

# 气候变化视阈下的水安全现状及应对策略

侯立安<sup>1,2</sup>, 张林<sup>2</sup>

1. 第二炮兵工程大学3系, 西安 710025

2. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 杭州 310027

**摘要** 气候变化是目前国际上普遍关注的社会问题之一。气候变化将加速大气环流和水文循环过程, 从而引发或恶化一系列水安全问题。本文从水资源安全、水环境安全、水生态安全、水工程安全、供水安全5个方面, 综述气候变化对水安全的影响, 并初步探讨全球气候变化背景下应对水安全问题的策略。

**关键词** 气候变化; 水安全; 水环境; 水生态

**中图分类号** TV213.9

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.14.001

## The water security and corresponding strategies from the perspective of climate change

HOU Li'an<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>2</sup>

1. Xi'an High-Tech Institute, Xi'an 710025, China

2. College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract** The climate change creates a most concerned social problem all over the world. It can accelerate both the atmospheric circulation and the hydrological cycle, and will lead to a series of water security problems. In this paper, the impact of the climate change on the water security is reviewed from five aspects, including the water environment, the water ecology, the water engineering and the water supply security, and the coping strategies are suggested.

**Keywords** climate change; water security; water environment; water ecology

近年来, 全球气候变化越来越显著, 引起全社会的普遍关注。气候变化指气候系统随时间发生的变化, 是自然变化和人类社会活动共同作用的结果。导致气候变化的直接原因是大气中温室气体和气溶胶的浓度及太阳辐射和地表性质的改变, 这些因素综合影响了地球气候系统的能量平衡, 从而导致了全球范围的气候变化<sup>[1]</sup>。

全球变暖是气候变化的主要特征, 它由人为排放的超量温室气体所致。温室气体包括化石燃料大量燃烧所释放的二氧化碳及甲烷、氧化亚氮和一些消耗臭氧的物质等<sup>[2]</sup>。温室气体通过吸收大地反射回来的能量并重新辐射这部分热量来影响地球的气候<sup>[3]</sup>。气候变化将会改变全球水文循环,

引起水资源在时空上的重新分配, 并对降水、蒸发等气候因素造成直接影响, 引发一系列的水安全问题<sup>[4-9]</sup>。

水安全, 指一个国家或地区可以保质保量、及时持续、稳定可靠、经济合理地获取所需的水资源、水资源性产品及维护良好生态环境的状态或能力<sup>[10]</sup>。

水安全问题不仅是一个资源问题, 也是一个生态环境问题、经济问题、社会问题和政治问题, 直接关系到国家的安全。水安全的内涵包括5个方面: 1) 水资源安全, 包括水量充裕和结构均衡; 2) 水环境安全, 包括饮用水安全、环境容量内的纳污能力和良好的环境服务功能; 3) 水生态安全, 即拥有良性水循环和水生生物多样性, 能够实现自我修复和维持

收稿日期: 2015-05-01; 修回日期: 2015-06-01

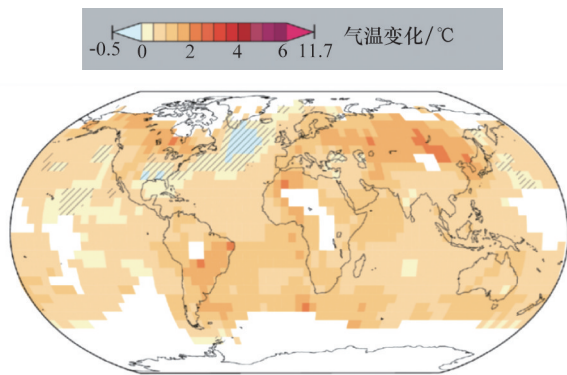
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51238006, L1422037); 中国工程科技中长期发展战略研究项目(2014-zcp-10)

作者简介: 侯立安, 中国工程院院士, 研究方向为环境工程, 电子信箱: houlian678@hotmail.com

引用格式: 侯立安, 张林. 气候变化视阈下的水安全现状及应对策略[J]. 科技导报, 2015, 33(14): 13-17.

整个生态系统的保育;4) 水工程安全,即在江河、湖泊和地下水开发、利用、控制、调配和保护水资源各类工程的安全,包括防洪、灌溉、供水、发电、防洪、发电、水土保持、水资源保护等工程的合理建设与良性运行等;5) 供水安全,包括结构供水安全和城乡供水安全,结构供水安全包括生产、生活和生态供水安全<sup>[10]</sup>。

根据联合国政府间气候变化专业委员会(IPCC)最近两次的统计数据,气候变化在近几十年来对全球范围内自然生态系统和人类社会都产生了深远影响<sup>[11]</sup>,对于气候变化可能引发的水安全问题必须引起足够重视。因此,本文阐述全球气候变化背景下水安全所面临的挑战并初步探讨应对策略。



纯色区域表示气温变化明显;斜线区域表示气温变化不明显;  
白色区域表示统计数据不足

图1 1901—2012年全球观测到的气温变化

Fig. 1 Observed global annual average temperature change from 1901 to 2012

全球变暖会直接导致高纬度、高海拔地区永冻土层和冰川升温融化、海平面上升,气旋、热浪等自然灾害发生的可能性增加,从而引发次生的水生态问题,如水体富营养化污染等<sup>[11-14]</sup>。

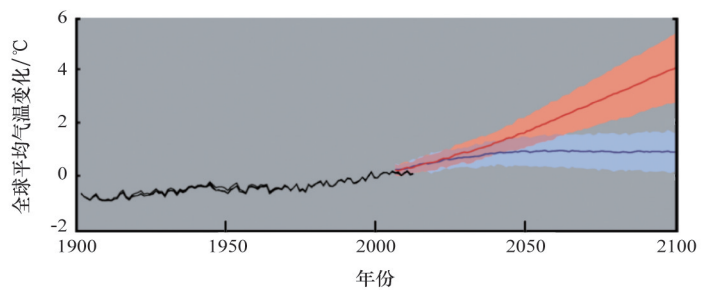
根据IPCC报道,由于北极冻土层顶部温度上升,自20世纪初以来北半球季节冻土覆盖面积已减少了约7%;从1978年以来,北极海冰面积以2.7%/10年的平均速率退缩。冰川对气候变化则表现得更为敏感,自20世纪80年代以来,高原冰川末端在近几十年间出现了快速退缩,且在边缘山区比中腹地区更为明显。中国拥有46377座冰川,覆盖面积达59425 km<sup>2</sup><sup>[15,16]</sup>。有研究指出,由于全球气候变暖,中国的西部有超过80%的冰川处于衰退中<sup>[17-20]</sup>。有学者通过气温重建技术证实,过去的50年是青藏高原近500年以来最热的半个世纪<sup>[21]</sup>,直接导致了过去40年中,青藏高原的冰川衰退了7% (3790 km<sup>2</sup>),并且厚度每年以200 mm的速度衰退<sup>[20]</sup>。

全球变暖引起的海平面上升,主要是由海水吸热膨胀、陆地冰川融化、格陵兰冰盖融化及南极冰盖融化等的综合作用所致<sup>[22,23]</sup>。IPCC 2007年的气候评估报告显示,海洋吸收了80%全球变暖的热量,这部分热量会引起上层海水的受热膨

## 1 气候变化的现状

气候变化对水安全的影响,主要来自于全球变暖及降雨量和降雨时空分布发生的变化。IPCC 2014年发布的气候变化评估报告给出了关于全球变暖的最新统计和预测数据(图1、图2)。

由图1可知,除去少部分数据不足和气温变化不明显的区域外,全球绝大部分区域的气温均呈现上升趋势。由图2可见,全球的平均气温虽然在短期内有所波动,但长期来看平均气温上升明显;并且两种不同气候模型的模拟结果表明,在将来很长一段时间内,全球的平均气温仍呈现上升趋势。这些数据充分说明全球变暖已是不争的事实。



黑色实线表示实际观测到的数据;红色实线表示温室气体排放模型RCP8.5的模拟数据;蓝色实线表示低温室气体排放模型RCP2.6的模拟数据

图2 相对1986—2005年全球平均气温的实测及模拟情况

Fig. 2 Observed and projected future global annual average temperatures relative to 1986—2005

胀<sup>[1]</sup>。据统计,近20年来格陵兰冰盖融化量翻了两番,从1992—2001年的(51±65) Gt/年到2002—2011年的(221±37) Gt/年,这部分冰川的融化使海平面上升了(7.5±1.8) mm<sup>[24]</sup>。这些现象的综合作用使得在过去的1个世纪里全球海平面平均上升速度为1.7~1.8 mm/年<sup>[1]</sup>。对于中国而言,近百年来,海平面总上升量为14 cm,其中渤海海面上升5 cm,东海上升19 cm,南海上升20 cm。上升量超过20 cm的省市有江苏、上海和广东<sup>[25]</sup>。如果海平面升高与全球气温上升之间的关系不变,未来100年海平面可能上升20~90 cm。

全球变暖还会导致上层海水水温上升,从而产生高强度的热带气旋。已有研究表明,从20世纪70年代以来,全球热带气旋的强度和频次都呈现出上升的趋势,其中在北太平洋、印度洋与西南太平洋增加最为显著<sup>[1,26]</sup>。

另外,气温变暖将提升大气中平流层携水能力——气温每升高1℃大气中的水含量提高7%<sup>[27]</sup>,大气中水含量的提高增加了暴雨天气发生的频次和强度。

IPCC 2014年发布的第5次气候变化评估报告中还指出:气候变化引起了一些地区降雨量和时空分布的变化,改变了当地的水文循环,影响水资源的数量和质量<sup>[1]</sup>。许多地区均

观测到降水量存在着明显的变化趋势:北美和南美东部、欧洲北部、亚洲北部和中部降水量显著增加,而萨赫勒、地中海、非洲南部、亚洲南部部分地区降水量减少<sup>[1]</sup>。这种降雨量和时空分布的变化导致了降水多而集中的地区发生洪涝灾

害的可能性提高,降水少而分散的地区发生旱灾的可能性上升。

综上所述,气候变化对水安全问题的影响是多方面和综合性的,二者间总体逻辑关系如图3所示。

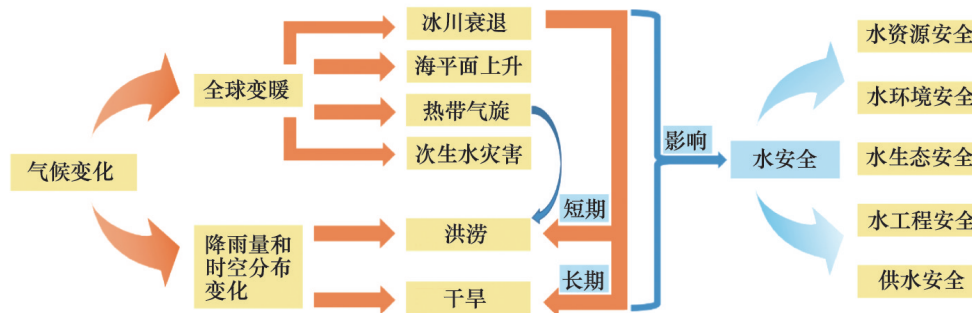


图3 气候变化对水安全影响作用的逻辑关系

Fig. 3 Effect of climate change on water security

## 2 气候变化对水安全的影响

### 2.1 气候变化对水资源安全的影响

目前面临的水资源安全问题主要包括水资源短缺和水污染。有研究表明,气候变化会加重这种全球性和地域性的水资源危机,并建立了多个模型预测气候变化对水资源的影响,结果表明:如果全球气温再升高2°C(即比工业革命前高2.7°C),全球处于极度缺水环境( $< 500 \text{ m}^3 \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$ )的人口将会增加15%<sup>[28]</sup>。

据中国水利部《2013年中国水资源公报》<sup>[29]</sup>,中国总的水资源量为29528.8亿 $\text{m}^3$ ,其中包括地表水量27957.9亿 $\text{m}^3$ ,地下水量8081.1亿 $\text{m}^3$ 。中国总的水资源量看似充足,但人均水资源量却不足全球的1/4<sup>[30]</sup>。水资源总量的分配中,松花江、辽河、海河、黄河、淮河、西北诸河6个北方的水资源一级区(简称北方6区)占5639亿 $\text{m}^3$ ,而长江(含太湖)、东南诸河、珠江、西南诸河4个南方的水资源一级区(简称南方4区)占23889.8亿 $\text{m}^3$ 。可见,在中国南方和北方水资源分配极不平衡:北方地区拥有全国65%的耕地面积却仅仅占有全国19%的水资源量。

全球性的气候变化进一步加剧了中国的水资源安全问题,一方面气候变化改变了降雨量和时空的分布,导致雨水的分布更加不平衡:一些原本“水多”的地区雨水更多,而一些原本就“水少”的地区雨水更少。统计数据显示,中国较为缺水的东北、华北地区夏季和秋季的降水量越来越少。相反,多雨的华南地区夏天和冬天的降雨量则越来越多<sup>[31,32]</sup>。降雨量和时空分布不平衡加剧了中国水资源安全问题。

另一方面,气温变暖导致地表蒸发作用更为显著,河流径流量及土壤含水量下降,使可用的水资源减少;引起的高纬度和高海拔冰川融化,将使冰川衰退,导致下游以冰川融水为主要水资源的地区水资源量锐减。

### 2.2 气候变化对水环境安全的影响

水是污染物最主要的运输载体和溶剂,气候变化通过影响水文循环的各个要素和循环方式,改变了水环境中污染物的来源和迁移转化行为,最终破坏水环境安全。例如,气候变化导致的降水量和时空分布的改变会引起干旱、洪涝等极端水文事件发生的频率增加。发生干旱灾害时,水体中部分离子浓度显著升高,影响水体水质安全;同时,水体表面温度也会升高,导致水中溶解氧浓度下降,复氧能力降低,最终使水体的稀释和自净能力同时降低,水环境质量下降<sup>[33-35]</sup>。

洪涝灾害发生时,一方面大量地表污染物进入水体,影响水质;另一方面,也会使大量的泥沙进入水体或造成沉积物的再悬浮作用,改变水体泥沙含量,进一步影响污染物的迁移转化作用,并最终影响水体的水质。

另外,全球气候变化引起的气温升高和降水变化将对地表水环境中的主要离子浓度产生影响,可能导致湖泊的盐化和矿化作用<sup>[36]</sup>。

### 2.3 气候变化对水生态安全的影响

全球气候变化最直接的反映是气温升高,随着气温的上升,河流湖泊等水体的水温也会升高。通常水体温度升高可以影响水体的密度、表面张力、黏性和存在形态,也会改变水温层分布和加速水体中化学反应和生物降解速率等。有研究表明,温度是水体富营养化的决定性影响因素之一<sup>[13]</sup>,在强降雨冲刷地表给水体带入大量的氮、磷等营养物质和水体温度升高的综合作用下,会促进水体富营养化污染的发生。一旦水体发生富营养化污染,水体中的藻类及其他浮游生物大量繁殖,水体中溶解氧浓度迅速下降,水质恶化,水体中的鱼类和其他生物大量死亡,严重威胁水生态安全。

另外,气温升高引发的海平面上升将导致海水入侵沿海地区地下含水层,使沿海区域地表土壤盐渍化、地表水含盐

量上升,水体中的动植物因无法耐受高盐渗透压而大量死亡,从而破坏沿海地区的水生态安全。

#### 2.4 气候变化对水工程安全的影响

气候变化对水工程安全的影响主要有:1) 气候变化导致的强降雨天气会在短时间内带来大量雨水,这部分雨水使得下游的防洪设施水位长时间居高不下,对下游的水工程安全产生严重的威胁,而全球变暖导致的高海拔地区的冰川融化,也会引起下游河流短期内径流量迅速升高,对下游冰湖的堤坝产生巨大威胁<sup>[37]</sup>;2) 气候变化会导致寒流和热浪天气发生频率升高,而这种极端的高温和低温天气对水利工程也十分不利。例如,当寒流天气发生时,水利工程表面的混凝土会迅速降温,而内部的混凝土由于降温较慢仍保持较高的温度,内外的温度差会产生剪切力,而当剪切力过大时,会使水利工程的混凝土结构产生裂缝,同时降低混凝土的脆度。同样,长时间的高温干旱天气会使得混凝土内部的水分快速消失,产生收缩和裂缝,威胁水工程的安全;3) 海平面上升引起海水侵蚀海岸线、入侵沿海地下淡水层、沿海土地盐渍化<sup>[38,39]</sup>。沿海土地的盐渍化会对沿海相关的水利工程特别是钢筋混凝土结构产生严重的腐蚀。

#### 2.5 气候变化对供水安全的影响

气候变化会加剧供水安全问题:1) 洪涝灾害发生时,洪水会携带大量的污染物进入水源地,破坏水源地的水质安全,引发城乡供水水质安全;2) 干旱灾害会加剧区域水源短缺现象,使可用的水资源减少,造成城乡的供水困难;3) 对于中国西北干旱地区,冰川和积雪融水对河川径流的补给占该地区内陆河流的径流补给的30%左右<sup>[40]</sup>,因此,气候变化引起的冰川衰退虽然在短时间内可以提高下流河道的径流量,但长此以往,一旦冰川完全衰退,会导致下游地区的供水困难<sup>[37]</sup>。

### 3 气候变化下的中国水安全对策

据IPCC 2007年气候变化评估报告<sup>[1]</sup>可知,人类活动对近50年的气候变化负主要责任,而且根据预测,人类活动对气候变化的影响还在不断增强。因此,为应对气候变化背景下的水安全问题,主要可从以下两方面入手:一是阻止或延缓气候变化;二是提高人类自身应对水安全问题的能力。主要措施为:

1) 提高能源利用效率,发展新能源,减少温室气体排放。根据IPCC对于气候变化的归因分析,温室气体的大量排放是气候变化的直接原因。因此,必须坚持节约能源和开发替代能源并重,减少温室气体的排放,这是缓解气候变化的根本途径。一方面,提高可再生能源在水处理方面的应用,如发展太阳能驱动海水淡化过程、风能驱动海水淡化过程;另一方面,通过改变传统工艺减少温室气体的排放。

2) 开源节流,提高水资源利用效率,加速节水型社会的建设。根据中国水资源不足和空间分布不均的实际状况,必须“开源”与“节流”并重,同时提高水资源的利用率。在“开源”方面,可以通过推广新型的膜法水处理技术,如海水淡

化、雨水回用及非常规水源的开发;在“节流”方面,必须做到节约用水,除加强相关宣传外,可以通过制定相关政策、法规加以保证和推动,在全社会形成节约用水的良好社会风气,建立节水型社会。

3) 加强水资源的管理与监控。水资源管理是一个涉及社会、经济与环境的综合管理。针对中国目前水质情况复杂的现状,应当对江河湖泊的水文、水质等情况进行实时监控。并在此基础上,应用系统分析的理论和方法,通过对水生生态系统环境、功能、结构特征及各组分间相互作用的研究实施中国水安全实时预警预报,以确保中国水资源的开发利用沿着健康轨道发展。

4) 建立城市应急供水系统。在阻止或延缓气候变化的同时还应当提高人类自身应对水安全问题的能力。城市应急供水系统在应对大规模城市严重缺水、重大水污染等突发事件时起着不可替代的作用。因此,应把应急供水系统纳入城市基础设施建设和水资源开发规划中,以当地水资源与水安全现状为背景,全面落实城市水安全应急供水系统建设,做到未雨绸缪。

### 4 结论

水资源是社会经济发展重要的物质基础之一。中国目前的水安全状况不容乐观,水安全问题已成为中国可持续发展急需解决的关键问题之一。分析表明,在全球气候变化的背景下,中国水资源总量将有所减少,时空分布更趋不均。同时,气候变化也将对水生态环境产生不利影响。在人口增长、经济发展和城市化水平不断提高的压力下,中国水安全状况将面临着前所未有的严峻考验。因此,需要采取一系列的行动来应对全球气候变化背景下的水安全问题。

还需指出的是,目前对于气候变化与水安全问题之间的关联以及对将来气候变化的预测仍然有一些不确定性。不同气候模式对云反馈、海洋热吸收、碳循环反馈等机制的描述差别很大,这也增加了对未来气候预估的不确定性,气溶胶等因素对气候系统和水循环的影响也仍然不确定。与气候平均值的变化研究相比,对极端气候事件变化的认识还有待深入,特别是一些小尺度的极端气候事件。未来气候变化的预估结果很大程度上依赖于模式和情景,提高未来气候变化对水安全问题影响预估的可靠性和信度,需要进一步完善气候系统模式、加强气候系统观测、提高对地球气候系统的科学认识。

#### 参考文献(References)

- [1] IPCC. Change, climate change 2007: The physical science basis[J]. Agenda, 2007, 6: 333.
- [2] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. Nature, 1990, 344(6266): 529-531.
- [3] Montzka S A, Dlugokencky E J, Butler J H. Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases and climate change[J]. Nature, 2011, 476(7358): 43-50.
- [4] Vorosmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources:

- Vulnerability from climate change and population growth[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [5] Arnell N W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios[J]. *Global Environmental Change*, 2004, 14(1): 31-52.
- [6] Alcamo J, Flörke M, Märker M. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2007, 52(2): 247-275.
- [7] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 347-350.
- [8] Fung F, Lopez A, New M. Water availability in +2°C and +4°C worlds[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1934): 99-116.
- [9] Hagemann S, Chen C, Clark D B, et al. Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models[J]. *Earth System Dynamics*, 2013, 4: 129-144.
- [10] 谷树忠, 胡咏君. 水安全: 内涵、问题与方略[J]. *中国水利*, 2014(10): 1-3.  
Gu Shuzhong, Hu Yongjun. Water security: Connotations, issues and strategies[J]. *China Water Resources*, 2014(10): 1-3.
- [11] IPCC. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability[R/OL]. 2014. [http://www.ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WG2ARS\\_SPM\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WG2ARS_SPM_FINAL.pdf).
- [12] Jomelli V, Khodri M, Favier V, et al. Irregular tropical glacier retreat over the Holocene epoch driven by progressive warming[J]. *Nature*, 2011, 474(7350): 196-199.
- [13] Trolle D, Hamilton D P, Pilditch C A, et al. Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(4): 354-370.
- [14] Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. Tropical cyclones and climate change[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 157-163.
- [15] Li X, Cheng G, Jin H, et al. Cryospheric change in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(3): 210-218.
- [16] Shi Y, Huang M, Yao T, et al. *Glaciers and their environments in China—The present, past and future*[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [17] Liu S, Ding Y, Li J, et al. Glaciers in response to recent climate warming in western China[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 762-771.
- [18] Ding Y, Liu S, Li J, et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 97-105.
- [19] Yao T, Pu J, Lu A, et al. Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2007, 39(4): 642-650.
- [20] Li Z X, He Y Q, Pu T, et al. Changes of climate, glaciers and runoff in China's monsoonal temperate glacier region during the last several decades[J]. *Quaternary International*, 2010, 218(1): 13-28.
- [21] Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. Temperature variation through 2000 years in China: An uncertainty analysis of reconstruction and regional difference[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(3): 5.
- [22] Gregoire L J, Payne A J, Valdes P J. Deglacial rapid sea level rises caused by ice-sheet saddle collapses[J]. *Nature*, 2012, 487(7406): 219-222.
- [23] Wigley T M L, Raper S C B. Thermal expansion of sea water associated with global warming[J]. *Nature*, 1987, 330(6144): 127-131.
- [24] Straneo F, Heimbach P. North Atlantic warming and the retreat of Greenland's outlet glaciers[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 36-43.
- [25] 史正涛, 刘新有, 彭海英. 气候变化对中国水安全的挑战[J]. *云南师范大学学报: 哲学社会科学版*, 2008, 40(2): 11-16.
- Shi Zhengtao, Liu Xinyou, Peng Haiying. The challenge of water safety to china under the climatic changes[J]. *Journal of Yunnan Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2008, 40(2): 11-16.
- [26] Woodruff J D, Irish J L, Camargo S J. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 44-52.
- [27] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring[J]. *Science*, 2007, 317(5835): 233-235.
- [28] Schewe J, Heinke J, Gerten D, et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3245-3250.
- [29] 中华人民共和国水利部. 2013年中国水资源公报[R/OL]. 2014-11-20. [http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201411/t20141120\\_582980.html](http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201411/t20141120_582980.html).  
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2013 China Water Resources Bulletin[R/OL]. 2014-11-20. [http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201411/t20141120\\_582980.html](http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201411/t20141120_582980.html).
- [30] 王媛, 盛连喜, 李科, 等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(3): 10-14.  
Wang Yuan, Sheng Lianxi, Li Ke, et al. Analysis of present situation of water resources and countermeasures for sustainable development in China[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2008, 19(3): 10-14.
- [31] 袁喆, 严登华, 杨志勇, 等. 1961—2010年中国400 mm和800 mm等雨量线时空变化[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 494-502.  
Yuan Zhe, Yan Denghua, Yang Zhiyong, et al. Research on temporal and spatial change of 400 mm and 800 mm rainfall contours of China in 1961—2010[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 494-502.
- [32] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [33] Caruso B S. Temporal and spatial patterns of extreme low flows and effects on stream ecosystems in Otago, New Zealand[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 257(1): 115-133.
- [34] Mimikou M A, Baltas E, Varanou E, et al. Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(1): 95-109.
- [35] Wilhelm S, Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton[J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53(2): 226-237.
- [36] 夏星辉, 吴琼, 牟新利. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 124-133.  
Xia Xinghui, Wu Qiong, Mou Xinli. Advances in impacts of climate change on surface water quality[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 124-133.
- [37] 王璞玉, 李忠勤, 周平, 等. 近期新疆哈密代表性冰川变化及对水资源影响[J]. *水科学进展*, 2014, 24(5): 518-525.  
Wang Puyu, Li Zhongqin, Zhou Ping, et al. Changes of representative glaciers in Xinjiang Hami and their impact to water resources[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 24(5): 518-525.
- [38] Bruun P. Sea-level rise as a cause of shore erosion[J]. *Journal of the Waterways and Harbors division*, 1962, 88(1): 117-132.
- [39] Ferreira Ó, Dias J A, Tabora R. Implications of sea-level rise for continental Portugal[J]. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24(2): 317-324.
- [40] 储开凤, 汪静萍. 中国水文循环与水体研究进展[J]. *水科学进展*, 2007, 18(3): 468-474.  
Chu Kaifeng, Wang Jingping. Advances in the research on hydrological cycle and water in the China[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 468-474.

(责任编辑 陈广仁)