

技术摘要

TS

技术摘要

主要协调作者：

Thomas F. Stocker (瑞士)、秦大河 (中国)、Gian-Kasper Plattner (瑞士)

主要作者：

Lisa V. Alexander (澳大利亚)、Simon K. Allen (瑞士/新西兰)、Nathaniel L. Bindoff (澳大利亚)、François-Marie Bréon (法国)、John A. Church (澳大利亚)、Ulrich Cubasch (德国)、Seita Emori (日本)、Piers Forster (英国)、Pierre Friedlingstein (英国/比利时)、Nathan Gillett (加拿大)、Jonathan M. Gregory (英国)、Dennis L. Hartmann (美国)、Eystein Jansen (挪威)、Ben Kirtman (美国)、Reto Knutti (瑞士)、Krishna Kumar Kanikicharla (印度)、Peter Lemke (德国)、Jochem Marotzke (德国)、Valérie Masson-Delmotte (法国)、Gerald A. Meehl (美国)、Igor I. Mokhov (俄罗斯联邦)、朴世龙 (中国)、Venkatachalam Ramaswamy (美国)、David Randall (美国)、Monika Rhein (德国)、Maisa Rojas (智利)、Christopher Sabine (美国)、Drew Shindell (美国)、Lynne D. Talley (美国)、David G. Vaughan (英国)、谢尚平 (美国)

贡献作者：

Myles R. Allen (英国)、Olivier Boucher (法国)、Don Chambers (美国)、Jens Hesselbjerg Christensen (丹麦)、Philippe Ciais (法国)、Peter U. Clark (美国)、Matthew Collins (英国)、Josefino C. Comiso (美国)、Viviane Vasconcellos de Menezes (澳大利亚/巴西)、Richard A. Feely (美国)、Thierry Fichefet (比利时)、Gregory Flato (加拿大)、Jesús Fidel González Rouco (西班牙)、Ed Hawkins (英国)、Paul J. Hezel (比利时/美国)、Gregory C. Johnson (美国)、Simon A. Josey (英国)、Georg Kaser (奥地利/意大利)、Albert M.G. Klein Tank (荷兰)、Janina Körper (德国)、Gunnar Myhre (挪威)、Timothy Osborn (英国)、Scott B. Power (澳大利亚)、Stephen R. Rintoul (澳大利亚)、Joeri Rogelj (瑞士/比利时)、Matilde Rusticucci (阿根廷)、Michael Schulz (德国)、Jan Sedláček (瑞士)、Peter A. Stott (英国)、Rowan Sutton (英国)、Peter W. Thorne (美国/挪威/英国)、Donald Wuebbles (美国)

编审：

Sylvie Joussaume (法国)、Joyce Penner (美国)、Fredolin Tangang (马来西亚)

应按照以下方式引用本技术摘要：

Stocker, T.F., 秦大河, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, 朴世龙, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan 和谢尚平, 2013: 技术摘要。参与：政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第一工作组的报告：气候变化 2013：自然科学基础。[Stocker, T.F., 秦大河, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex 和 P.M. Midgley (编辑)]。英国, 剑桥, 剑桥大学出版社和美国, 纽约。

目录

TS.1 引言	35
文框TS.1 对不确定性的处理	36
TS.2 气候系统变化观测	37
TS.2.1 引言	37
TS.2.2 温度变化	37
TS.2.3 能量收支与热含量的变化	39
TS.2.4 环流和变率模式的变化	39
TS.2.5 水循环和冰冻圈的变化	40
TS.2.6 海平面变化	46
TS.2.7 极值变化	46
TS.2.8 碳与其它生物地球化学循环的变化	50
TS.3 气候变化的驱动因子	53
TS.3.1 引言	53
TS.3.2 温室气体的辐射强迫	53
文框TS.2 辐射强迫与有效辐射强迫	53
TS.3.3 人为气溶胶的辐射强迫	55
TS.3.4 地表变化和凝结尾流的辐射强迫	55
TS.3.5 气候变化自然驱动因子的辐射强迫	56
TS.3.6 强迫综述：时空演变	56
TS.3.7 气候反馈	58
TS.3.8 排放度量标准	58
TS.4 认知气候系统及其近期变化	60
TS.4.1 引言	60
TS.4.2 表面温度	60
文框TS.3 气候模式和过去十五年	
全球平均表面升温的中断	61
TS.4.3 大气温度	66
TS.4.4 海洋	68
TS.4.5 冰冻圈	69
TS.4.6 水循环	72
TS.4.7 极端气候	72
TS.4.8 从全球到区域	73
文框TS.4 模式评价	75
文框TS.5 古气候	77
TS.5 全球和区域气候变化预估	79
TS.5.1 引言	79
TS.5.2 未来强迫与情景	79
文框TS.6 新典型浓度路径情景与耦合模式	
比对项目第5阶段模式	79
TS.5.3 气候系统响应的量化	81
TS.5.4 近期气候变化	85
TS.5.5 长期气候变化	89
TS.5.6 碳循环和其它生物地球化学循环的长期预估	93
文框TS.7 气候地球工程方法	98
TS.5.7 海平面变化的长期预估	98
TS.5.8 气候现象与区域气候变化	105
TS.6 关键不确定性	114
TS.6.1 气候系统变化观测中的关键不确定性	114
TS.6.2 气候变化驱动因子中的关键不确定性	114
TS.6.3 认识气候系统及其最近变化方面的关键不确定性	114
TS.6.4 全球和区域气候变化预估中的关键不确定性	115
专题要素	
TFE.1 水循环变化	42
TFE.2 海平面变化：科学认知和不确定性	47
TFE.3 IPCC以往评估报告的预估与观测的比较	64
TFE.4 全球气候系统不断变化的能量收支	67
TFE.5 不可逆性与突变	70
TFE.6 气候敏感性与反馈	82
TFE.7 碳循环扰动与不确定性	96
TFE.8 气候目标与稳定性	102
TFE.9 极端气候	109
补充材料	
补充材料见本报告的在线版。	

TS.1 引言

《气候变化2013：自然科学基础》是政府间气候变化专门委员会(IPCC)《第五次评估报告》(AR5)第一工作组(WG1)的报告。这份关于气候变化自然科学方面的综合评估报告把重点放在与了解过去的气候变化、记录当前的气候变化以及预估未来的气候变化相关的要素上。本评估报告建立在IPCC《第四次评估报告》(AR4)¹和最近的《管理极端事件和灾害推进气候变化适应特别报告》(SREX)²的基础上，共有14章和3个附件。各章涵盖了对气候系统所有组成部分变化的直接观测和代用观测资料；评估了当前有关气候系统各组成部分的内部过程以及各部分之间相互作用的知识，通过评估确定了气候系统对强迫变化的敏感性和响应；并量化了大气成分变化之间的联系、辐射强迫(RF)³，以及后续的气候变化探测和归因。对于气候系统所有组成部分中变化的预估基于一套新情景强迫下的模式模拟。本报告还用了一整章篇幅对过去和未来的海平面变化作了全面评估。区域气候变化信息以全球和区域气候预估图集形式呈现(附件1)。本报告还有两个附件作补充，即附件2：气候系统情景表和附件3：术语表。

本技术摘要(TS)的主要目的是把主报告14章中提出的多条独立证据链的完整评估与第一工作组《决策者摘要》(SPM)中高度概括的摘要联系起来。因此，读者若希望获得本评估报告所涵盖的更具体专题的完整信息，本技术摘要可作为一个切入点。各章节中加入了一些供查阅完整评估出处的提示，以有助于达到上述目的。与政策相关的专题在多个章节相互交叉参引并涉及气候系统中许多相互关联的过程，在此以“专题要素”(TFE)呈现，以便快速查阅这些信息。

本报告中一个不可或缺的组成部分是使用不确定性语言，使本评估报告可追根溯源(文框TS.1)。本评估报告根据作者团队对基础科学认知的评估给出了各重要发现的确定性程度，并按信度水平表述，而信度水平则源于证据的类型、数量、质量和一致性以及所考虑的科学研究的一

致性水平⁴。信度以定性方式表述。对某项发现的不确定性的量化度量用概率表示，并以观测和(或)模式结果的统计分析结合专家判断的结合体为基础。在适用情况下，报告还采用事实陈述表述某些发现，而没有使用不确定性限定词(详见第1章和文框TS.1)。

沿袭《第五次评估报告》第一工作组报告的情节，本技术摘要分四个主要部分陈述了评估结果：TS.2节涵盖了对气候系统变化观测的评估；TS.3节概括了不同自然和人为驱动因子(用辐射强迫表述)的信息；TS.4节介绍了对观测到的气候变化量化认识的评估；TS.5节总结了整个21世纪乃至更长时期从区域到全球尺度的气候变化预估的评估结果。TS.6节合并列出了从TS.2节到TS.5节中第一工作组评估报告的关键不确定性。全部9个专题要素与《第五次评估报告》第一工作组报告各部分相互交叉参引，并贯穿技术摘要的四个主要部分，外观上与正文不同，并可单独阅读。

本技术摘要中实质性段落的依据可查阅基础报告的相关章节。在大括号中给出了索引。

1. IPCC, 2007: 《气候变化2007：自然科学基础》。政府间气候变化专门委员会《第四次评估报告》第一工作组的报告[Solomon, S.、秦大河、M. Manning、陈振林、M. Marquis、K.B. Averyt、M. Tignor 和 H.L. Miller (编辑)]。英国剑桥，剑桥大学出版社和美国纽约，996页。
2. IPCC, 2012: 《管理极端事件和灾害风险，推进气候变化适应特别报告》。政府间气候变化专门委员会第一和第二工作组的特别报告[Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, 秦大河, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor 和 P.M. Midgley (编辑)]。英国剑桥，剑桥大学出版社和美国纽约，582页。
3. 辐射强迫(RF) 衡量地球系统能量平衡对某种外部扰动作出响应的净变化，以瓦/每平方米(W m⁻²)为单位表示；见文框TS.2。
4. Mastrandrea, M.D., C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe, 和 F.W. Zwiers, 2010: 《IPCC第五次评估报告主要作者关于不确定性一致性处理的指导说明》。政府间气候变化专门委员会(IPCC)。

文框TS.1 | 对不确定性的处理

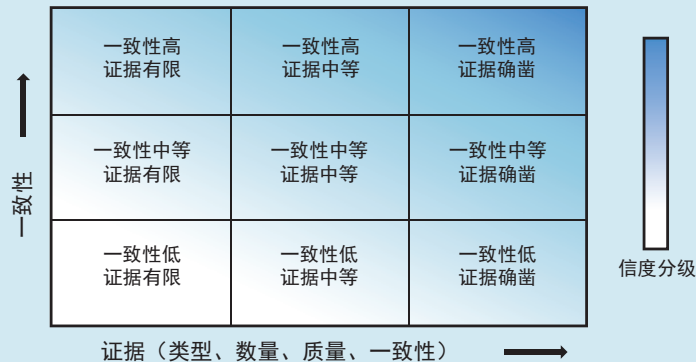
根据《IPCC第五次评估报告主要作者关于不确定性一致性处理的指导说明》，第一工作组的《技术摘要》和《决策者摘要》依靠两种度量标准表达重要发现中的确定性程度，这是基于作者团队对基础科学认知认知作出的评价：

- 根据证据的类型、数量、质量和一致性（如机理认知、理论、资料、模式、专家判断）以及一致性程度，对某项发现有效性的信度。信度以定性方式表述。
- 对某项发现的不确定性进行量化衡量，并用概率表示（基于对观测资料或模式结果的统计分析或专家判断）。

上述AR5指导说明对支持IPCC第三次和第四次评估报告的指南作了细化。对本报告中各项发现的不确定性评估很难与AR4和SREX中的不确定性评估进行直接比较，因为（此次评估）采用了修订后的不确定性指导说明，并涵盖了新信息，提高了科学认知认知，对数据和模式开展了不间断分析，况且在评估研究中采用的方法存在具体差异。对于某些气候变量，已对不同方面作了评估，因此不适合直接比较。

每项主要发现均是基于作者团队对相关证据和一致性的评价。如同按证据评价和一致性作出判定那样，信度衡量标准为作者团队对某一发现的有效性作出判断提供了一个定性综合方法。如果不确定性能够以概率量化，作者团队则能够利用核定的可能性语言或更精确的概率描述某一发现的特征。除非另有说明，高信度或很高信度则与作者团队将某个可能性术语赋予某些发现有关。

下列简略术语用于描述现有证据：有限、中等或确凿；以及一致性程度：低、中等或高。信度水平用五个限定词表示：很低、低、中等、高和很高，均采用斜体字，例如中等信度。文框TS.1，图1对证据和一致性及其与信度的关系作了简要陈述。在此关系中存在灵活性；对于某个给定的证据和一致性陈述，可赋予不同的信度水平，但证据水平和一致性程度的提高与信度的提高相关联。



文框TS.1，图 1 | 证据和一致性说明及其与信度的关系。随着向右上角抬升阴影渐强，信度也相应提高。一般情况下，当有多条一致独立的高质量证据链时，证据最为确凿。{图1.11}

使用下列术语来表示评估的可能性，均采用斜体字：

术语*	结果的可能性
几乎确定	99-100%概率
很可能	90-100%概率
可能	66-100%概率
或许可能	33-66%概率
不可能	0-33%概率
很不可能	0-10%概率
几乎不可能	0-1%概率

* 其它术语（极有可能：概率为95-100%，多半可能：概率大于50-100%，极不可能：概率为0-5%）也许会酌情使用。

TS.2 气候系统变化观测

TS.2.1 引言

气候系统变化观测基于直接的物理和生物地球化学测量，以及来自地面站和卫星的遥感手段；来自古气候档案的信息提供了一个长期背景。全球观测的器测时代始于19世纪中叶，古气候重建可使一些记录追溯至几百年乃至几百万年前。这些信息汇总起来，提供了有关大气、海洋、冰冻圈和地表的变率和长期变化的综合观点。

本节总结了对气候变化观测证据的评估。自AR4以来，有关大气、地表、海洋和冰冻圈观测资料集的可提供性、获取性、质量和分析取得了实质性的进展。气候系统的许多方面显示出气候变化的证据。{2, 3, 4, 5, 6, 13}

TS.2.2 温度变化

TS.2.2.1 地球表面

可以确定的是，自19世纪后期以来，全球平均表面温度(GMST)已经升高(图TS.1和TS.2)。过去三个十年的地表已连续暖于器测记录中的任何前一个十年，2000-2010年是最暖的十年。全球平均陆地和海洋温度的线性趋势计算结果⁵表明，在存在多套独立制作的资料集的1880-2012年间，温度升高了0.85[0.65至1.06]°C⁶，在1901-2012年间升高了约0.89[0.69至1.08]°C，在1951-2012年间(基于多套独立制作的资料集)0.72[0.49至0.89]°C。基于哈得莱中心/气候研究室格点表面温度资料集4(Had-CRUT4)，以及三个独立制作的资料集中记录最长的全球平均表面温度资料集，1850-1900年间和2003-2012年间的平均温度之间的总升温幅度为0.78 [0.72至0.85]°C。根据HadCRUT4的计算结果及其不确定性估值，从1850-1900年到1986-2005年的升温幅度(模拟章节和图集的参考期见附件1)为0.61[0.55至0.67]°C。此外，*几乎确定*的是，自1950年以来全球陆地的最高和最低温度已升高。⁷ {2.4.1, 2.4.3; 第2章补充材料 2.SM.3节}

虽然多年代际升温的证据确凿，但在升温速率方面仍然存在很大年际至年代际变率，其中有些时期显

示出较弱趋势(包括自1998年以来出现的变暖中断)(图TS.1)。过去15年间的升温速率(1998-2012年; 每十年0.05[-0.05至+0.15]°C)小于1951年以来的升温速率(1951-2012年; 每十年0.12 [0.08至0.14]°C)。短期趋势是不确定的，而且对于开始和结束年份非常敏感。例如，从1995年、1996年和1997年开始的三个15年期的趋势分别为每十年温度升高0.13 [0.02至0.24]°C、0.14 [0.03至0.24]°C和0.07 [-0.02至0.18]°C。一些根据台站观测资料对全球和区域表面温度独立分析的资料记录普遍认为表面温度已经升高。海表温度(SST)亦已升高。对通过不同测量方法获取的新SST资料记录(包括卫星资料)的相互比对已使人们能够更好地认识记录中的误差和偏差。{2.4.1-2.4.3; 文框9.2}

与已报告的趋势相比，任何未订正的城市热岛效应和土地利用变化效应*不可能*将估算的全球百年平均表面温度趋势提高10%以上。这是一个平均值；在某些地区，快速发展的城市热岛和土地利用变化对区域趋势的影响也许大得多。{2.4.1}

具有*高信度*的是，自20世纪以来的年平均地表升温扭转了北半球(NH)中高纬度地区过去五千年来的长期降温趋势。至于北半球年平均温度，1983-2012年间*很可能*是过去800年来最暖的30年(*高信度*)，也*可能是*过去1400年来最暖的30年(*中等信度*)。支持证据包括器测温度与多种代用资料和统计方法的多项重建的比较，并与AR4一致。大陆尺度的表面温度重建表明：具有*高信度*的是，在中世纪气候异常期(950至1250年)中的多个年代内，一些区域的温暖程度与20世纪中期相当，而其它区域的温暖程度与20世纪后期相当。具有*高信度*的是，这些区域性暖期并没有像20世纪中期以来变暖那样出现区域一致性。基于重建和模拟之间的比较，具有*高信度*的是，不仅外部轨道、太阳和火山强迫，而且内部变率均为中世纪气候异常期与小冰期(1450-1850年)之间表面温度变化的空间型态和发生时间做出了很大贡献。{5.3.5, 5.5.1}

TS.2.2.2 对流层和平流层

基于对无线电探空仪和卫星传感器测量资料的多项

⁵ 基于哈得莱中心/气候研究室格点表面温度资料集4(HadCRUT4)、陆地-海洋表面温度合并分析(MLOST)以及戈达德太空研究所表面温度分析(GISTEMP)资料集计算的线性趋势估值，变暖值按不加权平均值报告(见图TS.2; 2.4.3节)。

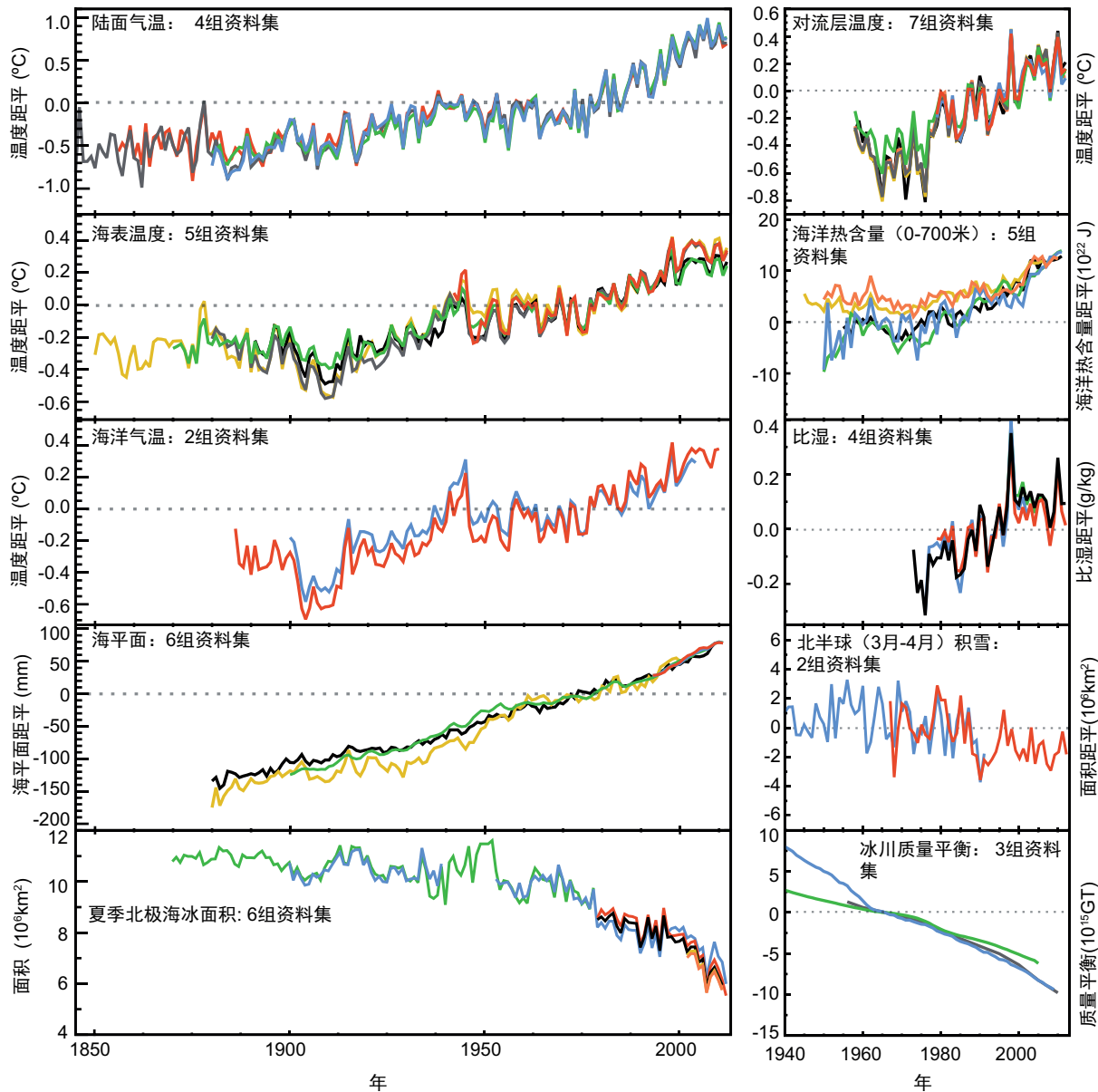
⁶ 在AR5第一工作组报告中，除非另有说明，不确定性用90%不确定性区间进行量化。方括号中给出的90%预计不确定性区间有90%的可能性涵盖了所估算的值。不确定性区间上端点有95%的可能性会超过所估算的值，而下端点小于该值的可能性也是95%。只要可能，则给出该值的最佳估值。不确定性区间与相应最佳估值之间不一定是对称关系。

⁷ 在AR4中也采用了本段中用于计算温度变化的两种方法。第一种方法利用1880-2012年间所有点的最佳拟合线性趋势计算温度变化。第二种方法计算两个时期，如1850-1900年和2003-2012年的平均温度差。因此，这两种方法得出的值及其90%不确定性区间不具有直接可比性。

独立分析，几乎确定的是，自20世纪中叶以来，全球对流层已变暖而平流层已变冷(图TS.1)。虽然趋势迹象趋于一致，但对于温度变化速率，各项现有估值之间仍然存在重大差异，特别是在无线电探空仪能够获得较好采样的北半球温带对流层之外。因此，北半球温带对流层的变化速率及其垂直结构仅为中等信度，而其它地方为低信度。
{2.4.4}

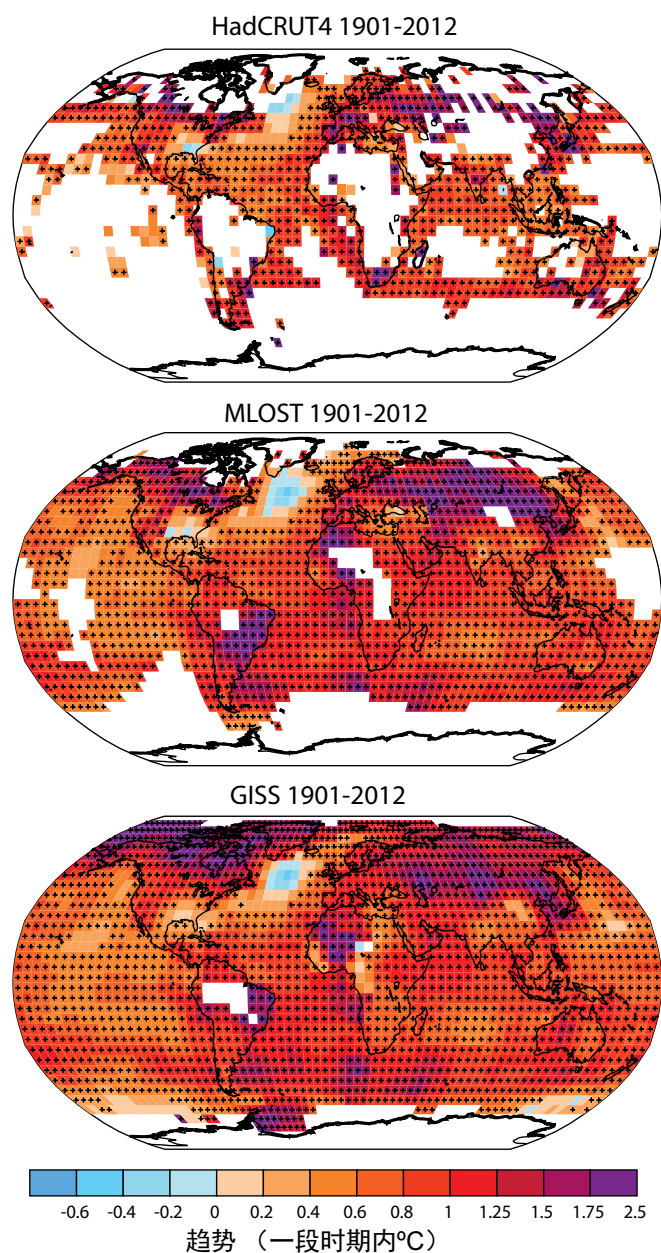
TS.2.2.3 海洋

几乎确定的是，从1971-2010年，海洋上层(700米以上)已变暖，而且可能从19世纪70年代至1971年间已变暖(图TS.1)。确定性较低的是1971年之前的变化，这是因为在较早时期采样相对稀疏。自AR4以来，已确定海洋上层历史测量资料的器测偏差减少，其中减少了温度和海洋上层热含量的人为年际变化，在20世纪70年代和80年代最为突出。{3.2.1-3.2.3, 3.5.3}



图TS.1 | 多项全球气候变化的互补性指标。每条线代表的是独立推导的气候要素变化的估值。此图给出的时间序列在第2、3和4章中作了评估。在每个图框中，所有资料集都统一为相同的记录期。每个图框中包括的资料集来源的完整详细信息在第2章补充材料2.SM.5节以及在相应章节中给出。关于图SPM.3的更多信息见TS补充材料。{FAQ 2.1, 图 1; 2.4, 2.5, 3.2, 3.7, 4.5.2, 4.5.3}

基于5年平均值, 1957-2009年间, 海洋在700-2000米深度之间可能已经变暖。1992-2005年间, 海洋从3000米至洋底可能已变暖, 虽然约在1992年至2005年间在2000和3000米深度之间未观测到全球平均温度存在显著趋势。在3000米以下, 在南大洋观测到了最大升温幅度。{3.2.4, 3.5.1; 图3.2b, 3.3; FAQ 3.1}



图TS.2 | 根据三个资料集的线性趋势确定的1901-2012年表面温度变化。白色区域表示不完整或资料缺失。趋势计算仅限于该时期前后10%时段内观测记录完整率超过70%并且资料可用率大于20%的格点框。黑色加号(+)表示格点框呈现显著趋势(即: 在90%的信度区间之外存在零趋势)。覆盖范围的差异主要反映资料集提供方针对资料空白区域开展的内插程度, 从不超出格点平均值(哈得莱中心/气候研究室格点表面温度资料集4(HadCRUT4))到插入相当大的值(戈达德太空研究所表面温度分析(GISTEMP))之间不等。关于相关的图SPM.1的详细信息见TS补充材料。{图2.21}

TS.2.3 能量收支与热含量的变化

至少从大约1970年以来, 地球辐射一直不平衡, 来自太阳的射入能量超过了从大气层顶外逸的能量。几乎确定的是, 1971年至2010年间地球获得了大量的能量。1971年到2010年间估算的能量清单增量为274[196至351] $\times 10^{21}$ J(高信度), 同期年度值线性拟合的加热率为213 $\times 10^{12}$ W(另见TFE.4)。{文框3.1, 文框13.1}

海洋变暖在总加热率中占主导地位, 各海洋深度全面升温占大约93%(高信度), 海洋上层(0-700米)的升温占大约64%。融冰(包括北极海冰、冰盖和冰川)以及大陆变暖各占总量的3%。大气升温占剩余的1%。1971-2010年间, 从同期资料线性拟合来看, 估算的海洋能量增益为199 $\times 10^{12}$ W, 相当于整个地球表面连续加热0.42 $W m^{-2}$, 也相当于由于整个海表区域的海洋升温, 海洋部分的加热为0.55 $W m^{-2}$ 。从1993年至2010年, 估算的地球能量增量为163 [127至201] $\times 10^{21}$ J, 其趋势估值为275 $\times 10^{15}$ W。对于1993-2010年趋势, 海洋部分为257 $\times 10^{12}$ W, 相当于进入海洋的平均热通量为0.71 $W m^{-2}$ 。{3.2.3, 3.2.4; 文框3.1}

或许可能是, 与1993-2002年相比, 2003-2010年间海洋上层0-700米热含量的增速较为缓慢(见图TS.1)。1993-2009年间, 在年际变率较小的700-2000米深处, 海洋热吸收可能继续增加。{3.2.3, 3.2.4; 文框9.2}

TS.2.4 环流和变率模态的变化

在很多情况下, 从年际到年代际时间尺度上的大变率阻碍了得出确凿的有关大气环流长期变化的结论。具有高信度的是, 从20世纪50年代到90年代北半球中纬度地区西风环流增强和北大西洋涛动(NAO)指数的增加, 以及从19世纪后期到20世纪90年代太平洋沃克环流的减弱, 已经在很大程度上被近期发生的变化所抵消。具有高信度的是, 自20世纪以来观测到的冬季NAO指数年代际和多个年代际变化是过去500年中前所未有的。{2.7.2, 2.7.5, 2.7.8, 5.4.2; 文框2.5; 表2.14}

自20世纪70年代, 环流可能已经朝极地方向位移, 使热带地区扩宽、风暴路径和急流朝极地方向位移、北部极涡收缩。北半球的证据更为确凿。南半球环状模(SAM)自20世纪50年代以来可能已变得更为正模态。在过去400年的背景下, 自1950年以来, 观测到的夏季SAM强度的增加已变得异常(中等信度)。{2.7.5, 2.7.6, 2.7.8, 5.4.2; 文框2.5; 表2.14}

来自高分辨率珊瑚记录的新结果证明，具有**高信度**的是，在过去**7000**年中，厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)系统一直具有高度可变性，而且没有明显证据显示ENSO出现轨道改变。{5.4.1}

最近的观测资料进一步证实了在从数年至数十年时间尺度上，主要海洋环流系统存在变率。自**1993**年以来，北太平洋和南太平洋亚热带涡流很可能已经扩大和加强。基于对不同纬度和不同时段完整的大西洋经向翻转环流(AMOC)及其各个组成部分的测量，并没有证据表明出现长期趋势。目前还没有证据显示在印度尼西亚贯通流、南极绕极流(ACC)输送中存在趋势，或者在大西洋和北欧海域之间的输送中存在趋势。然而，观测资料显示在**1950-2010**年间ACC向南转移了大约**1°**纬度(中等信度)。{3.6}

TS.2.5 水循环和冰冻圈的变化

TS.2.5.1 大气

全球陆地区域平均降水变化在**1951**年之前为**低信度**，而之后为**中等信度**，这是因为资料不足，特别是记录的早期(全球水循环观测和预测变化的概述见TFE.1)。此外，当使用重建方法涵盖了几乎所有的陆地地区，所产生的时间序列显示自**1901**年以来陆地降水的变化不大。北半球中纬度陆地地区确实显示降水量可能发生了整体增长(1951年之前是**中等信度**，但之后为**高信度**)。对于其它纬度地区平均长期正或负趋势均为**低信度**(TFE.1, 图1)。{2.5.1}

自**20**世纪**70**年代以来，全球近地表和对流层空气的比湿很可能已经增加了。然而，近些年来近地表湿润趋势已减弱(中等信度)(图TS.1)。因此，近年来观测到近地表的相对湿度普遍降低。{2.4.4, 2.5.5, 2.5.6}

虽然在某些区域各独立资料集之间的云量趋势具有一致性，但又十分模棱两可，因此在对全球尺度上云变率和趋势的观测仍为**低信度**。{2.5.7}

TS.2.5.2 海洋和海表通量

自**20**世纪**50**年代以来，区域趋势很可能已加大了海表盐度的平均地理差异：在蒸发为主的中纬度地区表层咸水的盐度增加，同时在降水为主的热带和极地地区相对低盐度表层水的盐度已更低。从**1950**年至**2008**年，高盐度地区与低盐度地区之间的平均对比度增加了**0.13**[**0.08**至**0.17**]。流域间淡水含量的差异很可能已经加大：大西洋的盐度增加，而太平洋和南大洋的盐度降低。虽然AR4也

作出了类似结论，但近期基于扩大的资料集和新分析方法的研究在本评估报告中提供了**高信度**。{3.3.2, 3.3.3, 3.9; FAQ 3.2}

盐度趋势的空间型态、平均盐度以及蒸发量减去降水量的平均分布都是相似的(TFE.1, 图1)。这些相似性提供了间接证据，表明自**20**世纪**50**年代以来，海洋上空蒸发量减去降水量的型态已增强(中等信度)。现有海表通量的不确定性限制了通量产品的可靠性，使其不能用于识别自**20**世纪**50**年代以来在观测到的盐度变化时间尺度上存在的区域或全球海洋蒸发或降水分布趋势。{3.3.2-3.3.4, 3.4.2, 3.4.3, 3.9; FAQ 3.2}

TS.2.5.3 海冰

AR4报告给出的趋势仍在持续，具有**很高信度**的是在**1979-2012**年间，北极海冰范围(年度、多年和常年)已经缩小(图TS.1)。年缩小率很可能为每十年**3.5%**到**4.1%**(每十年缩小**45**万至**51**万km²)。北极海冰每十年年均范围的平均缩小速度在夏季和秋季最快(高信度)，但自**1979**年以来每个季节和连续每个十年北极海冰范围均已缩小(高信度)。1979年至2012年间，北极常年性和多年海冰范围已缩小(很高信度)。夏季海冰范围最小时(常年冰)的速率很可能为每十年缩小**11.5** [9.4至13.6]% (每十年缩小**73**万至**107**万km²)，多年冰的减少速率很可能为每十年缩小**13.5**[**11**至**16**]%。根据资料重建，具有**中等信度**的是，当前(1980-2012年)北极夏季海冰范围退缩史无前例，北极海表温度至少在过去**1450**年中异常偏高。{4.2.2, 5.5.2}

1979-2012年间北极常年海冰表面年融化期可能每十年延长**5.7** [4.8至6.6]天。在此期间，在东西伯利亚海和西部波弗特海之间的区域，无冰状态的持续时间增加了近**3**个月。{4.2.2}

具有**高信度**的是，**1980**年和**2008**年间北极流域内冬季海冰平均厚度有所下降。平均降幅可能介于**1.3**米和**2.3**米之间。本评估报告给出的**高信度**基于多种来源的观测资料：潜艇、电磁探测和卫星测高；并且与多年和常年海冰范围缩小相一致。相比**2003-2008**年，**2010-2012**年间的卫星测量结果显示海冰体积缩小(中等信度)。具有**高信度**的是，北极海冰厚度下降，而海冰漂移速度增加。{4.2.2}

在**1979-2012**年间南极海冰范围很可能以每十年**1.2%**至**1.8%**(每十年**13**万至**20**万km²)的速度增加(很高信度)。由于浮冰群中开放水域的百分比下降，海冰范围有较大的扩大。具有**高信度**的是，这一速率存在很大的区域差异，有些区域在增加，有些区域在减小。南极周围也有

反差大的区域，在卫星观测期间有些区域无冰期延长了，而在其它区域却缩短了(高信度)。{4.2.3}

TS.2.5.4 冰川和冰盖

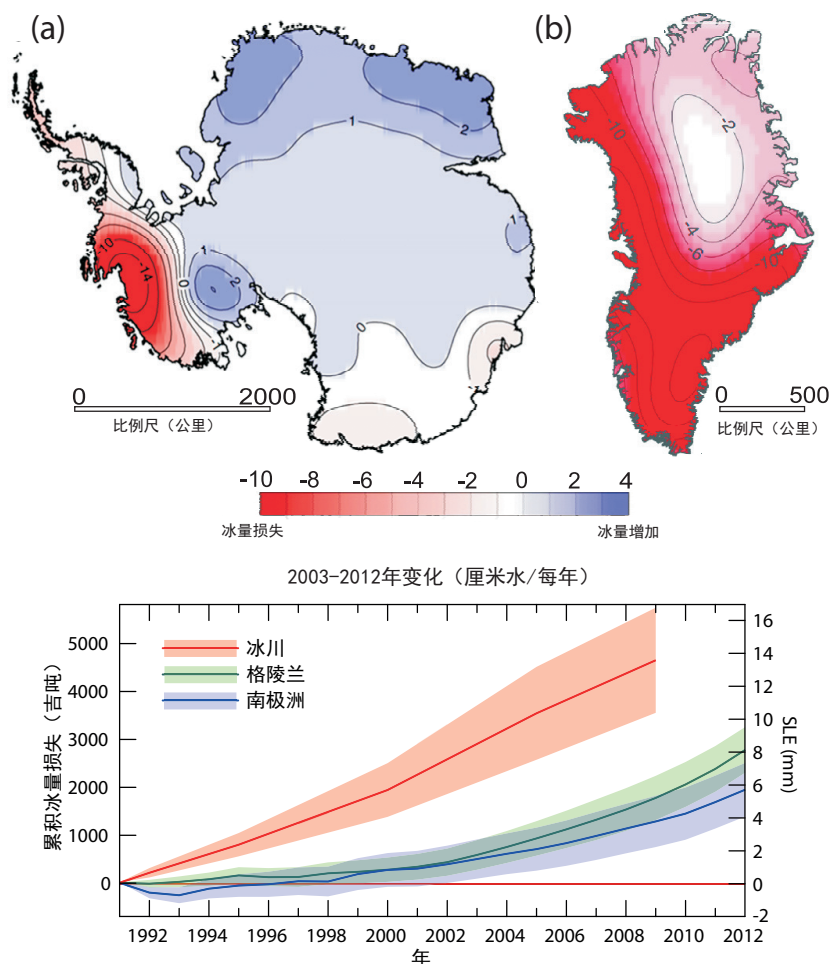
具有很高信度的是，正如测量到的冰川长度、面积、体积和冰量变化的时间序列所示(图TS.1和TS.3)，全球冰川持续退缩。在有限的区域和时间内有个别情况例外。自AR4以来，冰川变化测量资料的数量大幅增加。大多数新资料集以及完整的全球冰川清单均源自卫星遥感。{4.3.1, 4.3.3}

具有很高信度的是，过去十年间，全球冰川冰量损失最大的是位于阿拉斯加、加拿大北极地区、格陵兰冰盖的边缘、安第斯山脉南部和亚洲山脉的冰川。超过80%的总冰量损失来自这些地区。1971–2009年间，全世界冰川的总冰量损失(不包括冰盖外围的冰川)很可能是每年损

失226 [91至361] Gt(海平面当量，每年0.62 [0.25至0.99]毫米)，在1993–2009年间很可能是每年损失275[140至410]Gt(每年0.76[0.39至1.13]毫米)，在2005-2009年间很可能每年损失301[166至436]Gt(每年0.83[0.46至1.20]毫米)⁸。{4.3.3; 表4.4, 4.5}

具有高信度的是，在当前的气候条件下，目前冰川范围已失衡，表明即使温度没有进一步升高，未来冰川仍将继续退缩。{4.3.3}

具有很高信度的是，格陵兰冰盖的冰量在过去20年中已有损失。卫星和机载遥感以及实地资料都表明，具有高信度的是，该冰盖某些部分已出现冰量损失，且较大冰量损失率已蔓延至更广泛的区域，超过了AR4中报告的区域(图TS.3)。具有高信度的是，自1992年以来，格陵兰冰盖的冰量损失速度已经加快：平均速率很可能已从



图TS.3|(上)通过重力恢复和气候试验(GRACE)时间-变量重力确定的冰量损失分布图：(a)南极和(b)格陵兰，2003-2012年间每年水量以厘米为单位表示。(下)以物质(Gt)和海平面当量(毫米)评估冰川和冰盖总冰量损失。冰川的损失不包括冰盖边缘的冰川。{4.3.4; 图4.12-4.14, 4.16, 4.17, 4.25}

⁸ 每年100 Gt的冰量损失相当于每年约0.28 毫米海平面当量。

专题要素

TFE.1 | 水循环变化

水循环描述气候系统中存储在海洋、冰冻圈、陆地表面和大气中的水以液体、固体和水汽形式进行的持续运动。在大气中，水主要以气体、水汽形式存在，但在云中也可作为冰和液态水出现。海洋主要是液态水，但在极地地区海洋局部被冰覆盖。陆地水以液态形式出现，如地表水（湖泊，河流）、土壤水分和地下水。固态陆地水出现在冰盖、冰川、地表冰雪和多年冻土中。水在气候系统中的运动对于陆地上生命的存在至关重要，因为以降水的形式落到陆地、并补充土壤水分和河流的水以同等的量被海洋蒸发并由大气输往陆地。冬季以降雪形式落到地面的水可以在春季提供土壤水分，在夏季提供河流流量，对于自然和人类系统都是及其重要的。大气与海洋之间的淡水运动也能影响海洋盐度，也是海洋密度和环流的重要驱动因子。大气中水汽所含的潜热对于驱动从单个雷暴到全球大气环流等尺度的大气环流至关重要。{12.4.5; FAQ 3.2, FAQ 12.2}

水循环变化观测

由于空气中饱和水汽压随温度升高，预计空气中的水汽含量随气候变暖而增加。地面站、无线电探空仪、全球定位系统和卫星测量的观测资料表明对流层水汽在较大空间尺度上有所增加(TFE.1, 图1)。对流层比湿很可能自20世纪70年代以来已增加。过去40年间，观测到的对流层水汽大约有3.5%的全球变化强度与同期观测到的大约0.5°C的温度变化相一致，相对湿度一直保持大致恒定。具有中等信度的是，水蒸汽变化可归因于人类影响。{2.5.4, 10.3.2}

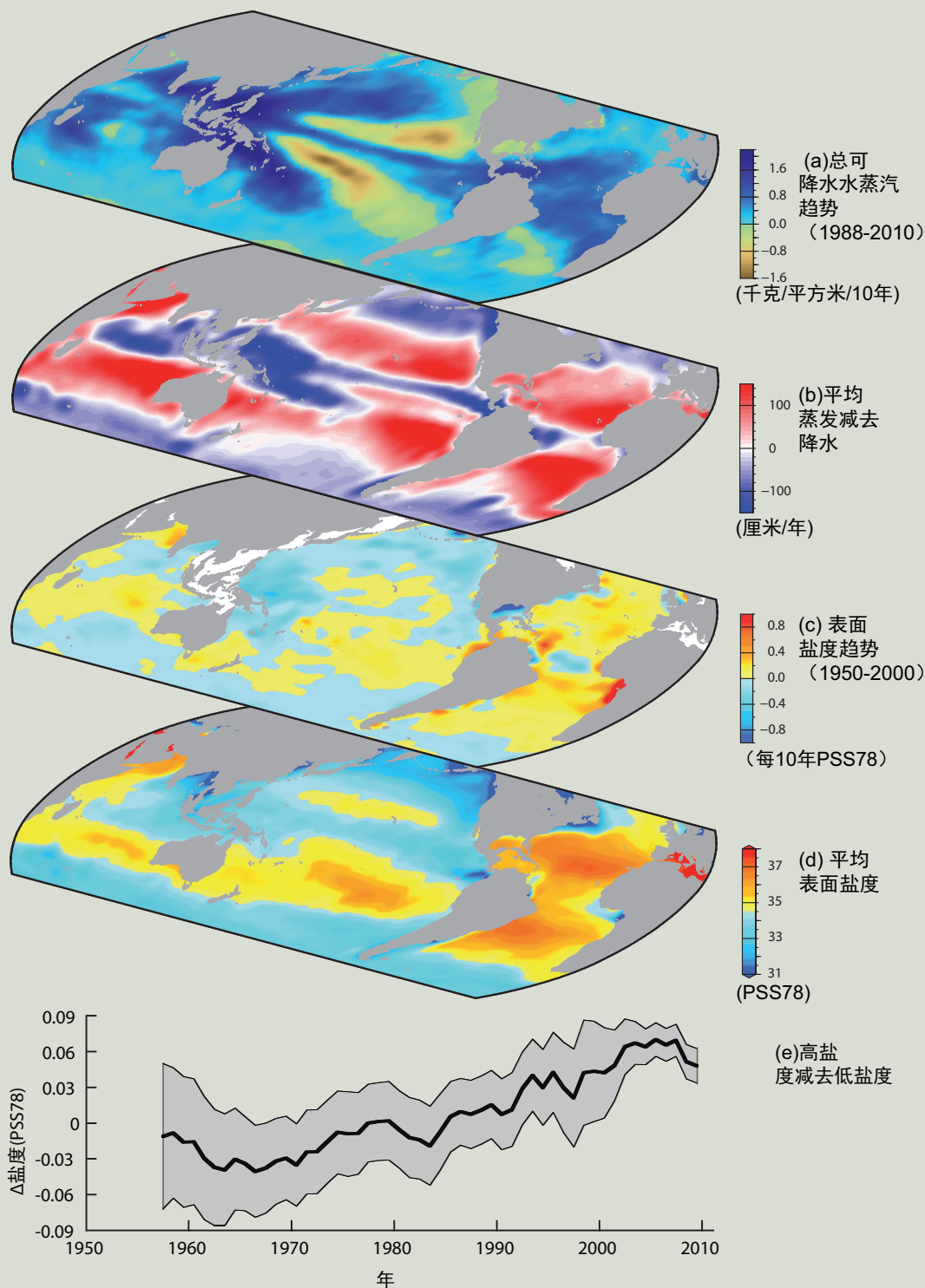
用现有的记录很难测量降水变化，原因有二：一是降水采样难度更大；二是预计随着气候变暖降水比空气中水汽含量变化更为微小。一些区域降水趋势似乎很确凿(TFE.1, 图2)，但当使用重建方法将几乎所有陆地面积都包括在内时，自1900年以来所产生的全球陆地平均降水量的时间序列均显示变化很小。当前，具有中等信度的是，人类对全球降水型态变化的影响显著，包括在北半球(NH)中高纬度地区有所增加。极端降水变化以及与水循环相关的其它气候极端事件在TFE.9中作了全面讨论。{2.5.1, 10.3.2}

虽然利用现有的记录难以衡量降水量和蒸发量的直接趋势，但观测到的海表盐度显示出显著的趋势，而盐度主要依赖于蒸发量和降水量之间差值(TFE.1, 图1)。自1950年以来盐度趋势的空间型态非常近似于平均盐度以及蒸发量减去降水量的平均分布：在蒸发量占主导地位的高盐度地区，其盐度进一步提高，而在降雨量占主导地位的低盐度地区，其盐度进一步降低(TFE.1, 图1)。这提供了间接证据，证明自20世纪50年代海洋上空蒸发量减去降水量的型态已加强(中等信度)。推断的蒸发量减去降水量的型态与观测到的变暖空气中水汽含量增加相一致。观测到的海表和次表层盐度的变化部分原因很可能是人为气候强迫所致。{2.5, 3.3.2-3.3.4, 3.4, 3.9, 10.4.2; FAQ 3.2}

对于所分析的大多数地区，在观测到冬季温度升高的地区降雪事件的数量可能在不断减少。卫星和实地观测资料显示，过去90年北半球积雪范围显著减少，主要减少发生在20世纪80年代。从1967年至2012年，积雪减少主要发生在六月，平均范围很可能减少了53%(40至66%)。从1922年至2012年，只有三月和四月的资料可用，资料显示很可能减少了7%(4.5至9.5%)。因为春季融雪提前，自1972/1973年以来冬季北半球雪季的持续时间每十年减少了5.3天。人为因素可能是自20世纪70年代以来观测到的积雪减少的原因。{4.5.2, 10.5.1, 10.5.3}

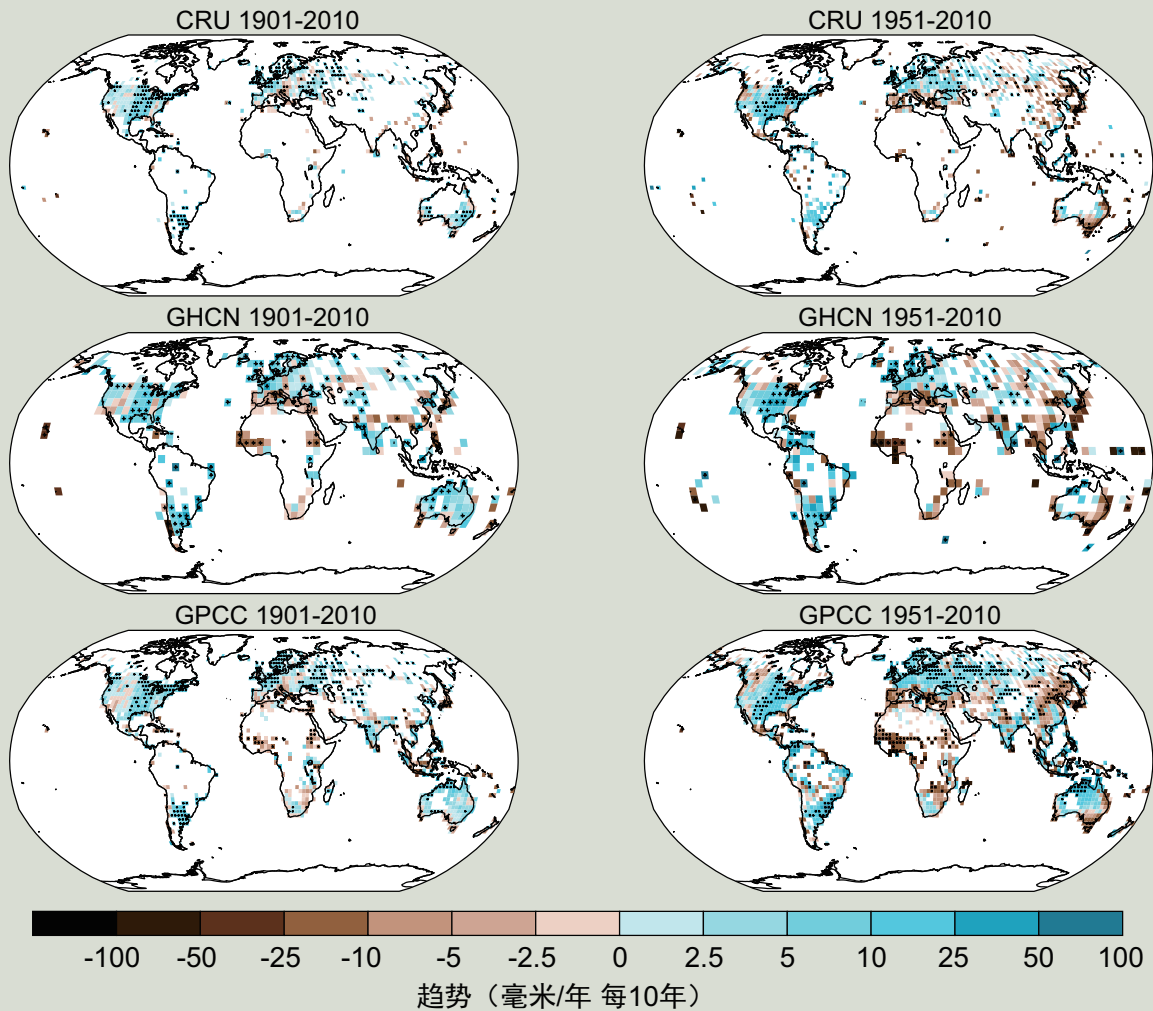
(接下页)

TFE.1 (续)



TFE.1, 图1 | 海表盐度变化与蒸发量减去降水量 (E-P) 的大气型态以及与总降水趋势相关: (a) 卫星观测给出的总降水量 (从地球表面至整个大气的水汽) (千克/米²/十年) 的线性趋势 (1988年至2010年)。 (b) 气象再分析资料给出的1979-2005年气候平均净蒸发量减去降水量 (厘米/年)。 (c) 海表盐度 (每50年实用盐度78 (PSS78)) 的趋势 (1950-2000年)。 (d) 气候平均海表盐度 (PSS78) (蓝色<35; 黄色-红色>35)。 (e) 按海表盐度高于全球平均海表盐度的海域平均的盐度 (“高盐度”) 与按平均盐度低于全球平均值的海域平均的盐度 (“低盐度”) 之间的全球差异。关于资料来源的详细信息见图3.21和FAQ3.2, 图1。 {3.9}

TFE.1 (续)



TFE.1, 图2 | 气候研究小组(CRU)、全球历史气候网(GHCN)和全球降水气候中心(GPCC)资料集给出的1901-2010年(左侧图)和1951-2010(右侧图)观测到的陆地降水变化分布图。仅针对第一个和最后一个十分位中超过完整记录70%和超过资料可用率20%的格点框计算了年累积值趋势。白色区域表示资料不完整或缺失。黑加号(+)表示趋势显著的格点框(即零趋势在90%信度区间之外)。有关图SPM.2的详细信息见TS补充材料。{图2.29; 2.5.1}

最近和最全面的河流径流分析并不支持IPCC《第四次评估报告》(AR4)关于20世纪全球径流有所增加的结论。新的研究结果也不再支持AR4关于自20世纪70年代以来全球干旱出现增加趋势的结论。{2.5.2, 2.6.2}

对未来变化的预估

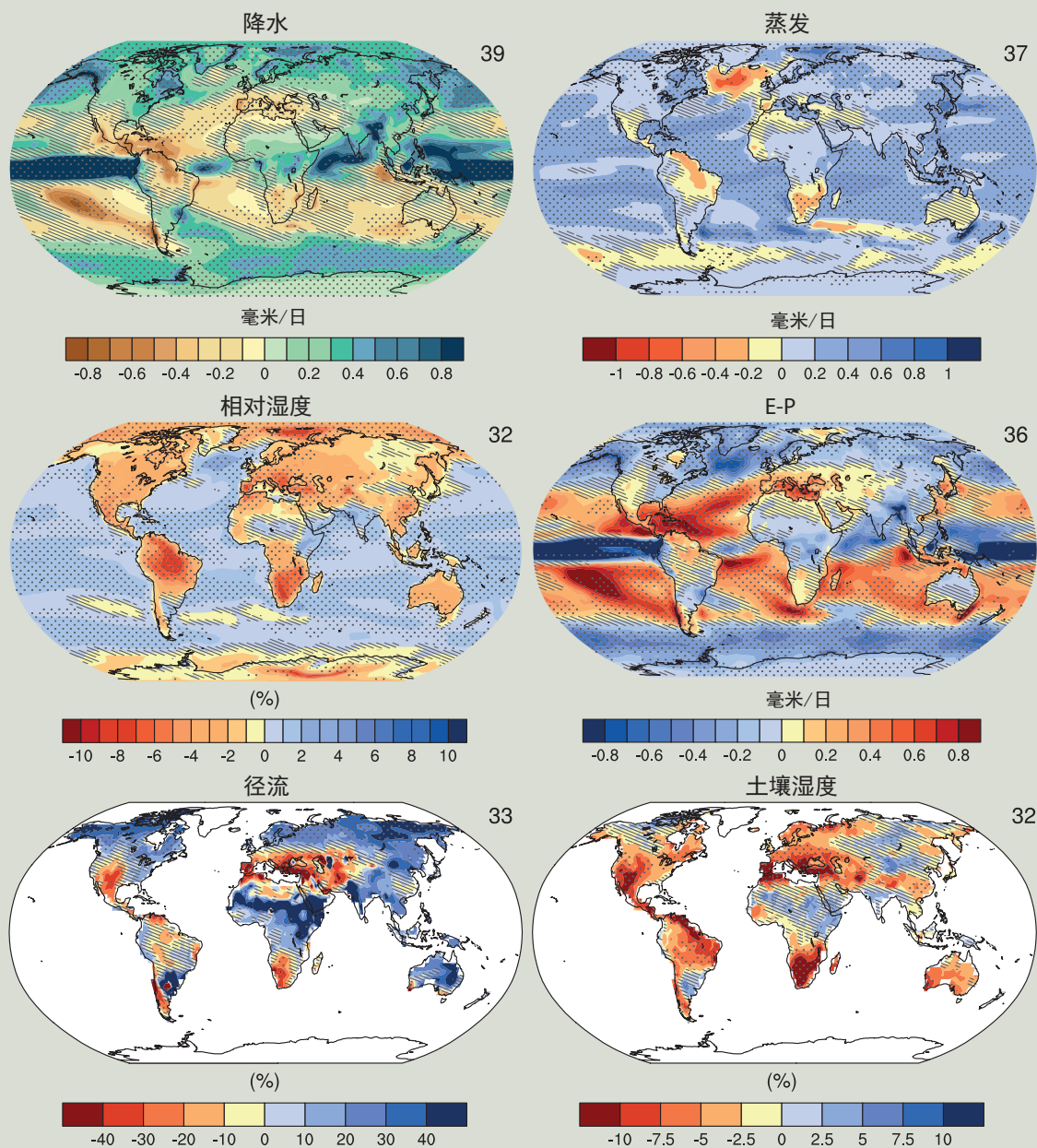
预估在不断升温的气候环境下水循环将发生变化(TFE.1, 图 3, 另见TS 4.6, TS 5.6, 附件1)。预估全球尺度降水在21世纪将逐渐增加。由于全球能量的限制, 预估降水量的增加(约 $2\%K^{-1}$)要比对流层低层水汽增加率(约 $7\%K^{-1}$)小得多。随着全球变暖, 平均降水量的变化不会是统一的, 有些区域会增加, 而其它一些区域会减少或者没有太大变化。由于对流层变暖能够承载更多的水汽, 高纬度陆地的降水量可能会有大幅增加。很多中纬度和亚热带干旱和半干旱地区的降水量可能会减少。预估欧亚大陆北部及北美地区冬季预估将出现最大的降水变化。{12.4.5, 附件1}

(接下页)

TFE.1 (续)

与水循环的其它方面相比，对区域至全球尺度上土壤水分和干旱的预估仍然不确定。尽管如此，地中海、美国西南部和南部非洲地区的干旱与预估的哈得莱环流变化一致，所以在典型浓度路径RCP8.5下温度升高了几度的情况下，随着全球温度升高这些区域可能会变得干燥。南欧和中东地区的径流可能减少。而在北半球高纬度地区径流可能增加，这与预估的该地区降水量增加相一致。{12.4.5}

年平均水文循环变化 (RCP8.5: 2031-2100)



TFE.1, 图3 | 在典型浓度路径RCP8.5下，相对于1986-2005年，2081-2100年降水量(P)、蒸发量(E)、相对湿度、E-P、径流和土壤水分的年平均变化(见文框TS.6)。用于计算多模式平均值的耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)模式的数值见每张图的右上角。影线部分表示多模式平均变化小于内部变量标准差的地区。点画部分表示多模式平均变化大于内部变量标准差且90%模式都符合变化符号的地区(见文框12.1)。{图12.25-12.27}

1992-2001年间每年34 [-6至74]Gt(海平面当量, 每年0.09 [-0.02至0.20]毫米。)增至2002-2011年间每年215[157至274]Gt。具有**高信度**的是, 格陵兰发生冰量损失的原因是冰面融化和径流增加, 以及溢出冰川流量的增加, 并且其流量类似。具有**高信度**的是, 在过去20年夏季融化面积已增加。{4.4.2, 4.4.3}

具有**高信度**的是, 南极冰盖在过去二十年冰量一直在损失(图TS.3)。具有**很高信度**的是, 这些冰量损失主要发生在南极半岛北部和南极西部的阿蒙森海区, 而具有**高信度**的是冰量损失是由于溢出冰川加速而导致的。南极冰量损失平均率**可能**从1992-2001年间的每年30[-37至97]Gt(海平面当量, 每年0.08[-0.10至0.27]毫米)增至2002-2011年间的每年增加147[72至221]Gt(每年0.40 [0.20至0.61]毫米)。{4.4.2, 4.4.3}

具有**高信度**的是, 在南极的部分地区浮动冰架正在发生大变化。具有**中等信度**的是, 在南极西部的阿蒙森海区冰架正在变薄, 而具有**低信度**的是, 这是由于高海洋热通量造成的。具有**高信度**的是, 几十年前南极半岛周围的冰架开始退缩和局部崩塌, 这种长期趋势仍在继续。{4.4.2, 4.4.5}

TS.2.5.5 积雪、淡水冰和冻土

具有**很高信度**的是, 北半球特别是春季积雪范围已经缩小(图TS.1)。卫星记录显示, 在1967-2012年间, 积雪范围**很可能**缩小了; 最大的变化, 即-53%[-40至-66%], 发生在六月。没有一个月出现统计意义上的显著增加。在较长的时期内, 1922-2012年间, 只有三月和四月的资料, 但这些资料显示**很可能**缩小了7% [4.5至9.5%], 并且与三月和四月40°N到60°N 陆地温度呈负相关(-0.76)。在南半球(SH), 证据很有限, 难以得出是否已经发生变化的结论。{4.5.2, 4.5.3}

自20世纪80年代初以来, 在全世界大多数地区多年冻土的温度已升高(**高信度**)。冻土温度升高是对大气温度升高以及对积雪时间和厚度变化的响应(**高信度**)。温度较低的多年冻土的温度升幅普遍比温度较高的多年冻土的温度升幅更大(**高信度**)。{4.7.2; 表4.8}

TS.2.6 海平面变化

造成海洋水体变化的主要原因是海水的膨胀, 因为海洋变暖并把当前存储在陆地(特别是冰川和冰盖)的水输送到海洋。水库和地下水的蓄水枯竭(及其后续流向海洋的径流)也会影响海平面。相对于陆地的海平面(相对海平面)的变化与全球平均海平面(GMSL)的差异显著, 这是由于海洋中水分布变化、陆地的垂直运动以及地球重力场

变化。关于近期(和预估的)海平面变化的科学认知及其相关不确定性的综述, 见TFE.2。{3.7.3, 13.1}

在上新世中期的暖期(3.3至3.0Ma), 当GMST比工业化时代前的气候高1.9°C至3.6°C, 而且二氧化碳(CO₂)水平为350-450ppm(**中等信度**)时, 具有**高信度**的是, GMSL高于目前水平, 这表明极地冰盖的冰量有所减少。根据各种方法得出的最佳估值显示, 具有**高信度**的是, 在上新世最暖时期, 虽然格陵兰岛、南极西部冰盖以及南极东部冰盖消融, 但海平面从未超过+20米。{5.6.1, 13.2}

具有**很高信度**的是, 末次间冰期(距今约12.9万年至11.6万年间)的几千年中, 全球平均海平面的最大值至少比当前高5米; 具有**高信度**的是, 那一时期的海平面没有高于当前的海平面10米, 这说明主要是格陵兰和南极冰盖的贡献。海平面的这种变化是在不同的轨道强迫、以及高纬度几千年平均的表面温度比目前至少高出2°C的背景下出现的(**高信度**)。基于冰盖模式模拟结果(与新的格陵兰冰芯结果得出的高度变化相一致), 格陵兰冰盖对海平面上升的贡献**可能**在1.4米到4.3米海平面当量之间, 这表明南极冰盖对末次间冰期的GMSL做出了贡献(**中等信度**)。{5.3.4, 5.6.2, 13.2.1}

海平面的代用资料和器测数据表明, 在19世纪末至20世纪初出现了海平面从过去两千年相对较低的平均上升速率向更高的上升速率的转变(**高信度**)。{3.7, 3.7.4, 5.6.3, 13.2}

基于1993年以来潮汐仪记录以及其它的卫星资料, 通过对1901-2010年间的线性趋势的估算, GMSL已上升了0.19[0.17至0.21]米。1901-2010年间海平面上升的平均速率**很可能**为每年1.7[1.5至1.9]毫米。1993年至2010年, 该速率**很可能**更高达每年3.2[2.8至3.6]毫米; 1920至1950年也**可能**出现类似的较高速率。GMSL的上升速率**可能**自20世纪初已增加, 各估值在每年0.000[-0.002至0.002]至0.013 [-0.007至0.019]毫米之间不等。{3.7, 5.6.3, 13.2}

TS.2.7 极值变化

TS.2.7.1 大气

近期关于极端事件的分析总体上支持AR4和SREX的结论(综述见TFE.9, 特别是TFE.9中的表1)。1951至2010年, 在全球尺度上, 冷昼和冷夜数**很可能**已减少, 而暖昼和暖夜数已增加。就全球而言, 具有**中等信度**的是, 自20世纪中叶以来, 暖期(包括热浪)长度和频率已经增加, 这主要是由于缺乏非洲和南美洲的资料或研究。然而, 此时期在欧洲、亚洲和澳大利亚的大部分地区, 热浪

专题要素

TFE.2 | 海平面变化：科学认知和不确定性

末次盛冰期之后，在几千年以前全球平均海平面(GMSL)已接近当前值。自那时以来，*几乎确定*的是，海平面上升的速率已从全新世后期的海平面变化低速率(每年0.1毫米)增至20世纪的速率(每年几毫米的量级，图TS.1)。{3.7, 5.6, 13.2}

海洋热膨胀和冰川物质损失是20世纪GMSL增加的主要原因(*高信度*)。海洋变暖*很可能*已对1971-2010年间每年上升0.8 [0.5至1.1]毫米的海平面变化做出了贡献，主要的贡献来自700米深的上层海洋。模式给出的1971-2010年海洋热膨胀平均速率接近观测值。{3.7, 13.3}

观测并结合了改进的分析方法表明，1971-2010年间，全球冰川(不包括格陵兰和南极外围冰川)对海平面的贡献为每年0.25毫米至0.99毫米海平面当量。用于冰川变化预估的全球冰川物质平衡模式具有*中等信度*，该信度源于对于冰川表面冰物质平衡基于过程的认知、冰川变化的观测与模式的一致性，以及大气-海洋环流模式(AOGCM)气候模拟可提供实际气候输入的证据。与使用AOGCM输入的模拟相比，使用观测到的气候资料的模拟结果显示20世纪30年代冰川物质损失的速率更大，可能是由于格陵兰地区的变暖期与未受强迫的区域气候变率有关。{4.3, 13.3}

观测显示，由于过去二十年表面融化和径流增多以及冰溢流增加，格陵兰冰盖*很可能*出现了冰物质净损失(图TS.3)。区域气候模式表明，从20世纪60年代至80年代格陵兰冰盖表面冰物质平衡没有显著的趋势，但是自20世纪90年代初以来融化和随之而来的径流不断增加。这种趋势与明显的区域变暖有关，这*可能*是因为近年来异常的区域变率和人为气候变化。对格陵兰未来变暖以及表面融化增加的预估具有*高信度*，这一信度的依据是各种模式在定性预估北半球高纬度地区升温幅度由于已知的物理原因而被放大的过程中具有一致性。{4.4, 13.3}

具有*高信度*的是，南极冰盖出现了净冰物质损失，并且它对海平面的贡献在过去二十年也*可能*已经增加了。自20世纪90年代观测到冰溢流加速，特别是在南极西部的阿蒙森海界。积累的年际变化很大，因此自1979年以来，当前模式或观测的累积都没有显著的趋势。表面融化目前在南极可忽略不计。{4.4, 13.3}

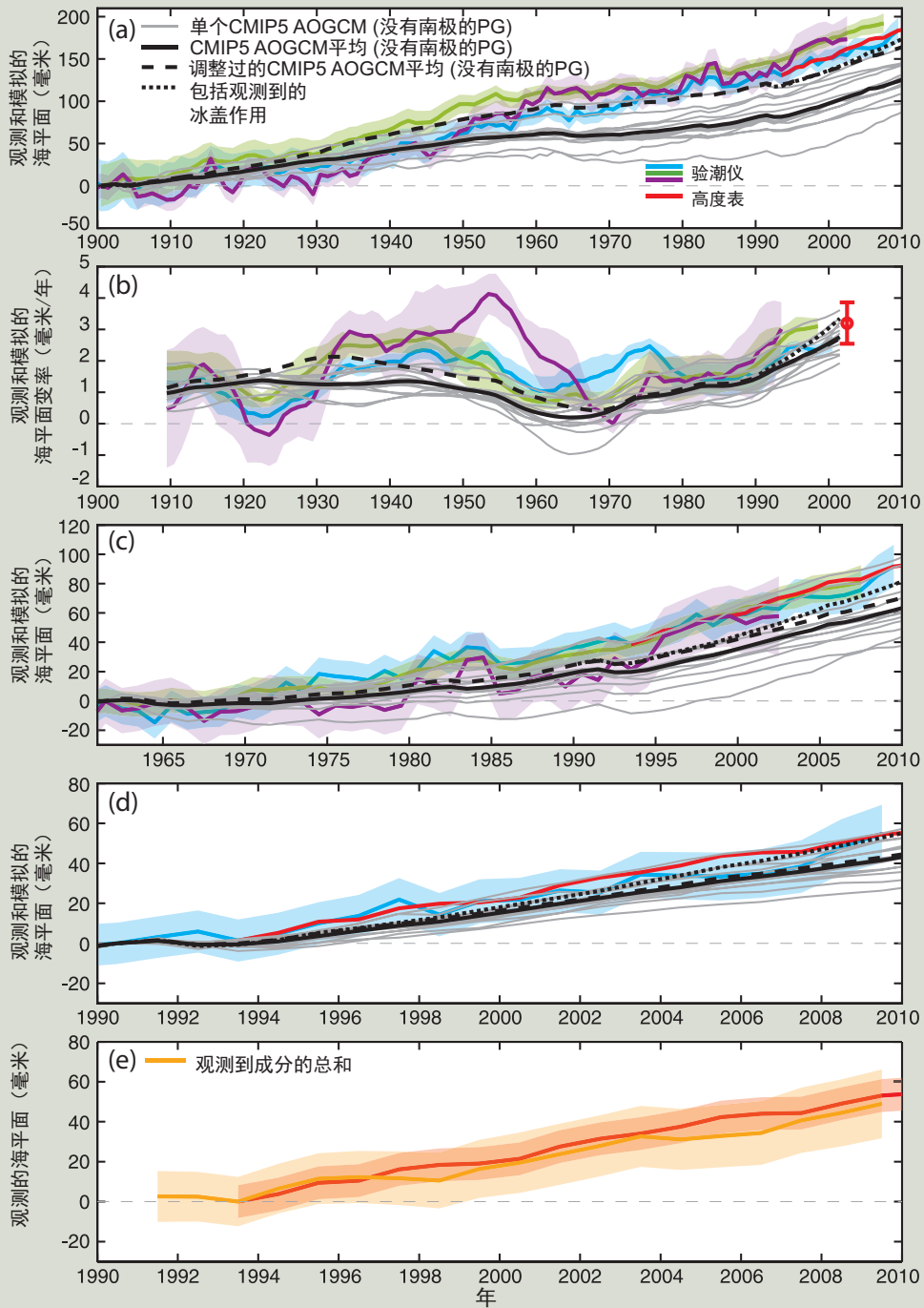
模式估值显示，与气候相关的陆地蓄水(如积雪、地表水、土壤水分和地下水)的变化在近几十年并没有对海平面变化产生长期重大贡献。然而，人类引起的变化(水库蓄水和地下水耗损)至少促使海平面每年变化了零点几毫米。在20世纪绝大多数时期水库蓄水量超过地下水耗损量，但是地下水损耗速度加快，现在超过了蓄水率。据估算，20世纪的水库蓄水和地下水加在一起的净贡献小。{13.3}

观测到的1993-2010年GMSL上升与根据观测估算的贡献之和相一致(TFE.2, 图1e)。在不确定性区间内，近段时期观测的收支闭合体现了自IPCC《第四次评估报告》以来在对过去GMSL变化原因的物理认识方面取得了显著的进展，并为这些贡献的模式的关键性评估提供了更好的基础，以评估所做预估的可靠性。{13.3}

模拟的海洋热膨胀和冰川贡献之和以及估算的陆地水储存量变化(相对较小)在1901-1990年间约占观测到的GMSL上升的65%，1971-2010年间和1993-2010年间占90%(TFE.2, 图1)。引入20世纪30年代冰盖的长期小贡献以及由于未受到强迫的气候变率造成冰川可能出现较大冰物质损失之后，模拟的贡献之和与观测到的上升值相近。增加了对自1993年来观测到的冰盖贡献，进一步提高了观测到与模拟的海平面上升之间的一致性(TFE.2, 图1)。相比之前的IPCC评估报告，现有的证据更清楚地解释了20世纪海平面变化的原因。{13.3}

(接下页)

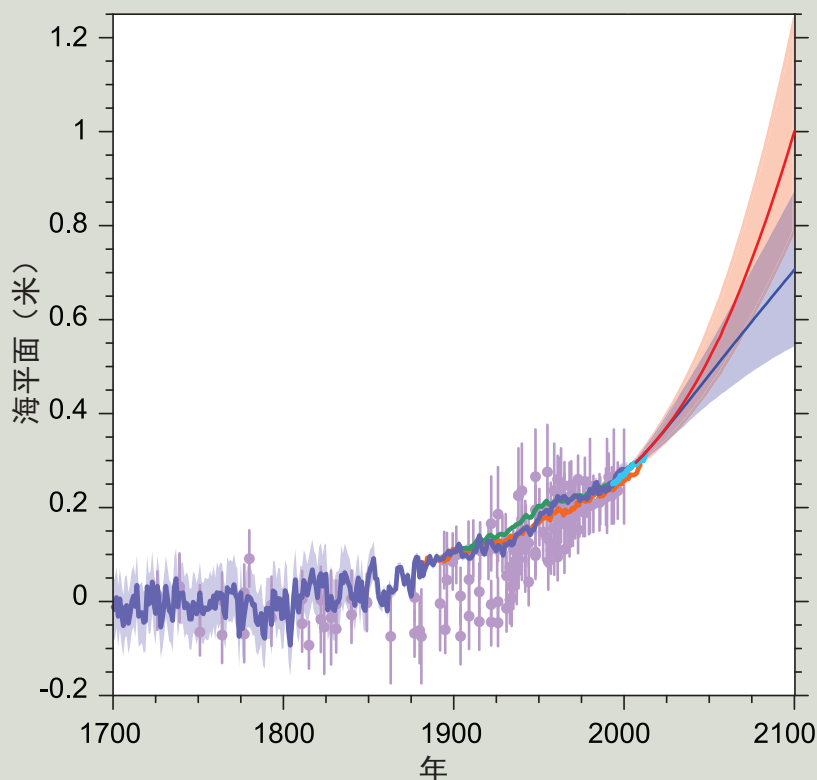
TFE.2 (续)



TFE.2, 图1 | (a) 观测到和模拟的1900至2010年间的海平面。(b) 同期海平面变化速率, 图中用红点表示根据卫星测高资料得出的速率。(c) 观测到和模拟的1961至2010年间的海平面。(d) 观测到和模拟的1900至2010年间的海平面。图(e) 将观测到的各种贡献(橙色)之和与卫星高度仪观测到的海平面(红色)进行比较。图中给出了不同来源的GMSL估值, 阴影区表示不确定性估值(两个标准差)。红色表示自1993年以来的卫星测高资料。图(a)至图(d)中的灰线表示模拟的海洋热膨胀和冰川(不包括南极冰盖外围冰川)贡献之和, 加上陆地水储量变化(见图13.4)。黑线表示灰线给出的平均值加上大气海洋环流模式(AOGCM)控制试验中省略的火山强迫的热膨胀订正值(见13.3.1节)。黑虚线(调整的模式平均值)表示订正的模式平均热膨胀、陆地水储量变化、使用观测到的(而不是模拟的)气候值给出的冰川估值(见图13.4)以及解释性冰盖长期贡献值(0.1毫米/年)之和。黑点线表示调整的模式平均值, 但目前包括观测到的从1993年开始的冰盖贡献值。因为观测到的冰盖估值包括了格陵兰和南极冰盖外围冰川(4.4节), 因而冰川对调整的模式平均值的贡献不包括外围冰川(PG), 以避免重复计算。{13.3; 图13.7}

TFE.2 (续)

若校准得当，近期改进的动力冰盖模式可再现观测到的单个冰川系统的冰盖溢流快速变化(如南极松岛冰川；中等信度)。但是，冰盖模式对全球变暖的响应，尤其是对冰盖-海洋相互作用的响应是不完整的，并且在过去的模式收支中省略冰盖模式(特别是动力过程)意味着冰盖模式没有像其它贡献那样得到审慎评估。{13.3, 13.4}



TFE.2, 图2古海平面数据(紫)、验潮站资料(蓝、红和绿)、测高仪资料(淡蓝)和中心估值，以及使用CMIP5和基于过程模式在RCP2.6(蓝)和RCP8.5(红)情景下综合计算的全球平均海平面上升预估可能区间汇编图，所有各值均相对于工业化时代前的值。{图13.3, 13.11, 13.27}

典型浓度路径(RCP)中2081-2100年GMSL上升的可能区间为5%-95%，这是耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)气候预估并结合计算其它贡献率的过程模式给出的区间(中等信度)，即0.26至0.55米(RCP2.6), 0.32至0.63米(RCP4.5), 0.33至0.63米(RCP6.0), 0.45至0.82米(RCP8.5)(RCP强迫见表TS.1和图TS.15)。在RCP8.5情景下，2100年的区间为0.52至0.98米。预估的可能区间的信度来自过程模式与观测和物理认知的一致性。据评估，目前还没有足够的证据可用于评估超过这一可能区间的特定水平的概率。根据当前的认识，只有南极大冰盖的海上部分崩塌后，才有可能使GMSL在21世纪的升幅大大超过这一可能区间。关于此类崩塌的概率缺乏共识，无法精确量化对GMSL上升做出的潜在额外贡献，但具有中等信度的是，在21世纪海平面上升不会超过几分米。几乎确定的是，2100年之后GMSL上升仍将持续。{13.5.1, 13.5.3}

许多半经验模式给出的GMSL上升预估值高于基于过程模式的预估值，但是科学界就其可靠性尚无共识，因此其预估具有低信度。{13.5.2, 13.5.3}

TFE.2, 图2综合了1700年以来海平面上升的古记录、验潮仪和测高观测资料以及预估到2100年GMSL的变化。{13.5, 13.7, 13.8}

发生的频率可能已经增加。{2.6.1; 表2.12, 2.13}

大约自1950年以来, 陆地强降水事件数量增多的地区可能比减少的地区要多。北美和欧洲的信度最高, 这些地区强降水的频率和强度可能均已增加, 但存在某些季节性和区域性差异。北美洲中部很可能已呈现朝着更强降水事件发展的趋势。{2.6.2; 表 2.13}

由于缺乏直接观测资料、推断趋势对指数选择的依赖性、以及趋势的地理不一致性, 在全球尺度观测到的干旱趋势(少雨)具有低信度。然而, 这掩盖了重要的区域变化以及, 举例来说, 自1950年以来地中海和西非的干旱频率和强度可能已增加, 而在北美中部和澳大利亚西北部可能降低了。{2.6.2; 表2.13}

具有高信度的是, 在过去一千年间, 许多地区的干旱强度和持续时间大于自20世纪初以来观测到的结果。具有中等信度的是, 相比中世纪气候异常期(950-1250年), 小冰期(1450-1850年)在亚洲季风季节发生了更多的特大干旱, 而干旱的中亚和南美季风地区出现了更潮湿的条件。{5.5.4, 5.5.5}

解释了以往观测能力变化的原因之后, 热带气旋活动的长期(百年)变化仍为低信度。然而, 自20世纪70年代以来的几十年, 几乎确定的是, 北大西洋风暴的频率和强度已有所增加, 虽然对其增加的原因仍有争议(见TFE.9)。上个世纪风暴强度的大尺度趋势具有低信度, 而且仍没有足够证据确定是否小尺度灾害性天气事件(如冰雹或雷暴)存在确凿的趋势。{2.6.2-2.6.4}

具有高信度的是, 自20世纪以来, 欧洲北部和中部、地中海西部地区和亚洲东部在过去五百年发生的洪水的规模比记录的更大。具有中等信度的是, 在近东、印度和北美中部, 现代大规模洪水在强度和/或频率上与历史记录差不多或者已经超越。{5.5.5}

TS.2.7.2 海洋

自1970年以来极高海平面事件的强度可能已经增加(见TFE.9, 表1)。大多数极端海平面上升能够用平均海平面上升来解释: 只要解释了平均海平面上升的原因, 94%的验潮仪显示极高海平面变化减少到每年不足5毫米。具有中等信度的是, 根据再分析强迫模式后报以及船舶观测结果, 在北纬45°北大西洋大部, 自20世纪50年代以来平均显著浪高已增加, 典型冬季趋势为每十年上升20厘米。{3.4.5, 3.7.5}

TS.2.8 碳与其它生物地球化学循环的变化

2011年, 大气温室气体(GHG)二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)的浓度均超过了过去80万年内冰芯记录的浓度区间。根据极地冰芯确定的过去大气GHG浓度的变化具有很高信度。自AR4以来, 这些记录已从65万年延至80万年。{5.2.2}

具有很高信度的是, 相对于过去2.2万年‘最高分辨率’冰芯记录, 当前大气中的CO₂、CH₄和N₂O浓度以及相关辐射强迫的增加是前所未有的。具有中等信度的是, 与过去80万年较低分辨率记录相比, 观测到的GHG上升变化速率也是前所未有的。{2.2.1, 5.2.2}

在以大气CO₂高浓度为特征的几个时期, 具有中等信度的是, 全球平均温度显著高于工业化时代前水平。在上新世中期(3.3至3.0Ma), 当时GMST比工业化时代前气候值高1.9°C至3.6°C(中等信度), 大气CO₂浓度为350ppm至450ppm(中等信度)。在始新世早期(52至48 Ma), 当时GMST比工业化时代前气候条件高9°C至14°C(中等信度), 大气CO₂浓度超过约1000 ppm。{5.3.1}

TS.2.8.1 二氧化碳

根据能源和燃料使用统计数据估算, 1750年至2011年间, 来自化石燃料燃烧和水泥生产的CO₂排放量为375[345至405]PgC⁹。2002-2011年间, 化石燃料和水泥生产的平均排放量为每年8.3[7.6至9.0]PgC(高信度), 其平均增长率为每年3.2%(图TS.4)。化石燃料排放量增长率高于20世纪90年代(每年1.0%)。2011年, 化石燃料排放量为9.5[8.7至10.3]PgC。{2.2.1, 6.3.1; 表6.1}

1750年至2011年间, 根据陆地覆盖资料和模拟结果计算的土地利用变化(主要是毁林)释放了180[100至260]PgC。2002年至2011年间, 土地利用变化的排放量以热带毁林为主, 据估算每年排放0.9[0.1至1.7]PgC(中等信度), 从20世纪90年代以来排放量可能有小幅下降, 因为这十年间报告的森林损失较低。这一估值包括因毁林造成的排放总量约为每年3 PgC, 一些区域的森林再植每年补偿了约2PgC, 主要是在荒废的农地上再造林。{6.3.2; 表6.2}

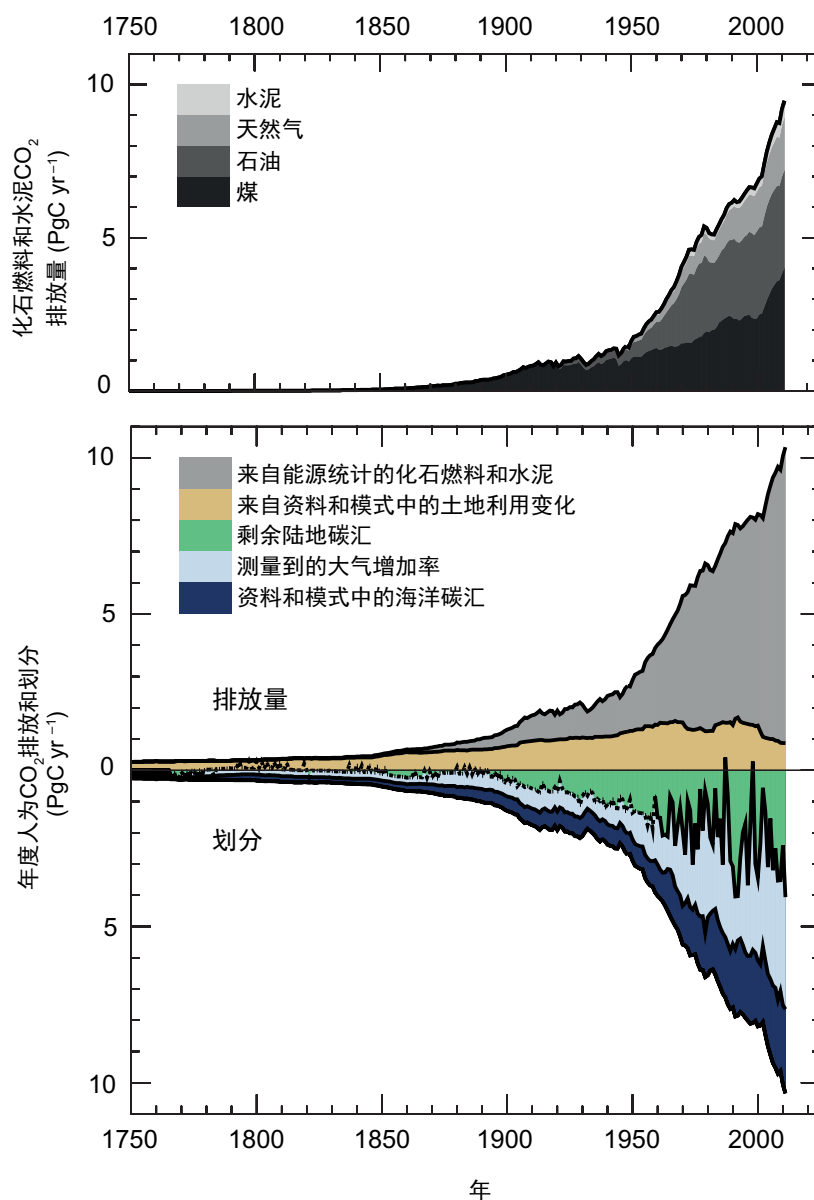
1750年至2011年间, 化石燃料和土地利用将555[470至640]PgC排入大气, 其中240[230至250]PgC在大气中累积, 该值是以很高精确度根据观测到大气CO₂浓度从1750年的278[273至283]ppm¹⁰增至2011年的390.5

⁹ 1拍克碳 = 1 PgC = 10¹⁵ 克碳 = 10 亿吨碳 = 1 GtC。相当于3.667 GtCO₂

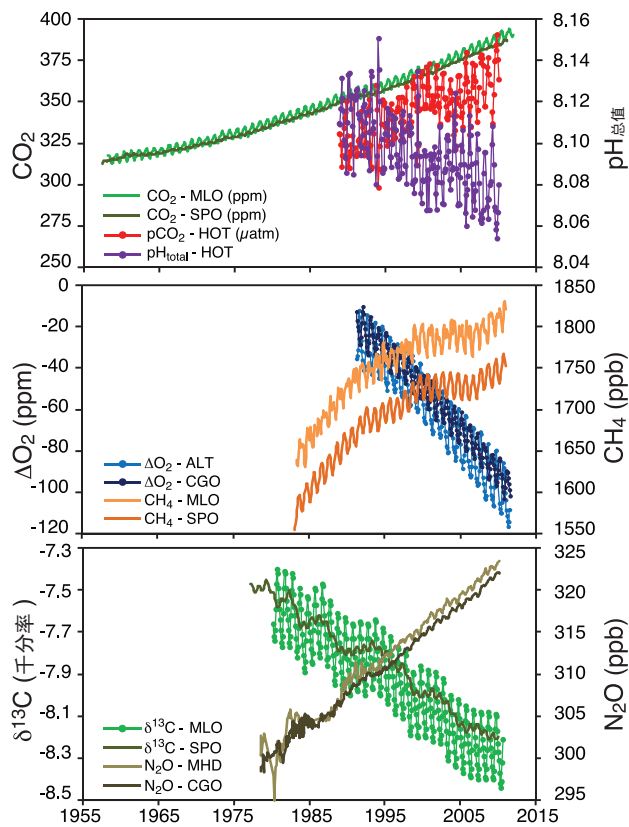
¹⁰ ppm(百万分之一)或ppb(十亿分之一)是温室气体分子数目与干燥空气总分子数之比。如300ppm即为在每一百万个干燥空气分子中, 有300个温室气体分子。

[390.4至390.6]ppm估算的。21世纪头十年，大气CO₂量每年增加了4.0 [3.8至4.2]PgC。观测到的大气CO₂的分布随着纬度增加，这明确表明这一增幅受人为排放驱动，主要发生在赤道以北的工业化国家。基于年平均浓度，北半球台站的浓度比南半球台站的浓度略高。一条有关观测到的人为源大气CO₂增加的独立证据链来自于观测到的大气含氧(O₂)量的一致下降以及大气中CO₂(¹³C/¹²C)的稳定同位素比的下降(图TS.5)。{2.2.1, 6.1.3}

化石燃料和土地利用排放的剩余碳量已被海洋和陆地生态系统重新吸收。使用不同方法和资料集(如海洋碳、氧和瞬时示踪数据)获得的各个独立估值之间具有高一致性，据此，从1994年至2010年间人为碳排放的全球海洋碳库很可能已增加。据估算，2011年为155[125至185]PgC。根据独立资料集(来自人为碳排放的海洋碳库变化，来自大气氧和氮比率(O₂/N₂)的测量，或来自CO₂分压(pCO₂)资料)计算出的全球年度海洋吸收率以及不同



图TS.4 | 1750到2011年间人为大气CO₂年排放量及其在大气、陆地和海洋之间的划分(PgC/年)。(上图)按类别划分的化石燃料和水泥CO₂排放量，由二氧化碳信息分析中心(CDIAC)估算。(下图)如上图，化石燃料和水泥CO₂排放量。净土地利用变化(主要是毁林)产生的CO₂排放量是基于土地覆盖变化数据(见表6.2)。1959年前大气CO₂增长率是基于冰芯观测的拟合曲线以及1959年以来的大气测量结果的综合。拟合冰芯观测并未捕获大气CO₂大的年际变率，并用虚线表示。海洋CO₂汇是通过模式和观测结合获得的。剩余的土地汇(图中绿色项)是根据其它项的剩余部分计算的。排放及其划分仅包括自1750年以来已变化的通量，而不包括之前已经存在并且今天仍然存在于大气、陆地和海洋碳库中的自然CO₂通量(如大气从风化中吸收的CO₂，从湖泊和河流挥发的CO₂以及海洋挥发的来自河流的CO₂；见图6.1)。各项不确定性在第6章中作了讨论，各十年平均值见表6.1。{图6.8}



图TS.5 |北半球和南半球具有代表性的时间序列台站记录的大气CO₂、氧、CO₂中¹³C/¹²C稳定同位素比率、CH₄和N₂O的大气浓度以及CO₂分压(pCO₂)和pH值的海表观测。MLO: 夏威夷莫纳罗亚天文台; SPO: 南极; HOT: 夏威夷海洋时间序列站; MHD: 爱尔兰马斯希德站; CGO: 塔斯马尼亚开普格里姆角; ALT: 加拿大西北地区预警。与图SPM.4相关的进一步详细信息见TS补充材料。{图3.18, 6.3; FAQ 3.3, 图1}

时期的吸收率在不确定区间内相互一致,因此很可能是在每年1.0至3.2PgC区间内。海洋人为碳存储速率的区域观测结果与大气CO₂浓度增加引起的预期速率大体一致,但存在显著的时空差异。{3.8.1, 6.3}

按其它碳库变化差值估算的自然陆地生态系统(未受到土地利用变化影响)在1750至2011年间已经累积了160[70至250]PgC。据估算自然陆地生态系统的碳增量发生在中高纬度地区,主要是在CO₂达到较高水平和氮沉降以及生长季节延长条件下通过增强的光合作用吸收CO₂。由于作用于不同时间尺度的物理、生物和化学过程,自然碳汇因地区的不同而异。陆地生态系统过量吸收大气CO₂,将其作为有机物存储在不同碳库中,包括短生命期(叶、细根)和长生命期(茎、土壤碳)碳库。{6.3; 表6.1}

TS.2.8.2 碳和海洋酸化

海洋因吸收人为CO₂导致逐渐酸化。自工业化时代初以来,海表水的pH¹¹值已经下降了0.1(高信度),相当于氢离子浓度增加了26%。观测到的海表水年均pH趋势区间为-0.0014和-0.0024。在海洋内部,天然物理和生物过程,以及人为CO₂吸收,可在年代际和更长时间尺度上引起pH值变化。{3.8.2; 文框3.2; 表3.2; FAQ 3.3}

TS.2.8.3 甲烷

自前工业化时代以来,CH₄浓度已增加了2.5倍,从1750年的722[697至747]ppb增至2011年的1803[1799至1807]ppb(图TS.5)。具有很高信度的是,在工业化时代大气CH₄的增加是由人为活动引起的。反刍动物数量的大幅度增长、化石燃料开采和利用产生的排放、稻田农业的扩大以及垃圾填埋场和废弃物产生的排放是人为CH₄的主要来源。人为排放占总排放量的50%至65%。通过包括未纳入以往收支中的自然地质CH₄排放量即与化石燃料行业泄漏和自然地质泄漏有关的人为排放,据估算目前CH₄总排放量中的化石分量(将约占CH₄总排放量的30%(中等信度))。{2.2.1, 6.1, 6.3.3}

最近几十年,大气中CH₄的增加一直在变化。在20世纪90年代的大约十年中,CH₄浓度相对稳定,但从2007年起开始再次增加。关于再次增加的确切驱动因子仍然有争议。天然湿地CH₄排放受气候驱动的波动(根据自下而上的估算,2000-2009年每年为177至284x10¹²g(CH₄))是全球CH₄排放年际变率的主要驱动因子(高信度);在火灾高发年,生物质燃烧排放会有较小的贡献{2.2.1, 6.3.3; 表6.8}。

TS.2.8.4 氧化亚氮

自工业化时代前以来,大气中N₂O浓度增加了1.2倍(图TS.5)。除了与CO₂源和汇相互作用之外,氮循环的变化影响陆地和海洋的N₂O排放。{2.2.1, 6.4.6}

TS.2.8.5 海洋氧

各项分析的高一致性给出的中等信度表明,自20世纪60年代以来,许多海域的公海温跃层的含氧量已经下降。总体降幅与预期一致:变暖引起的层结致使近表层海水向温跃层的供氧下降;较暖水域含氧量较少,风驱动环流的变化影响含氧量。热带含氧量最低的海域在近几年可能已有所扩大。{3.8.3}

¹¹ pH是酸度测量值: pH值下降表示酸度上升,即酸化。

TS.3 气候变化的驱动因子

TS.3.1 引言

人类活动已经改变且正在继续改变着地球表面和大气成分。其中一些变化对地球的能量平衡产生了直接或间接的影响，因而成为气候变化的驱动因子。辐射强迫(RF)是对地球系统能量平衡响应某些外部扰动的净变化的一种度量(见文框TS.2)，正辐射强迫导致变暖，负辐射强迫则变冷。辐射强迫概念的重要性在于可用于比较影响地球辐射平衡的多数单个因子对GMST的影响。尽管有一些重要修正，AR5中给出的定量值与IPCC以往报告相一致(图TS.6)。有效辐射强迫(ERF)目前用于量化某些强迫因子的影响，这些因子涉及在辐射强迫概念中假定为常数的大气和地表各部分的快速调整(见文框TS.2)。如未明确指明其它时期，则辐射强迫和有效辐射强迫是根据1750-2011年间(称为‘工业化时代’)的变化估算的。同时给出了与辐射强迫和有效辐射强迫最佳估值相关的不确定性，数值表示5-95%(90%)的信度区间。{8.1, 7.1}

在确定不同驱动因子对气候的最终影响方面，除了全球平均辐射强迫和有效辐射强迫外，强迫的空间分布和时间演变以及气候反馈也发挥着作用。地表变化实质上也会通过非辐射过程影响局地 and 区域气候。{8.1, 8.3.5, 8.6}

TS.3.2 温室气体的辐射强迫

人类活动会直接(通过气体或颗粒的排放)或间接(通过大气化学)导致大气成分的变化。在工业化时代，人为

排放已促使充分混合的温室气体(WMGHG)浓度发生变化(见TS.2.8节和TFE.7)。直接测量和冰芯记录已使人充分了解了自工业化时代前以来的历史WMGHG浓度，而且对WMGHG的辐射特性也有了充分的认识，因此，计算浓度变化引起的辐射强迫可得出严格的约束值(图TS.6)。我们对WMGHG辐射影响的认识并没有显著变化，因此，相对于AR4，辐射强迫估值的变化主要是由于浓度增加。对WMGHG有效辐射强迫的最佳估值与辐射强迫相同，但由于不良约束的云响应，不确定区间为两倍大。由于高质量的观测，可确定大部分WMGHG(特别是CO₂)使大气载荷不断增加，导致2005-2011年间其辐射强迫进一步增加。根据浓度变化，2011年所有WMGHG的辐射强迫为2.83[2.54至3.12]W m⁻²(很高信度)。自AR4以来升幅为0.20[0.18至0.22]W m⁻²，这一升幅几乎都是由自2005年以来CO₂丰度的上升。仅是工业化时代的CO₂辐射强迫为1.82[1.63至2.01]W m⁻²。在过去15年，CO₂是WMGHG辐射强迫上升的主要贡献因子，CO₂辐射强迫每十年的平均增长率略小于0.3W m⁻²。WMGHG辐射强迫的不确定性是由于其辐射特性，但主要是由于对大气辐射传输(包括云)的全面核算。{2.2.1, 5.2, 6.3, 8.3, 8.3.2; 表6.1}

继十年的近乎稳定之后，近来CH₄浓度上升造成比AR4更强的辐射强迫，上升了2%，达到0.48[0.43至0.53]W m⁻²。目前CH₄的辐射强迫很可能大于所有卤烃合计的辐射强迫。{2.2.1, 8.3.2}

自AR4以来，大气N₂O已增加了6%，产生的辐射强迫为0.17[0.14至0.20]W m⁻²。N₂O浓度在继续升高，而作为几十年来辐射强迫第三大WMGHG贡献因子，二氯二

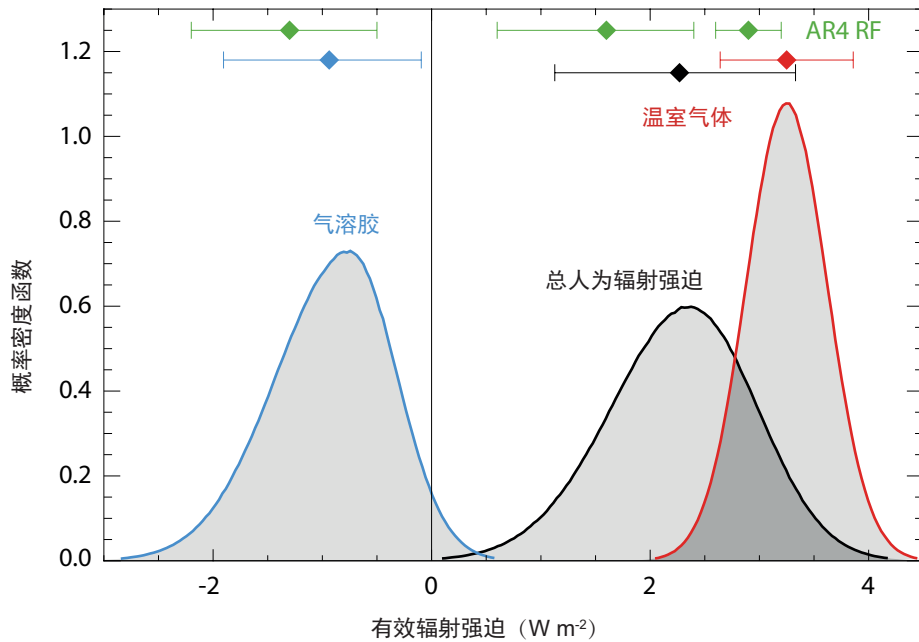
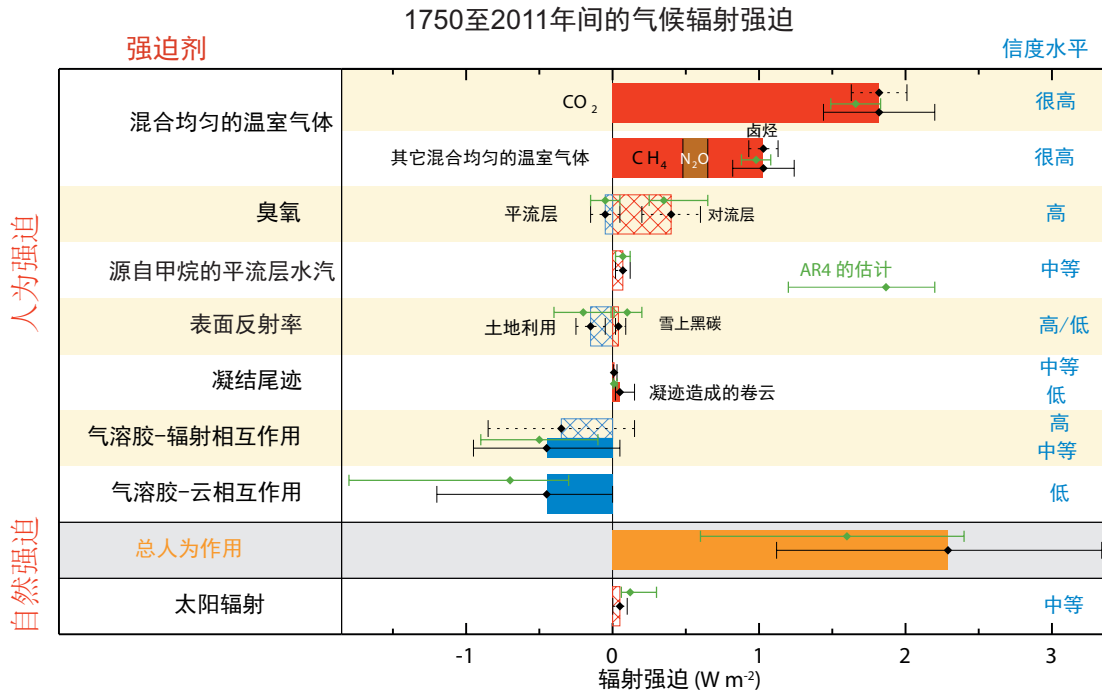
文框TS.2 | 辐射强迫与有效辐射强迫

辐射强迫和有效辐射强迫用来量化外部施加变化引起的地球能量平衡的变化，其单位为：瓦/平方米 (W m⁻²)。与IPCC以前的评估报告一样，在AR5中，辐射强迫的定义为在平流层温度重新调整到辐射平衡后，对流层顶的净向下通量(短波+长波)的变化，同时保持对流层温度、水汽和云量等其它状态变量固定在未扰动值(见术语表)。{8.1.1}

尽管已证明辐射强迫概念非常重要，但进一步的了解表明，包括地球表面和对流层的快速调整能够量化气候响应提供更好的测量标准。这些快速调整会在不同的时间尺度出现，但有别于对GMST变化的响应。气溶胶尤其会影响大气温度廓线和云特性，而且时间尺度远小于海洋(甚至是上层)对强迫的调整。AR5中定义的有效辐射强迫概念允许所有变量(除GMST或海温和海洋冰盖之外)对扰动的快速调整。对于人为气溶胶，由于其对云以及对积雪或冰盖的影响，有效辐射强迫和辐射强迫值存在显著差异。对于驱动地球能量平衡的其它部分(如GHG)，有效辐射强迫和辐射强迫值相当接近。鉴于辐射强迫需要更少的计算资源，且不受气象变率的影响，从而能更好地确定微小强迫，因此辐射强迫具有可比用途。在辐射强迫和有效辐射强迫存在很大差异的情况下，有效辐射强迫已表明它是更好的GMST响应指标，因此在AR5中受到了强调。{7.1, 8.1; 文框8.1}

氟甲烷(CF_2Cl_2 , CFC-12)的浓度正在下降, 因为根据《蒙特利尔议定》, 停止了这种化学物质的排放。自AR4以来, N_2O 已超过CFC-12成为辐射强迫的第三大WMGHG贡献因子。卤烃的辐射强迫与AR4中给出的数值非常相近, 而CFC的辐射强迫下降, 但其许多替代物的辐射强迫上升。其中的四种卤烃(三氯氟甲烷(CFC-113, CFC-11)、CFC-12、三氯三氟乙烷($\text{CF}_2\text{ClCFCl}_2$, CFC-113))

和二氟一氯甲烷(CHF_2Cl , HCFC-22)) 占总卤烃辐射强迫的85%。在过去五年, 前三种化合物的辐射强迫下降, 但是HCFC-22的辐射强迫增加补偿了更多。具有高信度的是, 由于非 CO_2 辐射强迫增加较慢, 过去十年所有WMGHG的辐射强迫增长率低于20世纪70年代和80年代。{2.2.1, 8.3.2}



图TS.6 | 工业化时代气候变化的辐射强迫(RF)和有效辐射强迫(ERF)。(上图)1750-2011年间浓度变化产生的强迫以及相关的不确定性区间(实心直方为有效辐射强迫, 阴影直方为辐射强迫, 绿菱形和相关不确定性是指AR4评估的辐射强迫)。(下图)气溶胶和温室气体(GHG)的有效辐射强迫以及总有效辐射强迫的概率密度函数(PDF)。绿线表示AR4 辐射强迫90%信度区间, 可与红、蓝及黑线进行对比, 红、蓝及黑线表示AR5有效辐射强迫90%信度区间(尽管辐射强迫和有效辐射强迫有差异, 尤其是对于气溶胶)。地表反照率变化和组合凝结尾流以及凝结尾流卷云等产生的有效辐射强迫已被纳入总人为强迫, 但并未被列为单独的概率密度函数。对于某些强迫机制(臭氧、土地利用、太阳), 辐射强迫假定为代表有效辐射强迫, 但额外17%的不确定性以正交添加到辐射强迫的不确定性。{图8.15, 8.16}

短生命期GHG臭氧(O₃)和平流层水汽也对人为强迫有贡献。观测表明,在20世纪90年代,许多未扰动(本底)地点的O₃可能已增加。在过去十年,这种增长主要是在亚洲持续(尽管观测只覆盖有限的区域),而在欧洲则保持平稳。O₃变化产生的总辐射强迫为0.35[0.15至0.55]W m⁻²(高信度),而对流层O₃产生的辐射强迫为0.40[0.20至0.60]W m⁻²(高信度),平流层O₃产生的辐射强迫为-0.05[-0.15至+0.05]W m⁻²(高信度)。O₃并非直接排放到大气中;而是通过光化反应生成的。在对流层中,这些反应涉及从各种自然源和人为源排入大气的前体化合物。对流层O₃辐射强迫主要归因于CH₄、一氧化碳、挥发性有机物以及氮氧化物的排放增加,而平流层辐射强迫主要是由于人为卤烃导致的O₃损耗。然而,目前有力的证据表明,对流层O₃和平流层O₃的变化之间存在显著的联系,总计0.50[0.30至0.70]W m⁻²的O₃辐射强迫归因于对流层O₃前体物排放,而-0.15[-0.30至0.00]W m⁻²则归因于卤烃引起的O₃损耗。有力的证据表明,对流层O₃还对植被生理学具有不利影响,从而影响其CO₂吸收。这种吸收的减少会导致大气CO₂浓度间接的上升。因此,部分CO₂辐射强迫应归因于臭氧或其前体物,而非CO₂的直接排放,但对定量估值为低信度。CH₄氧化产生的平流层水汽辐射强迫为0.07[0.02至0.12]W m⁻²。平流层水汽的其它变化以及对流层水汽的所有变化均被视为反馈,而非强迫。{2.2.2, 8.1-8.3; FAQ 8.1}

TS.3.3 人为气溶胶的辐射强迫

人为气溶胶是通过多个过程造成气候辐射强迫的原因,这些过程可分为两类:气溶胶-辐射相互作用(ari)以及气溶胶-云相互作用(aci)。自AR4以来,对气候相关的气溶胶特性(包括其粒谱分布、吸湿率、化学成分、混合状态、光学和云核化特性)及其大气分布的观测和模拟取得了进展。然而,由于测量困难,且缺乏某些相关参数观测资料、高时空变率以及现有相对简短的观测记录,对全球气溶胶光学厚度及气溶胶其它全球特性长期趋势的评估仍然存在很大不确定性。利用气溶胶模式得到的证据以及某些观测限制,给出了人为RFari的最佳估值为-0.35[-0.85至+0.15]W m⁻²(高信度)。RFari由多种气溶胶类型所致(见TS3.6节)。对RFari的快速调整导致进一步的负强迫,尤其是通过云调整,并主要归因于黑碳。因此,ERFari的负强迫大于RFari(低信度),其最佳估值为-0.45[-0.95至+0.05]W m⁻²。对RFari的评估,负强迫小于AR4的报告,这是由于对气溶胶吸收进行了重新评估。不确定性估值区间更广,但更为确凿。{2.2.3, 7.3, 7.5.2}

随着对气溶胶-云相互作用的进一步了解,降低了对

全球许多气溶胶-云强迫的估值强度。对气溶胶的总有效辐射强迫(ERFari+aci,不包括吸收气溶胶对冰雪的影响)评估为-0.9[-1.9至-0.1]W m⁻²(中等信度)。该估值包含所有的快速调整,包括云生命期的变化以及气溶胶对混合相位云、冰云和对流云的微观物理影响。该区间是通过给予基于卫星的研究和气候模式估值同等权重获得的。这与多条证据链相一致,即气溶胶-云相互作用的负估值小于AR4中给出的估值。{7.4, 7.5, 8.5}

冰雪上黑碳(BC)的辐射强迫的评估值为0.04[0.02至0.09]W m⁻²(低信度)。与IPCC以往评估不同,该估值包括对海冰的影响,计算了更多的物理过程,并综合了各模式和观测的证据。该辐射强迫造成比最初的CO₂大2-4倍的单位强迫GMST变化,这主要是由于所有的强迫能量都直接沉降到冰冻圈,其演变给气候带来了正的反照率反馈。因此,这种效应是北极及其它冰雪覆盖地区的重要强迫机制。{7.3, 7.5.2, 8.3.4, 8.5}

尽管气溶胶强迫存在很大不确定性区间,但具有高信度的是,气溶胶抵消了很大部分的GHG强迫。气溶胶-云相互作用能够影响单个风暴的特征,但气溶胶对风暴或降水强度的系统性影响的证据则较为有限且不明确。{7.4, 7.6, 8.5}

TS.3.4 地表变化和凝结尾流的辐射强迫

有确凿的证据表明,人为土地利用变化(如毁林)增加了地表反照率,引起的辐射强迫为-0.15[-0.25至-0.05]W m⁻²。由于对自然地表和管理的地表(如农田、牧场)的反照率存有不同的假设,因此,定量估值的区间仍然很大。此外,土地利用变化的时间演化,特别是在1750年这一基准年中已完成了多少,仍有争议。此外,土地利用变化导致其它一些改变,虽然不是辐射变化,但会影响表面温度,比如地面粗糙度、潜热通量、河水径流和灌溉方面的变化。这些方面更为不确定,而且很难量化,但往往会在全球尺度抵消反照率变化的影响。因此,土地利用变化导致的全球平均温度净变化信号有低一致性。土地利用变化,尤其是毁林,也对WGMGHG浓度具有显著影响。它对与CO₂排放或浓度变化有关的辐射强迫有贡献。{8.3.5}

2011年,航空飞行产生的持续凝结尾流引起的正辐射强迫值为0.01[0.005至0.03]W m⁻²(中等信度),而来自航空飞行、结合了凝结尾流和结尾流卷云的有效辐射强迫的评估值为0.05[0.02至0.15]W m⁻²(低信度)。这种强迫在区域上会更大,但目前具有中等信度的是,它不会对表面温度的平均值或日较差产生可观测到的区域影响。{7.2.7}

TS.3.5 气候变化自然驱动因子的辐射强迫

在工业化时代，太阳强迫和火山强迫是全球气候变化的两个主要自然贡献因子。自1978年以来，太阳总辐照度(TSI)变化的卫星观测资料显示出准周期性循环变化，大约为每11年一个周期。通过比较太阳极小期(变率最小的时期)通常可以估算出更长期的强迫。这得出在最近的(2008年)太阳极小期与1986年极小期之间的辐射强迫变化值为-0.04[-0.08至0.00] $W m^{-2}$ 。然而，各种卫星合成资料的估算趋势存在某些差异。在启用卫星观测之前，TSI的长期趋势是依靠一系列间接代用资料。工业化时代TSI变化的辐射强迫最佳估值为0.05[0.00至0.10] $W m^{-2}$ (中等信度)，其中包括大约至1980年的更大辐射强迫以及随后的小幅下降趋势。该辐射强迫估值显著小于AR4的估值，这是由于增加了最近的太阳活动周期以及与IPCC早期评估报告中太阳辐射强迫的估算方法不一致。最近的太阳极小期似乎异常低，且持续时间长，一些预估指出未来几十年的TSI较低。然而，目前预估太阳辐照度的能力极其有限，因此，关于未来的太阳强迫有很低信度。但是，具有高信度的是，因为WMGHG，21世纪太阳强迫将明显小于预估增加的强迫。{5.2.1, 8.4.1; FAQ 5.1}

太阳活动的变化影响了照射到地球大气的宇宙线通量，它被假设可通过云量的变化影响气候。宇宙线促进气溶胶核化，从而会在自由对流层中影响云凝结核的生成，但在一个太阳活动周期或在上个世纪，这种影响很弱，不会对气候产生任何影响(中等证据量，高一一致性)。宇宙线变化和云量变化之间并没有发现任何确凿的联系。如果存在此类联系，则需要用另一种机制来解释，而不是宇宙线引起的新气溶胶粒子核化。{7.3, 7.4.6}

目前已对平流层火山气溶胶的辐射强迫有了充分认知，在大的火山喷发之后，随之会出现若干年大的辐射强迫(文框TS.5, 图1)。虽然火山喷发会向大气同时注入矿物粒子和硫酸盐气溶胶前体物，但因后者粒径小、生命期长，是造成显著影响气候的辐射强迫的原因。火山喷发产生的 CO_2 排放量比人为排放至少低100倍，在百年时间尺度上，对气候的影响微不足道。在工业化时代，因为热带大型火山喷发有时会产生很大的负辐射强迫，对于推动年到年代尺度的气候变化产生了重要作用。1991年皮纳图博火山喷发造成了为期一年约-3.0 $W m^{-2}$ 的辐射强迫。自之以后，没有任何大的火山喷发，而在2008-2011年，一些较小规模的喷发造成了平均-0.11[-0.15至-0.08] $W m^{-2}$ 的辐射强迫(高信度)，强度是1999-2002年平均值的两倍。较小规模的喷发导致更好地了解辐射强迫对来自高纬度喷发物质的量的依存度，以及它们在一年中的喷发时间。

{5.2.1, 5.3.5, 8.4.2; 附件2}

TS.3.6 强迫综述；时空演变

对工业化时代强迫的综述指出，在强迫因子中，只有WMGHG辐射强迫具有很高信度。相对于AR4，由于证据更为有力，认知更为深入，有七个强迫剂的信度水平得到了提高。{8.5; 图8.14}

自1750年以来，主要自约1860年以来，人为总辐射强迫的时间演变显示几乎在持续上升。自1960年以来，人为总辐射强迫的增长率显著高于工业化时代早期，这主要是由于多数WMGHG浓度的持续上升。气溶胶总有效辐射强迫的时间演变仍然是低一致性，这是总人为强迫不确定性的主要因素。1950年之后，由于负气溶胶强迫少量抵消了正WMGHG强迫，人为总强迫中的部分不确定性逐步降低。有确凿证据和高一致性表明，自然强迫是WMGHG强迫的一小部分。在过去15年，自然强迫的变化可能抵消了这一时期相当大一部分(至少30%)的人为强迫增长(文框TS.3)。CO₂强迫是工业化时代以及1980-2011年间总强迫的最大单一贡献因子。与整个工业化时代相比，相对于1980-2011年其它WMGHG的变化，CO₂强迫的主导地位更强，具有高信度的是，在这一时期，气溶胶强迫对WMGHG强迫的抵消要远小于1950-1980年的时期。{8.5.2}

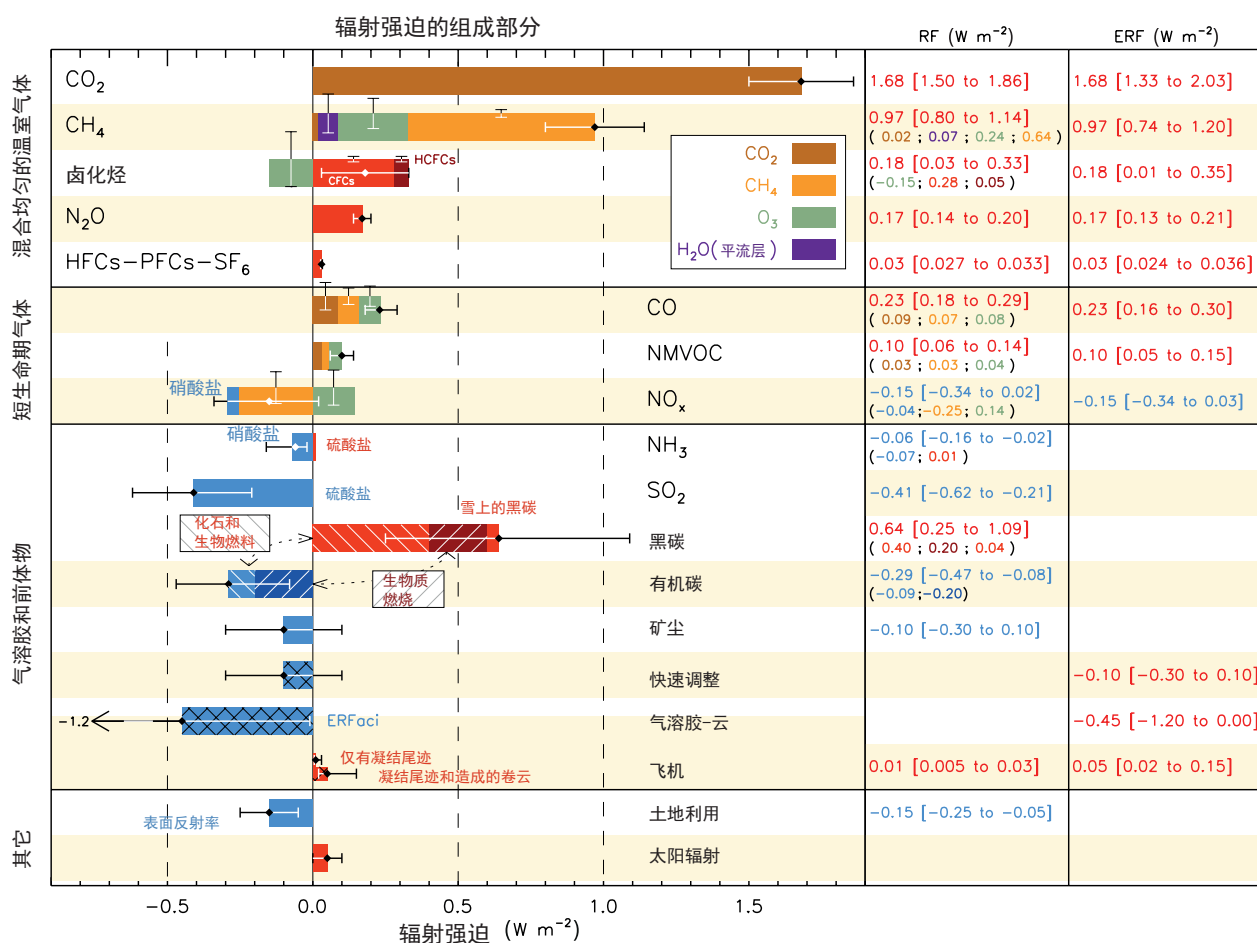
强迫还可归因于排放，而不是归因于最终的浓度变化(图TS.7)。无论是从大气CO₂浓度变化的角度，还是从CO₂净排放变化的影响的角度，二氧化碳都是历史辐射强迫最大的单一贡献因子。然而，选择的视角不同，其它强迫因子的相对重要性会有显著的差异。特别是由于通过大气化学产生的一些间接影响，CH₄排放产生的强迫(在工业化时代约为1.0 $W m^{-2}$)要远高于CH₄浓度增加(约为0.5 $W m^{-2}$)。此外，一氧化碳排放几乎确定会产生正强迫，同时，活性氮氧化物的排放可能造成净负强迫，但不确定性很大。损耗臭氧的卤烃的排放很可能产生净正强迫，因为其直接辐射效应大于其引起的平流层臭氧损耗的影响。SO₂、有机碳和氨的排放产生负强迫，而黑碳的排放通过气溶胶-辐射相互作用产生正强迫。注意，矿物粉尘强迫可包括自然部分或气候反馈效应。{7.3, 7.5.2, 8.5.1}

尽管WMGHG显示出空间上相当均一的强迫，但气溶胶、臭氧和土地利用变化等其它因子具有高度的空间不均匀性。20世纪初，在北美洲东部和欧洲，RFari出现最大的负值，而到1980年，大的负值随之扩大到东亚和东南亚、南美和非洲中部。然而，此后由于污染控制，北美

洲东部和欧洲负值幅度降低，负强迫峰值转至南亚和东亚，这主要是由于这些地区的经济增长以及导致的排放增加。气溶胶总有效辐射强迫在出现最大负强迫的地区也有类似情况，但在一些沙漠地区和北极也出现显著的正强迫。相反，在整个20世纪，全球平均整体大气臭氧强迫有所增加，在大约15°N-30°N之间出现正振幅峰值，但在南极则是负值。在工业化地区和生物质燃烧地区，反照率变化引起的负土地利用强迫最强。这些强迫的非均一性会使其对水文循环的影响显著大于全球平均均一性强迫当量。 {8.3.5, 8.6}

根据各典型浓度路径(RCP; 见文框TS.6)，预估在整个21世纪人为辐射强迫会增加。RCP对辐射强迫的简单模式估算包括涉及未来各种可能的WMGHG大范围排放，据估算，相对于1750年，人为辐射强迫在2050年将

增至3.0至4.8W m⁻²，在2100年将达2.7至8.4W m⁻²。在近期，各RCP彼此相当接近(而且近期气候强迫因子的排放没有超出文献中未来各种可能情况的范围)，在2030年辐射强迫值仅为2.9至3.3W m⁻²(2010-2030年额外辐射强迫为0.7至1.1W m⁻²)，但是在21世纪下半叶出现极高的发散值，这主要由于CO₂的推动。基于RCP情景的结果表明，2000-2030年，气溶胶有效辐射强迫的变化很小，随后气溶胶明显减少，且气溶胶负总有效辐射强迫大幅度减弱。硝酸盐气溶胶不在此减少之列，负强迫显著增加，这在仅有的几个模式中是一个突出特点。各RCP的散度表明，虽然由于历史排放及一些长生命期大气强迫因子导致目前辐射失衡，使‘系统中’已存在一定程度的未来气候变化，但社会选择仍然会对未来的辐射强迫产生很大的影响，从而影响到气候变化。 {8.2, 8.5.3, 12.3; 图8.22, 图12.4}



图TS.7 | 按1750-2011年排放量给出的工业化时代气候变化的辐射强迫(RF)。横直方表示总体不确定性，而竖直方表示各分量(竖直方长度与相对不确定性成正比，总长度等于±50%不确定性的直方宽度)。右栏给出了响应总量和各分量(由左至右)的最佳估值。各值均为辐射强迫值，但气溶胶-云相互作用(ERFaci)产生的有效辐射强迫(ERF)以及气溶胶-辐射相互作用产生的有关辐射强迫的快速调整(RFari快速调整)属于例外。注意，气溶胶-辐射相互作用产生的总辐射强迫(-0.35W m⁻²)与各分量辐射强迫之和(-0.33W m⁻²)略有差异。气溶胶-辐射相互作用产生的总辐射强迫是图SPM.5的依据。由于次生有机气溶胶的形成取决于各类因子，且目前不足以量化，因此未将其包括在内。凝结尾流有效辐射强迫包括凝结尾流卷云。ERFaci -0.45[-1.2至0.0]W m⁻²与快速调整的ari -0.1 [-0.3至+0.1]W m⁻²相加，得出气溶胶产生的综合调整分量-0.55[-1.33至-0.06]W m⁻²。CFCs=氯氟烃，HCFCs=氢氯氟烃，HFCs=氢氟烃，PFCs=全氟化碳，NMVOC=非甲烷挥发性有机化合物，BC=黑碳。有关图SPM.5的更多详情见TS补充材料。 {图8.17}

TS.3.7 气候反馈

反馈也将在确定未来气候变化方面发挥重要作用。气候变化的确会改变水循环、碳循环和其它生物地球化学循环，这会加强(正反馈)或抑制(负反馈)预期的温度上升。冰雪反照率反馈已知为正。水汽和直减率联合反馈极有可能为正反馈，而且目前得到相当充分的量化，而云反馈仍存在较大不确定性(见TFE.6)。此外，新的耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)模式一致估算为正的碳循环反馈，即为响应未来气候变化，已减少的自然CO₂汇。特别是，模式中的海洋碳循环反馈为正。热带陆地生态系统中不同碳汇的一致性较低，也许会通过有时尚未充分表现的干旱和火灾等过程，易受到气候变化影响。AR4以来的一项关键更新是将营养动力学引入CMIP5的一些陆地碳模式中，尤其是氮有效性对植物生长的限制。计算氮循环净效应是已知人为CO₂排放轨迹的较小预估陆地汇(见TFE.7)。{6.4; 文框6.1, 7.2}

模式和生态系统变暖实验显示出高一致性的是，在较暖气候下，单位面积的湿地CH₄排放将增加，但湿地面积可能出现增加或减少，这取决于影响湿地水文的区域温度和降水的变化，因此，对湿地CH₄排放的定量预估为低信度。水合物和多年冻土的碳库很大，因此有可能作为非常强的反馈。虽然是不良约束，但由于海洋的欠饱和状态、海洋的长时间通风以及通过海底的升温传播缓慢，因此21世纪从水合物中释放到大气的全局CH₄可能是低水平。具有高信度的是，融化的多年冻土释放的碳具有正反馈，但对其强度的定量预估为低信度。{6.4.7}

气溶胶-气候反馈的发生主要是通过自然气溶胶源强度的变化或自然和人为气溶胶汇效率的变化；有限数量的模拟研究评估表明，这种反馈强度小，而且为低信度。具有中等信度的是，由于云凝结核群对二甲基硫醚排放变化的敏感性低，涉及二甲基硫醚、云凝结核及云反照率的(不确定符号的)反馈弱。{7.3.5}

TS.3.8 排放度量标准

不同的度量标准可用于量化和表述不同物质的排放以及各个地区/国家或源/行业的排放对气候变化的相对和绝对贡献。一直到AR4时，最常用的度量标准是全球增温潜势(GWP)，它求出特定时间范围的辐射强迫积分值。因此，这种度量标准可计算不同物质的辐射效率及其在大气中的生命期，并给出相对于基准气体CO₂值的数值。目前对全球温度变化潜势(GTP)的关注日益上升，它以某一选定时间点的GMST变化为基础，再次与基准气体CO₂导致的变化相对比，从而计算气候响应以及辐射效率和大

气生命期。GWP和GTP均利用一个时间范围(图TS.8上图)，其选择是主观的，并倚赖于特定背景。总之，对于近期气候强迫因子而言，由于GWP中综合强迫采用均等时间权重，因此，GWP高于GTP。由此，度量标准的选择可大大影响近期气候强迫因子和WMGHG的相对重要性，时间范围的选择亦是如此。当前排放(1年排放脉冲)的影响分析表明，近期气候强迫因子，例如黑碳、二氧化硫或CH₄，在短时间范围内会作出与CO₂相当的贡献(相同或相反信号)，但在CO₂排放占主导的更长时间范围内，其影响将逐渐降低(图TS.8上图)。{8.7}

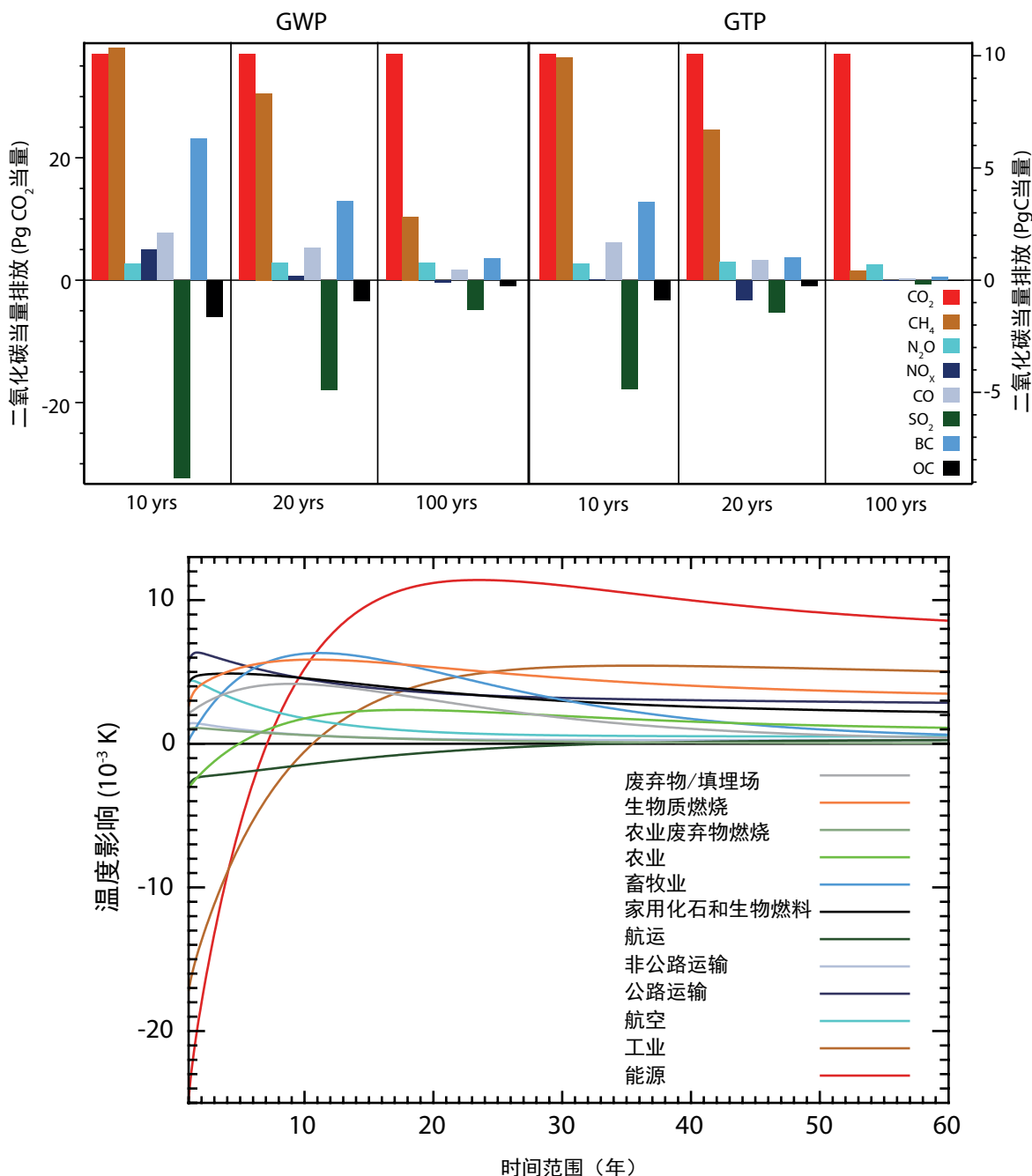
沿着驱动因子-响应-影响链，可确定其它大量的度量标准。单一的度量标准无法准确比较所有不同排放的结果(即随时间变化的气候参数响应)，某种度量标准建立起与一种效应的等效性并不能得出与其它效应的等效性。因此，度量标准的选择主要取决于所要评估的特定结果。重要的是要注意，度量标准不能确定政策或目标，但可促进分析和实施多元化政策，以实现特定目标。对度量标准的所有选择包含与隐性价值相关的判断，例如所考虑的效应类型以及随时间变化的效应权重。GWP求出选定时间范围内的影响积分(即：对时间范围内的所有时间给予同等权重，之后为零权重)，而GTP仅给出某个选定年份的温度，之前或之后的年份没有权重。{8.7}

GWP和GTP在处理间接影响和反馈方面具有局限性和不一致性，例如，是否包括基准气体CO₂的气候-碳反馈，而不是非CO₂气体的。GWP的不确定性随时间范围而增加，100年WMGHG的GWP，其不确定性可高达±40%。一些研究还指出，该度量标准并不是非常适于最高温度目标的政策。GTP的不确定性也随时间而增加，因为它们源于与GWP不确定性相同的促发因素并沿着驱动因子-响应-影响链进一步发展做出了额外贡献并包括气候响应。GTP度量标准更适于基于目标的政策，但也并非适合于每个目标。目前已有更新的度量值用于计算生命期和辐射效能认知方面的变化以及气候-碳反馈。{8.7, 表8.7, 表8.A.1, 第8章补充材料表8.SM.16}

利用这些排放度量标准，便可评估归因于各类活动的过去或目前排放对气候的影响。此类基于活动的核算可提供更多政策相关信息，因为特定社会选择对这些活动的直接影响大于总体排放。单一年份的排放值(脉冲)通常用于量化对未来气候的影响。从这个视角出发并利用可说明此类结果的绝对GTP度量标准，能源和工业对今后50-100年的变暖具有最大的贡献(图TS.8, 下图)。家用化石燃料和生物燃料、生物质燃烧和公路运输对于上述时间尺度的变暖而言也是相对大的贡献因子，而目前CH₄排放量大的行业(畜牧业、废弃物/填埋场和农业)在较短时间范围(

最多约20年)内也有重要的影响。另一个有用的视角是检验目前持续排放的影响。由于排放的物质可以根据其驻留时间得以清除,因此在这项分析中,短生命期物质保持在近似于常数值,而长生命期气体则在累积。在这两种情况下,具有最大长期变暖影响的行业(能源和工业)导致了近期降温(主要由于SO₂排放),因此,在短时间尺度和长时

间尺度上,这些行业的排放会导致相反的全球平均温度响应。其它行业的相对重要性取决于所选择的时间和视角。如同辐射强迫或有效辐射强迫,气溶胶影响的不确定性很大,尤其是气溶胶-云相互作用归因于各个分量为不良约束。{8.7, 第8章补充材料图8.SM.9, 8.SM.10}



图TS.8 | (上图)全球增温潜势(GWP)和全球温度变化潜势(GTP)加权的选定时间范围全球当今人为排放。GWP和GTP加权的2008年(单一年份脉冲)排放。GWP是与CO₂排放强迫相比,综合所标示年数的单位质量排放的全球平均辐射强迫(RF);GTP是相对于CO₂排放的影响,以辐射强迫的时间变化和单位质量排放的气候响应时间变化为基础,估算对全球平均温度的影响。其单位为‘CO₂当量’,在所选度量标准的影响参数中仅反映当量(GWP为所选时间范围的综合辐射强迫;GTP为所选时间点的温度变化),以Pg(CO₂)当量(左轴)和PgC当量(右轴)为单位表示。(下图)绝对GTP(AGTP)是作为时间函数乘以所列各行业当今所有化合物的排放,用于估算全球平均温度响应(AGTP与GTP相同,但没有用CO₂排放影响进行归一化)。在60-100年时间范围内,各行业的相对值几乎没有变化。上图未包括气溶胶-云相互作用的影响以及凝结尾流卷云的影响。{图8.32, 8.33}

TS.4 认知气候系统及其近期变化

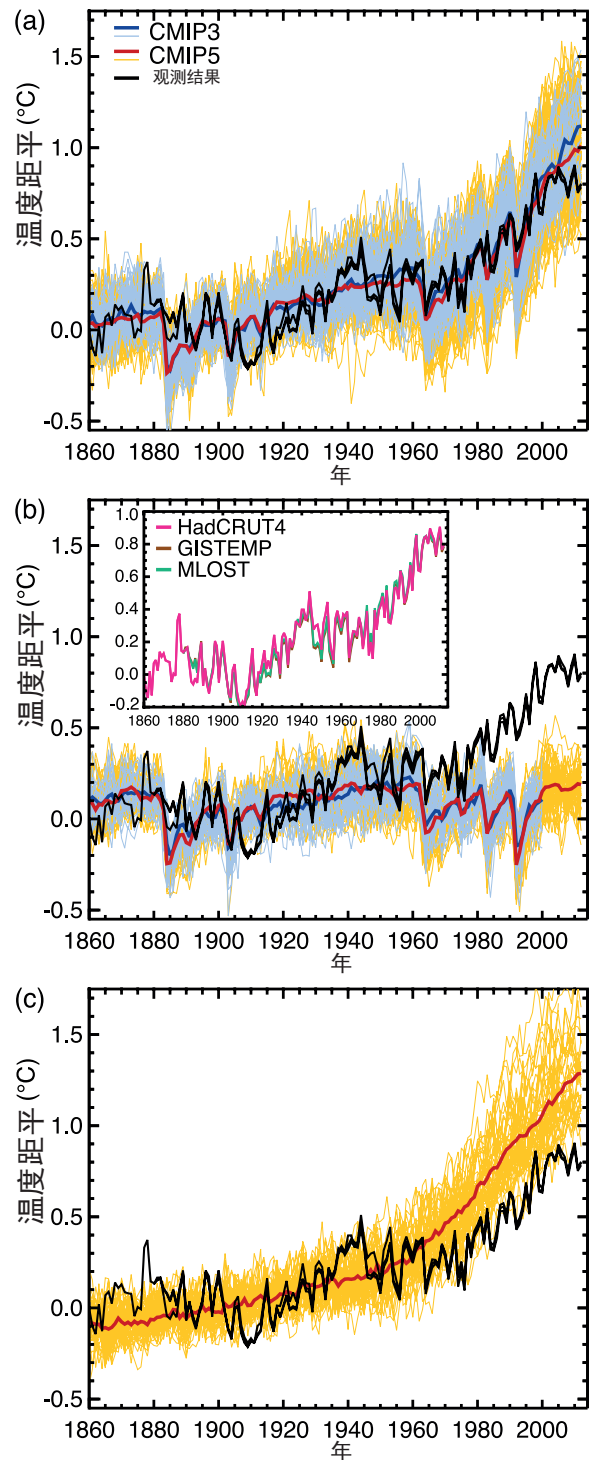
TS.4.1 引言

对气候系统的认知来自将观测、反馈过程理论研究和模式模拟相结合。与AR4相比，目前有更为详尽的观测和改进的气候模式(见文框TS.4)，能够将气候系统更多部分中检测到的变化归因于人为影响。在整个气候系统中，在区域温度、水循环、全球能量收支、冰冻圈和海洋(包括海洋酸化)等方面，观测到的变化和模拟的变化相一致，这表明全球气候变化主要是由于WMGHG浓度的人为增加。{10}

TS.4.2 表面温度

自AR4以来，已取得一些进展，能够更可靠地量化表面温度变化的人为影响。对观测不确定性的研究也比以前更为彻底。目前评估报告考虑的是21世纪最初10年的观测资料和新一代气候模式的模拟，这些模式的历史气候模拟能力在许多方面都高于AR4中的模式。相对于1880-1919年，近年观测到的GMST距平远超出仅有自然强迫的CMIP5模拟中的GMST距平区间，但与CMIP5模拟集合相一致，包括人为和自然强迫(图TS.9)，虽然有些模式高估了变暖趋势，但其它模式则是低估了。仅用WMGHG变化而不用气溶胶变化进行模拟，总体呈现出强于观测到的变暖(图TS.9)。1951-2010年观测到的温度趋势，其特点是在全球多数地区升温，在北半球大陆升温强度最大，这种趋势与包含人为和自然强迫的CMIP5模拟温度趋势相一致，而与仅含自然强迫的CMIP5模拟温度趋势不一致。针对大西洋年代际涛动(AMO)对GMST的影响已开展了一系列研究。尽管有些研究发现AMO在推动GMST年代变率过程中起到了重要作用，但在1951-2010年间，AMO几乎未体现出目前评估所依据的趋势，且具有高信度的是，评估认为AMO对1951-2010年间的GMST趋势几乎未起作用(远低于 0.1°C)。{2.4, 9.8.1, 10.3; FAQ 9.1}

1951-2010年观测到的全球平均表面温度上升中，极有可能一半以上由人类活动所致。利用不同方法进行的多项研究得出了确凿证据，对本次评估给予了有力支持。特别是，在多信号探测和归因分析中，归因于综合所有人为强迫的温度趋势会受到更严格约束。强迫的不确定性和气候模式响应这些强迫的不确定性，以及在区分WMGHG及其它人为强迫导致的温度响应型态方面存在的困难，均有碍于准确量化分别归因于WMGHG及其它人为强迫的温度变化。与AR4一致的是，评估认为，从1951-2010



图TS.9 | 全球平均表面温度的三个观测估值(黑线)，这三个估值来自哈得莱中心/气候研究小组格点表面温度资料集4(HadCRUT4)、戈达德空间研究所表面温度分析(GISTEMP)以及综合陆-海表面温度分析(MLOST)，对比包含人为和自然强迫(a)和仅含自然强迫(b)以及仅含温室气体强迫(c)的模式模拟(CMIP3模式—细蓝线和CMIP5模式—细黄线)。粗红线和粗蓝线分别是所有现有CMIP5和CMIP3模拟的平均值。所有模拟和观测的资料均用HadCRUT4覆盖进行掩码(因为该资料集的空间覆盖率最为有限)，所示的全球平均距平是针对1880-1919年，其中各格点框中所有资料首先计算为相对于1961-1990年的距平。图(b)表示三个观测资料集，以不同颜色加以区分。{图10.1}

文框TS.3 | 气候模式和过去十五年全球平均表面升温的中断

观测到的GMST显示出过去15年的线性上升趋势远小于过去30-60年的趋势(文框TS.3, 图1a, c)。根据观测资料集, 估算出1998-2012年的GMST趋势大约是1951-2012年的三分之一到二分之一。例如, 在HadCRUT4中, 1998-2012年间的趋势为每十年0.04°C, 而1951-2012年为每十年0.11°C。在北半球冬季, 观测到GMST趋势下降最为显著。即使GMST趋势出现‘中断’, 但21世纪的这十年是GMST器测记录中最暖的十年。然而, 过去15年GMST趋势中断带来了两个相关问题: 发生的原因何在以及气候模式是否能够对其进行重现。{2.4.3, 9.4.1; 文框9.2; 表2.7}

在观测到的和CMIP5历史GMST时间序列中, 15年之久的中断期很常见。然而, 对整套CMIP5历史模拟(RCP4.5对2006-2012年的模拟出现增长)的分析显示, 114次实现中有111次表明, 1998-2012年GMST的趋势高于整个HadCRUT4趋势集合(文框TS.3, 图1a; CMIP5集合平均趋势为每十年0.21°C)。模拟趋势和观测趋势之间的这种差异可能是由于某些综合因素所致, 比如(a)内部气候变率, (b)缺失的或存在误差的辐射强迫, 以及(c)模式响应误差。作为观测到的GMST趋势中断的原因, 这些潜在差异根源之间并不相互排斥, 下文对其进行评估。{2.4.3, 9.3.2, 9.4.1; 文框9.2}

内部气候变率

出现10-15年的中断期可体现内部十年气候变率, 它时而加强时而抵消长期外部强迫趋势。因而, 内部变率减小了10-15年短时期趋势与长期气候变化的相关性。此外, 预计内部十年气候变率的时间与CMIP5历史模拟不相匹配, 因为可预测范围最多为10-20年(源自对照运算的CMIP5历史模拟通常名义上大约从1850年开始)。但是, 各气候模式显示出各个十年的GMST趋势中断, 甚至在气候系统能量吸收的持续阶段, 在此情况下, 持续增加的次表层-海洋热吸收可使能量收支平衡。{2.4.3, 9.3.2, 11.2.2; 文框2.2, 9.2}

由于采样有限, 尚不确定过去15年次表层海洋热吸收率是否出现上升。然而, 1998-2010年, 气候系统(包括700米以下的深海)很可能已持续积累能量。与这种能量积累相一致的是, GMST在1998-2012年间持续上升, 速率略低于1993-2012年。观测到的热含量与海平面变化有一致性, 因而对持续的海洋能量积累的评估具有高信度, 它同样也与气候系统的正辐射失衡相一致。相反, 有限的证据表明, 2003-2010年与1971-2010年相比, GMST趋势的中断伴随有0-700米深度海洋热含量较缓的增速。这种减缓具有低一致性, 因为五次分析中, 有三次出现增速放缓, 而另两次分析则显示增速持续不减。{3.2.3, 3.2.4, 3.7, 8.5.1, 13.3; 文框3.1和 13.1}

从1998年起的15年间, HadCRUT4的GMST趋势集合几乎低于所有模式模拟的趋势(文框TS.3, 图1a), 但到1998年止的15年间, 却高于114个模拟趋势中的93个趋势(文框TS.3, 图1b; HadCRUT4集合平均趋势每十年0.26°C, CMIP5集合平均趋势每十年0.16°C)。在1951-2012年的62年间, 观测到的平均趋势和CMIP5集合平均趋势每十年相差在0.02°C之内(文框TS.3, 图1c; CMIP5集合平均趋势每十年0.13°C)。因此, 具有很高信度的是, CMIP5模式表现出长期GMST趋势与观测相一致, 虽然对最近15年的趋势存在争议。由于内部气候变率, 在任何给定的15年中, 观测到的GMST趋势有时接近模式集合的一端, 这种效应在文框TS.3的图1a, b中非常明显, 因为1998年极强的厄尔尼诺事件对GMST产生了影响。{文框9.2}

与上述CMIP5历史模拟不同, 有些CMIP5预测是根据20世纪90年代末和21世纪初观测到的气候状况进行初始化的。有中等证据量表明, 这些初始化的预测显示, GMST比历史(未初始化)模拟大约低0.05°C至0.1°C, 并且在模拟的最初几年仍然保持这一较低的GMST。有些初始化模式中会出现这样较低的GMST, 部分原因是大约在2000年, 模式正确模拟了年代际太平洋涛动(IPO)由正相位到负相位的变化。然而, 通过初始化改进IPO的这种相变并不普遍适用于CMIP5预测。此外, 尽管通过初始化降低的部分GMST确实是由于在内部变率的正确相位上进行初始化, 另一部分则可能是由于订正模式偏差造成的, 其原因是过去强迫不正确或对过去强迫的模式响应不正确, 尤其是海洋。目前尚不了解这些效应的相对强度; 此外, 利用单一预测(此处
(接下页)

文框TS.3 (续)

为1998-2012年间的一个10年预测)无法评估预报系统的质量。总之,具有中等信度的是,与未初始化的CMIP5历史模拟相比,初始化使1998-2012年GMST模拟与观测到的趋势中断更为一致,且中断部分是由于内部变率,它在多年时间尺度上是可预测的。{11.1, 11.2.3; 文框2.5, 9.2, 11.1, 11.2}

辐射强迫

在年代到年代际时间尺度上,以及在有效辐射强迫持续增加的情况下,GMST趋势的强迫分量对有效辐射强迫趋势做出相对迅速且几乎是线性的响应(中等信度)。预期强迫响应的GMST趋势与有效辐射强迫趋势存在系数关系,估值为CMIP5集合中CO₂增幅每年1%,每摄氏度2.0 [1.3至2.7]W m⁻² (90%不确定性区间)。因此,有效辐射强迫趋势可大致转换为强迫响应GMST趋势,从而评估文框TS.3图1中的GMST趋势变化有多少源于有效辐射强迫趋势的变化。{文框9.2}

AR5最佳估算的1998-2011年有效辐射强迫趋势为每十年0.22[0.10至0.34]W m⁻² (90%不确定性区间),这明显低于1984-1998年的趋势(每十年0.32[0.22至0.42]W m⁻²; 注意,1982年发生了强烈的火山喷发)和1951-2011年的趋势(每十年0.31[0.19至0.40]W m⁻²; 文框TS.3, 图1d-f; 选择2011年为截止年是因为比用于GMST的资料可用性更为有限)。最终的强迫-响应GMST趋势大致分别为:1998-2011年每十年0.12[0.05至0.29] °C、1984-1998年每十年0.19 [0.09至0.39]°C、1951-2011年每十年0.18 [0.08至0.37]°C (不确定性区间假设GMST趋势转换系数区间和有效辐射强迫趋势本身范围是独立的)。因此,AR5最佳估算的1998-2011年与1951-2011年之间有效辐射强迫趋势差异可以解释这两个时段之间大约一半(每十年0.05°C)观测到的GMST趋势差异(每十年0.06至0.08°C,取决于观测资料集)。{8.5.2}

与1984-1998年和1951-2011年相比,AR5最佳估算的1998-2011年有效辐射强迫趋势降低,这主要是由于自然强迫的下降趋势,相比1951-2011年每十年0.01[-0.00至+0.01]W m⁻²,1998-2011年为每十年-0.16[-0.27至-0.06]W m⁻²。太阳强迫从2000年相对最大到2009年相对最小,峰值与峰值之间相差大约为0.15W m⁻²,1998-2011年的线性趋势约为每十年-0.10W m⁻²。此外,在2000年之后,一系列小规模火山喷发增加了观测到的平流层气溶胶含量,导致1998-2011年产生额外负有效辐射强迫线性趋势贡献,约为每十年-0.06W m⁻² (文框TS.3, 图1d, f)。相反,基于卫星反演的对流层气溶胶光学厚度估值表明,过去10年全球平均气溶胶光学厚度没有总体趋势,这意味着气溶胶-辐射相互作用引起的有效辐射强迫几乎无变化(低信度,因为气溶胶光学厚度趋势本身为低信度)。此外,对气溶胶-云相互作用引起的有效辐射强迫估值仅为低信度,因此,其过去15年的趋势同样为低信度。{2.2.3, 8.4.2, 8.5.1, 8.5.2, 10.3.1; 文框10.2; 表8.5}

对于1984-1998年间和1951-2011年间,CMIP5集合平均有效辐射强迫趋势与AR5有效辐射强迫趋势最佳估值仅偏离每十年0.01W m⁻² (文框TS.3, 图1e, f)。然而,1998年后,CMIP5模式中缺少了某些推动有效辐射强迫趋势持续下降的因素,例如2000年后持续增加的平流层气溶胶含量以及2009年异常低的太阳极小期。但是,1998-2011年间,CMIP5集合平均有效辐射强迫趋势比AR5的有效辐射强迫趋势最佳估值每十年低0.03W m⁻² (文框TS.3, 图1d)。此外,CMIP5模式中的全球平均气溶胶光学厚度在1998-2012年间未显示出趋势,与观测资料接近。尽管强迫不确定性很大,但在过去15年,CMIP5模式中没有明显不正确或缺失的全球平均强迫,这可以解释在升温中断期间模式-观测的差异。{9.4.6}

模式响应误差

模拟和观测的1998-2012年间GMST趋势存在差异,部分原因是为响应温室气体浓度的增加,有些CMIP5模式往往模拟的变暖高于与观测的一致性。对第10.3.1节中评估的模式集合求出平均值之后,最佳估算的GHG及其它人为尺度因数均小于1(虽然不十分显著,图10.4),这表明模式平均GHG及其它人为响应须降尺度,以与观测实现最佳匹配。该发现提供的证据表明,某些CMIP5模式显示出对GHG及其它人为因子(主要是气溶胶效应)的响应要大于真实情况(中等信度)。因此,第11章认为,对GMST增加的近期模式预估应将尺度下降约10%。然而,此降尺度不足以解释中断期间对GMST趋势的模式平均值的高估。{10.3.1, 11.3.6}

模式误差的另一可能原因是上层大气中的水汽模拟欠佳。有人提出,2000年后平流层水汽减小导致了

(接下页)

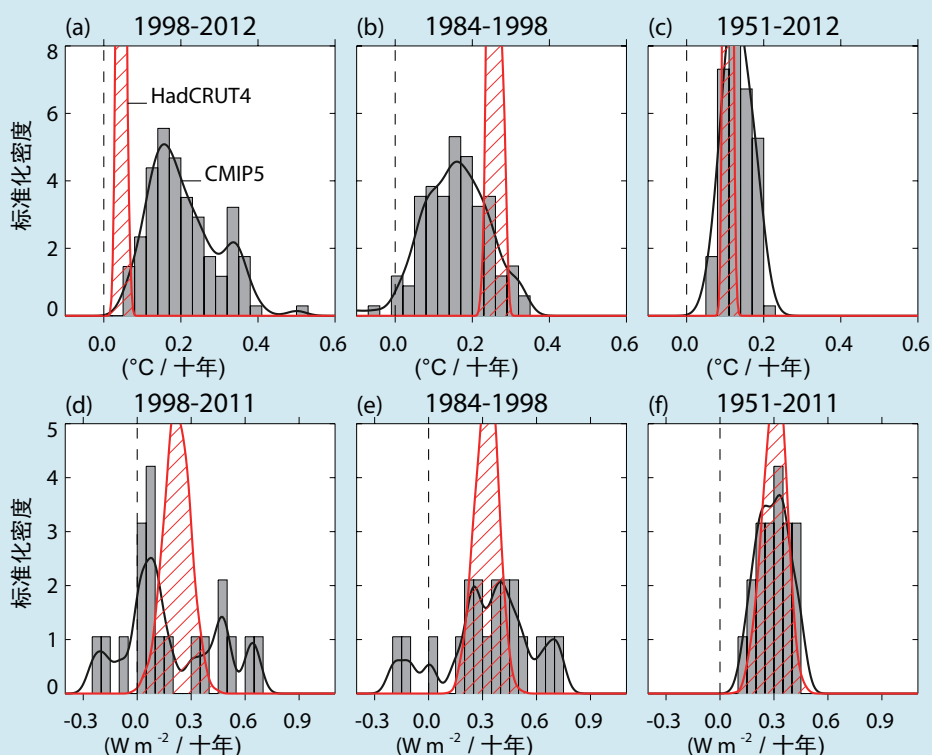
文框TS.3 (续)

下行长波辐射减小, 从而造成地表降温作用, 这可能是模式的遗漏。然而, 评估认为这种效应很小, 因为2005年后平流层水汽得到了恢复。{2.2.2, 9.4.1; 文框9.2}

总之, 观测到的近期变暖中断, 定义为与1951-2012年间的趋势相比, 1998-2012年间GMST趋势下降, 可以大致同样的方法归因为内部变率引起的降温以及外部强迫的下降趋势(专家判断, 中等信度)。强迫趋势下降主要由于火山喷发和太阳活动周期向下相位所产生的负强迫趋势。然而, 量化强迫趋势对于中断的贡献具有低信度, 这是由于火山强迫趋势幅度的不确定性以及气溶胶强迫载荷的低信度。{文框9.2}

几乎所有的CMIP5历史模拟都没有重现观测到的近期变暖中断。具有中等信度的是, 1998-2012年间的模式与观测之间的GMST趋势差异在很大程度上由于内部变率所致, 并可能由于强迫误差和某些CMIP5模式高估对GHG强迫增加的响应所致。CMIP5模式的有效辐射强迫趋势与AR5的1998-2012年最佳估值相比, 并未出现明显的偏差。然而, 对CMIP5有效辐射强迫趋势的评估信度为低, 这主要是因为模式气溶胶强迫和过程的不确定性, 它通过空间非均一性可明显造成某种未检验出的全球平均有效辐射强迫趋势误差, 即使是在缺少全球平均气溶胶载荷趋势的情况下。{文框9.2}

观测到的GMST趋势中断的原因以及1998-2012年模式-观测GMST趋势差异的原因意味着, 除了大的火山喷发以外, 在不远的未来, 多数15年GMST的趋势将大于1998-2012年间的趋势(高信度; 近期GMST估值的全面评估见第11.3.6节)。这种推断有四个方面的原因: 第一, 所有RCP情景都预计人为GHG浓度将进一步上升; 第二, 所有RCP情景都预计人为气溶胶浓度将下降, 因而产生冷却效应; 第三, 预计多数近期15年太阳强迫趋势大于1998-2012年间的趋势(中等信度), 因为1998-2012年间包含了太阳活动周期的全部向下相位; 第四, 多半可能是, 近期内部气候变率将增强, 且不会削弱预期人为强迫递增导致的表面升温。{文框9.2}

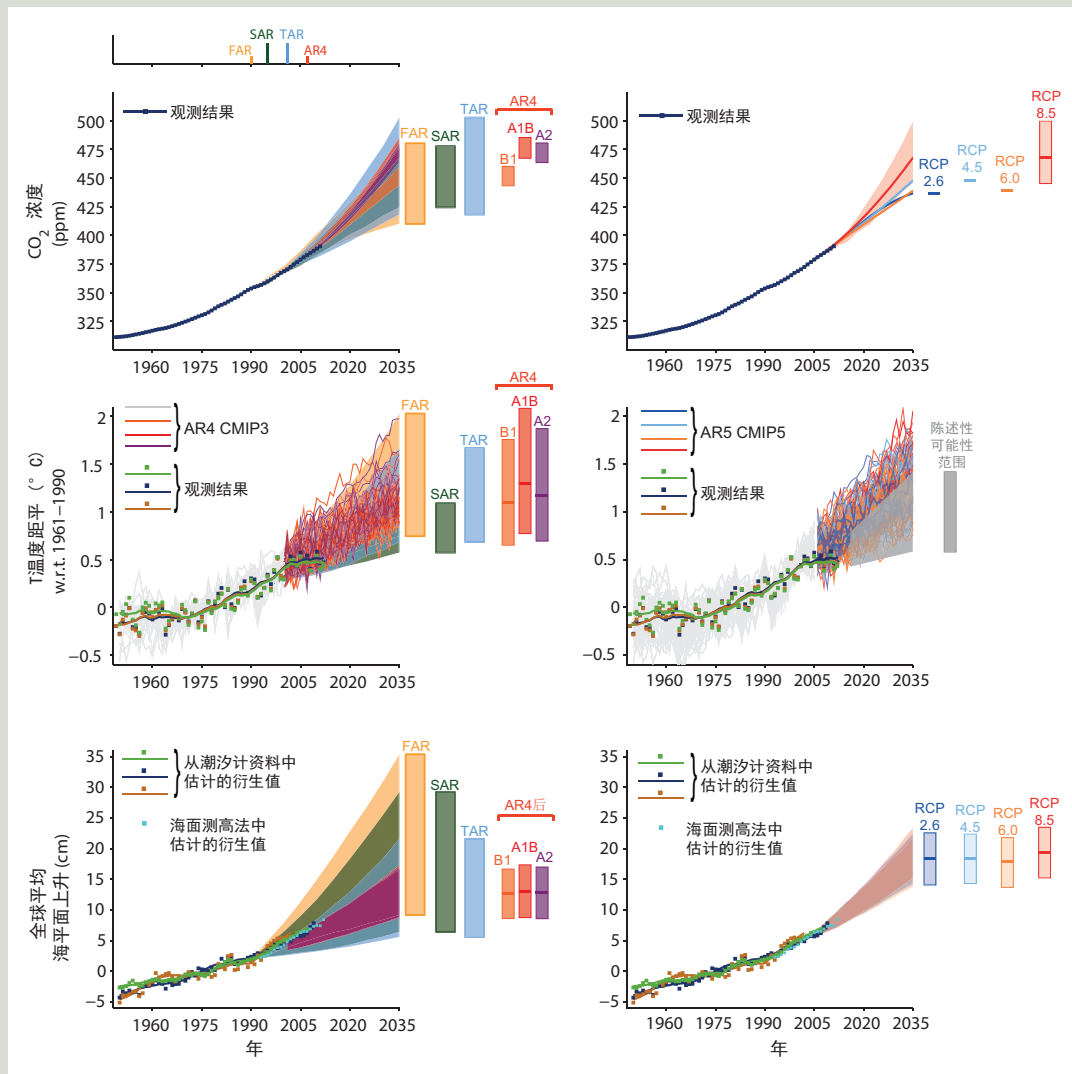


文框TS.3, 图1 | (上图) 1998-2012年(a)、1984-1998年(b)和1951-2012年(c)观测到的和模拟的GMST趋势(单位: $^{\circ}\text{C}/\text{十年}$)。对观测而言, 图中显示了哈得莱中心/气候研究小组格点表面温度资料集4 (HadCRUT4) 集合的100次重现(红影线)。与第2.4.3节引述的趋势不确定性相比, 集合宽度显示出的不确定性仅为全球平均值的统计结构不确定性, 包括内部气候变率估值。与之相比, 内部变率是通过模式集合的宽度表征的。对于模式而言, 图中显示了所有114次CMIP5历史重现, 在RCP4.5情景的2005年之后延至2012年(灰阴影)。(下图) 1998-2011年(d)、1984-1998年(e)和1951-2011年(f)的有效辐射强迫趋势(ERF, 单位: $\text{W m}^{-2}/\text{十年}$)。本图显示AR5最佳估算的有效辐射强迫趋势(红影线)和CMIP5有效辐射强迫(灰阴影)。黑线是直方的平滑形式。每个直方均被归一化, 因而其面积合计为一。{2.4.3, 8.5.2; 文框9.2; 图8.18; 文框9.2, 图1}

专题要素

TFE.3 | IPCC以往评估报告的预估与观测的比较

对预估的检验可以说是最具说服力的建立气候变化科学信誉的方法。IPCC以往各评估报告对二氧化碳(CO₂)、全球平均表面温度(GMST)以及全球平均海平面(GMSL)预估变化的结果可与现有最佳观测估值进行定量比较。此前四次评估报告之间的比对突出强调了我们对气候系统如何响应自然和人为强迫的变化做进一步了解,并评估预估值如何与观测估值进行比较。例如,TFE.3图1列出了下列预估值和观测估值:(1)CO₂变化(上行)、(2)相对于1961-1990年的GMST距平(中行)、(3)相对于1961-1990年的GMSL(下行)。以往评估报告的结果见左侧栏,目前评估的完整结果见右侧栏。{2.4, 3.7, 6.3, 11.3, 13.3}



TFE.3, 图 1 (左上)与IPCC以往各评估报告的预估相比,自1950年以来观测到的全球和年均CO₂浓度(ppm)。观测到的全球年度CO₂浓度以深蓝色表示。阴影部分表示1950-2035年全球年度CO₂浓度的最大模式预估区间,出处: FAR(《第一次评估报告》; 1990年IPCC决策者摘要(SPM)图A.3)、SAR(《第二次评估报告》; 1996年IPCC中的图5b)、TAR(《第三次评估报告》; 2001年IPCC附件2)以及AR4(《第四次评估报告》; 图10.26)所述的IPCC排放情景特别报告(SRES)A2, A1B和B1情景。列明了评估报告的发布年份。(右上)同样观测到的全球平均CO₂浓度和本报告的预估。仅RCP8.5具有数值区间,因为仅针对该RCP采用排放驱动情景。图中给出了其它RCP的最佳估值。(中左)与IPCC以往各评估报告的预估区间相比,自1950年以来相对于1961-1990年的观测到的全球和年度平均

(接下页)

TFE.3 (续)

表面温度距平估算变化(单位: °C)。各数值的校准均从1990年的相同数值开始。哈得莱中心/气候研究小组格点表面温度资料集4 (Had-CRUT4; 亮绿色)、综合陆-海表面温度分析(MLOST; 暖芥木色)和戈达德空间研究所表面温度分析(GISTEMP; 深蓝色)三个资料集相对于1961-1990年观测到的全球年度温度距平显示为直方和实线平滑时间序列。彩色阴影表示在FAR(图6.11)、SAR(1996年IPCC中的图19)、TAR(TAR所有部分, 图9.13(b))中所用模式的1990-2035年全球年均近表面温度变化的预估区间。TAR的结果是基于本评估所述的简易气候模式分析, 而不是基于各个全面的三维气候模式模拟。AR4的结果表述为CMIP3集合的单一模式运算, 针对1950-2000年历史时段(浅灰线)以及三个SRES情景(A2, A1B和B1)下的2001-2035年。在三个SRES情景下, 直方表示CMIP3集合平均以及AR4第10章评估给出的-40%至+60%平均值可能区间。(中右)在CMIP5模式的不同RCP下, (相对于1961-1990年的距平)1950-2035年全球年平均地表气温(GMST)预估(浅灰色及彩色线, 每个模式一个集成员), 观测估值与中左图相同。灰色阴影区域表示2016-2035年所有RCP下, 年均GMST的指示可能区间(详见图TS.14)。灰色直方表示2035年的相同指示可能区间。(左下)自1950年以来观测到的全球年均海平面(GMSL)的预估变化。验潮仪资料的全球年海平面距平的不同变化估值(深蓝色、淡绿色、墨绿色)以及基于1993年起的高度表资料年平均值(浅蓝色)(这些数值已做校准到符合1993年验潮仪资料值)。直方表示年均值, 实线代表平滑值。阴影表示FAR(图9.6和9.7)、SAR(1996年IPCC技术摘要中的图21)和TAR(2001年IPCC附件2)的1950-2035年全球年度海平面升高的最大模式预估区间, 依据的是AR4时期利用SRESA1B情景得出的CMIP3模式结果。注意, 在AR4中, 并未给出这一时期海平面预估的全部区间。因此, 本图所示为AR4之后发布的结果。每张图表右侧直方表示各评估报告给出的2035年的全部区间。(右下)与左下相同的观测估值。直方是相对于1961-1990年, 四个RCP下2035年全球平均海平面上升的可能区间(中等信度)。附件1.A提供了用于创建这些图表所用资料和计算的详情。更多详情见第1、11和13章。{图1.4, 1.5, 1.10, 11.9, 11.19, 11.25, 13.11}

二氧化碳变化

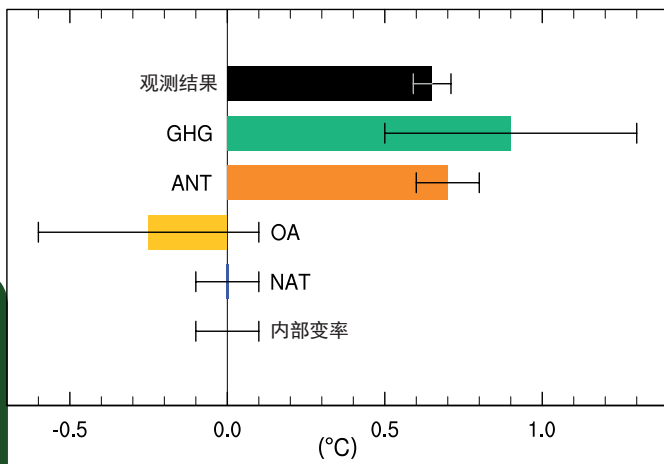
1950-2011年间, 观测到的大气CO₂浓度持续上升。考虑到1990-2011年间, 观测到的CO₂浓度变化处于四次评估报告中使用的情景范围之内。上一次评估报告, 即《IPCC第四次评估报告》(AR4)(TFE.3.图1; 左上)具有最窄的情景范围, 观测到的浓度符合这一范围。《IPCC第五次评估报告》(AR5)(TFE.3, 图1; 右上)的结果与AR4相一致, 在2002-2011年间, 大气CO₂浓度的增长率为每年1.9至2.1 ppm。{2.2.1, 6.3; 表6.1}

全球平均温度距平

相对于1961-1990年间的平均值, 自2001年以来, GMST距平一直为正, 且大于0.25°C。观测值通常处于早期IPCC预估范围内(TFE.3, 图1, 中左)。鉴于观测记录处于模式预估区间之内且在羽状下端, 因而也适用于耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)的结果(TFE.3, 图1, 中右)。1991年皮纳图博火山喷发(见FAQ 11.2关于火山如何影响气候系统的论述), 导致20世纪90年代初期出现了短期的相对全球平均温度下降。IPCC第一、第二和第三次评估报告(FAR、SAR和TAR)没有包括火山喷发的影响, 因此未涵盖与皮纳图博火山喷发有关的降温。然而AR4和AR5包括了火山喷发的影响, 并成功模拟了相关的降温。在1995-2000年间, 全球平均温度距平有显著变化—这一变率的主要因素是1997-1998年发生的大规模厄尔尼诺事件, 以及紧接着在1999-2001年间的强拉尼娜事件。与这些评估报告有关的预估并没有力图获取这些厄尔尼诺和拉尼娜事件的实际演变, 而是将其列为自然变率导致的不确定性根源, 比如就像各CMIP3和CMIP5模拟和预估给定的区间所涵盖的不确定性根源一样(TFE.3, 图1)。TFE.3图1(中右)中灰色楔形符号表示年温度的指示可能区间, 它由典型浓度路径(RCP)2016-2035年20年平均估值确定(详见图TS.14和第11.3.6节的论述)。从1998到2012年, 观测估值主要在以往评估报告各情景和CMIP3及CMIP5预估区间的低端。{2.4; 文框9.2}

全球平均海平面

相对于1961-1990年, 根据验潮仪和卫星测高资料, GMSL持续升高。虽然是相当稳步地上升, 但上述两种观测记录表明, 短期未发生变化或略有下降。或许除了在20世纪90年代初期之外, 观测到的估值均在所有预估的区间之内。由于情景相关不确定性带来的海平面上升的不确定性在最近的评估报告(AR4和AR5)中是最小的, 且观测到的估值均在该情景相关不确定性区间内。几乎确定的是, 20世纪海平面已上升。海平面平均上升速率为1.7毫米/年, 1901-2010年的区间很可能是1.5至1.9之间, 而1993-2010年上升率增至3.2, 可能区间为2.8-3.6毫米/年(见TFE.2)。{3.7.2, 3.7.4}



图TS.10 | 由于充分混合的温室气体(GHG)、人为强迫(ANT)而非充分混合的温室气体(OA)、自然强迫(NAT)和内部变率引起的1951-2010年变暖趋势的评估的*可能*区间(须状)及其中间点(直方)。哈得莱中心气候研究小组格点表面温度资料集4(HadCRUT4)观测的趋势以黑色表示,其不确定性区间为5-95%,惟一原因是该记录中的观测不确定性。{图10.5}

年,观测到的全球平均表面温度上升中,有一半以上*很可能*是由于观测到的人为WMGHG浓度上升。在1951-2010年,WMGHG推动全球平均地表升温*可能*达0.5°C至1.3°C,而其它人为强迫作用*可能*为-0.6°C至0.1°C,自然强迫的作用*可能*是-0.1°C至0.1°C。这些评估的贡献与观测到的这一时期大约0.6°C的升温相一致(图TS.10)。{10.3}

太阳强迫是致使1951-2010年间气候变暖的惟一已知自然强迫,但它的增长远低于WMGHG强迫,且观测到的长期对流层变暖和平流层降温型态与预期对太阳辐射度变化的响应不一致。考虑到该证据以及评估的这一时期自然强迫对观测趋势的贡献,评估认为,1951年以来太阳强迫对观测到的全球变暖的贡献*极不可能*大于WMGHG强迫。因为1986-2008年用卫星直接测量太阳输出的时期,太阳强迫*很可能*已经减小,因此,具有*高信度*的是,太阳总辐照度变化并未对这一时期的全球变暖做出贡献。然而,具有*中等信度*的是,太阳变率的11年周期通过放大机制影响了一些地区的年代际气候波动。{8.4, 10.3; 文框10.2}

过去60年观测到的变暖远远超出使用仪器前的资料所估算的内部气候变率区间,也远远超出气候模式模拟的内部变率区间。对基于模式的内部变率模拟的评估足以开展此次评估。此外,观测到的变暖的空间分布不同于与内部变率相关的分布。根据此项证据,评估了内部变率对1951-2010年GMST趋势的贡献,*可能*区间为-0.1°C至

0.1°C,几乎确定的是,仅凭内部变率无法解释自1951年以来的变暖。{9.5, 10.3, 10.7}

器测记录表明20世纪上半叶出现了显著变暖。与AR4相一致,评估认为,20世纪早期的变暖*极不可能*只是由于内部变率。由于强迫和响应不确定性以及观测覆盖率不足,因此仍然难以量化内部变率、自然强迫以及人为强迫对20世纪早期变暖的贡献。{10.3}

TS.4.3 大气温度

AR4以来的一些研究都探究了自由对流层温度的模拟与观测到的趋势的一致性(见TS.2节)。大多数(尽管并非所有)CMIP3和CMIP5模式会高估1979-2012年卫星周期已观测的热带对流层变暖趋势。在这种不同于观测到的趋势的差异中,大约有一半到三分之二是由于高估SST趋势,由于模式力图保持静态稳定,所以这种趋势会向上扩散。然而,由于观测到的热带对流层趋势率和垂直结构为*低信度*,所以这些评估也为*低信度*。在热带地区以外,在1961年开始的探空仪记录时期,模拟和观测到的趋势差异较小{2.4.4, 9.4, 10.3}

无线电探空仪资料集和卫星资料集的分析,并结合CMIP5和CMIP3模拟,仍然发现观测到的对流层变暖与内部变率和仅对自然强迫响应的模拟结果不一致。1961-2010年CMIP5模式模拟以WMGHG变化为驱动的对流层变暖,只有很小的抵消变冷作用,原因是气溶胶的反射和吸收变化以及对流层臭氧的共同作用。根据这个证据并结合多信号检测和归因分析,以WMGHG为主的人为强迫*可能*为自1961年以来的对流层变暖作出了贡献。无线电探空仪和卫星记录的不确定性使对观测到的对流层上部趋势的原因评估信度低于总体大气温度变化的评估。{2.4.4, 9.4, 10.3}

CMIP5模拟包括WMGHG、臭氧和自然强迫变化,这可大体再现观测到的平流层下部温度演变,有时往往会低估卫星时代观测到的变冷趋势(见第TS.2节)。关于平流层温度的最新研究考虑了对自然强迫的响应、WMGHG和消耗臭氧物质。研究表明,自1979年以来,以消耗臭氧物质引起臭氧层消耗为主的人为强迫*很可能*为平流层下部变冷作出了贡献。CMIP5模式只模拟出平流层下部对历史WMGHG变化作出极弱降温响应,而WMGHG对平流层下部温度的影响尚未正式检测到。将这两个区域统一考虑,人为强迫,特别是WMGHG和平流层臭氧损耗,*很可能*导致出现可检测到的自1961年以来观测到的对流层变

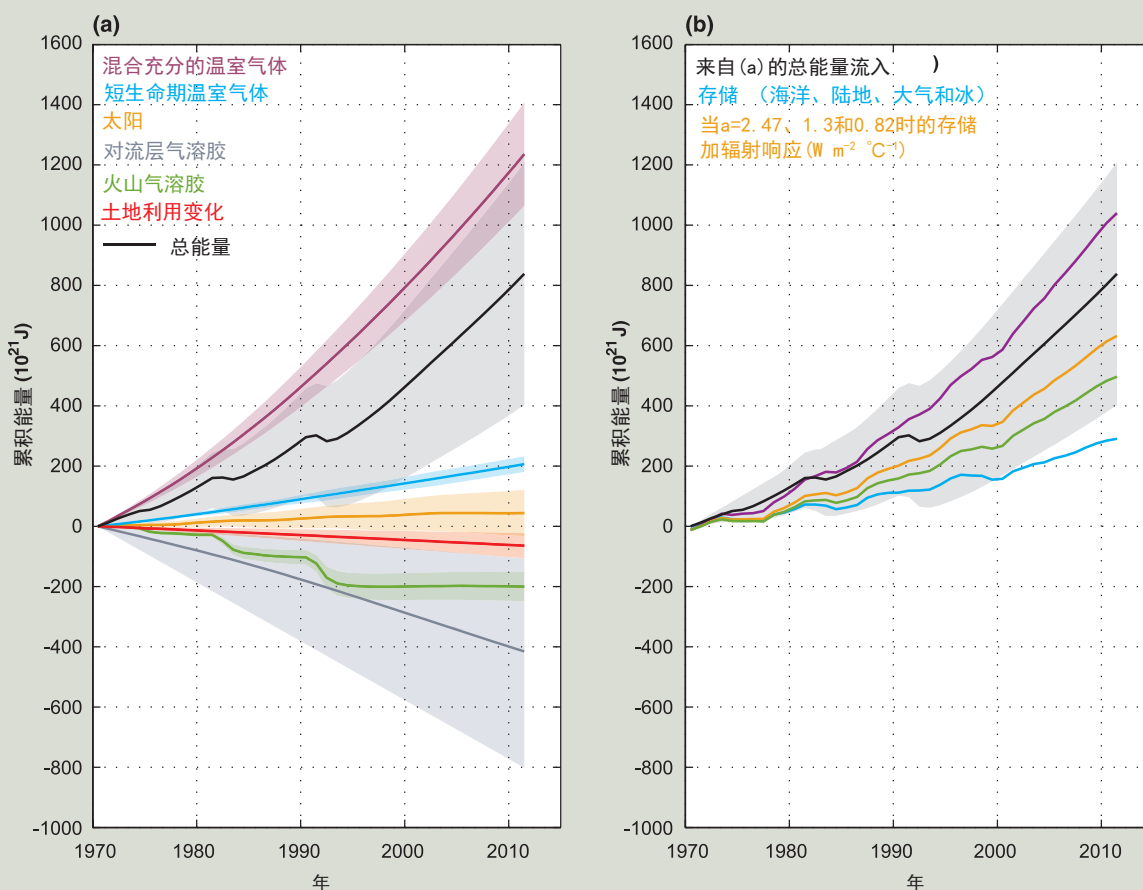
专题要素

TFE.4 | 全球气候系统不断变化的能量收支

全球能量收支是地球气候系统的基本方面，且取决于地球系统中的许多现象。海洋储存了近几十年来气候系统约93%的能量增量，导致海洋热膨胀及其后的海平面上升。地球系统能量存储率一定等于大气层顶的净向下辐射通量，它是地球系统承受变化引起的有效辐射强迫(ERF)与地球系统辐射响应之间的差。而气候系统各组成部分之间以及从一个地点到另一个地点也有明显的能量转移。由于1970年后全球观测资料的覆盖率更高，所以这里重点讨论的是1970年后的地球全球能量收支。{3.7, 9.4, 13.4; 文框3.1}

由于混合充分的(长生命期)温室气体(GHG)浓度的上升、短生命期温室气体(对流层和平流层臭氧和平流层水汽)的变化，以及太阳辐照度的上升(TFE.4, 图1a)，气候系统的有效辐射强迫为正。尽管黑碳会产生正强迫，但正有效辐射强迫已得到了部分抵消，因为对流层气溶胶的变化对气候系统的有效辐射强迫具有负贡献，它主要反射阳光，并且增强云亮度。火山猛烈喷发(如1982年墨西哥的厄尔奇冲火山和1991

(接下页)



TFE.4, 图1 | 1970至2011年地球能量收支。(a) 彩色线表示由混合充分的短生命期温室气体、太阳辐射、对流层气溶胶强迫、火山强迫和土地利用变化引起的地表反照率变化(均相对于1860-1879年)导致的地球系统累积能量流入; 这些贡献相加得出总能量流入(黑色; 雪上的黑碳、凝结尾流和凝结尾流卷云的作用也包括在内, 但没有单独列出)。(b) 地球系统能量吸收(蓝色; 海洋、大气和陆地升温以及融冰所吸收的能量)和根据全球平均表面温度变化推断出的向外辐射增加, 二者之和抵消了来自(a, 黑色)中的累积总能量流入。图中针对气候反馈参数 a (分别为每摄氏度 2.47 、 1.23 和 $0.82 W m^{-2}$)求出了这两项之和, 分别对应平衡气候敏感性 $1.5^{\circ}C$ 、 $3.0^{\circ}C$ 和 $4.5^{\circ}C$; 评估认为 $1.5^{\circ}C$ 至 $4.5^{\circ}C$ 是平衡气候敏感性的可能区间。在某个特定 a 值下, 如果对应的线与总能量流入重合, 则能量收支将闭合。为了明确起见, 列出的所有不确定性(阴影)均为可能区间。{文框12.2; 文框13.1, 图1}

TFE.4 (续)

年菲律宾的皮纳图博火山)会使二氧化硫进入平流层,使平流层的气溶胶增加,并驻留数年。平流层气溶胶反射一部分入射太阳辐射,从而产生负强迫,土地利用变化引起的地表反照率变化也已使短波辐射更多地反射回太空,所以产生负强迫。自1970年起,气候系统的净负有效辐射强迫增加,这些强迫的综合影响是这段时期能量流入(TFE.4;图1a)。**{2.3, 8.5; 文框13.1}**

随着气候系统变暖,能量通过更多的向外辐射散失到太空。系统的这种辐射响应主要是由于热辐射的增加,但它被气候反馈所修正,如水汽、云和地表反照率等变化,这会影响到向外长波辐射和反射的短波辐射。地球辐射收支试验(ERBE)卫星在1985至1999年测量了大气层顶通量,云地辐射能量系统(CERES)卫星自2000年3月至今仍在测量这一通量。大气层顶辐射通量的测量精确度非常高,从而能在ERBE和CERES卫星使命中确定地球净能量收支的逐年变化,但仪器的绝对校准并不十分准确,无法确定大气层顶的绝对能量通量,也使这两个卫星使命无法提供连续性。TFE.4中的图1b将地球系统累计总能量变化与能量储存和累积向外辐射变化相联系。后者的计算是基于观测到的全球平均表面温度乘以气候反馈参数 α ,这又涉及到平衡气候敏感性。 α 的中位数 $1.23 \text{ W m}^{-2}/\text{摄氏度}$ 对应的有效辐射强迫是翻倍的二氧化碳浓度 3.7 W m^{-2} [2.96 到 4.44 W m^{-2}]加上 3.0°C 的平衡气候敏感性。气候反馈参数 α 可能会处于每摄氏度 0.82 至 2.47 W m^{-2} 的区间(对应平衡气候敏感性的可能区间为 1.5°C 至 4.5°C)**{9.7.1; 文框12.2}**

如果有效辐射强迫是固定的,气候系统最终将充分变暖,辐射响应会平衡有效辐射强迫,气候系统的能量储存将不会有进一步的变化。然而,强迫在不断增加,海洋巨大的热容量意味着气候系统并不处于辐射平衡,其能量含量在增加(TFE.4,图1b)。这种储存提供了气候变化的有力证据。大部分这种额外的热量处于海洋上层700米中,但深海中温度也在上升。自1970年以来,海洋相关的热膨胀已促使观测到的海平面上升了大约40%。少量的额外热量能够使各大陆变暖、冰川和海冰升温融化、大气升温。**{13.4.2; 文框3.1, 13.1}**

除了地球能量收支的这些强迫变化,还有年代时间尺度的内部变率。观测和模式表明,因为大气的热容量相对较小,在全球变暖的过程中也会出现表面温度的十年稳定甚至下降。气候模式模拟表明,这些周期伴随着热量从海洋上层向更深层输送,量级为 0.1 W m^{-2} ,同时向空中输送近乎稳定或增加的辐射,量级也为 0.1 W m^{-2} 。虽然这些自然波动说明热量巨大,但它们明显小于地球能量收支中的人为强迫,特别是在几十年或更长的时间尺度上。**{9.4; 文框9.2, 13.1}**

将有效辐射强迫、观测到的热储量和地表变暖等现有的独立估算相结合,得出地球能量收支,这与估算的不确定性区间内平衡气候敏感性的可能区间相一致(高信度)。地球能量收支中各项的量化,以及对于这些项在最近几十年保持平衡的验证,为我们了解人为气候变化提供了有力证据。**{文框13.1}**

暖而平流层下部变冷的型态。**{2.4, 9.4, 10.3}**。

TS.4.4 海洋

自AR4以来,利用更新的观测资料和更多的模拟,对20世纪末和21世纪初观测到的海洋上层变暖及其原因进行了更为全面的评估(见第TS.2.2节)。观测到的长期趋

势和变率大多符合对人为强迫和火山强迫响应的模拟。观测到的海洋上层变暖(包括全球平均和流域尺度型态变化)也已检测到了人为指纹。这个结果对于许多观测、模式和方法或结构的不确定性而言很有说服力。人为强迫很可能为自20世纪70年代以来观测到的海洋上层(700米以上)变暖作出了很大贡献。这种人为海洋变暖通过热膨胀为

这一时期全球海平面的上升作出了贡献。{3.2.2, 3.2.3, 3.7.2, 10.4.1, 10.4.3; 文框3.1}

观测到的表面盐度变化也表明全球水循环已发生了变化(见TFE.1)。长期趋势表明, 1950至2000年, 表面盐度的平均气候和表面盐度的时间变化之间有很强的正相关。这种相关性显示了气候盐度型态增强, 因此淡水区变得更淡, 咸水区盐度更高。人为影响信号最强的地区是在热带(30°S到30°N)和西太平洋。随着人为强迫的显著贡献, 太平洋和大西洋之间的盐度差也已增大。{3.3, 10.3.2, 10.4.2, FAQ 3.2}

在全球尺度上, 水柱上层250米的表层和次表层盐度变化(1955-2004)与自然变率的预期变化不符, 但与强迫变化(WMGHG和对流层气溶胶)的模拟分布相符。从仅有太阳强迫和火山强迫变化模拟得出的自然外部变率与观测完全不相符, 所以排除了观测到的趋势可以只用太阳变化或火山变化解释的假设。基于这些证据和我们对物理过程的了解, 从而得出结论: 人为强迫很可能对20世纪60年代以来表层和次表层盐度变化做出了可辨别的贡献。{10.4.2; 表10.1}

氧是海洋中重要的物理和生物示踪物。对20世纪60年代到90年代氧气的全球分析将空间范围从局地扩展到了全球尺度, 并连同地球系统模式(ESM)有限区域的输出结果, 用于归因研究。结论认为, 具有中等信度的是, 观测到的海洋溶解氧下降的全球型态, 部分可归因于人类影响。{3.8.3, 10.4.4, 表10.1}

观测资料呈现出海洋酸化的不同趋势(观测值区间为每年-0.0014至-0.0024pH单位)。具有高信度的是, 因为海洋吸收人为二氧化碳, 自工业化时代开始以来, 海洋表层海水的pH值下降了约0.1。{3.8.2, 10.4.4; 文框3.2, 表10.1}

TS.4.5 冰冻圈

北极海冰面积和北半球积雪范围的缩小、冰川普遍退缩, 以及格陵兰冰盖表面进一步融化, 这些都证明冰冻圈发生了系统性变化。冰冻圈的所有这些变化都与人为强迫有关。{4.2.2, 4.4-4.6, 10.5.1, 10.5.3; 表10.1}

归因研究将20世纪50年代观测到的北极海冰面积季节变化与耦合模式模拟的变化相比较, 表明20世纪90年代初以来, 可以明显检测到人类对海冰面积变化的影

响。5月至12月的各个月份中也可以检测到人类活动信号, 这表明在夏末最强的人类影响目前也延伸到较冷的季节。根据对海冰的这些模拟和器测记录的观测到的海冰面积以及各项研究之间的高一致性得出的结论是, 自1979年以来, 人为强迫很可能为北极海冰损失作出了贡献(图TS.12)。{10.5.1}

关于南极海冰面积, 由于缺乏观测记录, 以及模拟和观测到的变率之间存在差异, 因而无法评估1979年以来观测到的海冰面积增加是否与内部变率不一致。与南极和周边海域的趋势和变化相关的各个过程仍然不易理清, 而且有些研究是相互矛盾的。总之, 具有低信度的是, 由于CMIP5模式的海冰模拟之间差异很大, 以及对变化起因的科学解释不全面且存在矛盾, 而且内部变率的估算为低信度, 所以对1979年以来观测到的南极海冰面积增加的科学认知为低信度(图TS.12)。{9.4.3, 10.5.1; 表10.1}

20世纪出现了创记录温度, 这与夏初大气环流位置持续变化有关。格陵兰冰盖近年发生了重大融化事件正是对上述温度作出的响应, 而自2007年以来大气环流位置变化更为突出。虽然格陵兰的许多器测记录相对较短(20年), 但区域模拟和观测都一致表明, 格陵兰的温度和冰盖径流都对更大尺度流态相关的区域大气环流变化以及全球温度上升作出了响应。由于暖水侵入有冰川的大峡湾, 如雅各布港冰川, 格陵兰也发生了冰物质损失和融化。人为强迫可能为1993年以来格陵兰冰盖的表面融化作出了贡献。{10.5.2; 表10.1}

对2000年以来南极冰物质的估算表明, 南极边缘的冰物质损失最大。对南极西部外海浮冰架下方观测资料的分析得出结论, 认为主要由于融冰率加速, 造成这一地区的海洋变暖、海洋环流输送的热量增加。南极冰物质损失的观测记录时间短, 而且对冰盖的内部变率也缺乏了解。由于科学认知水平较低, 所以对观测到的1993年以来南极冰盖冰物质损失的归因为低信度。{3.2, 4.2, 4.4.3, 10.5.2}

目前关于变暖和水分变化造成冰川退缩的证据比AR4时更为完整。对观测到的冰物质损失的估算以及根据长期冰川记录对自然变化和内部变率进行的估算具有高信度。基于这些因子以及我们对冰川响应气候驱动因子的了解, 具有高信度的是, 冰川物质损失的很大一部分可能是由于人类影响。1970年以来观测到的北半球积雪减少可能有人为分量。{4.3.3, 10.5.2, 10.5.3; 表10.1}

专题要素

TFE.5 | 不可逆性与突变

目前已提出了气候系统内可能表示阈值行为的一些组分或现象。交叉这些阈值会使气候系统或其一些组分突然或不可逆转地过渡到不同状态。

本次IPCC《第五次评估报告》(AR5)将气候突变定义为在几十年或更短时间内气候系统发生的大尺度变化,至少持续(或预期持续)几十年,并对人类系统和自然系统造成严重干扰。目前已有关于突变潜在后果的信息,但关于21世纪发生此类事件的可能性总体为低信度,而且几乎没有一致性。各个组分易受此类突变影响的实例有:大西洋经向翻转环流(AMOC)强度、包合物甲烷释放、热带和北方森林枯死、北冰洋夏季海冰消失、长期干旱和季风环流。{5.7, 6.4.7, 12.5.5; 表12.4}

如果系统由于自然过程从扰动状态中恢复所需的时间尺度显著长于系统达到这种扰动状态所用的时间,则这种变化就称为不可逆的。出现这种行为的原因可能是扰动和恢复过程的时间尺度不同,或者是由于大气中二氧化碳(CO₂)扰动的存留时间长,造成持续的气候变化(见TFE.8)。评估认为北冰洋夏季海冰面积变化、长期干旱变化和季风环流变化在几年到几十年内是可逆的,而热带或北方森林回枯可能仅在几个世纪内是可逆的。水合物甲烷和多年冻土碳释放的变化、格陵兰冰盖和南极冰盖崩塌在因果扰动后的几千年内可能是不可逆的。{5.8, 6.4.7, 12.5.5, 13.4.3, 13.4.4; 表12.4}

与AMOC相关的气候突变

新的瞬变气候模式模拟已确认,具有高信度的是,AMOC强度的强烈变化造成全球尺度的气候突变,其幅度和形态类似于过去的冰川丹斯加德-厄施格事件和海因里希冰川退缩。自IPCC《第四次评估报告》(AR4)以来,北大西洋气候变化和低纬度降水变化之间联系的信度有所增加。根据新的古气候重建和模拟研究,具有很高信度的是,AMOC强度降低和北大西洋区域相关海面变冷,造成了大西洋热带辐合带南移,并影响了美洲(南美和北美)季风,非洲季风和亚洲季风。{5.7}

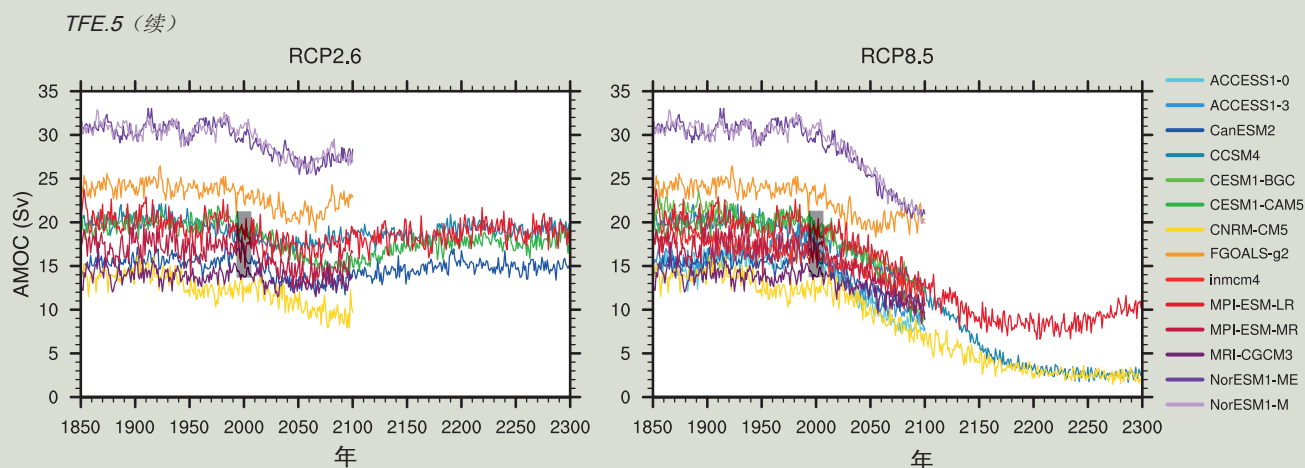
AMOC间冰期模态能够从短生命期淡水流入副极地北大西洋中得到恢复(高信度)。约8200年前,在北美冰盖融化的最后阶段突然发生淡水释放。古气候观测和模式结果表明,具有高信度的是,AMOC的强度显著降低,随后在扰动后大约200年内迅速恢复。{5.8.2}

虽然自AR4以来,在各类未来强迫情景下进行了更多的模式模拟,但对AMOC特性的预估没有变化。相对1850-1900年的值,AMOC在21世纪仍然很可能减弱。耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)中关于这种减弱的最佳估值和区间在典型浓度路径RCP2.6下为11%(1-24%),在RCP8.5下为34%(12-54%),但减弱的幅度为低信度。在所考虑的情景下,AMOC在21世纪仍然很可能突变或崩溃(高信度)(TFE.5,图1)。对于AMOC发生突变,AMOC对强迫的敏感性必须要远大于目前模式中看到的敏感性,或需要格陵兰冰盖的融水通量大大超过目前的最高预估。虽然不能完全排除这两种可能性,但是在所考虑的情景下,AMOC在21世纪末之后不可能崩溃,但是不排除21世纪后由于显著持续升温致使AMOC崩溃。因为分析数量有限,结果不明确,对21世纪后AMOC演变的评估为低信度。{12.4.7, 12.5.5}

多年冻土、甲烷水合物和森林变化的潜在不可逆性

在气候变暖条件下,多年冻土融化会导致在冻土中累积留存数百年到数千年的碳分解,造成大气CO₂和/或

(接下页)



TFE.5, 图1 | 不同大气-海洋环流模式模拟的大西洋经向翻转环流 (AMOC) 响应RCP2.6情景(左)和RCP8.5情景(右)在30°N (Sv) 的强度, 以年为函数, 时间范围为1850至2300年。竖黑直方表示在26°N测量的2004至2011年AMOC强度区间 {图3.11, 12.35}

甲烷 (CH₄) 浓度上升。关于在未来变暖情况下多年冻土碳平衡的模拟研究至少考虑了某些多年冻土相关的重要过程, 但研究没有得出一致结果, 只是知道在合理的未来变暖情景下, 当今的多年冻土在21世纪将成为碳的净排放源(低信度)。这也反映出没有充分理解多年冻土融化期间和之后的相关土壤过程(包括导致非冻土碳稳定的过程), 而且无法定量评估与多年冻土脱气和相关反馈潜在相关的气候系统不可逆变化的幅度。{6.4.7, 12.5.5}

人为变暖很可能会增加陆地和海洋包合物的CH₄排放。海床下的甲烷包合物的沉积物很容易由于海洋变暖变得不稳定。但是海洋质量变化引起的海平面上升会提高海洋中包合物的稳定性。虽然难以正式评估, 但对21世纪甲烷包合物不稳定性反馈的初步估算为程度小, 但不容忽视。包合物中的甲烷很不可能在21世纪产生灾难性释放(高信度)。在数千年时间尺度上, 由于释放和累积的时间尺度之间存在差异, 此类甲烷排放可对人为变暖提供正反馈, 而且也许是不可逆的。{6.4.7, 12.5.5}

单纯在气候变化驱动下, 亚马逊和其它热带雨林是否存在关键气候变化驱动的回枯阈值仍然存在高度不确定性。不排除降水量和旱季持续时间的临界阈值交叉的可能性。北方森林对预估气候变化的响应也是高度不确定, 而目前不能排除临界阈值的存在。对大面积热带和/或北方森林崩溃的预估为低信度。{12.5.5}

冰冻圈变化的潜在不可逆性

在CO₂上升和下降的敏感性研究中, 使用大气-海洋环流模式 (AOGCM) 或地球系统模式 (ESM) 直接评估了海冰损失的可逆性。研究表明, 没有证据表明北极海冰会在任何方面出现不可逆变化。相反, 由于在南大洋表层和深层海水之间的强烈耦合, 结合起伏不定的大气CO₂浓度, 有些模式中的南极海冰呈现某种滞后行为。{12.5.5}

目前, 尽管由于流入海洋的冰量超过净表面冰物质平衡, 使格陵兰冰盖和南极冰盖的冰物质出现损失, 但二者都有正表面冰体平衡(降雪超过融化)。正反馈会减少冰盖体积及范围, 而冰盖表面高度的下降会导致表面冰体平衡降低。这种情况的出现通常是由于表面融化增加, 因此在21世纪适用于格陵兰, 但不适用于南极, 因为南极目前表面融化非常少。在充分混合温室气体辐射强迫情景下, 预估在几个世纪后南极表面融化将会成为重要因素。{4.4, 13.4.4; 文框5.2, 13.2}

(接下页)

TFE.5 (续)

流入海洋的冰盖突变可能是由于一些地区的陆地缘线的不稳定退缩，这些地区的基岩低于海平面，并朝冰盖内部向下倾斜。这主要适用于南极西部，但也适用于南极东部和格陵兰的部分地区。冰架衰退可引发陆地缘线退缩，这是由于冰架下较暖海水会加剧水下冰架融化，或冰架表面的融水池塘会促使冰架断裂。由于冰盖的增长是一个缓慢的过程，在这里所用的定义中，此类变化将是不可逆的。{4.4.5；文框13.2}

具有**高信度**的是，在过去几百万年间，全球温度比现在高，在这段时期格陵兰冰盖和南极西部冰盖的体积缩小。冰盖模式模拟和地质资料表明，南极西部冰盖对次表层海洋变暖非常敏感，并且具有**中等信度**的是，这意味着如果大气CO₂浓度在几千年内保持或超过350-450ppm，南极西部冰盖则将退缩。{5.8.1，13.4.4；文框13.2}

现有证据表明，全球变暖超过阈值将导致格陵兰冰盖在一千年或更长时间内几乎完全损失，造成全球平均海平面约上升7米。利用当今固定冰盖地形进行的研究指出，该阈值即为全球平均表面温度比工业化时代前高2°C但低于4°C (**中等信度**)。利用动力学冰盖进行的一项研究表明，该阈值为全球平均升温比工业化时代前高1°C (**低信度**)。鉴于科学不确定性的现状，无法量化**可能**区间。格陵兰冰盖完全损失并非不可避免，因为这需要一千年或以上的的时间；如果在冰盖完全消失前温度下降，冰盖则可能会再增长。然而，部分冰物质损失可能是不可逆的，这取决于超出阈值的持续时间和程度，因为由于冰盖与区域气候的相互作用，冰盖可具有多个稳定状态。{13.4.3，13.4.4}

TS.4.6 水循环

自AR4以来，已出现新的证据，表明在水循环的几个方面有可检测到的人为影响。具有**中等信度**的是，自1973年以来观测到的近地表比湿变化含有可检测到的人为分量。从特种传感器微波/成像仪(SSM/I) 1988-2006年的数据反演的对流层下部水分含量估算中检测到了气候模式集合模拟出的人为水汽指纹。发现人类活动对流层比湿增加作出了贡献，这一发现具有**中等信度**。{2.5，10.3}

全球纬向平均陆地降水和北极降水归因研究都发现了可检测到的人为影响。人类对全球尺度降水分布变化的影响总体为**中等信度**，包括北半球中高纬度地区的增加。其余的观测不确定性和模拟不确定性，以及内部变率对观测到的降水的巨大影响妨碍了作出更可信的评估。{2.5, 7.6，10.3}

基于收集到的比湿、陆地降水以及与降水和蒸发有关的海面盐度归因变化证据(有不同的信度和可能性)，以及根据对水循环的物理认知，自1960年以来人类活动**可能**已对全球水循环产生了影响。这是自AR4以来的重大进展。{2.4，2.5，3.3，9.4.1，10.3，10.4.2；表10.1；FAQ3.2}

TS.4.7 极端气候

一些最新归因研究发现，观测到的暖昼和暖夜的频率增加，冷昼和冷夜的频率减少，这些方面都有可检测到的人为影响。自AR4和SREX以来，对于检测人类对极暖昼温的影响方面发现了新证据。有新证据表明，在全球尺度、某些大陆和次大陆区域，可区分出自然强迫的影响和人为强迫的影响。这强化了AR4和SREX的结论，而目前人为强迫**很可能**已为自20世纪中期以来观测到的全球尺度日温度极值的频率和强度变化作出了贡献。人类的影响**可能**显著增加了某些地方发生热浪的概率。对极端天气和气候事件的评估摘要见TFE.9和TFE.9的表1。{10.6}

自AR4以来，关于极端降水的人为影响，有一些新的、有限的直接证据(包括一个正式的检测与归因研究)和间接证据表明，鉴于全球水文循环各方面人为影响的证据，以及具有**高信度**的是极端降水事件强度将随变暖而增加，且比率超过平均降水，因而极端降水预计已经增加。在观测覆盖率足以开展评估的陆地地区，具有**中等信度**的是人为强迫已为20世纪下半叶全球尺度强降水的增强作出了贡献。{7.6，10.6}

从全球而言，热带气旋活动变化归因于人类影响具

有低信度。这是由于观测证据不足，对气候和热带气旋活动的人为驱动因子之间的联系缺乏切实的认知，而且关于内部变率、人为强迫和自然强迫的相对重要性在各项研究之间的一致性较低。在北大西洋地区，具有中等信度的是，北大西洋气溶胶强迫减少至少为自20世纪70年代以来观测到的热带气旋活动的增加作出了部分贡献。关于内部变率、WGMHG强迫和气溶胶对于观测到的这种趋势的相对重要性仍然存在很大分歧。{2.6, 10.6, 14.6}

虽然AR4的结论认为，人为影响多半可能对20世纪下半叶加大的干旱风险作出了贡献，但对观测证据的最新评估表明不再支持AR4关于自20世纪70年代以来全球水文干旱上升趋势的结论。由于观测到的大尺度干燥趋势的低信度，加上难以将干旱年代际尺度变率与长期气候变化区分开，现在将自20世纪中期以来全球陆地干旱变化归因于人类影响列为低信度。{2.6, 10.6}

TS.4.8 从全球到区域

从更长期的视角来看，外部强迫对驱动工业化时代前时期半球尺度气候变率起到了很大作用(文框TS.5)。很不可能仅以内部变率来解释1400年至1850年北半球温度的变化。具有中等信度的是，外部强迫为850年至1400年北半球温度变率作出了贡献，也为过去5个世纪欧洲的温度变动作出了贡献。{5.3.3, 5.5.1, 10.7.2, 10.7.5; 表10.1}

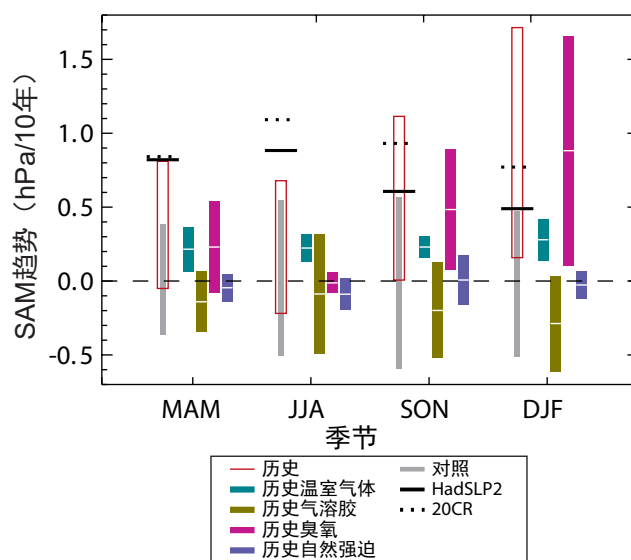
大气环流变化对于局地气候变化很重要，因为这会导致某一特定区域的气候变化比其它地方更大或更小。人类影响可能已改变了全球海平面气压型态。具有中等信度的是，平流层臭氧消耗促使观测到的南半球夏季哈得莱环流的南部边界向极地漂移。平流层臭氧消耗可能为20世纪中叶以来南半球夏季观测到的SAM正趋势作出了贡献，这与高纬度地区海平面气压下降而亚热带地区气压上升相吻合(图TS.11)。{10.3}

更有力的证据表明，观测到的气候系统变化目前可归因于人类在气候系统许多组分中开展的全球和区域尺度活动(图TS.12)。对观测不确定性的研究已比以前更为透彻，新一代气候模式已经推断出人类影响的指纹。目前对海洋变化(包括盐度变化)有了更深入的认识，这与气候模式预测的水循环大尺度加强相一致。近表面温度、自由大气温度、海洋温度以及北半球积雪和海冰面积等方面的变化综合在一起，不仅呈现出全球平均变化，而且还显示出

独特的区域型态，这与预期的人为强迫变化指纹和预期的火山喷发响应相一致(图TS.12)。{10.3-10.6, 10.9}

在几乎所有所评估的气候系统主要组分中都检测到了人类影响(图TS.12)。总体而言，综合证据提高了对观测到的气候变化归因的总体信度水平，并减小了以单一气候变量为基础进行评估带来的不确定性。根据这一综合证据，几乎确定的是人类影响已使全球气候系统变暖。近表面温度变化、大气和海洋变化以及冰冻圈变化、水循环和某些极值变化等方面已确定存在人为影响。目前有力的证据表明，太阳强迫、火山及内部变率不是1950年以来变暖的最强驱动因子。{10.9; 表10.1; FAQ5.1}

自20世纪中叶以来，除南极以外的每一个大陆，人为影响可能已为地面温度升高作出了贡献(图TS.12)。过去50年，北极表面温度非常显著的上升可能有明显的人为作用。对于南极，由于观测的不确定性很大，因此具有低信度的是，人为影响对现有台站观测到的平均变暖作出了贡献。因为驱动因子(环流变化)的更大作用、具有区域重要性的强迫的区间更大，以及区域尺度上相关过程的模拟

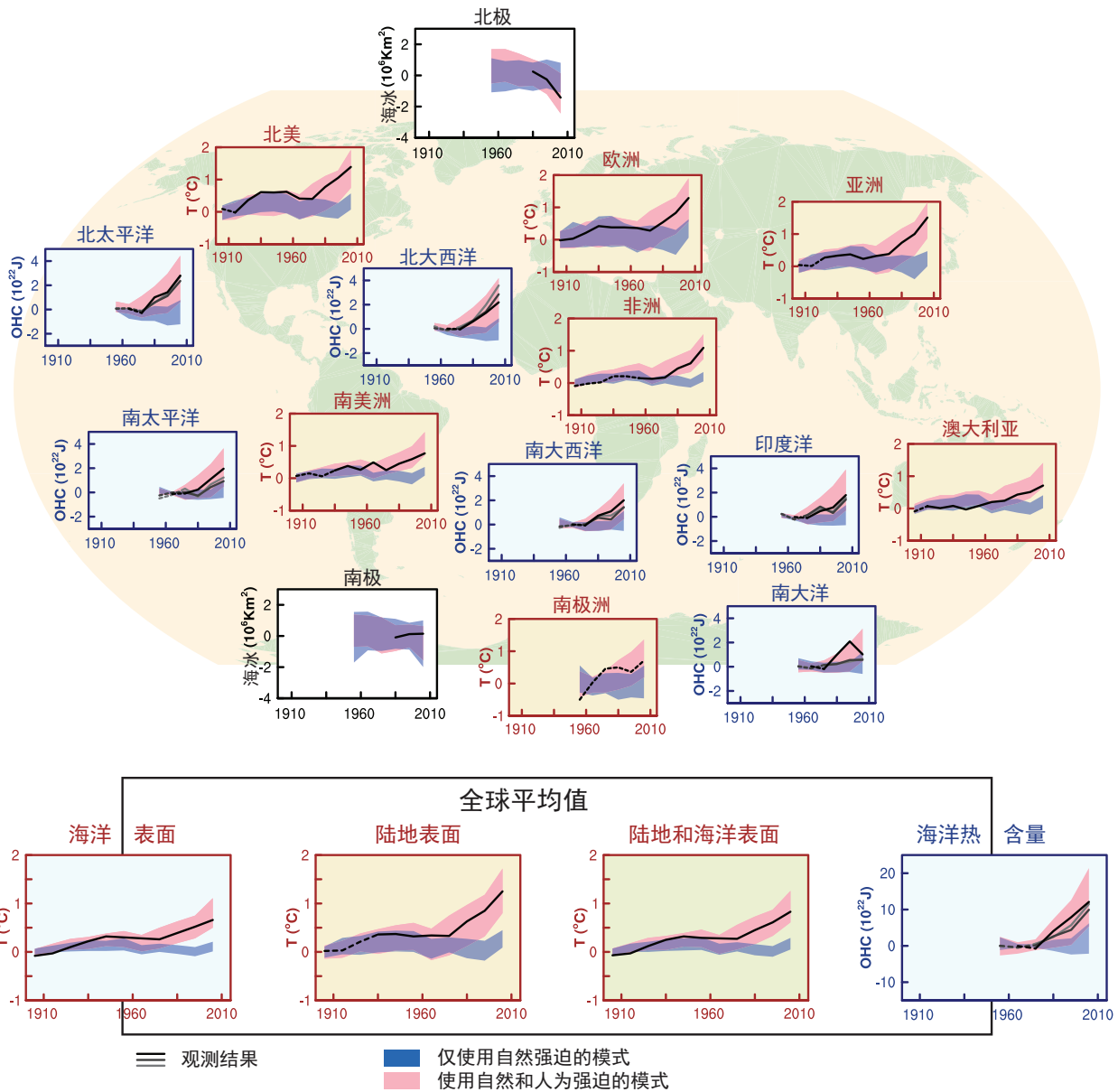


图TS.11 | 模拟和观测到的1951-2011年南半球环状模(SAM)指数季节趋势。SAM指数是40°S和65°S纬向平均海平面气压(SLP)之间的差值。SAM指数的确定未经归一化，以便对比模拟的与观测到的趋势幅度。黑线表示哈得莱中心海平面气压2r(HadSLP2r)资料集(实线)中观测到的趋势，以及20世纪再分析(虚线)。灰色直方表示对照趋势的第5至第95百分位区间，红框表示历史模拟趋势的第5至第95百分位区间，包括人为和自然强迫。彩色直方表示集合平均趋势及其相关5-95%信度区间，模拟响应的是CMIP5单个强迫模拟中充分混合的温室气体(浅绿色)、气溶胶(深绿色)、臭氧(品红色)和自然强迫变化(蓝色)。{图10.13b}

难度更大，区域尺度的检测和归因变得很复杂。然而，在许多次大陆地区，人类影响可能已为温度的升高作出了贡献。{10.3; 文框5.1}

观测到的变化明显与自然系统中人为和自然强迫的模拟相一致(图TS.12)，尤其是与温度相关的变量。表面

温度和海洋热含量显示，在这两个记录中有新的人为和自然信号，明显有别于仅为自然变化的假设。这些信号不仅在全球均值中出现，而且还出现在大陆和海盆的区域尺度上的其中每个变量中。北极海冰面积明显超出内部变率区间。在次大陆尺度上，人类影响可能显著增加了某些地方发生热浪的概率。{表10.1}



图TS.12 | 区域尺度(上方各小图)和全球尺度(下方四个小图)观测到的和模拟的气候系统变化对比。褐色小图是表面温度时间序列，蓝色小图是海洋热含量时间序列，白色小图是海冰时间序列(十年均值)。每个小图都给出了观测资料(黑色或黑加灰色阴影)、对自然强迫(蓝色阴影)和自然及人为强迫(粉色阴影)的5-95%模拟响应区间，以及对应的集合平均值(分别为深蓝和暗红色)。观测到的表面温度来自哈得莱中心/气候研究小组格点表面温度资料集4 (HadCRUT4)。图中给出了三个观测到的海洋热含量(OHC)记录。图中绘出海冰距平(而不是绝对值)，依据的是图10.16中的模式。观测资料线为实线或虚线，表示观测和估值的质量。对于陆地和海洋表面温度图和降水图，观测资料实线表示被检验的区域空间覆盖率超过50%，观测资料虚线表示观测覆盖率低于50%。例如，南极的资料覆盖率一直没有达到大陆的陆地区域的50%以上。对于海洋热含量和海冰图，观测资料实线是指资料覆盖率良好，质量较高的地区，虚线是指资料覆盖率仅为足够。本图是以图10.21为基础，区别在于标示的是十年平均值，而不是年平均值。与图SPM.6相关的详情见TS补充材料。{图10.21}

文框TS.4 | 模式评价

自AR4以来,气候模式不断得到改进,许多模式涵盖了对气候变化有重要作用的生物地球化学循环的表述,从而扩展到地球系统模式(ESM)。文框TS.4,图1部分概述了本报告所评价的模式能力,包括AR4中评估的或AR4时已有模式的改进或不足。{9.1, 9.8.1; 文框9.1}

与AR4时评价的那些模式相比,气候模式模拟表面温度的能力在许多重要方面已有所改善,虽然不是所有方面。仍然具有**很高信度**的是,模式能再现观测到的大尺度时间平均表面温度型态(型态相关系数约为0.99),尽管在某些地区发现了几摄氏度的系统误差。具有**高信度**的是,在区域(次大陆和更小)尺度上模拟的时间平均表面温度优于AR4时;但是,模式能力的信度低于大尺度。模式能够再现观测到的年际至百年时间尺度全球平均或北半球平均温度变化幅度。模式还能够再现末次盛冰期温度的大尺度型态,这说明模式有能力模拟与目前显著不同的气候状态(另见文框TS.5)。{9.4.1, 9.6.1}

具有**很高信度**的是,模式可再现历史时期全球及年平均表面温度变化的一般特征,包括20世纪下半叶的变暖和大型火山喷发后的骤然变冷。对历史时期的多数模拟不能再现过去10-15年观测到的全球平均表面升温趋势的下降(见文框TS.3)。具有**中等信度**的是,在1998-2012年间模式和观测之间的趋势差异很大程度上是由于内部变率所致,模式的强迫不足可能也有一定作用,而且有些模式高估了对温室气体强迫上升的响应。大多数模式(虽然不是全部)会高估过去30年观测到的热带对流层升温趋势,而往往会低估平流层下部的长期变冷趋势。{9.4.1; 文框9.2}

自AR4以来,大尺度降水型态模拟有所改善,虽然模式对降水的模拟仍然不及对表面温度的模拟。模拟和观测到的年平均降水的空间分布相关系数已经从AR4时已有模式的0.77增加到当前模式的0.82。在区域尺度上仍不能很好地模拟降水,而且由于观测的不确定性,仍然很难评估。{9.4.1, 9.6.1}

很多模式都能够再现1961-2005年观测到的海洋上层热含量变化。多模式平均的时间序列处于这一时期多数时间的现有观测估值区间内。{9.4.2}

有确凿证据表明,对北极夏季海冰面积下降趋势的模拟优于AR4时。约四分之一的模式显示出的趋势与1979-2012年卫星时代观测的趋势一样强或更强。大多数模式模拟的南极海冰面积呈小幅下降趋势,尽管模式间的离散度很大,这与观测的小幅上升趋势相反。{9.4.3}

自AR4以来,对模式模拟极端事件的评估已取得显著进展。20世纪下半叶极端暖昼和暖夜以及冷昼和冷夜的频率变化在模式和观测之间是一致的,而集合平均全球平均时间序列总体处于观测估值区间之内。大多数模式会低估极端降水对温度变率或趋势的敏感性,尤其是在热带地区。{9.5.4}

在包括交互式碳循环的模式中,多数模式模拟的20世纪下半叶全球陆地和海洋碳汇处于观测估值区间之内。然而,模式会系统性低估大气反演技术得出的北半球陆地碳汇。{9.4.5}

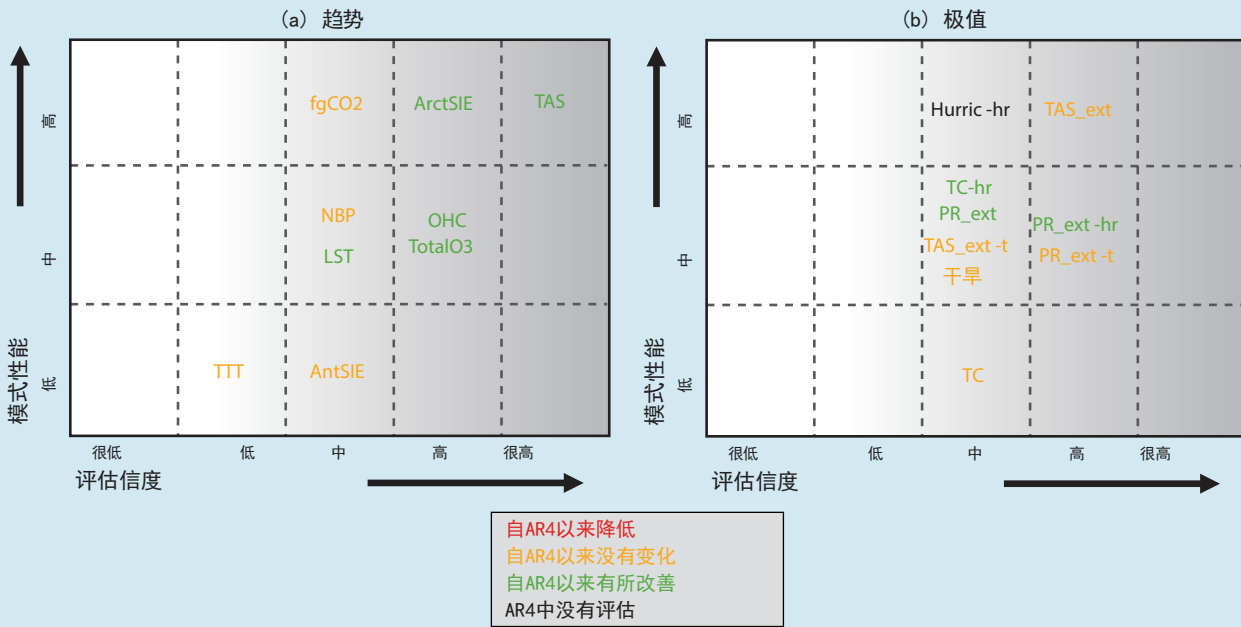
区域降尺度方法为许多气候影响研究提供所需的较小尺度气候信息。有**高信度**的是,降尺度对于地形多变地区和各种小尺度现象更具价值。{9.6.4}

平衡气候敏感性的模式离散度是在2.1°C至4.7°C之间,与AR4的评估非常接近。具有**很高信度**的是,平衡气候敏感性离散度的主要贡献因子仍然是云反馈。这适用于现代气候和末次盛冰期。同样具有**很高信度**的是,与观测相一致,模式显示在区域到全球尺度对流层温度和水汽之间呈现强烈的正相关,这意味着模式和观测中都有正水汽反馈。{5.3.3, 9.4.1, 9.7}

(接下页)

文框TS.4 (续)

气候模式基于物理原理，可再现观测到的气候的许多重要要素。这两个方面促使我们对模式的适用性建立起信心，相信它们可以用于检测和归因研究(见第10章)，也可用于未来的定量预测和预估(见第11至14章)。有越来越多的证据表明，观测到的变率或趋势的一些要素与模式参量预估中的模式间差异有很好的相关性，这些参量包括北极夏季海冰趋势、雪反照率反馈，以及热带陆地碳损失等。然而，在气候预估的多模式集合平均方面，目前仍没有通用的策略能将模式过去的性能转换为本模式的相对权重。{9.8.3}



文框TS.4, 图1 | 当前气候模式模拟20世纪气候重要特征的概况。如渐强的阴影所示，评估信度向右逐渐增加。模式质量自下而上提高。彩色编码表示AR4时的模式到目前评估所用模式的改进。自AR4以来已做了一些改进，有些模拟参量没有得到更好的模拟。本概况列出了主要的气候参量，没有一个显示出下降。评估的主要依据是多模式平均值，但不排除个别模式可能存在偏差。本图简要说明了评估的模式质量，各评估的详细信息见第9章。{9.8.1; 图9.44}

图中突出了以下关键特征，括号中为评估所在的相应章节号：

(a) 趋势

- AntSIE 南极海冰范围 {9.4.3}
- ArctSIE 北极海冰范围 {9.4.3}
- fgCO2 全球海洋碳汇 {9.4.5}
- LST 平流层下部温度 {9.4.1.}
- NBP 全球陆地碳汇 {9.4.5}
- OHC 全球海洋热含量 {9.4.2}
- TotalO3 总臭氧柱 {9.4.1}
- TAS 地表气温 {9.4.1}
- TTT 热带对流层温度 {9.4.1}

(b) 极值

- 干旱 干旱 {9.5.4}
- Hurric-hr 高分辨率AGCM中大西洋飓风的逐年数 {9.5.4}
- PR_ext 降水极端事件的全球分布 {9.5.4}
- PR_ext-hr 高分辨率AGCM中降水极端事件的全球分布 {9.5.4}
- PR_ext-t 降水极端事件的全球趋势 {9.5.4}
- TAS_ext 地表气温极端事件的全球分布 {9.5.4}
- TAS_ext-t 地表气温极端事件的全球趋势 {9.5.4}
- TC 热带气旋路径和强度 {9.5.4}
- TC-hr 高分辨率AGCM中的热带气旋路径和强度 {9.5.4}

文框TS.5 | 古气候

根据古气候档案进行气候重建可以将目前大气成分、海平面和气候（包括干旱和洪水等极端事件）的变化以及未来的预估置于以往气候变率的更宽广的视角（见第TS.2节）。{5.2-5.6, 6.2, 10.7}

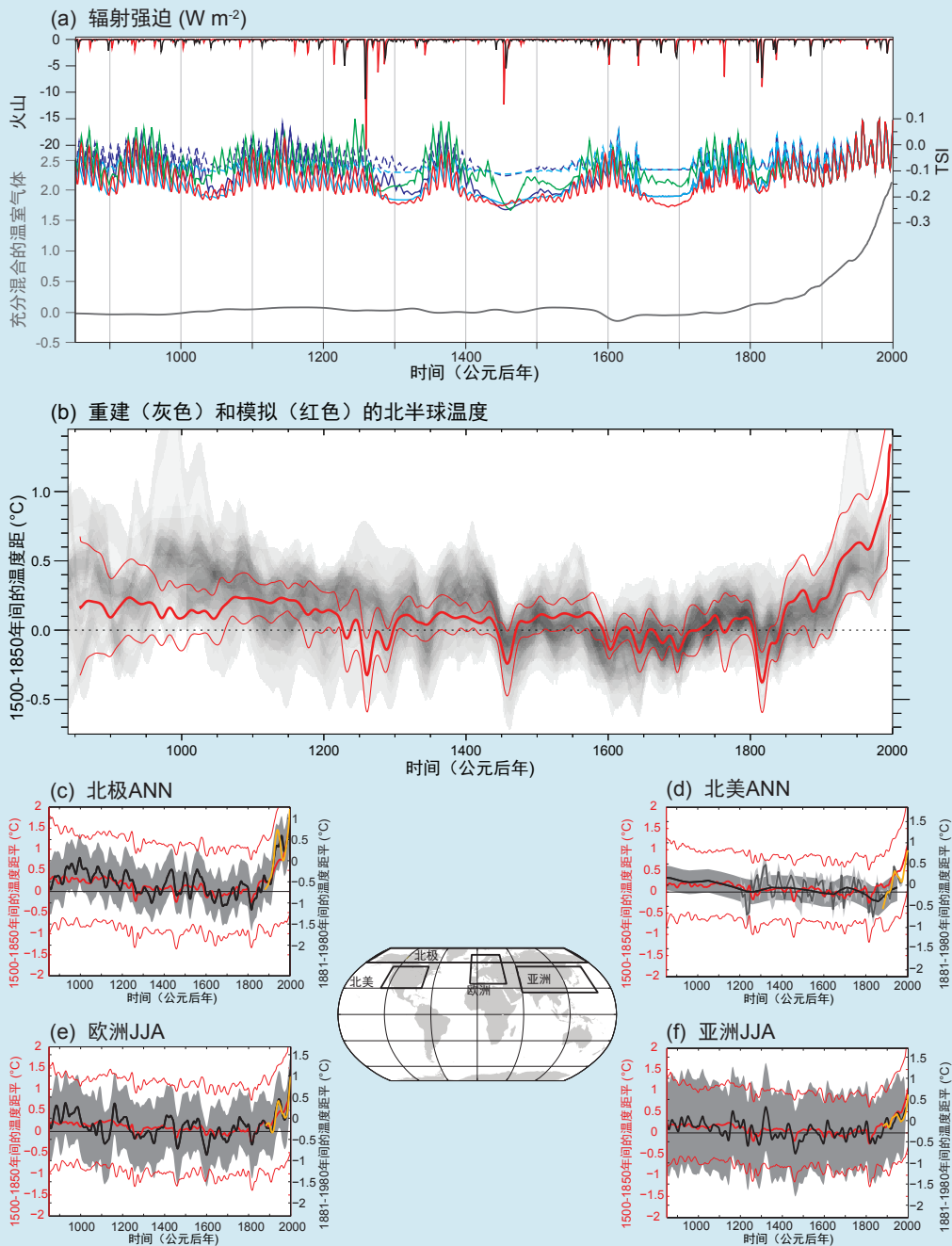
以往气候信息还记录了气候系统中缓变组分的情况，包括碳循环、冰盖和深海等，与它们响应扰动的特有时间尺度相比，上述器测记录的时间尚短，因此以往气候信息可以提供有关突变和不可逆变化机制的情况。结合对过去外部气候强迫的了解，古气候综合资料已记录了极地放大作用，其特点是在响应高或低CO₂浓度时，北极温度变化大于全球平均{5.2.1, 5.2.2, 5.6, 5.7, 5.8, 6.2, 8.4.2, 13.2.1, 13.4; 文框5.1, 5.2}

自AR4以来，在PMIP3(古气候模拟比对项目)/CMIP5框架中纳入了古气候模拟，因而使古气候信息能够更紧密地与未来气候预估相联系。全新世中期(6千年)、末次冰盛期(约2万1千年)及上一个千年的古气候信息已用于检测模式真实模拟过去变化幅度和大尺度模态的能力。古气候模拟和重建信息相结合能够量化气候系统对辐射扰动的响应、对平衡气候敏感性区间的约束、在年际到数百年尺度上记录的过去内部气候变率型态。{5.3.1-5.3.5, 5.4, 5.5.1, 9.4.1, 9.4.2, 9.5.3, 9.7.2, 10.7.2, 14.1.2}

文框TS.5, 图1为上个千年古气候模拟比对项目第3阶段(PMIP3)/CMIP5模拟结果与重建气候的比较以及相关的太阳、火山和WGMHG强迫辐射。对于北半球年均温度而言，1983-2012很可能是过去800年中最暖的30年(高信度)，可能是过去1400年中最暖的30年(中等信度)。器测温度与利用各种代用资料和统计方法所做多个重建的比较对这一评估结果给予了支持，该结果也与AR4相一致。在响应太阳、火山和人为辐射变化的情况下，各气候模式模拟过去1200年北半球多年代际温度变化，其幅度和时间基本与重建相一致，而且在其不确定性区间内。具有高信度的是，大陆尺度温度重建表明，在中世纪气候异常期(约950-1250年)内有多个十年期，某些区域的温暖程度与20世纪中叶相同，而在其它区域与20世纪后期相同。具有高信度的是，这些区域暖期并不像20世纪中叶以来的升温那样在各区域同步发生。根据气候重建与模拟的比较，具有高信度的是，外部轨道强迫、太阳和火山强迫以及内部变率都对中世纪气候异常期与小冰期(约1450-1850年)之间表面温度变化的空间分布和出现时间做出了很大贡献。但是，其相对贡献的定量估值仅有很低信度。很不可能的是，仅凭内部变率就能够解释1400-1850年北半球的温度变化。具有中等信度的是，外部强迫为850-1400年北半球温度变化作出了贡献，而且也过去5个世纪欧洲的温度变化作出了贡献。{5.3.5, 5.5.1, 10.7.2, 10.7.5; 表10.1}

(接下页)

文框TS.5 (续)



文框TS.5, 图1 | 对上一个千年的模拟和重建。(a) 850-2000 PMIP3/CMIP5火山、太阳和充分混合的温室气体引起的辐射强迫。不同的颜色表示两个现有的火山强迫数据集和四个太阳强迫估值。对于太阳强迫, 实(虚)线代表重建的变型, 其中考虑了(没考虑)辐照度本底变化; (b) 850-2000 PMIP3/CMIP5模拟(红色)和重建(阴影)的北半球(NH)温度变化。粗红线表示多模式平均, 细红线表示多模式90%的区间。灰色阴影表示叠加的重建温度; 所有数据都表示为1500-1850年年均值的距平, 且用30年滤波器进行了平滑处理。注意: 某些重建表示的空间域小于整个北半球或某个特定的季节, 而整个北半球的平均年温度表示的是模拟值。(c)、(d)、(e)和(f)表示重建(黑线)和PMIP3 / CMIP5模拟(粗红线为多模式平均; 细红线为90%多模式区间)的950-2000年北极和北美年平均温度以及欧洲和亚洲6月、7月和8月(JJA)温度。所有的红色曲线都表示为1500-1850年平均距平, 并用30年滤波器进行了平滑处理。阴影部分表示每个重建的不确定性(北极: 90%信度区间、北美: ± 2 标准差、亚洲: ± 2 均方根误差、欧洲: 95%信度区间)。为了与器测记录相比较, 给出了气候研究小组陆地站温度(CRUTEM4)(黄线)。这些器测资料未必是那些在重建校准中使用的资料, 因此与实际用于校准的器测资料相比, 也许与重建或多或少相对应; 截止时间也会造成所示平滑资料的端点效应。所有线条都采用30年移动平均经过平滑处理。地图也显示了重建的各个区域。{5.3.5; 表5.A.1; 图5.1, 5.8, 5.12}

TS.5 全球和区域气候变化预估

TS.5.1 引言

气候系统变化预估使用了各层级气候模式，其中有简单气候模式，中等复杂模式，以及综合气候模式和地球系统模式(ESM)。这些模式可根据一套人为强迫情景模拟各种变化。一套新情景，即典型浓度路径(RCP)，已用于在世界气候研究计划的耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)框架下进行的新气候模式模拟。大量的综合气候模式和ESM都参加了CMIP5，其结果构成了气候系统预估的核心。

本节总结了对这些气候变化预估的评估。首先介绍了未来强迫和情景。其后各节涉及全球和区域气候变化预估的各个方面，包括近期(大约至本世纪中叶)和长期(21世纪末)大气、海洋和冰雪圈预估；碳和其它生物地球化学循环的预估；海平面变化预估；21世纪气候现象和区域气候其它方面的最终变化。除非另有说明，这里给出的是

相对于1986-2005年平均值的预估变化。关于更长期气候变化预估以及关于气候稳定性和目标的信息见TFE.8。称为地球工程的应对气候变化的方法已经提出，其概述见文框TS.7。{11.3, 12.3-12.5, 13.5-13.7, 14.1-14.6, 附件1}

TS.5.2 未来强迫与情景

本评估报告中使用了一系列新的RCP，基本替代了《IPCC排放情景特别报告》(SRES)中的情景(气候系统情景表见文框TS.6和附件2)。新情景生成了一系列响应，从持续升温、到近于稳定的强迫、到严格减缓情景(RCP2.6)，后者在21世纪中叶以后能够稳定并随后缓慢降低辐射强迫。与AR4不同，AR5中将RCP情景框定为适应与减缓相结合。各RCP情景中目前开始的减缓行动在未来30年左右的时间内不会产生明显不同的气候变化结果，而对于本世纪中叶之后的长期气候变化，各RCP情景之间有明显差异。{文框1.1}

文框TS.6 | 新典型浓度路径情景与耦合模式比对项目第5阶段模式

未来温室气体、气溶胶颗粒的人为排放和土地利用变化等其它强迫因子都取决于社会经济因素，而控制排放实现减缓的全球地缘政治协议会对这些方面产生影响。AR4广泛使用了SRES情景，这些情景不包括额外的气候活动，这意味着没有情景明确承担执行《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)或《京都议定书》的减排目标。然而，针对各类其它目标的非气候变化政策对温室气体排放有着直接影响。SRES情景的制定采用循序渐进法，即将社会经济因素纳入到排放情景中，而后再将这些情景用于简单气候模式，以确定温室气体浓度，并采用驱动更复杂AOGCM所需的其它因子。在本报告中，对在被称为RCP的新情景(其中一些包括为实现减缓的隐含政策行动)下气候模拟的结果进行了评估。这些RCP是一套更大的减缓情景，筛选出来以针对2100年不同的辐射强迫目标(约2.6, 4.5, 6.0和8.5W m⁻²; 图TS.15)。这些情景应当视为是合理的和有说明性的，并不附带概率。{12.3.1; 文框1.1}

RCP的开发采用综合评估模式(IAM)，通常包括经济、人口、能源和简单气候等组分。它们制作的排放情景会通过简单模式运算，制作出可在AOGCM中运算的GHG浓度时间序列。而后RCP的排放时间序列可直接用于包括交互式生物地球化学在内的ESM(至少是陆地和海洋碳循环)。{12.3.1; 文框1.1}

CMIP5多模式试验(通过世界气候研究计划协调)带来了开展气候变率和变化评估所需的空前信息量。除了AOGCM之外，CMIP5还包括一些新的ESM、新的模式试验和更多的诊断产品。CMIP5比IPCCAR4时可用的CMIP3多模式试验更加全面。CMIP5的模式数量是CMIP3的两倍多，还有更多的试验(还包括着力于了解未来气候变化情景运算中各种响应的试验)，以及数据量近2×10¹⁵字节(而CMIP3的数据量为30×10¹²字节)。CMIP5更全面地处理了更多强迫因子，特别是气溶胶和土地利用变化。强迫因子目前通常都包括黑碳气溶胶。CMIP5评估了CO₂的“浓度驱动”的预估和“排放驱动”的预估。这些能够量化物理响应不确定性以及气候-碳循环相互作用。{1.5.2}

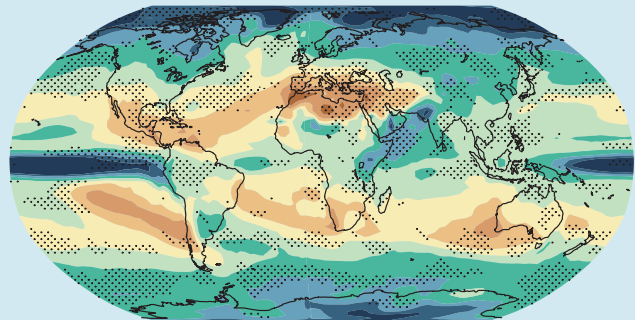
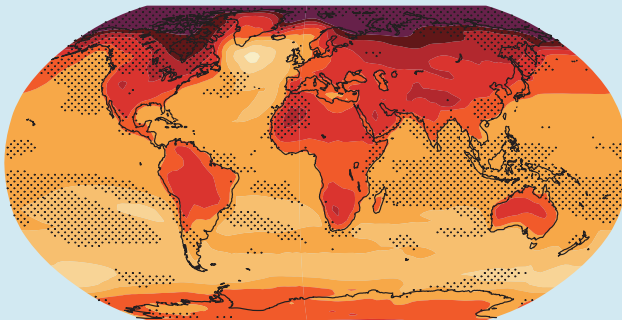
(接下页)

文框TS.6 (续)

如果AR4中使用CMIP5模式，那么AR4对全球平均温度变化的平均值和区间的评估就不会有很大差异。全球温度预估的差异主要归因于不同情景。CMIP3和CMIP5模式模拟的全球平均温度响应在瞬时和平衡态均值与模式区间都非常接近。所有情景之间的温度变化区间较大，因为RCP包括一个强减缓情景(RCP2.6)，而CMIP3中使用的SRES情景中没有与之对等的情景。对于每一个情景，通过用相同平均和标准偏差的正态分布大致估算CMIP5分布而得出CMIP5的5%-95%预估区间并对CMIP5的预估结果进行评估后作为可能的21世纪末全球温度变化预估的结果。使用为涵盖AR4评估的平衡气候敏感性区间而校准的简单模式所作的概率预估可提供与CMIP5一致的不确定性区间。在AR4中，当以模式平均升温分数表示全球温度预估的不确定性时(定常分式不确定性)，发现该不确定性近似于常数。对于更高浓度的RCP而言，就目前估算不确定性小于AR4使用的长期气候变化方法的不确定性，因为碳循环-气候反馈与浓度驱动的RCP预估不具相关性(相反，AR4中评估的全球温度预估不确定性考虑了碳循环-气候反馈，虽然这些不是CMIP3模式的一部分)。当用RCP8.5 CO₂排放而不是RCP8.5CO₂浓度强迫时，包括交互式碳循环的CMIP5 ESG的模拟结果是到2100年比后者平均高50ppm(-140至+210ppm)(CMIP5模式离散度)的大气CO₂浓度和比后者高0.2°C的全球表面温度升幅。对于低浓度RCP而言，分式不确定性更大，因为内部变率和非CO₂强迫对总不确定性有更大的相对贡献。{12.4.1, 12.4.8, 12.4.9} (接下页)

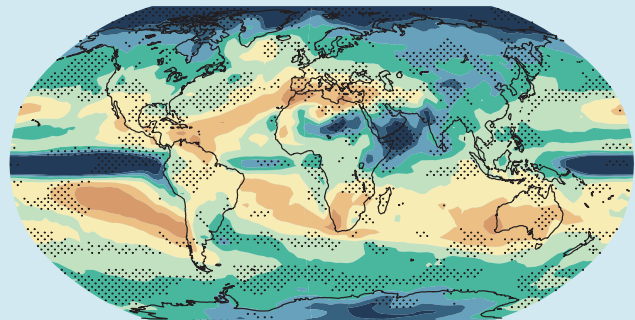
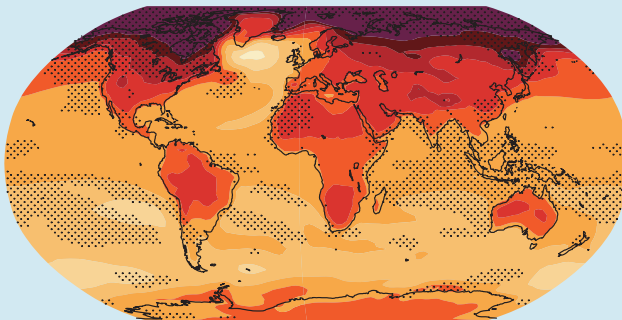
以全球温度为尺度的温度(°C / °C)
CMIP3 : 2080-2099

以全球温度为尺度的降水(% / °C)
CMIP3 : 2080-2099

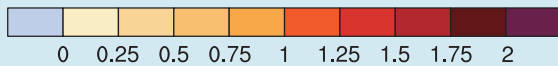


CMIP5 : 2081-2100

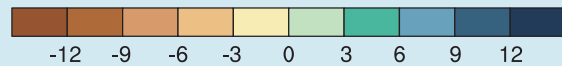
CMIP5 : 2081-2100



(°C / °C 全球平均变化)



(% / °C 全球平均变化)



文框TS.6, 图1 | CMIP3模式平均(第一行)和CMIP5模式平均(第二行)温度型态(左列)和百分比降水变化型态(右列)，均以对应的全球平均温度变化为标尺。这些型态的计算是通过求出21世纪最后20年试验(CMIP3为2080-2099年，CMIP5为2081-2100年)与最后20年历史试验(CMIP3为1980-1999年，CMIP5为1986-2005年)的平均值之差，并根据全球平均温度相应变化重新调整各差值。此做法首先针对单个模式进行，然后将结果在模式之间进行平均。点状部分表示自举法得到的两个相应型态差值显著性度量。CMIP3和CMIP5集合成员的合并集合与原集合的成员数量相同，但没有区分二者的成员，合并集合的两个子集是从500次随机抽样中选出。对于每个随机抽样，均计算出相应型态及其差值，然后逐格点对真差值与自举差值分布进行比较，并且只在差值处于自举分布尾部的格点上(小于第2.5百分位或第97.5百分位)才施以点刻。{图12.41}

文框TS.6 (续)

基于CMIP3和CMIP5的温度和降水预估之间具有总体一致性，无论是变化的大尺度分布还是幅度(文框TS.6, 图1)。预估的模式一致性和信度取决于变量、空间和时间的平均，较大尺度一致性更好。温度的信度高于与水循环或大气环流相关的参量。已开发了量化和显示模式可靠性的改进方法，以表示凡是模式间就局地趋势缺乏一致性时，则是由于内部变率所致，而不是模式实际上对其强迫响应存在差异。自AR4以来，虽然对气候变化长期大尺度预估的不确定性来源和特征表述方式的认知并没有显著变化，但新的试验和研究已继续在朝着更完整和严格的特征表述努力。{9.7.3, 12.2, 12.4.1, 12.4.4, 12.4.5, 12.4.9; 文框12.1}

在瞬时试验中建立的温度和降水变化地理分布型态的良好稳定性在各CMIP5模式(文框TS.6, 图1)中仍然有效。随着时间推移以及在各情景之间，分布型态均类似，并可被全球平均温度变化项标记为第一阶。当应用于强减缓情景时，或应用于局地强迫明显且随时间变化的情景时，或应用于除季节平均温度和降水平均值之外的变量时，这一技术的有效性仍会受到某些限制。{12.4.2}

所有情景之间的人为气溶胶排放区间对近期气候预估的影响大于对长生命期温室气体对应区间的影响，特别是对区域尺度和水文循环变量的影响。RCP情景不包括在SRES和替代情景中发现的未来气溶胶排放区间(文框TS.6)。{11.3.1, 11.3.6}

如果采取快速减少硫酸盐气溶胶的措施以改善空气质量或作为化石燃料CO₂减排的一部分，那么具有中等信度的是，这会导致近期快速升温。有证据表明，同时控制CH₄排放将会抵消部分硫酸盐引起的升温，虽然减缓CH₄带来的降温比减缓硫酸盐引起的升温更为缓慢，这是由于为响应减排，这些物质的大气浓度下降的时间尺度各有不同。虽然黑碳气溶胶的清除也可抵消与硫酸盐清除相关的升温，但不确定性太大，以至于无法限制全球温度响应黑碳减排的符号正负，这取决于共同排放的(反射性)气溶胶的减少，并且还取决于气溶胶的间接影响。{11.3.6}

在预估来自RCP排放、具有化学反应的温室气体CH₄和N₂O的过程中包括不确定性，可给出一个丰度路径区间，该区间可能比强迫CMIP5气候模式的RCP浓度区间大30%。在农业、森林和土地利用排放源的估值中，在大气生命周期中以及在化学反馈中包括不确定性，则会产生N₂O、CH₄和HFC及其辐射强迫出现一个更大丰度区间。以CH₄为例，到2100年，RCP8.5CH₄丰度的可能区间会比单值RCP8.5CH₄的丰度高520 ppb，而RCP2.6CH₄丰度区间会比单值RCP2.6 CH₄的丰度低230 ppb。{11.3.5}

自然强迫的预估为很低信度。大型火山喷发会造成高达每平方米几瓦的负辐射强迫，一般生命期为一年，但

未来喷发的可能发生几率和时间不得而知。除了11年的太阳活动周期外，太阳总辐照度的变化尚不确定。除非明确说明，否则除周而复始的11年太阳周期外，未来火山喷发和太阳总辐照度变化都没有纳入所评估的近期和长期气候预估。{8, 11.3.6}

TS.5.3 气候系统响应的量化

基于观测到的气候变化、气候模式和反馈分析的平衡气候敏感性(ECS)估值，以及古气候证据表明ECS为正值，具有高信度的是，可能在1.5°C至4.5°C区间内，极不可能小于1°C(高信度)，很不可能大于6°C(中等信度)。包括长期反馈在内的几千年时间尺度上的地球系统敏感性一般不包括在模式中，可显著高于ECS(更多详情见TFE.6)。{5.3.1, 10.8; 文框12.2}

根据观测到的气候变化和气候模式，具有高信度的是，瞬时气候响应(TCR)为正值，可能是在1°C至2.5°C区间内，极不可能大于3°C，(更多详情见TFE.6)。{10.8; 文框12.2}

GMST变化与累积总人为碳排放之比相对不变，它独立于情景，但依赖模式，因为它是模式累计碳的空中部分和瞬时气候响应的函数。因此对于任何给定的温度目标，在先前几十年中较高的排放量意味着之后将减少大约相同量的排放。累积碳排放的瞬时气候响应(TCRE)可能是每1000PgC为0.8°C至2.5°C(高信度)，因为温度达到峰值前，累计碳排放量约小于2000 PgC(更多详情见TFE.8)。{10.8, 12.5.4; 文框12.2}

TFE.6 | 气候敏感性与反馈

可将气候变化描述为对被反馈放大的某种强迫的响应，这种描述可追溯到数十年前。辐射强迫(RF)和气候反馈的概念一直在细化，而目前对各种局限有了更好的认知；例如，反馈可能远快于表面升温，反馈取决于强迫因子的类型(如温室气体(GHG)相对于太阳强迫)，或也许有数百年到数千年的内在时间尺度(主要与植被变化和冰盖有关)。分析模式和观测中的物理反馈依然是一个强有力的框架，可为不同情景提供对未来瞬时气候变暖的约束、提供气候敏感性的约束，并结合碳循环反馈的估值(见TFE.5)，确定适合于气候稳定或目标的GHG排放(见TFE.8)。{7.1, 9.7.2, 12.5.3; 文框12.2}

水汽/直减率、反照率和云反馈是平衡气候敏感性的主要决定因素。所有这些反馈均被评为正反馈，但可能性水平不同，从*可能*到*极有可能*。因此，具有*高信度*的是，净反馈为正，所以气候对强迫的黑体响应将被放大。云反馈仍然是最大的不确定性。水汽和直减率变化两者相加的净反馈都*极有可能*为正反馈，而且大约是黑体响应的两倍。气候模式中这两个过程的平均值和离散度与IPCC《第四次评估报告》(AR4)相比基本保持不变，但目前得到以下支持：对相对湿度分布的决定因素有了更有力的观测证据和更深入的认识。云对各种气候强迫机制的响应有多种方式，云反馈可以是正或负反馈。关键问题包括描述厚积云和薄积云对流、冰云的微物理过程、云形成和云消散过程小尺度变化产生的部分云量等。大气环流模式(GCMS)中诊断云反馈的新方法已经说明云作出各种响应是确凿的，同时将继续证明低云量是模拟云反馈的模式间离散度的最重要来源。由所有云类引起的净辐射反馈*可能*为正反馈。除了目前气候模式中的过程外，这一结论还考虑了有待计算的各过程未知贡献率的合理区间。虽然目前单凭观测资料无法提供可靠和直接的约束，但目前有多个证据链均表明高云的高度变化和云水平分布变化都起到了正反馈作用。在大多数气候模式中，低云量反馈也是正反馈，但对这个结果的认知尚不充分，观测资料也没有对其进行有效约束，所以这一结论为*低信度*。{7.2.4-7.2.6, 9.7.2}

气候模式中气溶胶-云过程的代表性依然是一个挑战。在各尺度上，气溶胶和云的变率明显小于气候模式计算的变率，而在这些尺度上各类云对气溶胶的响应却不明显，这意味着在可预见的未来，气候模式将继续依赖对气溶胶-云相互作用的参数化，或可重现代表次网格变率的其它方法。这表明与气溶胶-云相互作用有关的各种强迫的估值存在大的不确定性。{7.4, 7.5.3, 7.5.4}

平衡气候敏感性(ECS)和瞬时气候响应(TCR)是两个有用的指标，用于概括全球气候系统的温度对某一从外部施加的辐射强迫做出的响应。ECS被定义为在大气二氧化碳(CO₂)浓度翻倍后全球年平均表面温度(GMST)的平衡变化，而TCR被定义为70年间在CO₂强迫呈现线性增加趋势之后，当CO₂翻倍时的年平均GMST变化(见术语表)。这两个指标比上述定义所示有更广泛的应用范畴：ECS决定了为响应多世纪时间尺度上大气成分的稳定而最终形成的升温，而TCR决定了在50至100年时间尺度上强迫作用稳定增加后，预计在某个给定时间出现的升温。{文框12.2; 12.5.3}

ECS和TCR可根据各种证据链估算(TFE.6, 图1和图2)。估值可根据气候模式诊断的ECS值和TCR值，或可通过以下方式对估值进行约束，即通过气候模式中的反馈分析、与观测比较的模式给出的平均气候型和变率、根据古气候档案重建的温度波动、观测到的和模拟的能量平衡短期扰动(如火山喷发引起的扰动等)，以及观测到的工业化时代前以来的表面和海洋温度趋势。对于诸多应用而言，毋忘强迫-反馈分析框架的各种局限性以及反馈对事件尺度和气候状态的依赖。{5.3.1, 5.3.3, 9.7.1-9.7.3, 10.8.1, 10.8.2, 12.5.3; 文框5.2; 表9.5}

(接下页)

TFE.6 (续)

有关约束ECS的较新研究是基于工业化时代前以来观测到的升温幅度、利用简单模式和中等复杂程度的模式所作过的分析、经改进的各种统计方法以及几个不同但较新的数据集，包括古气候约束，但没有考虑基于CMIP的证据。这些研究表明，ECS值可能在1.5°C至4.5°C之间(中等信度)但极不可能小于1.0°C。{5.3.1, 5.3.3, 10.8.2; 文框5.2, 文框12.2}

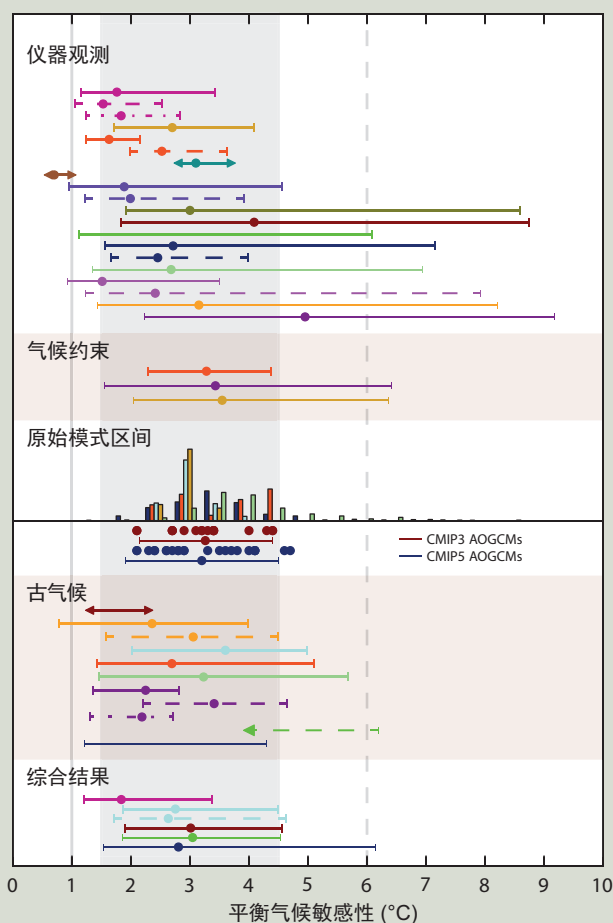
基于大气-海洋环流模式(AOGCM)的估值和反馈分析表明存在一个2°C至4.5°C区间，而耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)的模式均值为3.2°C，这与CMIP3的模式均值类似。在一些有扰动参数的集合模式中发现高气候敏感性，但最近把有扰动物理过程的集合结果与观测到的气候状态进行对比，发现凡是ECS值在3°C至4°C区间的模式，其许多要素场中的误差最小。在某个特定有扰动参数的集合模式中通常发现在气候量值与气候敏感性之间存在一定的关系，但在许多情况下，在有扰动参数的其它集合模式中这种关系是不确凿的，无论是在不同模式中，还是在CMIP3和CMIP5模式中都是如此。评估的文献表明，通过用平均气候和变率观测值约束模式的方式无法显著缩小CMIP3和CMIP5所涵盖的气候敏感性和瞬时响应区间。基于扰动参数集合模式和CMIP3的研究均支持这样一个结论：平均气候和变率的可信代表性很难用小于2°C的ECS实现。{9.2.2, 9.7.3; 文框12.2}

基于上次冰盛期(21 ka至19 ka)的重建和模拟得出的ECS新估值表明，ECS值很不可能小于1°C并大于6°C。在一些模式中，由于云反馈的描述方式不同，在暖气候和冷气候之间气候敏感性也有所不同。地球系统敏感性的各种估值，其中包括各种慢反馈(如冰盖或植被)，更难以与当前气候状态的气候敏感性联系起来。根据古气候状态计算出的ECS各估值的主要局限性是代用资料的不确定性、资料的空间覆盖范围、一些强迫的不确定性，以及在模式-资料比中所用模式本身的结构局限性。{5.3, 10.8.2, 12.5.3}

可用于约束ECS或TCR的贝叶斯方法对于所假设的先前分布是敏感的。通过综合源于观测到的变暖趋势、火山喷发、模式气候学和古气候的约束因子，这些方法原则上能够得出区间较窄的估值，况且在某些研究中已用此方法完成了估算，但应如何得出确凿估值目前尚无共识。这种方法对于以下假设是敏感的：对各种证据链独立性的假设、模式中或反馈估值中存在共同偏差可能性的假设以及各单个证据链无偏差的假设。本评估报告对不同估值的综合基于专家的判断。{10.8.2; 文框12.2}

如上文所述，根据观测到的气候变化的综合证据(包括观测到的20世纪变暖、气候模式、反馈分析和古气候)，ECS值可能是在1.5°C至4.5°C区间内并

(接下页)



TFE.6, 图1 | 基于图10.20b 和IPCCAR4给出的气候约束因子(文框AR4 10.2 图1)以及CMIP5的模拟结果(表9.5)所得出的平衡气候敏感性的概率密度函数、分布和区间。灰色阴影区表示1.5°C至4.5°C的可能区间，灰色实线表示极不可能小于1°C，灰色虚线表示极不可能大于6°C。有关完整的图解和细节，见图10.20b和第10章的补充材料。{文框12.2, 图1}

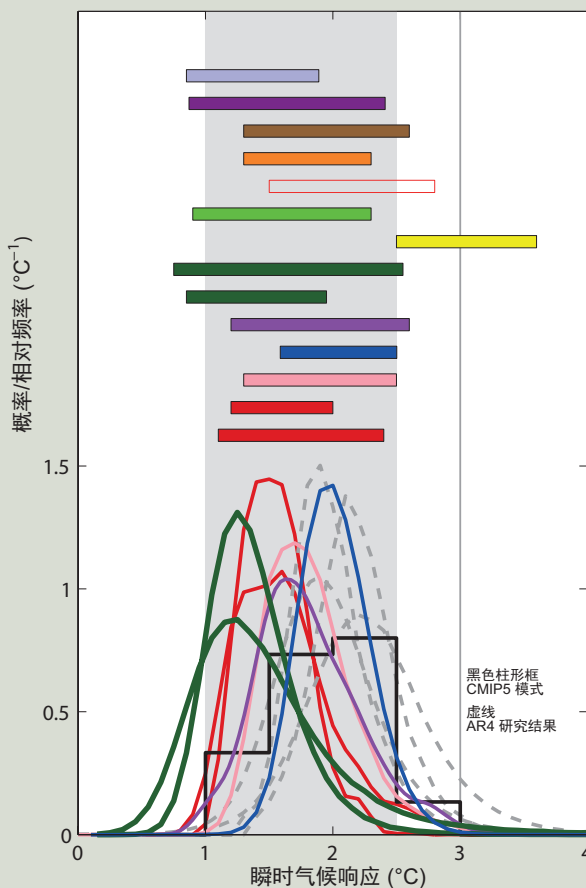
TFE.6 (续)

具有**高信度**。ECS为正值，**极不可能**小于1°C (**高信度**)，并且**很不可能**大于6°C (**中等信度**)。目前对ECS分布的尾端有了更深入的了解。多条证据链给出了**高信度**，即ECS值**极不可能**小于1°C。与AR4相比，这个**可能区间**的上限没有变化。该**可能区间**的1.5°C下限低于AR4给出的2°C的下限。这一变化反映了从利用大气和海洋延长期记录开展的有关观测到的温度变化的新研究获得的证据。这些研究表明，处于该**可能区间**偏下位置上的ECS值达到了与观测到的地表升温和海洋变暖的最佳拟合。在此指出：这些研究不是纯观测性的，因为这些研究需要从模式中得到一个对辐射强迫做出响应的估值。此外，海洋热吸收的不确定性依然相当大。在简单模式中解释短期变率依然是困难的，重要的是，切勿将不当权重赋予任何短时期，因为短时期会受到内部变率的很大影响。另一方面，凡具有观测到的气候背景的AOGCM模式，而ECS各值又位于1.5°C至4.5°C区间偏上位置，就表明与观测到的气候背景有很好的一致性，但在这些模式中对某些关键反馈(如各类云)的模拟却依然具有挑战性。从观测到的升温、古气候以及从气候模式分别得到的估值在各自的不确定性区间内均具有一致性，每一估值都分别得到了诸多研究和多个数据集的支持，通过综合的方式，这些估值对这一评估的**可能区间**给出了**高信度**。即使这个评估的区间与以往报告类似，但当今的置信度却高出许多，因为高质量和更长时间的观测记录可给出一个更清晰的人类活动信号，对过程有更深入的认识，对通过古气候重建得到的证据有更多和更好的了解，而且有更好的和具有更高分辨率的气候模式，这些模式可更现实地捕获更多过程。所有这些证据链均支持这个评估的1.5°C-4.5°C **可能区间**。{3.2, 9.7.3, 10.8; 文框9.2, 文框13.1}

在数百年乃至更长时间尺度上，具有各自内在时间尺度的其它反馈(如植被、冰盖)可成为重要因素，但通常不在AOGCM中模拟。在千年时间尺度上对CO₂翻倍后产生的平衡温度的响应或地球系统敏感性尚未得到充分约束，但**可能**大于ECS，这表明较低的大气CO₂浓度相当于把升温幅度限制在低于某个给定的温度水平上。这些缓慢的反馈不大可能在全球平均温度变化中占有一定比例，这表明地球系统敏感性随时间变化。地球系统敏感性估值目前还难以与当前气候状态的气候敏感性联系起来。{5.3.3, 10.8.2, 12.5.3}

至于辐射强迫不断增加的那些情景，与ECS相比，TCR是信息更丰富的未来气候变化指标。本评估报告得出了具有**高信度**的结论，即TCR的**可能区间**为1°C至2.5°C，接近CMIP5估算的5%至95%区间(1.2°C至2.4°C)，TCR为正值而且**极不可能**大于3°C。如同ECS那样，这是一个经专家评估的区间，得到了若干不同的和部分独立的证据链的支持，每一条证据链均基于多个研究、模式和数据集。TCR是根据观测到的全球表面温度变化、海洋热量吸收变化和辐射强迫变化估算的，其中包括对不断增加的温室气体浓度的响应型态进行识别的检测/归因研究，以及CMIP3和CMIP5的模拟结果。对TCR的估算在状态依赖性 or 时间依赖性反馈方面遇到较少困难，且受不确定性影响不大，如海洋究竟吸收了多少能量等。与ECS不同的是，根据观测到的

(接下页)



TFE.6, 图2 | 不同研究给出的瞬时气候响应的概率密度函数、分布和区间(5%至95%)，基于图10.20a以及CMIP5的模拟结果(黑色柱形框，表9.5)。灰色阴影区间表示1°C至2.5°C**可能区间**，灰色实线表示**极不可能**大于3°C。有关完整的图解和细节，见图10.20a和第10章的补充材料。{文框12.2, 图2}

TFE.6 (续)

升温估算的TCR区间与根据AOGCM模拟的TCR区间十分吻合，因而在对整个21世纪预估的不确定性进行评估方面提升了我们的信心。

评估的ECS区间和TCR区间在很大程度上与观测到的升温、强迫估值和未来升温预估是一致的。与AR4相比，这里没有给出ECS的最佳估值，原因有二，一是在各证据链和各项研究中就最佳估值尚缺乏共识，二是对根据观测到的升温得出的各估值不确定性的认知水平有所提高。当ECS各值位于该可能区间的偏上位置时，气候模式显示出与观测到的气候大背景有很好的吻合度，而对于处在该可能区间偏下位置的ECS值，根据观测到的气候变化计算的估值趋于与观测到的地表升温和海洋变暖有最佳的拟合度。在根据观测到的升温计算的估值中，最可能的值对观测和模式的不确定性、内部气候变率以及对有关ECS之前分布的各种假设是敏感的。另外，在不同的研究中，对“最佳估值”和“最可能的值”的定义也不同。{9.7.1, 10.8.1, 12.5.3; 表9.5}

技术摘要

TS.5.4 近期气候变化

近期年代际气候预测提供了在现有季节至年际(几个月至一年或两年)气候预测中或在长期(21世纪中叶及以后)气候变化预估中均没有的信息。季节至年际时间尺度的气候预测需要有关气候初始状态的准确估值，并略微兼顾延伸至外部强迫的变化¹²，而长期气候预估则在更大程度上依赖对外部强迫的估算，几乎不依赖内部变率的初始状态。近期气候的估值取决于持续的变暖(由于海洋惯性所致，这是海洋对历史外部强迫的响应)、内部产生的气候变率的时间演变，以及未来的外部强迫路径。近期气候预测的时间跨度大约为十年(图TS.13)，在更大程度上取决于对内部产生的气候变率的准确描述。{11.1, 12, 14}

由于海洋的惯性，以往排放引起的更近期的升温是无法避免的。这种升温幅度将随着近期各种温室气体的不断排放而上升，而且近期观测到的气候还将受到气候系统内部产生的变率的很大影响。之前发表的IPCC评估报告仅描述了气候变化预估，虽然其中包括了未来气候的外部强迫分量，但却没有尝试预置内部产生的气候变率。另一方面，年代际气候预测的意图是不但预测未来气候变化的外部强迫分量，而且还预测内部产生的分量。近期气候预测不提供有关天气演变的详细信息，却可提供近期气候随时间演变的统计变化估值。{11.1, 11.2.2; 文框11.1; FAQ 11.1}

已将历史回顾预报试验用于评估预报质量。具有高信度的是，当对照地球大部分地区的观测以及对照全球平均值进行检验时，这些预报期长达10年的历史回顾预报试验显示出正的技巧评分值。基于观测的预报初始化为

最初两年的年平均温度的预报技巧水平，以及为长达10年的GMST、北大西洋、南太平洋地区和热带印度洋上空温度预报技巧水平作出了贡献(高信度)，这可以部分归功于对强迫的正确响应。由于正确描述了多种全球趋势，温度概率预报在统计上是可靠的(关于可靠性的定义，见11.2.3节)，但在区域尺度上仍是不可靠的，当根据多模式集合计算概率时尤为如此。在2000-2005年间开始的预测改进了对最近中断的全球平均温度的估值。反映具有大强迫趋势的大陆地区的降水预报也显示出正的技巧评分值。{11.2.2, 11.2.3; 文框9.2}

TS.5.4.1 预估的近期气候变化

近期气候预估表明，与模式离散相比，对各类GHG情景有较低敏感性，但对气溶胶排放的不确定性却有很高的敏感性，尤其是在区域尺度上，对于水文循环变量尤为如此。在某些区域，降水以及平均和极端温度方面，局地 and 区域对土地利用变化的响应将大于在大尺度温室气体和气溶胶的强迫下引发的局地和区域响应。这些情景假设近期内无重大火山喷发，而且人为气溶胶排放快速减少。{11.3.1, 11.3.2, 11.3.6}

TS.5.4.2 预估的近期温度变化

在无重大火山喷发情况下(火山喷发可导致显著但却暂时的降温)，并认为未来太阳辐射无显著的长期变化，相对于1986-2005年基准期，2016-2035年间的GMST异常有可能将在0.3°C至0.7°C区间内(中等信度)。这是基于多条证据链得出的结论。这一区间与通过用CMIP5模拟的2012-2035年间5%至95%的模式趋势得出的区间相

¹² 季至年际预测一般包括外部强迫的影响。

一致。该区间还与CMIP5以2006-2012年为基准期在所有四个0.36°C至0.79°C的RCP情景下模拟的5%至95%的区间相一致，而这是在上限和下限都减少10%之后的模拟结果，以充分考虑到这样一个证据，即某些模式也许对人为强迫过于敏感(见图TS.1和图TS.14)。{11.3.6}

浓度较高的温室气体加上少量硫酸盐气溶胶可导致更大幅度升温。近期，任何单个气候模式在所有RCP情景下给出的全球平均表面气温差异一般小于在任何一个RCP情景下所有气候模式给出的温度差异。2030年，在各RCP情景之间，CMIP5集合预报的全球平均温度中位数最高相差0.2°C，而在每个RCP情景下模式离散度(界定为17%至83%的区间)大约为0.4°C。情景之间的离散度随着时间推移而增加，到2050年，将相当于模式离散度。在区域上，各RCP情景之间地表气温的最大差异出现在北极。{11.3.2. 11.3.6}

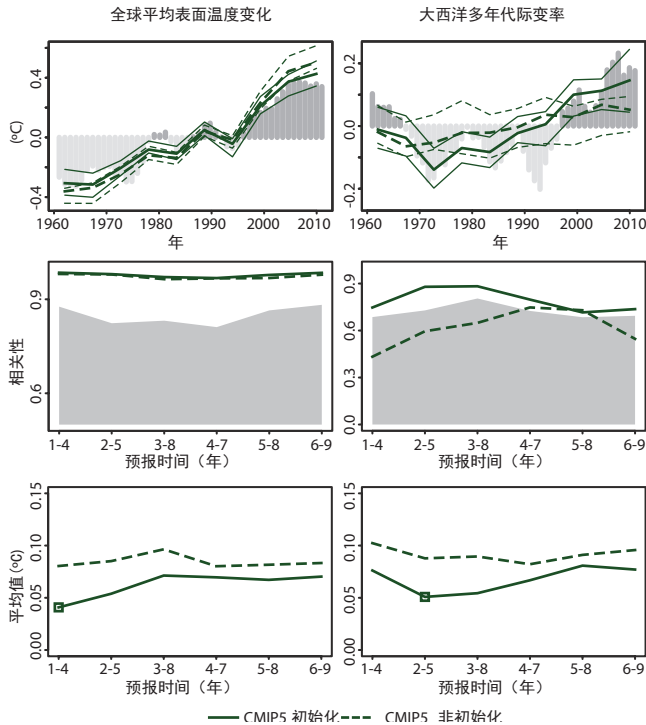
预估的全球平均温度升高表明具有高信度的是，相对于1850-1900年的平均气候，特别是在较高的GHG排放情景下，新的升温幅度将被超过。相对于1850-1900年的基准期，在RCP4.5或RCP6.0情景下，2016-2035年间的平均GMST多半可能将比1850-1900年间的平均值高1°C以上，并很可能比1850-1900年间的平均值高1.5°C以上(中等信度)。{11.3.6}

未来类似于1991年皮纳图博火山喷发那样规模的火山喷发可导致次年全球平均表面气温迅速下降大约0.5°C，在其后几年内方可恢复。较大规模的火山喷发，或者几座火山在一段时间内密集喷发，将导致产生更大和更持久的影响。{11.3.6}

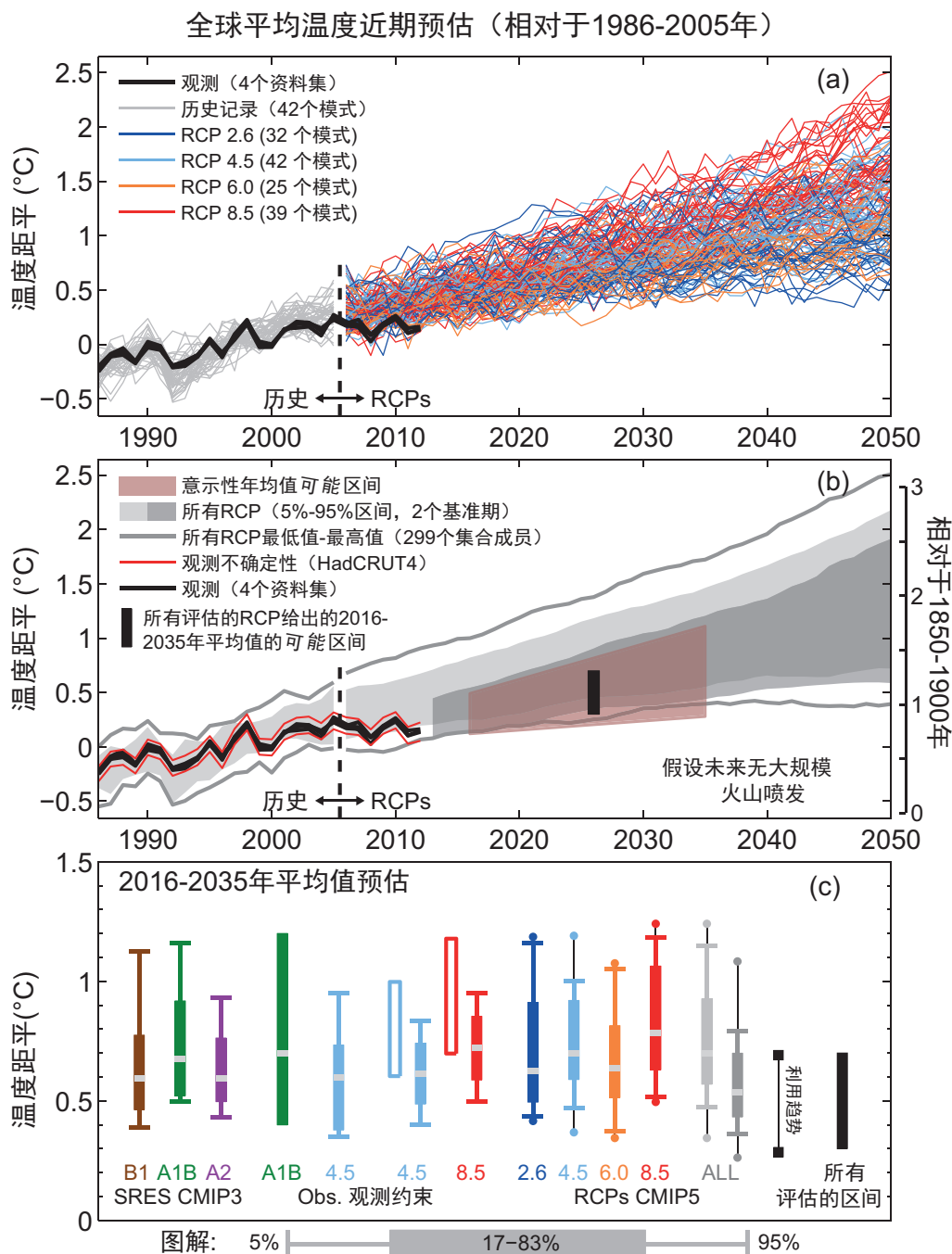
未来可能的太阳辐射变化可影响GMST增加的速率，但是具有高信度的是，与大气中不断增加的GHG浓度的影响相比，太阳辐射变化的影响将是较小的。{11.3.6}

各CMIP5模式根据各RCP情景(图TS.15)预估的近期升温的空间型态与AR4给出的升温空间型态大致一致。很可能是，未来几十年因人类活动引起的表面气温升高速率在陆地区域将快于海洋，而且很可能是，冬季北极地区的人为变暖幅度将大于全球平均变暖幅度，这与AR4相一致。相对于内部产生的变率的背景水平而言，具有高信度的是，相对于基准期，预计热带和亚热带地区的人为变暖幅度将大于中纬度地区。{11.3.2}

有可能是，未来几十年在多数陆地区域出现暖昼和暖夜的频率将上升，而出现冷昼和冷夜的频率将下降。各模式还预估近期热浪和暖期的持续时间、强度和空间范围将会增加。这些变化也许正以不同于平均升温的速度发生。例如，若干研究预估：欧洲的高百分位夏季温度预估升温速度将快于平均温度的升幅(另见TFE.9)。{11.3.2}



图TS.13 | 年代际气候预测可预报几个气候指数的质量。(顶部图框)按2至5年平均集合均值初始化的后报距平的时间序列以及对应的三个气候指数的非初始化试验结果：全球平均表面温度(GMST,左图)和大西洋多年代际变率(AMV,右图)。用深灰色区(正距平)和浅灰色区(负距平)竖线区表示观测时间序列、戈达德空间研究所表面温度分析(GISTEMP)的全球平均温度和用于AMV的延长重建的海表温度(ERSST)，其中为了保持与各预测的时间平均一致性采用了一个4年滑动平均值。图中给出了用1960-2005年间每5年开始一次后报进行CMIP5初始化(实线)和非初始化(虚线)模拟的预报时间序列。多模式集合下四分位数和上四分位数均用细线标出。AMV指数的计算方法是用赤道至60°N和80°W至0°W两地的平均海表温度(SST)距平减去60°S至60°N地区的平均SST距平。注意：每个时间序列的垂直轴各不相同。(中间图框)图中给出了集合平均预报与随CMIP5初始化(实线)和非初始化(虚线)后报的三个资料集的4年平均值预报时间推移所参照的观测基准的相关性。图中给出t分布的95%的置信度水平用灰色表示。已计算出有效样本的数量，同时充分考虑了对观测时间序列的自动订正。已采用双边t测试(其中已计算出有效的样本数量并充分考虑了对观测时间序列的自动订正)方法检查初始化试验相关性与非初始化试验相关性之间的差异，但没有发现两者之间存在统计意义上的显著差异，其信度等于或大于90%。(底部图框)图中给出了随CMIP5初始化(实线)和非初始化(虚线)后报的4年均值预报时间推移出现的集合平均预报的均方根误差(RMSE)。已采用双边F测试(其中已计算出有效样本数量并充分考虑了对观测时间序列的自动订正)方法检验初始化RMSE和非初始化RMSE与之间的比例，凡是在统计意义上存在显著差异但其信度等于或大于90%的预报时间均在方括号中给出。{图11.3}



图TS.14 | 近期全球平均表面气温 (GMST) 预估综述。图(a): 各CMIP5模式 (灰色和彩色线, 每个模式作为一个集合成员) 在所有RCP情景下预估的1986-2050年间年均GMST (相对于1986-2005年的距平), 对于1986-2012年间 (黑线) 各模式均采用了四个观测估值: 哈德莱/气候研究小组的表面温度格点资料集4 (HadCRUT4)、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的全球大气和地表条件中期再分析 (ERA-Interim)、戈达德空间呢研究所的表面温度分析 (GISTEMP)、美国国家海洋大气局 (NOAA) 的资料集。图(b): 如同图(a), 给出了所有RCP情景的年均CMIP5预估的5%至95%区间 (每个模式作为一个集合成员), 均以1986-2005年为基准期 (浅灰色阴影区), 而且还给出了以2006-2012年为基准期的所有RCP路径, 连同观测到的2006-2012年间估值减去1986-2005年间估值后0.16°C的距平(深灰色阴影区)。为了清晰起见, 已利用5年滑动平均方法对2006年以来的百分位作了平滑处理。用灰色线表示采用所有集合成员, 并以1986-2005年为基准期的CMIP5给出的最高值和最低值 (也作了平滑处理)。黑线表示年平均观测估值。红色阴影区表示2016-2035年间年均GMST的示意性可能区间, 该区间是根据GMST的20年 (2016-2035年) 平均距平的 ‘所有评估的RCP’ 可能区间给出的, 如图(b)和图(c)中的黑色直方所示(详见正文)。图右侧给出相对于1850-1900年平均气候的温度标尺, 假设在1986-2005年之前GMST升高了0.61°C(据HadCRUT4估算)。图(c): 相对于1986-2005年, 2016-2035年间各GMST平均距平预估的综合结果。盒须图分别表示66%区间和90%区间。图中给出了以下信息: 在SRES情景下未经约束的CMIP3预估和在RCP情景下未经约束的CMIP5预估; 在SRES A1B情景下以及在RCP4.5和8.5情景下利用观测约束的预估; 用图(b)中的两个基准期在所有四个RCP情景下未经约束的预估 (浅灰色和深灰色阴影区), 并与图(b)一致; 利用CMIP5给出的2012-2035年间各种趋势和观测到的2012年GMST距平估算的90%区间; 在所有RCP情景下评估的总体可能 (>66%) 区间。各CMIP5估值上下两端的圆点表示用所有集合成员得出的最高值和最低值。各中位数 (或最大可能性估值; 绿色实心直方) 用灰色块表示。(改编自图11.25) 详见11.3.6节。{图11.25}

技术摘要

TS.5.4.3 预估的近期水循环变化

在高纬度地区和部分中纬度地区,纬向平均降水将*很可能*增加,而在亚热带地区将*多半可能*减少。在更多区域尺度上,降水变化也许主要受到自然内部变率、火山强迫和人为气溶胶效应的综合影响。{11.3.2}

在未来几十年,近地表比湿*很可能*增加。在许多区域蒸发*可能*将增加。预估的土壤水分和地表径流变化具有*低信度*。{11.3.2}

近期,陆地上强降水事件的发生频率和强度*可能*将增加。这些变化主要是受大气水汽含量增加的驱动,但还受到大气环流变化的影响。区域尺度人为强迫的影响较不明显,因为区域尺度变化在很大程度上受自然变率的影响,而且还取决于未来气溶胶排放、火山强迫和土地利用变化的过程(另见TFE.9)。{11.3.2}

TS.5.4.4 预估的近期大气环流变化

内部产生的气候变率和多种辐射强迫因子(如火山、温室气体、臭氧和人为气溶胶)都将为大气环流的近期变化做出贡献。例如,年平均哈得莱环流和南半球中纬度西风带*可能*将朝极地方向转移,而预估的平流层臭氧层的恢复和温室气体浓度的增加*可能*将对哈得莱环流的宽度和南半球风暴路径的经向位置产生抵消影响。因此,年平均哈得莱环流和南半球中纬度西风带将*不可能*像最近几十年那样继续快速朝极地方向扩展。{11.3.2}

北半球风暴路径位置和强度的近期预估具有*低信度*。近期内,自然变化大于预估的温室气体影响。{11.3.2}

对在所有流域截至21世纪中叶的流域尺度热带气旋强度和频率变化的预估具有*低信度*。这一*低信度*反映了探索近期热带气旋活动的研究数量少,在已公布的有关热带气旋活动的各种预估之间存在差异,而且自然变率的作用大。有关大西洋热带气旋强度增加的近期预估具有*低信度*;作出这一预估的部分原因是预估气溶胶载荷将减少。{11.3.2}

TS.5.4.5 预估的近期海洋变化

近期内,全球平均表面温度和垂直平均海洋温度*很可能*将升高。在无多次重大火山喷发的情况下,在2016-2035年间平均的全球平均表面温度和按深度平均的海洋温度*很可能*将高于1986-2005年间的上述平均温度。{11.3.3}

未来几十年,热带和(特别是)亚热带大西洋的盐度*可能*将增加,而热带西太平洋的盐度*可能*将下降。总

体而言,到2050年,大西洋经向翻转环流*可能*将在一定程度上减弱(*中等信度*)。但是,减弱的速率和强度是很不确定的,而且预计该环流得到加强还需要几十年时间。{11.3.3}

TS.5.4.6 预估的近期冰冻圈变化

在RCP8.5情景下,在本世纪中叶之前,9月份几乎无冰的北冰洋(海冰范围至少连续5年小于 10^6km^2)*可能*一直存在(*中等信度*)。此项评估基于一套子模式,这些模式以非常接近实况的结果再现了气候平均状态以及1979至2012年间北极海冰盖趋势。北极海冰盖*很可能*将进一步退缩和变薄,北部高纬度地区的春季积雪范围和近地表多年冻土*很可能*将随着GMST的升高而减少(图TS.17和图TS.18)。有关南极海冰范围和体积近期将减少的预估具有*低信度*。{11.3.4}

TS.5.4.7 近期气候突变的可能性

有各种机制可导致全球或区域气候产生相对于最近几十年经历的速率的突变。这种变化的可能性一般近期低于长期。因此,各种相关机制主要在TS.5有关长期变化的各节中以及在TFE.5中作了评估。{11.3.4}

TS.5.4.8 预估的近期空气质量变化

空气质量(地面空气中的 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$)的预估区间主要受排放(包括 CH_4)驱动,而不受自然气候变化驱动(*中等信度*)。与空气质量对排放驱动的变化所作出的响应相比,空气质量对气候驱动的各种变化的响应更加不确定(*高信度*)。在全球范围内,升温使本底地面 O_3 减少(*高信度*)。相对于 CH_4 变化小的情景(如RCP4.5和RCP6.0),高 CH_4 排放水平(如RCP8.5和SRESA2)能够抵消 O_3 的减少,导致2100年本底地面 O_3 平均增加大约8ppb(目前水平的25%)(*高信度*)。在大陆尺度上,与SRES各情景相比,在RCP新情景下预估的空气污染水平较低,因为SRES没有结合空气质量立法(*高信度*)。{11.3.5, 11.3.5.2; 图11.22和图11.23ab, All.4.2, All.7.1-All.7.4}

观测和模拟结果表明,在所有其它方面相同的情况下,污染地区局地偏高的表面温度将引发各种区域性化学反馈和局地排放,这将提升 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的峰值水平(*中等信度*)。已知局地排放与本底水平相结合,加上有利于形成污染及其累积的各种气象条件可在局地和区域尺度上产生极端污染时段。与这些极端污染时段相关的气象阻塞作用变化的预估具有*低信度*。关于 $\text{PM}_{2.5}$,气候变化可改变天然气溶胶的来源(野火、风吹扬尘、生物前体物)以及降水冲刷作用,但尚未就气候变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 分布的总体影响赋予任何信度水平。{11.3.5, 11.3.5.2; 文框14.2}

TS.5.5 长期气候变化

TS.5.5.1 预估的长期全球温度变化

在所有RCP情景下，全球平均温度在整个21世纪将继续升高。大约从21世纪中叶起，全球升温速率开始更加随情景而定(图TS.15)。{12.4.1}

在受浓度驱动的各RCP情景的假设条件下，相对于1986-2005年间，2081-2100年间的GMST将可能在各CMIP5模式的5%至95%区间；即0.3°C至1.7°C(RCP 2.6)、1.1至2.6°C(RCP4.5)、1.4°C至3.1°C(RCP 6.0)、2.6°C至4.8°C(RCP8.5)(见图TS.1)。具有高信度的是，根据对TCR的评估，CMIP5的5%至95%区间被评估为可能而不是很可能(见TFE.6)。

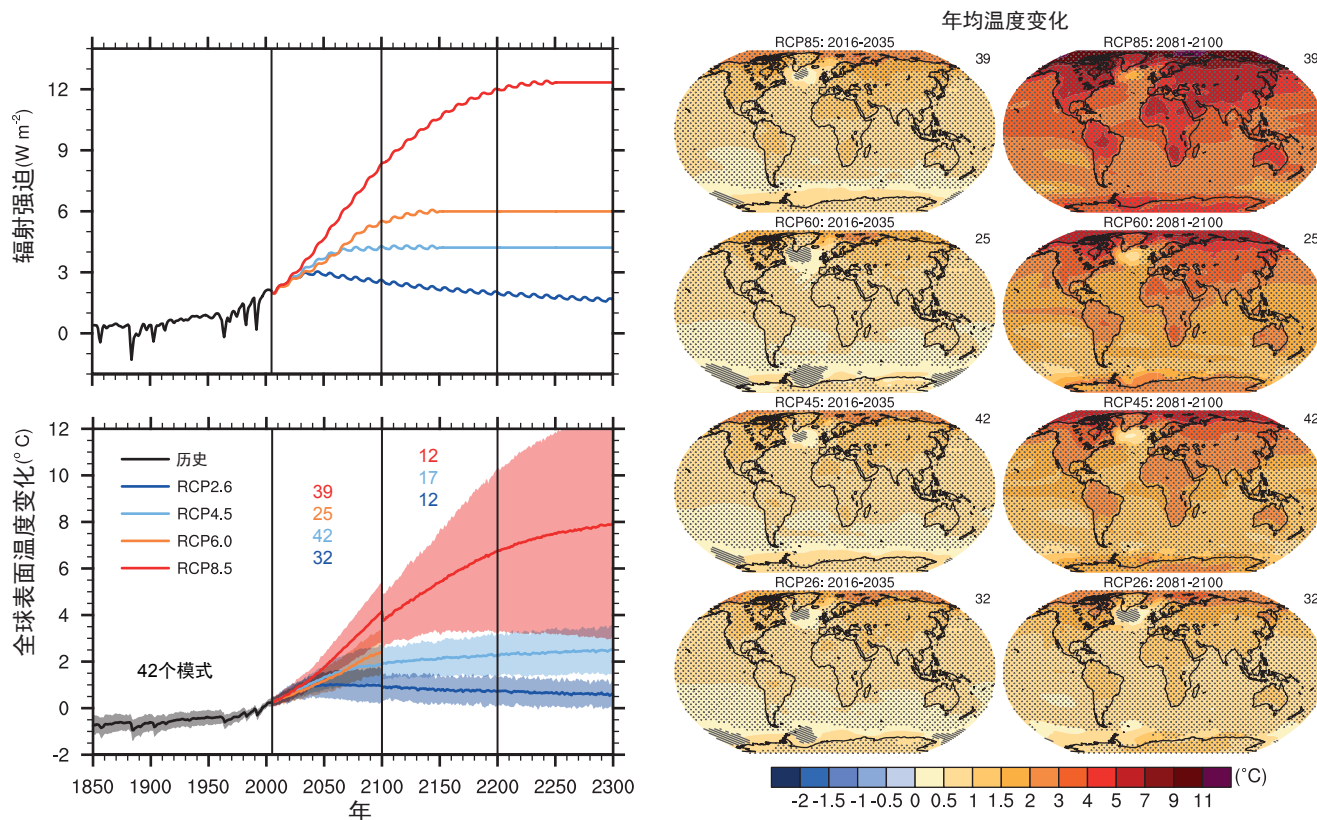
CMIP5模拟的21世纪中叶的全球平均温度变化的5%至95%区间也被评估为可能，但仅为中等信度。相对

于1850-1900年的平均气候状态，在RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景下，预估2081-2100年间的全球平均温度可能比1850-1900年间的平均值高1.5°C(高信度)并在RCP6.0和RCP8.5情景下可能比1850-1900年间均值高2°C(高信度)。在RCP2.6情景下，相对于1850-1900年，温度变化不可能超过2°C(中等信度)。在除RCP8.5以外的所有RCP情景下，到2081-2100年升温幅度不可能超过4°C(高信度)，在RCP8.5中为或许可能(中等信度)。{12.4.1; 表12.2, 表12.3}

TS.5.5.2 预估的长期区域温度变化

具有很高信度的是，21世纪末全球陆地平均变化将超过海洋上温度变化1倍以上，即可能在1.4至1.7倍区间内。在大西洋经向翻转环流没有出现大幅度减弱的情况下，预估北极地区升温幅度最大(很高信度)(图TS.15)。随着GMST升高，大气纬向平均温度的型态表明在整个对

技术摘要



图TS.15 | (左上) 基于温室气体引起气候变化评估模式(MAGICC)的能量平衡模式模拟的四个RCP情景的全球平均总辐射强迫。应指出，由各CMIP5模式模拟的实际辐射强迫在模式之间略有不同。(左下) CMIP5浓度驱动模拟试验给出的全球年均表面气温距平的时间序列(相对于1986-2005年)。图中给出了每个RCP情景下基于年均值的多模式平均预估(实线)以及各模式分布之间存在 ± 1.64 的标准差(5%至95%)(阴影区)。相对于1986-2005年，基于20年(2081-2100年)均值得出的1.64标准差区间可解释为21世纪末出现的各种可能变化。在2100年出现的不连续性是由于开展超出21世纪的延伸运算的模式数量不同，因此没有物理意义。与线条颜色相同的数字表示为不同时期模拟做出贡献的不同模式的数量。地图：在RCP2.6、4.5、6.0和8.5情景下，2016-2035年和2081-2100年这两个时期平均表面气温变化的多模式集合平均值(与1986-2005年基准期相比)。交叉阴影线表示多模式平均信号小于内部变率1个标准差的区域。点线阴影区表示多模式平均信号大于内部变率2个标准差的区域以及90%的模式均给出相同变化符号的区域。在每张图的右上角分别给出了所用的CMIP5模式的数。有关图SPM.7a和图SPM.8.a的更多细节，详见技术摘要的补充材料。{文框12.1; 图12.4, 图12.5, 图12.11; 附件I}

表TS.1|预估的21世纪中叶和后期的全球平均表面气温变化和全球平均海平面上升（相对于1986-2005年基准期）。{12.4.1；表12.2，表13.5}

		2046-2065年		2081-2100年	
情景		均值	可能区间 ^c	均值	可能区间 ^c
全球平均表面 温度变化(°C) ^a	RCP2.6	1.0	0.4至1.6	1.0	0.3至1.7
	RCP4.5	1.4	0.9至2.0	1.8	1.1至2.6
	RCP6.0	1.3	0.8至1.8	2.2	1.4至3.1
	RCP8.5	2.0	1.4至2.6	3.7	2.6至4.8
情景		均值	可能区间 ^d	均值	可能区间 ^d
全球平均海平面 上升(m) ^b	RCP2.6	0.24	0.17至0.32	0.40	0.26至0.55
	RCP4.5	0.26	0.19至0.33	0.47	0.32至0.63
	RCP6.0	0.25	0.18至0.32	0.48	0.33至0.63
	RCP8.5	0.30	0.22至0.38	0.63	0.45至0.82

注:

- a 基于CMIP5集合；针对1986-2005年间计算的距平。利用HadCRUT4及其不确定性估值（5-95%置信度区间），1986-2005年基准期观测到的升温幅度相对于1850-1900年间为0.61 [0.55至0.67] °C，相对于1980-1999年间为0.11 [0.09至0.13] °C，这是《第四次评估报告》使用的预估基准期。尚未参照之前的基准期对上述两个可能区间进行评估，因为在文献中一般没有可供结合模式和观测中各种不确定性的方法。预估的变化和观测到的变化两者相加既无法解释与观测相比模式偏差的潜在影响，也无法解释在该观测基准期内的自然内部变率。{2.4；11.2；表12.2和表12.3}
- b 基于21个CMIP5模式；针对1986-2005年间计算的距平。如果某一特定的AOGCM和情景没有CMIP5结果，则根据在第13章表13.5中的解释进行估算。来自冰盖快速动力变化和人为陆地水储量的贡献均按统一的概率分布进行处理，并在很大程度上依赖情景。这种处理方式并非表明此类相关贡献将不取决于所沿用的情景，而仅表明根据当前的认知水平无法对依赖性进行量化评估。根据当前的认知，只有当南极冰盖的海洋部分已开始崩塌时，才可能在21世纪内引起全球平均海平面大幅度上升并超出这一可能区间。具有中等信度的是，在21世纪内这一新增贡献将不会造成海平面上升超过零点几米。
- c 根据预估计算的5%-95%模式区间。在说明各模式中其它不确定性或不同信度水平的原因为后，再对这些区间进行评估，最终成为可能区间。至于2046-2065年间的全球平均表面温度变化预估，信度为中等，因为自然内部变率具有相对重要性，而且在非温室气体强迫和响应中的不确定性大于2081-2100年间的的多不确定性。2046-2065年间的可能区间没有考虑某些因素可能产生的影响，这些因素可致近期(2016-2035年)全球平均表面温度变化评估区间小于5%-95%的模式区间，因为由于科学认知有限，这些因素对更长期预估的影响尚未量化。{11.3}
- d 根据预估计算的5%-95%模式区间。在说明各模式中其它不确定性或不同信度水平的原因为后，再对这些区间进行评估，最终成为可能区间。关于全球平均海平面上升预估，就这两个时期而言信度为中等。

流层中温度在升高，而在平流层内温度却逐渐下降，这与之前的评估报告相一致。这种一致性在热带地区对流层上层和北方高纬度地区尤为明显。{12.4.3；文框5.1}

几乎确定的是，由于全球平均温度升高，多数地点将出现较多高温极值和较少低温极值。预计被定义为日和季节时间尺度上的极端事件将有这些变化。预计高温极端事件的频率、持续时间和强度将伴随热应力一并增加；但是，偶尔发生的寒冬极端事件将继续出现。预计在大多数区域，低温事件的20年重现值将以大于冬季平均温度的速率不断上升，而低温重现值的最大变化将出现在高纬地区。预计在大多数区域，高温事件的20年重现值将以类似于或大于夏季平均温度的速率不断上升。在RCP8.5情景下，到21世纪末，大多数陆地地区目前20年一遇的高温事件可能将更加频繁发生(至少是现有频率的两倍，但在许多地区将变成一年一遇或两年一遇的事件)而目前20年一遇的低温事件将变的极为罕见(另见TFE.9)。{12.4.3}

模式模拟结果表明，大多数热带和中纬度地区未来的云量将减少，主要是由于低云的减少。海洋边界层云量

的变化最不确定。模拟结果显示在高纬度地区，即朝极地方向50°位置上，云覆盖量和云的光学厚度以及由此形成的云反照率都将不断增加。{12.4.3}

TS.5.5.3 预估的长期大气环流变化

预估随着全球温度的升高，高纬地区的平均海平面气压将下降，而中纬地区的将升高。在热带地区，哈得莱环流和沃克尔环流可能减弱。在RCP8.5情景下，到21世纪末，南北半球中纬度急流可能将朝着极地方向位移大约1至2个纬度(中等信度)，北半球位移则较弱。在南半球夏季，虽然净响应在各模式和情景之间存在很大差异，但由于温室气体的存在，南半球平流层臭氧恢复带来的新增影响对各种变化形成了阻力。对北半球(尤其是北大西洋流域)风暴路径的预估仍有很大不确定性，因而仍维持低信度。哈得莱环流可能变宽，延伸至更宽泛的热带区域并朝极地方向侵入亚热带干旱区域。在平流层，布鲁尔-多普森环流可能会加强。{12.4.4}

TS.5.5.4 预估的长期水循环变化

在星际尺度上，预计相对湿度将维持大致不变，但在气候不断变暖的背景下比湿将增加。陆地和海洋预估的变暖差异推动了大气加湿过程的变化，这可导致在大多数陆地地区近地表相对湿度的小幅下降，而部分非洲热带地区明显例外(中等信度)(见TFE.1, 图1)。**{12.4.5}**

几乎确定的是，全球降水将长期随着已上升的GMST增加。全球平均降水将以每摄氏度小于大气水汽增速的速率不断增加。除RCP2.6以外，其它情景的全球平均降水将可能每摄氏度增加1至3%。在RCP2.6情景下，到21世纪末各CMIP5模式的敏感性区间为每摄氏度0.5至4%。**{7.6.2, 7.6.3, 12.4.1}**

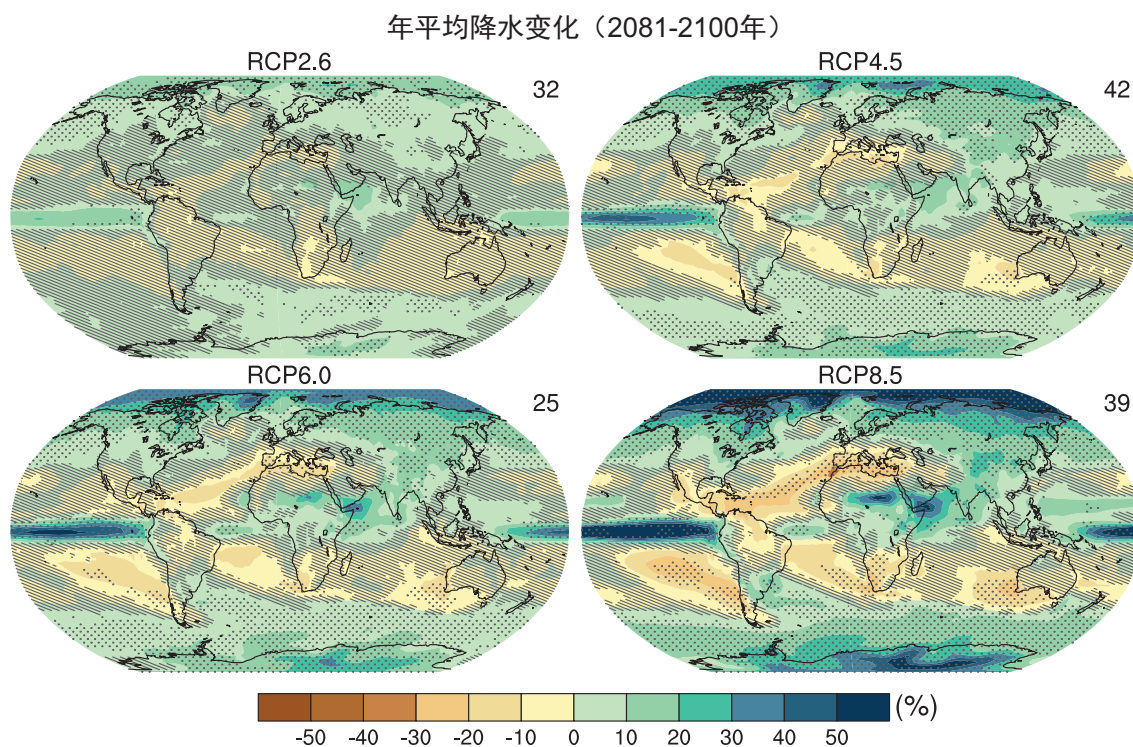
在RCP8.5情景下，在偏暖的世界中平均降水的变化将体现出相当大的空间差异。某些区域的降水将增加，另外一些区域将减少，还有一些区域将看不到任何显著变化(见图TS.16)。具有高信度的是，由于温度升高，在全球大多数地区，干旱与潮湿地区之间以及雨季与旱季之间年均降水的鲜明反差将不断加大。降水变化的一般型态表明，由于偏暖的对流层中比湿增加，并由于在RCP8.5情景下到本世纪末从热带地区输送的水汽增多，高纬度地区很可能经历更大的降水量。在RCP8.5情景下，到本世纪末，许多中纬度地区以及亚热带干旱和半干旱地区

将可能经历较少降水而许多潮湿的中纬度地区将可能经历更多降水。图TS.16给出了四个RCP情景的降水变化图。**{12.4.2, 12.4.5}**

在全球层面上，由于温度升高，短时降水事件可能转变为较多强风暴和较少弱风暴。在变暖的世界中，在大多数中纬度陆地区域以及潮湿的热带区域，极端降水事件将很可能更强和更频繁。对于年最大日降水的20年重现值的全球平均敏感性，其范围是从当地温度升幅的每摄氏度4%(各CMIP3模式的均值)到当地温度升幅的每摄氏度5.3%(各CMIP5模式的均值)，但在区域上却存在广大的差异。**{12.4.2, 12.4.5}**

预计随着全球温度的升高，大部分海域的表面年蒸发量将增加，并陆地的地表年蒸发量将与降水的型态类似。在RCP8.5情景下，到本世纪末，南欧部分地区、中东和非洲南部地区的年径流量将可能减少。在RCP8.5情景下，到本世纪末，随着大幅度增加的冬季和春季降水量，北方高纬度地区的年径流量可能增加。在RCP8.5情景下，到本世纪末，具有中等信度的是，区域至全球尺度上土壤湿度减少和农业干旱风险增加的情况预计可能出现在目前干旱的区域。预估蒸发量减少突出的地区包括非洲南部地区和地中海沿岸的非洲西北部地区。地中海和非洲南部地区土壤湿度的不断减少与预估的哈得莱环流变化和

技术摘要



图TS.16 | 在RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景下，由多个模式模拟的2081-2100年间平均降水量的平均百分率变化结果。图中给出的变化均相对于1986-2005年间。在每张图的右上角标出了参加计算多模式平均值的CMIP5模式数量。阴影线表示多模式平均信号小于内部变率1个标准差的区域。点线表示多模式平均信号大于内部变率2个标准差的区域以及90%的模式均给出相同变化符号的区域(见文框12.1)。有关图SPM.8b的更多细节，详见技术摘要的补充材料。**{图12.22; 附件I}**

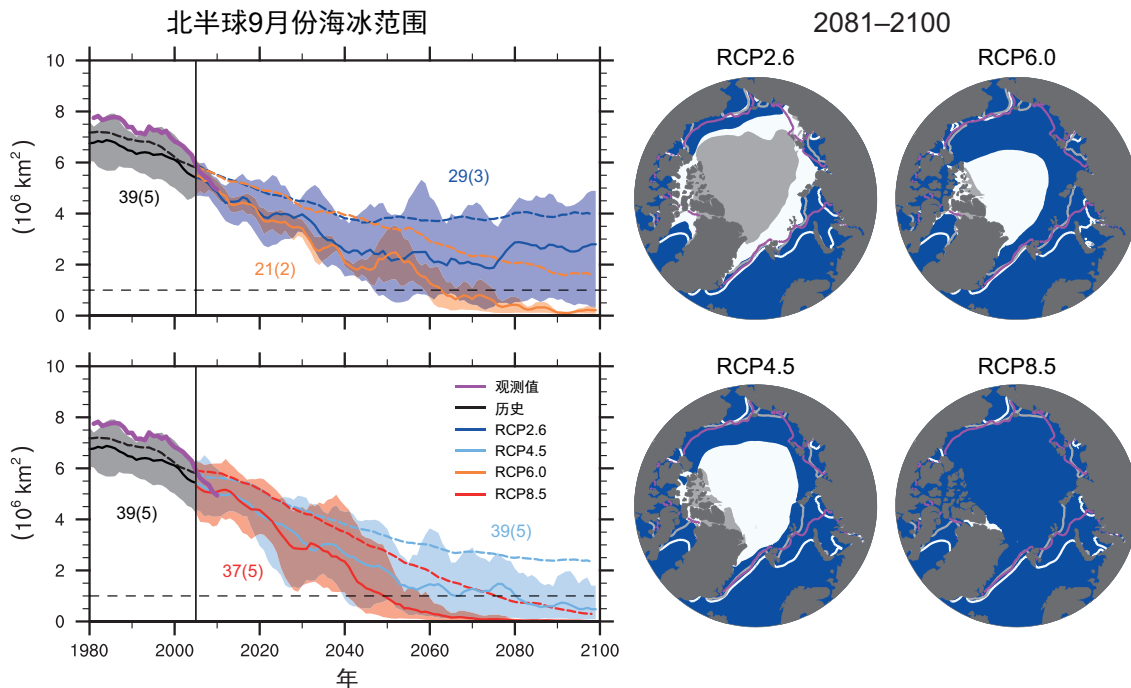
表面温度上升是一致的，所以在RCP8.5情景下，到本世纪末，随着全球温度升高在这些区域出现地表变干的预估可能具有**高信度**。在预估地表变湿的区域，在20年时间尺度上各种变化一般小于自然变率。TFE.1的图1展现了各CMIP5模式给出的水循环预估变化概况。{12.4.5; 文框12.1}

TS.5.5.5 预估的长期冰冻圈变化

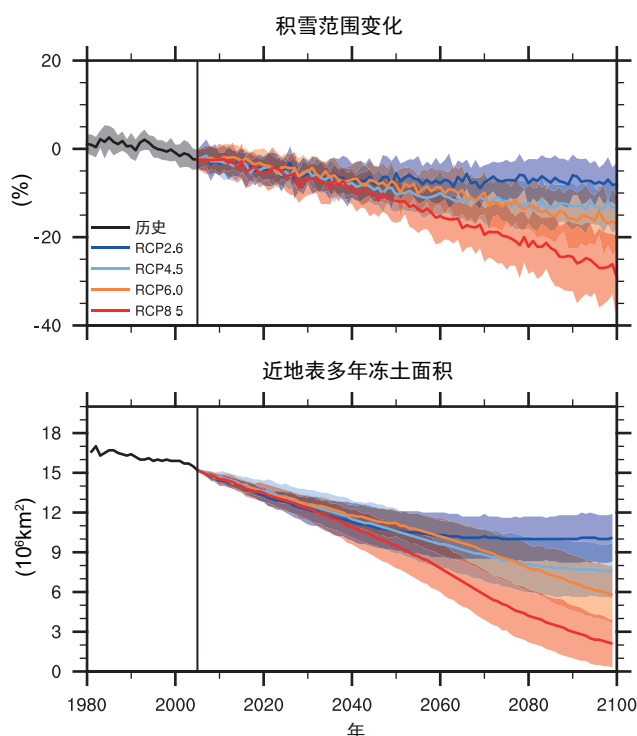
由于GMST升高，在整个21世纪，北极海冰盖很可能将全年继续缩小并变薄。与此同时，预计南极海冰范围和体积将减少，但具有**低信度**。CMIP5多模式预估给出了2081-2100年间的北极海冰范围平均减少率，即与1986-2005年间相比，北极海冰范围在RCP2.6情景下从二月份减少8%到在RCP8.5情景下同月减少34%，以及在RCP2.6情景下从九月份减少43%到在RCP8.5情景下同月减少94%之间不等(中等信度)(图TS.17)。在RCP8.5情景下，在本世纪中叶前，9月期间几乎无冰的北冰洋(海冰范围至少连续5年小于 10^6km^2)可能一直存在(中等信度)，这是基于对一套子模式的评估，这些模式以非常接近实况的结果再现了气候平均状态和1979至2012年间北极海冰盖的趋势。一些气候预估给出了5至10年的北极夏季海冰骤减期-其骤减程度甚至超过了过去十年观测到的减幅-而且

未来可能将出现这种海冰快速消失的情况。在全球气候模式中几乎没有证据表明北冰洋有从常年海冰覆盖向季节性无冰期转变的临界点(或临界阈值)，且超过该临界点海冰进一步消失是无法阻止和不可逆转的。在南极，按CMIP5多模式平均值预估，与1986-2005年相比，在2081-2100年，海冰范围在RCP2.6情景下从二月份减少16%到在RCP8.5情景下同月减少67%，以及在RCP2.6情景下从九月份减少8%到在RCP8.5情景下同月减少30%之间不等。但是，这些预估具有**低信度**，因为在各模式之间的离散度很宽，而且几乎所有可用模式都没有能力再现卫星观测到的南极海冰覆盖面积的总体增加情况。{12.4.6, 12.5.5}

由于全球温度升高，北半球积雪很可能将在下个世纪内减少。几乎确定的是，随着全球温度不断升高，多年冻土的范围将缩小。降水和消融变化可引起积雪变化，但有时则恰好相反。到21世纪末，预估北半球春季积雪面积的减少率将在7 [3至10]% (RCP2.6) 和25 [18至32]% (RCP8.5) 之间(图TS.18)，但这些数值的信度仅为中等，因为在全全球气候模式中降雪过程在很大程度上过于简化。预估的多年冻土变化不仅是对升温的响应，而且也是对积雪变化的响应，积雪可对其下土壤施加某种控制。到21世纪末，预估经诊断分析的近地表多年冻土面积减少率将在37% (RCP2.6) 到81% (RCP8.5) 之间(中等信



图TS.17 | 在RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景下，各CMIP5模式给出的20世纪后期和整个21世纪的九月份北半球(NH)海冰范围，以及相对应的2081-2100年间北半球九月份海冰范围的多模式结果。图中给出的时间序列为5年滑动平均值并标出了参与计算多模式平均值的CMIP5模式数量(括号内给出了子模式数量)。图中还给出了由一套子模式预估的平均海冰范围，这些子模式以非常接近实况的结果再现了气候平均状态和1979-2012年间的北极海冰趋势(实线)，而阴影区表示这套子模式的最低值和最高值区间。黑色(灰色阴影区)表示使用重建的历史强迫模拟的历史演变过程，虚线表示CMIP5多模式平均值。在地图中，白色表示CMIP5多模式平均值，灰色代表子模式的结果。各填充区表示2081-2100年间的平均值，线条表示1986-2005年间的平均海冰范围，粉色表示观测到的海冰范围作为时间序列，粉线表示1986-2005年间的平均海冰范围。有关图SPM.7b和图SPM.8c的更多细节，详见技术摘要的补充材料。{图12.18, 图12.29, 图12.31}



图TS.18 | (上图) CMIP5模式中北半球(NH)春季(3至4月平均)相对积雪面积(RSCA),用模拟的5年盒式滑动平均的春季积雪总面积(SCA)除以模拟的1986-2005年基准期春季平均积雪面积得出相对积雪面积。(下图)利用20年月平均地表气温和雪深诊断的CMIP5模式中北半球近地表多年冻土面积。图中线条表示多模式平均值,阴影表示模式间离散度(1个标准差)。{图12.32, 图12.33}

度)。{12.4.6}

TS.5.5.6 预估的长期海洋变化

在整个21世纪内,在所有RCP情景下,全球海洋都将变暖。预估最强的海洋变暖情况将出现在亚热带和热带地区洋面。预估更大深度的变暖在南大洋最为突出。到21世纪末,在距洋面100米深的表层中,海洋升温的最佳估值大约是从0.6°C(RCP2.6)到2.0°C(RCP8.5),而在距离洋面大约1000米深处,此估值是从0.3°C(RCP2.6)到0.6°C(RCP8.5)。在RCP4.5情景下,到21世纪末,在海洋吸收的热能有50%被最上面700米深的表层吸收,并且85%被最上面2000米深的海水层吸收。由于从海面向海洋深处输送该热能需要很长时间,所以即使温室气体排放减少或其浓度保持稳定,海洋变暖仍将持续几个世纪,并将继续对海平面上升做贡献(见TS5.7节)。{12.4.3, 12.4.7}

TS.5.6 碳循环和其它生物地球化学循环的长期预估

利用几个CMIP5 ESM模式对到2100年的全球碳循环预估给出了一个可体现碳循环与自然气候系统之间复杂相互作用的宽广区间。{6}

具有很高信度的是,在所有四个RCP情景下,海洋对人为CO₂的吸收将一直持续到2100年,而且在更高的浓度路径中碳吸收也更高。陆地碳吸收的未来演变更加不确定。绝大多数CMIP5 ESM模式预估陆地生态系统的碳净吸收将一直持续到2100年。然而,有少数模式的模拟结果表明:由于气候变化和土地利用变化的综合影响,到2100年对于大气将出现一个净CO₂源。鉴于在模式结果中存在大离散度,而且过程描述也不完整,因此对未来不同陆地碳变化强度的模拟具有低信度。{6.4.3}

具有高信度的是,由于大气CO₂不断增加,气候变化将部分抵消全球陆地和海洋碳汇增量。然而,海洋和陆地CO₂通量对气候的响应在各CMIP5 ESM模式之间存在区域差异。在各模式之间具有高一致性的是,在更暖的气候中,热带生态系统储存的碳将减少。在各CMIP5 ESM模式之间具有中等一致性的是,在高纬度地区,温度升高将增加陆地碳储量,虽然在这些模式中没有任何一个模式解释了多年冻土中的碳分解过程,而这一分解过程可能抵消已增加的陆地碳储量。具有高信度的是,因温度升高导致的多年冻土范围的退缩将造成某些目前处于冻结状态的碳逐渐融化。但是,具有低信度的是,通过CO₂和CH₄排入大气的碳损失强度在RCP8.5情景下从2000年至2100年具有一个从50至250 PgC的区间。{6.4.2, 6.4.3}

冻土的碳损失构成了一种辐射正反馈,这正是当前ESM耦合模式的预估中所缺失的。在各CMIP5 ESM模式之间具有高一致性的是,海洋变暖和环流变化将减缓南大洋和北大西洋的海洋碳吸收速度,尽管如此,碳吸收仍将在这些区域持续下去。{6.4.2}

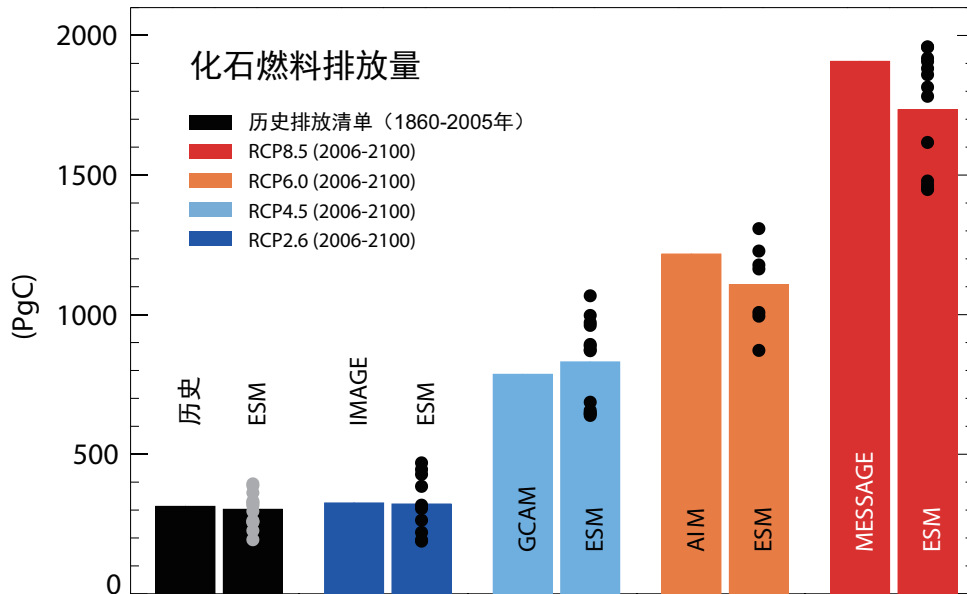
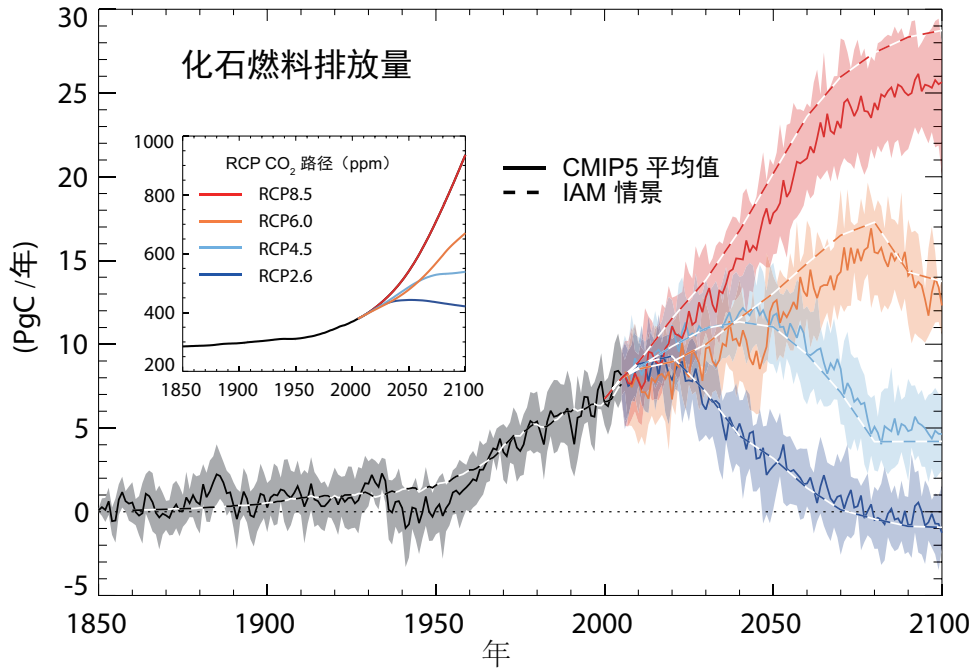
根据新的试验结果和模拟,在四个RCP情景下,营养物储存很可能将限制不断增加的大气CO₂对未来各种陆地碳汇的影响。具有高信度的是,氮可用量低将限制陆地碳存储,甚至当考虑人为氮沉降时也是如此。磷的限制作用更不确定。{6.4.6}

至于受CO₂浓度驱动的ESM模拟,对陆地和海洋碳循环的描述可对与各RCP情景兼容的化石燃料排放进行量化。在2012至2100年间,在RCP2.6情景下,ESM结果显示兼容的累计化石燃料排放量为270[140至410]PgC,在RCP4.5情景下为780[595至1005]PgC,在RCP6.0情景下为1060[840至1250]PgC,以及在RCP8.5情景下为1685[1415至1910]PgC(援引各值最小保留到5PgC的个位整数,CMIP5模式结果的标准差区间为±1)(图TS.19)。在RCP2.6情景下,各模式预估相对于1990年水平,到2050年将出现平均50%的减排(14%至96%区间)。到21世纪末,大约一半模式推测排放量将略大于零,而另一半模式推测大气中将出现CO₂的净清除(另见文框TS.7)。{6.4.3; 表6.12}

当在RCP8.5情景下受到CO₂排放强迫时，与RCP8.5情景中的CO₂浓度正相反，具有交互碳循环的CMIP5 ESM的模拟结果是，到2100年将出现平均高出50 (-140至+210) ppm的大气CO₂浓度和平均高出0.2 (-0.4至+0.9) °C的全球表面温度升幅(CMIP5模式离散度)。{12.4.8}

几乎确定的是，海洋中增加的碳储量将来会加剧海

水酸化，同时将延续在过去几十年中观测到的趋势。洋面的海水酸化将随大气CO₂变化，随着CO₂继续向海洋深处渗透，海水酸化也将将在深海中扩大。各CMIP5模式一致预估，在所有RCP情景下，全世界海洋酸化将增加直至2100年。到21世纪末，在RCP2.6情景下洋面海水的pH值将相应下降0.065(0.06至0.07)，在RCP4.5情景下将下降

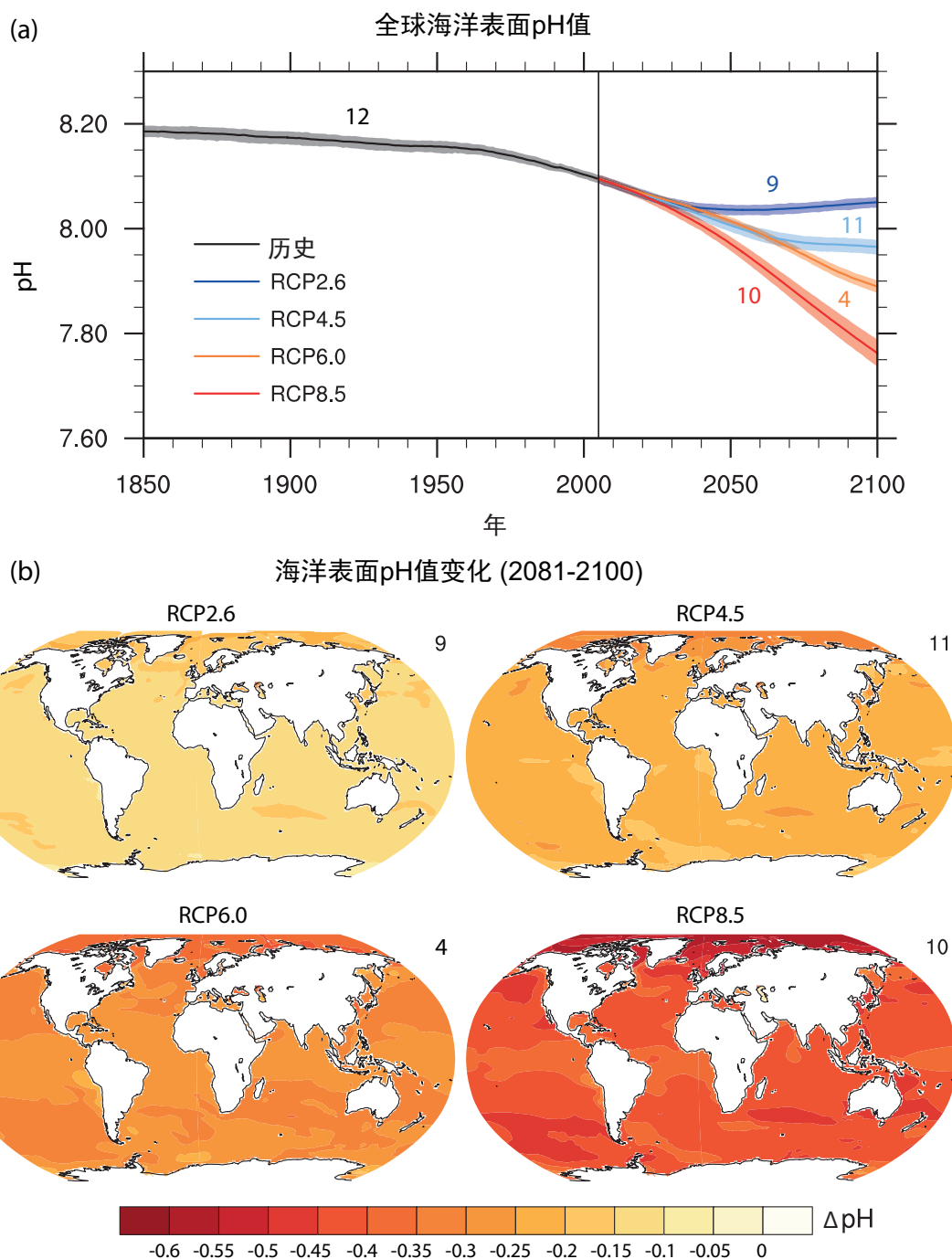


图TS.19 | 在所有四个RCP情景下，由各CMIP5模式模拟的可兼容的化石燃料排放量。(上图)年排放的时间序列(PgC/年)。虚线表示历史估值和可用于确定RCP情景的若干综合评估模式(IAM)计算的RCP排放量。实线和羽状轮廓表示各CMIP5地球系统模式结果(ESM, 模式均值, 阴影区内为1个标准差)。(下图)针对历史估值和RCP情景模拟的历史时期(1860-2005年)和21世纪(在CMIP5中定义为2006-2100年间)的累计排放量。左侧直方表示各IAM模式给出的累计排放量, 右侧直方表示各CMIP5 ESM给出的多模式平均估值, 而点线表示各单个ESM结果。从各CMIP5 ESM结果中看出, 可跟踪陆地-大气-海洋系统的碳总量, 而该碳总量的变化必须等于排入该系统的化石燃料排放量。因此, 通过以下等式给出兼容的排放量: 累计排放量 = $\Delta C_A + \Delta C_L + \Delta C_O$, 而排放率 = $d/dt [C_A + C_L + C_O]$, 式中 C_A , C_L , C_O 分别为存留在大气、陆地和海洋中的碳。此图没有考虑百年时间尺度上很小的其它CO₂源和汇, 如火山、沉积或岩石风化等。{文框6.4; 图6.25}

0.145 (0.14至0.15)，在RCP6.0情景下将下降0.203 (0.20至0.21)，以及在RCP8.5情景下将下降0.31 (0.30至0.32) (CMIP5模式离散度) (图TS.20)。在大多数情景下，预估洋面海水将在十年内对北极部分地区以及某些沿海上升流系统中的文石造成季节性腐蚀，并将在10至30年内将对南大洋部分海域中的文石造成季节性腐蚀。文石是一种欠稳定的碳酸钙形式，当大气CO₂浓度达到500至600 ppm水平时，文石未饱和状态则成为上述区域的普遍现象。

象。{6.4.4}

作为对洋面升温的响应，在21世纪期间海洋溶解氧含量很可能将减少几个百分点。各CMIP5模式表明，溶氧减少的情况将主要出现在中纬度海洋的次表层，这是由于层结得到加强，通风减少和海水升温所致。但是，关于公海中低氧水和稀氧水容积的未来发展动向尚无共识，因为在潜在的生物地球化学影响和热带海洋动力演变方面还存



图TS.20 | (a): 时间序列 (模式平均值区间和最低至最高值区间) 和 **(b):** 2081-2100年间在RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景下的多模式海洋表面pH值图。(b)中的小图表示2081-2100年间全球海洋表面pH值变化(相对于1986-2005年)。在每张图右上角标出了参与计算多模式平均值的CMIP5模式数。有关图SPM.7c和图SPM.8.d的更多细节，详见技术摘要的补充材料。{图6.28}

专题要素

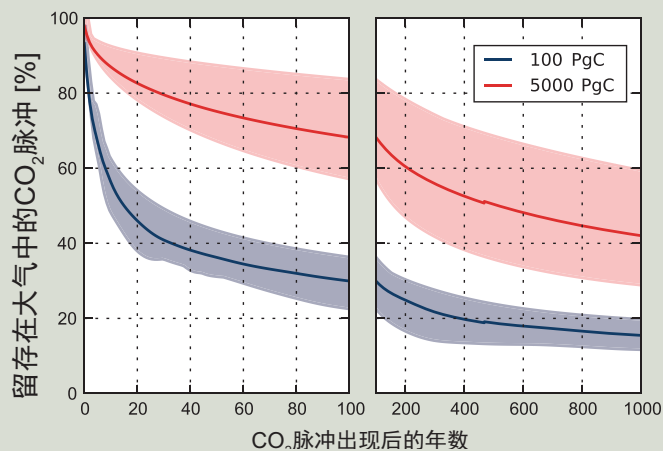
TFE.7 | 碳循环扰动与不确定性

自工业革命开始(约1750年)以来,自然碳循环一直受到人类活动产生的二氧化碳(CO₂)排入大气后的影响,CO₂基本上都来自化石燃料的燃烧和土地利用变化,以及来自水泥生产的小贡献。化石燃料的燃烧是一个与能源生产有关的过程。化石燃料中的碳源于埋入地壳几百万年后形成的煤、石油和天然气地质沉积矿。土地利用变化产生的CO₂排放则是与为了粮食、饲料和木材生产而将自然生态系统转变为管理的生态系统有关,而CO₂排自于植物材料的焚烧或死亡植物和土壤有机碳的分解。例如,当清除一片森林时,植物材料可通过焚烧很快释放到大气中,或历经多年经死亡的生物质自身腐烂和土壤碳分解后排入大气。{6.1, 6.3; 表6.1}

大气中由人类产生的大量CO₂可通过陆地生态系统中中和海洋中各种碳汇从大气中清除一部分,目前在大气中留下了不到一半的CO₂排放量。自然碳汇之所以能清除部分CO₂是由于在不同时间尺度上起作用的物理、生物和化学过程。大量的大气CO₂支撑着由各种植物通过光合作用完成的CO₂固化,而CO₂作为植物生物质留存或储存在土壤中。在陆地上存储的碳的驻留时间取决于有机碳的分室(植物/土壤)和成分,时间尺度从几天到几个世纪之间不等。在未受到土地利用变化影响的陆地生态系统中碳储量增加可能是由于在较高CO₂水平上光合作用增强、氮沉积和气候变化有利于形成碳汇,如中高纬度地区植物生长季节延长。{6.3, 6.3.1}

海洋对人为CO₂的吸收主要是对大气中不断增加的CO₂作出的响应。海洋表面吸收的或通过各类水系(如江河、地下水系)输送到海洋的大量大气CO₂被埋入沿海泥沙中或输送到海洋深处并在那里储存几十年至几百年。海洋深处的碳可分解海洋碳酸盐沉积物,使大量CO₂储存几百年乃至几千年。在1000年内,存留大气中的CO₂排放量将在15%至40%之间,这取决于释放到大气中的碳总量(TFE.7, 图1)。在1万年或更长地质时间尺度上,通过岩石风化作用可非常缓慢地从大气中清除更多CO₂,1万年后将存留大气中的CO₂比例降至10%至25%。{文框6.1}

可将碳循环对未来气候和CO₂变化的响应视为两种虽强但却截然相反的不同反馈。浓度-碳反馈决定着因CO₂增加引起的碳储量变化,而气候-碳反馈则决定着因气候变化引起的碳储量变化。具有高信度的是,已增加的大气CO₂将导致陆地和海洋碳吸收增加,但吸收量不确定。各模式一致认为陆地和海洋对不断增加的CO₂做出响应的符号为正值,但模式对海洋和陆地碳吸收强度却仅分别给出了中等和低一致性的评估(TFE.7, 图2)。与保持气候稳定的情形相比,未来的气候变化将降低陆地和海洋的碳吸收能力(中等信度)。这一结果进一步得到古气候观测和模拟的支持,两者表明在世纪至千年时间尺度上,气候与碳循环之间存在一种正反馈。虽然各模式就陆地和海洋对气候变化做出响应的符号取得了一致,即在全球范围内该响应符号为负值,但对这一响应的强度却给出了低一致性的评估,尤其是对于陆地(TFE.7, 图2)。IPCC《第四次评估报告》(AR4)以来做出的一个重要更新是在一些陆地碳模式中引入了营养动力学,尤其是氮的可用量对植物生长施加的各种限制。具有高信度的是,在全球尺度上,相对于耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)仅限于碳的

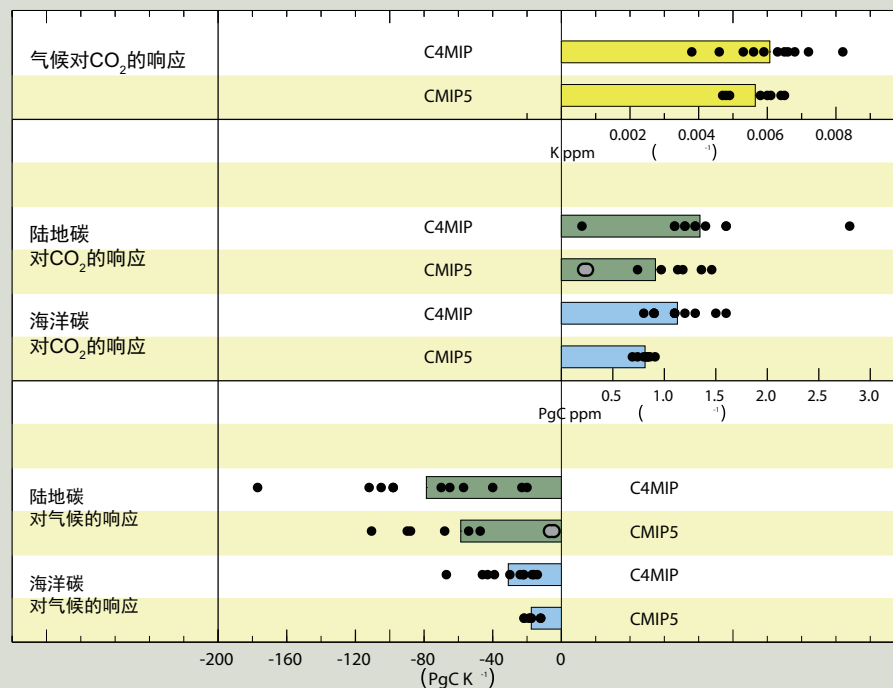


TFE.7, 图1 | 由一系列气候-碳循环耦合模式计算的留存在大气中的初始大气CO₂扰动对0年的理想瞬时CO₂排放脉冲作出响应的百分比。在100 PgC(蓝)和5,000 PgC(红)的瞬时排放脉冲出现后,模拟了100年(左图)和1000年(右图)时期的多模式平均值(线条)和不确定性区间(最大模式区间,阴影区){文框6.1, 图1}

(接下页)

TFE.7 (续)

地球系统模式(ESM)，各CMIP5 ESM模式(包括一个陆地氮循环)将降低陆地生态系统的浓度-碳反馈和气候-碳反馈的强度(TFE.7, 图2)。引入各种氮循环过程后, CMIP5集合之间的离散度扩大。CMIP5给出的海洋对CO₂和气候敏感性的离散度与《第四次评估报告》相比似乎有所缩小(TFE.7, 图2)。**{6.2.3, 6.4.2}**



TFE.7, 图2 | 在编写《第四次评估报告》时在SRES A2情景下7个大气环流模式(GCM)集合加上4个中等复杂性地球系统模式(EMIC)(碳循环气候耦合模式比对项目(C⁴MIP))与在140年每年CO₂增加1%情景下8个CMIP5模式之间的碳循环反馈度量比较。黑点表示单个模式的模拟结果,彩色直方表示多模式结果的平均值,灰点表示引入了耦合陆地氮循环的模式。与各C⁴MIP模式的比对是为了提供背景,但已知这些度量在不同情景和变化速率中是可变的(见6.4.2节)。SRES A2情景在变化速率上比较接近每年CO₂增加0.5%情景,因此可预计CMIP5气候-碳的敏感性项应具可比性,但浓度-碳的敏感性项可能是CMIP5比C⁴MIP小20%左右,这是由于陆地和海洋在对更高CO₂增速的响应能力上存在滞后。这种对情景的依赖性降低了对CMIP5碳循环反馈如何有别于C⁴MIP的量化描述的信度。**{图6.21}**

具有很高信度的是,在所有四个典型浓度路径(RCP)下,人为CO₂排放的海洋碳吸收将一直持续到2100年,相对于更高的浓度路径,碳吸收也更高。陆地碳吸收的未来演变更加不确定,绝大多数模式预估在所有RCP情景下将有持续的净碳吸收,但有些模式的结果表明由于气候变化和土地利用变化的综合效应,陆地将出现碳净损失。鉴于模式结果中存在大的离散度,而且过程描述也不完整,因此对未来不同陆地碳变化强度的模拟具有低信度。**{6.4.3; 图6.24}**

除碳循环外,各种生物地球化学循环和反馈在未来气候系统中起到重要作用,虽然碳循环是最强的循环过程。除了与各种CO₂源和汇相互作用之外,氮循环中各种变化还影响陆地和源自海洋的氮氧化物(N₂O)的排放。在过去20年间人类引起并产生的活性氮一直在稳定增加,这主要是由于生产氨用作化肥和用于工业所致,并且豆类作物种植和化石燃料燃烧也做出了重要贡献。**{6.3}**

但是,有许多过程尚未在气候-生物地球化学耦合模式中得到体现(如涉及磷、硅和铁等生物元素的其它过程),所以不得不在线下模式或较为简单的模式中对这些生物元素的强度进行估算,难以对这些元素进行量化评估。这类过程之间许多可能将是非线性相互作用,但是尚未得到充分量化。因此,对气候与生物地球化学循环之间的未来反馈的评估依然存在大的不确定性。**{6.4}**

文框TS.7 | 气候地球工程方法

地球过程被定义为刻意地大规模干预地球系统，以抵消气候变化给地球造成的不良影响。减少二氧化碳（CDR）的目的是减缓或扭转预估的未来大气CO₂浓度的增幅，同时加快自然清除大气CO₂的速度并增加陆地、海洋和地质碳库中的碳储量。太阳辐射管理（SRM）旨在通过减少气候系统吸收的日照量的方式抵消与温室气体浓度增加有关的升温。有一项相关技术试图通过改变高层云量的方式刻意减少气候系统中的温室效应。{6.5, 7.7; FAQ 7.3}

如果能够减少CO₂，CDR方法可减缓气候变化，但是这里存在各种不确定性、副作用和风险，而且方法的实施将会取决于技术成熟度以及经济、政治和伦理等方面的考量。CDR可能需要大规模部署并至少持续一个世纪方可显著降低CO₂浓度。目前生物地球化学和技术方面存在各种限制，从而难以给出有关CDR潜力的量化估值。几乎确定的是，通过CDR从大气中清除的CO₂会因释出之前储存在海洋和陆地碳库中CO₂而被部分抵消。CDR方法的某些气候和环境方面的副作用与因造林而改变的地表反照率、因海洋肥化作用引起的海洋去氧化，以及N₂O排放增强等现象有关。基于陆地的各种CDR方法也许会面临各种土地竞争需求。有关CDR方法成效及其对碳和其它生物地球化学循环的副作用的信度水平低。{6.5; 文框6.2; FAQ 7.3}

SRM仍未实施也没有经过测试，但如果能够实现，则可抵消全球温度升高及其某些影响。具有中等信度的是，通过在平流层注入气溶胶，SRM是可扩展的，足以抵消辐射强迫和某些因CO₂浓度翻倍后预计产生的气候效应。由于对气溶胶-云相互作用缺乏足够的认识，是否可通过使云增亮的SRM方法实现差不多大的辐射强迫目前尚无共识。目前看来采用改变陆地反照率的SRM方法无法产生大的辐射强迫。由于有关其它SRM方法的文献有限，无法对这些方法作出评估。{7.7.2, 7.7.3}

已发现SRM存在多种副作用、风险和缺陷。SRM会对温室气体的辐射强迫产生一种无法精确的补偿。有几条证据链表明，如果维持全球表面温度，SRM会造成全球降水出现虽小但却显著的减少（在区域尺度上存在较大的差异）。另一种已得到相对充分阐述的副作用是有可能造成极地平流层臭氧的轻微消减，而这一消减与采用平流层气溶胶SRM方法有关。还有可能带来其它难以预料的后果。{7.6.3, 7.7.3, 7.7.4}

只要温室气体浓度继续增加，SRM也会需要相应加大，同时各种副作用会不断加剧。此外，一旦把SRM扩展到相当高的水平，风险会接踵而来，即若出于任何理由SRM被终止，那么具有高信度的是，表面温度会迅速（在10年或20年内）升至与温室气体强迫相一致的温值，这会对气候变化速率敏感的各种系统构成压力。最后，SRM不会补偿因CO₂不断增加而引起的海洋酸化。{7.7.3, 7.7.4}

在大的不确定性。{6.4.5}

具有很高信度的是，海洋中和陆地上的碳循环将继续对21世纪期间出现的气候变化和大气CO₂增加做出响应（见TFE.7和TFE 8）。{6.4}

TS.5.7 海平面变化的长期预估

TS.5.7.1 21世纪全球平均海平面变化预估

根据CMIP5气候预估的计算结果，同时结合基于过程的冰川和冰盖表面物质平衡模式，并结合公开发表的文献中评估的可能冰盖动力变化，与1986-2005年相比，2081-2100年间GMSL的上升区间可能为5%-95%。这

些可能区间具体为0.26至0.55米（RCP2.6）、0.32至0.63米（RCP4.5）、0.33至0.63米（RCP6.0）和0.45至0.82米（RCP8.5）（中等信度）（图TS.1，图TS.21）。在RCP8.5情景下，到2100年GMSL将上升0.52-0.98米。在所有情景下GMSL上升的中心预估值在21世纪中期前均位于0.05米以内，此时所有预估值开始离散；到21世纪末，所有情景预估值的离散度为0.25米。虽然在本世纪末在RCP4.5和RCP6.0情景下升幅变化非常相似，但与RCP6.0情景相比，RCP4.5情景在本世纪初期具有更高的上升速率。GMSL上升不仅取决于CO₂累积排放总量，而且还取决于其排放路径。因此在累积排放总量相同的情况下，越早减排，海平面上升的减缓幅度就越大。{12.4.1, 13.4.1, 13.5.1; 表13.5}

预估的**可能区间**的信度高低源自基于过程的模式与观测资料和对物理机制认知的一致性。已考虑了对21世纪GMSL上升作出更高预估的基础，而且已得出的结论是：目前没有足够证据可用于评估高出上述**可能区间**特定水平的概率。根据目前的认知，只有南极冰盖的洋基部分出现崩塌才会导致GMSL出现大大高于21世纪**可能区间**的情况。这种崩塌发生概率有多大，目前尚无共识，其对GMSL上升的潜在额外贡献亦无法精确量化，然而，具有**中等信度**的是，21世纪内它不会超过海平面上升的几分米。{13.5.1, 13.5.3}

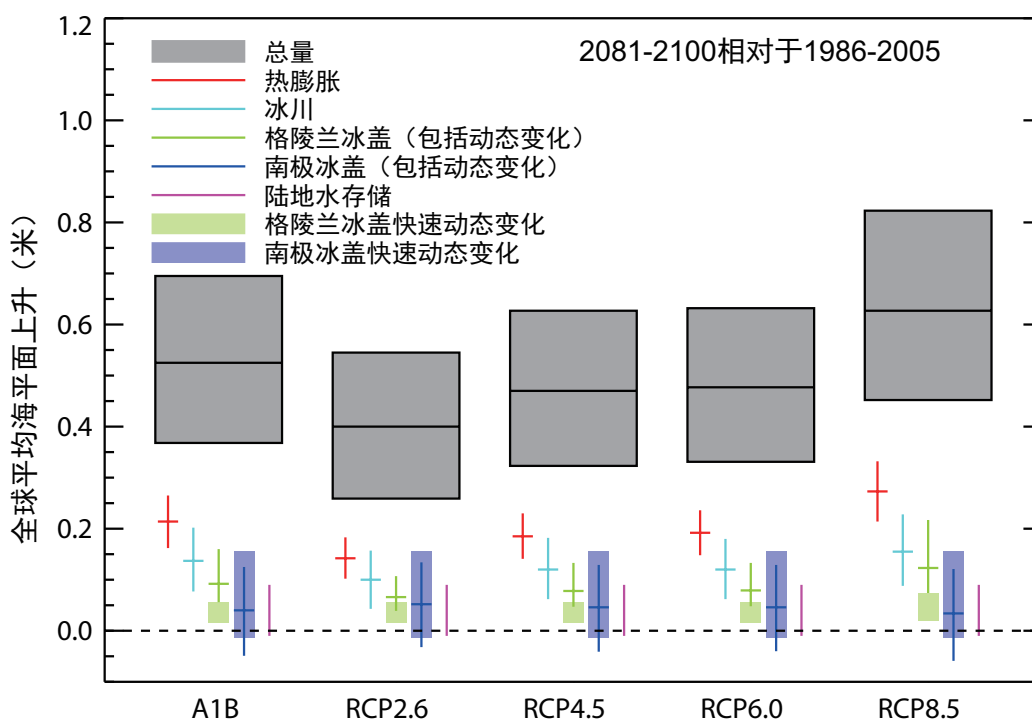
在所有RCP情景下，21世纪期按时间-平均的GMSL上升速率**很可能**超过1971至2010年间观测到的速率。在所有预估中，上升速率在最初有所增加。在RCP2.6情景下，上升速率在本世纪中期前大致稳定(中心预估值为每年约4.5毫米)，接下来略微下降。到21世纪末，在RCP4.5和RCP6.0情景下的上升速率大致趋于稳定，而在RCP8.5情景下上升速率持续增加(2081-2100年达到每年11 [8至16]毫米)。{13.5.1; 表13.5}

在所有RCP情景下，热膨胀的贡献最大，占30-

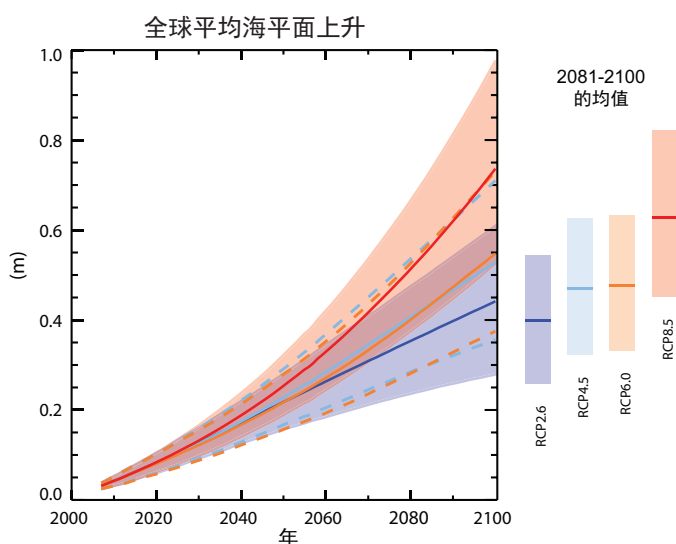
55%。冰川次之，占15-35%。到2100年，预估在RCP2.6情景下15-55%的现存冰川体积将消失，在RCP8.5情景下为35-85% (**中等信度**)。格陵兰冰盖表面融化增量预估超过累积增量，具有**高信度**的是，格陵兰冰盖表面物质平衡变化将对21世纪海平面上升具有积极贡献。预估南极冰盖表面融化量将保持低位，而具有**中等信度**的是，降雪量将增加(图TS.21)。{13.3.3, 13.4.3, 13.4.4, 13.5.1; 表13.5}

具有**中等信度**的是，目前有能力模拟未来年代际尺度的冰盖动力的快速变化。在AR4时期，由于科学认知不足，无法评估这种变化的可能性。自AR4发表以来，在认知相关过程、开发可供模拟冰盖变化的新模式方面取得了长足进步。然而，在作与特定情景相关的预估时，公开发表的文献提供的依据并不够充分。在我们对2081-2100年GMSL上升预估中，格陵兰冰盖和南极冰盖的合计流出量的快速变化**可能区间**为0.03-0.20米，增加了这一要素是本次预估值高于AR4预估值的最重要原因。{13.1.5, 13.5.1, 13.5.3}

半经验模式的设计初衷是再现校准周期内观测到的



图TS.21 | 根据基于过程的模式，在四个RCP情景和AR4使用的SRES A1B情景下预估的2081至2100年间（相对于1986-2005年）GMSL上升的**可能区间**和中位数及其贡献来源。冰盖贡献包括冰盖快速动力变化的贡献，单独列出。冰盖快速动力变化和人为陆地水储存的贡献作为独立情景并以一致的概率分布处理（除RCP8.5情景下分析格陵兰冰盖流出量使用了更高的变化率）。这种处理方法并不否认相关贡献取决于之后的情景，而是因为已有的知识无法量化评估对情景的依赖性。详见13.5.1和13.5.3节的讨论以及关于方法的补充材料。根据目前认识，只有南极冰盖的洋基部分出现崩塌，才可能使GMSL在21世纪的上升幅度大大高于**可能区间**。这种可能的额外贡献无法精确量化，但是具有**中等信度**的是，在21世纪由它引起的海平面上升不会超过几分米。{图13.10}



图TS.22 | 相对于1986-2005年四个RCP情景下基于过程的模式对GMSL上升的预估。实线表示中位数预估，虚线表示RCP4.5和RCP6.0情景下的可能区间，阴影部分表示RCP2.6和RCP8.5情景下的可能区间。彩色竖直方表示2081至2100年的时间平均值。详见13.5.1、13.5.3节和补充材料。根据目前认识，只有南极冰盖的洋基部分出现崩塌，才可能使GMSL在21世纪的上升幅度大大高于可能区间。这种可能的额外贡献无法精确量化，然而，具有中等信度的是，在21世纪由它引起的海平面上升不会超过几分米。相关图SPM.9的详情见TS补充材料。{表13.5；图13.10，13.11}

海平面记录，但不把海平面上升归因于单个物理分量。在不同RCP情景下，一些半经验模式预估的区间与基于过程的模式预估的可能区间重叠，而其它半经验模式预测的中位数和第95百分位是基于过程的模式预测值的两倍。在几乎所有案例中，半经验模式的第95百分位均高于基于过程的模式的可能区间。RCP4.5情景下的2081-2100年间（相对于1986-2005年），半经验模式预估的中位数为0.56-0.97米，它们的第95百分位高达约1.2米。这种差距意味着，要么有某种贡献目前未被基于过程的模式识别或被低估，要么半经验模式的预估过高。用半经验模式来预估所基于的假定是：未来海平面变化与辐射强迫或全球平均温度变化的关系和过去相同。如果潜在的非线性物理过程未来变化尺度无法根据以往经验校准，那么这种假设就站不住脚。科学界对半经验模式的可靠性尚无共识，故将其评估为低信度。{13.5.2，13.5.3}

TS.5.7.2 2100年后全球平均海平面变化预估

几乎确定的是，GMSL在2100年后会持续上升。现有的少数可模拟2100年后的模式结果表明，如在RCP2.6情景下，在CO₂浓度达到峰值后下降并保持低于500ppm对应的辐射强迫下，到2300年GMSL相对于工业化时代之前时期（此处确定为大气CO₂浓度稳定在280ppm）的上升

会小于1米。但是，如在RCP8.5情景下，在对应CO₂浓度高于700ppm，但低于1500ppm的辐射强迫下，上升幅度预估在1米到3米以上（中等信度）。{13.5.4}

因海洋热膨胀引起的海平面上升会持续数百年至数千年。热膨胀量随全球变暖而加剧（模式预估的区间为0.2至0.6m°C⁻¹）。冰川的贡献随其体积（当前融化后相当于海平面上升0.43米）的减少而减少。在南极，2100年后在GHG更高的情景下，表面融化增量可超过累积增量。{13.5.2，13.5.4}

现有证据表明，高于某一阈值的全球变暖会导致一千多年或更长时间内格陵兰冰盖几乎完全消失，使全球平均海平面上升约7米。对当今恒定的冰盖地形研究表明，相对于工业化时期前，GMST上升的阈值为大于2°C但小于4°C（中等信度）。利用冰盖动力变化开展的一项研究指出，该阈值比工业化时代前全球平均变暖高约1°C（低信度）。由于现在科学上的不确定性，无法量化可能区间。冰盖完全消失不是不可避免的，因为发生这种情况需要一千年或更长时间；如果温度在冰盖消失前下降，那么冰盖可能会重新增长。然而，有些冰量损失是不可逆的，这取决于超出阈值的时长和程度，因为冰盖与区域气候的相互作用使之可能有多种稳定状态。{13.4.3，13.5.4}

目前的信息表明，2100年后冰盖仍有动力贡献，但在预估中的信度低。在格陵兰，与海水相互作用导致的冰盖流出量正在减少，因为冰盖边缘由沿海向内陆退缩。相比之下，南极的基岩地形导致冰量损失随着冰盖退缩而增多。南极西部的冰盖融化后相当于全球海平面上升3.3米，这些冰盖所在区域遍布向下倾斜的基岩，由于海洋冰盖不稳定，这些地方的冰量可能遭受损失。不能排除气候强迫造成南极冰盖的洋基部分由于潜在的不稳定性而出现突然、不可逆的冰量损失的可能性，但现在的证据和认识不足以做出量化的评估。由于南极降雪量相对较弱，内部冰层流速较慢，可预估其西部冰盖因动力流出而消失后，要重新增长至少需几千年。因此，下个世纪南极西部一旦发生显著的冰量损失，那么在几百年至几千年的时间尺度内都是不可逆的。{5.8，13.4.3，13.4.4，13.5.4}

TS.5.7.3 区域海平面变化预估

区域海平面会因海洋环流动力变化、海洋热含量变化、整个地球系统的物质再分配和气压变化而变化。海洋动力变化源自风强迫和浮力强迫（热和淡水）、相关的环流变化及热与淡水的重新分布。在几天以上的时间尺度上，区域海平面也几乎均衡地根据海平面气压相对于平均状态的变化而变化。（当代和过去的）冰盖冰量损失、

冰川冰量损失和陆地水文变化导致水量在冰冻圈、陆地和海洋之间的重新分布，使固体地球、地球自转和重力场的变化具有区域特征。在一些沿海地区，水循环的变化、人为导致的地表沉降、构造运动和海岸过程可以支配相应的海平面变化，即海洋表面相对于陆地的高度变化。{13.1.3, 13.6.2, 13.6.3, 13.6.4}

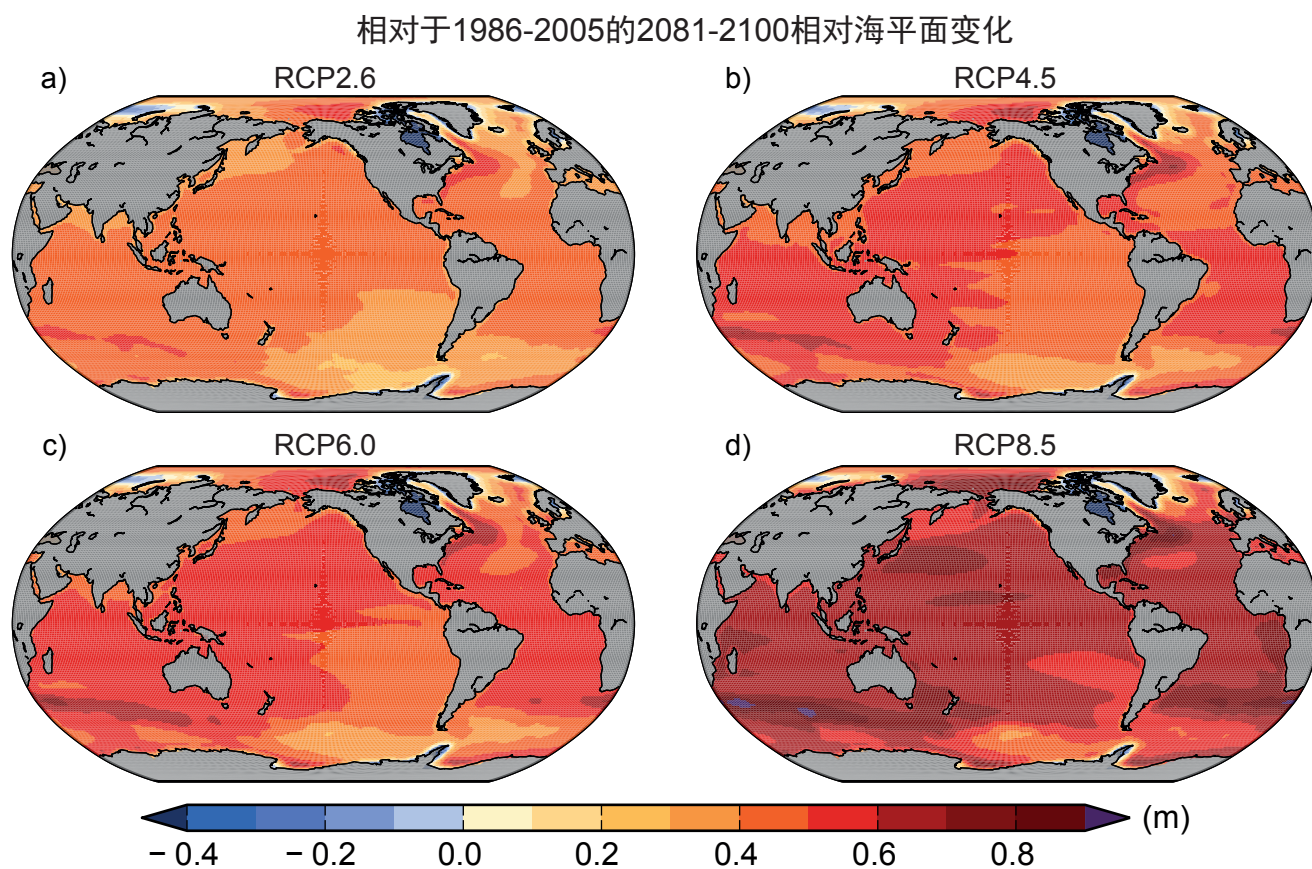
到21世纪末，海平面变化将有明显的区域型态，这将成为主要差异，且许多地区的变化可能会与全球平均变化有很大差别(图TS.23)。很可能是，约超过95%的海洋区域将经历区域性相对海平面上升，而经历海平面下降的区域大都靠近当前或原有冰川和冰盖。对于全球30%的海区，海平面局地变化偏离预估平均值的10%；对于全球9%的海区，海平面局地变化偏离预估平均值的25%。这表明空间差异可以很大。在南大洋和北美洲附近，区域海平面变化值比全球平均值高30%；赤道地区，该值高10%-20%；北极和位于南极附近的一些区域，该值低50%。预计全球约70%的海岸线将经历海平面相对变化，

区间在GMSL变化的20%之内。在年代际周期上，气候变率导致的区域相对海平面变化率与全球平均值的差异大于100%。{13.6.5}

TS.5.7.4 21世纪极端海平面变化和波浪变化预估

到21世纪末，极端海平面的出现率很可能明显增加，而21世纪初期的出现率可能增加(见TFE.9, 表1)。增加原因主要是平均海平面上升(高信度)，而到21世纪末一些地区极端重现期减少至少一个量级。具体区域风暴度和相关风暴潮的预估为低信度。{13.7.2}

南大洋年平均有效浪高可能会因风速增强而增高(中等信度)。南大洋涌浪可能影响相邻流域的浪高、周期和方向。北冰洋浪高和季节性波浪长度很可能因海洋冰量减少而增加。一般而言，具体区域预估具有低信度，因为对热带风暴和温带风暴的预估具有低信度，而且使用粗分辨率气候模式也难以对未来风况降尺度。{13.7.3}



图TS.23 | 1986–2005年和2081–2100年两个时段间在(a) 2.6、(b) 4.5、(c) 6.0和(d) 8.5四个RCP情景下根据21个CMIP5模式评估的集合区域平均净相对海平面变化(单位:米)。每幅地图均包括大气载荷,加上陆地冰、冰川均衡调节(GIA)和陆地水资源等效应。{图13.20}

专题要素

TFE.8 | 气候目标与稳定性

稳定性这一概念紧密联系《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)的最终目标—“将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上”。最近的政策讨论集中在要将限制全球温度升高作为UNFCCC各种目标背景下的具体气候目标,而非限制温室气体(GHG)浓度增加。讨论最广泛的是2°C目标,即将相对于工业化时代前的全球温度上升限制到2°C以下,但也提出了其它目标(如全球变暖相对于工业化时代前回归至1.5°C以下,或大气CO₂浓度回归至350ppm以下)。气候目标通常是指避免全球变暖达到一个预先设定的阈值。然而,气候影响有地理上和行业上的差异,而且也没有一个客观阈值能确定何时将达到危险的干预程度。某些变化可能被延迟或不可逆转,另一些影响可能是有益的。因此,在没有价值判断,以及在假设如何汇总当前和未来成本和效益的情况下,不可能确定一个客观的临界阈值。本TFE并不主张或支持某个阈值或目标,也不评判这些目标的经济或政治可行性,而是根据当前对气候和碳循环反馈的认知,评估以气候目标为背景的在典型浓度路径(RCP)情景下的气候预估结果,以及不同的长期温度稳定目标对允许碳排放的影响。下文进一步突出强调了温度稳定并不一定意味着整个地球系统的稳定。{12.5.4}

温度目标表示总辐射强迫(RF)的上限。四个RCP情景辐射强迫的区别是在2030年之前都相对较小,但到21世纪末变得很大,主要是由于CO₂强迫。因此,预估近期全球平均表面温度(GMST)将在四个RCP情景下以类似的速率持续升高。大约在21世纪中叶,全球升温速率对情景的依赖性开始增强。到21世纪末,在所有RCP情景下全球平均温度均高于当前,RCP8.5下全球温度变化最大(每十年都大于0.3°C),RCP2.6下最小,尤其是2050年后,届时全球表面温度变化稳定(之后下降)(见图TS.15){11.3.1, 12.3.3, 12.4.1}。

相对于1850-1900年的平均值,近期(2016-2035年)的全球平均表面升温多半可能超过1°C,而且很可能高于1.5°C(假设1850-1900年到1986-2005年升温0.61°C)(中等信度)。相对于1850-1900年,到21世纪末(2081-2100年),在RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5情景下升温可能超过1.5°C(高信度),且在RCP6.0和RCP8.5情景下可能超过2°C(高信度),在RCP4.5情景下多半可能超过2°C(中等信度)。在RCP2.6情景下升温不可能高于2°C(中等信度)。2081-2100年在RCP2.6、RCP4.5和RCP6.0情景下升温不可能超过4°C(高信度),在RCP8.5情景下或许可能超过4°C(中等信度)。{11.3.6, 12.4.1; 表12.3}

在RCP8.5延伸情景下,2100年之后GHG的持续排放导致总辐射强迫到2300年高于12W m⁻²,2281-2300年全球升温相对于1986-2005年达到7.8[3.0-12.6]°C。在RCP4.5延伸情景下,2100年后辐射强迫保持稳定(4.5W m⁻²左右),升温达2.5[1.5-3.5]°C。在RCP2.6延伸情景下,升温达0.6[0.0-1.2]°C,持续的负排放导致辐射强迫进一步下降,到2300年低于目前水平。另见文框TS.7。{12.3.1, 12.4.1, 12.5.1}

自工业化时代前以来大气中人为CO₂排放总量(常称作累积碳排放,虽然仅代表CO₂排放)是反映大气CO₂浓度和全球升温响应的优良指标。GMST变化与总累积人为CO₂排放的比率一直相对稳定且不依赖情景。CO₂排放总量与全球温度变化之间有近似线性关系,能将一个新变量-累积碳排放的瞬时气候响应(TCRE)-定义为某一给定的累计人为CO₂排放量(通常是1000PgC)引起的瞬时GMST变化(TFE.8,图1)。TCRE依赖于模式,因它是累积CO₂排放量大气占比和瞬时气候响应的一个函数,这两个变量因模式的不同而相差甚远。结合不同证据链(观测、模式和对过程的认知)的有效信息,累积CO₂排放与全球平均温度峰值间的近似线性关系在文献中已充分建立,对高达2000PgC的累积CO₂排放总量也是确凿的。这个关系与从以往累积CO₂排放

(接下页)

TFE.8 (续)

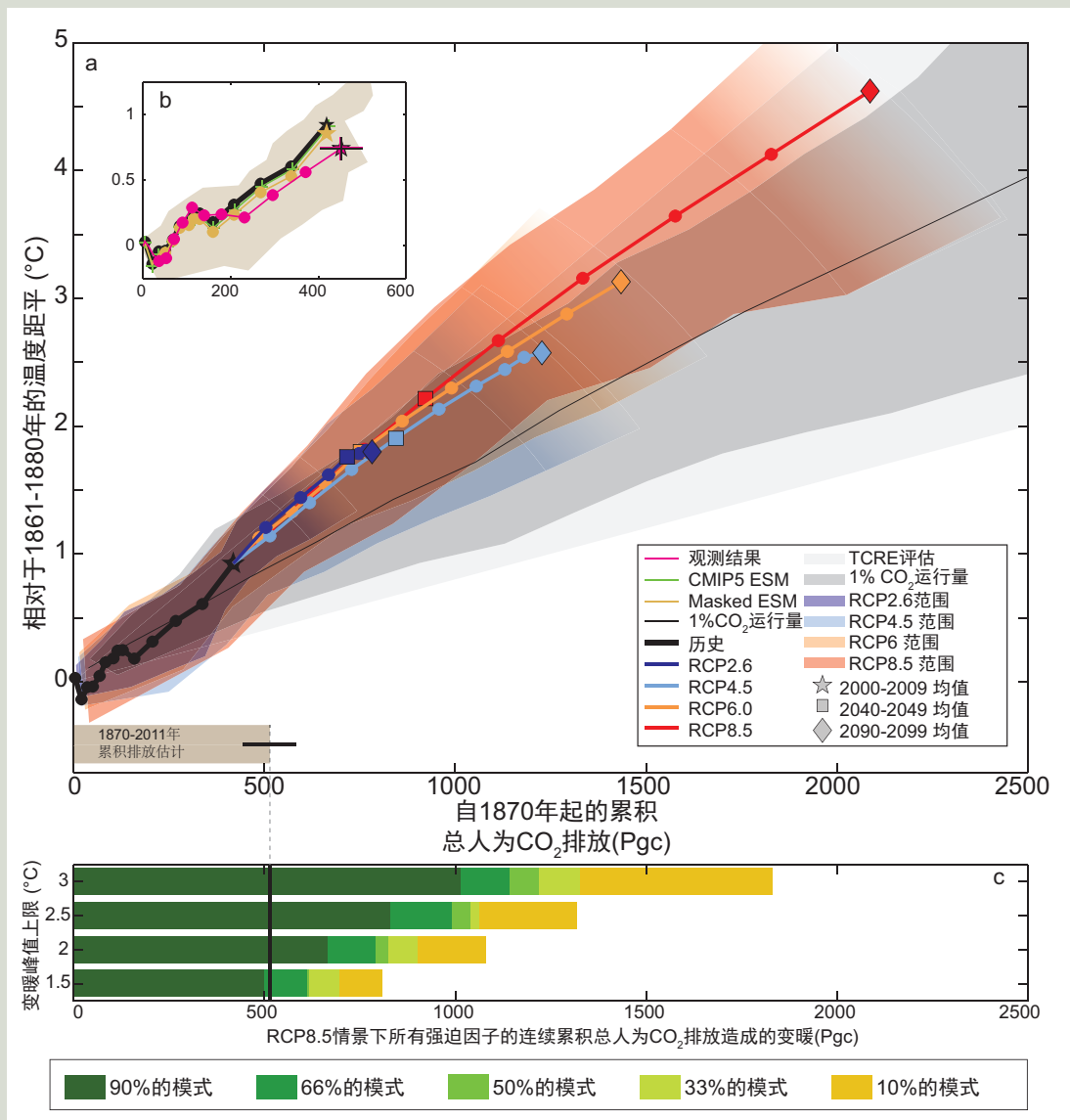
量和观测到的升温中推导出的关系相一致，而对碳循环和全球能源平衡的认知过程也支持这一关系，并且是从整个模式体系中得出的确凿结果。专家基于现有证据作出的判断表明，在达到温度峰值之前、累积排放不超过2000PgC的情况下，TCRE区间可能是每1000PgC引起0.8°C至2.5°C的温度升幅。(TFE.8, 图1a) {6.4.3, 12.5.4; 文框12.2}

在排放完全停止后，CO₂导致的升温预估还会持续数百年。因此，就人类存在时间尺度而言，很大一部分气候变化是不可逆转的，除非在很长一段时期内人为CO₂净排放为极负。根据TCRE的评估(假设在正常分布情况下，每1000PgC引起0.8°C至2.5°C的温度变化，标准差为±1)，如果要以>33%、>50%和>66%的概率将人为CO₂排放单独引起的升温(忽略其它辐射强迫不计)限制在自1861-1880年间以来不超过2°C的水平上，自1870年以来所有来源的人为CO₂排放总量的累积收支则需要分别低于约1570 PgC、1210 PgC和1000 PgC。1870-2011年间已排放了515[445-585]PgC(TFE.8, 图1a,b)。因此，先前几十年中的高排放量意味着之后需要低排放甚至负排放。若考虑对升温峰值有贡献的非CO₂强迫，累积CO₂排放量则更低。非CO₂强迫成分非常重要，研究它们需要对CO₂减排与其它强迫变化之间的联系作出假设，或需要单独的排放收支并对短寿命周期和长寿命周期气体开展气候模拟。截至目前，考虑非CO₂强迫的研究为数不多。那些考虑了此类强迫的研究发现了这类强迫具有显著效应，尤其是气溶胶等短寿命周期气体排放量骤降，导致升温零点几度。多年冻土或甲烷水合物意外释放的GHG(未包括在本文所评估的研究内)，也会降低要达到某一给定升温目标相对应的人为CO₂排放水平。如需要有可能性将温度保持在一个低于某个给定温度目标，则要进一步减少相应排量(TFE.8, 图1c)。考虑到所有RCP情景中非CO₂强迫，为了分别以>33%、>50%和>66%的概率把自1861-1880年间以来的升温幅度限制在2°C以内，则需要将自1870年以来相应碳排放量分别减至大约900 PgC、820 PgC和790 PgC。通过计算全球耦合模式对比项目第5阶段(CMIP5)各地球系统模式(ESM)和中等复杂程度地球系统模式(EMIC)中在RCP8.5情景下对于给定累积排放量温度低于2°C的部分(如TFE.8图1c),得出了上述估值。RCP8.5的非CO₂强迫高于RCP2.6中的非CO₂强迫。由于在IPCC标准语言中所有关于可能性的表述均为开放区间，因此上述估值既是保守选择又是一致性选择，适用于所有RCP情景的非CO₂强迫。没有任何一种RCP情景用>33%或>50%的概率把升温幅度限制在2°C，且不能直接推导相应累积排放量。对于>66%的概率，RCP2.6可作为比较对象。将2012年和2100年之间RCP2.6情景下的反算化石燃料平均碳排放量(270 PgC)与平均历史估值(515 PgC)相加，总计为785 PgC，四舍五入为790 PgC。由于785 PgC不含对未来土地利用变化产生排放的明确评估，所以790 PgC也是与总体可能性评估相一致的保守估值。基于各RCP情景的三种可能性的排放区间很窄，因为排放区间是基于单一情景的，可用的模式样本有限。与TCRE相比，这些区间不包括观测约束或不解释模式未取样的不确定性的来源。固定累积CO₂收支不仅针对2°C，也准对截至当前模式所探索的任何温度水平(高达约5°C，见图12.44至12.46)。升温目标越高，可允许有更大的累积收支，而温度目标越低，则需要的累积收支也更低(TFE.8, 图1)。{6.3.1, 12.5.2, 12.5.4}

气候系统有多个时间尺度，从一年到几千年不等，与不同的热量库和碳库有关。这些长时间尺度使持续变暖‘已箭在弦上’。强迫的稳定不会带来升温的瞬时稳定。对RCP情景及其到2300年延伸情景而言，辐射强迫稳定时已实现的升温将会达到平衡升温的75%至85%。若CO₂量以每年1%的速率增至2倍或4倍，之后强迫保持稳定，那么已实现的升温占比会小得多，约为强迫稳定时的40-70%。由于深海的时间尺度长，达到完全平衡需几百至几千年。{12.5.4}

(接下页)

TFE.8 (续)



TFE.8, 图1 |自1861-1880年间以来的全球平均温度增幅, 作为从各条证据链中获得的全球CO₂累积排放总量的一个函数。图(a)用彩线(多模式平均)和年代际标记(点)分别给出了所有CMIP5中等复杂程度地球系统模式(EMIC)和各地球系统模式(ESM)在每个RCP情景下的十年平均结果, 并用星号、正方形和菱形分别突出显示了三个十年期(2000-2009、2040-2049和2090-2099)。2000-2009年以及之前历史时期取自CMIP5历史记录中RCP8.5下2006-2010时段的延伸, 用粗黑线和黑符号表示。不同颜色的区间表示所有CMIP5 ESM和EMIC模式的离散度(90%区间), 并不代表正式的不确定性评估。只要能获得所有模式的数据就在各自区间内填充相应颜色, 直至温度达到峰值。出于展现离散度之目的, 各区间的颜色随后逐渐淡出。深灰色阴影区(区间的定义与前面RCP的定义类似)和细黑线(多模式平均)表示CMIP5模式仅以每年1%的CO₂增量模拟的结果。浅灰锥形代表本报告仅对CO₂排放的瞬时气候响应(TCRE)的评估。图(a)底部的灰色直方表示1870-2011年间CO₂历史累积排放估计及其相关不确定性。图(b)为历史模拟结果与观测资料的比较。紫红色线和不确定性区间均基于来自二氧化碳信息分析中心(CDIAC)的观测到的排放, 并用全球碳计划提供的排放值和哈得莱中心/气候研究小组格点表面温度资料集(HadCRUT4)观测到的温度估值延至2010年。过去十年观测中的不确定性基于本报告中的评估。粗黑线与图(a)中的相同。有十字的细绿线作用与黑线相同, 但只针对ESM。黄褐色线及羽状范围表示2010之前的ESM结果, 当时对不完整的HadCRUT4地理覆盖范围作了修正。图中给出所有数值均相对于1861至1880年基准期。所有时间序列均反演自十年平均值, 以表示长期趋势。注意: 观测也受内部气候变率的影响, 这增加了约0.1°C的不确定性。图(c)给出了整个工业化时代的CO₂累积排放量, 均与四个展示性全球温度峰值上限(分别为1.5°C、2°C、2.5°C和3°C)相一致, 同时考虑了所有引起升温的强迫因子。水平直方表示一致性累积排放收支, 作为各模式(CMIP5 ESM和EMIC)中至少将升温幅度控制低于某个给定温度上限的那部分模式的函数。注意: 不能将这部分模式作为概率解释。排放收支是在RCP8.5情景下计算出的, 其中非CO₂强迫在整个21世纪相对较高。如果非CO₂强迫显著减少, 那么与具体温度限制对应的CO₂排放或许略高, 但仅在非常有限的程度上, 如图(a)中彩线所示, 假设非CO₂强迫显著偏低。关于图SPM.10的细节, 详见TS补充材料。{图12.45}

TFE.8 (续)

即使停止CO₂排放，过去的排放也会造成持续多个世纪的升温，继续维持在已达到的升温水平。排放停止后CO₂引起的持续变暖源于在上述延迟的持续变暖与海洋陆地碳吸收导致的大气CO₂缓慢下降之间的一种补偿。这种升温持续性也源于辐射强迫对大气CO₂的非线性依赖，即强迫的相对降幅小于CO₂浓度的相对降幅。就高气候敏感性而言，尤其当硫酸盐气溶胶排放与GHG排放同时消除时，过去的排放的持续性在很大程度上仍为正值，并且是对减少的气溶胶排放的快速响应和对减少的CO₂排放缓慢响应的两者叠加。{12.5.4}

全球温度稳定并不代表气候系统所有方面的稳定。与植被变化、冰盖变化、深海增温及相关的海平面上升和潜在的各种反馈联系，例如海洋和冰盖均有各自内在的长时间尺度。随着海洋不断吸收大气CO₂，海洋酸化很可能持续。陆地生态系统碳循环的持续变化将在21世纪末之后进一步显现。几乎确定的是，在2100年之后GMSL仍会持续上升，因热膨胀引起的海平面上升将持续几百年乃至几千年。GMSL上升不仅取决于累积总量，还取决于CO₂排放路径；在累积总量相同情况下，及早减排而不是推后可更大幅度地减缓海平面上升。{6.4.4, 12.5.4, 13.5.4}

TS.5.8 气候现象与区域气候变化

本节评估了21世纪影响区域气候的大尺度气候现象的预估变化(表TS.2)。一些现象是从气候学(如季风)角度定义的，另一些现象则是从年际变率(如厄尔尼诺)角度定义，后者影响旱涝、热浪等极端气候。热带气旋和温带风暴等天气现象统计的变化也在此作了总结。{14.8}

TS.5.8.1 季风系统

在21世纪，按地区降水和夏季降水衡量的全球季风可能增强，而季风环流会减弱。季风爆发日期可能提前或变化不大，而其结束日期可能推迟，导致多地季风期延长(图TS.24)。在东亚和南亚夏季季风中季节性平均降水增加突出，其它季风区的变化不确定性较大。{14.2.1}

具有中等信度的是，与季风相关的年际降水变率未来将会增加。在南美、非洲、东亚、南亚、东南亚和澳大利亚，未来与季风相关的极端降水很可能增加。{14.2.1, 14.8.5, 14.8.7, 14.8.9, 14.8.11-14.8.13}

具有中等信度的是，与亚洲-澳大利亚季风相关的全面降水将会增加，但南北分布不对称：预估印度季风降水将增加，虽然澳大利亚夏季风降水预估变化不大。具有中等信度的是，印度夏季风环流会减弱，但因大气湿度增加而得到补偿，最终导致降水增加。对东亚夏季

风，预估季风环流和降水都将增加。{14.2.2, 14.8.9, 14.8.11, 14.8.13}

对北美和南美季风降水变化的预估具有低信度，但具有中等信度的是，北美季风在一年中发生时间推迟，持续时间延长，而且具有高信度的是，南美季风区会扩大。{14.2.3, 14.8.3-14.8.5}

具有低信度的是，预估西非雨季会来得稍迟，雨季后期降雨将增强。模式模拟该区域的技巧评分水平有限，因此预估为低信度。{14.2.4, 14.8.7}

TS.5.8.2 热带现象

降水变化因空间不同而异，一些区域增加，一些其它区域减少。热带降水变化的空间分布可能受当前气候和海洋变暖型态的影响。影响首先是在目前的多雨区降雨增加，其次，在海洋变暖超过热带平均值的地区降雨增加。具有中等信度的是，热带降雨预估值的季节平均变化比年均变化更可靠。{7.6.2, 12.4.5, 14.3.1}

具有中等信度的是，未来赤道两侧热带辐合区季节平均降水将增加，亚热带(包括北美和中美、加勒比、南美、非洲和西亚部分地区)季节平均降水将减少。具有中等信度的是，南太平洋辐合带纬向事件的年际发生率将会增加。具有中等信度的是，南太平洋辐合带将南移，

表TS.2 | 预估的区域变化及其与主要气候现象的关系一览表。当某一现象对给定区域产生的影响达到足够的信度水平时，以及当有足够的信度表明该现象将发生变化时，尤其在RCP4.5或更高端情景下，则认为该现象与这一区域相关。关于这些变化的信度及其与区域气候的相关性的完整评估见14.8节以及表14.2和表14.3。{14.8；表14.2，14.3}

区域	根据气候现象预估的重大变化
北极 {14.8.2}	预估北大西洋涛动（NAO）小幅增强，导致冬季温度和降水变化；变暖增强，海冰融化增加；到本世纪中叶，降水主要由于温带气旋的降水增加而显著增加。
北美 {14.8.3}	季风降水将在年内推后；温带气旋降水增加将导致冬季大陆北部三分之一的地区降水大幅度增加；在美国和墨西哥的西海岸、墨西哥湾及美国、加拿大东海岸登陆的热带气旋带来的极端降水增加。
中美和加勒比地区{14.8.4}	预估平均降水减少，极端降水增加；东、西海岸登陆的热带气旋带来的极端降水增加。
南美 {14.8.5}	南大西洋辐合带南移，使东南部降水增加；南半球环状模呈现正相位趋势使温带风暴移动路径南移，造成智利中部地区降水减少，而南美南端降水增加。
欧洲和地中海地区 {14.8.6}	与地中海东部风暴相关的极端降水增加，但出现频率降低。
非洲 {14.8.7}	西非夏季风降水增强；由于印度洋变暖型态，东非短时降雨增加；在非洲东海岸（包括马达加斯加）登陆气旋带来的极端降雨增加。
中亚和北亚 {14.8.8}	夏季降水增强；北亚冬季变暖增强。
东亚 {14.8.9}	夏季风降水增强；在海岸登陆的台风带来的极端降水增加；冬季中期对温带气旋的抑制作用减弱。
西亚 {14.8.10}	在阿拉伯半岛登陆气旋的极端降水增加；西北亚降水因温带风暴路径北移而减少。
南亚 {14.8.11}	夏季风降水增强；孟加拉湾和阿拉伯海海岸登陆气旋带来的极端降水增加。
东南亚 {14.8.12}	由于印度洋变暖型态，印度尼西亚7-10月降水减少；中国南海、泰国湾和安达曼海海岸登陆气旋的极端降雨增加。
澳大利亚和新西兰 {14.8.13}	澳大利亚北部夏季风降水也许增加；南太平洋辐合带更频繁的天气事件可使澳大利亚东北部降水减少；由于南半球环状模预估呈现正相位趋势，新西兰和澳大利亚南部变暖增强，降水减少；与热带和温带风暴相关的极端降雨增加。
太平洋诸岛 {14.8.14}	热带辐合带的变化对降雨和极端降水产生影响；与热带气旋相关的极端降水增加。
南极 {14.8.15}	与南半球环状模位呈现正相位趋势相关的南极半岛和南极西部变暖增强；由于风暴路径朝极地方向位移，导致沿岸地区降水增加。

导致南美东南部降水增加，幅合带北部降水立即减少。
{14.3.1，14.8.3-14.8.5，14.8.7，14.8.11，14.8.14}

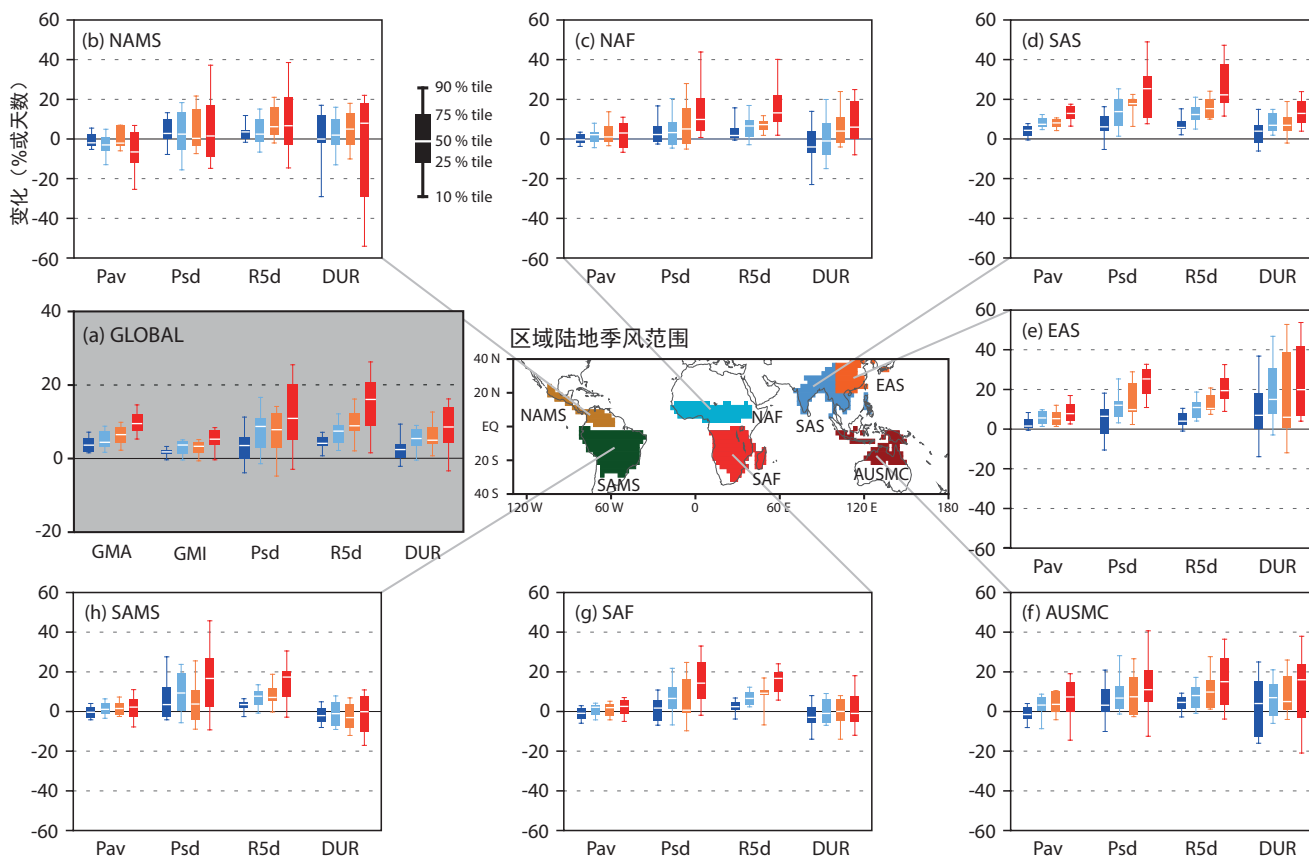
热带印度洋地区可能形成这样一种纬向型态：东部（包括印度尼西亚）升温幅度下降，降水减少；西部（包括东非）升温增强，降水增加。印度洋年际变率的偶极子模态很可能保持活跃，对东非、印度尼西亚和澳大利亚的极端气候产生影响。{14.3.3，14.8.7，14.8.12}

由于在对该区域的模式模拟中误差大，因此对大西洋热带地区平均和年际模态的预估具有低信度，因此对未来大西洋飓风、南美热带地区和西非降水的预估具有低信度。{14.3.4，14.6.1，14.8.5，14.8.7}

由于当前模式模拟季节内现象的技巧评分水平以及对海洋变暖型态的敏感性都很低，目前尚无法评估马登-朱利安振荡将如何变化。对未来西非、东南亚和澳大利亚的区域性极端气候的预估因而具有低信度。{9.5.2，14.3.4，14.8.10，14.8.12，14.8.13}

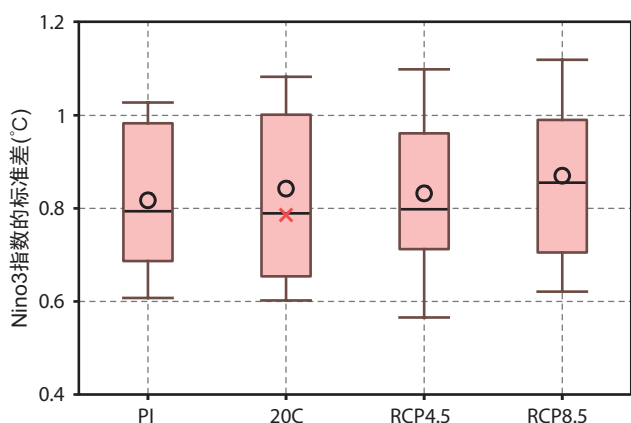
TS.5.8.3 厄尔尼诺-南方涛动

具有高信度的是，在21世纪，厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）将仍是自然气候变率的主要模态，并影响全球；ENSO引起的区域降水变率可能增强。ENSO的振幅和空间分布型态的自然变化如此之大，以至于对21世纪ENSO作出的任何预估变化仍为低信度。与模式间的离散变化相比，在RCP4.5和RCP8.5情景下对厄尔尼诺振幅的预估变化较小（图TS.25）。在北太平洋和北美地区，与厄尔尼诺和拉尼娜（遥相关）有关的温度和降水距平型态未来可能东移（中等信度），而气候对中南美洲、加勒比地区、非洲、亚洲大部、澳大利亚和大多数太平洋岛屿等其它地区的影响变化具有低信度。在更暖的气候条件下，即使大气环流变率不变，大气湿度增加也能使降水时间变率加大。这适用于ENSO引起的降水变率，但ENSO遥相关可能发生变化，从而将这个一般性结论复杂化，使之在某种程度上取决于具体区域。{12.4.5，14.4，14.8.3-14.8.5，14.8.7，14.8.9，14.8.11-14.8.14}



图TS.24 当前(1986-2005)和未来(2080-2099)两个时段之间的季风统计值变化,这是基于RCP2.6(深蓝;18个模式)、RCP4.5(蓝;24个)、RCP6.0(黄;14个)和RCP8.5(红;26个)模拟的CMIP5集合。(a)全球:全球季风区(GMA)、全球季风强度(GMI)、季节性降水年际变率的标准差(Psd)、季节5日最大降水总值(R5d)和季风季节时长(DUR)。图中,利用当前的24个多模式平均降水划分了区域陆地季风域。(b)-(h)显示区域陆地季风统计值的未来变化:(b)北美(NAMS)、(c)北非(NAF)、(d)南亚(SAS)、(e)东亚(EAS)、(f)澳大利亚-海洋性大陆(AUSMC)、(g)南非(SAF)和(h)南美(SAMS)的季节平均降水(Pav)、Psd、R5d和DUR。除DUR(单位:天),其它指标单位均为%。盒须图给出了第10、第25、第50、第75和第90百分位。在每个模式的季风域内,所有指数均按夏季计算(北半球是5-9月,南半球是11-3月)。{图14.3, 14.4, 14.6, 14.7}

技术摘要



图TS.25 | 赤道太平洋东部(尼诺3区:5°S至5°N,150°W至90°W)海表温度变率的CMIP5多模式集合的标准差,它用于衡量厄尔尼诺振幅,以开展工业化时代前(PI)控制模拟和20世纪(20C)模拟,并在RCP4.5和RCP8.5情景下对21世纪进行预估。圆环表示多模式集合平均值,红色十字号表示观测到的20世纪标准差。盒须图给出了第16、第25、第50、第75和第84百分位。{图14.14}

TS.5.8.4 气旋

对21世纪的预估表明,热带气旋的全球频率可能降低或基本保持不变,与其相一致的是全球平均热带气旋最大风速和降水率均可能增加(图TS.26)。不同区域未来气候变化对热带气旋的影响可能也不同,但是对具体区域的预估具有低信度。最强风暴的频率多半可能在一些流域增加。在中美、北美、东非、西亚、东亚、南亚、东南亚、澳大利亚和太平洋上许多岛屿,登陆热带气旋的中心附近会发生更多极端降水(中等信度)。{14.6.1, 14.8.3, 14.8.4, 14.8.7, 14.8.9-14.8.14}

全球温带气旋数量降幅不可能超过几个百分点,未来风暴的变化与自然年际变率和模式间的很大变化相比可能很小。南半球(SH)风暴路径可能会略微朝极地方向位移,但是该变化的大小取决于采用哪种模式。气候预估中北大西洋风暴路径的响应不可能仅朝极地方向位

移。具有中等信度的是，北太平洋风暴路径预估朝极地位移。风暴路径变化对区域地表气候的影响具有低信度。温带气旋带来更多降水，导致北极、北欧、北美和南半球中高纬地区冬季降水增加。 {11.3.2, 12.4.4, 14.6.2, 14.8.2, 14.8.3, 14.8.5, 14.8.6, 14.8.13, 14.8.15}

TS.5.8.5 环状和偶极变率模态

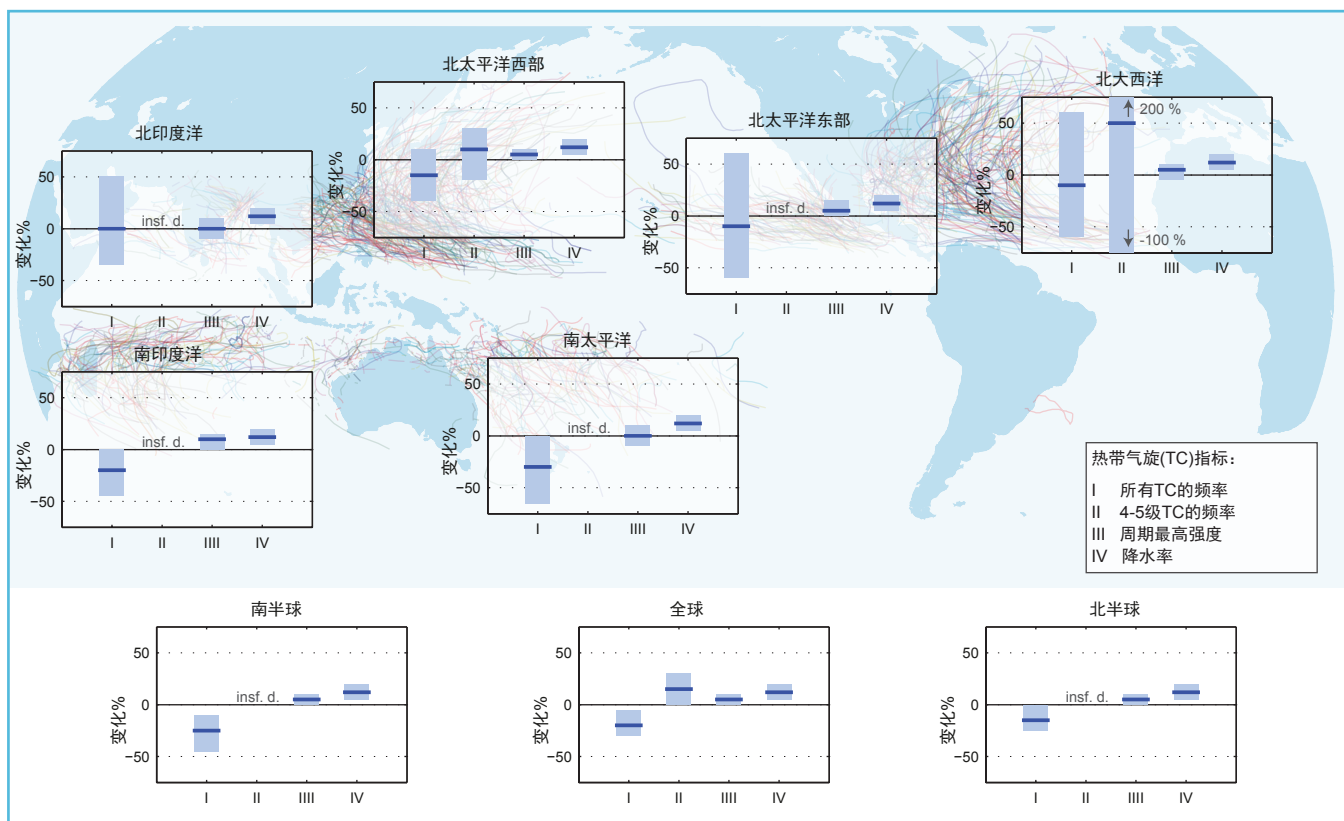
未来北半球冬季北大西洋涛动 (NAO) 很可能像过去观测到的那样表现出大的自然变化。NAO可能位相偏正(平均而言)，对北极、北美和欧亚大陆冬季的状况产生一些影响，但这些影响没有充分论据可证。南半球环状模 (SAM) 在南半球夏/秋时分的正位相可能因21世纪中叶平流层臭氧量回升而大幅减弱，对南美、非洲、澳大利亚、新西兰和南极有一些影响，这些影响亦

无充分文件记载。{11.3.2, 14.5.2, 14.8.5, 14.8.7, 14.8.13, 14.8.15}

TS.5.8.6 其它现象

大西洋多年代际涛动 (AMO) 不可能随平均气候改变而改变其习性。然而，未来数十年中AMO的自然波动可能影响区域气候，至少与人为引起的变化的影响程度相当，主要影响大西洋主要飓风的频率、西非季风 and 北美及欧洲夏季的状况。 {14.2.4, 14.5.1, 14.6.1, 14.7.6, 14.8.2, 14.8.3, 14.8.6, 14.8.8}

具有中等信度的是，南北半球阻塞的频率不会增加，而阻塞强度和持久性趋势仍不确定。{文框14.2}



图TS.26 | 预估的热带气旋统计变化。所有数值代表2081-2100年(相对于2000-2019年)预期的平均值百分比变化，是在类似A1B情景下、基于对模式预估的主观正常化后的专家判断的。考虑了四个特征量的百分比变化：1) 热带风暴年均发生总频率，2) 第4、5级风暴的年发生频率，3) 平均生命周期最大强度 (LMI; 风暴生命期中达到的最大强度)，4) LMI时距风暴中心200千米范围内的降水率。对每个标出的度量，粗蓝线表示对预期百分比变化的最佳估值，彩色直方为该值提供67% (可能) 的信度区间(注意：北大西洋4级、5级风暴的年均发生频率区间为-100%至+200%)。未标出度量之处是因可用资料不足(用X表示)而无法完成评估。图中置于底层的是随机抽取(并用彩线标出)的历史风暴路径表示热带气旋的活动区域。详见14.6.1。{14.6.1}

专题要素

TFE.9 | 极端气候

评估极端气候的变化带来的挑战非同一般，不仅因为这些事件固有的罕见特性，还因为它们的出现总是伴随着混乱状况。它们深受小尺度和大尺度天气型态、变率模态、热动力过程、陆地-大气反馈和先定条件的影响。自IPCC发布第四次评估报告(AR4)以来已取得很大进展，包括早IPCC《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(SREX)中对极端气候的全面评估。当然，有大量观测到的有效证据、人们认识水平提高以及模式模拟极端事件的能力增强也是取得进步的原因。{1.3.3, 2.6, 7.6, 9.5.4}

诸如干旱、洪水、热浪等极端气候事件需要在多种因素共同作用下才能形成。对于更罕见的极端事件，如20年一遇或百年一遇的事件，运用极值理论所做的分析正被越来越多的文献利用。其它近期取得的进展涉及“归因风险分值”这一概念，其目的是将一个特定的极端事件与具体因果关系联系起来。{1.3.3, 2.6.1, 2.6.2, 10.6.2, 12.4.3; 文框2.4}

TFE.9, 表1显示了过去50年中已经观测到的一系列极端天气和气候事件的变化、人类对这些变化的贡献评估、以及预估这些极端事件未来如何变化。该表还对当前评估与AR4和SREX中的评估作了比较。{2.6, 3.7, 10.6, 11.3, 12.4, 14.6}

极端温度、热浪和暖期

自20世纪中叶以来，在大多数陆地区域，最高和最低极端温度很可能已经升高。当前的气候模式很好地模拟了这些变化，人为强迫很可能已经影响了这些极端温度的出现频率，而且几乎确定的是，还将发生进一步变化。这支持了AR4和SREX的结论，虽然人为强迫分量的信度更大。{2.6.1, 9.5.4, 10.6.1, 12.4.3}

在资料充足的陆地区域，暖昼和暖夜数总体增加。冷昼和冷夜数相应减少。很可能是，异常暖昼和暖夜数增加，且/或异常冷昼和冷夜(包括这一时期大多数大陆发生的霜冻)数减少。暖期或热浪包括连续多个昼夜温度极高，通常与准静止反气旋环流距平相关，且还受到先期土壤条件和土壤湿度距平保持的影响，特别是在湿度有限地区土壤湿度可放大或缓解热浪天气。自20世纪中叶以来，全球大多数陆地区域(少数例外)经历了更多热浪。一些研究显示，平均温度升高是热浪频率变化的主因，然而，热浪强度/幅度对温度变率和温度分布型态变化非常敏感，热浪的定义也起到一定作用。虽然在一些地区，20世纪50年代前的器测时期发生过较多热浪(如美国)，但在其它地区(如欧洲)，在绵长的历史温度序列中自20世纪50年以来这段时期热浪频率增加显得十分突出。{2.6, 2.6.1, 5.5.1; 文框2.4; 表2.12, 2.13; FAQ 2.2}

观测到的极端温度和热浪特征已被气候模式很好地模拟出来，且与大多数地区基于观测得出的估值离散度相似。区域降尺度如今能提供关于空间尺度的可信信息，而这正是耦合模式比对项目第3阶段(CMIP3)到第5阶段(CMIP5)评估极端事件以及评估对模拟厄尔尼诺-南方涛动以及其它大尺度现象的改进程度所需要的信息。但是，模拟极端事件频率和强度变化受到观测资料可提供性和质量的限制，而且还受到模式可靠地模拟环流重要特征(如阻塞)中某些反馈和平均变化能力的限制。{2.6, 2.7, 9.4, 9.5.3, 9.5.4, 9.6, 9.6.1, 10.3, 10.6, 14.4; 文框14.2}

自AR4以来，对引起极值变化的机制和反馈的认识已有所提高。关于人类影响观测到的某些区域极端温度和热浪发生频率的证据不断得到加强。近期(十年)预估表明，极端温度事件可能增加，但在各排放情景间几乎无法区分(TFE.9, 图1)。也许正以不同于平均升温的速率发生变化，同时一些研究表明，预估的欧洲高

(接下页)

TFE.9, 表1 | 极端天气和气候事件：对最近观测到的变化的全球尺度评估、人类对这些变化的贡献以及预估21世纪初期(2016-2035)和末期(2081-2100)的进一步变化。粗体字表示AR5(黑色)根据《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(SREX)(蓝色)或AR4(红色)对全球尺度评估的修订*。之前的评估报告不包括对21世纪初期的预估。AR5中的预估是相对于1986-2005年基准期, 除非另有具体说明, 否则均使用新RCP情景。极端天气和气候事件的定义见术语表。

现象和趋势方向	评估发生的变化(一般自1950年以来, 除非另有说明)	评估人类对观测到的变化的贡献	未来变化的可能性	
			21 世纪初期	21 世纪后期
大部分陆地地区 变暖 和/或 更少冷昼和冷夜	很可能 很可能 很可能	{10.6}	{11.3}	{12.4}
大部分陆地地区 偏暖 和/或更 频繁的热昼和热夜	很可能 很可能 很可能	{10.6}	{11.3}	{12.4}
暖期/热浪 。大部分陆地地区 发生频率和/或持续时间增加	在全球尺度为 中等信度 。在 欧洲、亚洲和澳大利亚 为可能。在 许多(但并非所有)区域 为 中等信度 可能。	{10.6}	{11.3}	{12.4}
强降水事件 。 强降水的频率、强度和/或强降水增加	可能增加的陆地 区域大于减少的区域 。可能增加的陆地 区域大于减少大部分陆地区域可能 。	{7.6, 10.6}	{11.3}	{12.4}
干旱的强度和/或持续时间增加	全球尺度为 低信度 。可能某些区域有 变化 。在 自1970年以来在许多区域 为 可能 。	{10.6}	{11.3}	{12.4}
强热带气旋活动增加	长期(百年)变化为 低信度 。北美自1970年以来几乎 确定 。低信度 可能(自1970年以来在某些区域) 。	{10.6}	{11.3}	{14.6}
极端高海平面事件的出现频繁和/或幅度增加	可能(自1970年) 可能(20世纪末期) 可能	{3.7}	{13.7}	{13.7}

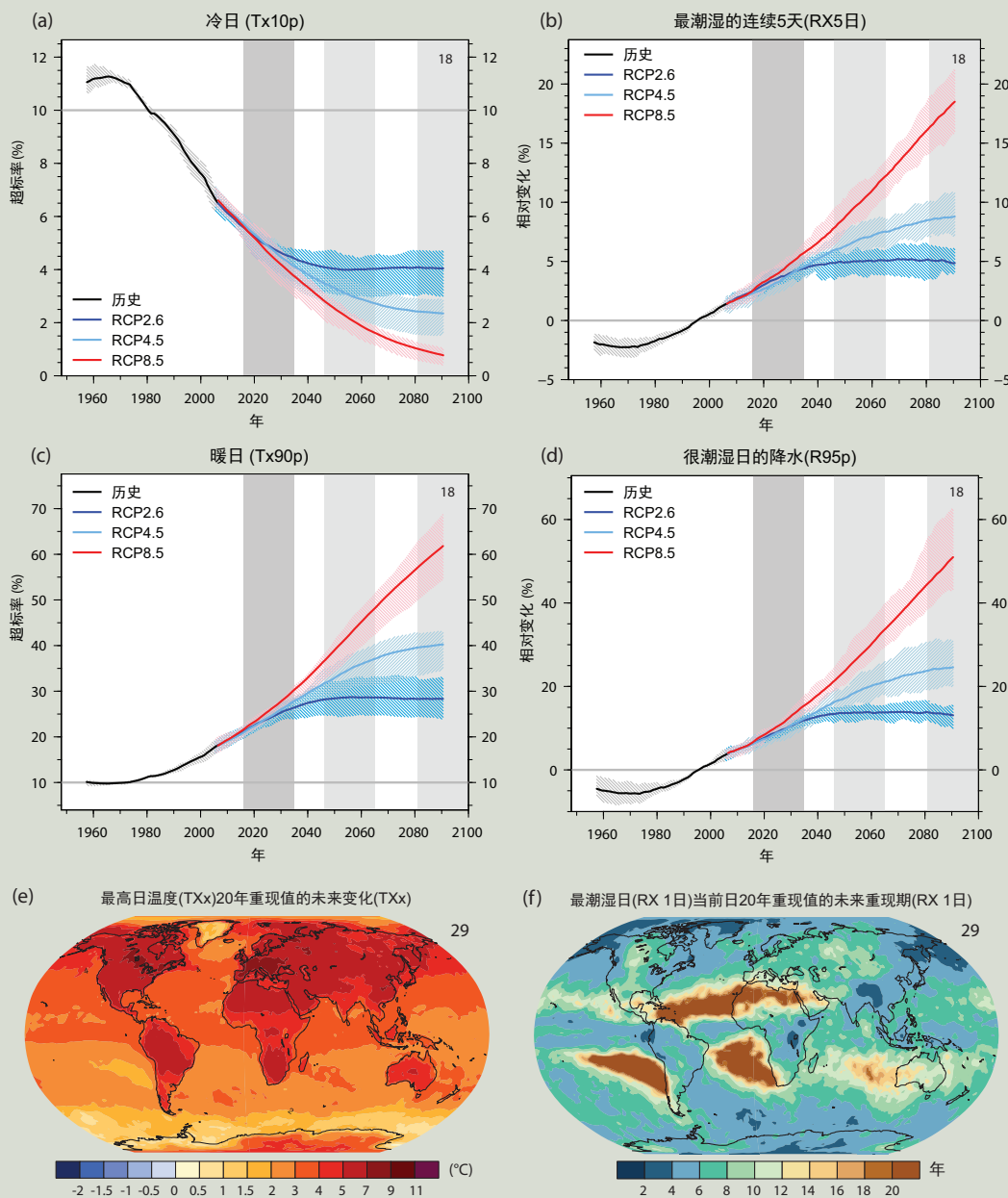
* 很难将各份报告的结果进行直接对比。对于某些气候变量, 已评估了不同方面, SREX和AR5已经使用了修订后的不确定性指导说明。新信息的提供、更深入的科学理解、资料和模式的持续分析、评估研究中所用方法的具体差异, 所有这些都为修订后的评估结果作出了贡献。

注:
 a. 归因是基于已有的案例研究。人类影响可能使一些地点观测到的热浪发生概率提高了一倍。
 b. 模式预估热浪和暖期的持续时间、强度和空间范围将出现短期增加。
 c. 在大多数大陆, 趋势信度不会高于中等, 但北美和欧洲除外, 在这两个大陆强降水的频率或强度可能已经增加, 但有季节性或区域性差异。很可能是, 北美洲中部地区的强降水频率和强度已经增加。
 d. 在地中海和西非干旱的频率和强度可能已经增加, 而北美中部和澳大利亚西北部可能已经下降。
 e. AR4评估了受干旱影响的地区。
 f. 根据对降水和温度变化影响的归因, SREX的评估结果是: 人为影响已对20世纪后半叶观测到的干旱型态的某些变化作出了贡献, 这一结果为中等信度。SREX评估认为在各区域层面的干旱变化归因为低信度。
 g. 预估的土壤湿度变化为低信度。
 h. 在RCP8.5情景下, 根据区域至全球尺度的预估, 到本世纪末在目前的干燥区域土壤湿度可能降低而农业干旱可能增加(中等信度)。在地中海、美国西南部和非洲南部, 土壤湿度降低, 这与预估的哈得莱环流变化和表面温度升高相一致, 因此具有高信度的是, 在RCP8.5情景下, 到本世纪末在这些区域地表可能不断变干。
 i. 具有中等信度的是: 北大西洋上空气溶胶驱动的降低至少对该地区自20世纪70年代以来观测到的热带气旋活动增加作出了贡献。
 j. 基于专家判断和对使用ISRES A1B(或相似情景)所作预估的评估。
 k. 归因是基于观测到的极端海平面变化与平均海平面变化之间的紧密关系。
 l. 具有高信度的是: 极端高海平面上升主要是由于平均海平面上升所致。具体区域的风暴潮和相关风暴雨的预估具有低信度。
 m. SREX评估认为平均海平面上升很可能将为未来海岸带极端高水位的上升趋势做出贡献。

TFE.9 (续)

百分位夏季温度升幅将快于平均温度的升幅。未来与长期极端温度升高相关的变化是几乎确定的，且与排放情景的强度成正比，即：人为排放量越大，极端温度升高幅度就越高(TFE.9, 图1)。对高排放情景而言，在大多数陆地区域，目前为20年一遇最高温度事件的发生频率未来可能将起码翻倍，而到21世纪末在许多地区会变成1年或2年一遇。预计极高和极低温度的强度至少将以与均值同样的速率增加，但预估大多数地区的低温20年重现值将以高于冬季平均温度的速率增加。{10.6.1, 11.3.2, 12.4.3}

(接下页)



TFE.9, 图1 | 全球范围内对如下现象发生几率的预估: (a) 冷昼数(TX10p), 即年内日最高表面温度(Tmax)低于1961-1990年间Tmax第10百分位的天数的百分比, (b) 连续最潮湿5日(RX5日), 即相对于1986-2005年间的年内连续5日最大降水总量的百分比变化, (c) 暖昼数(TX90p), 即超过1961-1990年间Tmax第90百分位的年内日最高表面温度(Tmax)天数的百分比, 以及 (d) 很潮湿日降水(R95p), 即相对于1986-2005年的年内降水超过第95百分位的天数的百分比变化。图中给出了在RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下CMIP5模式的结果。实线表示集合的中位数, 阴影表示各预估间的四分位离散度(第25和第75百分位)。地图显示 (e) 从1986-2005到2081-2100时段的日最高温度(TXx)20年重现值(RV)变化, 以及 (f) 2081-2100年间罕见日降水值(RX1天)的重现期(RP), 这些降雨值在1986-2005年间的重现期为20年。两张地图均根据CMIP5 RCP8.5情景绘制。每张地图右上角给出了参与计算多模式均值的模式数量。关于指数的定义见文框2.4中的表1。{图11.17, 12.14, 12.26, 12.27}

TFE.9 (续)

极端降水

自20世纪中叶以来，陆地强降水事件数量已增多的区域可能超过强降水减少的区域，具有中等信度的是，人为强迫已对这种增多局面作出了贡献。{2.6.2, 10.6.1}

CMIP3和CMIP5模拟更真实的极端降水的能力有了很大提高。但是，有证据表明，大部分模式低估了极端降水对温度变率或趋势的敏感性(尤其在热带)，这意味着这些模式可能低估未来预估的极端降水的增加。虽然在认识驱动极端降水过程方面取得了进步，但模式在量化云和对流效应方面仍面临挑战。陆地表面和大气过程的复杂性限制了降水变化的区域性预估的信度，尤其是在陆地，虽然在大尺度上，海洋上空有一种“湿者更湿”而“干者更干”的响应。即便如此，具有高信度的是，随着气候变暖，极端降水率(如在日尺度上)比时间平均值增加更快。在每日及日内时间尺度上，每升温1°C，预计局地极端降水变化将增加约5%-10%(中等信度)。{7.6, 9.5.4}

就近期和长期而言，CMIP5预估证实了AR4提出的强降水事件有明显增加的趋势，但是区域间差异很大(TFE.9,图1)。在多数中纬度陆地区域以及在多雨的热带地区，极端降水将很可能在全球变暖的背景下变得更强和更频繁。{11.3.2, 12.4.5}

洪水与干旱

目前依然缺乏证据，因此有关器测记录的全球尺度洪水强度和/或频率的趋势符号为低信度。具有高信度的是，在中北欧、西地中海地区和东亚，过去500年中发生的洪灾比1900年起记录到的洪水要大。具有中等信度的是，在近东、印度和中南美洲，现代大洪水在规模和/或频率上可与历史上的洪水相当，甚至有过之而无不及。{2.6.2, 5.5.5}

自20世纪中叶以来，受干旱和/或干燥影响的陆地区域显著增多，针对这一观点，赞成和反对的论据都非常有力，这导致对观测到的和可归因于大尺度趋势的评估具有低信度。主要原因是缺乏直接观测和观测资料存在质量问题、推导趋势对指数选择的依赖性、各趋势中存在的地域不一致性以及从长期趋势中区分年代际尺度变率时困难重重。在千年时间尺度上，具有高信度的是，代用信息提供了证据，表明未来干旱在强度和时长上均大于20世纪许多地区观测到的干旱。具有中等信度的是，在小冰河期(1450-1850年)，与中世纪气候异常期(950-1250年)相比，亚洲季风区发生特大干旱的次数反而更多，而目前干旱的中亚和南美季风区当时却盛行较为湿润的气候条件。{2.6.2, 5.5.4, 5.5.5, 10.6.1}

在典型浓度路径RCP8.5情景下，对本世纪末的预估表明，在目前干燥的区域，干旱风险的增大可能与区域至全球尺度预估的土壤湿度降低有关(中等信度)。在地中海、美国西南部和非洲南部的土壤湿度不断降低最为突出，这与预估的哈得莱环流变化和表面温度升高相一致。在RCP8.5情景下，到本世纪末这些区域可能(高信度)出现地表持续干燥现象。{12.4.5}

极端海平面

自1970年以来极高海平面事件的强度可能增加，主要原因是平均海平面上升。当考虑平均海平面变化时，在94%的验潮仪站点上极高海平面的变化降至小于每年5毫米。未来，极端海平面事件的发生几率将很可能显著提高，而且与过去的观测结果类似，发生几率的提高主要是由于平均海平面上升所致。{3.7.5, 13.7.2}

(接下页)

TFE.9 (续)

热带与温带气旋

在解释过去观测能力变化的原因之后，对热带气旋活动的长期(百年)变化的预估具有低信度。但是，在卫星时代，北大西洋最强风暴的频率和强度有所增加，这是确凿的(很高信度)。但是，这一增加的原因却引起了辩论。由于观测证据不足，由于对气候人为驱动因子与热带气旋活动之间联系的物理机制缺乏认识，以及由于学界对内部变率、人为强迫和自然强迫的相对重要性达成的一致性低，因此将热带气旋活动的变化归因为人类影响具有低信度。{2.6.3, 10.6.1, 14.6.1}

一些高分辨率的大气模式已真实地模拟出热带气旋的路径和数量，总体而言模式能够捕捉到风暴路径和温带气旋的一般特征。自AR4以来，有证据表明这些模式已得到改进。北大西洋风暴路径偏差略有减少，但是模式模拟的风暴路径区域性太强，而且低估了气旋强度。{9.4.1, 9.5.4}

虽然预估表明，热带气旋的全球发生频率可能将降低或基本保持不变，与此同时，全球平均热带气旋的最大风速和降雨率可能增加，但是对具体区域的发生频率和强度的预估信度较低。然而，由于模式分辨率和降尺度技术的提高，在预估21世纪变暖的前提下，最强风暴在一些流域内的发生频率多半可能将大幅提高(见图TS.26)。{11.3.2, 14.6.1}

AR4和SREX之后开展的研究继续支持以下观点：自20世纪50年代以来风暴路径可能朝两极方向位移。但是，自上个世纪以来，由于各研究间结论不一致或缺乏全球部分地区(尤其在南半球(SH))的长期资料，因此风暴度的明显趋势具有低信度。{2.6.4, 2.7.6}

虽然在模拟风暴路径过程中存在系统性偏差，但大多数模式和研究一致认为温带气旋在全球的数量的减少不可能超过几个百分点。南半球风暴路径可能朝极地方向出现小幅位移。预估北太平洋风暴路径多半可能朝极地方向位移(中等信度)，但北大西洋风暴路径的响应不可能仅仅是朝极地方向位移。区域风暴路径变化强度以及这种变化对区域表面气候的影响具有低信度。{14.6.2}

TS.6 关键不确定性

本技术摘要最后一节向读者简要综述了在认识气候系统方面、以及在为响应人为影响而预测各种变化的能力方面存在的关键不确定性。这一综述并不全面，也没有详细叙述这些发现的依据。关于这些发现，见本技术摘要的主体部分和每个要点后面用大括号标明的基础报告中的相关章节号。

TS.6.1 气候系统变化观测中的关键不确定性

- 对流层升温及其垂直结构的变化速率具有中等至低信度。对流层升温速率估值包括表面温度升幅估值。平流层变冷速率及其垂直结构具有低信度。{2.4.4}
- 由于资料不完整，1951年之前的全球陆地降水变化具有低信度，1951年之后的降水变化具有中等信度。{2.5.1}
- 对全球尺度云变率和趋势的观测在很大程度上是模棱两可的，因此具有低信度。{2.5.6}
- 由于缺乏直接观测，由于方法存在不确定性和缺少选择，以及由于地域不一致性，观测到的全球尺度干旱或干燥(少雨)趋势具有低信度。{2.6.2}
- 在解释了过去观测能力变化的原因之后，任何已报告的热带气旋特征的长期(百年)变化都是确凿的，这一结论具有低信度。{2.6.3}
- 由于年际至年代际尺度的变率很大，而且各资料集之间仍有差异，因此目前不可能得出关于大尺度大气环流长期变化的确凿结论。{2.7}
- 对海洋次表面温度的不同全球估值在不同时间和不同时期存在差异，这表明历史记录依旧无法清晰描述温度和上层含热量(0-700m)的次年代变率特征。{3.2}
- 2005年之前，洋面700米以下深度的空间采样稀少而时间采样十分稀少，以至于无法给出年均全球海洋温度和热含量估值。{3.2.4}
- 洋面2000米以下的观测范围仍十分有限，并阻碍了对全球海洋热含量和碳含量变化给出更确凿的估值。这还制约了对深海变暖为海平面上升做出贡献的量化。{3.2, 3.7, 3.8; 文框3.1}

- 持续观测时间序列可衡量与气候相关的海洋环流特征(如经向翻转环流)，然而其数量有限，现有的时间序列又太短，不足以评估十年期乃至更长时期的趋势。{3.6}
- 在南极，现有的资料不足以评估海冰的许多特征(如厚度和体积)的变化。{4.2.3}
- 全球尺度上，尚未全面评估冰裂线处融化和冰山崩塌导致的冰量损失。在估算的冰川冰量损失中，最大不确定性来自南极，而且冰盖周围冰-海洋相互作用的观测记录依然匮乏。{4.3.3, 4.4}

TS.6.2 气候变化驱动因子中的关键不确定性

- 在气溶胶-云相互作用以及相关辐射强迫中存在的不确定性依然很大。因此，虽然人们对某些相关的大气过程有了更好的认识，并有了全球卫星监测，但气溶胶强迫中的不确定性依然是净人为强迫中总体不确定性的主要贡献因子。{2.2, 7.3-7.5, 8.5}
- 云反馈可能为正反馈，但对其量化仍然困难。{7.2}
- 古气候重建和地球系统模式表明，气候与碳循环之间存在正反馈，但反馈强度(尤其针对陆地)的信度依然低。{6.4}

TS.6.3 认识气候系统及其最近变化方面的关键不确定性

- 自AR4以来，各AOGCM模式在模拟云方面已有改进；然而，它依旧是个挑战。{7.2, 9.2.1, 9.4.1, 9.7.2}
- 除温度外的气候变量的观测不确定性、气溶胶等强迫的不确定性，以及对过程认知方面的各种限制继续阻碍着许多气候系统方面的变化归因。{10.1, 10.3, 10.7}
- 水循环变化及其内部变率的模拟结果的可靠性依然欠缺，这限制了归因评估的信度。观测不确定性及内部变率对观测到的降水产生的大影响也阻碍了降水变化原因评估有更高信度。{2.5.1, 2.5.4, 10.3.2}
- 与模式分辨率和整合相关过程有关的模拟不确定性在区域尺度上更重要，内部变率的影响变得更加显著。因此，在区域尺度上将观测到的变化归因于外部强迫依旧充满挑战。{2.4.1, 10.3.1}
- 模拟极端事件的频率和强度变化的能力受到了模式

是否能可靠地模拟重要特征上的平均变化能力的限制。{10.6.1}

- 由于模拟的不确定性及科学研究间的低一致性，将包括干旱变化、热带气旋变化、南极变暖、南极海冰范围变化、南极冰物质平衡等气候系统某些方面的变化归因于人类影响的信度仍然低。{10.3.1, 10.5.2, 10.6.1}

TS.6.4 全球和区域气候变化预估中的关键不确定性

- 根据模式结果，对全球平均的和某些地理区域的年年代平均温度可预测性的信度有限。多模式降水模拟结果表明，可预测性普遍低。短期气候预估也受到自然强迫预估不确定性的限制。{11.1, 11.2, 11.3.1, 11.3.6; 文框11.1}
- 对北半球风暴路径及西风带北移的近期预估具有中等信度。{11.3.2}
- 对21世纪洋盆尺度热带气旋频率和强度显著趋势的预估普遍为低信度。{11.3.2, 14.6.1}
- 在很多区域，对土壤湿度和地表径流变化预估并不确凿。{11.3.2, 12.4.5}
- 气候系统中某些组分或现象可能呈现出突变或非线性变化，但就许多现象而言，在21世纪出现此类事件的可能性具有低信度，而且几乎没有共识。{12.5.5}
- 从正在融化的多年冻土向大气排放CO₂或CH₄而引起的碳损失的量级具有低信度。由于湿地变化、海底释放气态水合物，对未来自然源的CH₄排放预估具有低信度。{6.4.3, 6.4.7}
- 21世纪冰盖动力模式预估的对海平面上升的各种贡献具有中等信度，而对2100年后的预估具有低信度。{13.3.3}
- 全球平均海平面上升的半经验模式预估具有低信度，科学界对这些预估的可靠性尚无共识。{13.5.2, 13.5.3}
- 对包括气候变率模态幅度和空间型态变化在内的影响区域气候变化的气候现象诸多方面的预估具有低信度。{9.5.3, 14.2-14.7}

FAQ

常见问题

这些常见问题摘自主报告的相关章节并汇集于此。当引用某些具体的常见问题时，请说明常见问题原引报告中的相关章节（例如，常见问题3.1即对应报告第三章）。

目录

常见问题

常见问题1.1	为什么对气候系统的理解已有所提高而对温度预估的范围却没有缩小? ...	121	常见问题10.2	何时人类对气候的影响会在局地尺度显现?	161
常见问题2.1	我们如何知道全球已经变暖了?	123	常见问题11.1	如果你无法预测下个月的天气, 你如何预测未来十年的气候?	163
常见问题2.2	极端气候有任何改变吗?	125	常见问题11.2	火山喷发如何影响气候和我们预测气候的能力?	165
常见问题3.1	海洋正在变暖吗?	127	常见问题12.1	为什么使用这么多的模型和情景来预估气候变化?	167
常见问题3.2	地球水循环改变的证据存在吗?	129	常见问题12.2	地球水循环将如何变化?	169
常见问题3.3	人为的海洋酸化与气候变化有关吗?	131	常见问题12.3	如果我们今天停止排放, 未来的气候将会怎样?	171
常见问题4.1	北极和南极的海冰是如何变化的?	133	常见问题13.1	为什么局地海平面的变化不同于全球平均值?	173
常见问题4.2	山区冰川正在消失么?	135	常见问题13.2	格陵兰和南极的冰盖在本世纪剩余时间里会继续对海平面变化作贡献吗? ...	175
常见问题5.1	太阳是近期气候变化的主要驱动力吗?	137	常见问题14.1	气候变化如何影响季风?	179
常见问题5.2	目前的海平面变动率有多不同寻常?	139	常见问题14.2	区域气候的预测与全球平均气候预测的关系如何?	181
常见问题6.1	因永冻土的融化和海洋变暖导致的甲烷和二氧化碳迅速释放, 是否会从根本上促进变暖?	141			
常见问题6.2	二氧化碳释放到大气中后, 会发生什么?	143			
常见问题7.1	云是如何影响气候和气候变化的?	145			
常见问题7.2	气溶胶是如何影响气候和气候变化的?	147			
常见问题7.3	地球工程能否抵消气候变化并会产生哪些副作用?	149			
常见问题8.1	水汽对气候变化有多重要?	153			
常见问题8.2	空气质量的改善对气候变化有影响吗? ...	155			
常见问题9.1	气候模型变得越来越好了吗? 我们又怎么知道呢?	157			
常见问题10.1	气候一直在变化。我们如何确定观测到				

常见问题

常见问题1.1 | 为什么对气候系统的理解已有所提高而对温度预估的范围却没有缩小？

用于计算IPCC温度预估的模式与未来全球变化的方向是相同的，但是变化范围的预测却无法十分精准。未来温室气体(GHG)排放率可呈现任何一个可能的轨迹，同时，一些基础性的物理过程我们还尚未完全知晓，使得这些过程难以模拟。这些不确定因素加上每年的自然气候变率导致了温度预估的“不确定性范围”。

预估的温室气体和气溶胶前体物排放的不确定性范围不能大幅度减小(因其取决于对未来社会和经济状况的预估)。然而，尽管有观测上的局限性，但随着认识上的提高和气候模式的改进，某些因气体排放变化而影响气候响应的因子其不确定性范围有可能会降低。然而，气候系统的复杂性使得此过程变得缓慢。(常见问题1.1, 图1)

自上次IPCC评估报告以来，气候科学已取得了很多重大进展，这得益于对冰冻圈、大气、陆地、生物圈以及海洋系统的测量方面和资料分析方面的进步。科学家对云、海冰、气溶胶、小尺度海洋混合以及碳循环等过程的理解有所提高，同时还有了更好的模拟工具。更多的观测资料意味着现在可以对模式做更为彻底地评估，预估结果也可以被更好地约束。例如，随着模式和观测分析能力的提高，对海平面上升的预估已更加精准，同时还可全面测算当前海平面上升的综合结果。

尽管取得了这些进步，但是未来全球和区域气候合理的预估仍然存在着一个范围，即科学家所称的“不确定性范围”。这些不确定性范围具体是根据所考虑的变量(例如：降水与温度)还有空间和时间范围(如区域与全球平均值)而定。气候预估的不确定性来自于自然变率，也来自于未来气体排放速度及气候对其的响应。此种不确定性还有可能是由于一些已知变化过程的表象没有被提炼，并由于一些过程没有包含在模式中。

由于气候系统的无序特性，如何精确预估年温度便受到了重要限制。此外，年代际尺度的预估对于一些主要条件很敏感，例如：深海温度，人们对此还知之甚少。一些多年形成的自然变率由海洋、大气、陆地、生物圈及冰冻圈的相互作用而形成，且与一些现象相关，例如：厄尔尼诺南方涛动(ENSO)及北大西洋涛动(气候变率的形态及指数详见文框2.5)。

火山爆发及太阳辐射能量的变化同样会产生自然变率，虽然这些现象是外部引起的且可以解释。此种自然变率可以看作是气候记录中的噪音，为探求人为气候变化的“信号”提供了背景信息。

自然变率对区域及局地尺度的不确定性的影响大于对大陆或全球尺度的影响。此种变率是地球体系中固有的，更多的知识并不能消除其带来的不确定性。但利用某些知识的进步(例如：冰冻圈或海洋状态及其过程)有可能实现特别是对未来几年的预估。这是一项热门的研究。当对气候变率在年代际时间尺度或更长时间尺度中进行平均处理之后，内部变率的相对重要性就会减少，使得长期信号更为显著(常见问题1.1, 图1)。这种长期观点与用30年平均值所通常定义的气候是一致的。

第二种不确定性的源头来自于各种可能的轨迹：未来温室气体及气溶胶前体可能的排放率以及未来土地利用方面的趋势。然而，气候预估基于这些变量的信息输入。为了得到这些估值，科学家根据人口、经济及技术的发展、以及政治选择，为人类未来社会考虑了不同情景。IPCC为政策制定提供依据，因此，对于不同排放情景所做的气候预估是有用处的，因为它们展现了不同政策选择可能带来的气候结果。这些情景旨在与现今科学文献中描述的各种有气候政策或无气候政策排放情景相匹配。因此，其设计初衷是为未来情景中的不确定性取样。(接下页)

常见问题

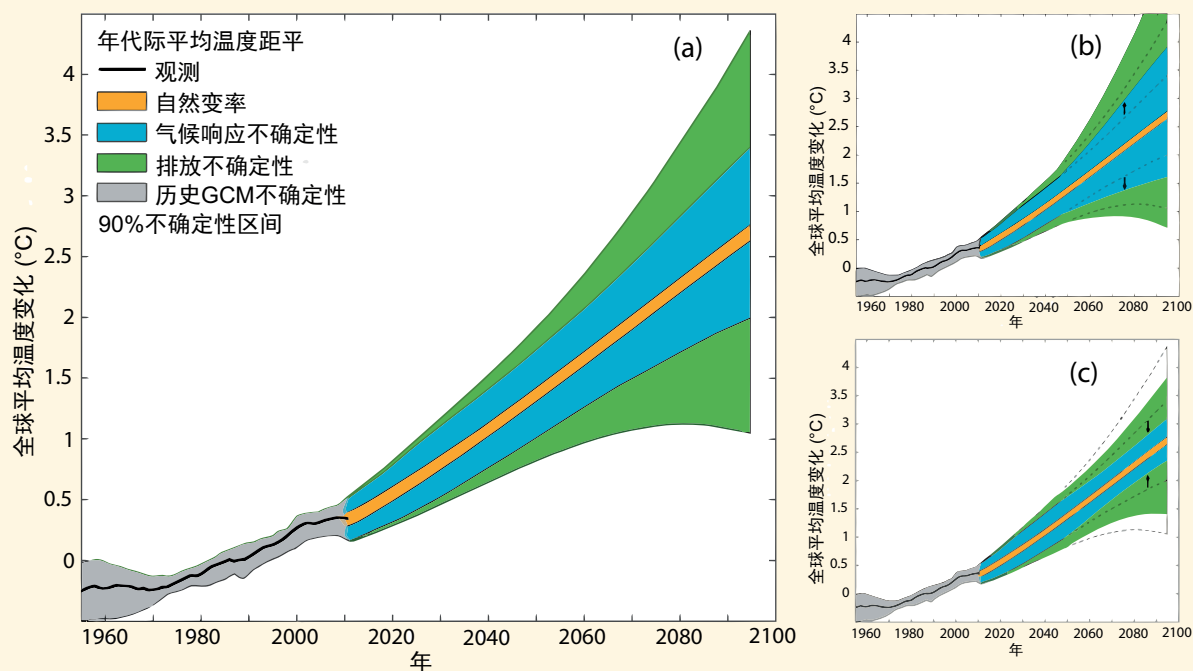
常见问题1.1(续)

短生命周期化合物对未来几年及几十年的预估有影响，例如：气溶胶及甲烷。但其他情景下的长生命周期温室气体排放对更遥远的预估影响更大。这些依情景而定的不确定性将不会因为气候科学的发展而减少，且会成为长期预估(例如：2100)中的主要不确定性(常见问题1.1，图1)。

产生不确定性范围的最后一个来源是我们在气候对人为排放及土地利用变化的响应方面仍缺乏了解。科学家主要是用计算机为基础的全球气候模式来估算这种气候响应。几十个全球气候模式已经被世界各地各种科学家群组开发出来。所有模式都基于相同的物理原理，但也需要一些近似值，因为气候系统如此复杂。不同群组选择略微不同的近似值以代表大气中的具体过程，如：云。这些选择造成不同模式中的气候预估也有所不同。这种引起不确定性范围的因素被描述为“响应不确定性”或“模式不确定性1”。

地球系统的复杂性指未来的气候会按照许多不同的情景发展，但会与当前的理解和模式相一致。随着观测记录的延长及模式的改进，研究人员应能够在自然变率范围的限制内，缩小未来几十年可能温度的范围(FAQ1.1，图1)。也可能利用关于目前海洋及冰冻圈状态的信息，为今后几年做出更好的预估。

随着科学的进步，可以将新的地球物理过程加入气候模式，已有的模式表现方式也可以得到改进。这些发展似可以增加模式导出的气候不确定性响应的估值，但此种方法仅能量化之前未测量的不确定性来源(常见问题1.1，图1)。随着越来越多重要过程的加入，非量化过程的影响将会变小，而预估信度将会提高。



常见问题1.1, 图1 | 示意图展示出不同不确定性的相对重要性及其时间演变。(a)历史纪录中的年代际平均表面气温变化(°C)(黑线)，和历史阶段气候模式估算的不确定性(灰线)，与未来气候预估和不确定性。标准值通过1961至1980年间的中值做出。自然变率(黄线)由模式的年际变率产生且假设与时间保持常定关系。排放的不确定性(绿线)被估算为不同情景下预估的模式平均差。气候响应不确定性(蓝色实线)是基于气候模式及从碳循环中增加的不确定性和从较差模拟出的过程中粗略估算的其他不确定性。基于Hawkins和Sutton(2011)和Huntingford等人(2009)的理论，(b)气候响应不确定性似可以随着新的相关过程的发现而增加，但这种增量反应的是对先前未测定的不确定性的量化，或者(c)可以随着模式的更多改进和观测约束的增加而减少。给出的不确定性范围为90%是指温度估值属于此范围，其概率为90%

常见问题

常见问题2.1 | 我们如何知道全球已经变暖了？

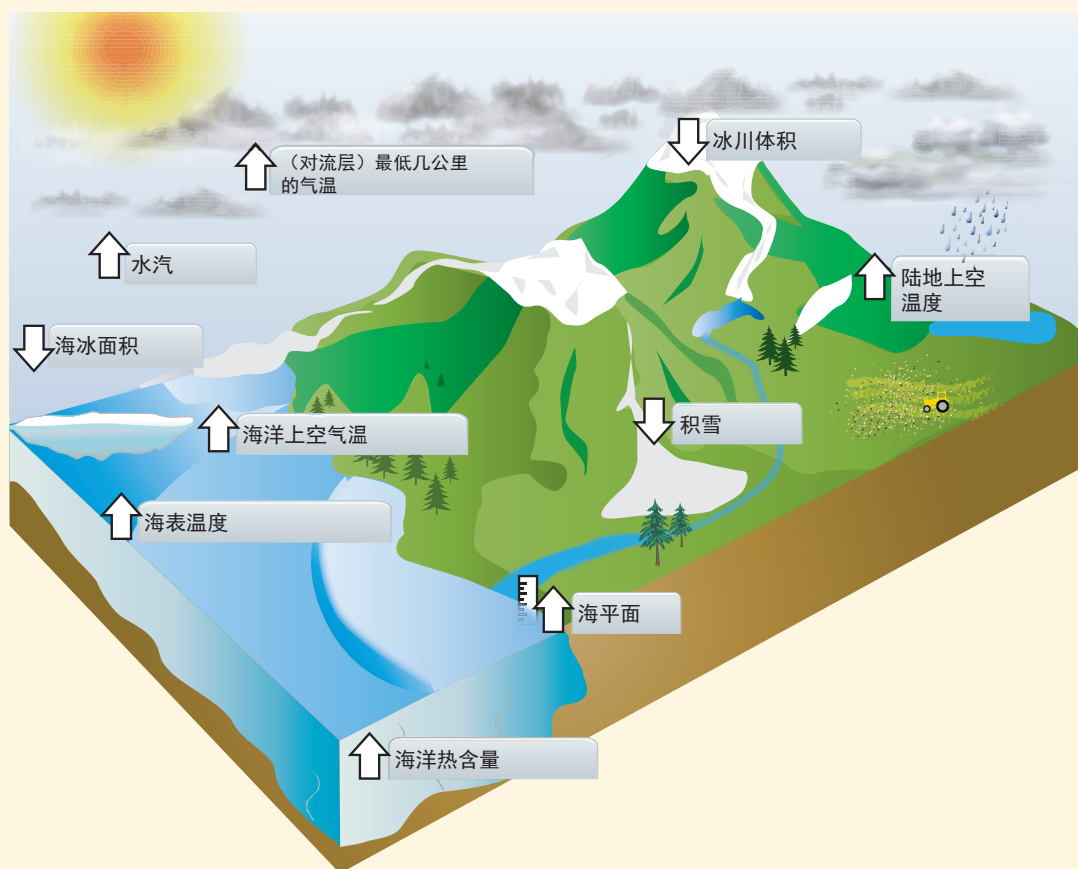
全球变暖的证据来源于多项复杂而独立的气候指标，高到大气层上部，深至海洋底部。这些指标包括表面温度、大气温度和海洋温度的变化；还包括冰川、积雪、海冰、海平面和大气水汽等方面的变化。全球各地的科学家对此类证据已独立验证过多次，证实了自19世纪起全球就开始变暖是毋庸置疑的。

讨论气候变暖问题总是围绕地基气象站所记录的温度潜在剩余偏差。这些记录尤为重要，但是其表示的只是气候系统变化的单一指标。全球变暖更多的证据来源于对气候系统中许多其他要素的广泛测量结果，这种测量是独立进行的，在物理上具有一致性，而这些要素之间具有紧密联系(常见问题2.1, 图1)。

在气候变化中，全球平均表面温度升高是众所周知的指标。虽然每一年甚至每10年的温度并不总是会比上年或上个十年高，但自1900年起全球表面温度已大大升高了。

陆地温度变暖与观测到的海洋温度变暖趋势是密切一致的。许多独立分析结果证明，从船上测量到的海洋空气温度上升与海面温度上升是同时发生的。

大气和海洋都是流体，所以表面增温也在低层大气中看到，同时也可在海洋上层看出，而观测结果也证实了事情确实如此。从对无线电探空气球和卫星的观测资料分析中可以一致地看道，对流层升温可以促进大气层中的天气层变得活跃。至少自从上世纪70年代起，超过90%的过量能源被气候系统吸收，这点可以从1950年代起全球记录的海洋热含量中得到证实。(接下页)



常见问题2.1, 图1 | 对随全球变暖发生变化的气候系统众多组分的独立分析显示出与变暖相一致的趋势(箭头方向表示变化的符号), 如FAQ2.1, 图2所示。

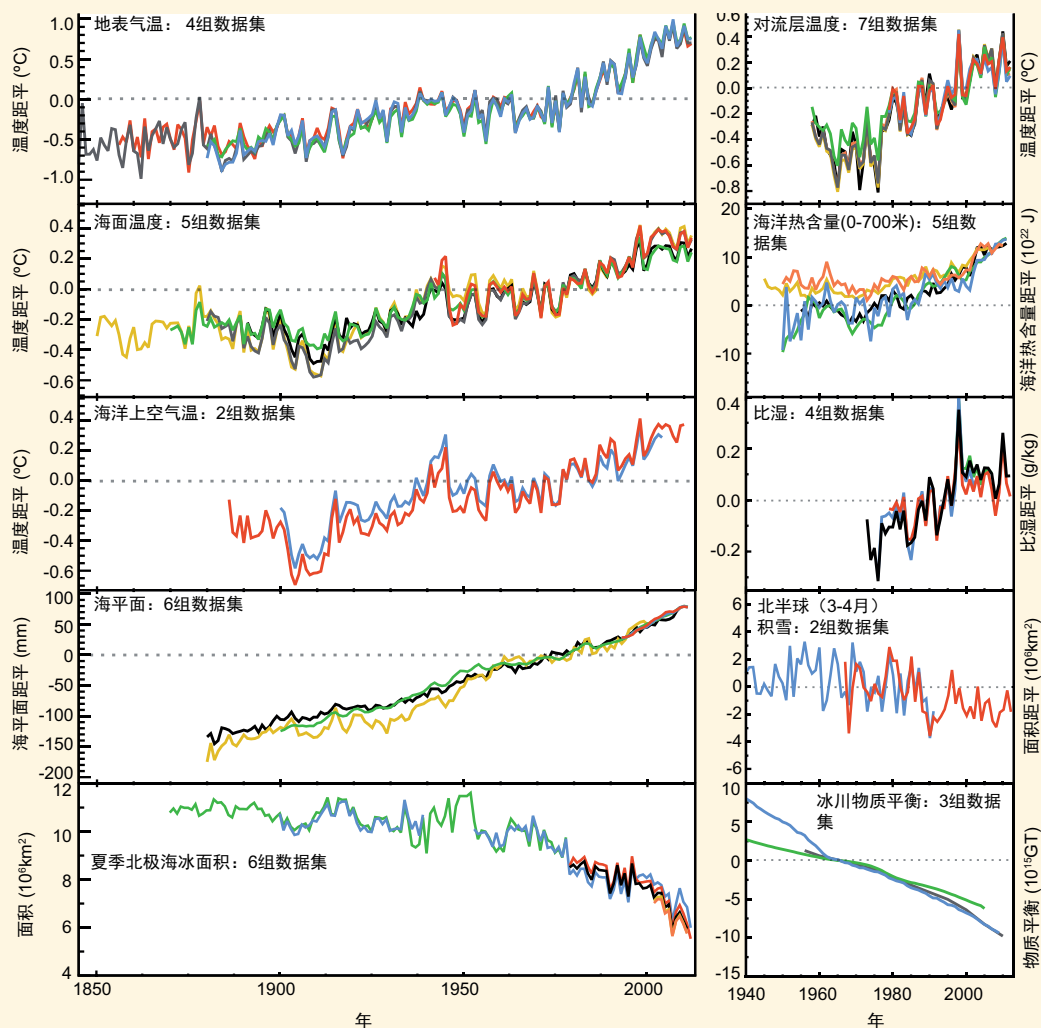
常见问题 2.1 (续)

随着海洋变暖，海水本身也会膨胀。这种膨胀也是过去一个世纪独立观测到的海平面上升的主要因素之一。融化的冰川和冰盖也是导致海平面上升的原因之一，而陆地水的存储和使用上也起了相应的变化。

这个逐渐变暖的世界也是个逐渐潮湿的世界，因为温暖的空气可以锁住更多水汽。全球性分析表明，这种测量大气水汽含量的比湿在陆地上和海洋上都有所增加。

作为整个星球中的冰冻部分 - 总称为冰冻圈，既受制于局地温度，同时也能影响局地温度。全球冰川中的冰量每年都在下降，而且已经持续了20多年，消融的冰量是海平面上升的部分原因。积雪对于温度变化非常敏感，尤其是在春季冰雪消融之时。从上世纪50年代起，整个北半球的春季积雪开始退缩。自从有了卫星纪录以来，就观测到北极海冰已有重大消融，尤其是在最小覆冰期，即每年融冰季节结束之际的9月。相比之下，南极海冰的增加量一直要小些。

个别地看，任何单一的分析结果都可能会令人难以信服，但是对这些不同指标和不同资料集所作的分析结果令许多研究团体都得出了相同的结论：从深海到对流层顶部，所有空气或海洋变暖、冰雪消融和海平面上升等等证据都确切地表明了一件事情，那就是从19世纪后期开始，全球已经开始变暖(常见问题2.1，图2)。



常见问题2.1, 图2 | 全球气候变化多项独立指标。每条线代表对一个气候要素变化独立推导的估值。每个小图上的所有资料集已被规范成通用记录期。对于哪个源资料集属于哪个图，详见补充材料2.SM.5。

常见问题

常见问题2.2 | 极端气候有任何改变吗？

自20世纪中叶起，有确凿证据表明变暖已导致包括热浪在内的极端温度变化。同时强降水天气也有可能增多，但因区域不同而有所不同。然而，对于其他极端现象，例如热带气旋的频率，我们对之更不确定，只有有限的一些区域，可以从观测记录中发现某些变化。

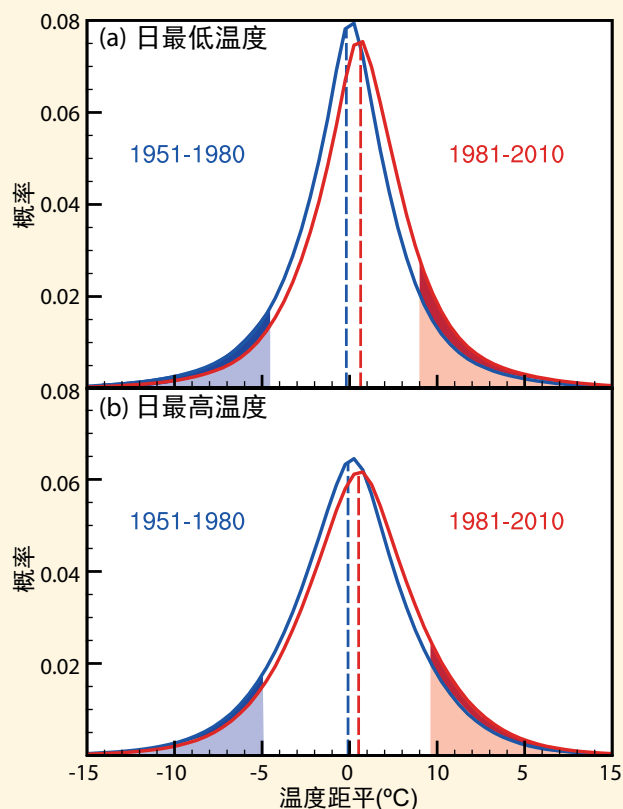
从热浪到寒流，或从干旱到洪灾，记录和分析极端气候都是特殊挑战，不仅因为极端事件发生频率稀少，而且因为这些事件的发生往往都和破坏性条件相关。此外，在科学文献中对于气候极端事件的形成没有一致的定义，这使得全球对比评估变得更为复杂。

虽然从绝对意义上讲，极端气候事件会因地而异，比如热带地区的热天温度可能会与中纬地区的热天温度不同，但国际上开展的极端事件监控都已把重点放在一些重大的全球变化上。

举例来说，我们统一把低于10的百分位数温度与超过90的百分位数温度分别定义为冷和暖，这样全球大多数地区的暖昼与暖夜的频率增加了，而冷昼与冷夜的频率降低了；但也有些例外，例如北美中部和东部，南美南部，但是主要仅与昼温有关。通常极端最低气温的变化都是显而易见的，例如暖夜。而资料的局限性使得我们很难对平均气温的增加建立一个因果链，不过常见问题2.2，图1表明，全球日极端温度确实已经发生改变。这些变化是否只是与日均气温上升有关(见常见问题2.2，图1中的虚线部分)还是发生了昼温或夜温分布等其他变化，目前尚在争论之中。

对温暖期或热浪，即构成连续极端热昼或热夜的时期，已作了评估。但是对热浪的研究要少于对暖昼或暖夜变化进行比较的研究。自20世纪中叶起，绝大多数全球有资料的陆地地区的热浪次数都有所增加。只有美国东南部例外，该地区的热浪频次和持续时间均有所减少。这与该区域的“暖洞”现象有关，而该地区的降水量也同时有所增加，这也许和陆地与大气相互作用以及大西洋和太平洋的长期变动有关。然而，对于大面积的区域，尤其是非洲和南美，有关热浪变化的信息很有限。

某些区域，例如欧洲，对历史气温的重建达数百年之长，从中可以看出某些区域近几十年发生的极端热浪数量已不成比例。(接下页)



常见问题2.2, 图1 | 使用逐日格点气温距平数据集，相对于1961-1990年间的气候，1951-1980(蓝色)和1981-2010(红色)两个时期的(a)每日最低和(b)每日最高温度距平分布。蓝色阴影与红色区域分别代表1951-1980年间(a)夜晚最冷的10%和(b)白天最暖的10%。与1951-1980年相比，1981-2010年间，蓝色阴影颜色越深说明最冷的昼夜降低了多少(深蓝色)，红色区域颜色越深说明最暖的昼夜升高了多少(深红色)。

常见问题

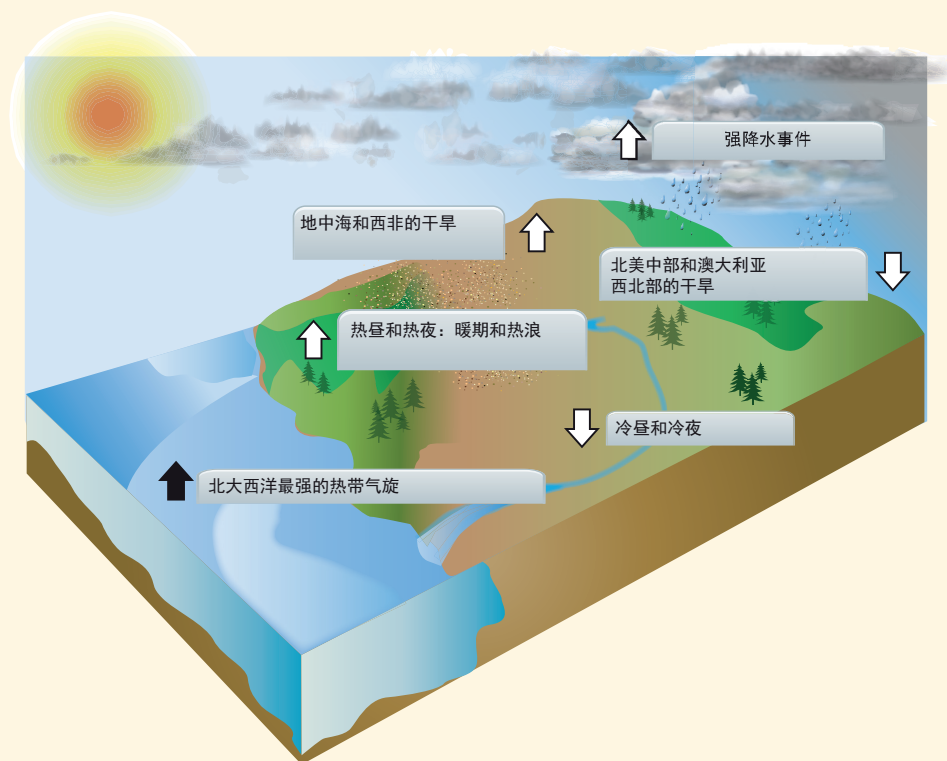
常见问题 2.2 (续)

其他气候变量极值的变化通常因为资料的局限性以及各项研究、各区域和(或)各季节之间的不一致而与观测到的气温差异更大。然而,举例来说,极端降水的增加与气候变暖相一致。利用充分的观测资料分析陆地区域,结果表明近几十年来极端降水发生的频率和强度都有所增加,但是因地域和季节不同,结果也是完全不同的。例如,有确凿证据表明:北美洲、美洲中部及欧洲的强降水呈递增趋势而其他区域,如澳大利亚南部和亚洲东部强降水是呈递减趋势。同样的,从对干旱的研究中发现,它也不同于全球的大趋势,区域发展趋势的不一致也取决于对干旱的定义。然而从20世纪中叶开始,有证据表明在某些区域干旱呈上升趋势(例如地中海地区),而在某些区域干旱则呈下降趋势(例如北美中部)。

对于其他极端事件,例如热带气旋,最新评估显示,由于过去的观测能力限制,很难就其长期发展趋势做出结论。然而,有确凿证据表明:自上世纪70年代开始,北大西洋的强风暴活动呈增长态势。

在一个多世纪中的数个时期,有证据显示北大西洋和南太平洋登陆热带气旋的频率稍有减少,即使在观测方法的不确定性加以考虑的情况下。而对其他洋盆的长期趋势则没有什么证据。对于温带气旋,在过去50年间在两个半球都表现出了向极地移动的趋势,还有有限的证据表明,中纬度地区风暴频率有所减弱。一些研究结果认为风暴强度有所增强,但是由于数据抽样存在问题,从而影响了这些风暴的评估。

常见问题2.2,图2总结了一些观测到的极端气候事件变化。总而言之,最确凿的全球极端气候变化是昼温观测,某种程度上包括了热浪。极端降水似也出现增加趋势,但有很大的空间变率。而且除某些地区外,干旱的观测趋势尚不确定。虽然自上世纪70年代以来就发现了北大西洋热带气旋的频率和活动确有增加,但是其原因究竟为何仍在争论之中。从20世纪中叶开始,与其他气候变量有关的极端事件变化方面的证据量是非常有限的。



常见问题2.2,图2 | 从20世纪中叶开始(北大西洋风暴除外,因其开始于20世纪70年代)的不同极端气候事件频率(或强度)发展趋势(箭头方向表示变化趋势)。

常见问题

常见问题3.1 | 海洋正在变暖吗？

是的，海洋正在许多区域、多个深度层面、多个时期变暖，尽管不是在所有地方，也不是恒定不变。从全球范围，或甚至仅洋盆范围，从十年以上时间跨度平均值来看，变暖的迹象最为清晰。

任何地区的海洋温度变化都是与季节变化息息相关的。因为海洋洋流的变化以及海洋和大气的热交换，所以温度波动每隔一年或每隔十年也可能会很大。

海洋温度记录已经有几个世纪了，但直到1971年前后，我们才有足够全面的观测资料来有信度地估计任何给定年份全球表层几百米的海洋平均温度。事实上，在2005年首次实现Argo温度、盐度剖面浮标阵列全球覆盖之前，全球给定年份的表层海水平均温度的估算所用方法还是个敏感气象问题。

全球平均表层海洋温度在1971到2010年的年代际时间尺度上有所上升。尽管年平均值具有很大的不确定性，但这个海洋升温结果是毋庸置疑的。这段时间，在海面至水深75米之间的表层海水以每十年 0.11°C (0.09°C 到 0.13°C)的速度在升温。这个趋势在海洋表层到海洋中层呈递减态势，每十年降温大约 0.04°C (每200米)和降温大约 0.02°C (每500米)。

进入海洋表面的海水温度异常，所以通过与顶层海水混合来调节水温(常见问题3.1, 图1)。更冷的水分子就更密集，从高纬度来的海水就会从海洋表面下沉，然后向赤道温暖水域扩散。反之，较轻的水分子密度就小，在低纬度海水就会上升。有几个地方，例如北大西洋北部和南极洲周围的南大洋，海水相当的冷，因此向更深的海洋下沉，直达海床。这些海水随即扩散，填补深海海域大部分其他地方。随着海洋表面海水变暖，这些下沉的海水随着时间的推移也会变暖，同时使海洋内部的温度上升，其速度要比单独的表面热流下沉升温快得多。

在北大西洋，深海海水温度每十年就会不同，时而变暖，时而变冷，具体取决于所盛行的冬季大气形势。从1992年到2005年，探测到在南极洲周围海洋底部的海水已经变暖，也许是因为在过去几十年期间南大洋周围的西风加强和南移造成的。在世界上最深最冷海底的海洋这个变暖信号是可测的，尽管印度洋、大西洋和太平洋往北有所减弱。深海升温率明显小于海洋表面升温率(自从20世纪90年代开始，南极洲周围的深海海底大约每十年升温 0.03°C ，其他地方的升温率要小些)。无论如何，大面积的深海升温为海洋热量总量的增加起到巨大作用。

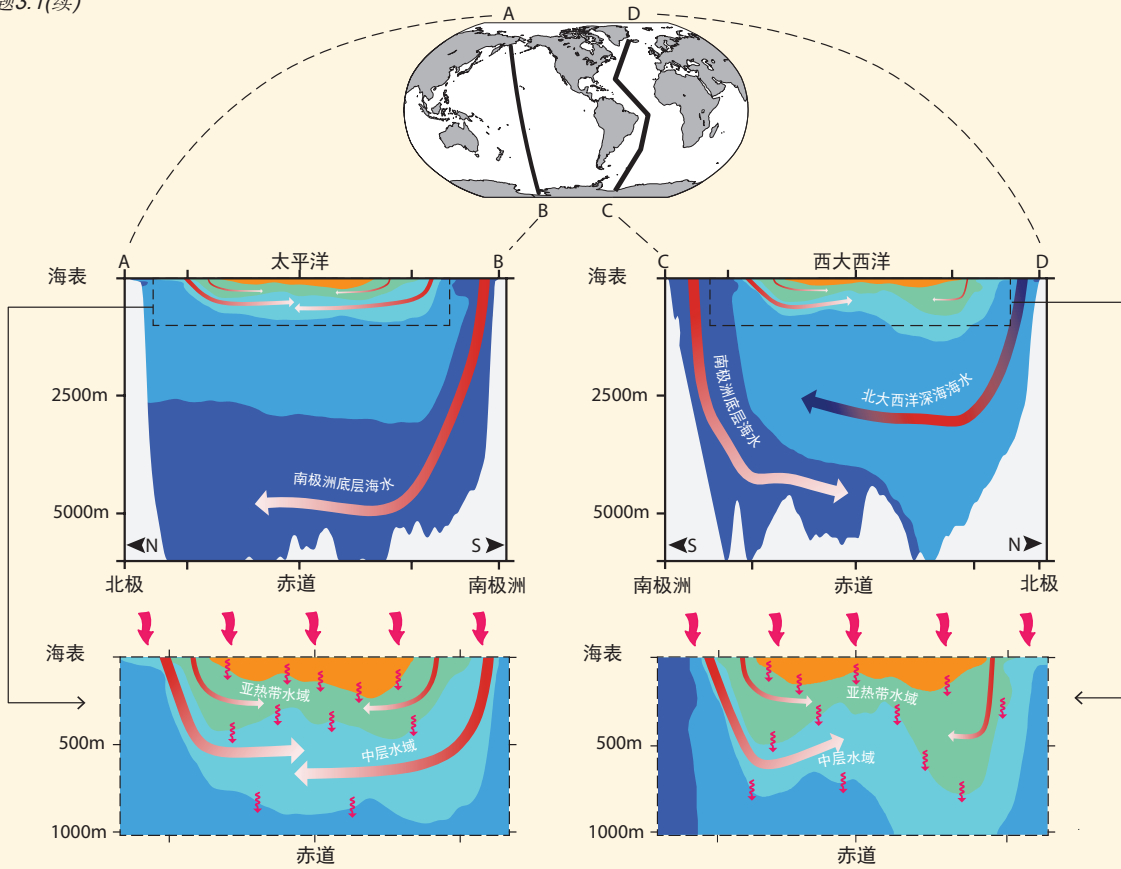
过去几年中，对全球历史海洋平均温度的估计变得更加精确了，这要归功于对海洋认识的提高以及测量系统误差的降低。通过将次准确测量值与同一时段、临近位置上更稀疏、更准确的测量值进行仔细比较，科学工作者可降低历史记录中的伪仪器偏差。通过这些改进之举，全球海洋平均温度测量值比2008年之前报告的测量值精准了许多，而且年年都有所提高。尽管如此，全球平均增温率在时间上可能还不统一。有些年份，海洋温度增加速度高于平均值，而有些年份增温率似乎有所减慢。

海洋的大体量和高热容使得它能够存储巨大的能量 – 这是大气中温度等量增加量的1000多倍。地球吸收的热量多于其反射到空间的热量，并且几乎所有多余的热量都进入海洋并被海洋储存。1971年到2010年间海洋吸收的热量占空气、海洋、陆地变暖和融冰储存的综合热量的大约93% (高可信度)。

海洋巨大的热容和缓慢的循环使得海洋具有显著的热惯性。近海洋表面温度需要10年时间才能随着气候强迫(比如温室气体浓度的变化)加以调整(参见12.5节)。因此，如果温室气体浓度在未来仍能控制在目前水平的話，地球表面温度的增长将在大约10年内开始减缓。然而深海温度在未来几百或几千年里还将持续变暖(参见12.5节)，而海平面在未来几百年或几千年里也将持续升高(参见13.5节)。(接下页)

常见问题

常见问题3.1(续)



常见问题3.1, 图1 | 海洋热量吸收途径。海洋是分层的, 最冷部分是位于深海密度最大的海水(上图: 用上方地图作为方向)。寒冷的南极洲底层海水(深蓝色)下沉至南极洲周边, 然后向北沿着海底扩展进入太平洋中央(左上图: 红色箭头渐变成白色说明近期底部海水与表层海水交汇而强烈升温)和大西洋西部(右上图)及印度洋(没有显示)。海水越不冷就越轻, 北大西洋深海海水(浅蓝色)沉入北大西洋北部海域(右上图: 红色和蓝色的箭头表示深海10年的增温和降温), 然后向南扩张到南极洲底层水域。与此类似, 在上层海洋 (左下图是太平洋详情, 右下图是大西洋详情), 凉爽的中层水域(青色)下沉至副极地地区(红色箭头渐变成白色说明随时间而升温), 之后向赤道方向扩散, 到达较暖的亚热带水域(绿色), 重新下沉(红色箭头渐变成白色说明中层海水和亚热带海水近来与表层海水接触而急剧升温), 然后向赤道方向扩散, 到达热带水域, 即三大洋中最暖、最轻的水域(橘色)。海洋表面过热或过冷的海水(见图中顶端弯曲的红色箭头)也经混合之后缓慢下沉(次表层波浪状的红色箭头)。

常见问题

常见问题3.2 | 地球水循环改变的证据存在吗？

地球上的水循环包括地表水分的蒸发和降水。大气水汽含量变化有力证明了气候变暖正在导致水循环的改变。因为缺少对全球海洋上空降雨和蒸发的长期观测，海洋盐度分布便成为重要的测雨代用工具，其变化提供了进一步的证据。

因为暖空气会加大湿度，所有预计在气候变暖的趋势下水循环会加强：大气每变暖 1°C 就可以多容纳大约7%的水汽。自20世纪70年代以来的观测资料表明，地表和大气底层的水汽有所增加(参见常见问题3.2，图1a)，与观测到的气候变暖速率相一致。另外，水汽和降水的强度预估会随着气候变暖而加大。

过去50年记录的海洋盐度变化支持了这一预估。海水里含有盐和淡水这两种物质，其盐度是所含溶解盐重量的函数。盐分来自于风化的岩石，其总量在人类时间尺度上不能改变，所以只能按天或世纪时间尺度通过增加或减少淡水的方式来改变海水盐度。

大气可将蒸发的水汽从一个地方移动到另一个地方，从而将海洋的净淡水流失区与净淡水获得区联系起来。这种海洋表面盐度的分布很大程度上反映了蒸发对降水、陆地径流和海冰过程的空间形态。因为洋流的作用，这些形态在某种情况下会相互转换。

因为蒸发量高于降水量，所以亚热带海水是高盐度的；反之，由于降水量高于蒸发量，处于高纬度及热带的水则是低盐度的(常见问题3.2，图1b、d)。大西洋是含盐度最高的洋盆，这是因为它从蒸发中失去的水要多于从降水中得到的水；而太平洋的含盐度则接近中间值(降水与蒸发基本持平)，南大洋(南极洲附近区域)以降水为主。

海水表层盐度变化和海水上层的变化加强了平均盐度分布。蒸发为主的亚热带区域海水变咸，而降水为主的副极地和热带区域海水变淡。考虑了表层500米以上水域的变化后，以蒸发为主的大西洋海水已变得更咸，而含盐度中等的太平洋和以降水为主的南大洋已变得更淡(常见问题3.2，图1c)。

对降水和蒸发的变化进行全球性直接观测是很困难的，因为有70%的地表是被海洋覆盖的，所以绝大多数大气和地表之间的淡水交换是在海洋上进行的。现有长期降水记录仅有陆地部分的，而且还没有蒸发方面的长期测量资料。

地基观测表明在某些地区降水增加，而某些地区降水减少，因此绘制一个全球合成的降水图非常困难。陆基观测表明极端降雨事件有所增加，以及北方高纬度地区由于冰雪融化期提前而引发的洪水有所增加，但从发展趋势上看，这种情况具有很强的区域性。迄今为止，陆基观测还无法为干旱变化提供足够的证据。

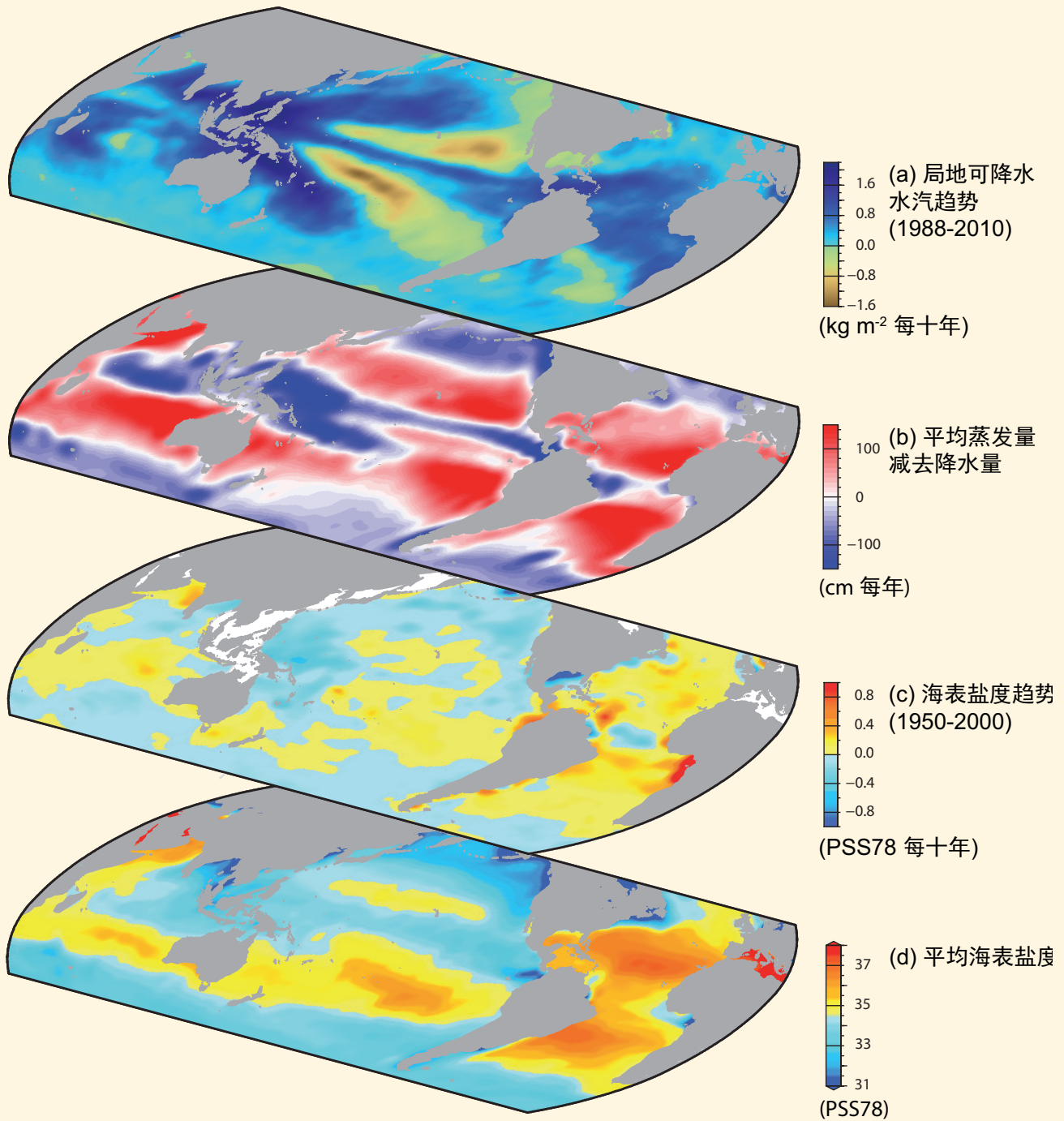
另一方面，海洋盐度就像海洋上的一个灵敏而有效的雨量计。它自然反映了海洋获得的降水水量和海洋损失的蒸发水量之间的差值并做了平滑，而降水和蒸发两者都是变化无常的。海洋盐度同样也会受到陆地径流水量的影响，并且会受到海冰或浮冰融化和冻结的影响。陆地积雪融化增加的淡水将改变全球平均盐度，但是迄今这些改变太小，无法被观测到。

过去50年的资料表明在海洋上层存在普遍的盐度变化，这说明了降水及减去蒸发后径流的系统性变化，如常见问题3.2，图1所示。

常见问题3.2基于第二章和第三章中报告的观测资料并基于第九章和第十二章中的模式分析。(接下页)

常见问题

常见问题3.2(续)



常见问题3.2, 图1 | 海面盐度变化与大气蒸发和降水(E-P)形态以及总可降水量趋势有关: (a) 从卫星观测(专用传感器微波成像仪)的总可降水量(从地球表面到整个大气层积分的水汽)(每十年kg m⁻²)的线性趋势(1988-2010)(根据Wentz等人, 2007)(蓝色: 变湿; 黄色: 变干)。 (b) 从气象再分析(国家环境预报中心/国家大气研究中心, Kalnay等人, 1996)中得到的1979-2005年气候平均净E-P量(厘米/年)(红色: 净蒸发量; 蓝色: 净降水量)。 (c) 1950-2000年表面盐度趋势(PSS78每50年)(根据Durack和Wijffels, 2010)(蓝色: 淡化; 黄色-红色: 盐度增加)。 (d) 气候表面平均盐度(PSS78)(蓝色: <35; 黄色-红色: >35)。

常见问题

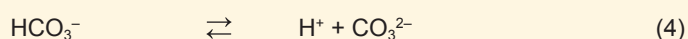
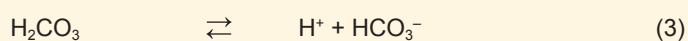
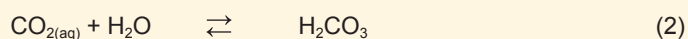
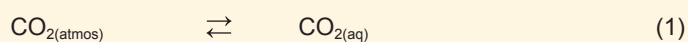
常见问题3.3 | 人为的海洋酸化与气候变化有关吗？

人为气候变化和人为海洋酸化都是因为大气中二氧化碳浓度增加造成的。二氧化碳(CO₂)等温室气体水平的上升可捕捉从地球表面反射回的热能，从而可间接改变气候系统。人为海洋酸化是CO₂浓度升高的直接后果，因为目前海水可吸收掉大气中将近30%的CO₂。

海洋酸化指的是pH值长期(通常为几十年或者更长)下降，这主要由于从大气中吸收了CO₂造成的。pH值是酸度的无因次量。海洋酸化说明的是pH的变化方向而不是终点：即海洋pH值下降，但预期不会变酸(pH < 7)。海洋酸化也可以由海洋中其他自然化学成分的增加或减少而引起。(例如：火山活动的加强、甲烷水合物的释放、长期净呼吸的改变等)或者由人为引发(例如：释放到大气中的氮气硫磺化合物)。人为海洋酸化指的是因人类活动造成的pH值下降分量。

从大约1750年开始，工业、农业活动中排放的CO₂使得全球大气平均CO₂浓度从278ppm上升到了2011年的390.5ppm。大气中CO₂的现在浓度比过去八十万年中的任何时候都要高，而且预期还要继续升高，这是因为我们是靠化石燃料来获取能源的。迄今，海洋从大气中吸收了将近155±30PgC，大致相当于自工业化前时代以来人类活动所排放CO₂总量的四分之一(555±85PgC)。这一自然的吸收过程很大程度上降低了大气中的温室气体水平，最大程度地降低了全球变暖的某些影响。然而，海洋吸收的CO₂正在给海水造成巨大的化学影响。从工业革命开始以来，海洋表面水体的pH平均值已经从8.2下降到了8.1，降低了大约0.1个单位。根据对未来大气和海洋CO₂浓度的预测，到本世纪末，海洋表面的pH平均值将比现在的低0.2到0.4个单位。pH标度是对数性质的，即若pH值有1个单位的变化，则氢离子浓度有10倍的变化。

当大气中的二氧化碳在空气海洋的交界处交换时，它与海水相互作用，形成一系列四种化学反应，使得碳种类的浓度增加。例如：被溶解的二氧化碳(CO_{2(aq)})、碳酸(H₂CO₃)和碳酸氢盐(HCO₃⁻):

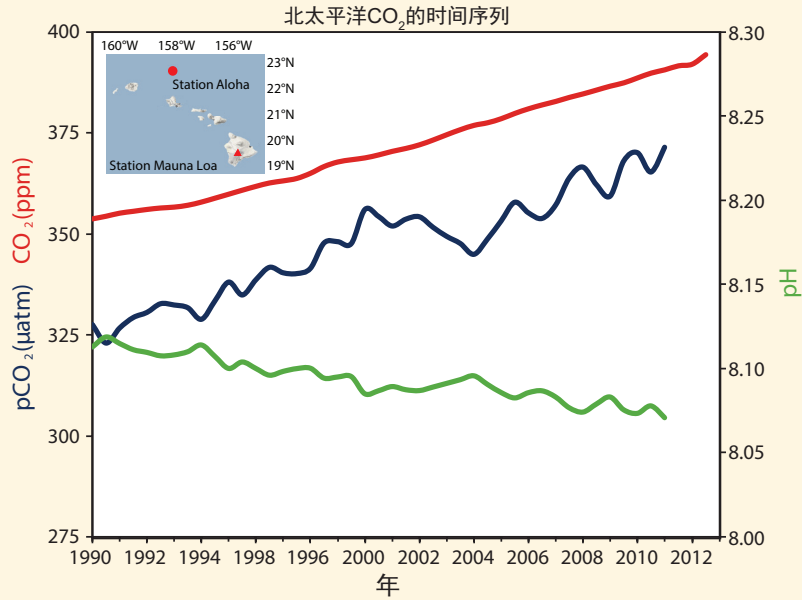


这些化学反应产生了氢离子(H⁺)。这种海洋氢离子浓度的增加对应的是pH值的下降或是酸度的上升。在正常的海水条件下，所产生的氢离子中99.99%以上的会与碳酸根离子(CO₃²⁻)结合产生新的碳酸氢根(HCO₃⁻)。因此，将人为CO₂加入海洋既会降低pH值，也会消耗碳酸根离子。这些反应完全是可逆的，并且这些海水中反应的基本热力学原理是众所周知的，即pH值约为8.1时，大约90%的碳是碳酸氢盐离子形式，而9%的碳是碳酸根离子形式，仅有1%的碳是溶解的CO₂形式。实验室、外场和模拟研究的结果以及地质学记录的证据均清晰地表明海洋生态系统极易受海洋CO₂的增加以及pH值和碳离子的相应降低的影响。

气候变化和人为的海洋酸化并不是独立的行为。虽然被海洋吸收的CO₂对温室升温并无贡献，但海洋变暖会降低CO₂在海水中的溶解度，因此会降低海洋从大气中吸收CO₂的总量。举例说明：在工业化前CO₂浓度加倍并且温度上升2°C的情况下，海水会比温度没有上升情况(与表1中第4列和第6列进行比较)下少吸收大约10%的CO₂(减少10%的总碳量，CT)，但是pH值几乎没有什么变化。因此，海洋的温度越高，其从大气中清除CO₂的能力就越低，而且仍会发生海洋酸化。原因是海水升温后，碳酸氢盐可转化成碳酸盐，同时释放氢离子，从而稳定住pH值。(接下页)

常见问题

常见问题3.3 (续)



常见问题3.3, 图1 | 从Mauna Loa大气观测站得到的经平滑处理后的大气CO₂摩尔分数（ppm）时间序列（顶端红线），位于亚热带北太平洋夏威夷北部的ALOHA观测站针对1990-2011年这段时期得到的海洋表面CO₂气体分压（pCO₂；中间蓝线）以及海洋表面的pH值（底部绿线）（根据Doney等人，2009；资料来自Dore等人，2009）。这些结果说明海洋表面的pCO₂趋势总体上与大气中的增长相一致，但因海洋过程的大尺度年际变率而变率更强。

常见问题3.3, 表1 | 设定温度没有升高或升高了2°C，与工业化前的大气相比CO₂增加了一倍，在这种情况下，表面海水的海洋pH值和碳系统参数的变化情况^a。

参数	工业化前 (280 ppmv) 20°C	2倍于工业化前 (560 ppmv) 20°C	(相对于工业化前的变化%)	2倍于工业化前(560 ppmv) 22°C	(相对于工业化前的变化%)
pH	8.1714	7.9202	-	7.9207	-
H ⁺ (mol kg ⁻¹)	6.739e ⁻⁹	1.202e ⁻⁸	(78.4)	1.200e ⁻⁸	(78.1)
CO _{2(aq)} (μmol kg ⁻¹)	9.10	18.10	(98.9)	17.2	(89.0)
HCO ₃ ⁻ (μmol kg ⁻¹)	1723.4	1932.8	(12.15)	1910.4	(10.9)
CO ₃ ²⁻ (μmol kg ⁻¹)	228.3	143.6	(-37.1)	152.9	(-33.0)
C _T (μmol kg ⁻¹)	1960.8	2094.5	(6.82)	2080.5	(6.10)

注：

^a CO_{2(aq)} = 溶解的 CO₂, H₂CO₃ = 碳酸, HCO₃⁻ = 碳酸氢盐, CO₃²⁻ = 碳酸盐, C_T = 总碳含量 = CO_{2(aq)} + HCO₃⁻ + CO₃²⁻。

常见问题

常见问题4.1 | 北极和南极的海冰是如何变化的？

覆盖在北冰洋和南极洲南部海洋的海冰具有完全不同的特征，随着时间的推移，它们所表现出的变化也不同。在过去的34年间(1979-2012)，北极海冰年平均覆盖范围以每10年3.8%的趋势在下降。在1978年到2008年间，北极海冰的冬季冰层平均厚度减少了大约1.8米，海冰总量(物质)全年都在下降。这种趋势造成的结果就是夏季海冰最小时，海冰范围减小的速度就越快。相比之下，在同期34年间，南极海冰总面积呈现了每10年1.5%的小幅增长，但是在南极周围的变化方面存在着很强的区域性差异。南极海冰厚度测量资料数量还太少，故不太可能判断出其总体积(质量)是降低的、稳定的还是升高的。

北极海冰覆冰总量的大部分都位于北纬60度以上区域(常见问题4.1, 图1)，海冰向南被陆地包围着，开口处为加拿大北极群岛、白令海峡、巴伦支海及格陵兰海。一些位于北极海盆内的海冰能够持续几个季节，依靠底部海水结冰和变形(成脊和叠挤)来实现其厚度的增长。季节性海冰厚度只能增长到2米，但是冰期长于1年的海冰(长期冰)可比季节性海冰厚出几米。北极海冰在海盆内漂流，受风和海洋洋流的推动：均值漂移形态是通过北极西部的顺时针环流形态和北极贯穿流把西伯利亚的海冰从北极洋盆经弗拉姆海峡带出来实现的。

具有区分冰面和开放海域功能的卫星提供了海冰覆盖变化的图像。自1979年起，北极海冰年平均覆盖面积每10年降低了3.8%。在夏季末(9月下旬)海冰面积缩减幅度更大，达到了每10年下降11%，在2012年达到了创纪录的最低值。从有卫星记录以来，每十年九月平均北极冰盖范围最小值一直在减少。从水下和卫星观测记录我们知道了北极冰的厚度，因此也就知道了其总体积也在减小。长期冰和季节性海冰的相对量变化使海冰总体积减小了。通过34年的资料记录，自1979年开始，每10年大约17%这种类型的海冰因融化或从洋盆流走而消失了，而自从1999年开始，大约40%的海冰以这两种方式消失了。虽然北极地区海冰覆盖面积每年都因季节产冰量有所变动而有所波动，但只有常年厚冰所占比例和海冰总体积可以缓慢恢复。

与北极不同，由于南极陆块的存在，南极洲周围覆盖的海冰都位于南纬78°以北。南极洲冰盖多数都是季节性的，9月海冰面积达到最大，平均厚度只有大约1米。2月夏季的冰盖面积最小，只有一小块，而且这里能维持2年以上不融化的海冰非常少。海冰边缘与开放海域相连而且南极降雪率高于北极。当降雪量足够把冰面上的雪压低到海平面以下时，海水渗透到积雪底部，当混合了积雪与海冰的泥浆冻结后就会形成冻雪。因此，由雪到冰的转化(就像北极海底冻结一样)导致了南极冰厚度和冰总体积的季节性增长。雪冰的形成对于降水的变化和这种区域性气候的变化非常敏感。降水变化对南极海冰厚度和体积的影响始终是科研的焦点。

由于不受陆地边缘的局限，南极海冰冰盖沿纬度方向的伸缩性极高。在南极海岸附近，海冰主要是从东向西漂移，但再往北，海冰是从西向东漂移并且具有高离散性。威德尔海和罗斯海呈显著的顺时针环流形态，可把海冰向北方推移，而南极洲东部周围的环流形态则更具多变性。海冰冰盖向北范围一部分是被海冰的离散性漂移所控制，这样有助于冬季月份在海岸线上长期开放水域(冰间湖)里的新海冰的形成。这些形成海冰的区域可导致盐度增高，从而增大海水密度，并且成为全球海洋中主要的最深水源之一。

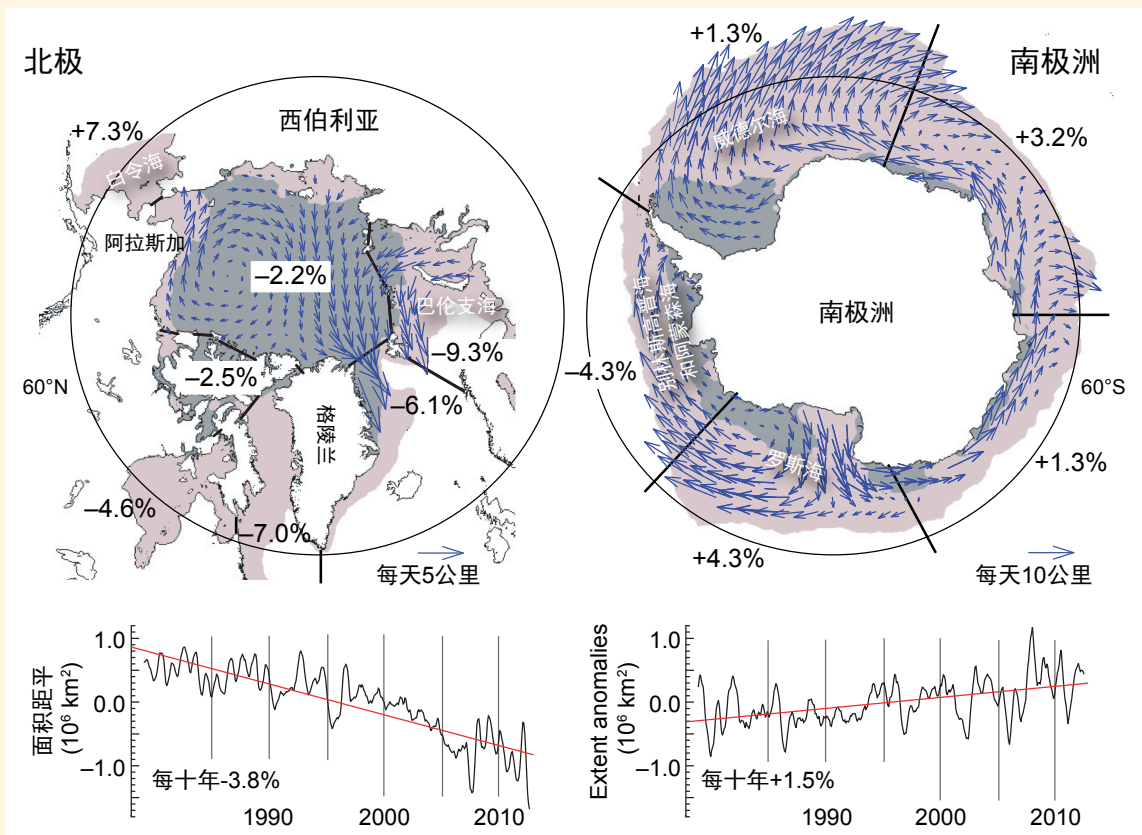
根据同期34年的卫星资料记载，南极年海冰范围每10年增长将近1.5%。然而，发展趋势具有区域性不同，在白令海和阿蒙森海呈现下降趋势，而罗斯海的海冰范围呈现更大的增长态势而且主导着总体趋势。南极海冰范围总体上呈现更小程度的增长是否可以作为有意义的气候指标这点还不确定，因为该大洲每年各地的覆盖范围都迥然不同。(接下页)

常见问题

常见问题4.1 (续)

最新研究表明这些相反的海冰覆盖趋势可能是因为区域风速和风型的发展趋势引起的。若没有更好地估算冰块厚度和体积，则很难描述气候变化对南极冰盖的影响方式或哪个气候因素对其最具影响力。

影响北极和南极海冰冰盖状态的物理环境和过程存在很大差别，而且这可导致对气候变化的响应有所不同。长期连续的卫星观测记录展现了北极海冰冰盖消融的清晰图片，但现有的证据无法使我们准确说明南极海冰的整体变化及变化原因。



常见问题4.1,图1 | 北极、南极不同扇区海冰平均环流形态和海冰范围（即移除季节性周期后）年度异常的10年趋势（%）。箭头表示海冰漂移平均方向和幅度。1979-2012年间从卫星观测记录中获得的平均海冰冰盖最大（最小）范围用橘色（灰色）阴影表示。

常见问题

常见问题4.2 | 山区冰川正在消失么？

世界各地的许多山脉，在过去几十年间因为大气温度上升，冰川正在消失。在加拿大北极地区及落基山脉、安第斯山脉、巴塔哥尼亚地区、欧洲阿尔卑斯山、天山山脉、南美热带山区、非洲、亚洲及其他地区均报道过正在消失的冰川。在过去几十年中，这些地区有超过600座冰川消失。即使气候没有进一步变暖，更多冰川也会消失。而且有些山脉的大部分(即便不是全部)冰川也有可能消失。

所有现有冰川的山脉，冰川的体积在过去的150年间大大减小。在此期间，许多小冰川已经消失。除了一些局部地区外，冰川的退缩(范围及体积的减少)已在世界范围内成为普遍现象，尤其是在20世纪40年代期间，以及20世纪80年代后。然而，对长期变化的测量及对物质平衡的模拟显示，19世纪90年代、20世纪20年代和70年代也有一些相对稳定的阶段。传统的现场测量及越来越多的机载和卫星测量都有力地证明了过去二十年间冰川减少的速度比以前更快且冰川还在继续退缩。但在少量地区，个别冰川的表现有所不同，在多数冰川退缩时，这些冰川的面积在增加(例如：新西兰、挪威及南巴塔哥尼亚(智利)沿海或亚洲的喀喇昆仑山区)。总的来说，特殊地形和/或气候条件(如降水增加)造成了这些冰川面积的增加。

冰川可用几十年的时间来调整其面积以适应气候的瞬变，所以绝大多数的冰川因为要适应当前气候需进行冰川物质平衡从而比原冰川要大。由于冰川所需的调整时间随冰川的体积变大而增加，因此在后来的几十年里即便温度稳定，体积较大的冰川也要继续缩小。体积小些的冰川也会继续退缩，但是它们调整自身大小的时间会更快，并且许多冰川最终将消失殆尽。

许多因素可影响冰川个体的未来发展，影响到其是否会消失：例如其大小、斜率、海拔极差、区域海拔分布以及其表面特征(如碎片覆盖量)。这些因素因区域不同而有很大的不同，即便是相邻冰川之间差别也很大。外部因素，如周边地形、气候状况对于冰川的未来发展也很重要。从更短时间尺度(十年或二十年)看，每个冰川对气候变化的响应在细节上都有个体差异。

在超过约50年的时段里，这种响应是一致的而且对当地环境条件的依赖并不高，这意味着我们可以很好地模拟冰川发展的长期趋势。这种模拟是建立在对基础物理原理的认识之上的。例如，当地平均气温上升，而降水没有变化，这会导致冰川平衡线高度(ELA：参见术语表)在大气变暖条件下的向上偏移，大气每升温一摄氏度该线则将偏移约150米。有关这样的向上偏移及其对不同尺寸、海拔极差冰川的影响可参见常见问题4.2，图1。

最初，所有冰川在ELA线上都有一个冰川积累区(白色)，在线下都有一个冰川消融区(浅蓝色)(常见问题4.2，图1a)。随着ELA向上偏移，积累区开始萎缩而消融区开始扩大，这样可扩大融冰消失区(常见问题4.2，图1b)。这个不平衡可导致海冰的整体消失。几年后，冰川前缘后退，消融区萎缩直到冰川调整自身范围以适应新的气候(常见问题4.2，图1c)。当某处的气候变化影响足够大时，ELA线会永久性地上升到冰川最顶端之上(常见问题4.2，图1b，右图)，冰川将完全消失(常见问题4.2，图1c，右图)。位置更高的冰川因其能保住其积累区，虽将萎缩，但是不会消失(常见问题4.2，图1c，左图、中间图)。大型山谷冰川的冰舌大部分都可能消失，也许在那里会留下一个湖(常见问题4.2，图1c，左图)。除了气温变化外，降水量的变化和降水的季节性变化也可影响ELA的偏移。冰川动力学(例如：流速)也起着一定的作用，但未在这个简化方案中考虑。

许多观测结果已经确认不同类型的冰川对于近期气候变化的响应也有所不同。例如，大型山谷冰川的平坦、低位的冰舌(像在阿拉斯加、加拿大或阿尔卑斯那里的冰川)目前表现出最大程度的冰川消失，基本上与朝向、背阴面或碎片覆盖无关。(接下页)

常见问题

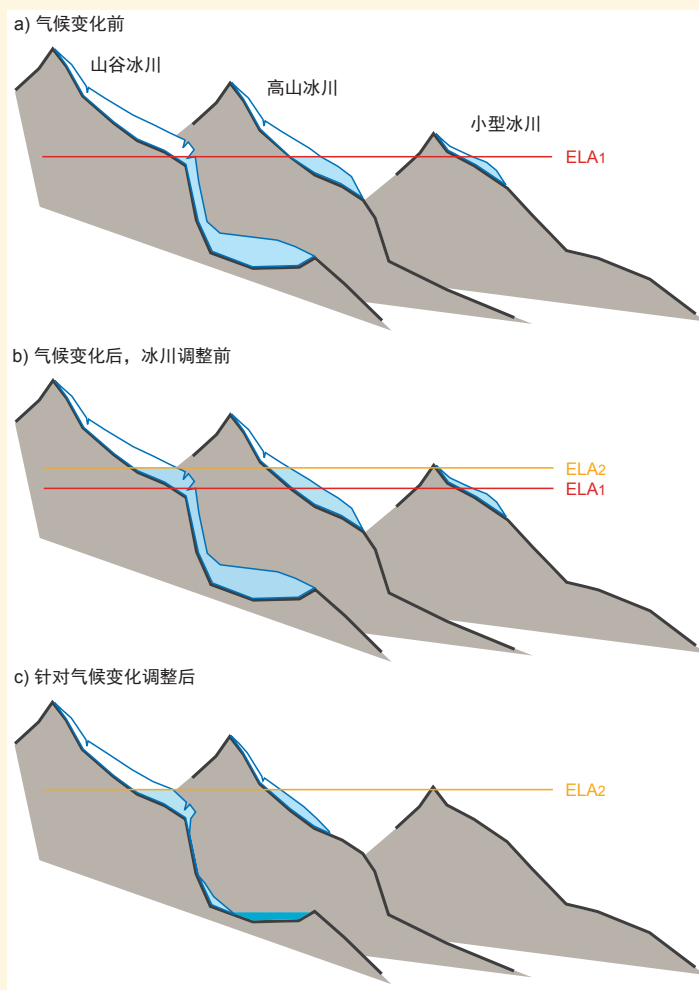
常见问题4.2(续)

这种类型的冰川在调整覆盖面积以适应新的气候条件方面属于缓慢型，其主要反应是“瘦身”，而非最终大大收缩。与此相反，坡度相当恒定的小型冰川，能更迅速地调整其消融面积，从而可更快地适应新的气候条件(常见问题4.2，图1c，中间图)。

大多数冰川类型对气候变化的长期响应可用常见问题4.2，图1中所述的方法很好地确定。然而，模拟短期的冰川响应，或者模拟更为复杂冰川类型的长期响应是很困难的(例如，那些有很多碎片覆盖的，由雪崩的雪来维系的，不与冰川积累区相连的，涌流型的，或崩解成水的)。这类情况需要详细掌握像物质平衡、冰层厚度分布和内部力学等其他冰川特征。对于全球大多数冰川而言，这类观测资料现还拿不出来，而它们对气候变化的响应也只能靠常见问题4.2，图1中提及的简单方案来求得近似值。

就像喀喇昆仑-喜马拉雅山脉，它有着各种各样的冰川类型和气候条件，而其冰川特性目前也仍知之甚少。这使对未来冰川趋势的确定具有极大的不确定性。然而，得益于卫星资料的大量运用(例如汇编冰川清单或推导冰川流速)和地基观测网的发展，预计在未来数年里能够大大缩小对冰川的认知差距。

综上所述，冰川的命运变化无常，既取决于其自身特性，又取决于未来的气候条件。更多的冰川将消失；其他冰川的低位部分会消失，而有些冰川也可能没有大的改变。对于某个特定冰川，当ELA位于海拔最高点以上时，该冰川注定会完全消失，除非气候变冷。同样，若是未来ELA升至海拔最高点以上时，那些区域里所有的冰川将不复存在。



常见问题4.2,图1 | 图上所示是处于不同海拔的三种类型冰川，及其对平衡线高度(ELA)向上移动的反应。(a) 在指定的某种气候条件下，ELA处于一个特殊的高度即ELA1，这时所有冰川都有一个特定的尺寸。(b) 由于气温的升高，ELA向上移动到了新的高度即ELA2，最初可导致冰川积累区的减少和大量消融区的出现。(c) 冰川大小调整后达到了新的ELA，此时山谷冰川(左图)的冰舌消失了，小冰川(右图)也完全消失了。

常见问题

常见问题5.1 | 太阳是近期气候变化的主要驱动力吗？

太阳总辐照度(TSI, 第8章)是对大气层上层从太阳接收的总能量的测量。虽然在过去的140年中, 太阳辐照度的变动一直相对较小, 但它在很广的时间范围内变动, 从数十亿年到短短几天。除火山喷发和人为因素之外, 太阳辐照度的变更也是气候变率(第1章; 图1.1)的一个重要驱动力。就此而论, 这有助于解释在仪器观测时期(常见问题5.1, 图1; 第10章)及过去的一千年里所观测到的全球表面温度变化。在20世纪初, 虽然太阳变率对全球表面温度变化的影响可以识别, 但它无法对20世纪70年代末太阳辐照度开始由人造卫星直接测量以来辐照度的增加做出解释(第8章, 第10章)。

太阳的核心是一个将氢转化成氦的大型核聚变反应堆。这一过程产生的能量以电磁辐射的形式在整个太阳系中向周围扩散。冲击在地球大气层顶部的能量大小依照太阳产生和扩散的电磁能量变化以及地球围绕太阳的运行轨迹变化而发生改变。

自1978年起, 卫星仪器可直接测量TSI, 显示地球大气层顶部接收到的太阳辐射平均值为 $\sim 1361\text{W}/\text{m}^2$ 。部分地表、空气污染及大气中的云层起到一面镜子的作用, 将约30%的能量反射回太空中。当太阳活动较多时, TSI的记录值会更高。辐照度以约11年1次的太阳黑子周期变化: 在最近的几个周期里, TSI的平均波动值在0.1%左右。

在能够使用卫星测量之前, TSI的变化不得不依照黑子数(追溯到1610年), 或是大气层中形成的、存在于极地冰和树木年轮的放射性同位素进行估算。在太阳活动非常衰弱的50-100年间, 例如1645年至1715年的蒙德极小期, 通常称作“太阳活动最低期”。从蒙德极小期出现至今, 有关太阳辐照度的众多估计值在0.1%左右浮动, 与11年的变率幅度相似。

太阳变率是如何有助于人们解释1870年以来的全球表面温度记录的呢? 为了回答这一问题, 了解所涉及的其他气候驱动力是很重要的。每个驱动力都会生成区域性气候响应的特有形态。然而, 正是它们的结合才引发出所观测到的气候变化。太阳变率和火山爆发是自然因素。人为(人类造成的)因素则是另一方面, 它包括温室气体浓度变化、可见气体污染(气溶胶)排放以及人类活动产生的其他物质。“内部变率”指在气候系统内的波动, 例如, 天气变化或类似厄尔尼诺-南方涛动的现象。

这些自然因素及人为因素带来的相关影响随时间发生变化。常见问题5.1, 图1在一些简单计算的基础上阐明了那些影响, 其中全球平均表面温度变化表明了与太阳、火山和人为强迫及内部变率成线性相关的四个组分的总和。1870年至2010年, 全球表面温度上涨约 0.8°C (常见问题5.1, 图1a)。然而这种温度上升现象并不是始终如一的: 有时, 使地球表面降温的因素, 如火山喷发、较弱的太阳活动及大量人为气溶胶的排放, 已经超过了类似温室气体这样可以使地表变暖的因素, 气候系统内的变率引发了与外部影响无关的进一步波动。

太阳对地球表面温度变化的影响主要由11年太阳周期控制, 这可以解释全球温度波动值在太阳活动最低期与最高期之间为何为 0.1°C 左右(常见问题5.1, 图1b)。在20世纪初, 太阳活动的长期增长趋势以及变率内部变率、温室气体的增加和火山活动的间断可能会放大这一周期内的升温情况。然而, 它却不能解释自20世纪70年代末以来所观测到的增长, 以及从1986年到2008年TSI甚至略有下降的趋势(第8章, 第10章)。

火山喷发间或将气溶胶注入大气, 对全球表面温度变化产生影响, 使地球表面降温(常见问题5.1, 图1c)。大型火山喷发, 如1991年的皮纳图博火山喷发, 在长达3年的时间内将表面温度降温了 0.1°C 至 0.3°C 。(接下页)

常见问题

常见问题5.1 (续)

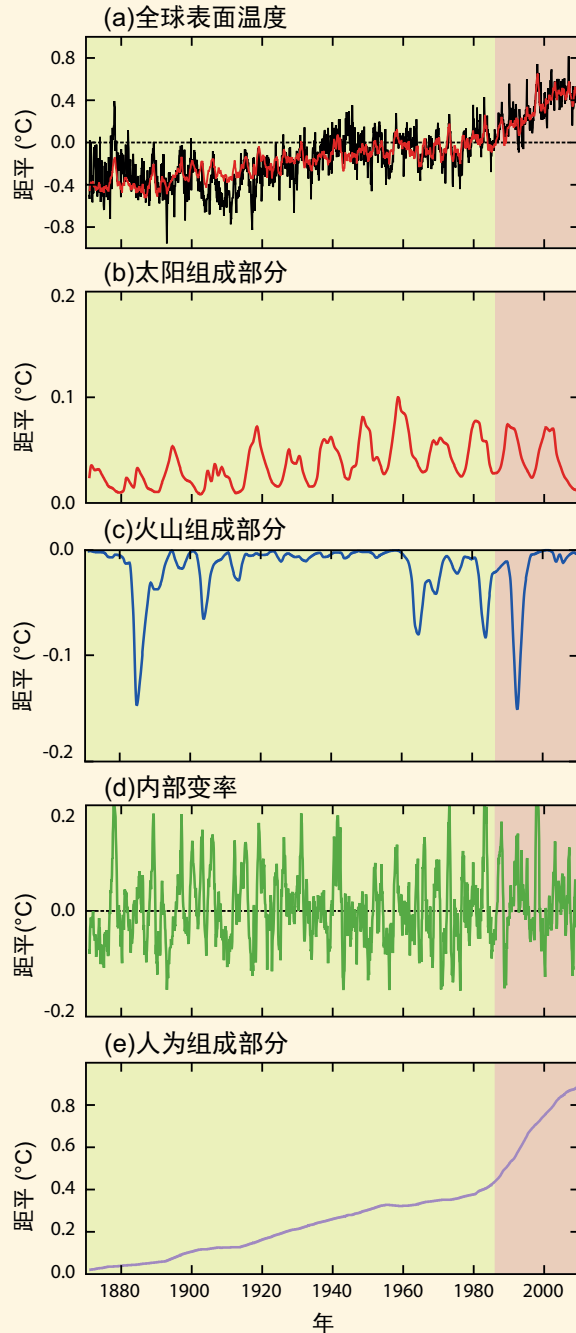
内部气候变率最为重要的部分是厄尔尼诺-南方涛动现象，它主要影响每年热带平均气温和全球平均气温的变化(常见问题5.1, 图1d)。比如1997年至1998年的厄尔尼诺现象致使年均气温相对较高。

所观测到的1870年至2010年全球表面温度变率(图1a)反映了自然因素(太阳、火山、内部; 常见问题5.1, 图1b-d)产生的综合影响, 加上人为因素叠加出数十年的变暖趋势(常见问题5.1, 图1e)。

1870年前, 人为排放的温室气体和气溶胶较少, 因而太阳和火山活动的变化及内部变率对全球表面温度的影响更为重要, 尽管其中单一因素的具体影响目前还不明确。持续数十年的太阳活动最低期常与低温环境相关联。然而, 最低期通常也受火山喷发的影响, 进而难以量化太阳因素的作用。

在区域尺度上, 太阳活动的变化与印度洋-太平洋、北亚及北大西洋等地区的地表气候和大气循环变化有关。约11年的太阳周期中TSI的波动相对较小, 波动会带来区域性效应, 将这种区域性效应放大的机制涉及到大气上下层之间或海洋表面温度和大气之间的动态相互作用, 但对全球平均气温影响较小(见文框10.2)。

最后, 几年前出现的太阳活动最低期里太阳活动的减少, 引发对未来它对气候有何影响的问题(常见问题5.1, 图1b)。尽管对未来的太阳活动有一些不确定性, 但是可以肯定, 相对于人为因素对气候变化的影响, 太阳在最高活动期和最低活动期范围内对气候的影响要小得多。



常见问题5.1, 图1 | 1870年至2010年全球表面温度距平, 以及影响它们的自然(太阳、火山及内部)和人为因素。(a)全球表面温度记录(1870-2010), 相对于1961年至1990年的全球表面平均温度(黑线)。全球表面温度变化模式(a:红线), 利用自然因素(b, c, d)和人为因素(e)气温影响之和制作。(b)估测温度对太阳强迫的响应。(c)估测温度对火山喷发的响应。(d)估测由于内部变率所发生的气温变化, 这里与厄尔尼诺-南方涛动现象相关。(e)估测温度对人为强迫的响应, 包括来自温室气体的增温成分和来自大多数气溶胶的降温成分。

常见问题

常见问题5.2 | 目前的海平面变动率有多不同寻常？

在过去的两千年里，全球海平面平均变动率在整个20世纪(平均每年 $1.7\pm 0.2\text{mm}$)和1993年以来(介于每年2.8和3.6mm之间(第13章))在世纪尺度变动的背景下是不同寻常的。然而，在过去冰盖迅速解体的时期里，海平面变动率的波动更为迅猛，例如，在冰川期和间冰期的过渡阶段。异常的地壳运动也可以引发局部海平面的快速变化，甚至超越了目前全球变动率。

‘海平面’普遍被认为是海洋与陆地的交会点，地球科学家将海平面定义为相对陆地而言测量海洋表面位置的标准，两者都可能相对地球中心发生运动。因此，海平面测量标准反映了地球物理学因素与气候因素的结合。地球物理学因素对海平面的影响包括陆地的沉降与隆起以及冰川均衡调整，这是地球-海洋系统对地球上物质分布(尤其是海水和陆地冰)变动的响应。

气候影响包括引起海水扩张和紧缩的海洋温度变化，还包括冰川和冰盖体积变化以及洋流变动。这些气候和地球物理学因素中的局地性和区域改变使海平面变动率相对全球预估的平均变动率有明显的偏差。例如，瑞典北部沿海(波的尼亚湾)的局地海平面正以近乎每年10mm的变动率下降，这是由于上个冰川时期后陆地冰融化造成了持续抬升。相比之下，1960年至2005年曼谷南部的局地海平面以每年~20mm的变动率上升，主要为响应由于提取地下水造成的地面沉降。

在过去的~150年里，潮位站对海平面的变化进行了记录，而且在过去的~20年里，卫星测高仪也加入了这个行列。这两组数据集的结果在重叠时期是一致的。在20世纪，全球海平面平均变动率为每年~ $1.7\pm 0.2\text{mm}$ ，大约是过去20年的两倍。它同全球范围内数量级更高的波浪和潮汐振荡比较，可能会显得很小。尽管如此，如果这种变动率在长时间内持续，它的量级就会对人口众多且低洼的沿海地区起到重要影响，海平面的轻微上涨就可能淹没大片的陆地。

在器测时期之前，局地海平面变动率都是根据沉淀物、化石以及考古档案记录的间接测量估算的。这些替代记录都具有空间局限性，反映了局地和全球的状况。然而，当一个个出自极其不同的环境背景的替代记录汇聚到一个通用信号上时，全球信号的重构就得到了加强。需要重点注意的是，地质档案，尤其是关于约2万年前的，通常只捕获海平面在千年尺度上的变化。对世纪尺度上海平面变动的预估因此是基于千年尺度的信息，但是必须认识到的是，这样的资料并不必排除世纪尺度上更快的海平面变动率。

对过去2000年的海平面重构为使用替代记录提供了机会，以便与器测时期重叠并有所延伸。最近的一个实例来自美国大西洋沿岸的盐沼沉淀物，并结合了基于潮位站数据和模拟预测的海平面重构，以记录19世纪末以来每年 $2.1\pm 0.2\text{mm}$ 的海平面平均变动率。在同一个海岸部分，这个一整世纪的上升超过了整个2000年中任何其他世纪尺度的变动率。

在更长的时间尺度上，有时会遇到更高得多的海平面变动率和振幅。过去50万年里的冰川期-间冰期气候周期导致全球海平面变动了约120米至140米。这类海平面变动大多发生在由全冰期转变为间冰期的1万年到1万5千年间，平均每年上升10-15毫米。这些高变动率仅在地球上出现极端冰河气候时存在，也就是当大冰盖与海洋相接的时候。例如，在最后一个冰川极盛期(约21000年前)转向目前的间冰期(全新世，过去的11650年)期间，珊瑚礁化石沉淀物表明全球海平面在不到500年里暴涨了14-18米。这就是著名的“融水脉冲1A”事件，期间海平面上升的速度超过了每年40毫米。

这些更长时间尺度的实例表明，海平面变化速率高于今天我们所观测到的，但是应该记住的是，它们都发生在特定的条件下：处于从全冰河期到间冰河期转变的时期，长期处于受到这些转变出现影响的地区；位

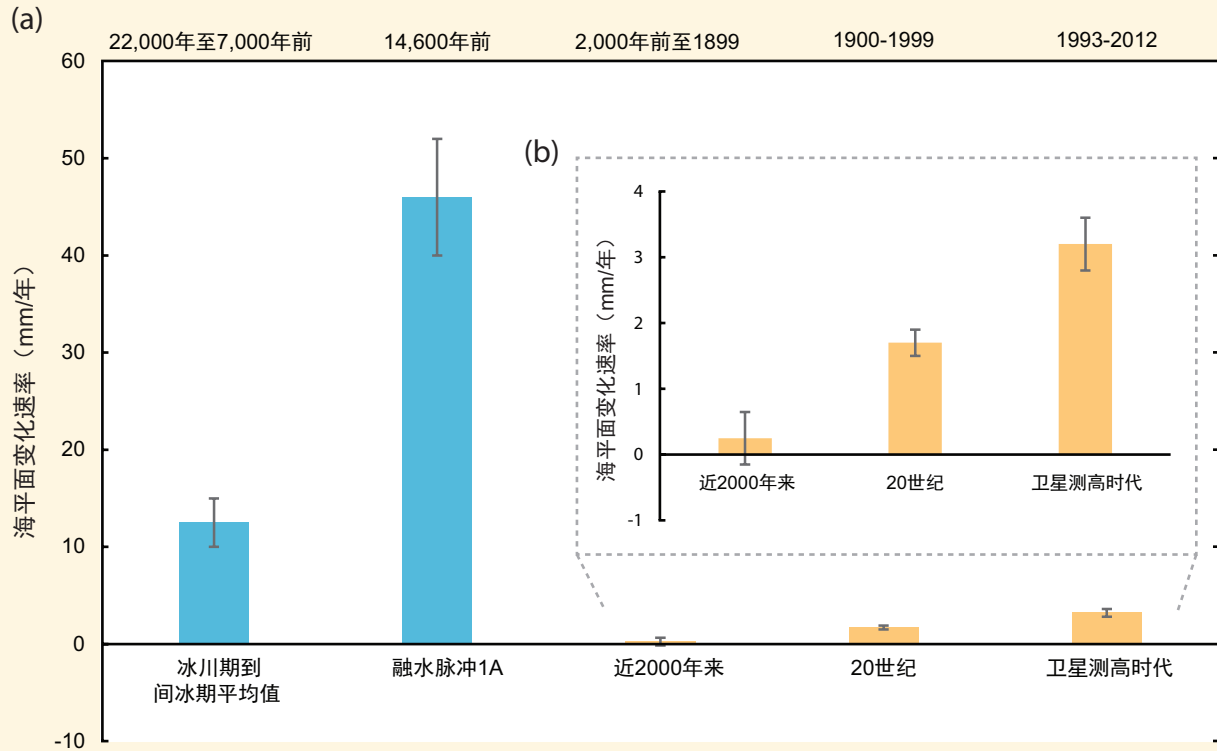
(接下页)

常见问题

常见问题5.2 (续)

于主要的地质构造巨变或是主要的三角洲地区，这些地方常有地表下沉，是由于沉积物压实作用造成的，有时会因为提取地下水而加深下沉情况。

目前全球平均海平面变动率与过去2000年中观测或估算出的变动率相比有着不同寻常之处，这一结论得到了仪器和地质记录的支持。更快的变动率已在地质记录里发现，尤其是在从冰期到间冰期的过渡期间。



常见问题5.2, 图1 | (a)在选取的五个阶段中对全球平均海平面变动率(mm/年)的估值：上次冰川期到间冰期的过渡；融水脉冲1A；近2000年来；20世纪；卫星测高时代（1993-2012）。蓝色柱形条表示从冰川期到间冰期过渡的时间间隔，而橘色柱形条表示目前的间冰期。黑色线条表示全球平均海平面变动率可能值的范围。请注意，冰川期到间冰期过渡中全球平均海平面变动率整体提高的特点。(b)目前间冰期三段间隔的全球平均海平面变动率的扩展图。

常见问题

常见问题6.1 | 因永冻土的融化和海洋变暖导致的甲烷和二氧化碳迅速释放，是否会从根本上促进变暖？

永冻土指主要分布于北极圈高纬度地区、富含古代有机碳沉积物的永久冻土，包括北冰洋浅海大陆架上的海底永冻土。一些永冻土源于末次冰期的残余，其中碳的含量至少是目前大气中二氧化碳(CO₂)中碳含量的二倍。假如其中相当一部分碳以甲烷和二氧化碳的形式释放到大气中，将促使大气浓度提升，进而导致气温升高。这将造成更多甲烷和二氧化碳的释放，形成正反馈，进而加剧全球变暖。

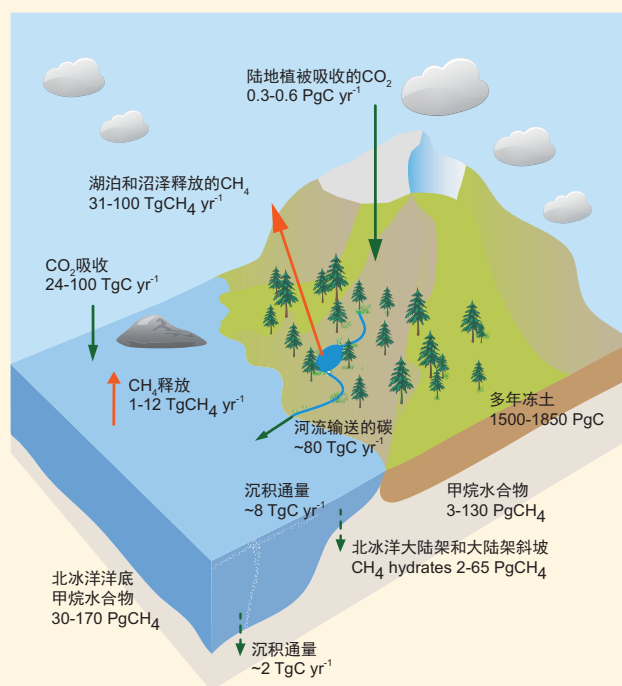
目前，北极是二氧化碳的净碳汇区，其植被吸收碳量约达0.4±0.4PgC/年，约占全球陆地碳汇量的10%。北极也是甲烷(CH₄)的稳定来源区：季节性解冻湿地的甲烷释放量在15至50Tg(CH₄)/年之间浮动，相当于同期全球湿地甲烷源的10%。目前尚无明确证据表明，永冻土的融化是造成这两种温室气体在大气中剧增的元凶。然而，模拟研究和专家中的一致性的判定均指出：在北冰洋持续变暖的条件下，到2100年，将可能有高达350PgC二氧化碳当量的温室气体合并排放到大气中。

大陆和海洋大陆架的永冻层土壤中都蕴含大量有机碳库，必须经过解冻和微生物分解的过程，才能大多以二氧化碳的形式释放出来。在水浸土壤等氧气不足的土壤中，某些微生物也可生成甲烷。

大陆永冻土的表面覆盖着“活土层”。活土层夏季融化，构成冻原生态系统的组成部分。假如春夏气温平均值升高，活土层将不断增厚，更多有机碳将被微生物分解。然而，夏季温度升高也能增加北极植被通过光合作用对二氧化碳的吸收。由此可见，在北极，增加了的碳吸收量和释放量之间的净碳平衡是一种微妙的平衡。

夏季融化期的水文条件同样重要。地下冰的大量过度融化也可能产生积水，形成河流湖泊，那里的缺氧环境将诱发甲烷生成。在气候变暖的条件下，北极地貌的复杂性意味着，我们对这些不同进程哪个可能会在区域尺度上占主导地位具有低信度。热量扩散和永冻土融化需要时间 - 实际上，深层北极永冻土可视为末次冰期的残余，它至今仍在缓慢腐蚀 - 因此，永冻土土壤碳的大规模流失仍需要经过漫长的时间历程。

在氧气充足的条件下，有机物在土壤中的分解，加之微生物释放的热量(类似堆肥)，可能在夏季进一步促进永冻土融化。根据永冻土中碳和冰的含量以及水文状况，在温度升高时，这种机制可能在当地触发相对快速的永冻土降解。(接下页)



常见问题6.1, 图1 | 北极地区当前主要碳库和碳流简图，包括陆地永冻土、大陆架永冻土和海洋永冻土。(根据McGuire等人，2009；和Tarnocai等人，2009。)TgC=10¹²gC以及PgC=10¹⁵gC。

常见问题

常见问题6.1(续)

对冻土动力学和温室气体排放的模拟研究表明，碳循环正反馈是个历经数百年、相对迟缓的过程。到2100年，以二氧化碳形式释放的碳总量将高达250PgC，以甲烷形式释放的碳总量将高达5Pg。鉴于甲烷的温室效应更强，这相当于100PgC的二氧化碳当量将在2100年前释放出来。这一数据在量级上与其他生地化反馈接近，例如，全球变暖从陆地土壤多排放出的二氧化碳。然而，目前的模拟研究尚未完全涵盖永冻土融化时北极演变过程的全面复杂性，例如湖泊和池塘的形成。

甲烷水合物是冰冻碳的另一种形式，存在于永冻土土壤、海洋大陆架、陆架坡和深海底沉积物中。甲烷水合物由甲烷和水分子团簇组成，只有在极其特定的低温高压环境下才能保持稳定。在陆地和海洋中，源自于海洋或陆地生物碳的此类水合物大多由于缺氧被分解，并在适当的温度-压力条件下，受困于水环境中。

永冻土土壤、海水和沉积物的升温，及 / 或压力的变化，都可能破坏这些水合物的稳定性，使其中的甲烷释放到海洋中。突发的大规模甲烷释放也可能使部分甲烷进入大气。世界上的水合物储量丰富，仅在北极地区，以水合物形式储藏的甲烷量可能是目前全球大气中甲烷含量的十倍以上。

和永冻土融化一样，水合物在陆地的释放也是个缓慢的过程，需历经几十年至数百年的时间。深海地区和海底沉积物将需要更长时间 - 经过几百年乃至上千年才能达到破坏内部水合物稳定性所需的温度。此外，深海释放出的甲烷需要到达海平面、进入大气，才能影响气候，而大部分甲烷在此之前可能已经被微生物吸收。只有在东西伯利亚以北的北冰洋等地区的浅海大陆架中的水合物释放出的甲烷，才能真正进入大气，对气候造成影响。

近期的几项研究表明，从北冰洋西伯利亚大陆架和西伯利亚湖泊中释放了大量甲烷，这对局地有重要意义。这些分解的有机碳或者稳定性遭到破坏的水合物产生多少甲烷尚不得而知。目前也没有证据证实，这些甲烷究竟是由近期区域气候变暖所引发，还是一直存在。或许从未次冰期至今，甲烷泄漏一直存在。无论如何，这些甲烷源在全球甲烷收支量中所占的比例不大，只有不到5%。通过对大气中甲烷浓度的监测，也证实了北极地区的甲烷量没有实质性的上升。

然而，模拟研究和专家评估都表明，北极气候变暖将促进甲烷和二氧化碳的释放，并将因此形成气候的正反馈。这种反馈在几百年间都将温和无害，在量级上接近其他陆地生态系统的气候反馈。然而，在数千年或更久以后，由于涉及大型碳库和甲烷水合物藏，从永冻土、大陆架和陆架坡中释放的二氧化碳和甲烷则变得尤为重要。

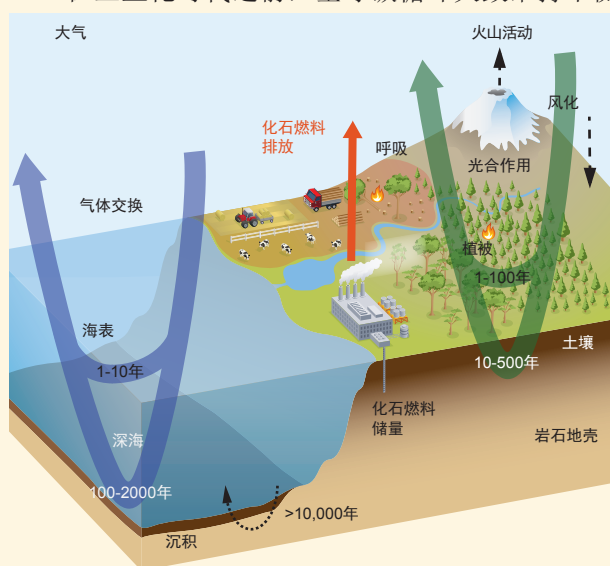
常见问题

常见问题6.2 | 二氧化碳释放到大气中后，会发生什么？

二氧化碳(CO₂)释放到大气中后，首先在大气、海洋上层和植被间迅速散发。随后，碳继续在全球碳循环内不同的储存库(如土壤、深海和岩石)中迁移。其中一些交换过程非常迟缓。依据释放的二氧化碳量，经过长达两千年后，仍有15%至40%的二氧化碳存留于大气中。此后，大气层、陆地生物圈和海洋将建立新的平衡。地质作用重新分配碳在地质储存库中的储量，则需经过数万到数十万年、甚至更长的时间。因此，过高的二氧化碳浓度以及目前排放造成的相关气候影响会在未来持续很长一段时间。

二氧化碳基本上属于惰性气体，可在不到一年的时间内快速混入整个对流层。不同于可在大气中通过汇效应被去除和分解的活性化合物(如甲烷)，碳在全球碳循环内不同的储存库中进行重新分配，经过漫长的时间历程后，最终通过再循环回到大气中。常见问题6.2，图1为全球碳循环简图。其中，开放箭头表示碳原子在不同储存库中迁移的典型时间表。

在工业化时代之前，全球碳循环大致维持平衡。通过冰芯检测可推断出，在工业化时代之前的几千年里，大气中的二氧化碳浓度一直近乎平衡。然而，



常见问题6.2，图1 | 全球碳循环简图，显示通过主要储存库碳转移的典型周转时间尺度。

人类向大气中排放二氧化碳打破了这种平衡。随着全球二氧化碳浓度的提高，二氧化碳和海洋表层以及植被之间的交换作用发生了转换，随之而来的，陆地、海洋和地壳的碳储存库之间及其内部的交换作用也发生了转换。通过这种方式，全球碳循环对新增碳进行再分配，直到不同碳储存库之间的交换接近新的平衡。

在海洋上空，二氧化碳分子通过气体交换穿越海气界面。二氧化碳和海水中的水分子相互作用形成碳酸，碳酸能迅速和海洋中庞大储存库内分解的无机碳 - 重碳酸盐和碳酸盐离子发生反应。洋流和高密度海水的形成，将碳从海平面输送到深海水层。海洋生物圈也能实现碳的再分配。栖息于表层水域的海洋生物长有有机组织和钙质壳，它们会在海洋生物死后沉入深海，经过溶解和微生物分解，又回到溶解的无机碳储存库。其中一小部分会抵达海底，沉入海底沉积物之中。

人为造成的额外碳排放能够提高大气中二氧化碳的分压，进而提升二氧化碳分子的海气交换作用。在海平面，碳酸盐化合物快速吸收了多余的二氧化碳。结果，浅海表层水域在一年或两年内就能和大气达到碳平衡。碳从海洋表面迁移到中等深度、再到深海，需要更长时间，从几十年到几百年不等。经过更加漫长的时间后，外来的二氧化碳分解了海底的碳酸盐沉积物，进一步提高了海洋的碳吸收量。然而，目前已知，除非海洋环流发生重大变化，浮游生物的生长会大致保持不变，因为其主要受到养分和光照等环境因素的影响。没有无机碳的存在，浮游生物在增强海洋碳吸收量和捕捉人为排放的二氧化碳方面起不到显著作用。(接下一页)

常见问题

常见问题6.2(续)

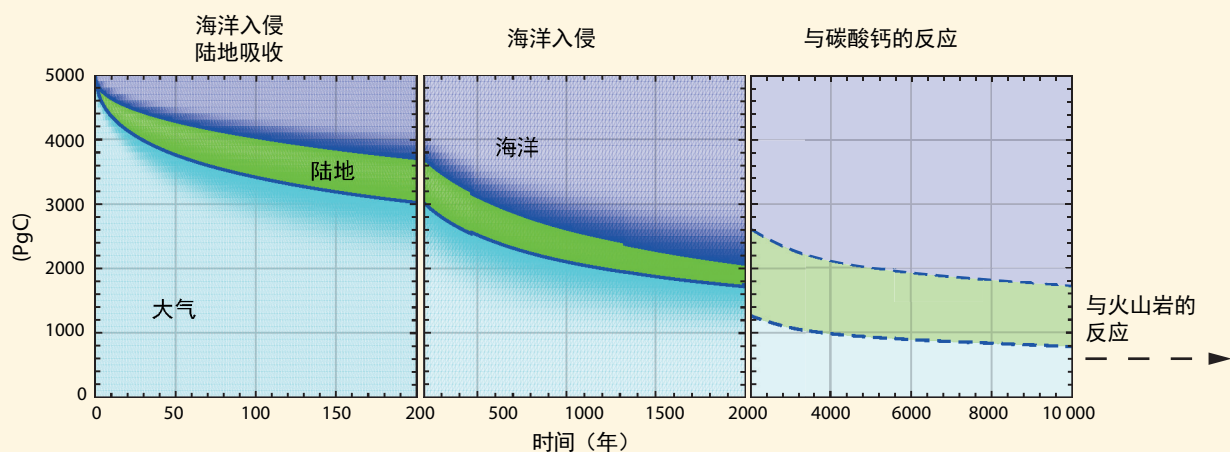
在陆地上，植物通过光合作用吸收二氧化碳，并将其转化为有机物。其中一小部分碳立即以二氧化碳的形式通过植物的呼吸作用回到大气中。植物利用剩余的二氧化碳促进生长。枯死的植物体融入土壤，最终被微生物分解，然后以二氧化碳的形式被吸回到大气中。此外，植物和土壤中的碳也可通过燃烧、昆虫、食草动物和植物的收割及随后被牲畜或人类所消耗的方式转化为二氧化碳。一些有机碳进而会随着河流进入海洋。

大气中二氧化碳的增加促进了光合作用，因此提高了碳吸收量。另外，在干旱地区，二氧化碳浓度的升高也可帮助植物更加有效地利用地下水。这也相应提高了植物和土壤的生物量，因此在陆地上形成了碳汇。不过，其他一些因素也对碳汇的形成规模起关键作用，如是否具备水分和养分。

耦合碳循环气候模拟表明，当气候变暖形成气候正反馈时，陆地和海洋对碳的吸收能力降低。这种效应由多个不同因素造成。例如，海水变暖，二氧化碳溶解度降低，于是碳的化学反应发生改变，从而导致海洋对大气中过量二氧化碳的吸收量下降；陆地气温升高，延长了温带和高纬度地区的生长季，但也加快了土壤碳的呼吸进程。

通过分配达到新的碳平衡所需的时间，取决于不同储存库之间碳迁移的次数以及漫长的时间作用。碳的交换需历经数千年，开始于“快速形成”的碳储存库，如大气、海平面、陆地植被和土壤。经过更加漫长的时间后，缓慢的次生地质作用变得重要起来，如碳酸盐沉积物的溶解和沉积物进入地壳。

常见问题6.2，图2描述了大量额外的二氧化碳(5000PgC，约等于从工业化时代开始至今释放出的二氧化碳总量的十倍)排放到大气中的书案件，以及经过一段时间后，二氧化碳在陆地和海洋中进行的再分配。在前200年中，海洋和陆地吸收的碳总量大致相同。经过更长的时间后，海洋吸收成为主导，因为与陆地(~4000PgC)和大气(工业化时代之前为589PgC)相比，海洋拥有更大的碳储存库(~38,000PgC)。海洋化学作用决定了初期碳输入量的重要性，排放量越高，意味着存留在大气中的二氧化碳量越大。2000年后，初期排放的二氧化碳仍会有15%到40%留存在大气中。通过碳酸盐沉积物的溶解以及与火成岩发生反应，例如碳酸盐风化和沉积物埋藏，二氧化碳含量会进一步减少，这个过程需要数万年、数十万年、甚至更长的时间。



常见问题6.2,图2 | 从时间零点起，5000PgC过量二氧化碳排放到大气中的衰减，及其后随着时间变化二氧化碳在陆地和海洋中的再分配(根据耦合碳循环气候模拟计算)。色带的大小代表各个储存库的碳吸收量。其中，前两个小图表示一项模拟比计划(Joos等人，2013)的多重模拟方式，最后一个小图表示通过中等复杂地球系统模式计算得出的碳长期再分配，含海洋碳酸盐沉积物溶解(根据Archer等人，2009b)。

常见问题

常见问题7.1 | 云是如何影响气候和气候变化的？

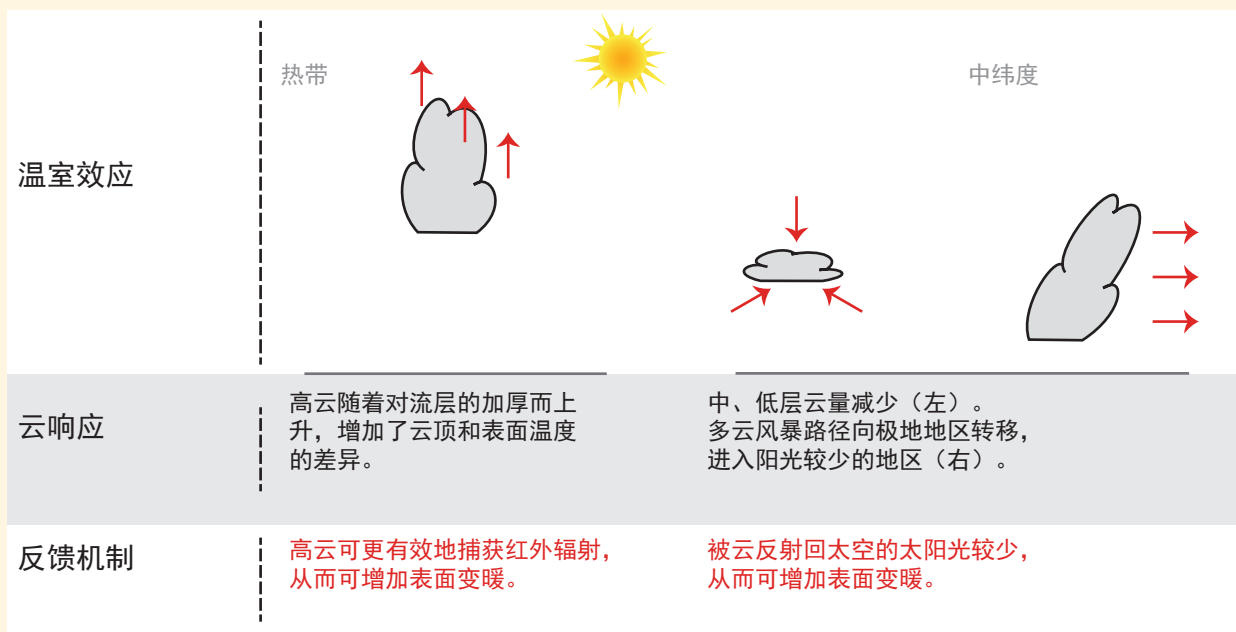
云对当前的气候影响很大，但仅凭观测无法预测云对未来变暖了的气候产生的影响。对云量变化的综合预测需要一个全球气候模式，此类模式可以大致重现观测云团的情况，但仍会存在重大误差和不确定性。云在变暖的气候条件下将如何变化，不同的气候模拟得出的估测也不相同。从现有的全部证据来看，净云-气候反馈似乎可加剧全球变暖。如果确实如此，其加剧的强度尚不明确。

自20世纪70年代以来，科学家们已经认识到云在气候系统和气候变化中起着关键作用。云以多种多样的方式影响着气候系统。云形成降水(如降雨和降雪)，为陆地上大部分生命提供必不可少的生存条件。水汽凝结形成云，使大气升温。尽管一部分凝结的水会重新蒸发，降水到达地表的过程中即可使空气温度上升。云对穿过大气的太阳光(使地球升温)和红外线(向太空辐射，使地球降温)的照射量，均可产生重要影响。最后，云内的强上升气流可快速把地表附近的空气输送至高空。上升气流可输送能量、水分、动量、微量气体和气溶胶粒子。数十年来，气候科学家们一直采用观测和模拟两种手段来研究云是如何随着每日天气、季节周期，以及逐年出现的气候变化(如与厄尔尼诺相关的现象)而发生改变的。

云在整个形成过程中都可能随气候状态的变化而改变，云反馈与气候变化非常相关。气候变化导致云在形成过程中发生的任何变化又反过来影响气候，体现了云与气候之间相互的作用和反应。由于云与太阳光和红外线均可发生剧烈的相互作用，云量的细微变化可对气候系统产生重大影响。

云-气候反馈可分为多种类型，包括云量变化、云顶高度以及/或者云反射率的变化(见常见问题7.1，图1)。文献一致表明，高云可通过与大气和地表释放的红外线相互作用加剧全球变暖。然而，从总体来看，与低云有关的反馈以及与云量和反射率有关的云反馈方面还存在着更多的不确定性。

厚高云能有效反射太阳光；薄、厚高云均可大幅降低大气和地表向太空中释放的红外线量。这两种作用的相互补偿使地表气温在高云量与低云量发生变化的两种情况中，更易受后者的影响。(接下页)



常见问题7.1，图1 | 重要云反馈机制示意图。

常见问题

常见问题7.1(续)

假如云发生系统性转变，从厚高云变成薄卷云，或反之亦然，该补偿则可能受到干扰。尽管目前尚无证据支撑，但仍然无法排除这种可能性。另一方面，高云（云量一定）高度的变化也可对地表气温产生重大影响。高云高度的上升可减少地表和大气向太空中释放的红外线量，但对被反射的太阳光作用甚微。有确凿证据表明在气候变暖时会发生这样的转变，大气和地表释放入太空的一部分额外红外线滞留在气候系统中，因此导致全球变暖加剧。

低云可将大量太阳光反射回太空，然而，在给定的大气和地表状态下，低云对地球向太空释放的红外线作用甚微。因此，低云对当前的气候具有净降温效应；中云也具有一定的相同作用，但程度上要低一些。未来温室气体增加会导致气候变暖，大多数经过IPCC评估过的气候模式模拟表明，低云量和中云量的减少会增加对太阳光的吸收，因此有可能使气候进一步变暖。然而，云量减少的程度目前仍需依模式而定。

在气候变暖后，云还可能其他的变化方式。风的型态和风暴路径的变化可影响云量和降水的区域和季节形态。一些研究表明，在气候模拟中发现的一个该趋势的信号 - 云随中纬度风暴路径的极向迁移 - 已在观测记录中有迹可寻。将云迁移至光照较少的地区，也可能加剧全球变暖。和含有等量且体积较大的冰晶的云相比，更多的云可能由体积小、数量多的水滴构成，可将更多的太阳光反射回太空。薄卷云可产生净暖化效应，难以对其进行气候模拟。尽管缺乏证据，但薄卷云确实存在着尚无法模拟的其他变化方式。云与气候之间其他的作用过程可能具有区域性的重要意义，例如，在海冰融化的海洋上空和植物蒸腾作用减少的陆地上空，云和地表的相互作用也可发生变化。

通过对云的长期或短期的变化情况及趋势的观测来对全球云反馈进行推测的做法目前尚未得到广泛接受。虽然如此，用于当前评估（以及先前的两项IPCC评估）的全部模式均生成净云反馈，它不是加剧了人类活动导致的温室增温，就是总体影响并不显著。反馈并不是被“置于”模式中，而是在模拟的大气条件下，在云的运动及其对气候系统中能量流动和转化产生影响的过程中自然显现出来的。不同的模式对温室气体浓度变化敏感程度的差异主要是由模式产生的云反馈强度的差异导致的。

常见问题

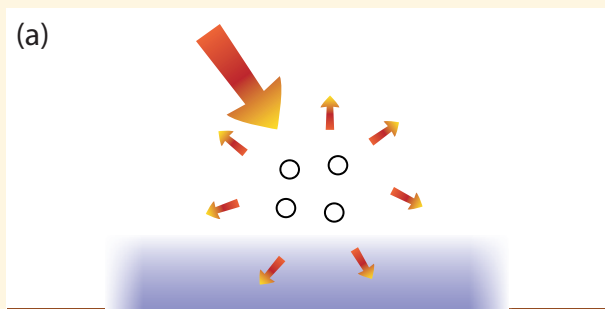
常见问题7.2 | 气溶胶是如何影响气候和气候变化的？

大气气溶胶由大气中悬浮的体积较小的液体或固体粒子构成，而非较大的云滴及雨滴粒子。来源于自然和人为排放的大气气溶胶，通过与辐射和云的相互作用，能以多种复杂的方式影响气候。总体而言，模拟和观测表明自工业化时代前以来，人为排放的气溶胶对地球起到了降温作用。这掩盖了某些因温室气体造成的全球平均气温升高，因为它们可能会在没有气溶胶排放的情况下发生。为响应空气质量政策，预计人为排放的气溶胶将会减少，最终会除去这种变暖的面具。

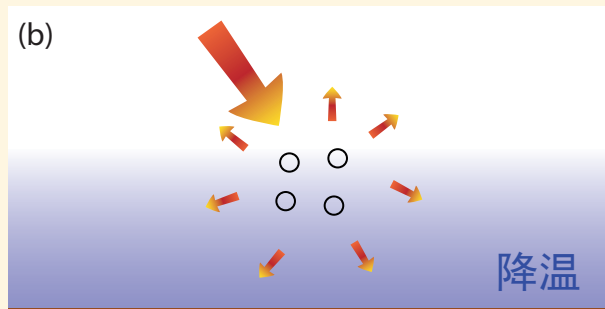
大气气溶胶在对流层中的生命期一般为一天到两周，在平流层中约为一年；各类气溶胶体积、化学成分和形态迥异。一些气溶胶，如灰尘和海沫，大部分或全部自然产生；而其他气溶胶，如硫酸盐和烟雾，则同时来自于自然和人为排放。气溶胶能以多种方式影响气候。首先，通过散射和吸收太阳光来改变地球的辐射平衡(见常见问题7.2，图1)。气溶胶的散射作用总体上能增强地球的辐射能力，从而带来降温；而气溶胶的吸收作用正好相反，会使气候系统升温。降温和升温之间的平衡取决于气溶胶的特性和环境条件。许多观测研究对由局地人为排放和自然排放所产生的气溶胶的辐射效应进行了量化分析，但其对全球的整体影响还要依靠卫星资料和模式。诸多持续存在的不确定因素之一来自于黑碳，一种吸收性气溶胶。黑碳不仅与散射性气溶胶相比更难测量，还能引起一种复杂的云团变化。尽管如此，大多数研究一致认为，人为排放气溶胶的总体辐射效应可使地球降温。(接下页)

气溶胶-辐射相互作用

散射型气溶胶：

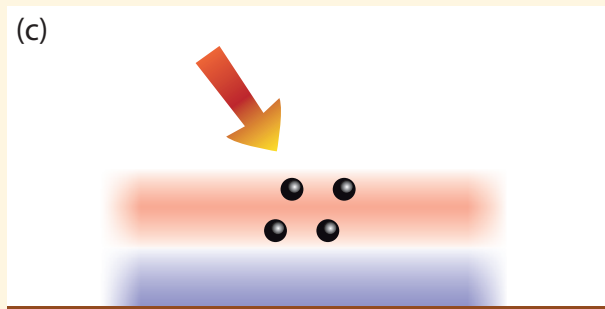


气溶胶可散射太阳辐射，致使达到表面的太阳辐射有所减少，从而导致局地降温。

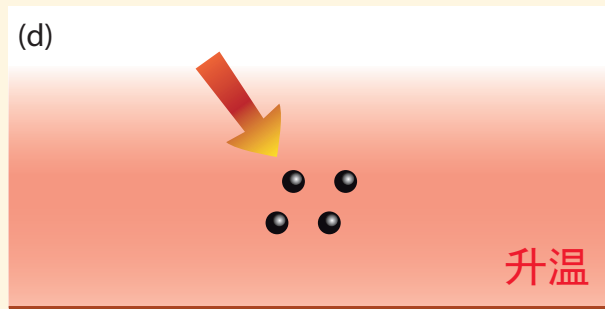


大气环流和混合过程使得区域和垂直方向变冷。

吸收型气溶胶



气溶胶可吸收太阳辐射。这使得气溶胶层变暖，而表面吸收的太阳辐射则有所减少，可致使局地降温。



在较大尺度上，表面和大气存在净变暖，因为大气环流和混合过程可重新分配热能量。

常见问题7.2，图1 | 气溶胶与太阳辐射相互作用以及对气候产生影响的概况。左图显示气溶胶的即时辐射效应，右图则显示在气候系统响应了气溶胶的辐射效应后的总体影响。

常见问题

常见问题7.2(续)

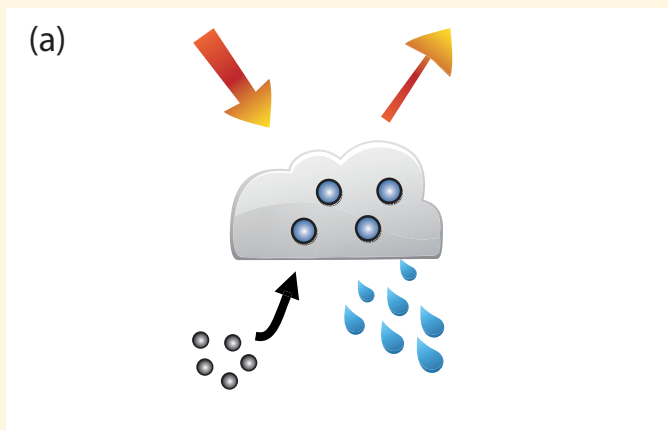
同时气溶胶作为凝结和冰核形成的场所，其上方可形成云滴和冰粒（见常见问题7.2,图2）。气溶胶粒子越多，越能使包含液体水滴的云产生更多微小的水滴，导致云反射更多的太阳辐射。不仅如此，气溶胶-云相互作用还有很多其他的途径，尤其是在冰-混合液体和冰-云的形式中二者进行相互作用时，液体和冰水之间的相变对气溶胶浓度和属性十分敏感。起初有观点认为增加气溶胶浓度也会带来低云量的增加，但是由于多种抵消作用的存在，这一观点受到了挑战。所以，可以理解，对气溶胶施加给云量及其属性的总体影响进行量化存在一定难度。通过气候模拟和卫星观测进行的现有研究表明，总体上人为排放的气溶胶对云产生的净效应可使气候系统降温。

由于气溶胶在大气中分布不均匀，会为气候系统带来升温和降温，从而导致天气变化。目前还难以用当前的模式对这类复杂的效应进行模拟，不过数项研究表明，气溶胶可对特定地区的降水产生显著影响。

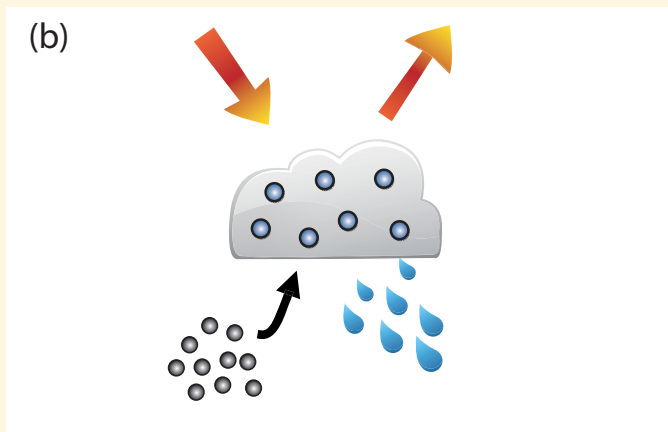
由于气溶胶的生命期较短，其总量和其对气候的影响随时间的变化而改变，大致与人为排放的气溶胶及其气态前体物（如二氧化硫（SO₂））和一些挥发性的有机化合物的排放量保持一致。在工业化时期，人为排放的气溶胶有了大幅度的增加，在一定程度上抵消了因充分混合的温室气体浓度升高而本应导致的气候变暖。源于大规模火山（如埃尔奇琼火山和皮纳图博火山）喷发的气溶胶进入平流层，也导致了一般长达一年或两年的降温期。

在过去二十年中，一些发达国家人为排放的气溶胶有所下降，而在许多发展中国家则有所上升。因此，在这一特定时期，气溶胶对全球表面平均气温的影响不大。然而可以预见，为响应空气质量政策，人为排放的气溶胶最终会减少，进而将抑制气溶胶对地表的降温作用，从而导致气候进一步变暖。

气溶胶-云相互作用



气溶胶可作为液态水滴形成其上的云凝结核。



气溶胶数量越多，则较小水滴的浓度越大，云的亮度越高。然而，可能还有许多其它气溶胶-云-降水过程会放大或抑制这种效应。

常见问题7.2, 图2 | 气溶胶-云相互作用及二者对气候影响的概况。(a)和(b)两图分别代表洁净的和受到污染的低云。

常见问题

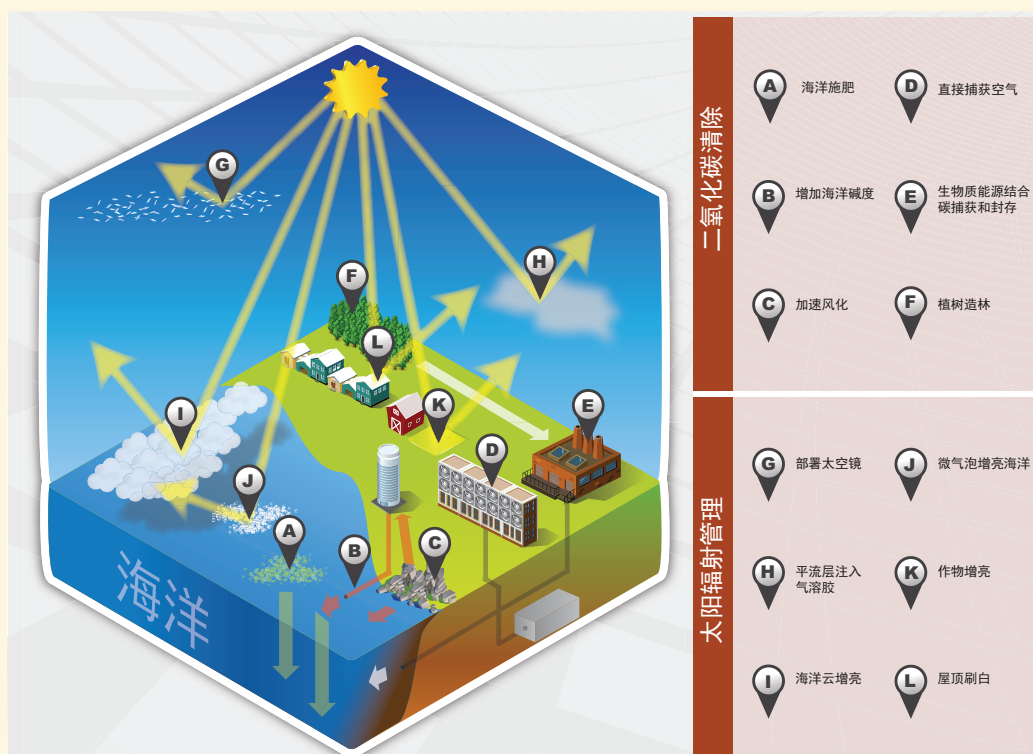
常见问题7.3 | 地球工程能否抵消气候变化并会产生哪些副作用？

地球工程，又称气候工程，其定义是利用一整套旨在刻意改变气候系统的方法和技术，以便减轻气候变化的影响。通常考虑使用的地球工程方法有两大类：太阳辐射管理(SRM，见7.7节的分析)和二氧化碳消除(CDR，见6.5节的分析)。前者旨在通过增强地球反射能力来抵消因人类活动产生的温室气体带来的升温；后者旨在降低大气中二氧化碳的浓度。这两种方法的物理原理和时间尺度均有所不同。模拟显示如果SRM可行，则会有效应对升温，并对其他气候变化产生些许作用，尽管效果尚不显著。SRM无法抵消气候变化带来的所有影响，同时所有现有的地球工程方法都存在着风险和负面作用。由于对SRM和CDR的科学认知水平较低，人们尚无法预见二者可能会引发的其他后果。地球工程还涉及许多其他超出了此报告研究范围的问题(如政治、伦理、实践)。

二氧化碳消除法

CDR法旨在通过有计划地改变碳循环过程或采取工业(如，化学)手段，将二氧化碳从大气中清除。从大气中清离的碳将会储藏在陆地、海洋或地质储层中。一些方法依靠的是生物进程，如大规模植树造林或植树还林、生物碳土壤碳捕获、生物能源结合碳捕获和封存(BECCS)、以及海洋施肥。还有一些方法依靠的是地质过程，如加快陆地或海洋中硅酸盐岩石和碳酸盐岩石的蚀化(见常见问题7.3，图1)。大气中移除的二氧化碳将继续以有机形式储存于陆地储层中，或以无机形式储存于海洋储层及地质储层中，储存时间至少长达几百年才可以实现CDR的有效发挥。

(接下页)



常见问题7.3，图1 | 部分拟议的地球工程方法概况。二氧化碳消除法（详见6.5节）：(A)向海洋中添加养分（海洋施肥），提升海洋表层生产率，且向海洋下方运送少量随之产生的生物碳；(B)向海洋中添加从固体矿产中提取的碱，使更多大气中的二氧化碳溶于海洋；(C)硅酸盐岩石侵蚀率上升，溶解的碳质矿物流向海洋；(D)以化学方式获取大气中的二氧化碳，储存于地下或海洋中；(E)发电厂利用碳捕获燃烧生物质，捕获的二氧化碳储存于地下或海洋中；(F)通过植树造林和植树还林进行二氧化碳捕获，储存于陆地生态系统中；太阳辐射管理法（详见7.7节）：(G)在太空中放置反射器反射太阳辐射；(H)向平流层中注入气溶胶；(I)为增强反射率而播种海洋云；(J)为增强反射率而在海洋表层制造微气泡；(K)种植更多反光作物；(L)将屋顶和其他建筑结构刷成白色。

常见问题

常见问题7.3(续)

CDR法可有效地从大气中移除二氧化碳且使碳与大气分离，因此降低二氧化碳的辐射强迫。一些方法也可减轻海洋酸化（见常见问题3.2），但是另外一些涉及海洋储存的方法是将碳以溶解的二氧化碳的形式进行封存，这样反而会增强海洋酸化。CDR法是否有效的一个主要不确定性是移除碳的储存能力和时效期。长远来看，借助这种方法，可以将碳永久地移除并储存，从而减缓气候变暖。然而，非持久的储存策略将会使二氧化碳重返大气层，导致再次升温。如果大气中二氧化碳的浓度降低，通过此方法有计划地移除二氧化碳所产生的效果将会因海洋和陆地碳储层的关系有所抵消。这是因为一些海洋及陆地碳储层将向大气中释放之前储存的人类活动所产生的二氧化碳。为完全抵消过去人类活动所导致的二氧化碳排放，此技术不仅要移除前工业化时代积累在大气中的二氧化碳，还要移除早期地球大气生物层及海洋所吸收的由人类活动产生的碳。

具有生物和最具化学侵蚀作用的CDR法不能被无限扩大使用，而且CDR法必然会受到诸如对土地的竞争需求等各种物理环境因素的制约。假设各种CDR法的综合封存率最大值为每个世纪200PgC，那么利用此法去除近50年排放的二氧化碳要用上大约150年，所以即使是利用一整套系统完整的二氧化碳消除方法也很难迅速地缓解气候变化。直接捕获空气法原则上可以更加快速地去掉二氧化碳，但大规模的启用会受到包括能源利用和环境等因素的制约。

CDR也可能对气候和环境产生副作用。例如，植被种植的增加会增加二氧化氮的排放量，二氧化氮是一种比二氧化碳温室效应更强的气体。再如，通过植树造林或能源作物的种植来大面积增加植被覆盖，会改变地表反射率和湍流通量等地表特性。一些模拟研究表明：事实上，在季节性积雪的北部地区植树造林可加速全球变暖；反之，在热带植树造林对于减缓全球变暖更加有效。基于海洋的CDR法依赖生物生产（如海洋施肥），这样可能会对海洋生态系统，海洋酸度产生大量的副作用，并产生非二氧化碳温室气体的排放。

太阳辐射管理法

地球大气层以及地表的太阳光吸收量对全球平均表面温度有着巨大影响，并可使地球变暖，由于温室效应的存在，通过这一过程，温室气体和云影响能量最终反射回太空的方式。在新的平衡达成前，温室效应作用的持续增强会导致表面温度的不断提高。如果由于增加了地球的反射率而减少了太阳光的吸收量，或是由于温室效应的作用减弱而使能量更有效地排放到空间，那么全球平均表面温度将会降低。

拟议的地球工程法就基于这一基本的物理原理，旨在控制地球能量流动的收支。大多数这类方法建议要么减少到达地球的阳光，要么通过大气、云或使地表更亮（常见问题7.3，图1）来提高地球的反射率。另一种技术建议抑制高层云即卷云的活动，因为这种云具有很强的温室效应作用。我们从基本的物理知识可以得知，如果这些方法能如期改变能量流动，那么地球将会降温。这个问题是整体复杂的，因为在能量流动、大气循环、天气和最后形成的气候之间的相互作用，其物理过程多样繁杂。

虽然全球平均表面温度与到达地表的阳光量以及温室效应的变化息息相关，但是影响指定时间、指定位置温度的其他因素却有很多，而且通过SRM减少的热量无法在总体上与温室气体产生的热量保持相等。例如，SRM法只能在白天降低升温率，但是不断增加的温室气体既可以在白天又可在夜间提高气温。这种并不精确的抵消能够影响表面温度的昼夜循环，即使平均表面温度保持不变。再举一个例子，模型计算表明，到达地表的太阳光的均匀减少可能会抵消全球平均二氧化碳引起的气温升高，但某些地区会不如其他地区那样降温。模型表明，如果人为产生的温室效应引起的升温完全得到平流层气溶胶的抵消，那么极地地区将会有少量残余升温，而热带地区将变得比前工业化时代凉爽一点。（接下页）

常见问题7.3(续)

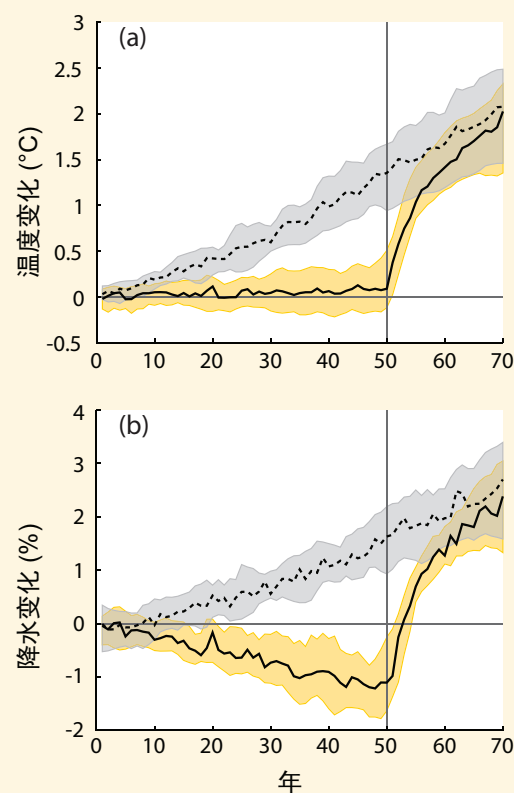
理论上，SRM可以迅速抵消人为的气候变化，在十年至二十年之内把地球降温到前工业化时代的水平。这不仅可以从气候模型也可以从大型火山喷发的气候记录中得到证实。1991年被详实记录的皮纳图博火山喷发造成了平流层气溶胶暂时增加，而且表面温度迅速下降了约0.5℃。

除表面温度外，气候还由很多要素组成。降雨、土壤水分、河流、积雪和海冰等气候特征造成的影响以及生态系统也很重要。模型和理论都表明，利用SRM来抵消增加的温室效应，以此来稳定表面温度，这在某种程度上将降低全球平均降雨量(常见问题7.3，图2展示了一个理想化模型结果)，并且还可能有地区性变化。由于区域和全球气候模式中有如此不精确的抵消，因此SRM不太可能使未来气候“就像”今天的气候或我们之前体验过的气候一样。然而，现有的气候模型表明，利用SRM和高大气二氧化碳浓度的地球工程气候，比起二氧化碳浓度升高且不利用SRM技术的未来气候，将大体更接近20世纪的气候。

SRM技术可能还有其他副作用。例如，理论、观测和模型表明，来自火山爆发和自然排放的平流层硫酸盐气溶胶会消减平流层臭氧，尤其当氯氟化碳排放产生的氯气驻留在大气中时。SRM所需的平流层气溶胶预计将产生同样的效果。臭氧消耗会增加到达地表的紫外线总量，从而破坏陆地和海洋生态系统。平流层气溶胶也会增加到到达地表的直射阳光与散射阳光的比例，这通常会提高植物的生产力。同时，也有人担忧使用硫酸盐气溶胶进行SRM会增加酸雨量，但模型研究表明，酸雨可能不是主要关注的问题，因为使用平流层气溶胶进行SRM所产生酸雨的速率比起由当前污染源所带来的值要小得多。SRM也不会涉及大气中二氧化碳浓度升高所带来的海洋酸化问题，以及它对海洋生态系统的影响。

没有传统的减排措施或潜在的CDR方法，人为排放的高浓度二氧化碳将长期存在于大气中，长达一千年之久，而且只要二氧化碳浓度维持在高水平，那么SRM就不得一直持续下去。当二氧化碳浓度依旧很高时停止SRM，将会导致未来一二十年内气温迅速升高(见常见问题7.3，图2)，从而给生态系统与人类适应能力带来巨大的压力。

如果将SRM技术用于避免由二氧化碳浓度升高带来的后果，那么随着SRM的规模增加，其危险性、副作用和缺点将明显增长。有人提出利用有时间限制的SRM技术以及一些降低二氧化碳浓度的积极策略，以避免跨越气候阈值或临界点，否则将不可避免。对这些方法进行评估将需要一个非常谨慎的风险效益分析，这远远超出了本报告的范围。



常见问题7.3 图2 | 在两个理想条件下的实验中，全球平均(a)表面温度(°C)及(b)降水(%)的变化。实线是模拟使用太阳辐射管理(SRM)来平衡50年每年1%的二氧化碳浓度的增加，之后停止SRM。虚线是模拟每年1%的二氧化碳浓度的增加，但不使用SRM。黄框和灰框表示八个不同模型第25个到第75个百分点。

常见问题

常见问题8.1 | 水汽对气候变化有多重要？

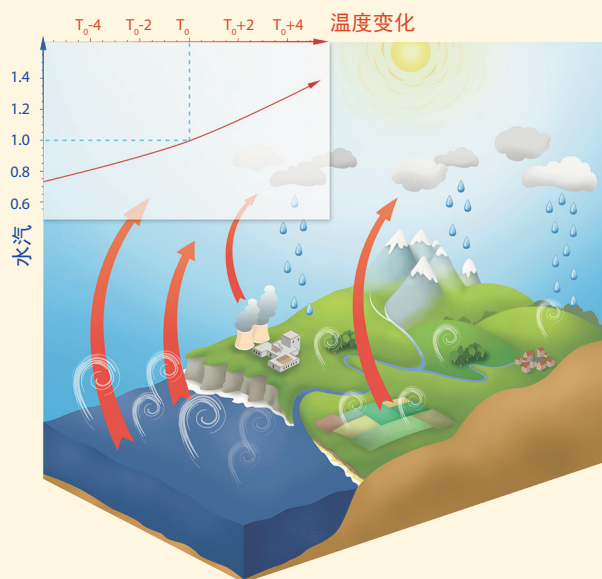
作为自然温室效应的最大贡献者，水汽在地球气候中扮演了重要角色。然而，大气中水汽的总量主要是由空气的温度而不是排放所控制的。出于这个原因，科学家认为水汽是一个反馈介质，而不是引发气候变化的强迫。灌溉或电厂降温带来的人为水汽排放对全球气候的影响微乎其微。

水汽在地球大气层中是主要的温室气体。水汽相对于二氧化碳(CO₂)对自然温室效应的贡献取决于核算方法，但可以认为比二氧化碳的贡献约大两至三倍。额外的水汽通过人为活动注入到大气中，主要是通过灌溉作物蒸发量的增加，同时还通过电厂降温，少量通过化石燃料的燃烧。因此，人们可能会问，谈及引发气候变化的强迫时，为什么对二氧化碳而不是水汽如此关注？

水汽的行为不同于二氧化碳的一个基本表现是：它能凝结和沉降。当高湿度的空气降温时，一些蒸汽凝结成水滴或冰粒并沉降。水汽在大气中通常会停留十天时间。水汽通过人为源头进入大气的流量比“自然”蒸发的要少得多。因此，它对整体浓度的影响可以忽略不计，并且对长期的温室效应没有显著作用。这就是为什么对流层水汽(通常低于10公里高度)不被认为是造成辐射强迫的人为气体的主要原因。

在平流层(大气层约10公里以上的部分)，人为排放对水汽确实有显著的影响。通过氧化作用，由人类活动导致的甲烷(CH₄)浓度的升高带来了额外的水源，这也部分解释了在平流层所观测到的变化。平流层中水的变化有辐射影响，被认为是一种强迫，并且可以进行评估。平流层水的浓度在过去几十年有显著不同。这些变化的完整范围还不是很清楚，可能与其说是一种强迫，不如说是加到自然变率中的反馈过程。平流层水汽对变暖的贡献，从强迫和反馈两方面来讲，都要比来自甲烷或二氧化碳的小得多。

空气中水汽的最大量由温度控制。极地地区从地表延伸到平流层的典型空气柱中每平方米可能只包含几千克水汽，然而热带地区类似的空气柱可以包含高达70千克的水汽。空气温度每升高一度，大气可以多保留7%的水汽(见常见问题8.1，图1，左上插图)。浓度的增加放大了温室效应，并且因此导致更多的变暖。该过程被称为水汽的反馈过程，这很好理解，也得到了量化。它出现在用于估算气候变化的所有模型中，其优点是观测一致。虽然已观测到大气中水汽的增加，但人们认为这种变化是一种气候反馈(来自大气温度的升高)，不应解释为人为排放导致的辐射强迫。(接下页)



常见问题8.1，图1 | 水循环及其与温室效应相互作用的示意图。左上插图表示随着温度升高，空气中潜在的水汽含量相对升高(约7%/度)。白色卷装物表示蒸发，通过降水抵消，以实现水分平衡。红色箭头表示向外的红外线辐射，被水汽和其他气体部分吸收，该过程是温室效应的一个组成部分。平流层的过程没有包括在本图中。

常见问题

常见问题8.1 (续)

目前，水汽在地球大气中发挥着最大的温室效应作用。然而，其他温室气体，主要是二氧化碳，对维持水汽在大气中的存在是必要的。事实上，如果从大气中去除这些气体，其温度将下降到足以引起水汽减少，而导致温室效应下降失控，使地球骤然进入冰冻状态。所以，是温室气体而不是水汽提供了维持当前大气中水汽水平的温度结构。因此，虽然二氧化碳是主要的人为控制气候的按钮，但水汽是一种强有力并且迅速的反馈，它以一个介于二和三之间的典型系数放大任何初始强迫。水汽不是一个显著的初始强迫，然而却是气候变化的基本介质。

常见问题

常见问题8.2 | 空气质量的改善对气候变化有影响吗？

有影响，但取决于所限定的污染物，它们或会使气候变冷或会变暖。例如，尽管二氧化硫(SO₂)排放减少导致更多的变暖，而对氧化亚氮(NO_x)排放的控制同时具有降温(通过减少对流层的臭氧)和增温的作用(由于其对甲烷的寿命和气溶胶产生的影响)。空气污染也会影响到降水形态。

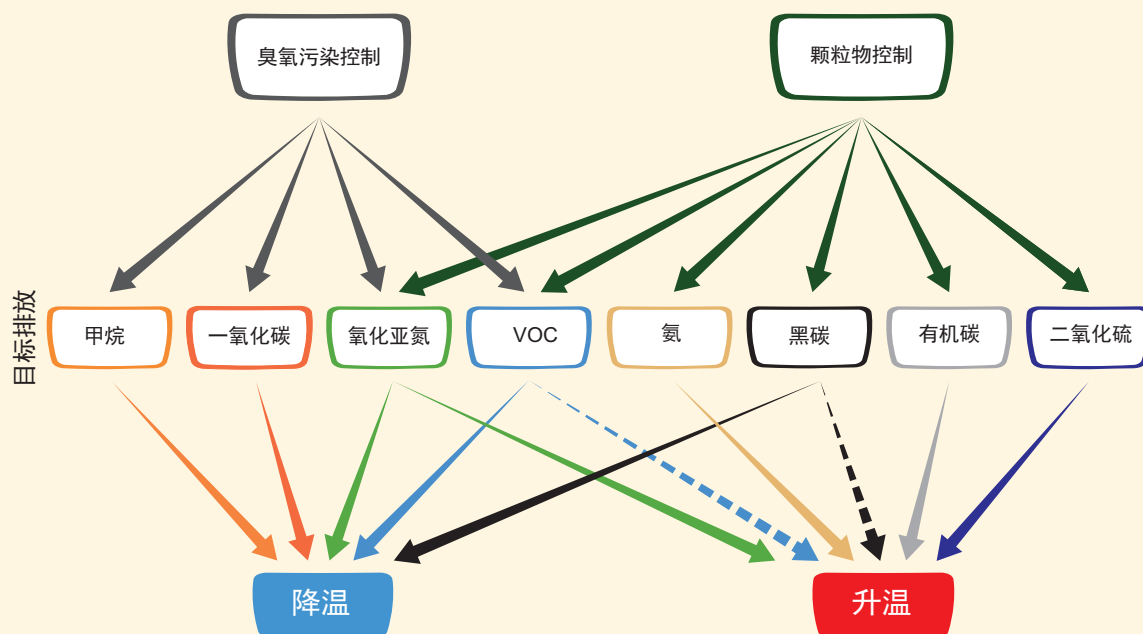
空气质量名义上是对臭氧、一氧化碳，NO_x和气溶胶(固体或液体颗粒物)等空气表面污染物的一种衡量。暴露在这些污染物中会加重呼吸系统和心血管疾病、危害植物以及损害建筑物。由于这些原因，大部分主要城市中心尽量控制空气污染物的排放。

与二氧化碳(CO₂)和其他充分混合的温室气体不同，对流层臭氧和气溶胶可能只能在大气中保持几天到几周的时间，尽管在地球系统内的间接耦合可以延长它们的影响。这些污染物通常在其排放和形成的地区最有效，在那里它们可以迫使局地或区域性气候扰动，即便其全球平均效果较小。

根据其物理和化学特性，空气污染物对气候产生不同的影响。污染产生的温室气体主要通过短波和长波辐射影响气候，而气溶胶可以额外通过云-气溶胶的相互作用影响气候。

控制甲烷的人为排放(常见问题8.2, 图1)来降低表面臭氧被认为是“双赢”局面。控制其他臭氧前体的后果并不总是清晰的。例如，控制NO_x的排放预期会具有降温效果，因为它们减少了对流层的臭氧，但相反其对CH₄寿命和气溶胶形成的影响更容易造成整体升温。

卫星观测已经证实，最近几十年东亚燃煤电厂的排放导致大气中二氧化硫(散射硫酸盐气溶胶的主要前体)浓度的上升。最新建成的电厂使用洗涤器来减少此类排放(虽然不是同时针对二氧化碳排放及其相关的长期气候变暖)。这改善了空气质量，但同时降低了硫酸盐气溶胶的降温效果，因此加剧了增温。气溶胶降温是通过气溶胶辐射和气溶胶-云相互作用起作用的，估计自前工业化时代以来为-0.9W m⁻²(所有气溶胶相加，第8.3.4.3节)，现已增长，尤其是在20世纪下半叶这个人为排放急剧上升的时期。(接下页)



常见问题8.2, 图1 | 污染控制对特定排放的影响及对气候的影响示意图。黑色实线表示已知的影响；虚线表示不确定的影响。

常见问题

常见问题8.2(续)

另一方面，黑碳或煤烟吸收大气中的热量(导致 0.4W m^{-2} 来自人为化石和生物燃料排放的辐射强迫)，并且当沉积在积雪上时，降低了其反射率或反射太阳光的能力。因此，减少黑碳的排放有降温作用，但黑碳与云额外的相互作用是不确定的，可能会消减一些变暖。

空气质量控制也可能会针对特定的人类活动领域，如交通或能源生产。在这种情况下，在所针对领域内共同排放的种类导致了化学和气候扰动的复杂组合。例如，生物燃料燃烧产生的烟雾中含有包括吸收和散射粒子以及臭氧前体的混合物，对于它对气候的综合影响是难以确定的。

因此，地表的空气质量控制将对气候产生一些影响。人们对有针对性的排放和气候之间的一些耦合仍然知之甚少或尚未证实，包括空气污染物对降水形态的影响，因此很难完全量化这些后果。同样地，气候变化对空气质量的潜在影响有一个重要的歪曲。尤其是，污染地区地表臭氧和温度之间观测到的相关性表明，单单是气候变化导致的温度升高可能加重夏季污染，暗示着“气候惩罚”。该惩罚意味着为了达到一个具体的目标，将需要对地表臭氧进行更严格的控制。此外，停滞事件的频率和持续时间的预期变化可能影响空气质量状况。这些特征将根据区域而有所变化，且很难评估，但对这些过程更好地理解、量化和建模将弄清空气污染物和气候之间的整体互动关系。

常见问题

常见问题9.1 | 气候模型变得越来越好了吗？我们又怎么知道呢？

气候模型是极其复杂精妙的计算机程序，概括了我们对气候系统的理解，并根据当下可行性尽可能真实地模拟大气、海洋、陆面、冰雪、全球生态系统和各种化学及生物过程的复杂交互。

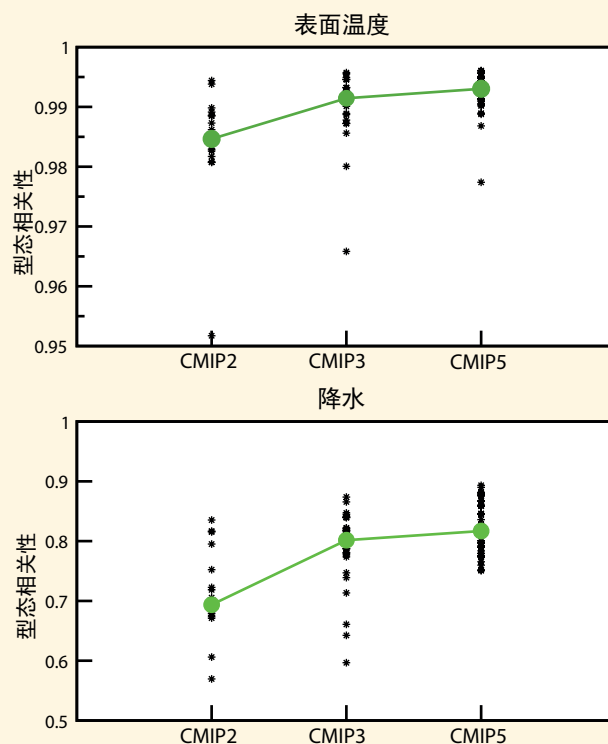
自从1990年IPCC的《第一次评估报告》以来，气候模型(云、陆面相互作用等物理过程的表示以及许多模型中全球碳和硫循环的表示)的复杂性持续增加，所以从这个意义上，当前的地球系统模型远比那个时代的模型要“好得多”。自《第四次评估报告》以来，这种发展一直在持续，同时其他因素也促成了模型的改进。更强大的超级计算机允许当前模型解决更精细的空间细节。今天的模型也反映了对气候运作过程的进一步理解 - 这些理解来自持续不断的研究和分析以及改进后的新观测。

原则上，当今的气候模型比它们的前辈们更好。然而，为了改善模拟气候的某些方面而增加的每一点复杂性也带来了新的可能的误差来源(例如，通过不确定参数)以及模型组件之间的新的交互，这样的交互可能(如果只是暂时的)降低了模型模拟气候系统其他方面的能力。此外，尽管已经取得了进展，仍然存在许多过程细节上的科学不确定性。

一个重要的考虑是，模型性能的评价只与过去的观测(加上考虑自然内部变率)相关。为了在未来对这样的模型预测有信心，必须很好地模拟历史气候(及其变率和变化)。模型评估的范围(就可获得的观测的种类和数量而言)、更好地协调模型实验的可获得性以及各种性能指标的扩大使用，提供了更多有关模型性能的量化信息。但仅此一点可能是不够的。尽管天气和季节气候预测能够定期核实，但跨度一个世纪以上的气候预测却不行。当人为强迫驱使气候系统面对器测记录没有观测到的情况时，更为如此，而且这将始终是一个局限。

量化模型的性能是以往所有IPCC第一工作组报告的特色主题。回顾这些早期的评估，可以大概了解已经取得的进展。过去的报告通常都提供一个相当广泛的模型性能的调查，显示各种气候量值的模型计算版本和对应的观测估计之间的差异。

不可避免的是，对于某些气候变量，一些模型比其他的性能更好，但总体上没有任何一个模型是“最好的”。最近，在计算各种性能指标上有一些进展，它根据一个简单的数值得分，综合地关联模型的性能与一系列不同的观测。当然，这种分数的定义、它是如何计算的、所使用的观察结果(它们有自己的不确定性)以及其各分数相结合的方式都是重要的，并且会影响最终结果。(接下页)



常见问题9.1, 图1|耦合模型相互比较方案的最近三个阶段(CMIP2, 大约在2000年的模型; CMIP3, 大约在2005年; 以及CMIP5, 目前这一代模型)的结果所显示的, 模拟年平均温度和降水形态的模型性能。这幅图显示了被观测和建模的温度(上图)同降水(下图)之间的相关性(形态相似性的度量)。值越大, 表明建模的和观测到的空间形态之间的对应关系越好。黑色符号表示一些个别模型的相关系数, 大型绿色符号表示中间值(例如, 一半的模型结果在其上, 另一半在其下)。通过增加连续几代模型的相关性, 模型性能的改进明显增加。

常见问题

常见问题9.1(续)

不过，如果度量计算一致，可以比较不同的几代模型。

这种比较的结果普遍显示，虽然每一代展示了一个性能上的范围，但是在每两代模型之间，模型的平均性能指标稳步提高。模型性能随时间变化的例子显示在常见问题9.1，图1中，并显示出持续(虽然不大)的改进。意思是，性能最差和最好的模型都显示出有改进，而且这种改善出现的时候伴随着模型复杂性的提高和对大气和海洋耦合(所谓的“流量调整”)的人工调整的消除。带来这种改进的部分原因包括对各种气候过程的进一步了解和这些过程在气候模型中更好的表示。更全面的地球观测也推动了改善。

所以，是的，气候模型正在变得越来越好，而且我们可以根据历史观测并使用定量的性能度量来展示这一点。虽然未来气候预估不能被直接评价，气候模型在很大程度上基于可证实的物理原理，并能重现过去应对外部强迫的许多重要方面。通过这种方式，它们可科学地预示气候是如何响应不同的人为强迫情景的。

常见问题

常见问题10.1 | 气候一直在变化。我们如何确定观测到的变化的原因？

观测到的气候长期变化(超过十年的时间尺度)的原因是通过确定预期的气候变化不同原因的“指纹” 是否存在于历史记录来进行评估的。这些指纹来源于对个别气候强迫所引起的气候变化的不同形态的计算机模型模拟。在数十年时间范围内, 这些强迫包括诸如温室气体的增加或太阳亮度的变化等过程。通过将模拟的指纹形态与观测到的气候变化进行比较, 我们能够确定观测的变化是否通过这些指纹形态或者自然变率(不由任何强迫引发)得到最好的解释。

在观测到的20世纪气候变化的形态中, 人类引起的温室气体增长的指纹是明显清晰的。除此之外, 这些观测的变化不能通过自然强迫或是由气候模型模拟的自然变率的指纹来解释。因此, 归因研究支持这一结论, 即“1951年至2010年间观测到的全球平均表面温度一半以上的增加极有可能是由人类活动所造成的。”

地球的气候一直在变化, 而且可能由多种原因引起。要确定所观测到的变化的主要原因, 我们必须首先确定观测到的气候变化是否不同于完全不由任何强迫引起的其他波动。不由强迫引起的气候变率 - 所谓的内部变率 - 是气候系统中过程的结果。大尺度的海洋变率, 如太平洋的厄尔尼诺-南方(ENSO)涛动, 是在十年至百年时间尺度上内部气候变率的首要来源。

气候变化还可能来自气候系统外的自然强迫, 如火山爆发或太阳亮度的变化。诸如此类的强迫可引起那些地质记录中清晰记载的剧烈变化。人类造成的强迫包括温室气体排放或大气颗粒物污染。这些强迫中任意一个, 不管是自然的或人为造成的, 都能影响内部变率, 并导致平均气候的变化。归因研究试图确定观测到的气候中能检测到的变化的原因。在过去一个世纪中, 我们知道全球平均气温已经升高, 因此, 如果观测到的变化是由强迫引起的, 那么主要的强迫一定是导致气候变暖而不是变冷的强迫。

正式的气候变化归因研究都是通过气候模型的对照实验来进行的。经模型模拟的对特定气候强迫的响应通常被称为这些强迫的指纹。为了产生一个有意义的气候变化归因评估, 气候模型必须可靠地模拟这些与单个强迫相联系的指纹形态以及无强迫的内部变化形态。没有模型能够完美地再现气候的所有特征, 但很多详细的研究表明, 采用当前模型的模拟对于进行归因评估确实是充分可靠的。

常见问题10.1, 图1说明了在20世纪后期关于全球表面温度变化的指纹评估的一部分。在20世纪下半叶所观测到的变化, 在左边图上由黑色时间序列显示, 比预期的只因内部变率引起的变化更大。只模拟自然强迫(左上方图中的黄色和蓝色线)无法重现20世纪后期全球地表变暖的变化, 其空间变化形态(右上)与观测的变化形态(右中)完全不同。模拟包括自然和人为造成的强迫, 它更好地表现了时间变化率(左下)以及观测到的表面温度变化的空间形态(右下)。

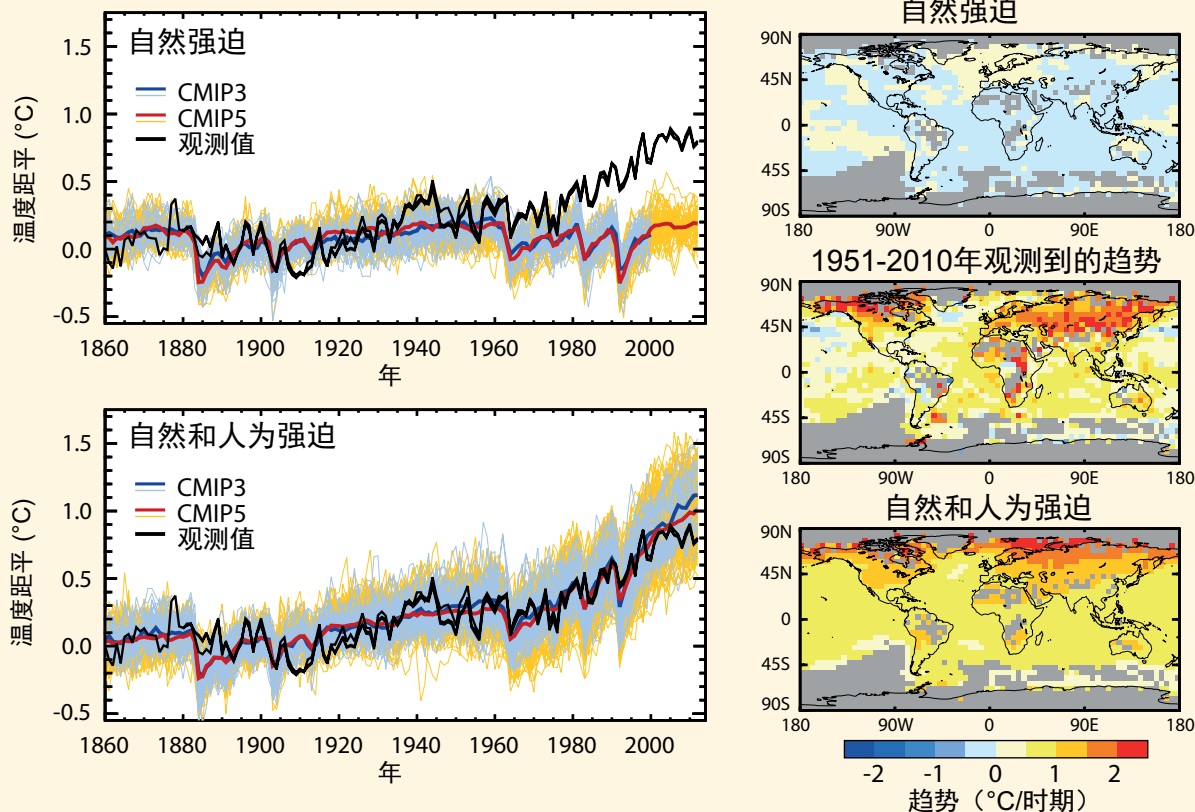
左侧两张图都显示该计算机模型再现了自然作用导致的地表变冷的观测值, 该观测的时间是在主要火山喷发之后的一年或两年(如发生在1982年和1991年)。自然强迫的模拟捕捉到火山爆发之后短暂的温度变化, 但只有自然强迫结合人为引起的强迫才能模拟出更长时间的变暖趋势。

除了常见问题10.1, 图1所示的表面温度结果外, 更完整的归因评估将考察地表以上的温度以及其他可能的气候变量。当更多的变量被考虑进评估后, 与个别强迫相联系的指纹形态会变得更加容易辨别。(接下页)

常见问题

常见问题10.1 (续)

总体而言，常见问题10.1，图1显示了观测到的温度变化的形态与单独响应自然强迫的形态显著不同。对所有强迫的模拟响应，包括人为强迫，很好地匹配了观测到的表面变化。如果不包括对人为强迫的响应（包括温室气体、平流层臭氧和气溶胶），我们就不能正确地模拟最近观测到的气候变化。自然原因引起的变化仍在气候系统中发挥着作用，但最近温度的趋势很大程度上归因于人为强迫。



常见问题10.1 图1 | (左)从1860年至2010年间全球和年均表面温度变化的时间序列。左上图显示只由自然强迫驱动的两组融合的气候模型，用细蓝色和黄色的线表示；集合平均温度变化用粗蓝线和红线表示。三种不同的观测预估用黑线表示。左下图显示相同模型的模拟，但由自然强迫和人类引起的温室气体和气溶胶的变化共同驱动。(右)1951年至2010年局地表面温度变化趋势的空间形态。上图表示仅由自然强迫驱动的耦合模型比对项目第5期(CMIP5)模拟的大集合形成的趋势形态。下图表示由自然+人为强迫驱动响应模拟所集合的趋势。中图表示同时期哈德利中心/气候研究小组的网格化表面温度数据集4(HadCRUT4)所观测到的趋势形态。

常见问题

常见问题10.2 | 何时人类对气候的影响会在局地尺度显现？

人为造成的变暖已经在一些热带局地地区显现，尤其是在一年中的温暖季节。在未来几十年，中纬地区将明显变暖，首先是在夏季。预计这一趋势在那里会较为缓慢出现，尤其是在冬季，因为自然气候变率随着离赤道的距离增大，还会在寒冷季节增大。在许多地区已经检测到的温度变化趋势归因于人类的影响。对温度敏感的气候变量，如北极海冰，也显示出归因于人类影响的检测到的趋势。

与全球变化有关的气候变暖趋势在平均全球气温方面一般比在局地温度的时间序列方面更为明显（这里，“局地”一般指个别地区或小区域的平均数）。这是因为大多数的局地气候的局地变率在全球平均值上得到了平均。在许多地区发现的多年代际气候变暖趋势被认为是在人们期望的气候系统自然内部变化趋势的范围之外，但是当局地平均气候从年际变率的“噪点”中出现时，这种趋势只会变得明显。这种情况发生有多迅速取决于气候变暖的趋势的速度和局地变率。未来的气候变暖趋势无法准确得到预测，尤其是在局地尺度，因此变暖趋势在未来出现的时间不能准确地估计。

在一些热带地区，气候变暖的趋势已经出现自局地变率（常见问题10.2，图1）。这种情况在热带地区发生更加迅速，因为那里的气温变化比世界其他地区少。预测的气候变暖可能直到21世纪中叶才在中纬度地区出现 - 即使那里的变暖趋势更显著 - 因为那里的局地温度变化比热带地区明显更大。按季节来讲，夏季局地温度变化往往小于冬季。因此，升温往往首先出现在一年中比较暖和的时候，甚至出现在一些冬季变暖趋势更明显的地区，比如欧亚大陆中部，见常见问题10.2，图1。

陆地表面温度之外的变量，包括一些海洋地区，也显示与自然变化不同的长期变率。例如，北极海冰范围下降非常迅速，并已经显示出人类产生的影响。另一方面，局地降水趋势也很难探测，因为大多数地区降水的变化相当大。整个北半球大部分地区出现创纪录的夏季高温的概率增加了。目前被认为极端的高温预计在未来几十年将更接近常态。寒潮等其他极端事件的概率已有所减少。

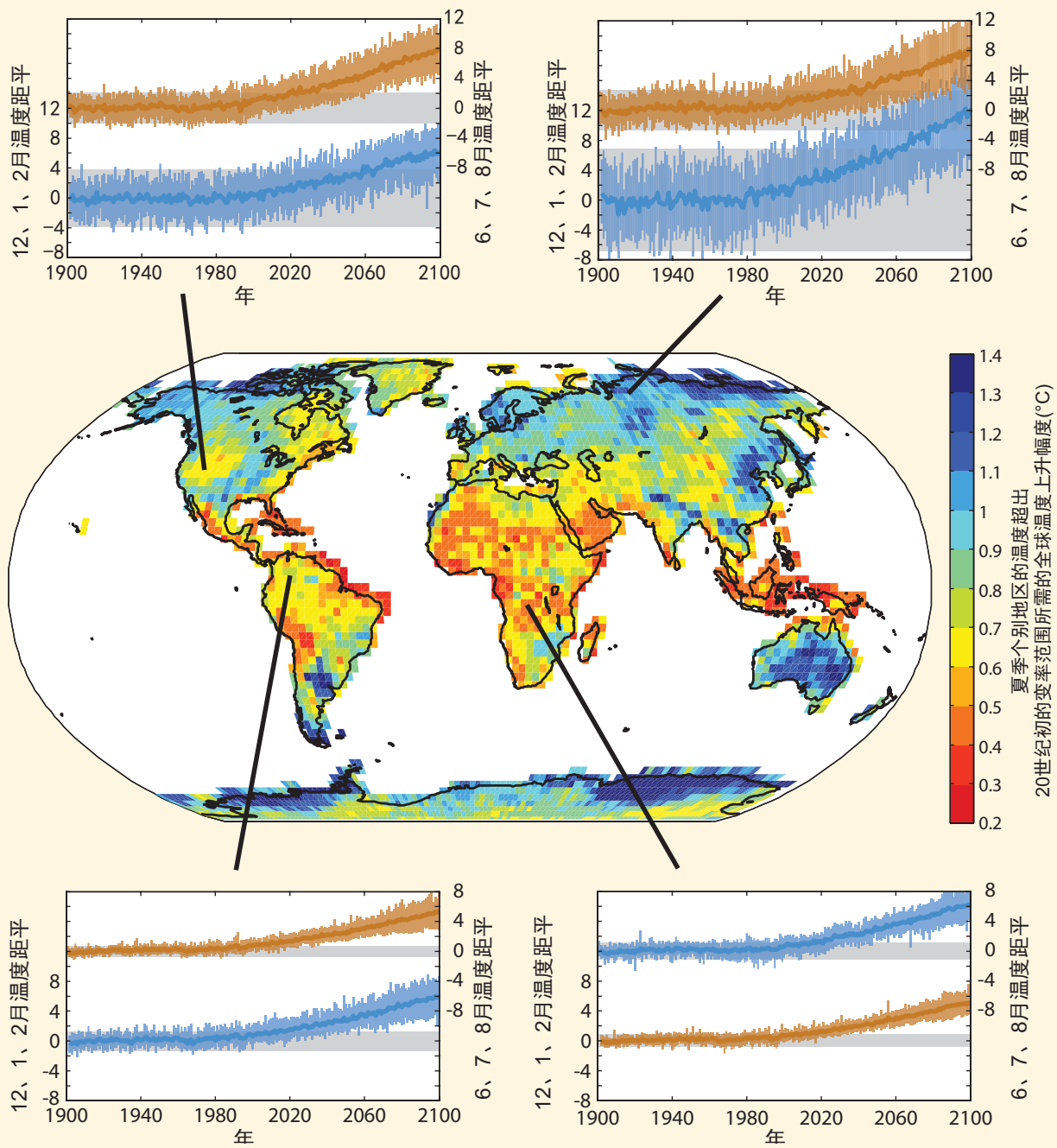
在目前的气候环境下，个别极端天气事件不能明确地归因于气候变化，因为这些事件也有可能发生在一个不变的气候中。然而，发生此类事件的概率可能在特定的地点发生了显著的变化。根据预测，人类活动引起的温室气体的增加可能极大地提高了一些热浪的概率。同样，气候模型研究表明，增加的温室气体对北半球部分地区所发现的强降水事件的显著加剧发挥过作用。然而，许多其他极端天气事件的概率可能没有太大的改变。因此，将每一个新的气象记录归因于气候变化是不对的。

预测的变暖趋势的未来出现日期还取决于局地气候变率，它可以暂时升高或降低温度。此外，常见问题10.2,图1预估的局地温度曲线是基于由同一个假设的未来排放情景所推动的多个气候模型模拟。不同速率的大气温室气体的积累会导致不同的气候变暖趋势，所以模型变暖的预估（常见问题10.2，图1的彩色阴影部分）离散将更宽，如果该图包括了温室气体排放情景离散的话。从20世纪局地变率（与变化速率无关）出现的夏季温度变化所需的温度升高在常见问题10.2,图1的中间地图上有所描述。

对于人类活动影响局地气候将何时显现这一问题，完整的答案取决于人们认为所掌握的证据是否确凿，是否足以让一件事变得“显而易见”。气候变化对局地尺度有所影响这方面最有说服力的科学证据来自于对全球状况的分析，并来自于气候系统中的大量证据：许多观测到的变化均与人类影响有联系。（接下页）

常见问题

常见问题10.2 (续)



常见问题10.2, 图1 | 夏季(红色曲线, 代表热带和北半球的某些地点六月、七月和八月或南半球的十二月、一月和二月)和冬季(蓝色曲线)的四个具有代表性地点显示的预估温度变化的时间序列。每个时间序列由24个不同的模型模拟产生的预估变化(粉色代表局地温暖季节, 蓝色代表局地寒冷季节)范围所包围, 是从使用20世纪初的条件由模型模拟的灰色自然局地变率范围中产生的。气候变暖的信号首先在夏季出现在热带地区。中间地图显示了夏季个别地区的温度从20世纪初的变率框出现所需的全球温度上升(°C)。需要注意的是, 温暖的表示所需幅度最小的温度升高, 因而也是最早出现的时间。所有的计算都是基于耦合模型比对项目第5期(CMIP5)由典型浓度路径8.5(RCP8.5)排放情景推动的全球气候模式模拟。预估变化和自然变率的范围被定义为 ± 2 个标准差。(改编和更新自Mahlstein等人, 2011)

常见问题

常见问题11.1 | 如果你无法预测下个月的天气，你如何预测未来十年的气候？

虽然天气和气候相互交织，但实际上它们并不相同。天气是给定时间和地点的大气状态，每时每刻都可能发生变化。而另一方面，气候一般指十年或更长时间天气状况的统计。

在不需要准确预测天气的条件下预测未来气候的能力比表面看起来更加普遍。例如，人们可以在春末准确地预测（例如）墨尔本当年夏季的平均气温将很有可能远远高于最近几个春季的平均气温，尽管无法准确预测当年夏季一周以上的逐日天气。这个简单的例子说明，存在一些因素-在这个例子中是到达南半球的太阳辐射的季节性循环 - 能够加强预测今后一个时期气候变化的技能，而不依赖于同一时期预测天气的准确性。

用来定义气候的天气条件统计包括：气温和降雨量的长期平均值及其变率的统计，如逐年降雨量变率与长期平均值的标准偏差，或者低于5°C的天数频率。长期气候变量的平均值被称为气候平均值。它们可以适用于个别月份、季节或全年。气候预测将解决这样的问题，如：“今年夏季的平均温度比往年夏季长期平均值高的可能性有多大？”或者“未来十年比过去几十年温暖的可能性有多大？”更具体地说，气候预测可能会回答这样的问题：“未来10年的平均温度（以中国为例）超过中国过去30年的平均温度的概率有多大？”气候预测不会预测未来天气的逐日具体变化。相反，它们提供未来气候变量统计的长期变化的概率。

另一方面，天气预报则提供未来特定时间的逐日天气预测。它们帮助解决这样的问题，如：“明天会下雨吗？”有时候，天气预报以概率的形式给出。例如，天气预报可能会说：“明天阿皮亚降雨的可能性是75%”。

要进行准确的天气预报，天气预报员需要关于当前大气状况的非常详细的信息。大气的混沌特性意味着，“初始条件”的描述中甚至最微小的错误也通常会导导致约一周以上的预报不准确。这就是所谓的“蝴蝶效应”。

气候科学家们不会试图或声称预测未来几个季节、几年或几十年的详细天气变化情况。另一方面，尽管有蝴蝶效应，气候方面可以预测的假设是有合理科学依据的，虽然这种预测不准确。例如，长生命期大气温室气体浓度的升高往往会增加未来几十年的表面温度。因此，过去的信息可以帮助预测未来的气候。

某些类型的自然发生的所谓“内部”变率 - 至少在理论上 - 可以延伸预测未来气候的能力。内部气候变率来自于气候系统固有的不稳定性。如果这种变率包括或导致广泛的、长期的海洋上层温度异常，这将在局地 and 远距离推动高层大气发生变化。厄尔尼诺-南方涛动现象可能是这种内部变率最著名的例子。与厄尔尼诺-南方涛动相关的变率以部分可预测的方式展开。蝴蝶效应是存在的，但它需要更长时间才能强烈影响一些与厄尔尼诺-南方涛动相关的变率。

气象部门和其他机构充分利用了这一点。它们开发出了季节至年际预测系统，使自己能够使用可论证的预测技能定期预测季节性气候异常。在不同的地点和不同的变量之间，技能会有显著的变化。预测越是深入到未来，技能趋于减弱，有些地方甚至没有技能可言。这里“技能”用其技术层面的意思：它用来衡量一个预测比一些典型的简单预测方法（如假设在预测期内最近的异常情况将持续存在）的准确性高多少。（接下页）

常见问题11.1 (续)

天气、季节-年际和年代际的预测系统在很多方面都很相似（例如，它们都包含相同的大气数学方程式，它们都需要指定初始条件来启动预测，而且都受到蝴蝶效应带来的对预测准确性的限制）。然而，年代际预测不像天气和季节至年际预测那样成熟，它尚处于起步阶段。但年代际预测系统显示出一定程度的后报能力，可后报出全球大部分地区至少达9年的近地表温度。“后报”是对过去事件的预测，只有该事件之前的观测信息被输入预测系统，用来进行预测。该技能的大部分被认为来自外部强迫。“外部强迫”是气候科学家用来指气候系统外部导致气候系统变化的作用力的一个术语。它包括长期温室气体浓度的增加。

理论表明，预测年代际降雨量的技能应该小于预测年代际表面温度的技能，而后报的表现也符合这种期望。

目前的研究旨在改善年代际预测系统，并加强对任何明显技能的原因的理解。确定额外信息从内部变率实际上转化为提高的技能的程度是关键问题。虽然预测系统有望在未来数十年得到改善，气候系统的混沌性质以及由此产生的蝴蝶效应总是会对预测技能带来不可避免的限制。不确定性的其他来源是存在的。例如，火山喷发会影响气候，但它们的发生时间和程度是无法预测的，未来的火山喷发是若干不确定性的其他来源之一。此外，拥有足够的海洋数据进行初始化和评估年代际预测的时间太短，这也提出了重大挑战。

最后，请注意年代际预测系统的目的是利用外部强迫的和内部产生的这两个可预测性来源。气候科学家将年代际预测和年代际预估加以区分。预估仅利用外部强迫产生的预测能力。虽然以前的IPCC评估报告仅仅侧重于预估，该报告还评估了年代际预测研究及其科学依据。

常见问题

常见问题11.2 | 火山喷发如何影响气候和我们预测气候的能力？

大型火山喷发向大气层高层(也称为平流层)喷射二氧化硫气体,经与水反应,形成硫酸液滴组成的云,从而影响气候。这些云将太阳光反射回太空,阻止其能量到达地球表面,从而使其降温,同时也使低层大气降温。这些高层大气的硫酸云也在局地从太阳、地球和低层大气吸收能量,从而使高层大气升温(参见常见问题11.2,图1)。在地表降温方面,举个例子,1991年菲律宾的皮纳图博火山喷发,向平流层射入约2000万吨二氧化硫(SO₂),将地球降温约0.5℃并长达一年。在全球范围内,火山喷发也减少了降雨量,因为地表减少的入射短波可由潜伏热量(即蒸发之后的降雨)的减少来补偿。

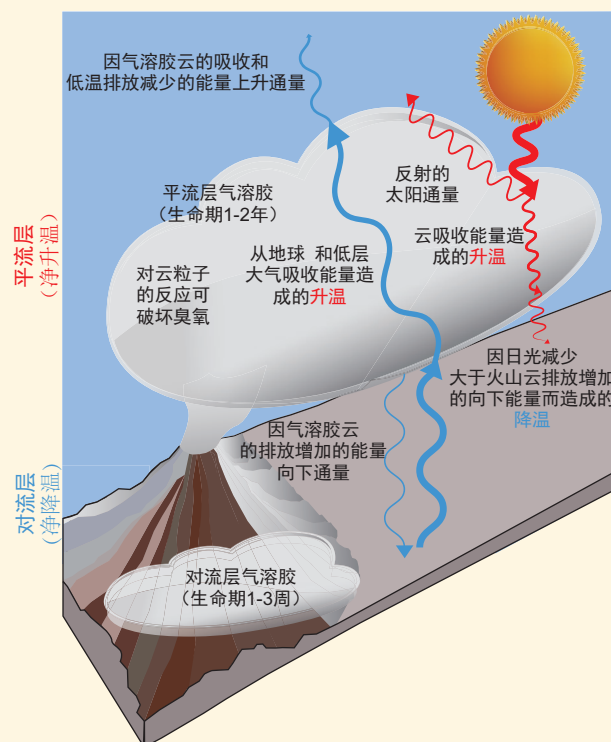
为了预测气候,可以预计火山喷发会造成未来一年左右显著的全球表面降温 and 高层大气升温。问题在于,即使可以检测到一个火山已经变得更加活跃,但无法预测精确的火山喷发时间,或射入高层大气的SO₂的量以及如何分散。这是气候预测中不确定性的来源。

大型火山喷发产生大量的颗粒,也被称为灰或火山灰。然而,这些颗粒很快就(在几天或几周之内)从大气层掉落出来,所以它们不会影响全球气候。例如,1980年圣海伦斯火山喷发影响了美国西北部表面温度好几天,但是,因为它只排放了极少量的二氧化硫进入平流层,因此没有检测到对全球气候有影响。如果大型的、高纬度地区火山喷发将硫磺射入到平流层,这只会对火山喷发发生的半球产生影响,而且影响也最多只会持续一年时间,因为火山喷发产生的平流层云只存在几个月时间。

热带或亚热带火山会产生更多的全球表面或对流层降温。这是因为由此形成的硫酸云在高层大气可持续一至两年时间,而且能覆盖地球大部分地区。然而,它们对区域气候的影响是难以预测的,因为平流层硫酸盐气溶胶的分布在很大程度上取决于火山喷发时大气层的风力条件。此外,地表的降温效应通常是不均匀的:因为大陆比海洋的降温幅度大,夏季风会减弱,从而减少亚洲和非洲的雨水。由于热带火山喷发产生的高层大气层云也从地球吸收太阳光和热量,在热带地区比高纬度地区的高层大气产生更多的升温,因此气候的反应变得更加复杂。

过去的250年中最大的火山喷发刺激了科学研究。1783年冰岛拉基火山喷发后,欧洲出现了创纪录高温的夏季,随后是非常寒冷的冬季。两次火山大喷发,一次是1809年发生的、无法识别的火山喷发,另一次是1815年发生的坦博拉火山喷发,导致1816年成为“没有夏季的一年”。当年欧洲和美国的农业歉收导致粮食短缺、饥荒和暴动。

50多年来最大的一次火山喷发,即1963年发生的阿贡火山喷发,导致了许多的研究,包括观测和气候模型计算。随后的两次大喷发,即1982年埃尔奇琼火山喷发和1991年皮纳图博火山喷发,促进我们开展工作,导致我们目前对火山喷发对气候影响的认识。(接下一页)



常见问题11.2, 图1 | 大型热带或亚热带火山如何影响高层大气(平流层)和低层大气(对流层)温度的示意图。

常见问题11.2 (续)

火山云在平流层只停留几年时间，所以它们对气候的影响也相应较短。但连续大喷发的影响可以持续更长的时间：例如，13世纪末发生过四次大喷发 - 每十年发生一次。第一次发生在公元1258年，是1000年以来最大的一次火山喷发。这一系列的火山喷发使北大西洋和北极海冰降温。另一个相关时期是1963年至1991年期间，发生了三次大型火山喷发和几次小型喷发（关于这些喷发如何影响大气成分并降低地面的短波辐射，见第8章）。

火山学家可以检测到什么时候火山会变得更加活跃，但他们无法预测火山是否会喷发，或者如果火山喷发，可能向平流层喷射多少硫磺。尽管如此，火山以三种截然不同的方式影响着预测气候的能力。首先，如果剧烈的火山喷发向平流层射入大量的二氧化硫，该影响可以纳入气候预测。其中还涉及到很大的挑战和不确定性的来源，如收集对火山云的良好观测资料，并计算其存在期间会如何移动和变化。但是，根据观测资料和对最近火山喷发的成功建模，一些大型火山喷发的影响可以纳入预测。

第二个影响是，火山喷发是我们的预测中不确定性的潜在来源。火山喷发无法事先预测，但它们会发生，在局地 and 全球范围造成短期的气候影响。原则上，这种潜在的不确定性可以通过将随机喷发或根据某种将喷发纳入我们近期集合气候预测的情景加以解释。这方面的研究还需要进一步探索。本报告中的未来预估不包括未来的火山喷发。

第三个影响，历史气候记录可以与对观测的硫酸盐气溶胶的估算一起使用，以测试我们的气候模拟的逼真度。虽然爆炸性火山喷发的气候响应是其他一些气候强迫的有用的类似物，但也存在局限性。例如，成功模拟一次火山喷发的影响，可以帮助我们验证用于季节和年际预测的模型。但通过这种方式，并不能对下个世纪全球气候变暖涉及的所有机制进行验证，因为这些涉及到长期的海洋反馈，这比应对个别火山喷发的时间尺度更长。

常见问题

常见问题12.1 | 为什么使用这么多的模型和情景来预估气候变化？

未来的气候一部分是由未来排放的温室气体、气溶胶的多少及其他自然和人为强迫来决定的。这些强迫在气候系统的外部，但会改变气候的行为。未来的气候定形于地球对那些强迫的响应以及气候系统固有的内部变率。对未来排放的幅度和速度的一系列假设有助于科学家设想出不同的排放情景，气候模型预估正是以此为基础的。同时，不同的气候模型可提供对地球对那些强迫的响应以及自然气候变率的替代表示。模拟应对各种不同情景的模型集合起来可绘制出一系列可能的未来，并帮助我们了解其不确定性。

可以说，预测社会经济的发展甚至比预测物理系统的演化更加困难。它要求预测人类行为、政策选择、技术进步及国际竞争与合作。常见的方法是使用未来似乎可信的经济社会发展的情景，未来温室气体的排放及其他强迫因素正是由此导出的。一般情况下，还做不到将多种可能性分配给个别强迫情景。相反，可将一组选项用于一系列的可能性。来自不同强迫情景的结果可为决策者提供不同选择和一系列可能的未来，以供考虑。

气候的内部波动由大气与海洋等组成部分之间的互动自发产生。在近期气候变化的情况下，它们可能会掩盖外部扰动的影响，如温室气体的增加（见第11章）。然而，从长远来看，预计外部强迫的影响将占主导地位。根据气候模式的模拟预估，数十年后，未来人为温室气体和其他强迫因素 - 以及气候系统对其做出的反应 - 等不同情景将以不同的方式影响全球平均气温的变化（常见问题12.1，图1，左图）。因此，评估这些不同的情景和反应的后果是极为重要的，尤其是在考虑政策决定时。

气候模型建立在主导我们的气候系统的物理原理和实证理解的基础上，并代表模拟过去和未来的气候和气候变化所需要的复杂的、相互作用的过程。与过去观测的类比或从最近趋势的推断对于预估来说都是不充足的策略，因为未来不一定是我们迄今所见状况的一个简单延续。

虽然有可能写下决定大气与海洋行为的流体运动方程，但却不可能不通过电脑模型模拟、使用数值算法来求解这些方程，正如航空工程依靠相似类型方程的数值模拟一样。此外，许多小规模物理、生物和化学过程，例如云过程，则不能被这些方程描述，或是因为我们缺乏足够精细的分辨率来描述系统的计算能力，无法直接模拟这些过程，或是因为我们仍然对驱动这些过程的机制有着片面的科学理解。这些需要通过气候模型内所谓的参数化来作近似处理，由此在直接模拟和近似量之间建立起数学的关系，经常是在观测到的行为基础上进行。

鉴于计算和观测存在局限性，因而有各种替代和同样看似可信的数值表示、解决方案和近似值来为气候系统建模。这种多样性被认为是气候建模界健康的一面，并可形成一系列全球和区域尺度上看似合理的气候变化预估。该范围为量化这些预测中的不确定性提供了基础，但由于模型的数量相对比较少，模型输出对公共档案馆的贡献是自愿的，对未来可能状况的采样既不系统也不全面。此外，一些不足之处仍然存在，这对所有的模型都很普遍；不同的模型有不同的优点和缺点；目前尚不清楚，可以通过观测来评估的模拟质量的哪些方面用以指导我们对未来模型模拟的评估。（接下页）

常见问题

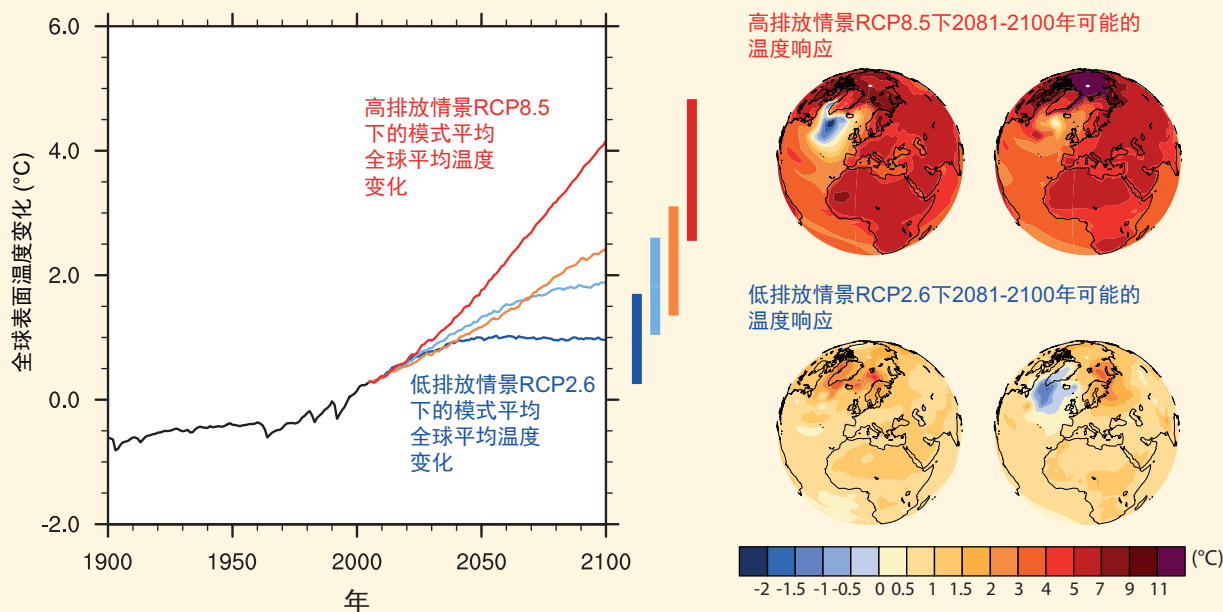
常见问题12.1 (续)

复杂程度不同的模式通常用于不同的预估问题。速度较快而分辨率较低的模式，或者对一些气候过程较简化的描述，可用于需要长达多个世纪的模拟或者需要多种实现的情况。简化模型可以充分代表大型平均数量(如全球平均温度)，但是更为精细的内容(如区域降水量)只能使用复杂的模式进行模拟。

科学界加紧努力协调模式实验和各组织的成果(如耦合模式比对项目(CMIP)、世界气候研究计划及其气候模式工作组)，以评估各模式模拟过去和当前气候以及比对未来气候变化预估的能力。当前气候科学界使用‘多模式’方法作为标准化的技术，来评估特定气候变量的预估。

常见问题12.1,图1,右图显示的是到21世纪末，两种解释性模式、以及最高和最低RCP情景的温度响应。各种模式在地球表面变暖的大型形态方面结果是一致的，例如，陆地将比海洋的变暖速度快，而北极将比热带地区的变暖速度快。但是上述模式在针对全球响应的同一情景以及在小范围，即区域响应方面的幅度都存在差异。例如，北极扩大的幅度在不同模式之间存在差异，而且模式的子集显示北大西洋变暖较弱并且有小幅降温，这是深海形成的减弱以及洋流的变化所致。

在未来外部强迫以及气候系统对其影响都存在不可避免的不确定性，而且内部产生的变率使其更为复杂。使用多个情景和模式已成为一种标准的选择，以评估和描述它们，从而使我们能够描述广泛的未来地球气候可能的演变。



常见问题12.1, 图1 | 耦合模式比对项目第5阶段(CMIP5)所有模式(相对于1986-2005年)中四个典型浓度路径(RCP)情景模拟的全球平均温度变化: RCP2.6(深蓝色)、RCP4.5(浅蓝色)、RCP6.0(橙色)和RCP8.5(红色), 32、42、25和39模式分别用于这四个情景。到21世纪末全球温度变化可能的范围用垂直柱块表示。请注意, 这些范围适用于两个20年平均值的差值, 即2081-2100年相对于1986-2005年, 这解释了处于中心位置的柱块意义: 其值比年度轨迹的终点小。对于最高(RCP8.5)和最低(RCP2.6)情景, 两个CMIP5模式显示了到21世纪末(2081-2100年相对于1986-2005年)地球表面温度变化的示意图。选择这些模式是为了显示更为广泛范围的响应, 但是这组选择不代表模式响应不确定的任何量值。

常见问题

常见问题12.2 | 地球水循环将如何变化？

地球气候系统中水的流量和储量差异很大，但是预计到本世纪末会出现其他因自然变率之外因素引起的变化。全球变暖后，降雨量、表面蒸发量和植物蒸腾量都会出现净增加。然而，不同地区的变化存在显著的差异。一些地区的降水量会增加，随之陆地上累积的水也会增加。在其他地区，由于区域性干旱以及冰雪量损失，水量会减少。

水循环包括存储在地球上的水的所有阶段，以及水在地球气候系统中的运动。在大气中，水主要以气体（水汽）的形式存在，但也以冰或液体水的形式存在于云中。海洋自然主要是液体水，但在极地地区也有部分的海洋被冰所覆盖。陆地水主要以地表水（如湖泊和河流）、土壤水分和地下水的形式存在。固体陆地水存在于冰盖、冰川、地表冰雪以及多年冻土和季节性冻土中。

一些关于未来气候的观点认为水循环会加速，但这可能会引起误解，因为严格来讲，这意味着在所有的地方将发生更多的水循环并且随着时间的推移将越来越快。世界部分地区的水循环将确实会加剧，届时将有大量的水从储水库输入和输出，同时水的运动也会加速。然而，气候系统的其他部分将消耗大量的水，因而水的运动将减少。一些储水库甚至会消失。

随着地球变暖，一些变化的总体特征将会发生，以响应变暖了的气候。这些变化受全球变暖施加给气候系统的能源量控制。所有形式的冰将融化得更快，但不会很普遍。例如，对于一些本报告中评估的模拟，夏季北极海冰将在本世纪中叶前消失。大气将承载更多的水汽，而观测和模式结果表明这种情况已经发生了。到21世纪末，大气水汽的平均量可能增加5-25%，这取决于人类排放温室气体和辐射活性颗粒（如烟雾）的总量。地球表面水的蒸发将加速。海平面将上升，因为海水变暖的扩张以及陆地冰融化流入海洋（见常见问题13.2）。

气候系统的复杂性可以调整这些总体变化，以使它们不会预期同时出现在所有地方或以同样的速度出现。例如，水在大气、陆地和海洋中的循环可以随着气候的变化而变化，在一些地方水很集中而在另一些地方则枯竭了。一年中的变化也不同：有的季节比其他季节潮湿。因此，本报告中评估的模式模拟显示，亚洲北部冬季降水量可能增长50%以上，而夏季降水预计几乎不变。人类还通过水务管理和土地利用变化直接干预水循环。不断变化的人口分布和用水习惯将进一步促进水循环的变化。

水循环过程可以在几分钟、几小时、几天或更长的时间发生，可以在从几米到几千米甚至更远的距离发生。这些尺度的变率通常大于温度的变率，因此气候变化在降水方面难以辨别。尽管复杂，对于未来气候的预估显示，在很多模式和气候强迫情景中这种变化很常见。AR4中也报告了类似变化。这些结果都表明已很好地了解了变化的机制，即使变化幅度是依模式和强迫而变的。此处我们侧重于陆地的变化，其中水循环的变化对人类和自然系统的影响最大。

本报告评估的模拟预估的气候变化（见常见问题12.2图1中的示意图）总体显示，在最极端排放的情景下，到21世纪末，热带深海和极地纬度的部分区域降水增长可能超过50%。与此相反，亚热带的大部分地区可能减少30%或以上。在热带地区，这些变化似乎是由于大气水汽增加以及大气环流的变化引起的，而大气环流会进一步将水汽集中在热带从而促进热带的降水增加。在亚热带，这些环流变化同时会促使雨量减少，尽管这些地区的温度会升高。由于世界上多数沙漠都位于亚热带，这些变化意味着这些已经很干旱的地区将更加干旱，而且沙漠有可能会扩大。（接下页）

常见问题

常见问题12.2 (续)

高纬度地区雨量增加是由于温度上升引起的，这使得大气承载更多的水分，因此降水就会相应增加。气候变暖也会使得温带的风暴系统将更多的水汽输入高纬度地区，同时无需热带风力强度发生实质性的变化。如上文所述，高纬度地区的变化在寒冷的季节更明显。

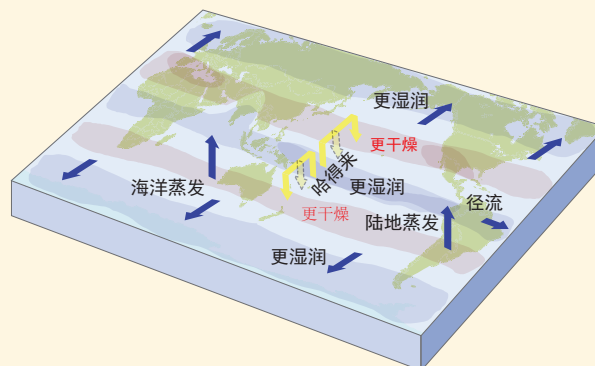
陆地变得干燥还是潮湿，部分取决于降水量的变化，但也取决于地面蒸发量和植物蒸腾量（合称蒸散量）的变化。因为大气升温会使大气携带更多的水汽，鉴于陆地水量充分，这可以诱发更大的蒸散量。然而，大气中二氧化碳的增加使得植物输入大气的蒸发量减少，这部分抵消了变暖的效应。

在热带地区，蒸散的增加往往会抵消降水增加后对土壤水分的影响，而在亚热带，本已低量的土壤水分使蒸散量几乎没有变化。在更高的纬度地区，降水量增加通常超过了预估的气候中蒸散的增加，产生更高的年均径流量，但土壤水分有多种变化。如常见问题12.2，图1中环流变化所示，高水分地区或低水分地区的边界也可能位移。

更为复杂的因素是降雨特点。模式预估表明降雨变得更强，部分是因为大气中的水分更多。因此，对于本报告评估的模拟，在多数陆地，到21世纪末，目前平均每20年发生的单日降水事件会每10年出现一次，甚至更加频繁。同时，预估还表明，降水事件的总体频率将趋于减少。这些变化产生两种表面相反的效应：更强的倾盆大雨，导致更多的洪水，而降水事件之间的干旱期更长，导致旱情加大。

在高纬度和高海拔地区，由于固态水的损失造成进一步的变化。其中有些变化可通过目前的全球气候模式（GCM）加以解析，而有些变化只能进行推断，因为它们涉及各类特征，例如冰川，模式中通常没有对它们加以解析或包括在内。越暖的气候意味着，雪往往在晚秋就开始积聚，并在初春就开始融化。本报告评估的模拟表明，到本世纪末，预估北半球三月至四月的积雪平均约减少10-30%，具体要取决于温室气体情景。初春融化改变了春季河流因融雪流入而形成的流量峰值的时间。结果，后期的流速将下降，有可能影响水资源管理。GCM模拟中显现出这些特征。

多年冻土的损失将使水分更深地渗入地下，但它也会使地面增温，并会提高蒸散。然而，目前大部分的GCM没有包含充分模拟冻土变化所需的全部过程。土壤冻结分析研究或利用GCM输出驱动更详尽的陆地模式研究表明，到本世纪末将有显著的多年冻土损失。此外，尽管目前的GCM没有明确包括冰川演变，但我们可预计，冰川将持续退缩，随着它们的消失，它们在夏季给某些地方的河流带来的水量会减少。冰川的损失还将促使春季河道流量的减少。然而，如果年平均降水量增加 - 无论是雪还是雨 - 则这些结果未必意味着年平均河水流量会减少。



常见问题12.2, 图1 | 水循环主要部分的预估变化示意图。蓝色箭头表示通过地球气候系统，水分运动变化的主要类型：温带风引起的向极水分输送、地表和陆地到海洋的径流的蒸发。阴影区域表示更有可能变得更干或更湿的地区。黄色箭头表示哈得来环流引发的重要大气环流变化，其向上运动可促进热带降雨，同时可抑制副热带降雨。模式预估表明，哈得利环流将改变其在北半球和南半球向极的下沉分支，同时导致相关的干化。在高纬度地区预估会出现较湿条件，因为更暖的大气将带来更大的降水，并更多地将水运动到这些地区。

常见问题

常见问题12.3 | 如果我们今天停止排放，未来的气候将会怎样？

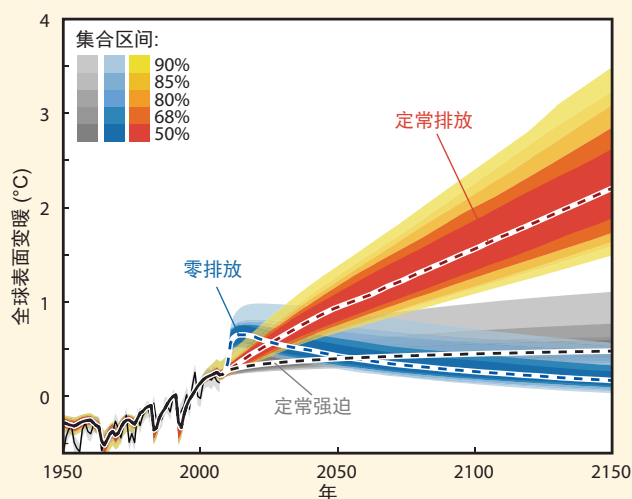
今天停止排放并不是一个真实情景，而只是深入了解气候系统响应和碳循环的众多理想案例之一。由于气候系统的多个时间尺度，因此，排放变化和气候响应之间的关系十分复杂，其中某些变化在停止排放很久之后仍会发生。模式和对过程的了解表明，由于巨大的海洋惯性和许多温室气体(主要是二氧化碳)的长生命周期，因此，在停止排放温室气体后，大部分的变暖会持续数个世纪。

温室气体排入大气后，会通过与其他活性部分的化学反应而得以清除，或者，以二氧化碳(CO₂)为例，与海洋和陆地进行交换。这些过程可描述大气中气体的寿命，可定义为某一浓度脉冲减少到e(2.71)分之一所需的时间。温室气体和气溶胶在大气中的存留时间从几天至数千年不等。例如，气溶胶的寿命为几周、甲烷(CH₄)约为10年、氧化亚氮(N₂O)约100年、六氟乙烷(C₂F₆)大约1万年。CO₂更为复杂，因为从大气中清除它要通过海洋和陆地的多种物理和生物地球化学过程；全部是在不同时间尺度上运行的。对于约为1000PgC的排放脉冲，其中约有一半会在数十年内清除，但剩余部分将在大气中驻留更长的时间。在1000年之后，大约15%-40%的CO₂脉冲仍会驻留在大气中。

由于主要人为温室气体寿命较长，过去排放增加的大气浓度将在停止排放后长期持续。如果排放停止，温室气体的浓度也不会即刻回落到工业化前的水平。甲烷浓度会在大约50年后回落到接近工业化前的水平值，N₂O浓度需要用数个世纪，而在我们社会的相关时间尺度上CO₂基本不可能回到其工业化前的水平。另一方面，气溶胶等短生命周期气体的排放变化会导致其浓度几乎瞬时改变。

气候系统对温室气体和气溶胶强迫的响应特征就是主要由海洋推动的惯性。海洋具有巨大的热吸收能力，而且可以在表层海洋和深层海洋之间缓慢混合。这意味着，整个海洋需用数世纪才能升温，并与改变的辐射强迫达到平衡。表层海洋(而后大陆)将持续变暖，直至其达到与这一新辐射强迫相平衡的表面温度。AR4表明，如果温室气体浓度保持在当今水平不变，与2000年相比，21世纪的地球表面仍将持续升温大约0.6°C。这就是目前浓度的气候持续性(或定常成分持续性)，参见常见问题12.3，图1灰色部分。目前排放水平不变将会进一步增加大气的浓度，导致变暖幅度比目前观测到的要高得多(常见问题12.3，图1，红线)。

即使现在停止人为温室气体的排放，这些长生命周期温室气体浓度造成的辐射强迫在未来只是缓慢减小，其减小率取决于温室气体的寿命(见上文)。此外，地球系统对这种辐射强迫的气候响应会更慢。全球温度不会对温室气体浓度变化做出快速响应。只消除CO₂排放会导致数个世纪温度几乎不变。同时消除硫酸盐气溶胶的短生命周期负强迫(例如，通过降低空气污染措施)将导致短暂升温零点几度，参见常见问题12.3，图1蓝色部分。因此，在短暂升温后，将所有排放调到零，会导致气候几乎稳定数个世纪。这就称为过去排放的持续性(或未来排放零持续性)。GHG浓度会减少，继而是辐射强迫的下降，但气候系统的惯性会延迟温度响应。(接下页)



常见问题12.3, 图1|2010年起定常大气成分)定常强迫, 灰色)、定常排放(红色)和零未来排放(蓝色)预估, 以及不确定性估值。此预估是基于能量收支碳循环模式 - 温室气体引起的气候变化评估模式)MAGICC)。图摘自Hare和Meinshausen)2006), 根据简易碳循环气候模式与所有耦合模式比较计划第3阶段)CMIP3)和耦合气候碳循环模式比较计划)C4MIP)模式的定标)Meinshausen等人, 2011a; Meinshausen等人, 2011b)。模式结果根据工业化前开始的全面瞬时模拟, 并利用所有辐射强迫分量。细黑线和阴影表示观测到的变暖和不确定性。

常见问题

常见问题12.3)续)

作为气候和碳循环中大惯性的后果，长期全球温度在很大程度上受控于随时间累积的CO₂排放总量，而不受过去排放的时间的影响。因此，把全球升温幅度限制在低于某个给定的水平上(如：与工业化时代之前相比高2°C)表示一个给定的CO₂收支，即早期较高的排放意味着之后要加强减排。制定一个较高的气候目标是考虑到将出现一个较高的CO₂浓度峰值，因而将出现较大的累计CO₂排放(如：在必要的减排过程中容许有一定的延迟)。

全球温度是一个有用的聚集数，用于描述气候变化的幅度，但并非所有变化都将以线性方式拉升全球温度。例如，水分循环中的各种变化还取决于强迫类型(如：温室气体、气溶胶、土地利用变化)、地球系统中变化缓慢的组成部分(诸如海平面上升和冰盖等)做出响应的时间要长得多，而且在气候系统中也许有临界阈值或突变或不可逆转的变化。

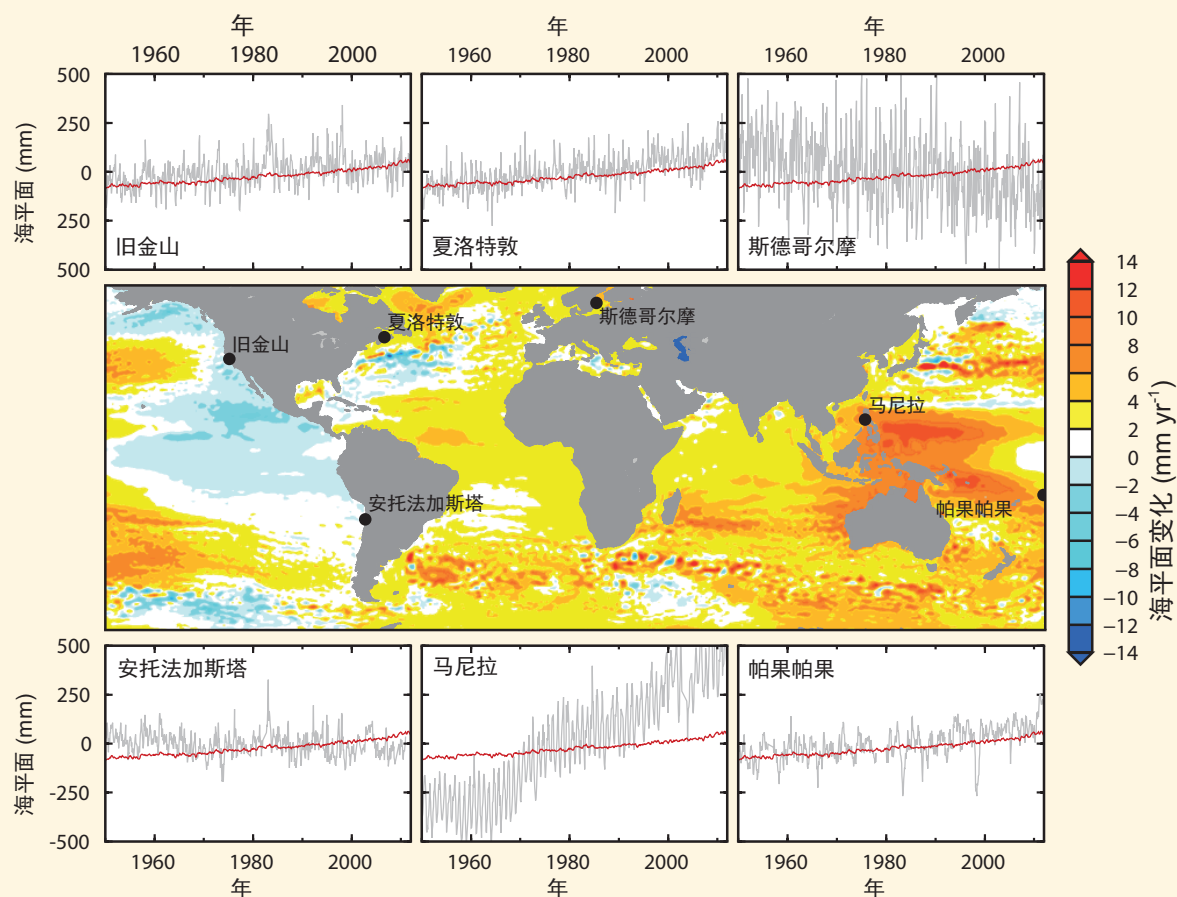
常见问题

常见问题13.1 | 为什么局地海平面的变化不同于全球平均值？

移动的表面风、不断变暖的海水的膨胀，以及融冰增多都可改变洋流，而洋流可相应导致各地出现不同的海平面变化。过去和现在的陆地冰体分布变化可影响地球的类型和重力场，后者还可造成海平面的区域波动。受更具区域性过程(如泥沙的淤积和大地构造运动等)的影响也可引起海平面的其他变化。

在任何沿岸，海洋或陆面的垂直运动可引起海平面出现相对于陆地的各种变化(即相对海平面)。例如，海面高度上升或陆地高度下降都可造成局地变化。在相对较短的时段内(几个小时至几年)，海潮、风暴和气候变率(如厄尔尼诺现象等)的影响是海平面变化的主因。地震和山体滑坡通过改变陆地高度也有影响，有时海啸也是如此。在较长时段内(几十年乃至几百年)，气候保护的影响(其后果造成海水容量和陆地冰体积发生变化)是大多数区域海平面变化的主要贡献因子。在上述较长时间尺度上，各种过程也可引起地面的垂直运动，而这一垂直运动也可导致相对海平面的大幅度变化。

自20世纪后期以来，对相对于地心的洋面高度(即地心海平面)的卫星测量结果表明，全球各地地心海平面变化的速率存在差异(见常见问题13.1, 图1)。例如，在西太平洋，其地心海平面变化速率与1993至2012年间每年上升3毫米的全球平均值相比约大3倍。相比之下，东太平洋的地心海平面变化速率小于全球平均值，而南北美洲西海岸大部同期经历了海面高度下降的局面。(接下页)



常见问题13.1, 图1 | 根据卫星测高绘制的1993-2012年期间海面高度(地心海平面)变化速率图。图中还给出了1950-2012年期间所选验潮站的相对海平面变化(灰线)。为了比较, 还给出了全球平均海平面变化估值(红线)以及每个验潮仪的时间序列。正如报告正文所述, 局地海平面相对大的短期振荡(灰线)是由于自然气候变率所致。例如, 在帕果帕果验潮站观测到的有规律的大波动与厄尔尼诺和南方涛动相关。

常见问题

常见问题13.1(续)

如常见问题13.1, 图1所示, 一年至几十年时间尺度的自然气候变率(如厄尔尼诺和太平洋年代际涛动)导致了大部分空间变化。这些气候变化改变了表面风、洋流、温度和盐度, 从而影响了海平面。这些过程的影响将继续贯穿整个21世纪, 并将叠加在与长期气候变化相关的海平面变化的空间型态上, 而海平面随着表面风、洋流、温度和盐度以及海洋容量的变化而上升。但是, 与自然变率相比, 各种更长期趋势随时间而累计, 因此可预计在整个21世纪这些趋势将占主导地位。因此, 与常见问题13.1中的图1相比, 在这一较长时期内, 地心海平面变化的最终速率将会显示一个非常不同的型态。

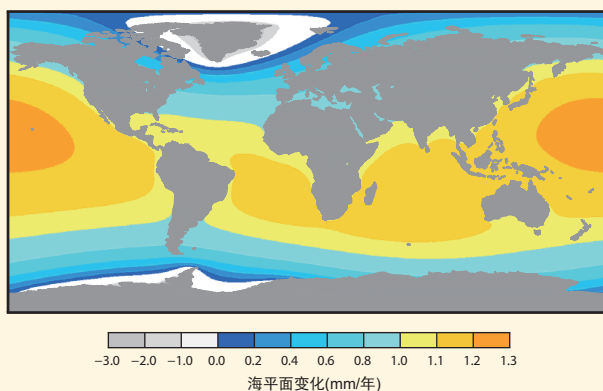
验潮仪是测量相对海平面的, 因此验潮仪观测包括了地表和海面垂直运动引起的海平面变化。在许多海岸带地区, 陆地垂直运动幅度小, 因而沿海和岛屿验潮站记录的长期海平面变化速率类似于全球平均值(见常见问题13.1, 图1给出的旧金山和帕果帕果两个验潮站的记录)。在某些区域, 陆地垂直运动对海平面有重要影响。例如, 在斯德哥尔摩记录的海平面稳定下降(常见问题13.1, 图1)是由于在上次冰期结束时(在~20,000至~9000年前之间)一块大的(>1千米厚)大陆冰盖融化后该地区陆地抬升所造成的。这种作为对古代冰盖融化的响应而正在发生的大陆构造变形是北美和欧亚大陆西北部区域海平面变化的一个显著贡献因子, 在上次冰盛期内这两个地区都曾被许多巨大冰盖所覆盖。

在其他区域, 这一过程还可导致陆地沉降, 反过来又使相对海平面上升, 正如夏洛特镇所出现的情况, 与全球平均上升速率相比, 已观测到此地海平面相对大幅度上升(常见问题13.1, 图1)。由于地球构造板块运动所引起的陆地垂直运动还可造成某些地区的海平面背离全球平均海平面趋势, 在那些地处靠近活跃隐没带的地区尤为突出, 在隐没带中一个构造板块滑落到另一板块之下。在安托法加斯塔的案例中(常见问题13.1, 图1), 这种现象似乎导致了陆地稳定抬升, 相对海平面因此下降。

除了垂直陆地运动对相对海平面变化有区域影响外, 某些过程可导致快速但极具局地性的陆地运动。例如, 相对于全球均值, 马尼拉的海平面出现比全球平均值更高的速度上升(常见问题13.1, 图1), 这主要因大规模汲取地下水从而导致陆地沉降。因自然和人为过程(如抽取地下水或碳氢化合物)造成的陆地沉降在许多沿海地区属于常见现象, 在大江大河三角州地区尤为如此。

人们通常假设, 冰川或格陵兰冰盖和南极冰盖的融化可引起统一的全球海平面上升, 就像向澡盆灌水那样。实际上, 由于各种过程(包括洋流、风、地球重力场和陆地高度变化), 上述融化可导致海平面出现区域性变化。例如, 用于模拟上述后两种过程的计算机模式预测, 在出现融冰的冰盖周边相对海平面将出现区域性下降, 因为冰与海水之间的重力引力减小, 随着冰体融化陆地趋于抬升(常见问题13.1, 图2)。但是, 在进一步远离冰盖融化的地区, 相对于全球平均值, 海平面上升会增强。

总之, 有各种过程可引起洋面和洋底高度发生变化, 最终导致在局地至区域尺度上海平面变化出现独特的空间分布型态。将这些过程结合起来可给出一个复杂的海平面总体变化型态, 由于每个过程的相对贡献发生变化, 海平面的总体变化型态也将随着时间推移而改变。全球平均变化是有用的单一值, 它可体现各种气候过程(如陆地冰融化和海洋变暖)的总体贡献, 并代表许多沿海地点的海平面变化的一个良好估值。但是, 与此同时, 一旦各种区域性过程最终发出一个强信号, 则有可能出现大幅度背离全球平均值的情况。



常见问题13.1, 图2 | 模式输出结果显示由于格陵兰冰盖和南极西部冰盖以每年0.5毫米的速度融化而引起的相对海平面变化(给出了每年上升1毫米的海平面上升全球平均值)。在靠近冰融化的地区, 模拟的海平面变化小于全球平均值, 但在远离这一地区的地方海平面变化却增强了。(改编自Milne等人, 2009)

常见问题

常见问题13.2 | 格陵兰和南极的冰盖在本世纪剩余时间里会继续对海平面变化作贡献吗？

格陵兰和南极东西部的冰盖是地球上最大的淡水水库。在地质时期及最近，它们对海平面变化都有贡献。冰量增加是通过积累(降雪)，而冰量损失是因为表面消融(主要是冰融化)，以及边缘冰体外流到漂浮的冰架或直接崩落到海洋。积累量增加使全球平均海平面下降，而表面消融和外流量的增加使之上升。物质通量的这些变化取决于一系列在冰盖内外、大气和海洋中的过程。然而，在本世纪，物质损失的源看来会超过物质增加的源，因此可预计对海平面上升的贡献持续为正。本节总结了目前关于此话题的研究，并全面预估了本世纪末(2081-2100年，相对于1986-2005)各种海平面贡献的大小，据称这些贡献在所有排放情景下有2/3的可能性。

几千年中，冰盖缓慢地进行水平移动，将净积累区(一般在内部高海拔区)的冰输送到净损失区(一般在低海拔外围和海岸周边)。如今，因表面消融，格陵兰损失了近一半的积累冰量，另一半因冰山崩塌。而南极积累冰量几乎全因冰崩和边缘冰架融化而损失。冰架是漂浮的，因此它们的损失对海平面的直接影响可忽略不计，虽然通过改变母冰架的物质平衡，它们可以间接影响海平面(见下文)。

在南极洲东部，一些研究使用卫星雷达测高法，显示出降雪有所增加，但是最近的大气模拟和卫星对重力变化的测量未发现降雪大幅增加。这种明显的不一致可能是因为相对较小的长期趋势被大的降雪年际变率掩盖。据估计，21世纪南极洲降雪大幅增加，主要由于大气变暖使更多水分得以进入极地，其次可能是因为大气环流的区域变化。对整个南极冰盖而言，该过程预计贡献0-70毫米的海平面下降。

目前，南极洲周围的空气温度太低，因此不可能出现大规模表面消融。然而，实地观测和卫星观测表明，局部海岸地区冰量外流会增加，表现为冰面降低。这些地区(南极洲西部的派恩岛和思韦茨冰川、东部的托腾冰川和库克冰川)均位于朝向南极洲大陆架边缘的千米深的基岩槽内。研究认为，海洋循环的区域变化使暖水与漂浮的冰架相遇，从而导致外流量的增加。

在更北面的南极半岛，关于冰架崩塌的记录在案充分。崩塌似乎与最近几十年大气变暖引起的表面融化增加有关。冰架崩塌后，流入其中的冰川变薄，对海平面有微小却积极的影响，后来类似的事件也会对南极半岛有类似的影响。对21世纪大气温度变化的区域预估表明，虽然这些冰架可能会受到未来海洋变化的威胁，这个过程可能不会影响南极洲东、西部大型冰架的稳定(见下文)。

过去几十年南极冰盖对海平面贡献的估计差异很大，但最近在协调这些观测上取得了极大进步。有力迹象显示，外流量增加(主要在南极洲西部)目前超过了雪量积累的增加(主要在南极洲东部)，这表明海平面上升的趋势。必须改进模拟冰流的模型，这样，在预估21世纪外流量，尤其是预估接地线(浮冰和沉积在基岩上的冰的分隔线)的变化、冰架和海洋的相互作用时，结果会更可靠，更有信心。“海洋冰盖不稳定性”的概念基于如下想法：如果接地线上的冰更厚且流速更快，那么沉积在海平面以下基岩上的冰盖外流量就增加。在朝冰盖内部下倾的基岩上，这产生了一种恶性循环，外流量增加使接地线上的冰变薄、浮起。而随着接地线退缩至更厚的冰，反过来又使外流量增加。随着接地线沿着向冰盖内部深入的槽和洋盆退缩，这种反馈可能导致冰盖迅速损失。

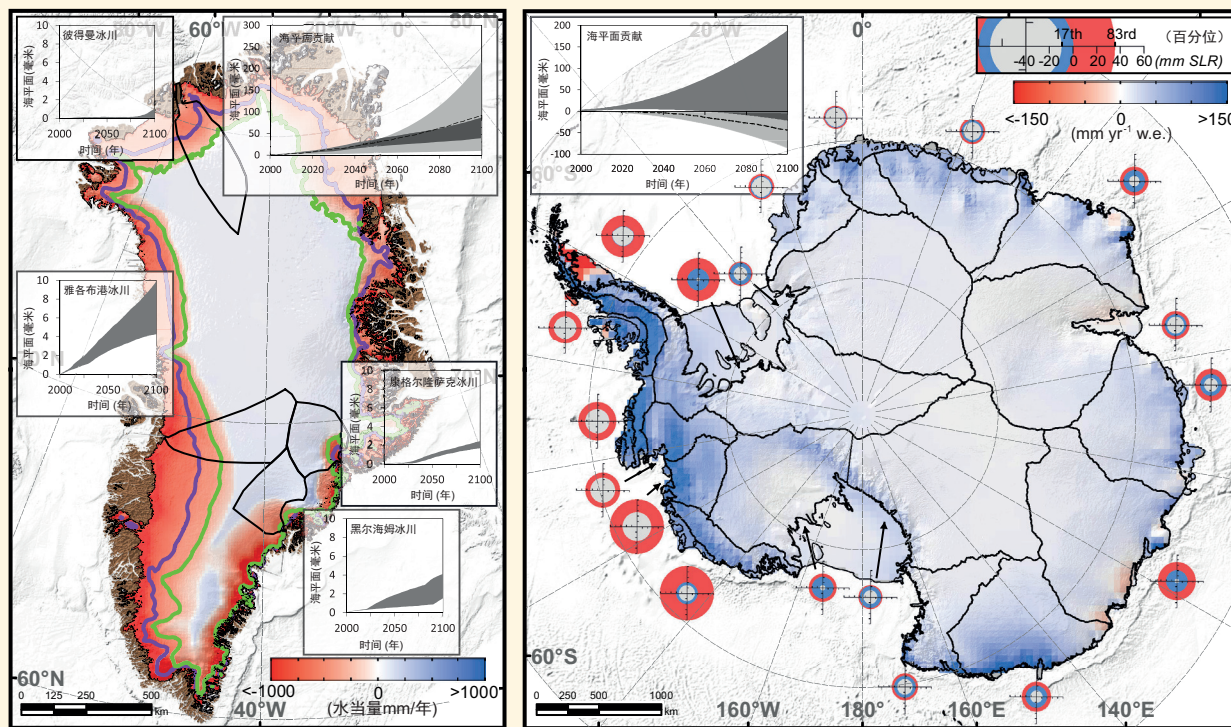
未来气候强迫可能引起这种不稳定的崩塌，之后不管气候如何，崩塌都将继续。对南极洲西部的单个基岩槽和东部部分地区而言，这种潜在的崩塌可能在几个世纪后发生。更多研究着眼于认识这个理论上的概念对冰盖的重要性。如果海洋不稳定的影响重大，海平面可能上升，但是目前没有充分证据能够明确识别出这种不稳定退缩的预兆。外流量变化到2100年预计贡献-20(即下降)至185毫米的海平面上升，但是海洋冰盖不稳定的不确定影响可能使该数值增加几分米。总的来说，降雪增加只能部分抵消外流量增加导致的海平面上升。(接下页)

常见问题

常见问题13.2(续)

在格陵兰岛，表面消融和外流增加引起的物质损失可能是近期内积累增量的主导趋势。表面消融造成的物质损失估量自20世纪90年代初期以来已翻了一番。预计这种趋势在下一世纪将继续，因为会有更多冰盖发生更长时间的表面消融。的确，对21世纪的预估表明，物质损失增加将超过积累的缓慢增加。冰盖高处积雪中融水重新冻结对大气变暖和物质损失之间的联系有重要的(虽然可能是暂时的)抑制作用。

虽然在格陵兰观测到的溢出冰川的响应既复杂又非常多变，但是过去十年,许多主要的溢出冰川崩塌次数大幅增加，造成相当可观的额外物质损失。该现象似乎与暖水侵入格陵兰近海海洋相关，但不清楚其是否关乎年代际变率，如北大西洋涛动或与由温室气体导致的变暖相关的长期趋势。因此，预估该现象对21世纪外流量的影响十分困难，但它强调了外流对海洋变暖明显具有敏感性。融水越多，对冰盖底床的润滑作用越大，冰块温度越高，越易变形，这样冰的流速也就越快。但这与最近外流量增加的联系尚不明确。表面消融和积累的净差额的变化预估在2081-2100年(相对于1986-2005年)将贡献10-160毫米的海平面上升，而外流量增加预估会再贡献10-70毫米(表13.5)。(接下页)



常见问题13.2, 图1 | 综合说明对2100年SMB和外流量的变化预估, (a) 为格陵兰冰盖, (b) 为南极冰盖。图中彩色代表21世纪初期和末期间的SMB变化预估, 是在未来变暖情景A1B (南极)和 RCP4.5 (格陵兰)下使用RACMO2区域大气气候模式得出的。对格陵兰岛而言, 两个时间段内平均平衡线位置分别用紫色和绿色表示。冰盖边缘和接地线用黑线表示, 代表冰盖部分。嵌入图显示了格陵兰的四个主要溢出冰川的流线模拟结果, 而彩色圆环反映了南极洲外流量的预估变化, 这是基于对观测到的趋势进行概率外推的结果。每个圆环和外部和内部半径分别代表贡献的2/3概率范围的上限和下限(右上方为标尺); 红色代表物质损失(海平面上升), 蓝色代表物质获得(海平面下降)。各冰盖对海平面的贡献显示在地图上方的嵌入图里, 浅灰色代表SMB(虚线代表用以产生SMB地图的模拟实验), 深灰色代表外流量。所有预估适用于所有情景下的2/3概率范围。

常见问题13.2(续)

虽然在格陵兰观测到的溢出冰川的响应既复杂又非常多变，但是过去十年许多主要的溢出冰川崩塌次数大幅增加，造成相当可观的额外物质损失。该现象似乎与暖水侵入格陵兰近海海洋相关，但不清楚其是否关乎年代际变率，如北大西洋涛动或与由温室气体导致的变暖相关的长期趋势。因此，预估该现象对21世纪外流量的影响十分困难，但它强调了外流对海洋变暖明显具有敏感性。融水越多，对冰盖底床的润滑作用越大，冰块温度越高，越易变形，这样冰的流速也就越快。但这与最近外流量增加的联系尚不明确。表面消融和积累的净差额的变化预估在2081-2100年（相对于1986-2005年）将贡献10-160毫米的海平面上升，而外流量增加预估会再贡献10-70毫米（表13.5）。

过去十几年内格陵兰冰盖对GMSL上升有贡献，预计这种趋势在本世纪会得到加强。与南极洲不同，在格陵兰岛没有可能导致21世纪海平面骤升的、已知的大尺度冰盖不稳定现象。然而，可能存在一个阈值，在数百年的时间尺度下，持续的冰盖收缩可能变得不可逆，即使气候经过百年时间尺度返回到工业化前期状态。虽然未来几十年冰山冰崩引起的冰量损失可能增加，但到了冰块边缘退缩至海平面上、有大量冰盖沉积的基岩时，这个过程最终就会停止。

常见问题

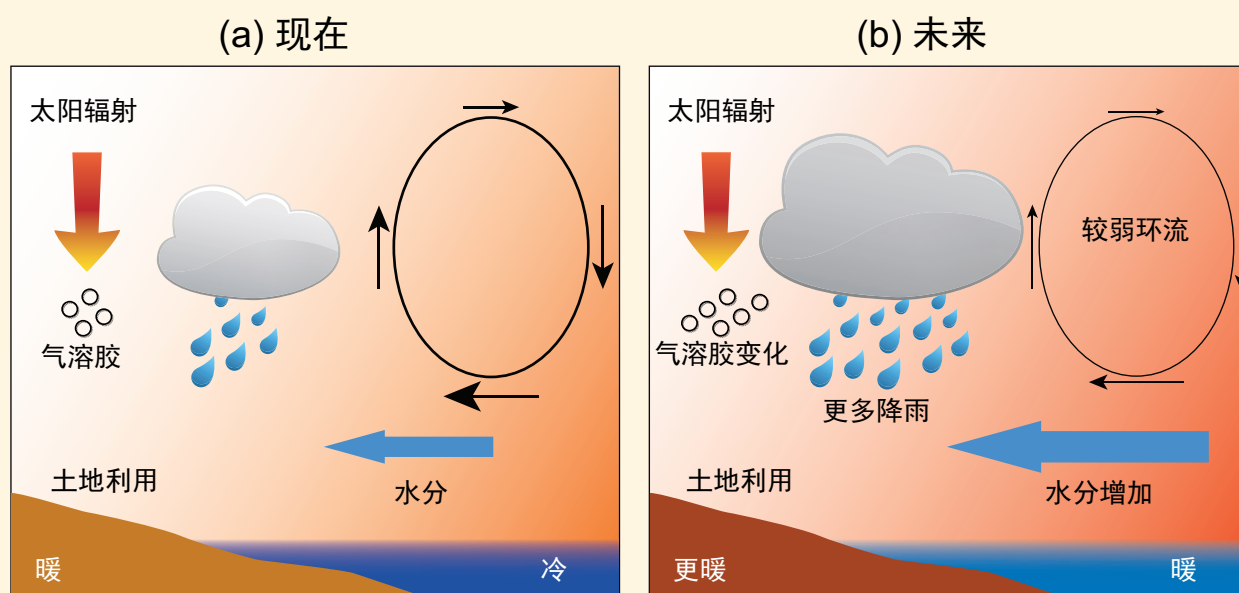
常见问题14.1 | 气候变化如何影响季风？

季风是热带地区季节性气候变化的最重要方式，并且在很多地区是每年大部分降水量的始作俑者。季风的强度和时间与大气中的水分含量、海陆温度对比、土地覆盖和利用、大气气溶胶负荷及其他因素有关。总体而言，季风降雨预计在未来将更加强烈，并影响更多地区，因为大气中的水分含量随温度的增加而增加。然而，气候变化对区域季风强度和变率的局地影响是复杂的，更不明朗。

季风雨在所有热带大陆降落：亚洲、澳洲、美洲和非洲。季风环流是由陆地和海洋之间的温度差驱动，而这个温度差随太阳加热的分布而发生季节性变化。降雨的持续时间和数量取决于空气中的水分含量以及大气环流的结构和强度。陆地和海洋的区域分布与地形一样也发挥了一定的作用。例如，青藏高原通过积雪和表面加热的变化，调节复杂的亚洲季风系统的强度。就像在印度西南部一样，潮湿的向岸风越过高山，使季风降雨加剧。在这些山的背风面，季风雨会减弱。

自从20世纪70年代后期，东亚夏季风已在减弱，而且不像早先时期延伸到遥远的北部，这是大气环流变化的结果。反之，这又导致了北方中国的干旱加重，但在长江流域更南部却发生了洪水。相比之下，自从20世纪中叶以来，印度-澳大利亚和西太平洋季风系统显示没有一致的趋势，但受到了厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的大力调节。同样，过去几十年南美季风系统观测到的变化与ENSO的变率密切相关。北美季风系统发展趋势的证据是有限的，但是已经观测到主要季风区的北部有雨量加大的趋势。印度或非洲季风行为没有观测到系统的长期趋势。

地表变暖比洋面更加迅速，因此在大多数地区表面温度对比增大。然而，热带大气的能量平衡约束导致气候变暖，因此热带大气翻转环流随之而平均减慢。大气循环的这些变化导致季风的强度、面积和时序的区域变化。关于气候变化影响季风还有一些其他影响。表面加热随着太阳辐射吸收的强度而变化，而这本身又受到改变地表反射率（反照率）的土地利用变化的影响。此外，改变空气污染等大气气溶胶负荷将影响太阳辐射到达地面的量，而这可以通过改变地表的夏季太阳加热而改变季风环流。另一方面，气溶胶吸收太阳辐射将使大气升温，从而改变大气的加热分布。（接下页）



常见问题14.2, 图1 | 预估21世纪的地表气温和降雨量的年平均值和年极端值(陆地)的变化：(a)每摄氏度全球平均变化带来的平均表面温度(b)每摄氏度全球平均最高温度带来的每日最高温度的第90个百分点(c)平均降水量(每摄氏度全球平均温度变化，单位是%) (d)降水量超过第95个百分点的天数比例。资料来源：RCP4.5情景下CMIP5模拟图(a)和(c)，1986年至2005年和2081年至2100年预估均值变化(见第12章，图12.41)；图(b)和(d)，1980年至1999年和2081年至2100年土地预估极值变化(改编自Orlowsky和Seneviratne的图7和12, 2012)。

常见问题

常见问题14.1 (续)

气候变化对季风最强的影响是与大气变暖相关的大气水分增加，从而增加季风降雨总量，即便季风环流的强度减弱或没有变化。

气候模型对21世纪的预估显示总季风降雨量将有所增加，主要是由于大气中的水分含量增加。随着热带地区的总体向极扩展，受季风影响的总表面积预估将会有所增加。气候模型预估，根据不同的情景，全球季风降雨量将从5%增加到约15%。虽然热带季风总降雨量会有所增加，但有些地区由于热带风环流减弱而导致季风降雨量将减少。季风爆发的日期可能会提前或变化不大，而季风撤退的日期可能会推迟，导致季风季节延长。

在世界上的许多地方，未来季风强度和时间的区域发展趋势仍不确定。许多热带地区季风的年际变化受ENSO的影响。ENSO在未来将如何变化 - 及其对季风的影响会如何改变 - 也仍然不明朗。然而，预估季风降雨量的整体增加表明，大部分地区极端降雨事件的风险也将相应增加。

常见问题

常见问题14.2 | 区域气候的预测与全球平均气候预测的关系如何？

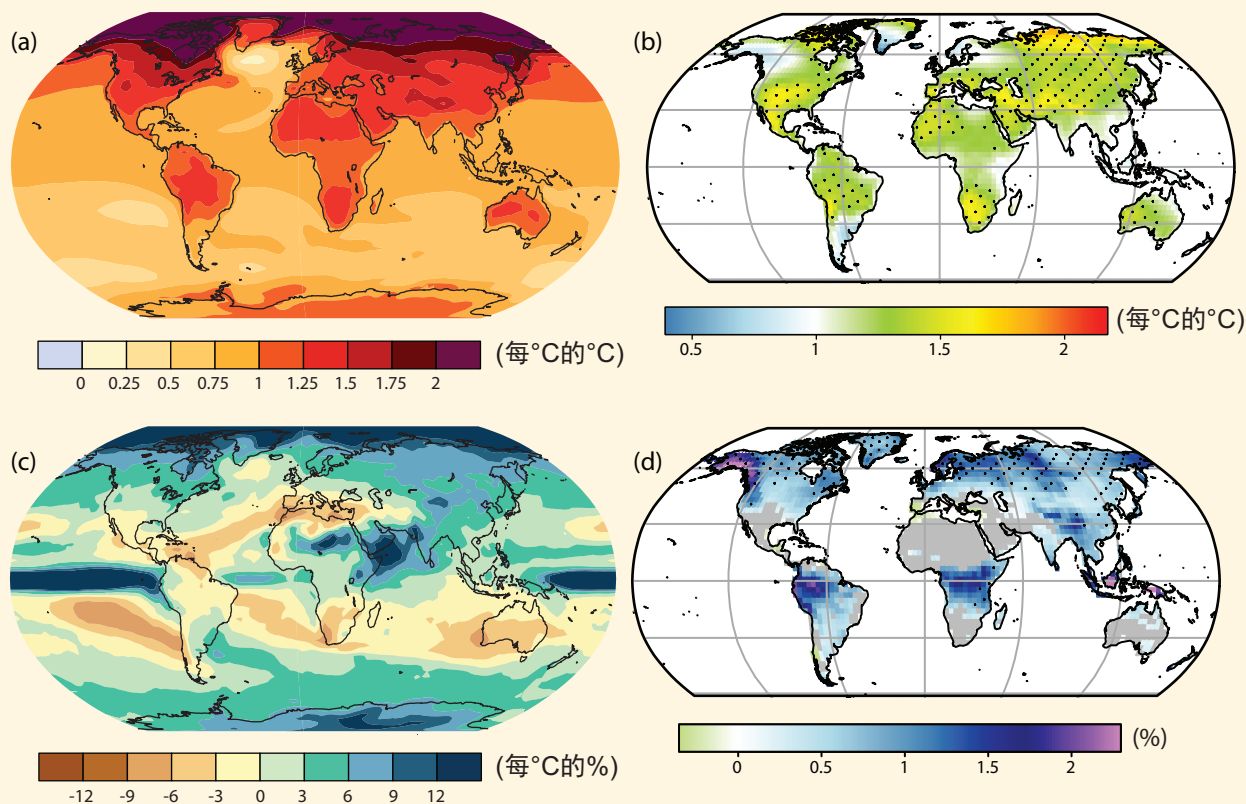
区域气候变化与全球平均变化之间的关系很复杂。区域气候变化因地点不同而有很大差异，因而对全球尺度影响的变化有不同的响应。事实上，全球平均变化是对各种区域气候响应的简易汇总。

热量和水分及其变化并非均匀地分布在全球各地，原因有以下几个：

- 外部强迫根据空间而变化(例如，太阳辐射取决于纬度，气溶胶排放具有局地来源，土地利用根据地区而变化等)。
- 地表条件根据空间而变化，例如陆地/海洋对比、地形、海洋表面温度、土壤水分含量。
- 天气系统和海洋洋流可在不同地区重新分配热量和水分。

天气系统与区域性重要的气候现象相关，如季风、热带辐合带、风暴路径和气候变率的重要模态(如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北大西洋涛动(NAO)、南半球环状模态(SAM)等)。除了调节区域气候变暖，一些气候现象也预计在未来会发生变化，从而导致对区域气候的进一步影响(见表14.3)。

表面温度和降雨变化的预测显示出较大的地区性差异(常见问题14.2, 图1)。增强的表面增温预计将在高纬度大陆地区和北冰洋发生，而其他海洋和低纬度地区的变化则更接近于全球平均值(常见问题14.2, 图1a)。例如，靠近北美五大湖区的升温预计将高于全球平均变暖的50%。类似的大型地区性差异也可见于更极端的温度的预期变化(常见问题14.2, 图1b)。预计的降雨量变化甚至比温度变化更易因地区而异(常见问题14.2, 图1c, d)，这些变化由气候现象的调节所造成，如季风和热带辐合区。预计近赤道纬度地区的降水量将增加，而亚热带地区的极向边缘地区的平均降雨量将减少。预计高纬度地区的平均降水量将增加，特别是来自温带气旋的极端降雨量。(接下页)



常见问题14.2, 图1 | 预估21世纪的地表气温和降雨量的年平均值和年极端值(陆地)的变化：(a)每摄氏度全球平均变化带来的平均表面温度 (b)每摄氏度全球平均最高温度带来的每日最高温度的第90个百分位 (c)平均降水量(每摄氏度全球平均温度变化，单位是%) (d)降水量超过第95个百分位的天数比例。资料来源：RCP4.5情景下CMIP5模拟图(a)和(c)，1986年至2005年和2081年至2100年预估均值变化(见第12章，图12.41)；图(b)和(d)，1980年至1999年和2081年至2100年土地预估极值变化(改编自Orlowsky和Seneviratne的图7和12, 2012)。

常见问题14.2 (续)

极地地区表明区域气候变化过程的复杂性。北极升温预计将超过全球平均值，主要是因为冰雪的融化产生了一种区域性反馈使来自太阳的热量更多被吸收。这导致进一步的升温，从而融化更多的冰雪。然而，南极大陆及周边海洋预期的变暖没有那么明显，部分是因为南半球环状模态的积极趋势更强。近几十年来，受南极上空平流层臭氧减少以及与温室气体浓度增加相关的大气温度结构变化所带来的综合效应驱动，中纬度南部海洋上的西风已有所增强。南半球环状模态的此类变化可被气候模型充分捕获，并具有减少向南极大陆输送大气热量的作用。尽管如此，南极半岛仍然在快速升温，因为它向北延伸够远，受到了西风带的暖湿气团的影响。