

气候变化对中国水资源情势影响综合分析

任国玉¹, 姜 彤^{1,2}, 李维京¹, 翟盘茂^{1,3}, 罗 勇¹, 马柱国⁴

(1. 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;
3. 中国气象局预测减灾司, 北京 100081; 4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 介绍了近年在气候变化对中国水资源影响研究方面的若干进展。研究表明, 中国水资源问题的产生不仅与人口和社会经济快速发展有联系, 更与气候环境的显著变化密切相关; 未来的气候变化将会导致一些流域水资源更加短缺和洪涝灾害更加频繁, 对流域水资源和可持续发展产生重要影响; 在流域水资源综合规划与管理中, 应十分重视气候变化的影响问题。

关键词: 气候变化; 气候变率; 水循环; 水资源; 综合分析; 中国

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)06-0772-08

中国水资源系统对气候变化的承受能力十分脆弱^[1,2]。多数河流的径流对大气降水变化非常敏感。同时由于我国人口众多, 经济发展迅速, 耗水量不断增加, 许多地区面临着水资源短缺问题; 基础设施的建设和社会经济的快速发展也使洪水、干旱造成的经济损失日益增多^[3]。

未来的气候将继续变化, 自然的年际、年代际气候波动永无停息。人类活动引起的全球气候变化也必须考虑^[4~6]。伴随气候平均态的变化, 极端气候事件如强降水和干旱事件频率可能发生变化。未来全球气候变化可能改变大气降水的空间分布和时间变异特性, 改变水资源空间配置状态, 加剧中国部分流域的水资源供给压力^[4,7,8], 直接影响到水资源稀缺地区的可持续发展。

气候变化及其对水资源的影响已引起国内学者和有关部门的高度重视^[9~14]。第二次全国水资源综合规划工作对气候变化及其影响问题也给予了认真考虑, 设立专题“气候变化对中国水资源情势影响的综合分析”, 开展了系统的科学研究^[15]。本文重点总结该专题的主要研究成果, 同时也介绍了专题以外有关长江流域和华北地区气候变化对水资源影响的相关研究进展。

气候变化是指由于自然或/和人为因素影响引起的全球或区域气候平均状态统计学意义上的显著改变。中国10个主要江河流域界线源自“全国水资源综合规划”技术工作组^[15], 包括松花江流域、辽河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域、东南诸河流域、珠江流域、西南诸河流域和西北诸河流域。气候资料主要来自国家气象信息中心国家级气象台站的连续观测记录。水文资料来源于水利部各大流域水文局提供的水文观测数据。由于研究工作主要集中在2002-2005年之间, 因此分析所用观测数据一般截止到2000年, 部分截止到2005年。关于气候资料和研究方法详细介绍, 可参考文献[16~21]。

1 地面气候及其变化趋势

1.1 常年气候特点与水资源空间变异

中国降水量空间分布差异很大。年降水量基本呈东南向西北递减分布, 其量值由东南沿海的2000 mm以上, 减少到西北内陆的不足25 mm。珠江流域平均年降水量最大, 西北诸河流域最少^[18]。中国降水量的季节差

收稿日期: 2008-03-15

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAC03A01); 第二次全国水资源综合规划研究专题; 全国流域综合规划修编研究专题

作者简介: 任国玉(1958-), 男, 辽宁康平人, 研究员, 博士, 主要从事气候变化和古气候研究。

E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

异及年际变化十分显著, 南方和东北地区降水年际变化相对较小。降水量的这种特点, 造成了中国水资源年内和年际的时空分配不均性。季节降水量空间分布的总体形势与年降水量基本一致。大部地区降水集中在夏季, 一般占全年降水量的 45%~65%, 北方地区集中程度更高, 春、秋两季降水所占比例大致相当, 冬季降水仅占年降水量的 2%~8%。

全国范围而言, 1980-2000 年相对于 1956-1979 年平均值, 丰水年降水量(20%保证率)有减少趋势, 平水年降水量(50%保证率)略有减少, 偏枯和枯水年降水均呈增加趋势(75%、95%保证率), 特别是枯水年降水增加较显著^[18]。降水的这种变化特点, 对于减少水旱灾害及增加水资源利用是有利的。但辽河、海河、淮河及黄河流域不同保证率下降水量均出现减少, 水资源紧张状况趋于严峻。

西北诸河流域年水面(蒸发皿)蒸发量最大, 松花江流域水面蒸发量最小。全国平均水面蒸发量有明显的季节变化, 夏季最大, 其次为春秋两季, 冬季最小。多数流域亦遵循同样的季节变化规律, 仅东南诸河、珠江流域秋季水面蒸发量大于春季; 西南诸河流域春季水面蒸发量最大。春、夏、秋季西北诸河流域的水面蒸发量均为各流域之首, 而冬季以西南诸河流域水面蒸发量为最大。春季东南诸河流域、夏季西南诸河流域、秋冬季松花江流域的蒸发量为各季最小值。春、夏季节南方各流域的蒸发量一般小于北方各流域, 秋、冬季节则相反。

中国年相对湿度空间分布呈现由东南向西北递减的特征, 四川盆地、湖南中部、福建等地为高值区, 西北诸河流域为低值区。流域平均相对湿度以东南诸河流域为最大, 西北诸河流域最小。除西北诸河流域以冬季相对湿度为最大外, 其余各流域均以夏季为最大。北方各流域春季相对湿度为四季中最小, 而南方以冬季为最小。全国平均的季节平均相对湿度由大到小依次为夏、秋、冬、春。

1.2 大气水循环要素的时间演化特征

20 世纪后 50 年, 年平均气温除西南小范围区域略有减少外, 全国大部地区表现出增温趋势。十大江河流域年平均气温均有增加, 北方各大流域增温尤其明显。季节平均气温变化趋势各区之间存在一定差异, 冬季和春季增温明显, 北方尤甚, 长江中下游夏季和西南地区春季则有变冷趋势。

从年降水量变化看, 西部大部地区增加, 北方东部多呈减少态势^[16,18,22]。西部和南方各大流域降水量有增多, 西北诸河、长江中下游和东南诸河等流域增加较明显; 而北方的松花江、辽河、海河、黄河中下游等流域年降水量减少, 其中辽河中下游、海河、黄河下游以及胶、辽半岛诸小河流域降水量减少显著。从全国平均看, 年降水量变化趋势不明显, 但雨日有所减少。从季节上看, 除松花江流域各季降水量与年降水量呈现一致减少外, 其他各大流域的降水量变化不同季节差异较大, 一般北方河流夏、秋季降水减少, 冬春季增加; 南方河流夏、冬季降水增加, 春、秋季减少(表 1)。

20 世纪初以来, 东部降水的变化存在着大致 40~50 年的震荡周期。从 20 世纪 80 年代初到 21 世纪初, 中国东部进入一个降水逐渐增多的阶段。长江流域的降水对东部降水的贡献显著。东部近百年夏季降水增加较明显, 特别是 20 世纪 80 年代中以来增加显著, 秋季降水下降趋势较明显。长江流域季节降水的长期变化特征与东部地区相似。

20 世纪后 50 年, 全国平均年潜在蒸发量(蒸发皿观测和 Penman-Monteith 方法计算)呈明显下降趋势, 90 年代之前减少尤甚, 此后轻微回升, 但仍低于多年平均值^[17,18,21]。冬季潜在蒸发量变化不明显, 夏季下降最显著, 春季减少也较明显。长江、海河、淮河、珠江以及西北、西

表 1 中国及十大江河流域 1956-2002 年降水量的线性变化趋势(10 年)(标准化值趋势)

Table 1 Linear trends in basin-averaged annual and seasonal precipitation (mm) over ten major river catchments and China 1956-2002

流域	冬季	春季	夏季	秋季	年
松花江	-0.08	-0.01	-0.03	-0.11	-0.06
辽河	-0.09	0.03	-0.12	-0.12	-0.15*
海河	-0.07	0.01	-0.16*	-0.08	-0.17*
淮河	0.07	-0.07	-0.11*	-0.13	-0.14*
黄河	0.02	-0.05	-0.10	-0.11	-0.14*
长江	0.06	-0.03	0.06	-0.04	0.03
东南诸河	0.07	0.00	0.19**	-0.09	0.11
西北诸河	-0.02	0.03	0.08*	0.07	0.10*
西南诸河	0.05	0.15**	-0.02	0.09*	0.09**
珠江	0.08	0.04	0.05	-0.02	0.08
中国	0.01	0.01	0.02	-0.02	0.01

注: **通过 0.01 显著水平的相关检验; *通过 0.05 显著水平的相关检验。

南各流域年平均蒸发量均呈明显下降趋势,其中海、淮河流域为东部减少最明显的区域。太阳辐射、气温(气温日较差)和风速变化是造成潜在蒸发量减少的直接因素,其他要素变化的影响在各个流域呈现不同的特征^[17,19]。

现在对造成各大流域气温、降水和蒸发变化的原因还不能给出满意解释。多数研究认为,气温的普遍上升可能与人类活动引起的大气中温室气体浓度增加有关;对降水量的变化,一般认为主要是海洋和季风系统年代以上尺度的振动引起的,也有研究认为可能至少部分与人类活动如温室气体排放、土地利用变化和区域空气污染等因素有关;我国东部多数流域潜在蒸发量的减少与区域人类活动、特别是大范围空气污染有关^[23]。

1.3 极端降水事件和旱涝灾害频率变化

20世纪东部年降水量极端偏多的年份随时间分布比较均匀,降水量极端偏少的年份在减少。长江流域年降水量极端偏多、偏少的年份随时间分布较均一,从20世纪80年代中以来有明显的增多^[18,24];华北地区年降水量极端偏多、偏少的年份都在减少;华南地区年降水量极端偏多、偏少的年份随时间变化不大。东部近百年来雨涝面积和干旱面积没表现出明显的增、减趋势。

20世纪后50年,全国平均干旱面积有扩大趋势,但干旱面积变化存在明显的阶段性,90年代以来扩大快速。北方的海、辽、松、淮、黄河流域干旱面积有明显扩大趋势;东南诸河区域干旱面积有明显缩小趋势,特别是90年代下降趋势明显。

因此,北方主要农区和水资源短缺地区各季干旱面积增加,冬、春发展速度尤快;从干旱面积平均状况看,夏、秋季干旱较重,冬、春季较轻^[18]。黄、淮、海流域和辽河流域干旱面积扩大迅速,东北中北部和华北中北部各流域干旱面积扩大速度相对较小,西北东部干旱面积扩大趋势不明显,这与降水变化的总体趋势分布是一致的。

20世纪后50年,南方各流域雨涝面积有下降趋势,但夏季(6~8月)雨涝面积扩大,特别是在80年代末以后,这种趋势更强烈^[18]。造成南方雨涝面积增加的主要原因在于夏半年降水趋于集中,极端强降水事件趋于增多,洪涝事件更易发生。冬季降水在长江中下游及其以南地区有增多趋势,因此雨涝面积也有明显的扩大现象,特别是80年代末以后这种趋势更强烈。华南地区前汛期降雨有减少趋势,后汛期台风雨有增多趋势,90年代这种趋势更明显。

20世纪后半叶,热带气旋或台风给东南沿海诸河流域带来的降水量及其对总降水量的贡献都呈现出显著减少趋势。

2 土壤水分与高空气候变化

2.1 土壤含水量的时空变化特征

中国土壤水分空间分布存在明显地域差异,但一般与降水量分布具有良好对应关系。35°N以北、120°E以西的北方地区土壤含水量低于18%,其中河套一带、新疆北部内陆河流域最小,低于14%;松辽流域、江淮流域、西南诸河流域土壤含水量多高于20%。大部地区秋季土壤含水量最大,中层(30~50cm)土壤含水量大于上层(0~20cm)。

土壤水分时间变化也存在明显的地域差别。从年代变化看,松、辽流域1981-1989年土壤含水量减少、1990-1994年增加,1995年之后松花江流域土壤含水量减少,而辽河流域则趋于增加^[18]。夏、秋季土壤含水量的年代变化一般较一致,春季与夏、秋季差别明显。多数流域中层(30~50cm)与上层(0~20cm)土壤含水量的年代变化是一致的。从长期趋势变化看,80年代初到21世纪初,东北和华北大部地区土壤含水量减少,其中松花江流域和黄河中下游减少显著。黄河上游和江、淮流域一般增加,长江中下游增加较明显^[18]。

土壤含水量的变化与大气降水量密切相关。在降水增加的流域,土壤含水量一般也增加;反之亦然。但个别地区土壤含水量与降水变化趋势不一致,如辽河流域20世纪80年代以后降水减少,而土壤含水量则有增加

趋势;同样情况出现在春、夏季的华北西南部地区。

2.2 大气水汽通量和云量的变化

大气水汽通量表征高空可降水量的状态。20世纪后50年,中国东部向北输送的水汽有滞留南方的趋势,同时北方向东输送的水汽通量中心强度也减弱^[18]。经向水汽通量特征值(50 kg/(m·s))的北界位置在1968-2003年期间平均每10年南迁近3个纬度,致使海河、黄河流域水汽通量辐合量减少,而长江中下游及其以南地区水汽通量辐合量增加。这些变化与同期华北地区降水减少及华南地区降水增加是一致的。

东部大气水汽通量与太平洋海表温度变化密切相关^[18]。热带太平洋海表增暖,大气产生上升运动距平;中纬度太平洋海表变冷,大气产生下沉运动距平,大尺度环流系统做出相应的调整,在欧亚大陆上产生南正北负的位势高度距平场;西北太平洋副热带高压也表现出增强、偏南和西伸等变化趋势,进一步影响区域大气水汽通量,导致包括中国东部在内的东亚地区向北输送的水汽通量减弱,水汽通量特征等值线南移,黄河和海河等流域水汽通量出现辐散距平,降水呈减少趋势;江淮和江南地区出现水汽通量辐合距平,降水呈增加趋势。

20世纪后50年全国平均总云量呈明显减少趋势,70年代末以来减少尤甚^[18]。从空间上看,内蒙中西部、东北东部、华北大部以及中国西部个别地点总云量减少最为明显。总云量减少主要发生在9~12月。全国平均低云量未见明显变化,但东北南部、新疆、青海、长江以南地区呈增加趋势,华北大部、青藏高原南部低云量减少。低云量的减少主要发生在秋、冬季。全国对流的云出现频率下降了8个百分点,南方减少更多。对流的云减少主要发生在6~9月。层云出现频率一般也下降,特别是在1975年以后,但1986年后趋于稳定。层云的减少主要发生在冬季。自80年代中期以来,中国暖季高层云出现频率也明显减少。

总云量以及各类型云量变化特征与大气水汽通量和降水变化基本一致^[18]。在总云量减少明显的地区,特别是华北大部和东北南部地区,一般也是大气水汽通量减少和降水量下降显著的区域。在南方地区,包括长江中下游流域,总云量变化不明显或呈弱增加趋势,与降水的增加趋势也基本一致。南方对流型云的减少可能和层状云特别是中低层云的增加相联系,与大尺度锋面天气系统出现频率增多、西太平洋副高影响和夏季风减弱等现象一致。

3 长江雨涝与华北旱化

3.1 长江流域降水和洪涝灾害情势

20世纪80年代和90年代长江流域洪水趋于增多,其主导因素是降水量和强降水事件明显增多。20世纪后50年,长江流域大部年降水量呈现上升趋势,夏季和冬季增加明显,90年代尤为显著^[18]。同期长江中下游夏季暴雨日数和极端强降水事件也明显增加。随着极端强降水事件频率的提高,极端降水占总降水量的比重加大,极端降水的集中程度增加。整个长江流域特别是中下游地区夏季和冬季降水量增加和极端强降水事件增多,是20世纪70年代后特别是90年代洪水发生频率增加的重要因素。

20世纪90年代,长江上游地区的极端降水集中程度在6月份也有明显增加。1990年以前,长江上游的暴雨大多出现在7~8月份,而此时长江中下游地区的梅雨期已经结束,上游来水对中下游的防汛威胁不大。90年代上游暴雨有提前发生的趋势,增大了中下游遭遇洪水的机率,使长江流域面临更严峻的防洪形势^[18]。

3.2 近30年华北地区的持续暖干化

在1951-2005年间,中国西北东部、华北和东北的干旱化趋势与降水量的持续减少密切相关,80年代以来气温的持续上升可能也在一定程度上加剧了北方干旱化趋势。西北东部、华北在70年代末发生了由湿向干的转折性变化,当前仍然处于干旱化的过程中;东北地区在近54年里却存在3个干湿变化的转折点,最近由湿向干的转折变化发生在90年代中,目前也处于一个明显的干旱时段。

华北区域的暖干趋势开始于20世纪70年代中后期,80年代以后更趋明显,持续时间已近30年^[18]。华北气温由低向高的转折点发生在1976年,降水由多向少的转折点发生在1977/1978年,随后绝大多数年份为少雨

年份。华北地表湿润指数已连续 28 年持续偏低(干旱)。

在年代际尺度上,太平洋年代涛动(PDO)与华北平均气温、降水量和地表湿润指数具有非常好的对应关系: PDO 的暖位相对应华北高温、少雨和干旱,而冷位相对应低温、多雨和湿润;此外,近 55 年华北地表湿润指数前 5 个主分量的年代际变化均为线性减小趋势,说明总体上存在明显干化趋势,且前 5 个主分量与年和季节 PDO 指数均具有显著的同期相关关系^[18]。对于华北干湿变化与 PDO 在年代际尺度上密切相关的机理,目前还难以得到合理解释。

4 气候未来趋势及其影响

4.1 未来气候变化的可能趋势

20 世纪后半叶,中国十大江河流域气温变化特征可分三类:“冷暖”型、“暖-冷暖”型和“暖-冷”型。未来 10~20 年(2010 年前后开始)间,西南诸河流域的气温将逐步由冷转暖,其他江河流域仍维持偏暖,但在自然变化情况下后期可能向偏冷周期过渡^[18]。

直至 21 世纪初,全国降水变化的空间分布形势基本上是“南多北少”,降水增加区域主要集中在长江流域及以南的东南诸河流域和珠江流域,松花江、辽河、海河和黄河流域处于少雨期,西北诸河流域处于多雨期。2003 年的分析表明,不考虑人类活动影响,即在自然气候变化情况下,松花江流域和淮河流域的少雨期可能将维持 5~10 年,而辽河、海河和黄河流域的少雨期可能要维持 10~15 年,长江流域的多雨期可能会维持到 2015 年前后,东南诸河流域、珠江流域和西北诸河流域的多雨期可能要持续 5~10 年。在 2010-2020 年之间,上述流域降水变化分布形势可能会相继发生转折^[18]。但是,最近几年的观测发现,长江中下游流域降水已出现减少迹象,其多雨期似乎比原来预计的结束时间来得早。

一般认为,2015 年之前中国大部地区仍持续偏暖趋势,降水可能仍以北少南多为主要分布形态。北方大部仍处于暖-干的气候背景下,加之需水量的增加,水资源短缺还是一个突出问题。2015 年以后,随着降水变化趋势的转折,北方大部地区降水可能趋于增加,水资源短缺状况可能得到一定缓解。

对由于人类活动引起的气候变化,当前的研究尚存在较大的不确定性。气候模式的初步预估表明,中国主要江河流域未来气温可能继续上升,21 世纪的前期,十大江河流域的年平均增温可能在 1.0 以上,北方各流域增暖明显。长江、东南诸河和珠江流域变暖幅度相对较小。气候变暖在冬季和春季更明显^[5,18]。

在全球变暖的背景下,多数江河流域降水量可能增多,松花江、辽河和西部内陆河流域降水增加可能更明显,到 21 世纪中年降水量有可能增加 5%~10%;南方诸河流域降水量可能变化不大或减少。长江流域未来 10~30 年年降水量可能略有减少,但极端强降水和干旱事件可能增加。北方各大流域降水增加在冬、春季较明显。与降水量增加相对应,北方各流域年降水日数也可能增多^[18]。有研究表明,中国南方部分地区大雨日数可能增加。台风的影响还不能确定。

目前还不清楚在自然和人类活动综合影响下,中国各大江河流域气候变化的趋势。

4.2 主要江河径流量变化趋势

松花江、黄河、长江、珠江(西江)下游 1956-2000 年实测径流量发生了较明显的变化。长江和珠江流域年径流量微弱增加,而黄河和松花江流域年径流量呈减少趋势。与 60 年代相比,90 年代长江和珠江下游控制站的年平均径流量分别增加了 9.5%和 12%,而黄河和松花江下游控制站年平均径流量分别减少 30%和 6.5%^[18]。径流量的变化与流域平均降水量变化趋势完全一致,说明流域降水变化在很大程度上决定了下游径流量的变化。

上述南北 4 条河流呈现不同的丰枯变化,特别在 1956-1966 年和 1990-2000 年时段,南北方河川径流量呈异相变化,而在 1967-1989 年时段长江和黄河径流量呈同相变化。松花江和珠江径流量变化存在 24 年左右的周期。

各大河流域径流量的季节分布发生了显著变化。在1980-2000年间4条江河夏季径流增加;冬季径流除珠江外,其他也呈增加趋势,但不如夏季显著;秋季各河的径流在近20年都有减少,黄河和长江减少明显。春季径流在长江和珠江减少,黄河径流量增加^[18]。

松花江和长江流域降雨与径流关系变化不明显,1980-2000年径流系数比1956-1979年略有增加,表明下垫面变化有利于径流的形成。黄河和珠江流域降雨与径流关系变化较大,其中黄河流域平均径流系数呈现减少趋势,而且降雨量较大和较小时,径流系数呈现增大和减小,表明流域涵养水的能力减弱,这可能与黄河上游源区植被退化有关;珠江流域降雨与径流关系变化与黄河流域相反,流域涵养水的能力有所加强,可能与植被覆盖率增加有关^[18]。

利用径流对降水变化响应的敏感程度或弹性系数^[18]及全球气候模式模拟结果^[5,6,18],预计21世纪中期和后期,在人类活动引起的全球气候继续变暖情况下,4条河流的径流量都呈增加趋势,松花江和珠江可能增加5%~10%,长江和黄河增幅略小,可能不到5%。在黄河河源区,降水变化对径流量的影响较大,气温影响相对较小;而未来黄河源区的降水量可能增加,这可能会缓解甚至逆转近20年黄河上游径流量减少趋势^[18]。

对主要江河径流量的预估还存在着不确定性。当前,对气候系统自然演变和人为因素强迫下的响应机理尚缺乏充分认识。上述估计也没有考虑自然气候变化的影响。

5 结 论

气候变化引起水循环变化,直接影响中国各大流域水资源供应和分布。20世纪80年代到21世纪初,中国地面气温呈现明显变暖趋势,东部出现“北旱南涝”的变化特点。缺水的海河、黄河等流域降水持续偏少,而丰水的长江中下游和东南沿海地区降水趋于增加,强降水事件频率增高,水资源空间分布更加不均,加剧了北方水资源的供需矛盾和南方防洪抗灾的压力。

中国水资源问题的产生不仅与人口和社会经济迅猛发展有关,也与气候环境变化密切相关。尽管对未来气候变化的预估还存在很多不确定性,但一般认为,在自然变化和人类活动的共同影响下,今后几十年中国各大江河流域的气温可能继续变暖,异常多雨地带可能发生迁移,一些流域极端降水事件频率可能升高。这些变化将对流域或区域水循环、水资源产生重要影响,也会对现有的水利工程设施的功能和效率提出新的挑战。

致谢:高歌、曹建廷、张莉、江滢、张秀芝、徐影、张建云、刘春蓁、王颖、黄朝迎、郭军等人对本文有贡献。同时感谢刘昌明、李原园、任光照、焦得生、贺伟程、张德尧、丁一汇、李黄、章国材、夏军、王邦中、赵宗慈、葛全胜、巢清尘、沈福祥等专家的支持和建议。

参考文献:

- [1] 刘春蓁. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 115-119. (LIU Chunzhen. Issues on studies of climate change impacts on terrestrial water cycle[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(1): 115-119. (in Chinese))
- [2] 陈宜瑜, 丁永建, 余之祥, 等. 中国气候与环境演变(下卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 397. (CHEN Yi-yu, DING Yong-jian, SHE Zhi-xiang, et al. Climate and environmental change in China (Vol 2)[M]. Beijing: Science Press, 2005. 397. (in Chinese))
- [3] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 209. (LIU Chang-ming, CHEN Zhi-kai. Analysis of current state and supply and demand trends of China's water resources[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. 209. (in Chinese))
- [4] IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881.
- [5] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰. 中国气候与环境演变(上卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 562. (QIN Da-he, Ding Yi-hui, SU Ji-lan. Climate and environmental change in China (Vol 1)[M]. Beijing: Science Press, 2005. 562. (in Chinese))
- [6] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8. (DING Yi-hui, REN Guo-yu, SHI Guang-yu, et al. National assessment report on climate change (Part one): History and future

- trends of climate change of China[J]. *Advance in Climate Change Research*, 2005, 2(1): 3 - 8. (in Chinese))
- [7] UNDP. *Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis*[R]. UNDP: Human Development Report 2006, 2006.
- [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. 214. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing. *Studies of climate change impact on water resources*[M]. Beijing: Science Press, 2007. 214. (in Chinese))
- [9] 叶笃正, 黄荣辉. 黄河长江流域旱涝规律和成因研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 1 - 53, 366 - 371. (YE Du-zheng, HUANG Rong-hui. *Study on change and causes of droughts and floods over the Yellow Rivers and Yangtze Rivers*[M]. Jinan: Shandong Science and Technological Press, 1996. 1 - 53, 366 - 371. (in Chinese))
- [10] 张建云. 气候变化对水资源影响研究中需进一步研究的若干问题[J]. *水科学进展*, 2000, 11(增刊): 76 - 79. (ZHANG Jian-yun. *Some issues on studies of climate change impacts on water resources*[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(Supp): 76 - 79. (in Chinese))
- [11] 夏 军, 谈 戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. *资源科学*, 2002, 24(3): 1 - 7. (XIA Jun, TAN Ge. *Water security problems and research perspective in China*[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 24(3): 1 - 7. (in Chinese))
- [12] 秦大河. 中国西部环境演变评估(综合报告)[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 80. (QIN Da-he. *Assessment of environmental change in western China (Synthesis report)*[M]. Beijing: Science Press, 2002. 80. (in Chinese))
- [13] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 中国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(): 主要研究成果[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(11): 1168 - 1175. (FU Cong-bin, AN Zhi-sheng, GUO Wei-dong. *Evolution of life-supporting environment in China and the predictive study of aridification in north China (): Main research results*[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(11): 1168 - 1175. (in Chinese))
- [14] 钱正英, 沈国舫, 石玉林. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究(综合卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 539. (QIAN Zheng-ying, SHEN Guo-fang, SHI Yu-lin. *Strategy studies of water and land resource allocation, ecosystem and environmental reservation and sustainable development in northeast China (Synthesis volume)*[M]. Beijing: Science Press, 2007. 539. (in Chinese))
- [15] 中国水利规划设计总院. 全国水资源综合规划水资源调查评价[R]. 北京: 中国水利规划设计总院, 2004. 230. (Institute of China Water Resources Planning. *Investigation and evaluation of water resources in China water resource integrated planning*[M]. Beijing: Institute of China Water Resources Planning, 2004. 230. (in Chinese))
- [16] 任国玉, 郭 军, 徐铭志, 等. 五十年来中国大陆近地面气候变化的基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 942 - 956. (REN Guo-yu, GUO Jun, XU Min-zhi, *et al.* *Climate changes of Mainland China over the past half century*[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 63(6): 942 - 956. (in Chinese))
- [17] 任国玉, 郭 军. 中国水面蒸发量的变化[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 31 - 44. (REN Guo-yu, GUO Jun. *Change in pan evaporation of mainland China*[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 31 - 44. (in Chinese))
- [18] 任国玉. 气候变化与中国水资源 [M]. 北京: 气象出版社, 2007. (REN Guo-yu. *Climate change and China's water resources*[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007. (in Chinese))
- [19] 郭 军, 任国玉. 黄、淮、海河流域蒸发量变化特征及其可能原因[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 666 - 672. (GUO Jun, REN Guo-yu. *Change in pan evaporation and its causes of the Huang-Huai-Hai rivers*[J]. *Advances in Water Sciences*, 2005, 16(5): 666 - 672. (in Chinese))
- [20] 陈 峪, 高 歌, 任国玉, 等. 中国十大流域近 40 多年降水量的时空变化特征[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 637 - 643. (CHEN Yu, GAO Ge, REN Guo-yu, *et al.* *Spatial and temporal variation of precipitation over ten major basins in China between 1956 and 2000*[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 637 - 643. (in Chinese))
- [21] 高 歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956 - 2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. *地理研究*, 2006, 25(3): 378 - 387. (GAO Ge, CHEN De-liang, REN Guo-yu, *et al.* *The characteristics of potential evapotranspiration over china during 1956 to 2000*[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 378 - 387. (in Chinese))
- [22] 任国玉, 吴 虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. *应用气象学报*, 2000, 11: 322 - 330. (REN Guo-yu, WU Hong, CHEN Zheng-hong. *Spatial characteristics of precipitation change over China*[J]. *Chinese Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11: 322 - 330. (in Chinese))

- [23] 赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 808 - 817.
(ZHAO Zong-ci, WANG Shao-wu, XU Ying, *et al.* The possible causes for surface air temperature change of the last 100 years over China [J]. *Climate and Environmental Research*, 2005, 10(4): 808 - 817. (in Chinese))
- [24] ZHAI P M, ZHANG X B, WAN H, *et al.* PAN, trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. *J Climat*, 2005, 18: 1096 - 1108.

An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources^{*}

REN Guo-yu¹, JIANG Tong^{1,2}, LI Wei-jing¹, ZHAI Pan-mao^{1,3}, LUO Yong¹, MA Zhu-guo⁴

(1. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China;*

2. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;*

3. *Department of Prediction and Disaster Reduction, CMA, Beijing 100081, China;*

4. *Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)*

Abstract: The newly advances in the climate change and China's water resources are given in this paper. The results and findings show that the current water resource issue in China is related not only to the rapid growth of population and economic, but also to the obvious climate change and variability over the past 50 years. Future change in climate will probably lead to further shortage of water resources in some river basins and more severe floods in others, threatening the sustainable development of the catchments. The authors recommend that more attention be given to the issue of climate change and variability in planning and managing major river basins' water resources in the future.

Key words: climate change; climate variability; water cycle; water resource; integrated assessment; China

第16届亚太地区国际水利学大会(IAHR-APD)暨第3届IAHR 水工水力学国际研讨会(IAHR-ISHS)在南京召开

2008年10月20~24日,国际水利学会第16届亚太地区会议(IAHR-APD)暨第3届水工水力学国际研讨会(IAHR-ISHS)在南京隆重召开,本届大会由国际水利学会主办,河海大学承办,南京水利科学研究院协办,主题为“水与人类——友好、和谐与可持续发展”,包括国际水利学会(IAHR)主席Nobuyuki Tamai、APD主席V. Sundar、HS主席J. Matos和大会技术委员会副主席李行伟教授等在内的近600余名国内外专家参加了会议。南京水利科学研究院张建云院长、李云副院长出席开幕式,张建云院长主持了大会主旨报告。

大会设6个分会场,重点围绕“水文水资源”、“环境与生态水力学”、“河床演变与河流工程”、“河口海岸工程”、“水工水力学”、“水电站水力学”等6个议题进行交流讨论。大会还邀请6名国际著名专家作专题报告。

会议期间,近200名中外参会代表参观了南京水利科学研究院铁心桥试验研究基地,中外代表们对南京水利科学研究院科研实力、科研条件和环境以及研究成果等给予高度评价。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Key Technologies R & D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2007BAC03A01).