

3

气候变化与水资源的关联： 影响和响应

3.1 观测到的气候变化影响

3.1.1 观测到的冰冻圈变化的影响

冰冻圈变化的影响已有文献刊载，涉及几乎所有冰冻圈部分，有确凿证据表明总体上冰冻圈的变化是对因变暖增强，雪冰物质减少的响应。

3.1.1.1 山地冰川和冰帽、冰盖和冰架

山地冰川和冰帽的变化效应已在文献中记载，如在径流方面(Kaser等，2003年；Box等，2006年)，在改变灾害条件方面(Haerberli和Burn，2002年)和在海洋淡化方面(Bindoff等，2007年)。也有新的证据表明由于最近阿拉斯加冰川融化使得目前地壳出现抬升(Larsen等，2005年)。融化加强，以及冰川融化季节延长，首先可导致江河径流和流量峰值增加，而在较长时间(十年至百年尺度)内，预计冰川径流将减少(Jansson等，2003年)。最近几十年因冰川融化加剧造成径流增加的证据已在安第斯山脉热带地区和阿尔卑斯山脉地区被检测到。[WGI 4.6.2; WGII 1.3.1.1]

随着几个陡峭山脉的冰川从突出的小冰期(LIA)冰碛退缩而正在形成冰川湖，包括喜马拉雅山脉(见框5.4)、安第斯山脉和阿尔卑斯山脉。埋藏冰的解冻还威胁小冰期冰碛的稳定。这些湖泊因此很有可能引起冰川湖洪水的爆发(GLOF)。各国政府机构开展了广泛的安全工作，有几个湖泊现在加固堤坝，或排水泄洪；但需要不断保持警惕，因为喜马拉雅山地区(Yamada，1998年)和安第斯山地区(Ames，1998年)仍存在数以十计有潜在危险的冰川湖，同时在世界其它山脉地区还有多个类似的湖泊。[WGII 1.3.1.1]

冰川退缩对景观造成了惊人的变化，影响了世界上许多山地地区的生活条件和当地旅游业(Watson和Haerberli，2004年；Mölg等，2005年)。图5.10是Chacaltaya冰川退缩对当地景观和滑雪产业的影响。气候变暖使得冰川的春夏融化加剧，特别是在消融地区，同时季节性积雪的损失使表面冰隙更多地暴露，例如，这反过来又可以影响冰雪跑道的运营，正如“南极半岛”的报道所述(Rivera等，2005年)。[WGII 1.3.1.1]

3.1.1.2 积雪和冻土

由于积雪范围在时空上均有减少，过去65年期间北美洲和欧亚大陆北部地区春季江河流量高峰发生时间提前了1-2周。也有证据表明欧亚北部地区和北美洲冬季基流有所增加，以及根据测量结果，

低高度地区积雪有减少的趋势，从而影响了滑雪区。[WGII 1.3.1.1]

季节性冻土和多年冻土面积的缩小以及活跃层厚度的增加已导致了：

- 湖泊因多年冻土中的水被排出而消失，已在阿拉斯加(Yoshikawa和Hinzman，2003年)和西伯利亚(见图5.12)(Smith等，2005年)检测到这种后果；
- 阿拉斯加冻土公路上车辆能够行驶的天数减少；
- 对北极地区海岸侵蚀有所增加(例如Beaulieu和Allard，2003年)。[WGII 1.3.1.1，第15章]

3.1.2 水文与水资源

3.1.2.1 地表水系和地下水系的变化

自《第三次评估报告》以来，关于20世纪江河流量趋势方面已有过许多研究，尺度从集水区到全球不等。部分此类研究在江河流量某些指标中检测到显著的趋势，部分研究表明在统计上，与温度或降水有着显著联系；但是没有得到全球均一性趋势的报告。然而，许多研究没有发现趋势，或已无法区分温度和降水变化的影响与人类干预集水区所产生的影响，诸如土地利用变化和水库建设。江河流量的逐年变化在某些区域还受到大尺度大气环流型态的强烈影响，这些环流型态与ENSO、NAO和其它变率系统有关，这些系统的时间尺度是从十年到几十年不等。[WGII 1.3.2.1]

在全球尺度，有证据表明年径流变化型态有广泛的一致性，部分区域有所增加(Tao等，2003年a、b，中国；Hyvarinen，2003年，芬兰；Walter等，2004年，美国本土)，特别是在高纬度地区，而其它地区有所减少，如西非部分地区、欧洲南部和拉美南部(Milly等，2005年)。Labat等(2004年)认为在20世纪期间温度每升高1°C，全球径流总量则增加4%，区域变化也是围绕着这一趋势，但是这一观点受到了质疑，因为非气候驱动因素对径流有影响，资料点数量较少会造成偏差(Legates等，2005年)。Gedney等(2006年)提供了第一个临时证据，表明CO₂强迫可导致径流增加，因为CO₂浓度上升可对植物生理产生影响，虽然其它表明这种关系的证据还难以找到。探索趋势所用的方法也能影响结果，因为忽略江河集水区之间交叉相关性的影响可导致对表明显著趋势的集水区数量的过高估计(Douglas等，2000年)。[WGII 1.3.2.1]

浅含水层的地下流量是水分循环的一部分，而且因水回灌过程(Chen等，2002年)而受到气候变率和变化的影响，此外还受到许多地方人类干预的影响(Petheram等，2001年)。^[WGII 1.3.2.1]世界各地许多蓄水层的地下水位表明在过去几十年中呈下降趋势^[WGII 3.2, 10.4.2]，但是这一般是由于地下水的抽取超过了地下水的回灌速度，而不是由于气候原因造成的地下水回灌减少。也许在有些区域，如澳大利亚西南部，地下水抽取量的增加不仅是因为需水量的增加，而且是因为气候造成了从地表水向地下回灌量减少(西澳大利亚政府，2003年)。在加拿大温尼伯附近的碳酸盐含水层上层，浅井流量仪观测表明无明显的趋势，但是展现了与年温度和降水相关的3—4年的变化(Ferguson和George，2003年)。由于缺乏资料，以及地下水系对回灌条件变化的响应非常缓慢，因此尚未观测到与气候有关的地下水回灌变化。^[WGII 1.3.2, 3.2]

目前，尚未发现湖泊水位有全球一致的趋势。虽然蒙古和中国(新疆)的一些湖泊水位因雪冰融化增加而有所上升，但是中国(青海)、澳大利亚、非洲(津巴布韦、赞比亚和马拉维)、北美洲(北达科他)和欧洲(意大利中部)的其它湖泊水位由于干旱、变暖和人类活动的综合影响而有所下降。在北极多年冻土区，最近因气候变暖发生融化而临时形成了湖泊，又因多年冻土退化而迅速出现冰的流失(例如Smith等，2005年)。北极冰架上形成的一个湖泊(即冰架湖¹²)。有报告指出了类似的影响，冰架崩塌后，该湖便消失了(Mueller等，2003年)。Le Treut等对多年冻土和冰架湖作了详细的论述(2007)。^[WGII 1.3.2.1]

3.1.2.2 水质

近几十年的观测表明湖泊与江河水温变暖与气候有关。^[WGII 1.3.2]因此，淡水生态系统在物种组成、生物丰度、生产力和物候变迁(包括鱼类迁移提前)发生了变化。^[WGII 1.3.4]另外，由于变暖，许多湖泊呈现出长期的层结，表层养分浓度下降^[WGII 1.3.2]，深层的耗氧期延长。^[WGII Box 4.1]由于强烈的人为影响与气候变化无关，因此尚无证据显示湖泊、江河和地下水中其它水质参数出现与气候有关的一致性趋势(例如：盐度、病原体或养分)。^[WGII 3.2]

湖泊的热结构

有报告指出，响应于较暖的环境，湖泊水温有所升高(表3.1)。冰盖期有所缩短，河冰、湖冰厚度有所下降，在第2.1.2节和Le Treut等(2007年)对此作了

论述。浮游植物动力学和初级生产力随着湖泊的物理变化也已改变。^[WGII 1.3.4.4, 图1.2, 表1.6]自1960年以来，欧洲、北美洲和亚洲湖泊、河面水温度已升高0.2°C至2.0°C。自1900年以来，随着地表水变暖，东非大的湖泊(Edward、Albert、Kivu、Victoria、Tanganyika和Malawi)的深水温度(可反映长期趋势)升高了0.2°C至0.7°C。水温升高，无冰期延长，对湖泊的热层结和内部流体力学产生了影响。在温暖年份，地表水温度升高，可蒸发水的损失增加，夏季层结出现时间提前，温跃层变浅。在欧洲和北美的几个湖泊中，层结期提前了20天，延长了2—3周，同时热稳定性有所增加。^[WGII 1.3.2.3]

化学

层结增加可减少整个温跃层的水运动，抑制上涌和混合，影响对食物链的基本养分供应。欧洲和东非湖泊中，地表水养份下降，深水浓度相应上升，这是因为热稳定性加大而使上涌减少所致。许多湖泊、江河的集水区出现了硫酸盐、盐基离子和二氧化硅等浓度的增加，加大了碱度和电导率，因为硅酸盐、钙和镁硫酸盐或碳酸盐岩增加了风化过程。相比之下，当温度升高，促进一些较高山地生态系统的植被生长和土壤发育时，由于有机酸输入的增加，碱度有所下降(Karst-Riddoch等，2005年)。冰川融化增加了有机氯(已经通过大气传输到冰川并储存其中)向加拿大亚高山湖的输入(Blais等，2001年)。^[WGII 1.3.2.3]

温度升高还影响到湖中化学过程(表3.1；关于已观测到的其它化学特性的变化，另见WGII 表SM1.3)。浮游植物生产力有所增加，溶解的无机氮已下降(Sommaruga-Wograth等，1997年；Rogora等，2003年)，湖中碱度生成加强，软水湖中pH值上升(Psenner和Schmidt，1992年)。温度升高，溶解度下降可促使铝浓度显著下降11%—13%(Vesely等，2003年)，而湖泊水温升高，汞甲基化过程加剧，鱼的汞含量上升(Bodaly等，1993年)。俄罗斯贝加尔湖中与区域气候变暖有关的硅含量减少并已有文件记载。日本27条河流的水质资料也表明由于气温升高，其化学和生物特性均恶化。^[WGII 1.3.2.3]

侵蚀和沉积

在世界许多地区，水侵蚀有所增加，这主要是由于人为改变土地利用所带来的后果。由于缺乏资料，没有证据可以支持或反对过去出现的侵蚀和输沙变化与气候有关。^[WGII 3.2]

¹²位于冰架下的水体，主要是淡水。

3.1.2.3 洪水

各种气候和非气候过程影响着洪水过程，导致江河洪涝、山洪暴发、市区洪涝、污水漫溢、冰川湖突发洪水(GLOF，见框5.4)和海岸带洪水。这些致洪过程包括强降水和/或持续降水、融雪、溃坝、由于冰凌或滑坡或风暴造成的水输送量减少。洪水取决于降水强度、降水量、降水时间、降水相(雨或雪)，取决于江河的前期条件及其排水流域(如雪/冰的存在、土壤特性和现状(冻结与否、是否饱和)、湿度、雪/冰融化速度和时间、城市化、(是否建有堤防、水坝和水库)。人类对洪泛平原的侵占，以及缺乏防洪应急计划，增加了破坏潜力。[WGII 3.4.3] 已观测到的降水强度增加及所观测到的其它气候变化，如：欧洲冬季西风天气型态的增加，导致了多雨的低气压系统，常常引发洪水(Kron和Berz, 2007年)，这表明气候变化可能已经影响了洪水的强度和频率。[WGII 3.2] 《第四次评估报告》第一工作组的决策者摘要的结论是20世纪后期大部分地区强降水事件的频率可能增加，并且多半可能人类对这一趋势做出了贡献。[WGI 表SPM-2]

在全球，过去10年(1996-2005)的内陆洪水灾害数量是1950年至1980年期间每十年发生洪水数量的两倍，同时相关的经济损失增加了五倍(Kron和

Berz, 2007年)。洪水损失增加趋势的主驱动力是社会经济因素，如经济增长、人口增多和财富增长并集中在脆弱地区以及土地利用变化。洪水是许多地区报道最多的自然灾害事件，每年平均受灾人口为1.4亿(WDR, 2003年, 2004年)。在孟加拉国，在1998年发生洪水期间，大约70%的国土被淹(而平均值为20–25%)(Mirza, 2003年；Clarke和King, 2004年)。[WGII 3.2]

由于洪水损失的增长速度比人口或经济增长速度快，所以必须考虑其它因素，包括气候变化(Mills, 2005年)。有举足轻重的观测证据表明水分循环正在加速(Huntington, 2006年)。[WGII 3.4.3] 强降水事件的频率有所增加，这与气候变暖以及与所观测到的大气水汽增加相一致。[WGI SPM, 3.8, 3.9] 但是，在高流量趋势文献中却无有关各处均出现增加的记录。虽然Milly等(2002年)根据对大流域资料所作的分析发现，全球大部分地区“大”洪水频率明显增加(重现期>100年)，后续研究所提供的证据则没有如此广泛。Kundzewicz等(2005年)发现(27个地方)大洪水有所增加，(31个地方)有所减少，全球范围所研究的195个集水区中余下的137个未发现变化趋势。[WGII 1.3.2.2]

表3.1: 径流/溪流、湖泊水位和洪水/干旱变化观测。[WGII 表1.3]

环境因素	观测到的变化	时间段	地点
径流/溪流	每年增加5%，冬季增加25–90%，冬季基流增加是由于多年冻土融化、解冻增加	1935–1999	北极地区排水流域：Ob, Lena, Yenisey, Mackenzie
	高峰溪流提前1–2周，由于气候变暖驱动融雪提前	1936–2000	北美西部、新英格兰、加拿大、欧亚大陆北部
洪水	灾害性洪水频率增加(0.5–1%)，由于河冰破裂和大雨提前	近些年	俄罗斯北极地区河流
干旱	干旱年最大日溪流量下降29%，由于温度升高，蒸发增加，降水未变	1847–1996	加拿大南部
	由于与近年热带太平洋西部和热带印度洋西部变暖有关的夏季干燥，异常温暖	1998–2004	美国西部
水温	湖泊温度升高0.1–1.5°C	40年	欧洲、北美、亚洲(100个台站)
	湖泊温度(深水)升高0.2–0.7°C	100年	东非(6个台站)
水化学	湖泊和河流分层增加，生长期延长，养分减少	100年	北美、欧洲、东欧、东非(8个台站)
	增加了湖泊和河流集水区的风化或内部处理	10–20年	北美、欧洲(88个台站)

3.1.2.4 干旱

干旱一词可指气象干旱(降水量远低于平均值)、水文干旱(江河、湖泊和地下水的低流量和低水位)、农业干旱(土壤水分含量低)和环境干旱(上述现象总合)。干旱的社会经济影响可由于自然条件与人类因素之间的相互作用而发生,如改变土地用途、改变土地覆盖以及改变需水量及用途。过量抽水可加剧干旱的影响。[WGII 3.4.3]

自20世纪70年代以来,干旱已变得更为常见,特别是在热带和亚热带地区。《第四次评估报告》第一工作组的决策者摘要的结论是自20世纪70年代以来,受干旱影响的面积*可能*已增加,这一趋势多半*可能*是人为因素所致。[WGI 表SPM-2] 陆地降水减少,温度增加,从而加强了蒸散,减少了土壤水分,这些是造成更多地区出现干旱的重要因素,如同按Palmer干旱严重程度指数(PDSI)测量的结果(Dai等,2004b)。[WGII 3.3.4]

发生干旱的区域似乎在很大程度上是由海面温度变化所确定的,尤其是在热带地区,而海面温度变化又与大气环流和降水变化有关。在美国西部,积雪减少及其后的土壤水分减少也似乎成为因素。在澳大利亚和欧洲,伴随最近发生的干旱所出现的高温和热浪具有极端性,与全球气候变暖有着直接联系。[WGI 3.ES, 3.3.4]

Dai等(2004b)使用PDSI发现北半球陆地自20世纪50年代中期以来出现大面积干旱的趋势,欧亚大陆大部、非洲北部、加拿大和阿拉斯加普遍变得干旱(图3.1)。在南半球,陆地表面在20世纪70年代湿润,而在20世纪60年代和90年代相对干旱,1974年到1998年出现干旱趋势,虽然1948年至2002年整个时期的干旱趋势不大。近几十年的陆地降水减少是造成干旱趋势的主要原因,虽然过去20-30年大范围地表变暖*可能*已助长了这种干旱。就全球而言,自20世纪70年代以来,非常干旱的地区(定义是陆地地区PDSI小于-3.0)增加了一倍以上(从~12%至30%),由于ENSO原因,陆上降水减少,80年代初期有大幅度增加,其后的降水增加主要是由于地表变暖所致(Dai等,2004b)。[WGI 3.3.4]

干旱影响雨养农业生产以及生活、工业和农业供水。一些干旱、半干旱和半湿润地区,如澳大利亚 [WGII 11.2.1]、美国西部和加拿大南部 [WGII 14.2.1]以及萨赫勒地区(Nicholson, 2005年)更多地发生了为时多年、更大的干旱。[WGII 3.2]

2003年发生在欧洲的热浪可归因于全球气候变暖(Schär等,2004年),同时造成年降水量下降达300毫米。这次干旱估计造成欧洲陆地生态系统的初级生产力总值下降了30%(Ciais等,2005年)。许多主要河流(如波河、莱茵河、卢瓦尔河和多瑙河)达到创纪录的低水位,导致内河航运、灌溉及电厂冷却等的中断(Beniston和Diaz,2004年; Zebisch等,2005年)。阿尔卑斯山地区冰川极度融化未使多瑙河和莱茵河水流降至更低(Fink等,2004年)。[WGII 12.6.1]

3.2 未来由于气候变化而导致可用水量和水需求的变化

3.2.1 未来淡水系统的气候驱动因子

可用水量的最主要气候驱动因子是降水、温度和蒸发量(取决于地面净辐射、大气湿度、风速和温度)。温度对积雪为主的流域和海岸带地区尤为重要,对海岸带地区之所以重要是由于温度对海平面的影响。(由于水的热膨胀作用,海平面可整体上升)。[WGII 3.3.1]

关于预估的水平衡中上述分量的变化,见第2.3节。简言之,预估每年整个陆地江河总径流量将会增加,尽管是有些区域径流量显著增加,有些地区显著减少。但是对增加的径流量却无法充分利用,除非是有足够的基础设施能收集和存储额外的水。在海洋上,预估“蒸发减去降水”项将会有净增加。

3.2.1.1 地下水

气候变化影响地下水的回灌率(即:可再生的地下水资源)和地下水位的深度。然而,对发达国家和发展中国家当前的回灌和水位情况了解不多;有关气候变化对地下水的未来影响或有关地下水与地表水的相互作用的研究甚少。在高纬度地区,多年冻土的解冻可使地下水水位和水质发生变化,因为与地表水的耦合有所增加。[WGII 15.4.1] 由于许多地下水变成地表水,又从地表水回灌成地下水,因此预计地表水流系将影响地下水。在湿润地区,降水变率增加可减少地下水的回灌量,因为强降水事件频率的增加可使土壤透支其渗透能力的频率相应增加。

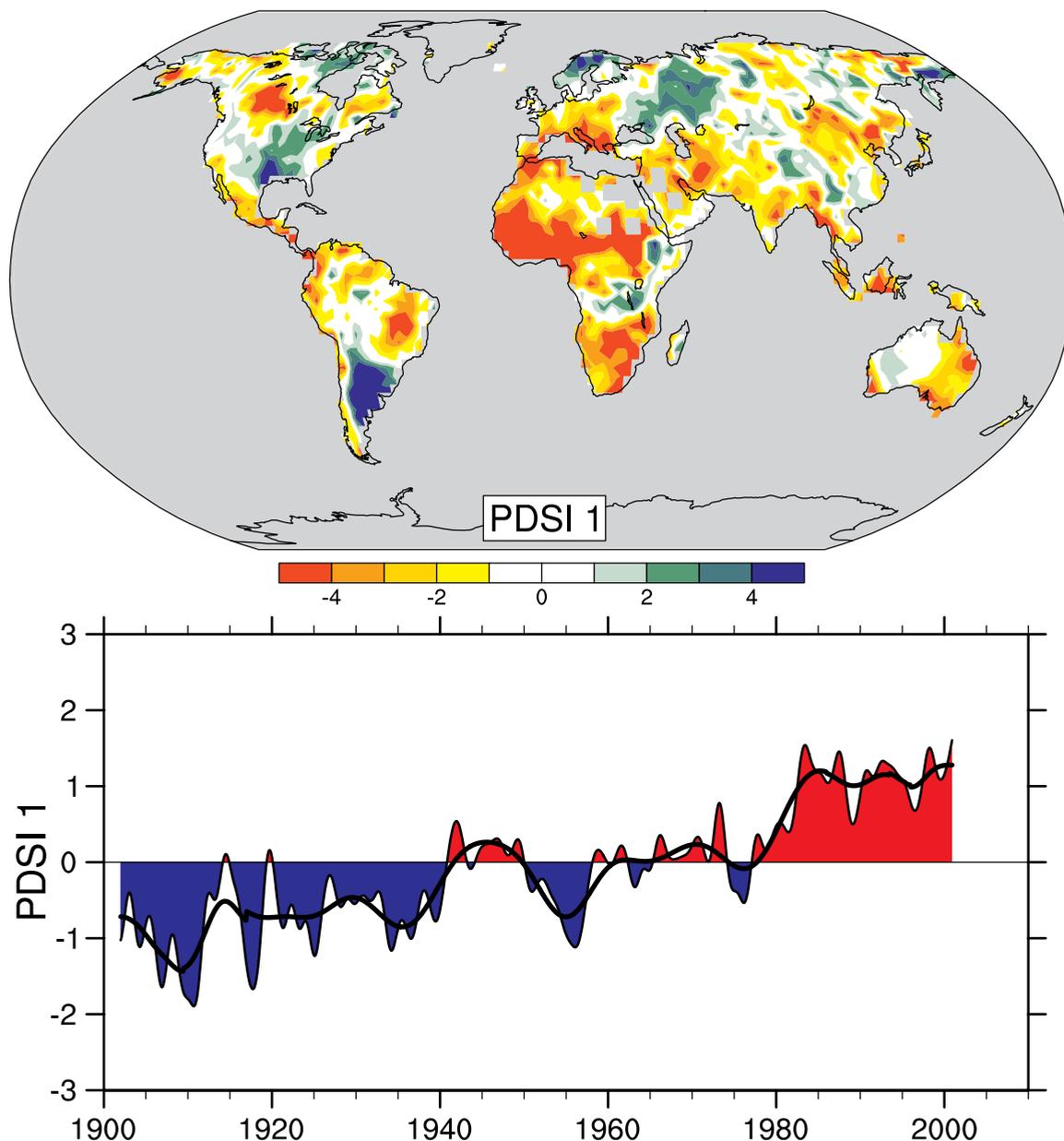


图3.1：1900至2002年月平均Palmer干旱严重程度指数(PDSI)的最重要空间型态(主分量分析的第一个分量；上图)。PDSI是一个干旱的显著度指数，用于衡量地表水分的累计亏值(相对于局地平均条件)，该指数把以往的降水量和进入大气的水分估值(根据大气温度)纳入水文统计系统¹³。下图显示自1900年以来，这一型态的正负值和强度的变化。当下图给出数值为正值(或负值)时，上图中的红色和橙色区域表示相对于平均值为少雨(或多雨)区，而蓝色和绿色区域则表示多雨(或少雨)区。平滑后的黑色曲线表示年代际变化。时间序列与某个趋势大致呼应，就全球陆地面积而言，这一型态及其变化占1900至2002年期间PDSI线性趋势的67%。因此，这一趋势的特征是非洲干旱逐渐普遍增加，例如：特别是萨赫勒地区。还请注意多雨地区，特别是北美和南美东部地区及欧亚大陆北部地区(Dai等，2004b)。[WGI FAQ 3.2]

¹³注意在积雪含降水的区域(如极地地区)，PDSI指数并非实际模拟该区域的干旱。

但是，在干旱和半干旱地区，降水变率增加可增加地下水的回灌，因为只有高强度降雨才能够快速渗透，不至蒸发，而冲积含水层的回灌主要是靠洪水。[WGII 3.4.2]

根据全球水文模式的结果(见图3.2)，经过全球平均后，地下水回灌的增加量小于总径流量(少2%，而到21世纪50年代将少9%，即ECHAM4的气候变化对SRES A2情景的响应：Döll和Flörke, 2005年)。对所有四个气候变化情景(ECHAM4和HadCM3 GCM采

用了SRES A2和B2排放情景¹⁴)作了研究，经计算，到21世纪50年代地下水回灌量在下列区域将减少70%以上：巴西东北部、非洲西南部和地中海南岸一带。不过，由于这项研究未考虑到预计增加的日降水率，因此对回灌量减少的估计也许有些过高。在水深度增加，地下水回灌减少的地方，依赖含水层的湿地受到损害，旱季江河的基本径流量减少。经计算，到21世纪50年代地下水回灌量将增加30%以上的地方包括萨赫勒、近东、中国北部地区、西伯利亚和美国西部。在地下水位已经很高的地区，回灌量

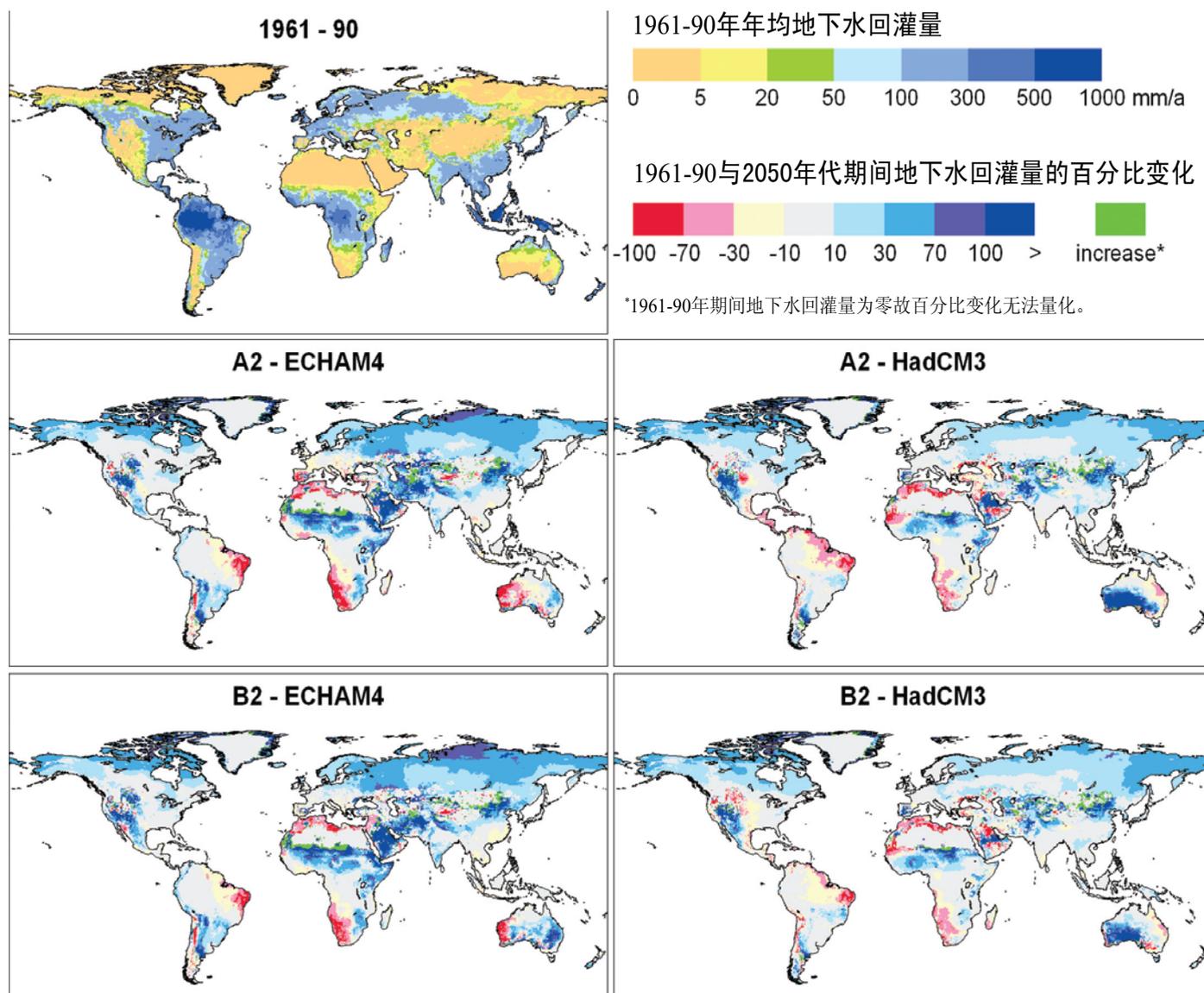


图3.2：气候变化对长期平均年扩散性地下水回灌的影响的模拟结果。当前(1961–1990)至21世纪50年代(2041–2070)期间30年地下水平均回灌量的百分比变化，用全球水文模式WGHM的计算，采用了四个不同的气候变化情景(基于ECHAM4和HadCM3气候模式和SRES A2和B2排放情景)(Döll和Flörke, 2005年)。[WGII 图3.5]

¹⁴ 模式描述见附件I。

的增加也许因土壤盐碱化和土壤涝渍而使城镇和农业出现问题。[WGII 3.4.2]

在气候变化对个别含水层地下水影响方面所作的研究甚少，研究表明对于某些地点和气候模式的结果有很强的针对性(如，Eckhardt和Ulbrich，2003年，欧洲中部地区低山脉的集水区；Brouyere等，2004年，比利时的白垩纪含水层)。例如，在奥加拉拉(Ogallala)含水层区域，预估天然地下水回灌量会减少20%以上，气候变暖2.5°C以上时，各模拟的结果均是如此(Rosenberg等，1999年)。[WGII 14.4] 由于气候变化，世界上许多含水层春季回灌转向冬季回灌，而夏季回灌有所下降。[WGII 3.4.2]

3.2.1.2 洪水

如第2.3.1节所述，预估在整个21世纪大多数区域强降水事件将会变得更加频繁。这会影响到山洪暴发和城市发生洪水的风险。[WGI 10.3.5, 10.3.6; WGII 3.4.3] 表3.2给出了一些潜在的影响。

通过多模式分析，Palmer和Räisänen(2002年)预估欧洲中部和北部大部分地区出现甚多降水冬季的风险大大增加，这是由于与中纬度风暴有关的强降水增加所致。北半球冬季降水总量超过正常以上两个标准偏差的概率，由于欧洲大部分地区CO₂出现倍加，因此预估该降水概率将会大大增加(五至七倍)，可能造成冬季洪水的后果。另预估在降水多的亚洲季风季节风险将会加大(Palmer和Räisänen，2002年)。据Milly等的研究(2002年)，如果CO₂增加四倍，预估在全世界16个大流域中有15个将会经常突破月平均江河流流量百年一遇洪峰。预估在一些地区，目前百年一遇的洪水(在控制运算中)将会更频繁地发生，甚至每2-5年发生一次，虽然这些预估具有大的不确定性。在许多温带地区，融雪对春季洪水所起的作用可能下降(Zhang等，2005年)。[WGII 3.4.3]

根据气候模式，预估全球温度升高2°C，孟加拉国发生洪水的地区将会至少增加23%-29%(Mirza，2003年)。[WGII 3.4.3]

表3.2: 根据到21世纪中叶乃至后期的预估，因与极端降水有关的天气和气候事件引发的气候变化可能产生影响的实例。这些实例未考虑适应能力的任何变化或发展。第2栏给出了针对第1栏所列现象的可能性估计。现象的趋势方向和可能性是根据IPCC SRES情景预估的气候变化。[WGI 表SPM-2; WGII 表SPM-2]

现象 ^a 和趋势方向	利用SRES情景 预估21世纪 未来趋势的可 可能性	按行业划分的主要预估影响实例			
		农业、林业和生态 系统[4.4, 5.4]	水资源 [3.4]	人类健康 [8.2]	工业、人居环境和社会 [7.4]
强降水 事件：多数 地区发生频率 增加	很可能	农作物受损；土壤 侵蚀，土壤渗透导 致无法耕种	对地表水和地下水 的水质有不利影响； 供水受到污染； 水短缺或许缓解	造成死亡、伤害， 引起传染病、呼 吸道疾病和皮肤 病	洪水破坏人居环境、 商业、交通运输和 社会；对城乡基础 设施造成压力； 财产损失
受干旱影响 的地区增加	可能	土地退化、 产量降低/农作物 受损和歉收； 牲畜死亡增加； 野火风险增大	面临更大范围的 缺水压力	粮食和水短缺的 风险增大；营养 不良的风险增大； 患水源性和食源 性疾病的风险增 大	人居环境、工业和 社会的水短缺；水 力发电潜力降低； 潜在的人口迁移
强热带 气旋活动 增加	可能	农作物受损； 树木被风刮倒； (连根拔起) 珊瑚礁受损	停电造成 公共供水 中断	造成死亡、伤害、 患水源性和食源 性疾病的风险增 大；创伤后患抑 郁失调症的风险 增大	遭受洪水和强风的破坏； 在脆弱地区，私营保险 公司撤出保险范围；潜 在的人口迁移；财产损 失；

^a 关于更详细的定义，见第一工作组第四次评估报告的表3.7。

气候变暖引起冰川上的常年积雪¹⁵覆盖厚度减少，使融水径流迅速加强，并使冰川河流发生洪水。[WGII 3.4.3]

英国各地洪水发生频率的未来变化估值有一定程度的不确定性。气候变化对洪水状况(大小和频率)的影响可能是正面的，也可能是负面的，这取决于所用的气候模式，融雪的作用大小，集水区的特点和位置，特别指出：在气候变化影响中仍存在这一不确定性(Reynard等，2004年)。[WGII 3.4.3]

3.2.1.3 干旱

受干旱影响的地区可能增加。[WGI SPM] 中部

大陆地区夏季出现干旱趋势，表明这些地区干旱风险加大。

[WGI 10.ES] 在对全球干旱频率的单一模式研究中，在SRES A2情景下，预估到21世纪90年代任何一个时间点上的极端干旱的地表比例、极端干旱事件的频率和平均干旱时段将会分别增加10至30倍、2倍和6倍(Burke等，2006年)。[WGI 10.3.6; WGII 3.4.3] 伴随着温度升高(蒸发量加大)，欧洲南部和中部的夏季降水减少将会不可避免地导致夏季土壤水分减少(参见Douveille等，2002年；Christensen等，2007年)，并增加干旱的频率和强度。[WGII 3.4.3] 如图3.3所示，预估到21世纪70年代，在西班牙和葡萄牙部分地区、法国西部、波兰维斯杜拉河流域和土耳其西

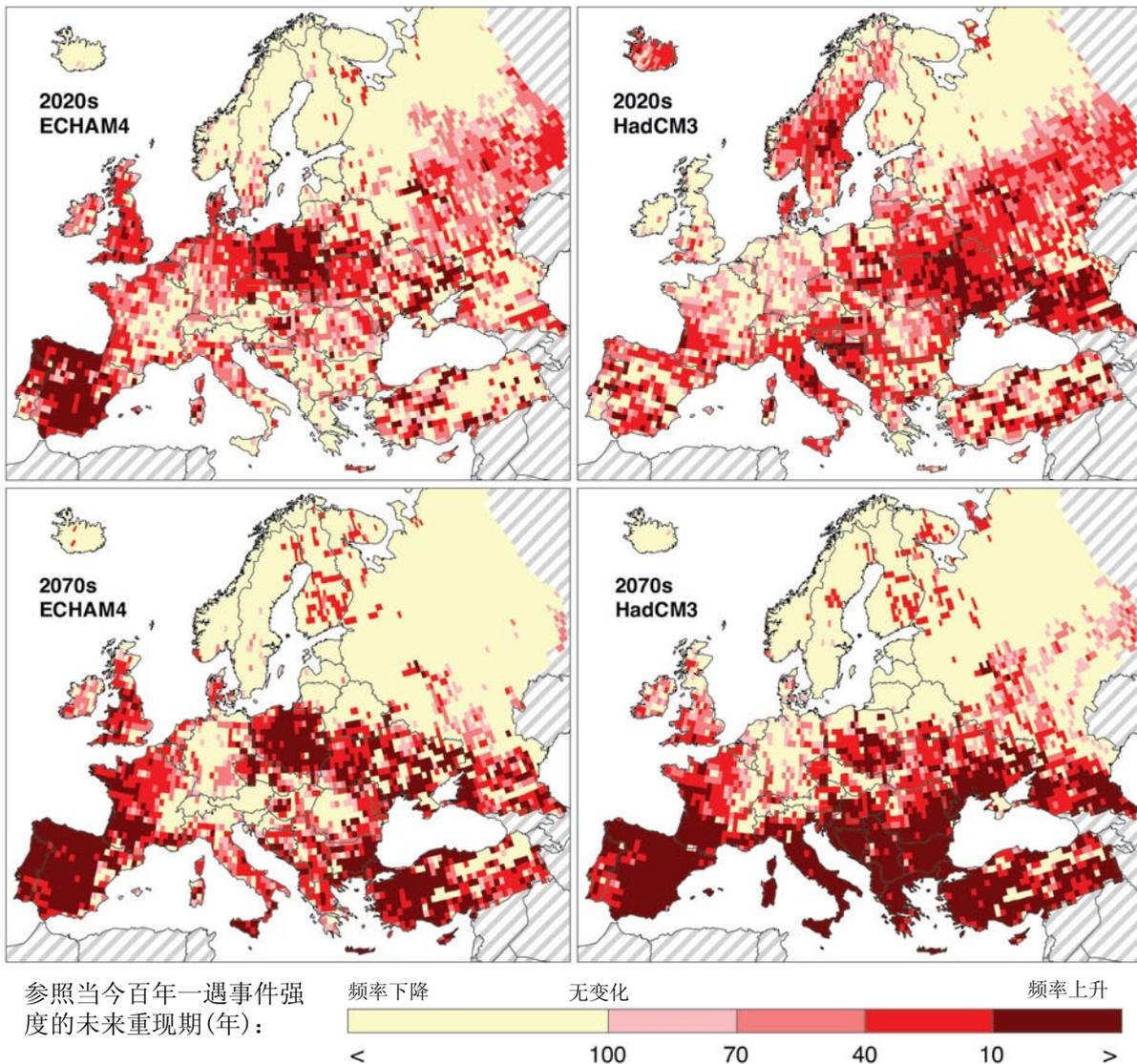


图3.3: 未来百年一遇的干旱重现率的变化，根据对1961–1990年期间气候与水利用的比较(Lehner等，2005年)。[WGII 图 3.6]

¹⁵常年积雪：处在变为冰川积冰(无渗透性)中间阶段的多年积雪(仍有渗透性)。

¹⁶每年，超过百年一遇洪水的机率为1%，而超过十年一遇洪水的机率为10%。

部，目前程度的百年一遇的大旱¹⁶将会重现，发生更频繁，不到10年出现一次(Lehner等, 2005年)。[WGII 3.4.3]

干旱地区扩大带来的部分影响见表3.2。预估融雪时间将会提前，融雪期的融雪量将会减少，这将会加大靠融雪供水的流域在流量偏低季节—夏季和秋季的干旱风险。预估加大干旱风险的区域将是那些在很大程度上旱季主要依赖于冰川融水供水的地区(Barnett等, 2005年)。在安第斯山脉, 冰川融水在漫长的旱季维持着河流量和数以千万计人口的供水。预计许多小冰川, 如位于玻利维亚、厄瓜多尔和秘鲁的冰川(参见Ramírez等, 2001年; 框5.5), 在未来几十年内将会消失。兴都库什山脉和喜马拉雅山脉的冰川和积雪融水是中国、巴基斯坦和印度的亿万人民所赖以生存的水资源, 这些地区将受到不利影响(Barnett等, 2005年)。[WGII 3.4.3]

3.2.1.4 水质

预估水温升高, 降水强度增加, 低流量期延长将会加剧许多形式的水污染, 包括沉积物、营养物质、可溶有机碳、病原体、农药、盐和热污染等。这将促进藻华大量繁殖(Hall等, 2002年; Kumagai等, 2003年), 并增加细菌和真菌含量(加拿大环境部, 2001年)。反之, 这又将影响生态系统、人类健康和供水系统的可靠性及运营成本。[WGII 3.ES]

由于热稳定性增加, 混合型态发生变化, 温度升高可能降低湖泊的水质, 从而减少含氧量, 增加沉积物的磷释放量。例如, 安大略湖湾磷含量夏季已经很高, 如果水温升高 3°C – 4°C , 磷含量可能会增加一倍(Nicholls, 1999年)。不过, 温度升高也可以改善冬季/春季水质, 因为冰融时间提前, 氧含量相应增加, 冬季鱼的死亡减少。[WGII 4.4.8, 14.4.1]

降雨强度加大将导致湖泊和水库中悬浮固体物(浊度)增加, 因为水土流失流入江河(Leemans和Kleidon, 2002年), 同时污染物也将流入(Mimikou等, 2000年; Neff等, 2000年; Bouraoui等, 2004年)。降水强度预估会有所加大, 预计将导致水质恶化, 因为加大了病原体和其它可溶污染物向地表水和地下水的输送(如农药); 水土流失增加, 进而引发吸附污染物的污染, 如磷和重金属。此外, 强降水事件频率增加将使污水系统不堪重负, 使水厂和污水处理厂更频繁地超负荷运行。[WGII 3.4.4] 水流偏低情况发生次数增加将使污染物稀释能力下降, 从而增加了污染物含量, 包括病原体。[WGII 3.4.4, 14.4.1] 在径流整体下降的地区(如许多半干旱地区), 水质将恶化。

在半干旱和干旱地区, 气候变化可能增加浅层地下水的盐碱化, 因为蒸散量会有所增加。[WGII 3.4.2] 预估许多半干旱地区的河流量将会减少, 河流和河口的盐度将会增加。[WGII 3.4.4] 例如, 预估到2050年澳大利亚默里-达令流域水源的盐度将会增加13%–19%(Pittock, 2003年)。一般而言, 地下水回灌的减少会使地下盐分的流动减少, 因此可以平衡江河与河口盐分因稀释下降所带来的影响。[WGII 11.4]

在沿海地区, 海平面上升可对雨水排水和污水处理造成负面影响[WGII 3.4.4] 并增加了咸水侵入海岸带蓄水层地下淡水的可能性, 从而对地下水资源造成不利影响。[WGII 3.4.2] 对于两个位于印度沿海附近面积不大、地势平坦的珊瑚岛, 如果海平面只上升0.1米, 经计算淡水透镜体的厚度则分别从25米下降到10米, 从36米下降到28米(Bobba等, 2000年)。地下水回灌的任何减少将加大海平面上升的影响。在内陆蓄水层, 地下水回灌的减少可导致盐水侵入邻近咸水含水层(Chen等, 2004年)。[WGII 3.4.2]

3.2.1.5 水土流失和沉积

所有关于水土流失的研究均表明预计降雨强度会有所增加, 从而加大流失速率。[WGII 3.4.5]此外, 冬季降水将从侵蚀性小的降雪向侵蚀性大的降雨转移, 因为冬季温度升高可加强侵蚀作用, 例如可给农业地区的水质带来负面影响。[WGII 3.4.5, 14.4.1]

多年冻土的融化可导致之前的非侵蚀性土壤变成可侵蚀状态。[WGII 3.4.5] 气候变化对侵蚀的进一步间接影响与气候变化及有关适应行动所引起的土壤和植被变化有关。[WGII 3.4.5] 关于气候变化对沉积物输送的影响所作的为数甚少的研究表明, 由于侵蚀作用增加, 输送过程有所加强, 特别是在径流增加的地区。[WGII 3.4.5]

3.2.2 未来淡水系统的非气候驱动因素

许多非气候驱动因素可在全球范围内对淡水资源产生影响(联合国, 2003年)。水资源的数量和质量均受到土地利用变化、水库建设和管理、污染物排放以及水和废水处理等影响。用水取决于人口、粮食消费、经济(包括水价)、技术、生活方式和社会对淡水生态系统价值的看法等方面的变化。淡水系统对气候变化的脆弱性还取决于国内和国际层面的水管理。可以预计在世界范围内将越来越多地遵循‘水

资源综合管理'(IWRM)¹⁷模式(联合国, 2002年; 世界银行, 2004a; 世界水事理事会, 2006年), 这一运作有可能将水问题既定为资源, 又定为生态系统, 使之处在决策的中心。这有可能减少淡水系统受气候变化的影响程度。环境流量需求的考虑可导致对水库运行的改变, 从而可节制人类对这类水资源的利用。[WGII 3.3.2]

3.2.3 气候变化对未来可用淡水量的影响

关于供水, 就全球而言, 气候变化的成本很可能将超过效益。原因之一是降水变率很可能增加, 洪水和干旱频率预期会有所增加, 有关论述见第2.1.6节和第2.3.1节。融雪养流域在枯水季节的干旱风险将有所增加, 有关论述见第3.2.1节。洪水和干旱的影响可以通过基础设施投资和改变对水利及土地利用的管理而得到缓解, 但是此类措施的实施将涉及费用(美国全球变化研究计划, 2000年)。在当前条件下建立的水利基础设施、水利用模式和管理体制已经发展了。洪水/干旱频率方面的任何重大变化, 或供水量和质量或季节时间上的任何重大变化将需要做出调整, 而费用可能是高昂的, 不仅是在资金方面, 而且在社会和生态影响方面也是如此, 包括还需要管理不同利益集团之间可能发生的利益冲突(Miller等, 1997年)。[WGII 3.5]

水文变化可对某些方面产生正面影响, 而对其它方面可产生负面影响。例如, 年径流量增加也许使可再生水资源增加, 从而可为各种生态和非生态用水带来效益, 但是可同时因增加洪水风险而造成危害。最近几十年, 部分南美洲南部地区出现多雨趋势, 扩大了洪涝面积, 但是也提高了阿根廷潘帕斯地区的作物产量, 并提供了新的商业性捕鱼机会(Magrin等, 2005年)。[WGII 13.2.4] 径流量增加还可能破坏地下水位浅的地区。在这些地区, 地下水位上升可影响农业用水, 并破坏城区建筑。例如, 在俄罗斯, 当前每年由浅地下水位造成的损失估计为50-60亿美元(Kharkina, 2004年), 而且未来损失可能增加。此外, 如果增加的径流集中在丰水期, 年径流量的增加并不一定会增加现有水资源的效益。[WGII 3.5]

降水强度增加可导致地表水源浊度和养分及病原体增加。纽约市供水机构已将强降水事件确定为其面临的与气候变化有关的重大关切问题之一, 因为此类事件可使该市部分主要水库的浊度上升, 使其超过水源质量法定限度高达上百倍, 故需要增加大量处理和监测成本(Miller和Yates, 2006年)。[WGII 3.5.1]

3.2.4 气候变化对未来淡水需求的影响

温度升高, 降水变率增加一般会导致灌溉用水增加, 即使降水总量在生长季节保持不变。气候变化对最佳生长期的影响和对产量最大化的灌溉用水的影响已作过模拟, 但假设灌溉面积和/或气候变率均无变化(Döll, 2002年; Döll等, 2003年)。应用两个气候模式在IPCC SRES A2和B2情景下, 模式预估到2020年中国和印度这两个世界上灌溉面积最大的国家对灌溉净需求的变化分别为: 中国+2%到+15%, 印度-6%到+5%, 具体预估值取决于排放情景和气候模式(Döll, 2002年; Döll等, 2003年)。不同的气候模式对灌溉净需求的全球变化的预估结果均不相同, 估计增长幅度不等, 到21世纪20年代为1%-3%, 到21世纪70年代为2%-7%。灌溉净需求全球最大增幅来自基于B2排放情景的气候模式。[WGII 3.5.1]

在利润最大化条件下, 对伊利诺斯州玉米灌溉作了研究, 结果发现年降水量减少25%对灌溉可盈利性的影响与年降水减少15%的影响相同, 但后者加上了增加一倍的日降水标准差(Eheart和Tornil, 1999年)。该项研究还表明利润最大化的灌溉用水对降水变化的反应比产量最大化用水的反应更为强烈, 而且大气CO₂加倍的影响却不大。[WGII 3.5.1]

由于气候变化, 家庭用水需求的增加(如通过增加花园浇水)和工业用水需求的增加可能相当小, 例如到21世纪50年代在一些选择的地方小于5%(Mote等, 1999年; Downing等, 2003年)。次要影响是电力需求有所增加, 用于建筑物制冷, 这往往会增加抽水量, 以供热电厂冷却所用。对纽约市用水作的统计分析表明, 在温度高于25°C 以上天数内, 人均日用水量每升高1摄氏度增加11升(约为目前人均日用水量的2%)(Protopapas等, 2000年)。[WGII 3.5.1]

¹⁷ 关于水资源管理的主要概念, 尚无明确的定义。IWRM是基于四项原则, 是由1992年在都柏林召开的国际水事与环境大会制定的: (1) 淡水是一种有限的和脆弱的资源, 是维持生命、发展和环境所不可缺少的; (2) 水的开发和管理应基于参与方法, 涉及各级用户、规划者和决策者; (3) 妇女在水的供应、管理和保护方面发挥着核心作用; (4) 水在其所有用水竞争中具有经济价值, 应被视作一种经济物品。

3.2.5 气候变化对未来缺水压力的影响

对全球生活在面临缺水压力地区的人口数量，一些研究的估计差别很大(Vörösmarty等, 2000年; Alcamo等, 2003a,b,2007年; Oki等, 2003年; Arnell, 2004年)。然而, 气候变化只是许多影响未来缺水压力因素中的一个; 人口、社会经济和技术等变化在大部分时间和大多数区域可能要发挥更重要的作用。到21世纪50年代, 四个IPCC SRES情景中人口预估的差异对生活在面临缺水压力的流域人口数量的影响大于气候情景中的差异对人口数量的影响(Arnell, 2004年)。生活在有缺水压力的流域人口数量将显著增加(表3.3)。预计到21世纪50年代之后面临缺水压力的人口数量变化在很大程度上取决于所采用的SRES情景。预估在A2情景下将会大幅增加, 而在A1和B1情景下, 增速较低, 因为全球可再生淡水资源增加, 而人口略有减少(Oki和Kanae, 2006年)。应当指出, 利用人均可用水指标, 气候变化似乎减少了全球总体缺水压力。这是因为增加的径流多集中于世界各地人口最多的地方, 主要是东亚和东南亚。但是, 鉴于增加的径流主要发生在丰水季节(Arnell, 2004年), 如果对额外的水不加储存, 也许无法减轻枯水季节的问题; 不会缓解世界其它地区的缺水压力。季节型态的变化和极端事件概率的不断增加可抵消每年现有淡水资源增加的影响以及人口变化的影响。[WGII 3.5.1]

如果对缺水压力的评估不仅随人口和气候变化而变, 而且还随用水变化而异, 非气候驱动因素(收入、用水效率、水生产力和工业生产)的重要性则会增加(Alcamo等, 2007年)。收入增长对用水量增加和缺水压力加大的影响有时大于人口增长所带来的影响(用抽水量表示: 水资源比)。根据模拟结果, 到21世纪50年代, 全球陆地面积20%–29%的缺水压力将有所减少, 而62%–76%的地区缺水压力将有所增加(考虑了两个气候模式和SRES情景A2和B2)。因降

表3.3: 2050年前后人口增长和气候变化对生活在面临缺水压力的流域(定义为人均可再生水资源少于1,000 m³/年)人口数量的影响。[WGII 表3.2]

	2050年面临缺水压力的流域内人口数量估值(单位: 10亿)	
	Arnell (2004年)	Alcamo等 (2007年)
1995: 基线情景	1.4	1.6
2050: A2 排放情景	4.4–5.7	6.4–6.9
2050: B2 排放情景	2.8–4.0	4.9–5.2

估值基于几个气候模式运行的排放情景。范围是根据被用于将排放转化为气候情景的各种气候模式和模式运行

水增加而加大了供水量, 这是缺水压力减少的主要原因, 而抽水量的增加则是缺水压力增加的主要原因。收入增加刺激家庭用水量增加, 是显著的发现(Alcamo等, 2007年)。[WGII 3.5.1]

3.2.6 气候变化对淡水成本和其它社会经济方面的影响

现有可抽水量随径流量、地下水回灌量、含水层条件(例如隔离度、深度、厚度和边界)、水质和供水基础设施(如水库、泵水井和配水网络)变化。饮用水的安全更多地取决于供水基础设施的水平, 而不取决于径流量。但是, 有些地区的径流量和/或地下水回灌量因气候变化而减少, 对这些区域提高获取饮用水安全性这一目标将更难以实现。此外, 气候变化会增加供水的成本, 如, 由于水位变化, 影响了供水基础设施, 从而使供水服务无法惠及到更多的人。反之, 这又增加了社会经济影响及后续成本, 特别是在有些地区, 由于气候变化, 缺水压力更加突出。[WGII 3.5.1]

就可用水量而言, 气候变化引起的季节径流体系和年际径流变率的变化是重要因素, 其重要程度能够与长期年平均径流量的变化相同(美国全球变化研究计划, 2000年)。在以融雪为水源的流域, 冬季积雪储量减少, 生活在这些流域的人也许会因夏秋流量减少而受到不利影响(Barnett等, 2005年)。例如, 到21世纪50年代, 莱茵河夏季枯水期流量也许下降5%–12%, 这将给供水带来不利影响, 特别是影响热电厂(Middelkoop等, 2001年)。对易北河流域所作研究表明到21世纪50年代, 预估实际蒸散将会增加(Krysanova和Wechsung, 2002年), 而河流量、地下水回灌量、作物产量和弥漫性水源污染可能减少(Krysanova等, 2005年)。[WGII 3.5.1]

在中国西部, 春季融雪提前, 冰川退缩可能减少农业灌溉的可用水量。为了保障在气候变化的条件下可靠地供水, 需要增加水井和水库, 已对中国在此方面的投资和运行成本作了估算。对于当前缺水压力较低的流域(如长江), 成本较低, 对于缺水压力较高的流域(如黄河)(Kirshen等, 2005a), 成本较高。此外, 气候变化未来供水成本的影响将有所增加, 这不仅是因为气候变化程度加强, 而且还由于水需求量不断增加。[WGII 3.5.1]

对于德克萨斯的某个含水层, 预估到21世纪30年代, 农民的净收入将会减少16%–30%, 到21世纪90年代将会减少30%–45%, 这是由于灌溉供水减少, 而灌溉用水需求增加。预估用水(市政用水和工业用水为主)的总净效益同期将会减少不到2%(Chen

等, 2001年)。[WGII 3.5.1]

如果由于气候变化, 淡水供应必须由淡化水取而代之, 那么气候变化的成本则包括海水淡化的平均成本, 目前约为1.00美元/m³海水, 0.60美元/m³咸水(Zhou和Tol, 2005年)。淡水加氯的成本大约是0.02美元/m³。在埃及、中国、孟加拉国、印度和东南亚人口稠密的海岸带地区(FAO, 2003年), 海水淡化的成本可能会过高。在这些地区, 特别是在埃及, 需要研发新的海水淡化技术以降低成本, 尤其是通过使用非传统能源, 从而降低温室气体的排放。此外, 咸水的淡化可提高此类项目的经济性(见第4.4.4节)。[WGII 3.5.1]

未来洪水会造成什么样的损失在很大程度上将取决于居住模式, 土地利用的决策, 洪水预报、警报和应急响应系统的质量, 以及脆弱地区的建筑物和其它财产的价值(Mileti, 1999年; Pielke和Downton, 2000年; Changnon, 2005年), 并取决于气候变化本身, 如热带气旋频率的变化(Schiermeier, 2006年)。[WGII 3.5.2]

气候变化对洪水损失的影响可根据模式进行预估, 即模拟当前20年一遇或百年一遇洪水重现期的变化, 并结合根据水位流量关系和详细财产数据确定当前事件造成的洪水损失。利用这种方法, 对澳大利亚三大流域年平均直接洪水损失作了预估, 结果是在CO₂倍增条件下增加了四至十倍(Schreider等, 2000年)。[WGII 3.5.2]

Choi和Fisher(2003年)对部分美国地区洪水损失的预期变化作了估算, 在两个气候变化情景下, 其年平均降水增加量分别是13.5%和21.5%, 年降水量标准差要么不变, 要么相对于均值按比例增加。利用结构计量经济学(回归)模式, 以洪涝损失的时间序列为基础, 加上人口、财富指标及年降水预测因子, 如果年平均降水量和标准差增加13.5%, 预估洪涝损失的平均值及标准差将会增加140%以上。这一估值表明洪水损失主要是与缺乏社会基础设施而使人民面临自然灾害有关, 因为模式在纳入人口和财富之后的解释能力为82%, 虽然加上降水后可使该解释能力提高到89%。[WGII 3.5.2]

另外一项研究通过采用加拿大气候中心针对美国东北部波士顿城区的模式和IS92a情景(Kirshen

等, 2005b)调查极端降水事件变化对潜在洪水损失的影响。这项研究发现如果在适应方面不给予投资, 到2100年, 洪水造成的财产损失数量和洪水损失的总成本均会增加一倍, 这是相对于在未发生气候变化的条件下预料的结果。还发现与洪水有关的交通运输的延误将会在本世纪逐渐成为突出问题。该研究的结论是, 这些损失的经济规模可能相当高, 足以证明在适应战略方面大量投入是合理的, 如洪泛区普遍开展防汛。[WGII 3.5.2]

这些研究结果还得到下列情景研究的支持: 到21世纪80年代英格兰和威尔士河流及沿海洪涝造成的损失。该项研究将四个排放情景与四个社会经济变化情景相结合, 采用了类似SRES的框架(Hall等, 2005年)。在所有情景下, 预估洪水损失将会增加, 除非当前防汛管理政策、做法和基础设施均有所改变。预估到21世纪80年代, 每年损失可达到50亿英镑, 这是按B1类情景假设的世界, 与目前相比的损失为10亿英镑, 而在出现大概相同程度的气候变化情况下, 如按B2型假设的世界, 损失则只有15亿英镑。如果对这些预估值按国内生产总值进行归一化处理, B1和B2情景均给出了大致类似的结果。在A1类世界中, 到21世纪50年代, 每年损失会达到150亿英镑, 到21世纪80年代会达到210亿英镑(Evans等, 2004年; Hall等, 2005年)。[WGII 3.5.2]

未来洪水期增多会更频繁地扰乱船舶的航行, 并对船舶荷载带来限制的低流量条件也许增加。例如, 莱茵河上的船舶荷载限制也许从当前气候条件下的19天增加到21世纪50年代的26–34天(Middelkoop等, 2001年)。[WGII 3.5.1]

气候变化可能改变江河流量, 对河流的可用水量造成重要影响, 特别是水力发电。对欧洲水力发电的影响, 利用宏观尺度水文模式作了估测。结果表明到21世纪70年代, 20世纪末斯堪的纳维亚和俄罗斯北部现有水力发电厂的发电潜力将增加15%–30%(假设维持在IS92a排放量), 这些地区当前水力发电的比例是19%(芬兰)和接近100%(挪威)(Lehner等, 2005年)。葡萄牙、西班牙、乌克兰和保加利亚会减少20%–50%以上, 这些国家当前水力发电的比例是10%(乌克兰、保加利亚)到39%(Lehner等, 2005年)。对于整个欧洲(水电占20%), 预估到21世纪70年代水电潜力将会减少7%–12%。[WGII 3.5.1]

在北美洲，五大湖流出量可能减少，这会造成重大经济损失，因为尼亚加拉和圣劳伦斯河两处水力发电量会减少(Lofgren等，2002年)。CGCM1模式预估全球变暖2°C的情况下，安大略省的尼亚加拉和圣劳伦斯的水力发电量会下降25%–35%，按2002年价格计算，每年损失2.4–3.5亿加元(Buttle等，2004年)。但是，根据HadCM2¹⁸气候模式，水电潜力却有小幅增长(+3%)，每年价值约2500万加元。另外一项研究调查了一系列气候模式情景，研究结果发现在全球变暖2°C的情况下，圣劳伦斯河的水力发电量可减少1%–17%(LOSLR，2006年)。[WGII 3.5.1]

3.2.7 对气候变化非常脆弱的淡水区和行业

在世界许多区域，气候变化对淡水资源的影响也许影响可持续发展，例如，还可能使扶贫事业、减低儿童死亡率等工作面临无法实现的风险。即使对水资源进行最佳管理，也很可能无法避免对可持续发展带来的负面影响。图3.4给出了世界上的一些关键案例，在这些地区与淡水有关的气候变化影响对受影响地区可持续发展构成了威胁。‘可持续的’

水资源管理一般是力求通过水资源综合管理来实现(IWRM：定义见脚注17)。但是，对该术语的确切解释却差别很大。所有的定义大致都包括这样的概念：维持和改善环境，特别是水环境，考虑水竞争用户、河道生态环境和湿地。还要考虑水资源政策的更广泛的环境影响，如水资源管理政策对土地管理的影响，反之，土地管理政策对水资源管理的影响。水资源管理制度是水资源管理的一个重要组成部分，有助于根据一系列政治、社会经济和行政管理制度实现水资源的可持续性(GWP，2002年；Eakin和Lemos，2006)。[WGII 3.7]

3.2.8 气候变化对淡水系统影响预估的不确定性

气候变化对水资源影响的不确定性主要是由于降水量输入值的不确定性，其次才是由于温室气体排放的不确定性(Döll等，2003年；Arnell，2004年)、气候敏感性的不确定性(Prudhomme等，2003年)，或水文模式本身的不确定性(Kaspar，2003年)。有关气候变化对淡水系统影响的预估不确定性的其它来源则是与规划的干预措施的性质、程度和相对成功

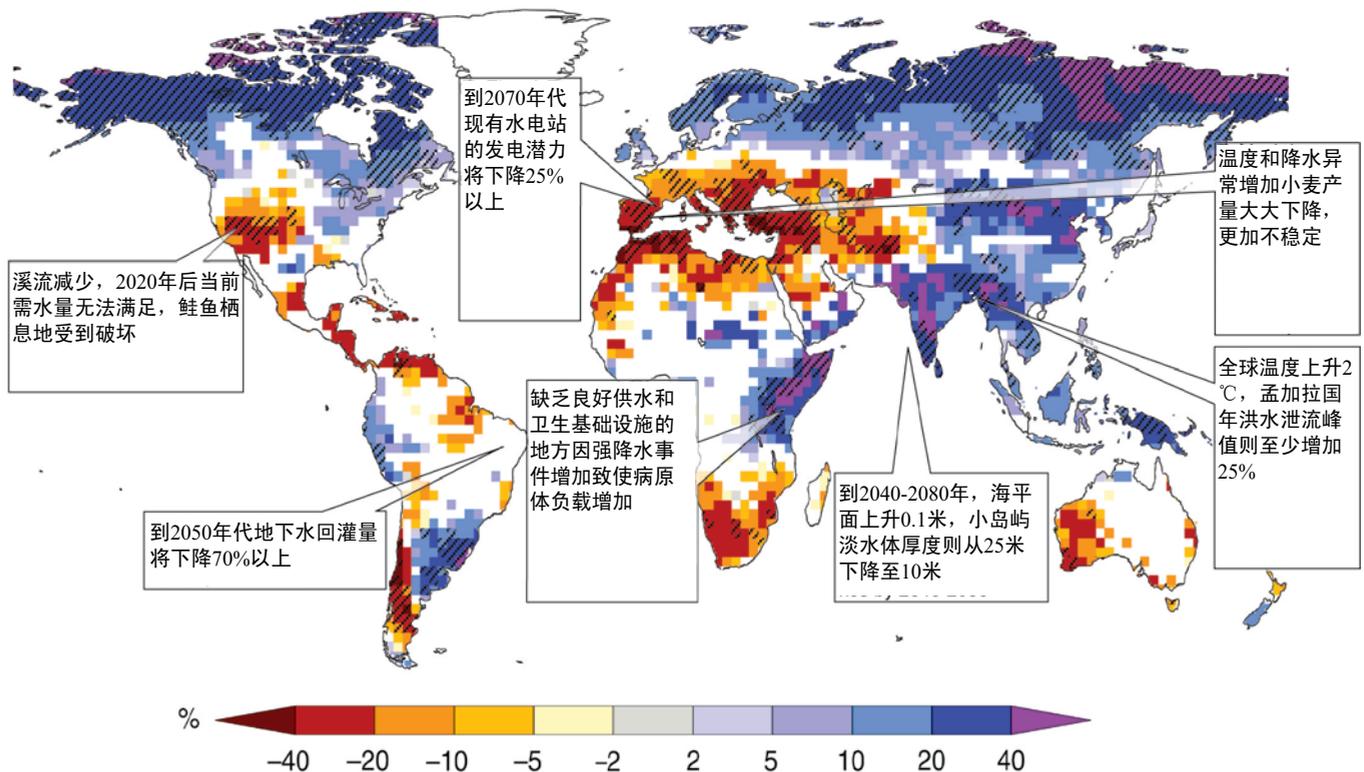


图3.4：未来气候变化对淡水影响的注释图，该图描述了受影响地区的可持续发展受到的威胁。1：Bobba等(2000年)，2：Barnet等(2004年)，3：Döll和Flörke(2005年)，4：Mirza等(2003年)，5：Lehner等(2005年)，6：Kistemann等(2002年)，7：Porter和Semenov(2005年)。背景图，见图2.10：当前(1980–1999)至2090–2099期间SRESA1B排放情景年径流量的平均综合变率(%) (根据Milly等，2005年)。蓝色(红色)地区表示年径流有所增加(减少)。[基于WGII图3.8和SYR图3.5]

¹⁸有关模式的描述，见附件1。

性有关。图3.4给出的影响可通过不同方式实现，这将取决于所采取的适应措施。气候变化的适应措施的反馈在当前的未来预测中尚未得到充分考虑，如作物生长期延长，河流量调节加大，水库库容量增加。通过对英国两个集水区水灾统计中不同来源的不确定性作了比较(Kay等, 2006a)得出的结论是：不确定性的最大来源是GCM结构，其次是排放情景和水文模拟过程。关于大不列颠月平均流量和低流量的统计，Prudhomme和Davies(2006年)得出了类似的结论。[WGII 3.3.1]

在评估气候变化对水资源影响的不确定性时，多模式概率方法比只用一个气候模式的输出结果效果要好。自《第三次评估报告》以来，针对水文影响开展的几项研究使用了全球尺度和流域尺度的多模式气候输入(如Arnell(2004年)和Jasper等(2004年))，但是纳入概率评估的研究却甚少。[WGII 3.3.1]

在许多影响研究中，气候观测值的时间序列是通过利用气候变量的变化计算进行调整，以获得符合当前条件的情景。这些调整目的在于尽量减少对GCM气候模拟误差的影响，假设气候模拟偏差对当前和未来时间跨度具有相同的量级。这对于降水预估尤为重要，因为观测值和气候模式计算值之间的差是相当可观的。[WGII 3.3.1]

气候变量的年际变率或日变率变化在水文影响研究中往往被忽略。这使得对未来洪水和干旱，对可用水量和灌溉需水量均估计偏低。[WGII 3.3.1] 量化气候变化对淡水资源影响的指标和阈值是选定的，这也是不确定性的来源。

为了克服GCM和水文循环过程之间空间格点尺度不匹配问题，已开发了一些技术将GCM输出结果的尺度降至更细的空间(时间)分辨率。[WGI TAR 第10章] 这些技术的主要假设条件是针对当前气候确定的统计关系将在未来条件发生变化的情况下仍保持有效。降尺度技术允许模式开发人员将日变率插入未来变化(如Diaz- Nieto和Wilby, 2005年)，并利用概率框架制作未来河流量信息，用于水资源规划(Wilby和Harris, 2006年)。这些方法有助于对不同来源、影响水资源预估的不确定性作了比较。[WGII 3.3.1]

气候变化对水资源的经济影响的量化努力因缺乏资料而受阻，并受到以下事实的影响，即各项估值对估算方法和所采用的不同假设均十分敏感，而这些假设关系到如何将可用水量的变化分配给各种用水类别，如农业用水、城市用水或河道用水(Changnon, 2005年；Schlenker等, 2005年；Young, 2005年)。[WGII 3.5]

3.3 与水有关的气候变化适应措施：概述

水管理者早已着手应对不断变化的水资源需求。迄今为止，水管理者通常假定自然资源的基数是一个中期内合理常数，因此，水文方面的以往经验对未来条件是一个很好的指导。气候变化对这些传统假设提出了挑战，并可改变水资源管理系统的可靠性。[WGII 3.6.1] 在管理上应对气候变化包括开发新的系统评估和设计方法，并且通过诸如欧洲联盟水框架指令这类机制开发非结构性方法。[WGII 12.2.2]

表3.4概括了一些供水方和需水方的适应选择，以在平均条件和干旱条件下确保水供应。供水方的选择一般涉及库容增加或水道抽水量增加，因此，可能会对环境造成不良后果。需水方的选择也许会缺乏实际效果，因为这些选择依赖于个人的累积作用。有些选择也许与减缓措施不一致，因为这些选择涉及高能耗，如海水淡化、抽水等。

自发性适应和有计划的适应常常是有区别的。自发性适应是那些对气候激励政策无意识响应的适应，但来自为满足已改变的需求、目标和预期所产生的变化，这种适应不是刻意应对气候变化，但是可以减轻气候变化的后果。此类适应在水行业是广泛存在的，虽然在对付气候变化的成效却各不相同(见表3.5)。[WGII 3.6.1] 在拉丁美洲，一些自发性适应措施已落实到位，包括利用跨流域调水管理和优化用水。[WGII 13.5.1.3] 在非洲，当地社区和农民制定了适应方案，利用积累的经验预报降雨。萨赫勒地区的农民还利用传统的集水系统补充灌溉措施。[WGII 9.6.2.1, 9.5.1, 表9.2]

有计划的适应是刻意的决策结果，具体而言就是考虑气候变化和变率，而且迄今为止未经常实施。少数几个国家的水管理者包括荷兰、澳大利亚、英国、德国、美国和孟加拉国，已开始直接将气候变化影响纳入其防洪、供水管理标准规范。[WGII 3.2, 3.6.5, 17.2.2] 这类适应措施一般是以改变方法和程序的形式，如设计标准并计算气候变化补贴。例如，英国和荷兰已为防洪备灾实施了此类适应(Klijn等, 2001年；Richardson, 2002年)，在英国的供水过程中得到实施(Arnell和Delaney, 2006年)，并在孟加拉国的水规划中普遍实施。[WGII 3.6.5, 17.2.2] 水行业专门并纯粹为适应气候变化所采取‘具体’行动的实例非常罕见。一部分原因是气候变化也许只是许多影响战略和投资计划的驱动因素之一(而且在短期规划内也许不是最重要的因素)，另

表3.4：供水方和需水方的某些适应选择(本表并非完整)。[WGII 表3.5]

供水方	需水方
勘探和抽取地下水	通过水的回收再利用提高水利用率
建设水库和水坝增加水储量	通过改变种植时间、作物结构、灌溉方法和种植面积降低灌溉水需求量
海水淡水	通过进口农产品(即虚拟水)降低灌溉水需求量
扩大雨水储量	促进因地制宜的做法，实现可持续用水
清除从河岸带地区外来的非本土植被	扩大利用水市场，为高价值用途分配用水
调水	扩大利用经济手段，包括计量和定价，以鼓励节约用水

一部分原因是未来的水文变化预估存在不确定性。

针对可用水量 and 水质变化，无论是水管理机构，还是各水环境用户都不得不采取适应变化的措施。它们将包括工业、农民(尤其是灌溉者)和个人消费者。虽然在适应不断变化的水需求和立法变化方面有了很多经验，但是对于此类团体和个人将如何适应气候变化目前却知之甚少。

表3.5概述了部分适应措施，既有计划的，也有自发性的，都是目前世界各地已采用的措施，如第二工作组《第四次评估报告》中有关区域章所述。表3.5并非详尽无遗，许多个别措施也能够许多地方采用。

有**高可信度**表明，适应能够减少脆弱性，特别是在短期内。[WGII 17.2, 18.1, 18.5, 20.3, 20.8] 但是，适应能力与社会、经济发展有着密切联系，而且这种能力在整个社会和社会内部并非均匀分布。穷人、老人、妇女、病人和土著居民通常能力偏低。[WGII 7.1, 7.2, 7.4, 17.3]

关于适应气候变化的影响，可确定五种不同类型的限制因素。[WGII 17.4.2]

- (a). **物理或生态因素**：无论是通过技术手段还是通过体制变革或许都无法防止气候变化的不利影响。例如，可能无法适应河流完全干涸的情况。[WGII 3.6.4]
- (b). **技术、政策或社会因素**：例如，或许难以找到可接受的兴建新水库的地点，或者很难让用户减少用水。[WGII 3.6.4]
- (c). **经济因素**：与某项适应对策或其实施所取得的效益相比也许过于昂贵。

(d). **文化观念和体制因素**：这些因素包括水管理运作的体制背景、对水管理重视不够，机构之间缺乏协调，不同尺度间的紧张程度，管理无效果，以及未来气候变化有不确定性(Ivey等，2004年；Naess等，2005年；Crabbe和Robin，2006年)；所有这些因素均对采取适应措施构成了体制障碍。[WGII 3.6.4]

(e). **认识和信息因素**：例如，水管理者或许没有认识到气候变化的挑战，或者与其它挑战相比也许认为次要。信息方面的一个关键障碍是缺乏获得方法的渠道，从而无法一贯地、严格地应对气候变化。[WGII 17.4.2.4]

气候变化对水管理带来了一个概念性挑战，即引入了未来水文条件的不确定性。检测某个来之有因的趋势也许很困难(Wilby，2006年)，这意味着在弄清水文体系实际变化的规律之前不得不出作出采取适应措施的决策。因此，面对气候变化，水管理需要采用基于情景式的方法(Beuhler，2003年；Simonovic和Li，2003年)。这一方法正在一些国家得到实际运用，如英国(Arnell和Delaney，2006年)和澳大利亚(Dessai等，2005年)。但是，仍存在两个问题。第一，各情景之间在影响程度上往往有很大的差异，需要在几种情景基础上开展分析。第二，一些国家的水管理者要求获得有关正在发生的结果详细的信息，以便作出基于风险的决策(如Jones和Page，2001年)因此，正在开发各种技术，用于建立某些特定结果的概率分布，这需要影响不确定性的关键驱动因素的概率分布作出假设(如Wilby和Harris，2006年)。[WGII 3.6.4]

应对不确定性的第二种方法称为‘适应性管理’(Stakhiv，1998年)，该方法涉及加大采用水管理措施，即采用那些就不确定性而言相对确凿的管理措施。此类工具包括减少水需求量的措施，被称为

表3.5：部分适应实践实例。

地区	适应措施	来源
非洲	<ul style="list-style-type: none"> 季节预报，其制作，发布，吸收和融入基于模式的决策支持系统 通过改善有形基础设施，并通过改善目前的雨养耕作制度，增强抵御未来干旱压力期的承受能力，包括：集水系统、水坝建设、水源保护/节水和农耕做法、滴灌、培育抗旱和早熟作物品种和替代作物和杂交品种 	WGII 9.5, 表 9.2
亚洲	改善农业基础设施，包括： <ul style="list-style-type: none"> 牧场供水 灌溉系统及其运行效率 雨水和雪水的利用/储存 国内、区域内和国际上关于新技术的信息交流系统 牧民、渔民和农民获得及时的天气预报（雨量和温度） 城市污水的回收再利用，如新加坡 减少水的跑冒滴漏，利用市场化方法减少用水浪费现象 	WGII 10.5, 表 10.8 WGII 10.5.2
澳大利亚和新西兰	<ul style="list-style-type: none"> 全国用水计划/倡议 水处理厂供应循环水 减少渠道渗漏和水源保护措施 以管道取代露天灌渠 提高用水效率和水质 抗旱准备，制定新的水价 安装雨水罐 海水淡化 	WGII 11.2, 表 11.2, 框 11.2; 见本卷表 5.2
欧洲	<ul style="list-style-type: none"> 水需求方的对策，如家庭、工业和农业等节水措施，修复高地地区市政和灌溉水库和低洼地区堤坝，以防漏水 扩大的泛洪平原地区、应急防洪水库、洪水蓄水区 and 洪水预警系统，特别是在山洪区 水供应方措施，如河水冲刷作用形成的河中水库，污水回收再利用和海水淡化系统和制定水价 将区域和流域适应气候变化的对策融入水资源综合管理计划 	WGII 12.5.1
拉丁美洲	<ul style="list-style-type: none"> 雨水集水区和储水系统 改善特别贫困社区供水系统的‘自我组织’方案 水源保护措施，水的回收再利用，改变工业流程实现水循环利用以及优化用水 	WGII 13.2.5.3, 框 13.2, 13.5.1
北美洲	<ul style="list-style-type: none"> 改善水源保护/节水和保持土壤水分的土地耕作 投资于水源保护/节水系统和新的供水和配水设施 改变美国国家水灾保险政策，减少多重水灾索赔风险 提出双重水灾索赔的家庭现在需要的条件是高于百年一遇洪水水位2.5厘米，或者被迫搬迁 冲刷排水系统，取代污水干渠系统，以达到更为极端的五年一遇防洪标准 将屋顶径流引入草坪，促进渗透，并提高凹地和街道滞蓄能力 	WGII 14.2.4 WGII 14.5.1
极地地区	<ul style="list-style-type: none"> 已成功地运用一项适应对策，抵消三角洲池塘的干化效应，该项对策涉及水库放水管理，可增加冰凌形成和有关的浸水效应 用于水力发电的流量调节，集水对策和饮用水的获取方法 应对淡水灾害增加/减少的对策（如用于降低洪水风险或为水生系统增加洪水的防护结构） 	WGII 15.6.2 WGII 15.2.2.2
小岛屿	<ul style="list-style-type: none"> 海水淡化厂 大储量水库，改进型集水 保护地下水，增加雨水收集和储水能力，利用太阳能蒸馏，雨水管理并在岛内划定地下水回灌区 	WGII 16.4.1 框 16.5

任一系统面临气候变化风险最小化的手段(如在加利福尼亚: Beuhler, 2003年)。同样, 一些防洪管理的弹性对策, 例如: 允许江河暂时泛滥并降低洪水损失风险, 相对于不确定性而言, 这比传统的防洪措施有更大的确凿性(Klijn等, 2004年; Olsen, 2006年)。[WGII 3.6.4]

3.3.1 水资源综合管理

水资源综合管理(IWRM: 见脚注17)应是一种探索气候变化适应措施的手段, 但迄今为止仍处于萌芽状态。除了包括其它内容以外, 成功的水资源综合管理战略还包括: 领悟社会观点, 重新建立规划过程, 协调土地和水资源管理, 认识到水量和水质的联系, 通盘利用地表水和地下水, 保护和恢复自然系统, 并考虑气候变化。此外, 综合对策要明确地解决信息流通中存在的障碍。并非总是需要一套完全整合的方法, 而是整合规模是否妥当将取决于这一方法在多大程度上有助于针对具体需要采取行之有效的行动(Moench等, 2003年)。尤其是, 水管理综合方法可有助于解决用户之间为争水而发生

的利益冲突。在美国西部几个地方, 水管理者和各利益集团已尝试一些方法来促进以共识为基础的决策。这些努力包括地方上围绕流域提出有关倡议和由州牵头或由联邦政府发起的活动, 旨在使利益攸关方参与规划的过程(如美国内务部, 2005年)。这些举措可促进在利益竞争的集团之间进行谈判, 使问题得到双方都满意的解决结果, 使一系列因素均得到充分考虑。对于大流域, 如科罗拉多河流域, 这些因素跨越了多个时空尺度(表3.6)。[WGII 3.6.1, 框14.2]

表3.6: 科罗拉多河流域水综合管理的跨尺度问题(Pulwarty和Melis, 2001年)。[WGII 表3.4]

时间尺度	问题
悬而未决	保护濒危物种所需的必要流量
长期	流域内水分配和流经各州之间的水分配
十年	流域上游供水义务
年	鲍威尔湖补水义务, 达到与米德湖水储量的相同水平
季	高峰取暖和制冷月份
日到月	洪水控制作业
小时	西部地区电业局的发电
空间尺度	
全球	气候影响, 大峡谷国家公园
区域	事先划拨(如科罗拉多河上游委员会)
州	针对州内外各区水销售的不同协议
市区和社区	浇水时间表, 污水处理, 家庭用水

