

气候变化与中国水资源可持续利用

张建云^{1,2}, 王国庆^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 全球变暖是目前最重要的环境问题之一. 根据目前的相关研究成果, 介绍了中国气候变化及其影响的事实, 论述了中国水资源特点及目前存在的问题, 分析了气候变化对中国典型流域河川径流量变化的贡献、未来气候变化对水资源的可能影响、以及水资源系统对气候变化的敏感性和脆弱性; 结合中国的实际情况, 初步提出了水资源管理中应对气候变化的基本适应对策.

关 键 词: 气候变化; 水资源; 敏感性; 脆弱性; 适应对策

中图分类号: P467:TV21

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0017-05

全球变暖是目前最重要的环境问题之一, 气候变化及其影响愈来愈引起世界各国政府和科学家的普遍关注. 全球气候变化将通过加速大气环流和水文循环而在一定程度上改变水资源量在时空上的分布, 进而加剧区域洪涝和干旱灾害, 影响区域水资源的可持续利用.

1 气候变化的事实及中国水资源问题

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一工作组的第四次评估报告《气候变化2007: 自然科学基础》指出: 近100年地球表面气温上升了 0.74°C , 全球气候呈现以变暖为主要特征的显著变化. 近50年的平均线性增暖速率为 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 几乎是近100年平均升率的2倍, 而最近的12年中(1995~2006年)有11年位列1850年以来最暖的12个年份之中, 全球气候变暖已是不争的事实^[1].

在全球变暖的大背景下, 中国近百年的气候也发生了明显变化. 总体来说, 变化趋势与全球气候变化趋势一致. 近100年中国的平均气温上升了 $0.6\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 20世纪90年代是上世纪最暖的10年^[2]. 近百年来, 我国的年降水也呈现出明显的年际振荡. 其中, 20世纪10年代、30~40年代和80~90年代降水偏多, 其他年代偏少. 近50年中国年降水量呈微弱减少趋势, 平均递减率为 $2.9\text{ mm}/10\text{ a}$, 但20世纪90年代略有增加. 就降水变化趋势的区域分布而言, 以年降水量较少的西北地区增加较为明显, 大部分地区每10a的年降水量增加率在5%以上; 以华北为核心的中部地区, 每10a的降水减少幅度在15%以下^[2].

近十几年来, 我国区域性暴雨频率及强度有增加趋势. 刘九夫等^[3]对我国暴雨洪水的研究表明, 20世纪90年代以来, 我国发生了多次短历时、点雨量实测或调查的极值接近或达到世界最高记录的暴雨事件. 如陕西省宽坪调查暴雨 $1300\text{ mm}/(6\sim 7\text{ h})$ (1998年7月)超过了以往的世界记录; 广东省湛江幸福农场实测暴雨 $146.8\text{ mm}/(24\text{ h})$ (2007年8月)是21世纪以来大陆24h实测最大降水量^[3]. 任国玉等^[4]分析认为, 近50年来, 我国西部及华南地区强降水日数增加趋势较为明显, 而华北和东北地区强降水日数呈现减少趋势.

收稿日期: 2009-11-15

作者简介: 张建云(1957-), 男, 江苏沛县人, 中国工程院院士, 主要从事气候变化、流域水文模拟、防汛抗旱等研究.

E-mail: jyzhang@nrhi.cn

我国 70% 以上的大城市、50% 以上的人口和近 60% 经济总量都处于台风的直接影响下。50 多年来, 登陆我国台风的中心气压降低了约 10 hPa, 总体上呈现强度逐年递增的趋势。进入 21 世纪以来, 在我国登陆的强台风和超强台风的数量明显增加, 影响范围和造成的灾害损失也大幅度增加。统计结果表明, 在 20 世纪 70、80 和 90 年代, 登陆我国(含台湾省, 下同)的台风(登陆时风速 32 ~ 41.5 m/s, 即 12 ~ 13 级台风)次数分别为 28、22 和 25 次; 强台风(登陆时风速 41.5 ~ 51.0 m/s, 即 14 ~ 15 级台风)的次数分别为 8、5 和 7 次; 超强台风(登陆时风速大于 51.0 m/s, 即 16 级以上台风)的次数分别为 2、2 和 0 次; 而 2000 ~ 2008 年的 9 年间, 登陆我国的台风达 29 次, 强台风 13 次, 超强台风 5 次(这里引用的是原始观测资料, 尚未经过风压关系修正)^[5]。

2008 年中国海平面公报指出, 近 30 年来, 中国沿海海平面平均上升速率为 2.6 mm/a, 高于全球海平面的上升速率。其中, 渤海、黄海、东海和南海的上升速率分别为 2.3、2.6、2.9 和 2.6 mm/a。2008 年, 中国沿海海平面为近 10 年最高, 比常年(1975 ~ 1993 年平均海平面)和 2007 年分别高 60 和 14 mm^[6]。

对我国长江、黄河、海河等六大江河 19 个重点控制水文站近 50 年的实测径流量分析结果表明: (1) 与 20 世纪 80 年代以前实测径流量相比, 黄河、海河、珠江及闽江流域各控制站均呈现减少趋势, 其中海河流域减少最为明显; (2) 各江河不同河段实测径流量(为水文整编资料, 但未经过还原计算, 下同)减少幅度存在一定差异。海河流域各站的距平百分率均超过 -40%, 其中观台站接近 -78%; 黄河流域上游唐乃亥站仅为 -3.2%, 而中下游的花园口站和利津站均在 -30% 以上; 珠江及闽江流域各站 80 年代以来实测径流量较前期有所减小, 但减幅不大, 其距平百分率最大值仅为 -2.2% (梧州站); (3) 长江、淮河和松辽河流域各站的实测径流量无明显变化趋势^[7]。

根据 1956 ~ 2000 年资料统计, 我国水资源总量为 28 412 亿 m³, 其中地表水资源量为 27 375 亿 m³。具有以下特点: (1) 人均占有量偏少。按照 2004 年人口计算, 我国人均水资源占有量只有 2 185 m³, 不足世界平均水平的 1/3; 如 2030 年我国人口按 16 亿计, 我国人均水资源仅为 1 760 m³, 属于联合国定义的用水紧张国家; (2) 时空分布极不均匀。我国水资源在地区上分布极不均匀, 具有南多北少、东多西少、山区水多、平原水少的区域分布特点, 在时间分配上呈现明显的雨热同期, 基本上是夏秋多、冬春少的分布特点; (3) 水资源分布与人口、土地、社会经济格局不匹配。北方地区(长江流域以北)面积占全国 63.5%, 人口约占全国的 46%, 耕地占 60%, GDP 占 44%, 而水资源仅占 19%。其中, 黄河、淮河、海河 3 个流域耕地占 35%, 人口占 35%, GDP 占 32%, 水资源量仅占全国的 7.7%, 人均水资源量仅为 457 m³, 是我国水资源最紧缺的地区; (4) 北方河流可用水资源量减少趋势明显。黄河、海河和辽河较为突出, 其中, 海河流域年降水量减少约 10%, 水资源总量减少约 25%。

2 气候变化对我国典型河流实测径流量影响的定量分析

河川径流变化是人类活动及气候变化等多种因素共同影响的结果。在全球气候变化和快速的人类活动影响下, 我国一些河流如黄河、海河、辽河流域实测径流量呈现显著减少趋势。张建云等^[8]采用有序聚类法和滑动游程法诊断了黄河中游水文序列变化的阶段性, 认为黄河中游干流和大多数支流河川径流量在 1970 年前后发生了较为显著的变化。因此, 将 1970 年之前的水文序列视为天然序列, 进行水文模型参数率定, 采用水文模拟途径还原了 1970 年之后的天然径流量。以 1970 年之前的实测径流量作为基准值(237.5 × 10⁸ m³), 分析了气候变化和人类活动对河川径流量的影响(见表 1)。由表 1 可见: (1) 20 世纪 70 年代以来, 黄河中游实测径流量较基准值有不同程度的减小, 其中 90 年代减少最多, 实测径流量不足基准值的一半; (2) 人类活动(包括流域下垫面变化和社会经济发展等)在各年代对径流量的相对影响均超 55%, 其中在 80 年代的相对影响量接近 70%; (3) 气候因素对径流的相对影响量在 20 世纪 70 年代最大, 超过 40%; (4) 就 1970 ~ 2000 年的平均情况而言, 人类活动是黄河中游径流量减少的主要因素, 气候变化和人类活动对径流的影响分别占径流减少总量的 38.5% 和 61.5%^[8]。

表1 气候变化和人类活动对黄河中游径流量的影响

Tab. 1 Impacts of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Yellow River basin

起止年份	实测值	计算值	总减少量	气候因素		人类因素	
	/ (10 ⁸ m ³)	/ (10 ⁸ m ³)	/ (10 ⁸ m ³)	/ (10 ⁸ m ³)	/ %	/ (10 ⁸ m ³)	/ %
1970 ~ 1979	148.5	198.5	89.0	39.0	43.82	50.0	56.18
1980 ~ 1989	172.7	217.6	64.8	19.9	30.67	44.9	69.33
1990 ~ 2000	95.3	181.1	142.2	56.4	39.64	85.8	60.36
1970 ~ 2000	138.8	199.5	98.7	38.0	38.53	60.6	61.47

3 未来气候变化对我国水资源的可能影响

评价未来气候变化对水资源的影响是以未来气候变化情景为基础. 为研究气候变化情势, IPCC 为未来世界设计了4种可能的社会经济发展框架(A1, A2, B1, B2)^[9]. 《气候变化国家评估报告》指出, 以1961~1990年的气候均值为基准, 根据不同气候模式的输出结果, 到2020年和2050年前后中国气温可能升高1.1~2.1℃和2.3~3.3℃, 相应地, 全国平均年降水量较基准年将分别增加约1.5%~3.5%和4.0%~7.5%, 但华北地区在2040年以前仍可能呈减少趋势^[2].

根据未来可能气候变化, 采用VIC模型分析了4种气候情景下径流量的可能变化, 结果表明, 全国除宁夏、吉林和海南减少明显, 陕西略减少及四川基本不变外, 其余各省多年平均径流深均有不同程度的增加, 且南方地区以福建为最大, 北方地区以新疆为最大. 在A1, A2情景下, 全国未来百年平均径流深分别较基准年增多约9.7% (+52 mm) 和9% (+46 mm); 在B1, B2情景下, 径流深增加幅度略小, 分别为7.5% (+40 mm) 和8% (+46 mm).

就季节分配而言, 北方地区春季(即3~5月份)、春夏之交(即6月份)径流深呈增加趋势, 其中5月份增幅最大; 夏季(7~8月份)以及秋、冬季节(9~12月份)径流深呈减少趋势, 其中12月份减幅最大; 而南方地区春季、夏季径流深呈增加趋势, 其中8月份增幅最大, 秋、冬季呈减少趋势, 特别是1~2月份减少显著. 此外, A1情景下全国径流深增加或减少的幅度最大. 4种气候变化情景下, 2011~2040年全国平均径流深较基准年增加基本相当约为7%, 2041~2070年增加7%~9%, 2071~2100年增加为8%~14%^[8].

气候变化将可能进一步增加我国洪涝和干旱灾害发生的机率, 加剧我国北旱南涝的态势. 特别是海河、黄河流域所面临的水资源短缺问题以及浙闽地区、长江中下游和珠江流域的洪涝问题难以从气候变化的角度得以缓解, 这将给水资源的管理提出更加严峻的挑战.

需要指出的是, 上述评价是在给定未来气候变化情景基础上进行评估的, 尽管全球科学家对未来气候变化情景预测进行了大量研究, 建立了数十个全球气候模式预估未来的气候变化趋势, 限于问题的复杂性和目前技术水平, 对未来气候变化情景的预测有很大的难度, 预测结果和评价结果亦具有较大的不确定性.

4 我国典型流域水资源系统对气候变化的敏感性

由于未来气候变化情景及评价结果的不确定性, 分析河川径流对气候变化的敏感性对于流域水资源规划非常重要. IPCC给出的敏感性定义是: 系统受到与气候有关因素的刺激而作出响应的程度^[9]. 水文要素对气候变化的敏感性是指流域的径流、蒸发等对气候变化情景响应的程度. 若在相同的气候变化情景下, 响应的程度愈大, 水文要素愈敏感; 反之则不敏感. 敏感性研究可提供气候变化影响的重要信息, 对于揭示不同流域水文要素响应气候变化的机理和差异有一定作用.

根据给定的气候条件, 对我国处于不同地域及气候区的典型流域海河(干旱半干旱区)、黄河(干旱半干旱区)、汉江(湿润区)、赣江(湿润区)、淮河(气候南北过渡区)流域进行分析, 结果表明: (1)降水变化对径

流影响显著,在气温不变、降水增加 10% 的情况下,处于干旱半干旱区的海河年径流量增加较多,约为 28%;处于湿润区的赣江和汉江增加相对较少,分别约增加 16% 和 14%;(2) 淮河年径流对气温变化响应最大,在降水不变、气温升高 2℃ 的情况下,年径流量约减少 13%,而海河、黄河、赣江和汉江在同样气候变化情况下年径流量依次减少 12%,9%,5.4% 和 5.3%;(3) 气温对径流的影响随降水的变化而变化.降水增加,气温对径流的影响更显著;反之,气温对径流的影响愈不明显;(4) 降雨的增加比同幅度减少对径流的影响大.如海河流域,在温度不变、降水增减 10% 的情况下,年径流量的变化分别为+28.2% 和-22.1%.由于流域产流过程十分复杂,不同地区产流条件存在差异,导致不同地区径流对气候变化的敏感性不同,总的看来,干旱地区或水资源缺乏地区径流对气候变化相对敏感;对比气候条件相似、人类活动不同流域的分析结果,可以发现,大规模水土保持和水利工程建设因增加了流域对径流的调节能力,从而减少了径流对气候变化的敏感性^[10].

5 应对气候变化的水资源适应性对策

气候变化背景下的水资源适应对策研究是中国应对气候变化的重要需求,它包括了适应能力和适应方式两个方面.在全球变暖背景下,科学管理水资源,应对及适应气候变化的对策主要包括以下方面的内容:

(1) 适应气候变化,转变水资源管理思路.充分认识和主动适应气候变化的影响,推进水资源管理思路和理念转变,科学评估气候变化对于水资源演变的影响,搞好流域和区域水资源优化配置,提高对水资源时空调控能力;强化用水需求和用水管理,全面建设节水型社会,不断提高用水效率和效益;实施最严格的水资源管理和保护,维护水资源的可再生性;

(2) 加强基础设施建设,增强水资源调配能力.气候变化加剧了我国水资源时空分布的不均性,要完善调控基础设施,加快调水工程建设,增强水资源时空调配能力;

(3) 强化非常规水源利用,实现多种水源综合配置.北方地区建立城市和农村的水循环利用体系,充分利用河道湖泊等调节条件,提高再生水的利用水平;加强洪水的预测分析和优化调度,加大洪水资源利用;注重地下水涵养和雨水利用;加强海水淡化技术开发和利用.完善多种水源的统一配置和调度系统;

(4) 加速国家水资源管理信息系统建设.在进一步完善水资源监测和评估的同时,大力加强对社会取水、输水、用水和排水的监测,建立和完善水循环监测与评估体系,大力推进国家水资源管理信息系统建设,为水资源管理提供可靠的信息和决策支持;

(5) 针对重点地区和重点问题开展专项研究.对于黄淮海、西北干旱区等水资源条件较差、对气候变化敏感的重点地区应开展重点研究,针对气候变化可能导致的水资源时空分布变化、供需关系变化、水生态环境恶化等重点问题开展专项研究,以全面准确掌握气候变化对我国水资源的影响,制定有针对性的对策.

气候变化已成为全球公认的事实,气候变化影响是一个需要长期和全球性共同深入研究的课题.中国水资源已经面临着人口增长、社会经济发展所带来的巨大压力,气候变化将可能进一步加剧水资源脆弱区的供需矛盾,针对未来气候变化情景下中国可能面临的水资源问题,提出有效可行的适应对策,可为水资源的可持续开发利用、保障国家社会经济的可持续发展提供科技支撑.

参 考 文 献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (Compilation Commission of China's National Assessment for Climate Change. China's national assessment for climate change[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 刘九夫, 张建云, 关铁生. 20 世纪我国暴雨和洪水极值的变化[J]. 中国水利, 2008(2): 35-38. (LIU Jiu-fu, ZHANG

- Jian-yun, GUAN Tie-sheng. Variation of extreme values of domestic storms and floods in 20th Century[J]. China Water Resources, 2008(2): 35-37. (in Chinese))
- [4] 任国玉. 气候变化与中国水资源[M]. 北京: 气象出版社, 2006. (REN Guo-yu. Climate change and water resources in China[M]. Beijing: Meteorology Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 张建云, 王国庆, 杨 扬, 等. 气候变化对中国水安全的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 290-295. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing, YANG Yang, et al. The possible impacts of climate change on water security in China [J]. Advances in Climate Change, 2008, 4(5): 290-295, (in Chinese))
- [6] 中国海洋局. 2008 年中国海平面公报[EB/OL]. <http://www.coi.gov.cn/hygb/hpm/2008>. (China Ocean Bureau. China ocean bulletin 2008[EB/OL]. <http://www.coi.gov.cn/hygb/hpm/2008>. (in Chinese))
- [7] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234. (ZHANG Jian-yun, ZHANG Si-long, WANG Jin-xing, et al. Variation trends of annual runoff over the recent 50 years in the six big rivers in China[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese))
- [8] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing. Impacts of climate change on hydrology and water resources[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [9] IPCC. Climate change 2001: impact, adaptation, and vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [10] 王国庆, 王云璋. 径流对气候变化的敏感性分析[J]. 山东气象, 2000, 20(3): 17-20. (WANG Guo-qing, WANG Yun-zhang. Analysis on the sensitivity of runoff to climate change[J]. Journal of Shandong Meteorology, 2000, 20(3): 17-20. (in Chinese))

Climate change and sustainable utilization of water resources in China

ZHANG Jian-yun^{1,2}, WANG Guo-qing^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Research Center for Climate Change, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Global warming is currently an important environmental issue. Based on the previous studies, climate change, characteristics of water resources, as well as water issues in China are introduced. Taking Yellow River as a case, the contribution of climate change to historical changes in runoff is preliminarily analyzed. According to the projected climate scenario and hypothetical scenario, the potential impacts of climate change on water resources, as well as sensitivity and vulnerability of water resources to climate change are studied. And adaptive strategies in water resources management to climate change are put forward based on the actual situation in China.

Key words: climate change; water resources; sensitivity; vulnerability; adaptive strategies