

文章编号: 0529-6579 (2000) S2-0151-07

未来气候变化对我国水文水资源影响的研究*

江 涛¹, 陈永勤¹, 陈俊合², 陈 喜¹

(1. 中文大学 地理系, 香港新界沙田; 2. 中山大学 地理系, 广东广州 510275)

摘 要: 概括介绍气候变化对水文水资源影响研究的现状与进展. 从研究方法、气候变化情景生成和水文模拟技术等 3 个方面, 阐述未来全球变暖对我国水文水资源影响的研究及其成果, 并提出有待进一步研究的问题.

关键词: 气候变化; 全球变暖; 水文水资源; 气候变化情景; 水文模拟

中图分类号: S 273 **文献标识码:** A

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社会经济产生灾难性的影响. 引起气候变化的因子是多方面的, 既有自然的因素, 也有人为因素, 目前科学家们对 CO₂ 的温室作用引起气候变化的研究最多. 据各种大气环流模式 (GCMs) 预测, 由于大气中 CO₂ 含量的倍增, 到 2100 年, 全球平均气温将升高 1~3.5 °C^[1]. 由人类活动排放大量温室气体引起全球变暖是未来全球气候变化的主要因素.

气候变化必然引起水分循环的变化, 引起水资源在时空上的重新分布和水资源数量的改变, 进而影响生态环境和社会经济的发展. 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. 本文将概括介绍气候变化对水文水资源影响的研究进展, 在此基础上, 从研究方法、气候变化情景生成和水文模拟技术等几个方面, 综述未来全球变暖对我国水文水资源的影响, 并提出一些看法.

1 气候变化对水文水资源的影响研究回顾

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) 就组织会议讨论了气候、气候变化和供水之间的相互关系和影响^[2]. 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

* 基金项目: 本研究得到香港特别行政区研究资助局 (项目编号 CUHK4188/98H) 和广东省科学技术委员会 (项目编号 99M050032) 的拨款资助

收稿日期: 1999-06-03; 作者简介: 江 涛 (1965~), 女, 博士研究生

气候变化的敏感性分析报告^[3]。为加快研究步伐,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),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。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(IAMAP—IAHS)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。

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”(1986~1990年)“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”重大项目中,首先设立了气候变化对西北华北水资源影响研究^[4]。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^①。在“九五”重中之重科技攻关项目“我国短期气候预测系统”中,有一专题是“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估模型研究”^[5]。选择淮河流域和青藏高原作为研究区域,参加了GEWEX在亚洲季风区试验即GAME项目^[6]。

2 气候变化对水文水资源影响的研究方法

评价气候变化影响的方法有3种:影响、相互作用和集成方法^[7]。气候变化对区域水文水资源影响的研究常采用影响方法,即所谓的What-if模式:如果气候发生某种变化,水文循环各分量将随之发生怎样的变化。分析评估气候变化对区域水文水资源的影响,一般包括4个步骤:

① 定义气候变化情景;

② 建立、验证流域水文模型;

③ 将气候变化情景作为流域水文模型的输入,模拟、分析区域水文循环过程和水文变量;

④ 评价气候变化对水文水资源的影响,根据水文水资源的变化规律和影响程度,提出相适应的对策和措施。

其中水文模型的建立与未来气候变化情景的生成是影响评价的关键。

2.1 气候变化情景的生成技术

由于区域气候变化的复杂性和不确定性,以及GCMs对水文、陆地表面过程参数的定量过分简化,气候学家还难以准确地预测未来区域气候变化。因此,在气候变化影响评价中,采用“情景”(Scenario)一词来描述未来气候变化状态。目前,生成未来气候变化情

^①水利部水利信息中心、气候变化对水文水资源的影响及适应对策专题报告,1996。

景的方法有任意情景设置、时间类比、空间类比和基于 GCMs 输出等 4 种基本方法^[8]。

任意情景是根据未来气候可能的变化范围, 任意给定气温、降水等气候要素的变化值, 例如假定年平均气温升高 1℃、2℃、3℃、4℃等, 年降水量增加或减少 5%、10%、20%等, 每一种气温与降水的可能状况的组合就构成区域未来气候的一种情景。任意气候变化情景下的影响评价实质上属于敏感性分析和模式的性能检验。

用时间类比法生成气候情景有 2 种类型。一是根据有气候资料记录以来的气候变化状况, 选取有明显的冷、暖期, 与当前气候进行对比分析, 生成未来气候的变化情景。这种方法的主要问题是选取时期的气候变化可能只是气候的自然变化, 而非温室气体所致, 其气温的增幅不足以同未来气温的增幅相类比; 另外由于历史气候记录序列短, 很难识别冷暖期, 使用不同时期的气候类比, 可能产生完全不同的气候情景, 因而得出不同的影响结果。时间类比的另一种方式是根据地质年代变化过程的记录, 重建气温、降水等气候因素的变化过程, 由于古气候与现代气候的边界条件不相同, 以及古气候重建分辨率低等不足, 使古代相似法的应用受到了一定的限制。

空间类比法是把某区域当前的气候状况看作是另一区域未来的气候变化情景。但区域气候是大气环流与当地地形等因子相互作用的结果, 这种空间上的类比不一定真实。

基于 GCMs 输出的方法是利用 GCMs 的模拟结果生成未来的气候变化情景。常用的 GCMs 包括: 美国哥达空间研究所模式 (GISS), 美国国家大气研究中心模式 (NCAR), 英国气象局模式 (UKMO), 美国俄勒冈州立大学模式 (OSU), 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) 和美国科罗拉多州立大学模式 (CSU) 等^[9]。GCMs 可以提供平衡试验和渐变试验两类情景, 但由于空间分辨率低, GCMs 不能提供地面局部尺度气候要素变化信息。为此, 需将 GCMs 输出结果按局部尺度聚解 (Downscale)。

聚解 GCMs 输出结果技术 (或称作 GCMs 与区域模型的接口技术) 有三种: (1) 直接在 GCMs 邻近几个网格点的输出之间进行线性或非线性内插。实际上, 因没考虑地形因子等作用, 精确的插值往往没有意义^[10]。(2) 建立局地观测气候要素与 GCMs 大网格上气候要素的统计关系, 包括多元线性回归、典型相关关系、随机过程等, 通过这些关系推算局地气候的未来情景, 但这种方法假定气候要素在局地尺度上的空间分布不变, 统计关系不包含未来气候变率变化的信息^[11]。(3) 在所研究的区域内, 将小尺度的区域模式嵌入 GCMs 中来模拟, 从而获得具有较高分辨率的气候变化情景。但模拟费时、以 GCMs 不准确的低分辨率输出为边界条件, 限制了这种方法的使用^[12,13]。

尽管 GCMs 空间分辨率低, 只能提供大尺度范围的预测结果, 但至今没有哪种方法能比 GCMs 提供更多、更有价值的气候要素信息。今后, 随着人们对气候系统各种过程认识的深入, 对气候要素观测技术的提高和观测资料的累积, GCMs 中参数化过程的合理化, GCMs 将可以提供准确的未来气候变化信息。用 GCMs 的输出来生成气候情景无疑是一种很有前途的方法。

2.2 水文模拟技术

近几十年来, 水文学家建立和发展了各种各样的水文模型。根据不同的分类标准, 水文模型可分为连续的和分散的, 动态的和静态的, 描述性的和概念性的, 随机的和确定性的等等^[14]。当选择和使用区域水文模型来评价气候变化对水文水资源的影响时, 应考虑

下列几个因素^[15]:模型的内在精度;模型率定和参数变化;现有的资料及其精度;模型的通用性和便于应用;以及与GCMs的兼容性。目前,用于估算区域水文水资源对气候变化响应的水文模型主要有以下两大类:

(1) 经验统计模型。这类模型根据同期径流、降水与气温的观测资料,建立三者之间的相关关系,以此推求降水与气温发生变化时的径流变化趋势。该方法的代表是Langbein, Stockton等人用这种方法也作了有关的研究^[16-18]。由于未来气候变化不可能是过去历史的完全重复,从过去的径流与降水、气温的关系外推未来可能出现的径流变化具有一定的局限性^[19]。

(2) 概念性水文模型。这是一类以水文现象的物理过程为基础的模型。利用概念性水文模型可以研究气候、径流的因果关系,以及流域水资源对不同气候条件的响应。Nemec和Schanke最先应用概念性水文模型估算气候变化对美国干旱地区和湿润地区径流的影响^[20]。以Thornthwaite等人建立的水量平衡模型为基础^[21,22], Glick提出了修正的水量平衡模型并用于评估气候变化对水资源系统的影响^[23]。随后,用水量平衡模型来评价气候变化对水文水资源影响的研究应运而生。这些研究涉及不同的气候区和地理区域,同时提出了各种改进的水量平衡模型。

鉴于现有的概念性水文模型一般以中小流域为空间尺度($\sim 10-100\text{ km}^2$),远小于GCMs的空间尺度($\sim 10^5\text{ km}^2$);模型中的参数从历史资料率定出来,参数间的不独立性和不确定性问题无法解决;采用集总式处理方法,无法描述变化环境(如土地利用,气候变化等)中的陆地表面过程等缺陷,许多学者现正在着手研制分布式水文物理模型。这是一种能够较好地反映不同下垫面条件(如土壤、植被、土地利用等)下产汇流机制的大陆尺度水文模型。由于这种分布式模型建立在GCMs网格上,因而能与GCMs联结耦合^[23]。分布式水文物理模型的研制是当今水文科学的前沿课题。此类模型的建成将使气候变化的影响研究工作迈向一个新台阶,尽管目前利用大陆尺度水文模型来评价气候变化对水文水资源影响的研究文献还很少^[24]。

3 全球气候变化对我国水文水资源的影响

近十几年来,我国开展了大量的气候变化对水文水资源影响的研究工作并取得了重要成果。这些研究应用气候变化情景与区域水文模型相结合的影响方法,探讨未来可能气候变化条件下我国水文水资源情况的变化。

我国的研究,主要采用2种气候情景:一种是根据区域气候可能的变化,人为地给定,例如假定未来气温升高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等,降水增加或减少10%, 20%等,两者的任意组合构成未来气候变化的假想情景^[25-31];另一种是基于GCMs输出的情景,一般直接使用赵宗慈等给出的7种平衡的GCMs预测值作为未来气候情景^[30-34]。在GCMs与水文模型接口技术方面,研制了用随机天气模型将GCMs大网格点的输出分解到流域尺度上^[35,36]。个别研究把过去100年内最暖时期(1981~1990年)类比作为未来全球变暖的气候情景^[37]。

用于估算气候变化对我国径流影响的水文模型主要有水量平衡模型;新安江模型,统计经验模型和比利时模型。此外,我国还研究了气候变化对水资源综合影响的评价模型,模型由供水系统和需水系统组成,供水系统由水库调度模型和地下水均衡模型描述,需水

系统由生活、工业以农业灌溉用水组成, 通过流域或地区的供水系统、供水工程和用水部门将气候变化对天然径流的影响转化为对供水及需水的影响^[33]。

研究表明, 全球气候变化对我国水文水资源的影响视流域或地区的不同而不同, 即使在同一流域或地区, 使用不同的气候情景或水文模型会产生不同的影响。虽然气候变化的影响依赖于所研究的流域、气候情景的选择和水文模型, 但仍可以得到一些具有规律性的结果:

(1) 我国河川径流对气候变化有灵敏的响应, 并自南向北, 自湿润地区向干旱地区敏感性增强, 对降水变化比对气温变化敏感;

(2) 未来全球变暖将导致我国西北高寒山区冰川萎缩, 以冰川补给为主的河川径流也将随之逐渐减少;

(3) 未来气候变化可能导致我国主要流域进一步变干或变湿, 但都不可能使流域水文情势发生跨越气候带的变化;

(4) 我国水资源系统对气候变化的敏感区与脆弱区相一致, 其中最敏感最脆弱的地区位于淮河及其以北的黄、淮、海地区。

到目前为止, 还没有一种可普遍接受的通用模型来评价气候变化对区域水文水资源的影响, 在今后一段时间仍需依赖气候变化情景与水文模型相结合的方法。由于缺乏对水文物理过程和大气系统内部变化的深刻认识, 气候情景的生成、水文模型结构、GCMs 与水文模型不同空间尺度的转化, 具有较大的不确定性; 另外, 这种研究方法是单向的, 并没有考虑气候与水文过程之间的双向交互作用, 这些都是有待于进一步探讨的问题。

参考文献:

- [1] HOUGHTON J T, MEIRA FILHO L G, CACCANDER B A, et al. IPCC Climate change 1995, the Science of Climate Change Cambridge. Cambridge University Press, 1996.
- [2] US National Academy of Sciences Climate Climatic Change and Water Supply. Washington D C.: National Academy Press, 1977.
- [3] WMO. Water resources and climatic change: sensitivity of water resources systems to climate change and variability. Geneve: WMO, 1987.
- [4] 施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.
- [5] 张建云. 短期气候异常对我国水文水资源的影响评估. 水科学进展, 1996, 7 (增刊), 1~3.
- [6] 郭生练, 刘春霖. 大尺度水文模型及其与气候模型的联结耦合研究. 水利学报, 1997, 7: 37~42.
- [7] IPCC. 关于评估气候变化影响和适应对策的技术指南, WMO, UNEP, 1994.
- [8] ARNELL N W. Hydrology and climate change. In: Calow P, Petts G E (eds). The Rivers Handbook, Vol. 2. Oxford: Blackwell, 1992. 173~186.
- [9] SULZMAN E W, POIANI K A, KITTEL T G. Modeling human-induced climatic change: a Summary for environmental managers. Environmental Management, 1995, 19 (2): 197~224.
- [10] 吴金栋, 王毅棠. 气候变化情景生成技术研究综述. 气象, 1998, 24 (2): 3~8.
- [11] WILBY R L, WIGLEY T M L, CONWAY D, et al. Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. Water Resources Research, 1998. 34 (11): 2995~3008.
- [12] GIORGI F, MARINUCCI M R, VISCONTI G A. 2×CO₂ Climate change scenario over Europe generated using

- a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97. D10: 1011 ~ 1028.
- [13] GIORGI F, BRODEUR C S, Bates G T. Regional climate change scenarios over the United States Produced with a nested regional climate model. *Journal of Climate*, 1994, 7: 375 ~ 399.
- [14] SINGH V P. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado water resources publications, 1995.
- [15] GLEICK P H. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, 1986, 88: 97 ~ 116.
- [16] LANGBEIN W B. Annual Runoff in the United States, US Geological Survey Circular 5, U S Dept. of the Interior, Washington D C, 1949.
- [17] STOCKTON C W, BOGGESE W R. Geohydrological implication of climate change on water resource, development. Fort Belvoir, Va: U S Army coastal Engineering Research Center, 1979.
- [18] ARINLL N W. Factors controlling the effects of climate change: an river flow regimes in a humid temperature environment. *Journal of Hydrology*, 1992, 132: 321 ~ 342.
- [19] Leavesley G H. Modeling the effects of climate change on water resources. *A Review Climate Change*, 1994, 28: 159 ~ 177.
- [20] REMEC J, SCHAAKE J C. Sensitivity of water resource systems to climate variations. *Hydrological Sciences Journal*, 1982, 27: 327 ~ 343.
- [21] THORNTWHAITE G W. A approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1949, 38: 55 ~ 94.
- [22] GLEICK P H. The development and testing of a water balance model for climatic impact assessment, modeling the sacramento. *Basic Water Resources Research*, 1987, 23 (6): 1049 ~ 1061.
- [23] 张建云, 章四龙, 朱传保. 气候变化与流域径流模拟. *水科学进展*, 1996, 7 (增刊): 54 ~ 59.
- [24] LOAICIGA H A, VALDES J B, VOGEL R, et al. Global warming and the hydrologic cycle. *Journal of Hydrology*, 1996, 174: 83 ~ 127.
- [25] 刘春荣, 田玉英. 用改进的非线性水两平衡模型研究气候变化对径流的影响. *水科学进展*, 1991, 2 (2): 120 ~ 126.
- [26] 傅国斌, 刘昌明. 全球变暖对区域水资源影响的计算分析. *地理学报*, 1991, 46 (3): 277 ~ 288.
- [27] 侯宇光, 詹淑贤. 气候变化对长江上游地区水资源的影响. *水资源研究*, 1995, 16 (4): 5 ~ 13.
- [28] 英爱文, 姜广武. 运河流域水资源对气候变化的响应. *水科学进展*, 1996, 7 (增刊): 67 ~ 72.
- [29] 赖祖铭, 叶佰生, 朱守森. 用冰川区水量 (物质) 平衡模型评估气候变化对冰川水资源影响的初步研究. *水科学进展*, 1990, 1 (1): 49 ~ 53.
- [30] 何新林, 郭生练. 气候变化对新疆玛纳斯河流域水文水资源的影响. *水科学进展*, 1998, 9 (1): 77 ~ 83.
- [31] 陈英, 刘新仁. 淮河流域气候变化对水资源的影响. *河海大学学报*, 1996, 24 (5): 111 ~ 114.
- [32] HULME M, WIGLEY T, 江涛, 等. 温室效应引起的气候变化以及对中国的的影响., *CRU/WWF/SMA*, 1992, 31 ~ 36.
- [33] 王建生, 张世法, 黄国标, 等. 气候变化对京津唐地区水资源及供需平衡的影响., *水科学进展*, 1996, 7 (1): 26 ~ 36.
- [34] 刘春荣. 气候变化对我国水文水资源的可能影响. 见: 丁一汇主编: *中国的气候变化与气候影响研究*, 北京: 气象出版社, 1997: 482 ~ 488.
- [35] XIA J. Astochastic downscaling approach in terms of patterns recognition and grey clustering. In: Cinren L, Jiren L (eds), *Proceedings of InternaTional Workshop on Macro-scale Hydrological Modeling*, Nanjiang Hohai University Press, 1996. 15 ~ 18.

- [36] 陈英, 刘新仁. 淮河流域降水蒸发随机模型研究. 河海大学学报, 1996, 24 (3): 43 ~ 48.
- [37] CHANGMING L, GUOBIN F. The impact of climatic warming on hydrological regimes in China: An overview. In: Jones J A A, et al (eds). Regional Hydrological Response to Climate Change. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1996. 133 ~ 151.

Impact Studies of Futrue Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources in China

JIANG Tao^{*}, CHEN Yong-qin, CHEN Jun-he, CHEN Xi

Abstract: Climate change induced by global warming has become a major international issue in the last two decades. One of the most important effects of global warming may change the hydrological regimes and water availability. This paper reviews the effects of global warming on hydrological regimes and water resources in China based on research methodology, generating of future climate change scenarios and hydrological modeling. Furthermore, areas needing further research are raised.

Keywords: climate change; hydrological regimes; water resources; climate change scenario; hydrological modeling

* Department of Geography, the Chinese University of Hongkong, Shatin, N.T., Hongkong