全球气候变化对水资源管理影响的研究综述

陶涛, 信昆仑, 刘遂庆

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 气候变化已成为当今科学界、各国政府和社会公众普遍关注的环境问题之一, 气候变化可能对生态系统和经济社会产生灾难性的影响。评价全球气候变化对水资源及水文条件的影响显得非常迫切。本文回顾了全球气候变化对水文水资源影响的研究进展, 总结了其发展趋势, 进一步分析了我国在这方面的研究进展, 在此基础上, 提出了主要问题及未来的发展趋势。

关键词: 气候变化; 水资源管理; 生态系统

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2007)06-0007-06

Summarization of climate changing effect on water resources management

TAO Tao, XIN Kun-lun, LIU Sui-qing

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The climatic change has become one of the universal attention environment questions to scientific circles, governments and social public. The climatic change possibly has the disaster influence to the ecosystem and the social economy. Appraising the global climatic change effect on water resources and hydrology condition influence appears extremely urgently. This paper reviewed the research progress in global climatic change effect on hydrology and water resources, summarized its development tendency, and further analyzed our country research progress, based on this, put forward the main question and the future development tendency.

Key words: climate change; water resources management; ecological system

近百年来,以全球变暖为主要特征的气候与环境发生了重大变化全球气候变化的幅度已经超出了地球本身自然变动的范围,对人类的生存和社会经济的发展构成了严重威胁。虽然气候变动会预计影响自然环境的各个方面,但是水资源是其中影响最为重要的一个因素,同时其对气候变化也最具有敏感性,气候变化必然引起水文循环的变化,引起水资源在时空上的重新分布和水资源数量的改变,气候变化诸如频繁的洪涝和干旱的发生,其直接原因都是由于气候的变化、ENSO 现象而导致的,进而影响到了生态环境和社会经济的发展。而进入 21 世纪以来,气候变化又有了新的变化结果,正如现代气候模式预测的那样,过去 100 年的变暖很可能是气候自身的变化,过去 1000 年气候数据的重建亦指出,这种变化可能完全由自然因素引起,新的探测技术应用以及气候变化归因研究同时发现了过去 35~50 年气候变化的人为因素影响,单纯考虑自然强迫的气候模拟结果已不能解释 20 世纪后半叶的变暖问

题^[1]。根据 IPCC(2001)报告,断定在过去 50 年内大多数的气候变暖很可能与温室气体浓度的增加有关。很多数值模拟结果也指出,20 世纪的气候变暖主要是温室气体增加造成,并且未来在 CO₂ 浓度倍增情况下,全球气温将上升 1.5℃~3.5℃,导致某些区域的降雨量出现±20%浮动,尤其是中高纬度地区的高温和干旱可能更为突出,因此未来气候变化对水资源的可能影响是非常值得关注的。

因此在这种前提下,评价全球气候变化对水资源及水文条件的影响显得非常迫切。研究气候变化对水文水资源的影响对未来水资源系统的规划设计、开发利用和运行管理具有重大的理论意义和现实意义。

1 研究进展及现状分析

气候变化对水文水资源影响的研究在 20 世纪 80 年代中期才引起国际水文界的高度重视,尽管早在 1977 年,美国国家研究协会(USNA)就组织会议

收稿日期: 2007-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50409016); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2004B012)

作者简介: 陶涛(1974-),女(汉族),重庆市人,副教授,博士,主要从事城市水资源管理方面的研究。

讨论了气候、气候变化和供水之间的影响关系。但进入80年代以后,气候变化对水文水资源的影响才真正进入研究者的议题中。1985年,世界气象组织(WMO)出版了气候变化对水文水资源影响的综述报告,并推荐了一些检验和评价方法,之后又出版了水文水资源系统对气候变化的敏感性分析报告;1988年,WMO和联合国环境规划署(UNEP)共同组建成立了政府间气候变化专业委员会(IPCC—Intergovernmental Panel Climate Change),IPCC作为一个非常设官方机构,主要任务是负责组织气候变化及有关问题的科学、技术、经济和政策评价,专门从事气候变化的科学评估,并定期总结最新的科学成果,提供具有权威性的气候评估报告,到目前为止,该机构已进行了三次气候变化的评价工作,并提交了相应的评估报告^[2~5];1991年在维也纳举行了第二十届国际大地测量与国际地理联合(IUGG)大会,为配合国际地圈和生物圈计划(IGBP),水文科学组的主题便是探讨土壤—大气之间相互作用的水文过程;1993年,以气候变化,气圈和水圈的相互作用和影响,大尺度气候和水文模拟技术为主题,在日本召开了第六届国际气象和大气物理科学、第四届水文科学(UMAP—IAIE)联合大会,这说明随着全球能量水分循环试验(GEWEX),IGBP等国际性合作计划的实施,水文学家开始注意环境变化中土壤—植物—水的全球性研究。由于完全建立在用历史资料率定参数的概念性水文模型,不能与气候模型耦合,这些计划的实施促使水文科学工作者加强对陆地表面过程参数化、大尺度水文物理模型和陆、气模型联结耦合等方面的研究,从而推动了水文科学的发展。

2001年7月10~13日在荷兰阿姆斯特丹由国际地圈生物圈计划、国际人文计划(IHDP)和世界气候研究计划(WCRP)联合举办了“全球变化科学大会(Global Change Open Science Conference)”。大会主题是:一个变化的地球的挑战(Challenges of a Changing Earth),其中除了碳循环和土地覆被变化是大会主要议题外,水循环及水资源是大会重要内容之一。

对全球气候变化的影响评估应用较多还是利用GCMs(General Circulation Model)——大气环流模式,通过建立各种不同情景(Scenario),来预测气候变化对自然环境带来的影响。根据Ringius等^[6]的研究,GCMs是大气循环系统的计算机三维模拟的数学表示,是利用大气中日益增加的二氧化碳浓

度对各种气候变量的影响来预测气候的变化趋势,他们描述了云的形成,降雨雪量和辐射等之间的物理关系,主要可以计算大气中的风速,温度和湿度的分布。GCMs也可用来估计不同程度的温室效应下某些气候变化对其的响应^[7]。Benioff等^[8]指出使用GCMs是模拟气候变化情景唯一可信的方法,因为温室效应和表征气候变化的大多数变量的变化趋势是一致的。由于气候变化的复杂性以及各个模型结构的不确定性,不同GCM的预测结构也不尽相同,但是尽管结果不同,其预测的趋势基本上是一致的(IPCC1990,1992)。

目前有不少国家对GCMs做了大量的研究(IPCC,1992;Smith et al^[9],IPCC,1996),而应用较多的主要有美国国家航空航天局Goddard研究院的NASA GISS模式;Princeton GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)模式;美国俄勒冈州立大学模式OSU;美国哥达空间研究所模式(GIGS);美国国家大气研究中心模式(NCAR);美国地球物理流体动力学实验室模式(GFDL);加拿大气象中心模式(CCC);美国科罗拉多州立大学模式(CSTJ);英国气象办公室高分辨率UKHI模式;CSM transient模式;Hadley—2模式;英国气象局UKMO模式;MPI模式等。

全球气候变化对水资源管理的影响最初的研究是将GCM模式和水量平衡模型耦合来预测不同区域的气候变化对河川径流量的影响^[10~13]。接着也有学者将融雪和积淀模型与泥土湿度模型结合,利用GCMs的结果来研究气候变化带来的影响。N. W. Arnell^[14]应用了HadCM2和HadCM3两种气候预测模式和宏观水力模拟模型,在分析供水管理和需水管理影响因素的条件下,模拟了在不同气候变化模式下,全球不同流域的人流变化及用水量变化模式,通过对全球区域水资源评价指标体系的研究,分析了全球不同区域的水资源承受压力的大小;M. A. Mimikou^[15]等利用两种气候变化模式,HadCM2和UKHI,以及水文平衡模型(WBUDG)(主要的输入变量有降雨量、温度、相对湿度、日照长度和风速,主要的输出变量为土壤蒸发量、土壤湿度、径流量),模拟了气候变化对希腊中部地区平均月径流的影响,进一步开发了河流水质模拟模型(R—Qual),模拟了点源污染的水质变化,模拟参数包括BOD,DO和氨氮的浓度,这也是对气候变化对水质影响的首次探索研究;J. I. Matondo^[16,17]等总结了气候模拟模型和水文模拟模型的发展现状,应用了

11种GCMs模式和水文模拟模型CLIRUN模拟了气候变化下瑞士三个流域的水资源及水文变化情况,其中三种模型:GFDL(the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory),UKTR(the united kingdom transient reasalient)和CCC-EQ(the Canadian climate change equilibrium)模拟出较好的降雨结果。尽管GCMs的应用目前收到了不错的结果,但是其应用只能在大尺度上,而对于区域研究来说,GCM模型的预测结果存在着一定的问题,因为GCM是将全球划分成无数的小格栅,面积在几百到千平方公里左右,而对于略小的研究区域GCMs的应用就受到了限制。

在这种前提下,许多不同的分析研究方法与模型也相应的提出,Burn^[18]就利用了无参数统计试验的方法,预估了气候变化对加拿大中西部区域春季时间序列入流的影响;为了研究一天降雨量和温度对未来气候前景的影响,Tung和Haith^[19]采用了天气预测模型,包括温度和降雨生成模型,利用多种GCM模型的结果分析了全球气候变化对纽约径流变化的影响;Mansell^[20]利用了基础的统计方法研究了苏格兰西部气候变化对降雨趋势和洪灾风险的影响;Westmacott和Burn^[21]同样利用无参数统计试验方法进一步分析了气候变化对不同时间和规模的水文现象中四种水文变量的潜在影响;Seidel等^[22]又利用高分辨率周期雪覆盖地图预测了Alpine流域的未来入流情况;Hobbs^[23]应用贝叶斯方法分析了气候变化带来的不确定性,主要的应用在于气候预测以及预测模型参数的选择,以及气候变化对径流入流影响,进一步分析了对水资源系统带来的影响,接着用实例验证了贝叶斯方法的可行性及实用性;H. D. Venema^[24]利用随机水文模型模拟了在气候变化影响下,塞内加尔河流域的降水量及入流量的变化,分析了气候变化对该流域的水资源的影响,其结果表明在气候变化影响下,该流域入流量呈现逐年下降趋势,干旱威胁日趋严重,进一步建立了优化模型,通过系统性能评价体系,经过反馈机制(需求管理)进行寻优,在此模型下,分析了不同策略的前景分析,供决策者选择;Pao-Shan Yu等^[25]同样利用天气预测模型和降雨-径流模型分析了气候变化对台湾南部水资源的影响。这些方法的提出与研究,进一步丰富了研究气候变化对水文水资源的内容,这也对研究区域气候变化对水资源的影响提供了一定的思路。

2 我国气候变化对水资源影响的研究现状

气温和降水量的变化直接影响到我国的生态环境建设和经济发展。我国面积大,占有不同的气候带,又处在世界主要季风区,加强气候变化分析尤为重要。特别是我国部分地区气候有可能从暖干型向暖湿型转变的情况下,尤其要重视气候研究。

根据国际上的发展趋势,再加上我国水资源问题的日益突出,我国自20世纪80年代起也迅速开展了气候变化对我国水文水资源影响的专门研究。由于西北和华北是我国主要缺水地区,在“七五”期间,设立了“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”重大项目,首先就气候变化对西北、华北水资源影响进行了研究;在“八五”国家攻关项目“全球变化预测、影响和对策研究”中,设立了“气候变化对水文水资源的影响及适应对策”专题;在“九五”重中之重科技攻关项目“我国短期气候预测系统”中,也设有专题“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评枯模型研究”,选择了淮河流域和青藏高原作为研究区域。

进入21世纪后,我国研究者对气候变化对我国水资源分布的影响作了大量的研究,取得了一定的研究成果。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究人员经过对我国385个观测站1951年到2000年间观测到的月平均温度和降水量资料进行分析,初步得出了我国50年来气温及降水量变化趋势的部分特征。50年来我国平均气温变化趋势同全球平均气温变化趋势一致。特别是从20世纪70年代开始的增温幅度明显高于全球平均水平。西北地区中部、华北及东北的广大地区是增温最快、范围最大的地区。研究还发现,从20世纪70年代开始,全国平均降水量没有明显的变化趋势,但区域平均降水量或增或减变化明显。新疆地区降水量的增加无论在范围上和强度上都是最大的,而华中、华北地区降水量的减少无论是在范围上和强度上都非常明显。近20多年来北方干旱缺水与南方洪涝灾害同时出现,形成了北旱南涝的局面。据有关国际研究,未来50年全球年平均气温预计将升高 $0.7^{\circ}\text{C}\sim 4.0^{\circ}\text{C}$;气温升高 1°C ,地表蒸腾量将可能提高 $10\%\sim 15\%$,水资源量将相应减少。具体到我国的各大流域,影响程度如何,还有待于进一步探讨。

我国研究学者的研究主要偏重于区域的研究,特别是针对华北地区水资源严重紧缺的现象,以及

黄河流域的问题,众多学者在进入 21 世纪后作了一定的研究,取得了一定的研究成果。高歌等^[26,27]利用华北地区近 50 年的气候、水资源等相关资料,极端气候事件对水资源的影响及气候变化对农业旱涝的影响进行了分析,并在气候模式预测结果的基础上,简要分析了华北地区未来气候变化对水资源的可能影响,分析了华北地区水资源及其开发利用状况、气候变化特征及对水资源的影响以及二者之间的相互关系。在此基础上,进一步建立了水资源评估模式,并结合短期气候预测结果,实现了华北地区 2003 年水资源定量预评估。张国胜等^[28]分析了 38 年黄河上游径流量及其与流域降水与气温的关系,着重分析了干旱气候对黄河水资源的影响,结果表明,黄河上游地区水资源呈减少趋势,其减少趋势进入 20 世纪 90 年代后尤为明显,这一变化趋势与黄河上游地区夏季降水量变化趋势有着一致性,说明汛期降水量的减少是黄河上游流量减少的最直接的气候因子。通过对 1961 年以来黄河上游地区气候变化的分析,发现黄河源区进入 20 世纪 80 年代中后期以后,年平均气温上升趋势非常明显,特别是 1998 年的年平均气温竟达到 -2.1°C ,是 40 年来年平均气温最高的一年;进入 90 年代,春季和夏季温度急剧回升。黄河上游地区年平均降水量及秋季降水量无明显的变化趋势,且其年际间的波动趋于缓和。冬季(12~2)月和春季(3~5)月降水量的变化趋势呈现出逐年增多的趋势。夏季(6~8)月降水量变化趋势却表现出显著的减少趋势。刘春蓁^[29]简要地回顾了现存的由气候情景驱动水文模型研究气候变化对陆地水循环影响的方法,及近 10 年来气候学家对大气环流模型中陆面过程模型的改进以及水文气候学家对大尺度水文模型研究所取得的进展,展现了它们之间的互补性,以及未来用水文—气候耦合模型方法研究气候变化与人类活动对陆地水循环影响及水资源预测的可能性。气候变化从实践上回答它们对洪水、干旱的频次及强度的影响以及对水量和水质的可能影响,为领导决策和水资源管理提供科学依据。唐国平等^[30]认为水资源脆弱性是水资源系统在气候变化、人为活动等的作用下,水资源系统的结构发生改变、水资源的数量减少和质量降低,以及由此引发的水资源供给、需求、管理的变化和旱涝等自然灾害的发生。气候变化下水资源脆弱性评估具有以下特点:该评估是对水资源系统、社会经济、区域气候系统的综合研究;该研究涉及到地理学、物理学、环境科学、社会科学等许多学科的分支学科;

由于受气候的制约,水资源脆弱性评估涉及的地域范围较广。曹丽菁等^[31]经过研究,认为华北地区年平均降水量与年平均水汽含量存在明显的正相关,大气水分的减少是直接导致降水量减少的主要因子之一。近 50 年中华北地区水资源总量呈减少趋势,水资源总量的减少与大气水分的减少密切相关,大气水分气候变化对华北地区的水资源有着重要影响。进一步利用 NECP/NCAR 的 1948~2003 年分析格点资料,研究了华北地区大气水分气候的变化及其对水资源的影响。结果表明:华北地区大气中水汽含量自 20 世纪 60 年代初至 80 年代中期呈持续下降趋势,80 年代中期以后略有回升,但幅度不大,90 年代中期以后又呈下降趋势,在 21 世纪初期与历史最低水平接近;华北地区大气水汽含量与降水量及水资源总量的关系密切,大气水汽含量的减少趋势与降水量及水资源总量的变化一致。刘春蓁^[32]指出所谓脆弱性就是指气候变化对某一流域地区的水资源系统可能造成损害的程度,它依赖于水资源系统对气候变化的敏感性和适应性。敏感性反映了气候变化通过水文循环现象对自然的水文系统如降水、径流、蒸发、入渗等的影响程度,而适应性则反映水资源系统对气候强迫的可能适应程度。

3 发展趋势

气候变化及其对水文水资源的影响的研究是近年来研究的热点,主要发展趋势包括以下三个方面:

(1) 全球气候变化利用 GCMs 是以后发展的主流,但是用 GCMs 模拟全球气候变化时,同时也要考虑众多政策制定对气候变化的影响,如 IPCC (2001)提出的气候变化减缓战略,它涉及到科学、技术、环境、经济以及政治各方面的内容,《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》的正式生效,这些政策的制定在一定程度上会遏制全球气候变暖。在这样一种前提下,将会对预测全球气候变化提出新的挑战。

(2) 气候变化对水资源的影响主要表现在两个方面:一是对水资源供给能力的影响,二是对水资源需求性的影响。气候变化下水资源脆弱性评估是水资源系统的综合评估,主要包括水资源供给与需求平衡的评估。我国水资源深受气候影响,表现在地区分布不均、洪涝灾害严重、供需矛盾突出等方面;此外,自气候变化引起关注以来,我国有关水资源脆弱性评估的研究甚少,对水资源脆弱性评估方法进行探讨,旨在为进一步探讨气候变化下我国水资源的

脆弱性提供依据。

(3) 全球气候变化趋势目前的研究已经很多,但对区域来说,特别是象我国这样广阔的区域,占有多个气候带,其气候变化必然会存在不同,而利用GCMs也存在一定的难度,因此创建新的理论与方法,针对我国不同流域及区域开展气候变化下水资源供需的影响是以后发展的主要趋势。总之,在充分利用现代科学技术,开展国家水平/国际间的水文科学实验、变化环境下的水文水资源理论创新研究,这是21世纪水科学发展面临的新的机遇与挑战!

参考文献:

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1990. In: Tegart, W. J., Sheldon, G. W., Griffiths, D. C. (Eds), Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared by Working Group II. Australian Government Publishing Service[R], Canberra, Australia, 1990.
- [2] IPCC, 1992. In: Houghton, J. T., Callander, B. A. Varney, S. K. (Eds.), The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment[R]. 1992.
- [3] IPCC, 1995. Climate Change: Impacts, Adaptations and Mitigation. Summary for Policy makers. WMO/UNEP[R]. Geneva, Switzerland, 1995.
- [4] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1996. In: Benioff, R. (Ed), Climate Change, 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific— Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.
- [5] IPCC, 2001. Summary for policy makers. A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. 2001.
- [6] Ringius L, Downing T E, Hulme M, Waughray D, Selrod R. Climate change in Africa: Issues and challenges in Agriculture and Water for Sustainable Development. CICERO Report, 8[R]. University of Oslo, Norway, 1996:151.
- [7] Joubert A M, Tyson P D. Equilibrium and coupled GCM simulations of future southern African climates [J]. South African Journal of Science, 1996, 92(10): 471—484.
- [8] Benioff R, Guill S, Lee J. Vulnerability and Adaptation Assessments (Version 1.1, An International Handbook)[M]. Environmental Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996:421.
- [9] Smith J B, Huq S, Lenhart S et al. Vulnerability and adaptation of climate change Interim results from the U. S. Country Studies Programme[M]. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996.
- [10] Cohen S J. Impacts of CO₂ induced climatic change on water resources in the Great Lakes basin[J]. Climate change, 1986, 8:135—153.
- [11] Gleick P H. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic change[J]. Journal of Hydrology, 1986, 88:97—116.
- [12] Bobba G, V P Singh, Jeffries D S, et al. Application of a watershed runoff model to north-east pond river, Newfoundland: to study water balance and hydrological characteristics owing to atmospheric change[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(12):1573—1593.
- [13] Arnell N W. Climate change and water resources in Britain[J]. Climate Change, 1998, 39(1):83—110.
- [14] Arnell N W. Climate change and global water resources[J]. Global Environmental Change, 1999, 9:31—49.
- [15] Mimikou M A, E Baltas, Varanou E, et al. Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234:95—109.
- [16] Jonathan I Matondo, Graciana Peter, Kenneth M Msi-bi. Evaluation of the impact of climate change on hydrology and water resources in Swaziland: Part I[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29:1181—1191.
- [17] Jonathan I Matondo, Graciana Peter, Kenneth M Msi-bi. Evaluation of the impact of climate change on hydrology and water resources in Swaziland: Part II[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29:1193—1202.
- [18] Burn D H. Hydrologic effects of climate change in the west central Canada[J]. Journal of Hydrology, 1994, 160:53—70.
- [19] Tung C P, Haigh D A. Global warming effects on New York stream flows[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1995, 121(2):216—225.
- [20] Mansell M G. The effect of climate change on rainfall trends and flood risk in the west of Scotland[J]. Nordic Hydrology, 1997, 28:37—50.
- [21] Westmacott J R, Burn D H. Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill—Nelson

- River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 202: 263—279.
- [22] Seidel K, Cornel Ehrler, Martinec J. Effects of Climate change on water resources and runoff in an Alpine basin. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 1659—1669.
- [23] Hobbs B F. Bayesian methods for analyzing climate change and water resource uncertainties[J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 49: 53—72.
- [24] Henry David Venema, Eric J Schiller. Adamowski Kaz, et al. A Water Resources Planning Response to Climate Change in the Senegal River Basin[J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 49: 125—155.
- [25] Pao-Shan Yu, Chang-Yang Tao, Chih-kang Wu. Impact of climate change on water resources in Southern Tainwan[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 260: 161—175.
- [26] 高歌, 李维京, 张强. 华北地区气候变化对水资源的影响及 2003 年水资源预评估[J]. *气象*, 2000, 29(8): 26—30.
- [27] 高歌, 黄朝迎. Climate Change and its impact on water resources in North China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(5): 718—732.
- [28] 张国胜, 李林, 时兴合. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响[J]. *水科学进展*, 2000, 11(3): 277—233.
- [29] 刘春葵. 中国水资源响应全球气候变化的对策建议[J]. *中国水利*, 2000, (2): 36—38.
- [30] 唐国平, 李秀彬, 刘燕华. 全球气候变化下水资源脆弱性及其评估方法[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 313—317.
- [31] 曹丽青, 余锦华, 葛朝霞. 华北地区大气水分气候变化及其对水资源的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(5): 504—507.
- [32] 刘春葵. 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.

(上接第 6 页)

应尽快启动河(内荆河)湖分家工程, 解决径流污染问题。四湖总干渠和洪湖围堤要加高培厚, 另在总干渠南堤洪湖入口处建大型涵闸, 主汛期开闸调蓄, 其他时间上游客水直接通过总干渠入内荆河排入长江; ②恢复江(长江)湖联系, 加大洪湖水体的置换频率; ③对洪湖丰富的水草资源, 既要保护又要利用。

在洪湖湖泊湿地生态系统中, 由于湖水较浅, 有利于水生植物的生长, 大量水生植物可以对水体起到净化作用, 有利于维持较好的水质。但另一方面, 如果只保护而不加以利用, 洪湖植被就会自然疯长, 将导致湖底淤积, 湖面缩小, 湿地沼泽化。

参考文献:

- [1] 水利部国际合作与科技司. 水资源及水环境承载力[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [2] 卢山, 姜加虎. 洪湖湿地资源及其保护对策[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(3): 281—284.
- [3] 胡学玉, 陈德林, 艾天成. 1990~2003 年洪湖水体环境质量演变分析[J]. *湿地科学*. 2006, 4(2): 115—119.
- [4] 杜耘, 陈萍, Kieko SATO, 等. 洪湖水环境现状及主导因子分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(4): 481—485.
- [5] 杨达源, 李徐生, 张振克. 长江中下游湖泊的成因与演化[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(3): 226—232.
- [6] 鄢帮有, 谭晦如, 邢久生. 鄱阳湖水环境承载力分析[J]. *江西农业大学学报*, 2004, 26(6): 931—935.
- [7] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范(第 2 版)[M]. 北京: 中国环境出版社, 1990: 11—25.
- [8] 马燕, 郑祥民, 远藤邦彦, 等. 洪湖水体氮、磷营养元素变化规律及富营养化进程研究[J]. *广州环境科学*, 2005, 20(2): 5—7.