

气候自然变异与气候强迫变化 对径流影响研究进展

刘春蓁

(水利部水利信息中心, 100053, 北京)

摘要: 在回顾 IPCC 自 1990 年至 2007 年 4 次关于气候变化对径流影响评价报告进展的基础上, 将第一次与第二次评价报告归纳为第一代, 主要以气候均值变化对径流影响及其适应为主要特征; 第三次与第四次评价报告为第二代, 主要突出人为强迫与气候自然变异变化对径流影响及其适应问题。分析了气候变化对水文水资源影响评价方法的发展过程与存在的问题, 认为目前的气候影响评价反映了气候年代自然变异的影响, 但未考虑与极端事件发生频次和强度变化密切相关的气候日、季和年际尺度变化的影响, 从而低估了气候变暖对洪水、干旱以及农业灌溉需水的负面作用。在介绍国内外研究的基础上, 为下次 IPCC 评价报告, 提出了应加强水文、气候交叉学科研究气候变化与自然变异对水影响的后果及其适应等问题的建议。

关键词: 气候自然变异; 气候强迫变化; 径流; IPCC 评价报告

Advances in studying impacts of climate natural variability and forced change on stream flow//Liu Chunzhen

Abstract: Based on the review of the course of successive 4 Assessment Reports of the IPCC WGII on climate change impact on streamflow, started from 1990, it was summarized that the First (FAR) and Second (SAR) seemed as first generation studies, characterizing the impact of change in mean climate and adaptation to it, while the Third (TAR) and Forth(AR4) Assessment Reports as second generation study, which emphasized the impact of climate forced change and natural variability on streamflow and adaptation to them. The progress and issues in studying methodology of climate change on hydrology and water resources were analyzed. Therefore, it was pointed out that the impact of decadal and multi-decadal variability of climatic parameters on streamflow can be identified, but the changes in inter-annual and day to day variability were not taken into account in the conventional methodology of hydrological impact studies, hence as the results, the impact of climate change on extreme events, such as droughts and floods and irrigation water demands were underestimated. As for further studies, the paper came to conclusion suggesting to emphasize the cross cutting study between hydrology and climatology on the hydrological consequences of climate natural variability and climate forced change impacts during the next IPCC Assessment Report.

Key words: climate natural variability; climate forced change; streamflow; IPCC Assessment Report

中图分类号: P461+TV121

文献标识码: A

文章编号: 1000-1123(2008)02-0041-06

一、引言

自 1988 年世界气象组织(WMO)与联合国环境规划署(UNEP)联合建立政府间气候变化专门委员会(IPCC)以来, IPCC 已经完成了 4 次关于气候

变化影响的评价报告, 即 1990 年的第一次报告(FAR), 1995 年的第二次报告(SAR), 2001 年的第三次报告(TAR)及 2007 年的第四次报告(AR4)。从气候变化对水影响的研究看, 可以将这 4 次评价报告分为两

代, 第一代以 FAR、SAR 为代表, 主要集中在气候均值变化对水文水资源的影响和适应对策研究^[1,2]; 第二代自 TAR 开始, 提出了径流自然变异的重要性, 并在气候变化影响的归因研究中, 重视了气候自然变异对径流影

收稿日期: 2007-12-18

作者简介: 刘春蓁(1933—), 女, 教授级高级工程师, 主要从事气候变化对水文水资源影响研究。

响的检测^[9]。随着气候科学及气候模型的发展,至AR4开始采用气候模型分离气候自然变异与气候变化引起的径流变化,并采用信号噪声比值来评价径流变化趋势中人为气候强迫变化及自然变异的贡献,给出气候强迫影响显著性大于气候自然变异影响的地区,以及气候自然变异影响可能仍起主要作用的地区^[4]。这一进展不仅反映了水文气候研究的深入,而且为决策者及水资源管理者提供了更有效的气候变化风险管理信息。至此,适应气候变化的对策,从只对气候均值变化影响进展至对气候强迫变化和气候自然变异影响的适应对策研究,其实用性和针对性得到了扩展与加强。

从IPCC历次评价报告可以清楚地看到,每一次气候科学的进步都在推动气候变化影响研究的进步。1995年第一工作组的SAR^[9],对气候系统不同时间尺度自然变异的揭示促进了2001年第二工作组TAR对气候变异影响的认知与重视。2001年第一工作组TAR给出的近150年来气温变化的检测与归因促进了2007年AR4对观测的水文变量变化趋势的检测与归因研究等。

然而,全球变暖对气候自然变异的影响研究尚处于起步阶段,研究这一问题的挑战性在于气候变异的时间尺度包括了日、季、年、年代、世纪至千年,人为气候强迫对气候自然变异的影响涉及对其全部变化的影响。目前气候模型可以模拟以海、气相互作用为主导的年代际及多年代际时间尺度的自然变异,而制约日、季、年际尺度的自然变异的因素,除了海洋状态外,还包括陆地状况,如青藏高原积雪、极地海冰、陆地表面过程、土壤温湿状况以及大气成分—气溶胶—云—辐射相互作用等,如果气候模型没有足够高的时空分辨率和模拟精度,则很难识别这些更精细的自然变异的变化,最终也很难解决这个

有重大科学与实用价值的问题。

气候系统内在的各种尺度的自然变化机理与可预报性是重要的基础性气候科学问题。本文不涉及气候要素自然变异的原因,仅从气候自然变异与人为强迫的气候变化对径流影响研究的历史进程做一回顾性分析,试图从中总结并揭示目前的研究水平、不足之处以及未来需要关注的问题,希望对即将开展的“十一五”适应气候变化影响的研究有所帮助。

二、气候自然变异与人为强迫的气候变化对径流影响研究

1. 与气候有关的水文时间序列变化趋势问题

最近一个时期以来,对水文时间序列变化趋势存在两种看法:一种认为水文现象是稳定的随机变量,随机序列中只有波动变化,而无趋势性变化,长序列的水文均值为不变的常数;另一种则将近30年水文现象的变化全部归因于气候变暖的结果。全球范围长系列观测的气候资料的获取以及气候模型对气候及其变率模拟的改进,促进了气候学家对历史资料的统计分析研究以及对长达几个世纪历史气候的数值模拟试验,这些研究揭示了气候系统内部的从几个星期至几个世纪甚至千年时间尺度的自然变异情况。人们逐渐认识到海洋作为缓慢的气候分量,能够集成高频天气变化,并与快速的气候分量相互作用,对气候的年代际和世纪尺度变异起着重要作用^[5,9],在无外力影响情况下,气候系统自身能够制造出量级较大、时间尺度较长的内在变化。气候科学的进步,促进了水文气候研究。自SAR以后,水文现象与气候低频变化间关联的研究在全球范围内广泛开展起来,特别是用厄尔尼诺、北大西洋波动、太平洋10年振荡等海气相互作用来解释水文现象随时间

的变化。在北美^[7,8]、南美^[9,10]、澳大利亚^[11]、欧洲^[12]及南非^[13]、亚洲等的研究表明,水文现象不仅具有年际变化,还有明显的年代际变化,变异的类型在不同地区有很大差异。这些研究告诉我们:即使没有人为强迫导致的气候变化,水文现象也有年际与年代际之间的变化。水文现象趋势性变化的原因首先要从气候自然变异与人为强迫变化两方面来认识;其次,对气候变化引起的水文变量年际与年代变异性随时间变化的评估,只能建立在气候模型对气候低频现象变异性的正确描写基础上;再者,只有正确认识水文现象随时间变化的原因,才有可能预测它的未来。

近年,关于全球变暖的水文后果,开始进行了以下两方面趋势变化研究:一是从观测的长系列水文气象历史资料中分析气候自然变异和人为强迫变化的影响,另一个是从模型得到的未来气候情景下的径流变化趋势,并评价两种变化的贡献。受当前气候模型模拟精度及其不确定性的限制,关于未来气候自然变异变化对径流的影响研究尚处于起步阶段,很多科学问题有待解决。

2. 在观测的水文气象系列中分离气候自然变异与气候强迫变化影响研究

1995年以后,很多气候学家采用海、气耦合模型分别模拟自然变化与人为强迫变化对历史长系列气候要素变化趋势的贡献问题。1999年Hulme^[14]等采用全球气候模型及影响模型研究人为气候强迫变化与自然气候变异对年径流和农业生产的相对影响,并给出气候变化大于自然气候变异标准差的2倍时,气候变化才是显著的判别依据。他们采用人为气候强迫信号与自然气候变异噪声之比的方法揭示出欧洲有些地区受大西洋波动影响,气候的自然年际变异

很强,从而掩盖了人为强迫气候变化的影响。

基于众多的对长系列观测数据变化趋势的检测研究,IPCC 第一工作组在第三次评价报告^[9]中明确给出了气候变化检测的定义:“由于气候自然变异的存在,人为气候变化的检测与归因是统计上的信号—噪声问题。检测是一个过程,它展示观测到的变化在统计意义上不同于由内在的自然变异可以解释的过程”。该报告第 12 章给出了采用气候模型对 1850—2000 年全球气温 4 个集合模拟的结果,分离出了 150 年气候系统自然变异与温室气体强迫对逐年全球地面气温相对于 1880—1920 年平均距平的贡献。这种采用气候模型分离气候系统自然变异与温室气体强迫的方法比较适合于主要受气温变化制约的现象或变量。对于降水,由于它的时空变异性很大,对温室气体浓度升高不敏感,加上目前气候模型对降水模拟的可靠性较低,在相同的温室气体排放情景下,不同气候模型可以给出完全不同的空间分布和降水量,因此用气候模型来分离长系列观测降水量中自然变异与人为强迫变化的贡献有较大难度。由于降水的时空变化尺度比气温大得多,仅通过观测数据的统计分析也很难分离出气候的自然变异与人为强迫。目前对降水变化的检测与归因方法基本按两步完成,即先从观测的长系列降水数据中提炼出降水变化的特性及与其相关显著的现象或事件,再由气候模型模拟确认这些现象或事件与气候人为强迫变化是否有关。例如 Fauchereau 等^[19]分析了南非 20 世纪降水的变异与变化,发现自 19 世纪 60 年代南非降水的变异性发生了十分显著的变化,年际变化加大,干旱增强并扩展,与南非降水变异联系较显著的遥相关由 19 世纪 70 年代以前的区域型变为 70 年代以后

的全球型,与 ENSO 事件的统计相关性增强。GCM 数值模拟试验,揭示出降水变异与 ENSO 相关的加强与海温长时间的变化、温室气体及气溶胶结合的气候变暖信号等有关。很多对降水长系列观测数据的统计研究表明,自 70 年代以后,降水的年际变化加大、极端事件频发、干旱与洪水交替出现^[16,17]。

对径流长期变化趋势的检测与归因要比气温变化的检测与归因困难得多^[18]。这是因为除了气候因素外,影响径流变化的还有非气候因素,如人口增加、经济社会发展引起用水量、消耗水量增加,土地利用、土地覆盖变化对产、汇流的影响等。而气候因素中降水作为主要影响因子,它的时空变异性比气温大得多,而对温室气体的敏感性却比气温小得多。就像有些地区降水的自然变异性大于人为强迫对降水的影响一样,某些地区气候强迫变化对径流影响的信号很可能被自然气候变异影响的噪声掩盖。在第二工作组第四次评价报告第一章给出的联合归因方法,即第一步通过统计分析显示自然或生态系统的变化归因于区域气候变化,第二步通过气候模型模拟证明观测的区域气候变化归因于人为气候强迫。这种方法已用于冰冻圈、极地流量变化,以及以冰川积雪融化补给为主的河流^[19,20]。对于大多数流域的径流变化检测研究一般采用统计方法。在第三次评价报告期间,很多国家对位于不同气候区的流域,从水文气象长系列观测值探求径流变化与降水、气温的相关关系,并从降水、气温的变化寻求径流增减的原因^[9]。这些研究对于估算河流系统对气候变化的脆弱性及适应对策有一定意义,但这种研究不能回答人为强迫变化在径流变化中起多大作用和所占的份额。只有将影响径流变化的各种因素都考虑在内,而且各因素都有足够长的观测数据,才有可能在一定的误差范围内通

过统计分析给出人为强迫的贡献。即使如此,也很难仅用统计方法分辨出气候自然变异和人为强迫变化各自对径流变化的贡献。近年,出现了采用气候模型直接与响应模型结合的方法比较自然系统观测的变化与有无人为强迫气候变化模拟的结果^[21]。如 Reichert 等给出瑞士与挪威两个冰川的后退不能用气候的自然变异和冰川的物质平衡解释^[19,20]。Milly^[21]用多个 GCMs 集合和统计显著性检验技术模拟 1900—1998 年期间全球大尺度径流分布,并指出气候强迫已经对 1970 年代以后全球径流分布产生影响,气候强迫信号在欧亚大陆北部和北美西北部的高纬地区比较显著。

3. 未来水文气象变量变化趋势及变化原因研究

对预测的未来径流变化趋势中气候自然变异变化和人为气候强迫变化影响的研究目前尚处于起始阶段。以下给出 IPCC 的 4 次评价报告近 17 年间,最常用的气候变化影响评价方法及其分辨气候自然变异与人为强迫变化的能力问题。

(1) 在 FAR、SAR 时期,气候模型的模拟能力较低,一般采用假定的气候变化值以及由 GCMs 输出的当大气 CO₂ 浓度加倍达到稳定状态的气候情景值(大致在 2030 年代),不考虑温室气体增加的过程。由此构建的气候平均变化,驱动水文模型。如我国“八五”期间采用赵宗慈^[22]提供的 7 个平衡 GCMs 输出的 CO₂ 加倍时的降水、气温均值变化,修正 1961—1990 年观测的降水、气温值,并将它们输入集总的水文模型,研究气候均值变化对我国 7 个代表性流域径流的影响。为了考虑气候波动,在研究中,引进了保证率的概念,即气候均值变化发生在平水年(保证率 50%)、枯水年(保证率 75%)及特枯水年(保证率 95%)时引起的径流变化。结果表明,虽然温室气体加倍对径流均值变化

的影响不大,仅为2%~12%,但如果它发生在特枯水年,则将对黄淮海地区水资源短缺产生很大影响^[23]。

(2) 1992年联合国通过了“气候变化框架公约”。公约的第二条款提出:“将大气中温室气体浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平”。同年IPCC研制了一组温室气体排放情景(1992),每组情景有各自关于未来人口总量、经济发展、土地利用的变化,并假定1990—2100年,温室气体以每年1%的幅度增加。1997年《京都议定书》通过,其中对发达国家提出了具体的减排指标。自那时开始,出现了一系列针对大气温室气体浓度稳定在某一排放水平,如550ml/m³、750ml/m³时的影响研究^[24,25],试图回答气候系统不受到危险的人为干扰的排放水平。2000年IPCC发布了排放情景特别报告(SRES),并称之为SRES情景。根据对未来设定的4种不同的社会经济发展速度、财富的增长、技术发展以及人口增长率、土地覆盖等,给出了全球1990—2100年4种能源消费和相应的温室气体排放情景(标记为A1, A2, B1, B2),再将这些全球的SRES情景聚解至0.5°×0.5°格点尺度,成为目前气候变化模型进行人为强迫数值试验的主要依据。

随着温室气体排放情景与经济社会发展途径及人口增长率联系起来以及气候模型模拟能力的提高,GCMs从平衡的数值试验发展为渐变试验。从CO₂加倍时一个气候单元的气候变化情景模拟发展至若干气候单元的模拟。Mitchell^[26]采用海气耦合模型研究了大气中CO₂浓度自1990年以每年1%速度增加,并稳定在550 ml/m³、750 ml/m³时,相对于基准情景的气候变化。用控制试验的标准差衡量自然变异,其结果表明,在全球范围内选择的5个试验区,年平均气温变化都达到显

著水平。而季节性降水,在有些地区,即使到2085年,也小于自然变异标准差的2倍,未能达到统计上的显著变化。这可能是自然变异太大,掩盖了人为强迫变化,也可能是气候模型对降水变化模拟不正确或其误差所致。

为了便于影响研究,Arnell^[27]给出了气候变化情景的定义,即根据某种设定的温室气体排放情景,由气候模型模拟出的气候变化情景为未来2020s(2010—2039年),2050s(2040—2069年),2080s(2070—2099年)每30年平均气候相对于GCMs模拟的1961—1990年期间的气候变化。但这个变化值还不能直接输入影响研究模型,而需要将上述由气候模型输出的几万km²格点尺度上的人为强迫气候变化情景值叠加在格点尺度为0.5°×0.5°1961—1990年期间观测到的基准气候系列上,构建一个比气候模型分辨率高,并被人为强迫扰动的气候系列场。

当前GCMs模拟的气候绝对值,尤其对降水的模拟误差很大,不能直接将它输入水文模型,而是将以上述方法得到的气候变化相对值,用于调整1961—1990年期间观测的气候系列值。这样可以使气候情景与当前的气候条件一致,并使GCMs气候模拟误差的影响为最小。虽然气候模型尚不能正确地模拟出气候变量的绝对值,但可以认为气候模型对当前及未来气候模拟的误差值是相似的。同时也起到了由全球粗网格尺度递降到较细网格尺度的作用。

Arnell^[27]采用SRES排放和经济社会情景研究了气候变化与全球水资源。他将6个GCM模型给出的气候变化产品用到描写1961—1990年期间格点为0.5°×0.5°基准气候上^[28],在0.5°×0.5°分辨率的网格上运行大尺度水文模型,模拟出无气候变化的1995年在不同排放情景下的2010—

2039年、2040—2069年、2070—2099年相对于1961—1990年的年径流变化(%)。模型输出每30年的月径流系列(水文模型运行的时间尺度为日,但输出产品为月),再由月累计到年平均径流。从每30年径流均值的变化可以看到气候年代际变化对径流的影响。作者给出了A2排放情景下6个气候模型模拟出的2050年平均年径流相对于1961—1990年的变化分布图。6张径流变化分布图大致类似降水分布,但有区域差异。作者根据气候变化信号大于自然年代际变异标准差的气候变化信号定义为变化显著的地区,结果得到模拟一半以上的面积为径流显著减少的地区,包括欧洲大部、中东、南非、北美及南美大部,径流一致显著增加的地区为北美及西伯利亚的高纬度地区。

(3) 上述方法反映了气候模型对气候自然变异模拟的能力与水平。目前气候模型对降水模拟的误差很大,由模型得到的降水模拟值与其观测值的偏离很大。如果将某一个GCM输出的降水绝对值(不是多个模型的集合值)直接输入水文模型,必将出现由误差引起的杂乱无章的变化,而得不到清晰完整的径流分布图。正因为如此,采用了保留气候年代际变化,而不考虑日际、年际尺度的气候自然变异的简单方法。即使气候模型具有描写气候年际尺度变异及其变化的能力,它们也只是体现在各30年的径流均值变化中。

(4) 目前为解决GCM与水文模型空间尺度不匹配而采取的种种递降尺度方法,将当前气候条件下的降水时空分布外延至未来变化的气候条件下,即保留了现今条件下的气候自然变异,而没有考虑人为强迫对其的影响。近几年,为减少气候模型对降水模拟的不确定性,开始采用多个气候模型集合平均^[29],或

反复运行一个具有不同初始条件的GCM^[3]方法,研究全球或流域尺度的径流变化问题^[31,32]。

由于上述方法没有考虑温室气体浓度增加对气候变量尤其降水的年际和日际变化影响,气候变暖对未来的洪水、干旱极端水文事件以及农业灌溉需水量的影响被低估了。

三、结论

(1) 气候系统具有日、季、年、年代、世纪至千年以上的多尺度变异性。人为强迫对气候自然变异全部谱变化的影响将改变极端水文气候事件时间、空间概率分布变化,以及高于或低于气候均值概率分布的变化,并对水旱灾害的防御与水资源风险管理,以及农业生产布局等产生十分重要的影响。

(2) 受气候模型模拟不确定性的限制,目前很多气候变化对水影响的研究不是将GCMs模拟的气候变量绝对值,尤其是降水量直接输入水文模型,而是用几万km²格点上的气候变化情景值修正格点为0.5°×0.5°、1961—1990年期间观测到的基准气候场,为水文模型构建一个比气候模型空间分辨率高,并被人为强迫扰动的气候系列。这种影响评估方法可以考虑人为强迫导致的气候年代际变异变化,但不能考虑日、季、年际尺度变异变化对径流的影响。因此气候变化对极端水文气候事件的影响被低估了。

(3) 提高全球及区域气候模型时空分辨率,改进对降水的模拟精度,采用物理模型与统计技术结合方法对观测的以及未来预测的水文气候变化趋势进行自然变异与人为强迫变化的检测与归因研究,预计将是IPCC第五次影响、适应和脆弱性评价报告的核心任务之一。

(4) 受气候变暖与东亚季风变异性影响,我国水旱灾害的时空变异性

有日益加大的趋势。2006年夏季,四川发生百年不遇的大旱,而2007年重庆发生百年不遇的洪水。防汛抗旱工作的艰巨性加大。人为强迫对气候自然变异的影响研究,既有重大的科学意义,也对减灾防灾具有重要的实际价值。这将是我国水文与气候工作者在较长一段时间内面临的颇具挑战性的任务。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change: The IPCC Impacts Assessment [Tegart McG W J, Sheldon G W, Griffiths D C (eds)] [M]. Canberra: Australian Government Publishing Service, Australia 1990.
- [2] IPCC. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific - Technical Analyses. Contribution of Working Group to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press 1996.
- [3] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA. 2001.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- [5] IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University

Press, United Kingdom and New York, NY, USA. 1996.

- [6] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA. 2001.
- [7] Vogel R M, Bell C J, Fennessey N M. Climate, streamflow and water supply in the northeastern United States [J]. J Hydrol, 1997 (198).
- [8] Piechota T C, Dracup J A, Fovell R G. Western US streamflow and atmospheric circulation patterns during El Nino/ Southern Oscillation [J]. J Hydrol, 1997(201).
- [9] Marengo J A. Variations and change in South American streamflow [J]. Climate Change, 1995(31).
- [10] Compagnucci R H, Vargas W M. Interannual variability of the Cuyo River's streamflow in the Argentinian Andean Mountains and ENSO events [J]. J Climatol. 1998(18).
- [11] Chiew F H S, Piechota T C, Dracup J A, et al. El Nino Southern Oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought - links and potential for forecasting [J]. J Hydrol. 1998(204).
- [12] Shorthouse C, Arnell N W. Spatial and temporal variability in European river flows and the North Atlantic Oscillation [A]. Ass Hydrol. Sci. Publ[C]. FRIEND '97, 1997(246).
- [13] Schulze, R.E. Impacts of global climate change in a hydrologically vulnerable region: challenges to South African hydrologists [J]. Progress in Physical Geography, 1997(21).
- [14] Hulme M, Barrow E M, Arnell N W, et al. Relative impacts of human-induced climate change and natural di-

- mate variability [J]. *Nature*, 1999(397).
- [15] Fauchereau N, Trzaska S, Rouault M, et al. Rainfall Variability and Changes in Southern Africa during the 20th Century in the Global Warming [J]. *Natural Hazards*, 2003.
- [16] Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003(84).
- [17] Zhai P M. Climate change and meteorological disasters [J]. *Science and Technology Review*, 2004.
- [18] 刘春蓁. 气候变化对江河流量变化趋势影响研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2007(22).
- [19] Reichert B K, Bengtsson L, Oerlemans J. Recent glacier retreat exceeds internal variability [J]. *J Climate*, 2002.
- [20] Wu P, Wood R, Stott P. Human influence on increasing Arctic river discharges [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005.
- [21] 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.
- [22] Zhao Z C. The Climatic Change Produced by GHG and their impact on China [J]. *CRU/WWF/SMA*, 1992.
- [23] 刘春蓁. 气候变化对我国水文水资源的可能影响 [J]. *水科学进展*, 1997(8).
- [24] Arnell N W, Cannell M G R, Hulme M, et al. The consequences of CO₂ stabilization for the impacts of climate change [J]. *J Climatic Change*, 2001(53).
- [25] Arnell N W, Levermore M J L, Kovats S, et al. Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments characterizing the SRES storyline [J]. *Global Environmental Change*, 2004(14).
- [26] Mitchell J F B, Johns T C, Ingram W J et al. The effect of stabilizing atmospheric carbon dioxide concentrations on global and regional climate change [J]. *Geophysical research letters*, 2000(27).
- [27] Arnell N W. Climate change and global water resources SRES emissions and socio-economic scenarios [J]. *Global Environmental Change*, 2003(14).
- [28] New M, Hulme M, Jones P D. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: Developments of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology [J]. *J of Climate*, 1999(12).
- [29] Murphy J M, Sexton D M H, Barnett D N, et al. Quantification of modeling uncertainties in a large ensemble of climate change simulation [J]. *Nature*, 2004(430).
- [30] Palmer T N, Raisanen J. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate [J]. *Nature*, 2002 (415).
- [31] Jasper K, Calanca P, Gydlistras D, et al. Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine rivers [J]. *Climate Research*, 2004(26).

责任编辑 张金慧

(上接第 54 页)

- [2] Jang T, Su B D, Hartmann H. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961 - 2000 [J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4).
- [3] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate [J]. *Nature*, 2002, 415.
- [4] 三峡工程生态与环境监测系统信息管理中心. 对局地气候的影响 [EB/OL]. <http://www.tgenviro.org/envissue/projecteffect7.html>.
- [5] 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.
- [6] 王维强, 葛全胜. 论温室效应对中国社会经济发展的影响 [J]. *科技导报*, 1993 (3).
- [7] 游松财, Kiyoshi, Takahashi, 等. 全球气候变化对中国未来地表径流的影响 [J]. *第四纪研究*, 2002, 22(2).
- [8] 张建敏, 黄朝迎, 吴金栋. 气候变化对三峡水库运行风险的影响 [J]. *地理学报*, 2000, 55(增刊).
- [9] 陈宜瑜. 气候与环境变化的影响与适应、减缓对策 // 中国气候与环境演变 (下卷) [M] 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 柯礼聘. 中国水资源可持续利用的进展与面临的挑战 [J]. *水问题论坛*, 2003(4), 1-4.
- [11] 水利部水利信息中心. “九五”国家科技攻关计划 (96—908—03—02) “气候异常对水文水资源影响评估模型研究”技术报告 [R], 2001.
- [12] 陈星, 赵鸣, 张洁. 南水北调对北方干旱化趋势可能影响的初步分析 [J]. 2005, 20(8).
- [13] 陈剑池, 金蓉玲, 管光明. 气候变化对南水北调中线工程可调水量的影响 [J]. *人民长江*, 1999, 30.
- [14] 陈德亮, 高歌. 气候变化对长江流域汉江和赣江径流的影响 [J]. *湖泊科学*, 2003, 15(增刊).

责任编辑 王晓平