

Review on the Impact of Climate Change on Features of Hydrology and Water Resources*

Xiaohong Chen^{1,2}, Chunyan Fang^{1,2}, Yun Zhang^{1,2}

¹Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes,

Sun Yat-sen University, Guangzhou

Email: eescxh@mail.sysu.edu.cn

Received: Jun. 25th, 2012; revised: Jul. 20th, 2012; accepted: Jul. 29th, 2012

Abstract: Climate change causes significant variation of hydrological and water resources system. A lot of achievements have been found in the research of responses of water resources to climate change in recent years. This paper aims to review the researches of impact of climate change on water resources and hydrology in two aspects, contents and approaches. The impacts covered in this paper include 1) responses of hydrological system to climate change, 2) impact of climate change on vulnerability and management of water resources systems, and 3) extreme hydrological events as flood and drought caused by climate change. Approaches for revealing the effects of climate change on water resources and hydrology are also discussed. Shortcomings of the present research are investigated. Key topics for future research in the field of impact of climate change on water system are put forward.

Keywords: Climate Change; Impact; Water Resources; Approaches; Review

气候变化的水文水资源效应研究进展*

陈晓宏^{1,2}, 房春艳^{1,2}, 张云^{1,2}

¹中山大学, 水资源与环境研究中心, 广州

²中山大学, 华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室, 广州

Email: eescxh@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2012年6月25日; 修回日期: 2012年7月20日; 录用日期: 2012年7月29日

摘要: 气候变化对水循环及其伴生过程的影响日趋明显, 所引起的水文水资源效应已成为全球普遍关注的科学、经济、社会、政治和环境问题。针对该问题, 从水文要素时空变化趋势分析、气候变化情景下水文要素影响模型模拟、敏感性和脆弱性、不确定性、对水安全综合影响(含极端水文事件)及适应性对策等方面对研究内容进行了回顾, 综述了研究所采用的统计分析、成因分析、情景假设及降尺度、模型模拟、多模型耦合等方法和技术, 并指出了存在的问题。最后提出数据监测体系建设、尺度降解技术、双向耦合模型、对水循环全过程及水安全综合影响评价、人类活动与气候变化影响的识别和贡献分解、无资料地区影响评价、涉水工程影响风险评价、适应性对策效益分析等研究, 将是该领域未来研究重点。

关键词: 气候变化; 水文水资源; 影响评价; 水文模型; 综述

1. 引言

水资源是世界经济可持续发展、人类社会进步和

生态环境良性循环最基本的物质支撑条件。随着全球工业化及经济的高速发展, 全球气候变化问题已成为

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50839005); 中英瑞气候变化适应项目广东气候变化风险评估及适应对策研究(ACCC/20100705-1); 广东省水利科技创新项目; 中山大学重大项目培育和新兴交叉学科项目(10lgzd11)。

当今世界各国共同面对的重大环境课题之一,全球气候变化对水循环要素的影响,必然导致水资源在时空上的重新分配。近几十年来,气候变化对水循环及其伴生过程影响日趋明显,所引起的水文水资源效应已成为全球会普遍关注的科学、经济、社会、政治和环境问题。

气候变化的水文水资源效应研究主要通过研究全球气候变暖所引起的一定尺度范围内气温、降水、蒸发等气象要素变化来分析和预测径流的增减趋势及其对未来水安全的影响,目前研究内容主要包括:不同空间和时间尺度气候变化下水文要素变化趋势及演变机理分析、不同气候变化情景下水文要素影响模拟及定量评估、水资源系统对气候变化的敏感性和脆弱性分析、气候变化下水文水资源效应评价的不确定性分析、气候变化对水安全综合影响分析及适应性对策研究等内容。自从 20 世纪 70 年代以来一些国际组织在该领域开展了大量的研究工作,如世界气候影响计划(WCIP)、全球能量和水循环试验(GEWEX)、国际水文计划(IHP)、全球水系统计划(GWSP)等,均涉及到气候变化与水的相关问题;联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)已完成四次评估报告,气候变化与水问题的研究是其核心议题之一。我国从 20 世纪 80 年代开始开展了气候变化对我国水文水资源影响的系统研究,如已经实施或正在实施的气候变化对西北华北水资源的影响、气候异常对我国水资源及水循环影响的评估模型研究、气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策、气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估、气候变化对水资源与生态安全的影响及其适应对策、变化环境下工程水文计算的理论与方法等课题。总体来说,国内外专家学者在该领域取得了很大的进展,但仍然存在较多的问题有待进一步深入研究。

本文主要从气候变化的水文水资源效应研究的主要内容及采用的技术方法两个方面综述已有的研究成果,同时提出目前研究存在的难点问题,并在此基础上结合未来经济社会发展和生态环境保护实际需求,对该领域部分研究方向进行展望。

2. 主要研究内容

2.1. 气候变化下水文要素时空变化趋势及演变机理分析

通过对水文气象等要素(如日照、降水、蒸发、风

速、温度、雪盖、陆冰、海冰、流量等)长系列实测数据进行数理统计学方面的系统分析,揭示全球气候变化下不同空间和时间尺度下水循环要素变化趋势,并根据各要素之间相关性分析,并结合水循环系统的演变机理对变化趋势和影响进行合理的分析和解释。该方面研究工作主要在历史变化规律统计分析和未来变化趋势分析。

研究之初期,主要是在确定了气温和降水的组合方案的基础上用年径流和年平均气温的经验相关曲线来推测径流量的变化^[1]。Stockton^[2]建立了降水、气温和径流之间的经验关系,并以此来评价气温、降水变化对水文因子的影响。McCabe^[3]通过对美国特拉华流域的季节径流和土壤含水量的研究,得出流域北部积雪的减少和蒸散发的增加,将改变径流的年内分配规律并减少现有的可用水量。Mimikou 等^[4]研究气候变化下的山区积雪和具有保水特征的地中海地区融雪变化,研究结果表明积雪积累与融化是流域水量平衡对气候变化响应的最重要和决定性因素。Smith 等^[5]分析了气候波动对水文和水资源的影响,研究发现气候的波动导致的水文系统的变化,发现在持续的较为湿润时期,河川径流量、地下水位、洪水位和洪水频率以及土壤侵蚀等变化更为明显些。国内在此方面也开展了大量的研究工作。沈大军和刘昌明^[6]从降水、蒸发、径流和土壤水分、供水、需水及水资源管理等方面论述了水资源系统对气候变化的响应。魏智^[7]通过黄河源区气温、降水观测资料,分析了气候变化对水资源的影响,并预测影响水资源因素的变化趋势。研究得出,源区气温呈上升趋势,而降水量呈下降趋势;黄河源区水资源量可能出现“短期增加,长期减少”的局面。朱燕君^[8]利用 1951~1999 年近百个站点的温度、降水资料,对黄河流域近 50a 来温度、降水的气候特征进行了分析;根据 1920~1999 年近 40 个站点的温度和降水资料,讨论了温度、降水与黄河断流的关系。刘燕^[9]以黄河第一大支流渭河流域为研究对象,基于长期水文观测资料,就不同时间尺度(包括月、年、10 年等)降水特征及其变化规律进行了分析,并探讨流域水资源变化的动因,指出降水减少是渭河流域水资源减少的最直接、最主要的原因。刘昌明^[10]根据黄河干流主要水文站近 50 年来观测资料,定量分析得出黄河干流实际来水量不断减少的原因主要是气候变化的影响。姚玉璧^[11]利用黄河首曲气候

资料和黄河上游年径流量资料以及黄河下游断流资料,分析了黄河首曲气候变化特征、气候变化对径流量的影响及气候变化与黄河下游断流的关系,结果表明,黄河首曲大部分区域降水量年际变化呈下降趋势,气温年际变化呈上升趋势;降水量年际波动曲线与径流量年际波动基本一致;黄河上游关键区、敏感区气候变化对黄河水资源的影响重大。黄荣辉^[12]利用我国气象观测站 1951~2000 年降水、气温资料以及黄河上游有关水文测站 1960~2003 年的径流资料,分析了黄河上游和源区气候的年代际变化及其对径流变化的影响及黄河上游径流变化对华北水资源的影响,分析结果表明:黄河上游径流的减少是 20 世纪 90 年代黄河下游流量锐减、黄河断流天数增多的重要原因,并表明了黄河上游来水量的多少是影响华北地区水资源的重要原因。马荣田^[13]利用晋中市近 49 年的水文气象资料,对气温、降水的变化特征以及由此引起的水资源量的变化进行了统计分析,结果表明,年平均气温整体呈上升趋势,降水量的变化呈减少趋势,水资源总量、地下水、河川径流量呈减少趋势,与降水的变化具有明显的一致性。李国军^[14]利用黄河上游重要水源补给区玛曲县气温、降水资料分析得出,气温年际变化呈上升趋势,降水量年际变化呈下降趋势;气候变化可能导致蒸发量增加,可利用水资源量减少。朱利等^[15]研究了汉江流域径流及实际蒸发的响应,指出汉江流域降水的变化对水资源的影响要大于气温的变化对水资源的影响。

2.2. 不同气候变化情景下水文要素影响模拟及定量评估方面

结合全球气候变化模式,通过降尺度方法和水文模型,对不同气候变化情景下全球或区域尺度水文要素影响进行模拟,定量评价气候变化对水循环过程的影响,预估未来的水文水资源情势。在该方面研究有: Mimikou 等^[16]用月水量平衡模型 WBUDG 分析了 CO₂ 倍增情景下希腊北部 Aliakmon 流域水资源量的变化。Gleick^[17]通过对美国加州萨克拉门托流域数据的分析,根据八种不同的 GCMs 模型输出的气温和降水结果,应用水量平衡模型研究了气候变化对该流域水文情势的影响,研究结果指出,引起水文情势变化最主要的内在机制是降雪和融雪的条件发生了显著变化。

Nash^[18]采用水平衡模型研究科罗拉多河水文系统的气候变化响应,并与前期统计模型的研究结果进行比较分析。张建云等^[19]采用设定情景与水文模拟相结合的途径,评估了不同区间河川径流量对气候变化的响应。王国庆等^[20]根据假定的暖干化气候方案和气候模型的输出结果,应用水文模拟途径,分析了黄河上中游主要产流区水资源对气候变化的响应及其变化趋势。何新林、郭生练^[21]利用包含积雪融雪结构的水文评价模型计算未来不同气候变化情况下的月均流量过程,分析气候变化对玛纳斯河流域水文水资源的影响,研究得出降水变化对洪水频率和洪峰流量的影响要比气温变化对其的影响敏感得多的结论。叶佰生等^[22]用水量平衡模型研究气候变化对伊犁河上游山区河川径流的影响。研究表明,未来气候变化对水资源量的影响将主要取决于降水量的变化,气温升高的影响相对较小。游松财等^[23]以改进的水分平衡模型为基础,研究了不同气候变化情景下中国未来地表径流的变化。张光辉^[24]根据不同气候情景下,分析了未来近 100 年内黄河流域天然径流量的变化趋势。

2.3. 水资源系统对气候变化敏感性和脆弱性分析方面

考虑全球气候变化的不确定性,根据全球气候变化总体趋势,给定气候可能变化的值,模拟区域未来气候不同条件变化下水资源系统的变化情况,分析水资源系统对于气候变化的敏感性。结合当地现有的自然地理、生态环境、经济社会等条件,分析气候变化对水资源系统脆弱性的影响。大量研究成果展示了在气候变化下水资源供需影响研究基础上的水资源供需平衡——脆弱性分析和适应性分析。该类研究成果主要包括水资源供需盈亏的时空分布,流域内和流域间水资源的重新分配,还涉及区域水资源的开发利用规划,供水系统的脆弱性、弹性和稳健性分析等问题^[25-34]。Gleick^[35]研究了供水系统对气候变化的脆弱性指标并对美国水供应系统的脆弱性进行了估计。Lettenmaier^[36]模拟了位于加利福尼亚州的大流域,分析发现流域对变化的气候条件的响应由与气温有关的变化所决定,而受 GCMs 预测的降雨变化的影响相对较小。王国庆^[37]对黄河上中游径流对气候变化的敏感性进行了分析,结果表明,径流对降水变化的响应

敏感,对气温变化的响应相对较弱。Zhang Yi 等^[38]利用简单的作物-气候模式对中国黄淮海平原地区农田水分平衡对气候变化的响应进行了研究。结果表明当黄淮海平原年降水量减少 20%时,年灌溉水量大约需增加 66%~68%。夏军等^[39]针对与气候变化影响的水资源系统的敏感性和抗压性相联系的脆弱性与适应性问题,提出变化环境下水资源脆弱性评估理论体系和评估模型,并在海河流域进行了应用研究。

2.4. 气候变化下水文水资源效应评价的不确定性分析

气候变化与水循环过程的关系问题是一个复杂的系统问题,由于目前对大气、水、生态环境、社会经济等系统内部和系统之间的认识有限,对于该问题的研究只能分析可能存在的变化趋势和影响程度,还存在很大的不确定性。如 Groggi 等^[40]通过 REF 方法研究全球气候模式的不确定性。Ghosh 等^[41]采用概率方法研究了气候模式和排放情景的不确定性。贺瑞敏、刘九夫等^[42]认为气候变化的不确定性主要来源于对机理认识的不确定性、监测数据的不确定性、气候变化情景的不确定性、模拟模型的不确定性等。吴赛男、廖文根等^[43]指出用于气候变化影响评估的水文循环模型的不确定性主要来自模型结构的不确定性和模型参数的不确定性,降低气候变化对流域水资源影响评价结果不确定性的主要方式有:完善全球气候模式,研究和提出适合未来发展的排放情景和深入研究降尺度分析技术;同时改进和完善水循环评价模型,充分考虑未来环境变化对流域水文的可能影响,降低评价模型和评价过程的不确定性。

2.5. 气候变化对水安全综合影响分析及适应性对策研究

分析气候变化对来水量(地表水、地下水)、可供水量、需水量(生活、生产、生态)、水文极端事件(洪涝、干旱)、重大水利工程、水环境水生态、水资源综合承载能力等的可能影响及存在的风险,综合评价气候变化对区域水安全的影响;同时针对存在问题,结合现有技术经济条件和未来发展趋势,研究可采取的适应性对策和措施。Nemec^[1]指出,根据现有气候条件设计和运行的水库将受到未来气候变化的影响,若

温度效应伴随着年降水量的减少,将使未来水库供水和发电的年保证率大大降低。Schwarz^[44]通过分析美国东北部的水文资料以评价气候变化对供水的影响。Frederick^[45]根据水土侵蚀模型(EPIC)分析了美国密苏里-衣阿华-内布拉斯加州-堪萨斯州 20 世纪 30 年代的干旱时期灌溉需水量较 1951~1980 年气候条件下将有所增加。Peterson 和 Keller^[46]研究了美国西部地区流域,认为假定未来气温若上升 3℃,降水将减少 10%,若按目前的灌溉标准和用水量,那么美国西部现有的可耕地面积将减少 30%。Arllen^[47]研究了气候变化对以色列灌溉需水的影响。McCabe 等^[48]应用灌溉模型分析了各种假定情景下气温、降水和气流阻力的变化对农作物需水量的影响。王守荣^[49]研究得出,未来 30 年黄河及其以北地区的气候变化使得该地区天然径流减少,水资源供需矛盾将更加突出。部分学者还研究了气候变化对生活用水、工业用水、热电厂冷却用水、航运和水生生态系统保护等用水部门用水量的影响^[50]。Smith^[51]研究了全球气候变化对大湖区水位、水质、航运及渔业的潜在影响。另有部分学者通过洪水、枯水、海平面、潮位等方面对全球气候变化对重大水利工程的影响进行了研究,如陈剑池等^[52]开展了气候变化对南水北调中线工程可调水量的影响等。另外,部分学者对气候变化与人类活动对水文影响的贡献识别开展了一定的研究,但其准确度仍存在较大问题^[53];也有部分学者对全球气候变化对水环境质量的影响进行了研究,重点研究降水、气温、光照辐射、风速风型变化对水质的影响^[54]。杨大文等^[55]指出全球气候变化已经影响到了流域水文过程和植被生长。

气候变化导致的水文极端事件(洪涝及干旱)的增加直接影响和威胁人类生命财产安全、经济社会的发展和生态环境良性循环,成为该领域重点关注和研究的主要内容之一。Krasovskaia 等^[56]采用实测日流量及同期降雨、气温等资料,分析了挪威气温、降水变化对极端洪水值及频率的影响,得出在“暖期”极端洪水次数增加 10%~15%,而极端洪水流量变化很小。Wigley 等^[57]根据英格兰和威尔士长系列降水记录,分析计算洪涝和干旱极值出现的频率和变化规律。Changnon^[58]分析了美国伊利诺斯州洪涝频率与气候条件的关系。Idso^[59]、Bultot^[60]等研究指出,CO₂ 浓度

增加会导致洪水发生频率增加。Whetton 等^[61]直接根据 GCM 网格点上的日尺度降水值分析了暴雨频率的变化。Zhang Qiang 等^[62]分析了气候变化和人类活动对中国南方地区水文极端事件的影响。张国胜等^[63]通过对 1961 年以来黄河上游地区气候变化的分析,指出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。范广洲等^[64]利用 PRMS 水文模式系统,模拟研究了气候变化对滦河流域丰、枯水年不同季节水资源的影响。邓惠平等^[65]分析气候波动对莱州湾地区水资源及极端旱涝事件的影响。陈特固等^[66]分析了粤港澳 7 个气象站近 100 年来降水量变化趋势,并对其与全球气候变暖的关系进行了分析,研究表明广东的重旱、重涝事件频率增加与气候变暖有关。

应对全球气候变化的适应性对策主要有加强气候变化的基础研究、调整经济发展模式和产业结构、加强水利基础设施建设、建立节水型社会建设、加强非常规水源的利用^[67]等。

3. 主要研究技术方法

对于气候变化的水文水资源效应研究,目前主要采用的技术、方法主要有:统计分析、成因分析、情景假设及降尺度、模型模拟、多模型耦合等。气候变化对水系统的影响研究是一个复杂的系统问题,在实际问题研究过程中并不是孤立采用某一种技术或方法,都是相关技术方法的有机结合。

3.1. 统计分析

采用概率与数理统计学方法对长系列数据进行分析,如 Man-Kendall 秩次相关检验法、Spearman 秩次相关检验法、线性回归等方法分析水文气象要素的变化趋势,主要分析对象为气温、降水、蒸发、流量等数据的多年平均值、逐年平均值、逐年最大值、逐年最小值、逐年最大月(旬、日)平均值、逐年最小月(旬、日)平均值等。通过目前已掌握的降水、蒸发、径流等水循环的影响要素的变化机理,结合统计分析结果,对气候变化的水文水资源效应可能成因进行分析,预估气候变化条件下各要素未来的趋势变化。如 Stockton^[2]应用 Langbein 等估计的年径流量、年均温度和年降水的经验关系对美国 7 个主要流域进行了研究。Stanley 等^[68]则根据统计分析方法综合分析了美国伊利诺斯州若干流域 1940~1990 年气候波动和土地利

用变化对河川径流和洪水的影响及各自的贡献大小。尤卫红等^[69]以云南纵向岭谷地区历年逐月径流量观测数据和云南的逐月雨量和气温等观测数据为基础,应用统计分析和小波变换分析方法,研究了云南纵向岭谷地区年际气候变化及其对国际河流年径流量变化的影响。蓝永超^[70]提出和使用一个用于黄河上游径流变化趋势超长期预测的时间序列 Markov 链耦合模型。邓慧平^[71]应用多种随机模拟方法分析了径流均值变化对洪水干旱频率和强度的影响。

3.2. 情景假设及降尺度

在全球尺度,由于气候系统受到地球外环境、地球内部各系统和人类活动各方面的影响,对未来气候变化趋势的预估还存在很大的不确定性,所以只能根据各种未来可能存在的变化情况及趋势进行情景假设,在此基础上开展气候变化的影响评估。生成情景的方法有任意假设法(如假定未来气温升高 1℃、2℃、3℃,降水量增加或减少 10%、20%、30%等)时间序列分析、时间/空间类比、基于 GCMs 输出等方法^[72],目前基于 GCMs 输出是最为常用方法。常用的 GCMs 包括:美国 NCAR 模式、GFDL 模式、CSU 模式,英国 UKMO 模式、HADL 模式,加拿大 CCC 模式,日本 CCSR 模式,德国 DKRZ 模式、ECHAM 模式、澳大利亚 CSIRO 模式,中国的 IAP 模式、CAMS 模式、NOA 模式、NCC 模式等。考虑全球气候模式的现有分辨率,直接应用于区域尺度上难以满足实际需求。对于区域尺度,气候变化不仅受到区域内部各种相关因子的影响,在相当大程度上受到全球气候影响,其不确定性更大,所以必须将 GCMs 输出降解到区域尺度上,作为水文模型的输入条件以便开展相关研究。目前主要根据全球气候模式采用简单法、统计法、动力法、多种方法相结合等降尺度的方法生成区域内未来气候变化情景,作为气候变化影响效应评估的输入条件。动力降尺度方法由于物理意义明确,对观测资料依赖小,应用前景较好,但由于计算复杂,现阶段实际应用受到较大的制约;统计降尺度计算相对简单,目前多采用该方法进行研究的较多^[72],常用的降尺度方法有相关分析法、天气分型法、天气发生器^[73]。相关研究如刘春蓁等^[74]在“八五”期间利用 GCMs 预测的未来气候情景系统研究了全球气候变化对我国水文水资源以及水资源供需平衡的影响。曾涛等^[75]

建立了气候陆面单向连接模型, 通过降尺度处理 GCMs 的输出结果, 连接到分布式水文模型计算径流, 以山西省为例进行不同情景下未来径流变化趋势的分析。张建云等^[76]利用 GCMs 的模拟结果对我国 7 大流域的水文要素变化进行了分析。范丽君^[77]采用统计降尺度的方法对中国未来区域气候情景进行了预估。郝振纯等^[78]以 Delta 方法为基础, 通过双三次多项式曲面插值法(DCSI)来考虑气候要素变化率在大尺度网格内的空间不均匀性, 并对未来水资源情景进行模拟预测, 结果表明 Delta-DCSI 方法是简单可行和更为合理的降尺度方法。左德鹏、徐宗学等^[79]统计降尺度模型 SDSM 将 HadCM3 输出数据降尺度到各站点, 分析未来气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量以及最高、最低气温的时空变化趋势。

3.3. 模型模拟

气候变化对水文水资源系统的影响的定量评估离不开水循环过程的基本原理和模拟模型, 如水量平衡原理、概念性水文模型、分布式水文模型等。常用的概念性水文模型有新安江模型、陕北模型、TANK、SWMM、PRMS、HSPF、HBV、AWBM、SSARR、NWSH、YRWBM、SARC 等^[80], 具有代表性的分布式/半分布式水文模拟模型和地下水模拟模型有 TOPMODEL、SWAT、MIKE SHE、VIC、TOPKAPI、MODFLOW、FEFLOW 等。Nemec 和 Schanke 应用概念性水文模型估算了气候变化对美国干旱地区和湿润地区径流的影响^[1]。以 Thomthwaite 等人建立的水量平衡模型为基础^[81], McCabe、Gleick^[3,82]分别对美国特拉华流域和美国加州萨克拉门托流域的水文情势进行研究。Chiew 等^[83]研究了气候变化对澳大利亚 28 个代表流域的影响。Major 等^[84-89]采用确定性的月时间尺度水量平衡模型来研究气候变化对水文水资源影响。傅国斌和刘昌明^[90]采用概念性月水量平衡模型分析了全球变暖对海南万泉河流域水资源的影响。陈英等^[91]应用新安江月模型模拟了淮河蚌埠以上流域对 7 个 GCMs 气候情景的响应, 分析了各水文要素的相应变化情况。英爱文和姜广斌^[92]应用 WatBat 模型分析了辽河流域水资源对气候变化的响应。郭靖等^[93]采用两参数月水量模型分析了气候变化对丹江口水库径流过程的影响。Dibike 等^[94]通过比较降尺度和水文模型方法, 分析气候变化的水文响应。Loukas 等

^[95]根据 CCC 气候模型的输出结果, 采用 UBC 流域水文模型研究了 CO₂ 倍增对英属哥伦比亚区的两个流域径流的影响。Kirby^[96]利用 SIMHYD 模型, 分析了气候变化情景下澳大利亚首府地区的流域水资源量。王国庆等^[97]通过采用 SIMHYD 概念性降水径流模型, 分析了气候变化对黄河中游汾河流域径流情势的影响。贺瑞敏等^[98]用澳大利亚水平衡模型(AWBM), 分析了环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响。陈利群等^[99]利用 2 个分布式水文模型(SWAT, VIC)进行模拟, 并对比其模型结果, 研究土地覆被与气候波动对径流的影响。刘昌明等^[100]应用 SWAT 模型的水量计算部分, 选取黄河河源区为典型流域, 基于 DEM 模拟不同气候和土地覆被条件下的黄河河源区地表径流的变化。袁飞等^[101]应用 VIC 模型与区域气候变化影响研究模型 PRECIS 耦合, 对气候变化情景下海河流域水资源的变化趋势进行了预测。王国庆^[102]采用假定的气候情景, 利用改进的水文模型研究了黄河中游各区间径流量对气候变化的敏感性。王兆礼^[103]以 RS、GIS 与 DEM 技术为基础, 构建了东江流域分布式水文模型-DJWDHM, 并利用该模型模拟了流域气候与土地利用变化对水文要素的影响。陈军锋等^[104]利用一个集总式水文模型(CHARM)模拟了梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响。还有一些学者根据不同流域特点相继提出了一些大尺度流域水文模型评估气候变化对流域水资源的影响^[105-112]。

采用流域水文模型研究气候变化对流域水文水资源影响方面有两个明显的趋势: 1) 从统计模型向概念性水量平衡模型和基于物理过程描述的分布式流域水文模型转化, 水文水资源特征对气候变化的响应机理更清楚; 2) 在模型的计算时段上, 也从较大的时间尺度(月)向小的时间尺度(日)转化, 便于了解流域水文水资源特征的实时变化。

气候变化的影响研究涉及海洋、陆地、大气等多个系统, 其研究有赖于气候模型、水文模型等诸多模型的有机结合。其关键核心问题涉及到模型的接口技术, 即情景假设与传统模型的有机结合。

4. 研究中存在的问题

气候变化对水文水资源的影响研究涉及的范围广(地圈、水圈、社会经济圈)、学科多(水文学、水资

源学、气象学、生态学、经济学、环境科学、社会科学、系统学、统计学等),因而目前的研究仍然有不少问题没有很好地解决,仍存在以下几个主要问题:

1) 近年来,国际上已注意到综合研究气候变化对水文系统的影响,并建立了相应的评估模型,但这方面的研究仍在探索之中,现有的模型较为单一有待进一步完善。

2) 国内以定性描述分析和统计分析的研究多,而利用遥感技术和地理信息系统建立机理驱动的概念性水文模式动态模拟气候变化的水文效应的研究工作较为薄弱。

3) 气候-陆地生态系统-社会经济系统及其相互作用方面的综合研究较为薄弱。如在土地利用/土地覆盖变化水文影响方面,综合评价各类下垫面的变化对流域水循环、水平衡及水旱灾害的影响,定量区分各类下垫面变化的贡献大小的研究相对较少,结合气候变化的研究更少。

4) 在气候变化水文水资源影响方面,考虑未来气候变化对水平衡、水循环、需水量和水旱灾害的影响研究还较少,以及流域土地资源、水资源变化及适应调整对经济增长、产业结构及生产力布局的影响以及两者之间的反馈关系的研究也相对较少^[113]。在气候变化大背景下,极端天气事件与洪涝灾害的形成机理研究、用水安全分析及水资源管理系统脆弱性研究的成果不多。

5) 在气候变化对我国各类水资源脆弱区影响的风险评估方面,由于气候变化的分析存在很大的不确定性,考虑综合分析和科学应用气候变化预测成果的研究比较少。

6) 空间尺度界定及其转换。尽管 GCMs 降尺度输出结果连接到分布式水文模型的研究很多,但水文空间不均匀性带来的尺度问题依然存在,即模型基本计算单元的确定以及不同尺度的模型参数能否转换问题。这主要表现为模型参数的网格化,即通过寻找模型参数与地理信息之间的关系,能否将率定的模型参数移植到无水文资料地区应用,仍然是有待研究的问题。

7) 模型的误差与情景预测的不确定性问题。误差的来源主要包括:被排除在外的因素引起的误差,不合适的内插与外推,不合适的时间和空间分辨率,不

合适的时间步长算法等^[114]。

5. 研究展望

气候变化对水文水资源的影响研究已取得了不少成果,未来研究的重点和方向将体现在以下几个方面:

1) 气候变化相关要素监测体系研究及建设。目前气候变化的影响研究在很大程度上受到研究地区和历史监测数据资料的局限,未来应考虑根据不同空间和时间尺度模型研究需要,选择有代表性地区构建有针对性的监测体系,积累长系列实测资料,为高精度模型的研究奠定基础。

2) 全球气候模式尺度降解技术的研究。尺度降解技术是现有全球气候模型-水文模型耦合的关键技术之一,受到现有认识水平的限制,还存在极大的不确定性,其精细化程度直接关系到最终模拟成果的应用。随着相关技术如 3S 技术的发展和基础资料的积累,将为降尺度方法提供良好的基础条件和机遇,简单实用的降解技术将成为将来研究亟需破解的难题之一。

3) 水文-气候模型的双向耦合研究。目前对于气候变化对水文水资源的影响研究主要是水文-气候模型单向连接方法,即由单气候模型输出的产品来驱动流域水文模型,未来需要深入研究气候模型与水文模型的耦合途径,以提高两者之间不同时空尺度的转化和模拟的精度。

4) 气候变化对水循环及其伴生全过程的综合研究。目前主要研究重点为水量,突出在地表,在已有成果基础上,未来应加强对水循环及其伴生全过程的综合研究,水量、水质与水生态结合,大气、地表、土壤与地下的结合,重点加强对水环境水生态的影响、水文极端事件机理、区域水安全综合影响等方面的研究。

5) 气候变化与人类活动对水文水资源系统影响的科学识别与定量评价研究。水循环过程受到多重因素的影响,构建“气候变化-人类活动-水”系统模型,科学识别与定量评价和区分气候变化与人类活动的贡献(影响)是研究的难点之一。

6) 无资料地区影响评价理论、方法与实践研究。如何定量预估无资料地区气候变化对地表径流的影响,服务于该地区的水工程建设,降低工程建设和运行风险,提高工程经济效益也是迫切需要解决的难题

之一。

7) 气候变化的水相关风险分析。原有很多涉水工程设计建设采用的相关经验理论和技术方法是建立在历史统计规律分析基础上, 由于气候变化对水循环过程外部条件的改变, 未来变化趋势必然发生改变, 若仍采用原标准, 其工程运行风险必将增大。如何客观评估由此增加的风险, 采取合理的对策(修正技术参数或采用其他补救措施)等, 是重大工程论证建设和运行管理中不得不面对的难题之一。

8) 适应性对策的效益对比分析。目前对于气候变化的适应性对策, 相对较为宏观, 未来应加强不同对策的经济效益定量对比分析研究。

参考文献 (References)

- [1] J. Nemeč, J. Schaake. Sensitivity of water resource systems to climate variation. *Hydrological Science Journal*, 1982, 27(3): 327-343.
- [2] C. W. Stockton, W. R. Boggess. Geohydrological implications of climate change on water resources development. USACE Institute for Water Resources, 1979.
- [3] G. J. McCabe, D. M. Wolock, L. E. Hay, et al. Effects of climatic change on the Thornthwaite moisture Index. *Water Resources Bull.*, 1990, 26(4): 633-643.
- [4] M. A. Mimikou, E. A. Baltas. Climate change impacts on the reliability of hydroelectric energy production. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 42(5): 661-678.
- [5] K. Smith, M. B. Richman. Recent hydroclimatic fluctuations and their effects on water resources in Illinois. *Climate Change*, 1993, 24(2): 249-269.
- [6] 沈大军, 刘昌明. 水文水资源系统对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 1998, 17(4): 435-442.
- [7] 魏智, 蓝永超, 吴锦奎等. 黄河源区水资源对气候变化的响应[J]. *人民黄河*, 2006, 28(3): 36-39.
- [8] 朱燕君, 李海萍. 黄河断流的气候因子分析[J]. *资源科学*, 2003, 25(2): 26-31.
- [9] 刘燕, 胡安焱. 渭河流域近 50 年降水特征变化及其对水资源的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(1): 85-87.
- [10] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. *地理学报*, 2004, 59(3): 324-330.
- [11] 姚玉璧, 尹东, 王润元等. 黄河首曲气候变化及其对黄河断流的影响[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(4): 1-6.
- [12] 黄荣辉, 韦志刚, 李锁锁等. 黄河上游和源区气候、水文的年代际变化及其对华北水资源的影响[J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(3): 245-258.
- [13] 马荣田, 周雅清, 朱俊峰等. 晋中近 49 年气候变化特征及对水资源的影响[J]. *气象*, 2007, 33(1): 107-111.
- [14] 李国军, 李晓媛, 王振国等. 黄河上游水源补给区气候变化及对水资源的影响[J]. *干旱气象*, 2007, 25(2): 67-70.
- [15] 朱利, 张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. *资源科学*, 2005, 27(2): 16-22.
- [16] M. A. Mimikou, E. A. Baltas. Climate change impacts on the reliability of hydroelectric energy production. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 42(5): 661-678.
- [17] P. H. Gleick. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, 1986, 88(1): 97-116.
- [18] L. L. Nash, P. H. Gleick. Sensitivity of streamflow in the Colorado Basin to climatic changes. *Journal of Hydrology*, 1990, 125(1): 221-241.
- [19] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 153-158.
- [20] 王国庆, 王云璋, 史忠海等. 黄河流域水资源未来变化趋势分析[J]. *地理科学*, 2001, 21(5): 396-400.
- [21] 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[J]. *水科学进展*, 1998, 9(1): 77-83.
- [22] 叶佰生, 赖祖铭, 施雅风. 气候变化对天山伊犁河上游河川径流的影响[J]. *冰山冻土*, 1996, 18(1): 29-35.
- [23] 游松财, T. Kiyoshi and M. Yuzuru. 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): 148-157.
- [24] 张光辉. 全球气候变化对黄河流域天然径流量影响的情景分析[J]. *地理研究*, 2006, 25(2): 268-275.
- [25] 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.
- [26] W. E. Riebsame. Adjusting water resources management to climate change. *Climate Change*, 1988, 13(1): 69-97.
- [27] K. D. Frederick. Adapting to climate impacts on the supply and demand for water. *Climate Change*, 1997, 37(1): 141-156.
- [28] E. Z. Stakhiv, D. C. Major. Ecosystem evaluation, climate change and water resources planning. *Climate Change*, 1997, 37(1): 103-120.
- [29] B. F. Hobbs, P. T. Chao and B. N. Venkatesh. Using decision analysis to include climate change in water resources decision making. *Climate Change*, 1997, 37(1): 177-202.
- [30] P. Rogers. Engineering design and uncertainties related to climate change. *Climate Change*, 1997, 37(1): 229-242.
- [31] R. Mendelsohn, L. L. Bennett. Global warming and water management: Water allocation and project evaluation. *Climate Change*, 1997, 37(1): 271-290.
- [32] G. Yohe, J. Neumann. Planning for sea level rise and shore protection under climate uncertainty. *Climate Change*, 1997, 37(1): 243-270.
- [33] D. P. Lettenmaier, S. J. Burges. Climate change: Detection and its impact on hydrologic design. *Water Resources Research*, 1978, 14(4): 679-687.
- [34] K. D. Frederick, D. C. Major and E. Z. Stakhiv. Water resources planning principles and evaluation criteria for climate change: Summary and conclusions. *Climate Change*, 1997, 37(1): 291-313.
- [35] P. H. Gleick. Vulnerability of water systems. In: P. E. Waggoner, Ed., *Climate Change and U.S. Water Resources*, New York: Wiley, 1990.
- [36] D. P. Lettenmaier. Climate sensitivity of California water resources. *Water Resources Planning and Management*, 1991, 117(1): 108-125.
- [37] 王国庆, 王云璋, 康玲玲. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 117-121.
- [38] Y. Zhang, X. Y. Xu and X. M. Wu. Using SCCM model to assess the impacts of climate change on water balance in the Huanghuaihai plain. In: Y. Zhang, Ed., *Climate Change and Its Impacts*, Beijing: Meteorological Press, 1993: 223-233.
- [39] 夏军, 邱冰, 潘兴瑶等. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 444-451.
- [40] F. Giorgi, L. O. Means. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the REA method. *Journal of Climate*, 2002, 15: 1141-1158.
- [41] S. Ghosh, P. P. Mujumdar. Climate change impact assessment: Uncertainty modeling with imprecise probability. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, Article ID: D18113.
- [42] 贺瑞敏, 刘九夫, 王国庆等. 气候变化影响评价中的不确定性问题[J]. *气候变化适应对策*, 2008, 2: 62-64, 76.
- [43] 吴赛男, 廖文根, 隋欣. 气候变化对流域水资源影响评价中的不确定性问题[J]. *中国水能与电气化*, 2010, 71(11): 14-18.
- [44] H. E. Schwarz. Climatic change and water supply: How sensi-

- tive is the Northeast? In: R. R. Reveile, P. E. Waggoner, Eds., *Climate Change and Water Supply*, Washington DC: National Academy of Sciences, 1977.
- [45] K. D. Frederic. Climate change impacts on water resources and possible responses in the MINK region. *Climate Change*, 1993, 24(1): 83-115.
- [46] D. Peterson, A. Keller. Irrigation. In: P. E. Waggoner, Ed., *Climate change and U.S. Water Resources*, New York: John Wiley and Sons, 1990: 269-306.
- [47] N. W. Arnell. Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment. *Journal of Hydrology*, 1992, 132(1): 321-342.
- [48] G. J. McCabe, D. M. Wolock. Sensitivity of irrigation demand in a humid-temperate region to hypothetical change. *Water Resources Bulletin*, 1992, 28(3): 535-543.
- [49] 王守荣, 郑水红, 程磊等. 气候变化对西北水循环和水资源影响的研究[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 43-51.
- [50] K. D. Frederick, D. C. Major. Climate change and water resources. *Climate Change*, 1997, 37(1): 7-23.
- [51] K. Smith. The potential impacts of climate change on the Great Lakes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1991, 72(1): 21-28.
- [52] 陈剑池, 金蓉玲, 管光明等. 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(3): 9-10, 16.
- [53] 董磊华, 熊立华, 于坤霞等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 278-285.
- [54] 夏星辉, 吴琼, 牟新利等. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 124-133.
- [55] 杨大文, 雷慧闻, 丛振涛等. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J]. *水利学报*, 2010, 41(10): 1142-1149.
- [56] I. Krasovskaia, L. Gottschalk. Frequency of extremes and its relation to climate fluctuations. *Nordic Hydrology*, 1993, 24(1): 1-12.
- [57] T. M. L. Wigley, J. M. Lough and P. D. Jones. Spatial patterns of precipitation in England and Wales. *International Journal of Climatology*, 1984, 4(1): 1-25.
- [58] S. A. Changnon. Trends in floods and related climate conditions in Illinois. *Climate Change*, 1983, 5(4): 341-363.
- [59] S. B. Idso, A. J. Brazel. Rising atmospheric carbon dioxide concentrations may increase streamflow. *Nature*, 1984, 312: 51-53.
- [60] F. Bultot, D. Gellens, M. Spreafico, et al. Repercussions of a CO₂ doubling on the water cycle and on the water balance—A case study in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 1992, 137(1): 199-208.
- [61] P. H. Whetton, A. M. Fowler, M. R. Haylock, et al. Implications of climate change due to the enhanced green house effects on floods and droughts in Australia. *Climate Change*, 1993, 25(3): 289-317.
- [62] Q. Zhang, T. Jiang, Y. Q. D. Chen, et al. Changing properties of hydrological extremes in south China: Natural variations or human influences? *Hydrological Processes*, 2010, 24(11): 1421-1432.
- [63] 张国胜, 李林, 时兴合等. 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): 277-283.
- [64] 范广洲, 吕世华, 程国栋等. 气候变化对滦河流域水资源影响的水文模式模拟(II): 模拟结果分析[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 302-310.
- [65] 邓惠平, 李爱贞, 刘厚凤等. 气候波对对莱州湾地区水资源及极端旱涝事件的影响[J]. *地理学报*, 2000, 20(1): 220-224.
- [66] 陈特固, 曾侠, 张江勇等. 全球变暖背景下的广东省降水量及旱、涝变化趋势[J]. *广东气象*, 2007, 29(1): 5-10.
- [67] 《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: 87-126.
- [68] A. C. Stanley, D. Misganaw. Detection of changes in streamflow and floods resulting from climate fluctuations and land use-drainage changes. *Climate Change*, 1996, 32(4): 411-421.
- [69] 尤卫红, 何大明, 段长春. 云南纵向岭谷地区气候变化对河
- 流径流量的影响[J]. *地理学报*, 2005, 60(1): 95-105.
- [70] 蓝永超, 丁永建, 康尔泗等. 黄河上游径流长期变化及趋势模型[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 321-326.
- [71] 邓慧平, 张翼. 可用于气候变化研究的日流量随机模拟方法探讨[J]. *地理学报*, 1996, 51(增刊): 151-160.
- [72] 郭靖. 气候变化对流域水循环和水资源影响的研究[D]. 武汉大学, 2010.
- [73] 杨涛, 陆桂华, 李会会等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 279-286.
- [74] 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, 3: 220-225.
- [75] 曾涛, 郝振纯, 王加虎. 气候变化对径流影响的模拟[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 324-332.
- [76] 张建云, 章四龙, 朱传保. 气候变化与流域径流模拟[J]. *水科学进展*, 1996, S1: 54-59.
- [77] 范丽君. 统计降尺度方法的研究及其对中国未来区域气候情景的预估[D]. 中国科学院, 2006.
- [78] 郝振纯, 李丽, 徐毅等. 区域气候情景 Delta-DCSI 降尺度方法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(5): 1-7.
- [79] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. *水科学进展*, 2001, 22(4): 455-460.
- [80] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 6-7.
- [81] W. C. Thomthwile. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1949, 38(1): 55-94.
- [82] P. H. Gleick. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, 1986, 88(1): 97-116.
- [83] F. H. Chiew, T. A. McMahon. Application of the daily rainfall-runoff model hydrolog to 28 Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 1994, 153: 386-416.
- [84] D. C. Major, K. D. Frederick. Water resources planning and climate change assessment methods. *Climate Change*, 1997, 37(1): 25-40.
- [85] H. Dowlatabadi, M. G. Morgan. Integrated assessment of climate change. *Science*, 1993, 259: 1813-1932.
- [86] P. H. Gleick. The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: Modeling the Sacramento Basin. *Water Resources Research*, 1987, 23(6): 1049-1061.
- [87] J. Schaake. From climate to flow. In: P. E. Waggoner, Ed., *Climate Change and U.S. Water Resources*, New York: John Wiley and Sons, 1990: 177-206.
- [88] 王国庆, 张建云, 林健等. 月水量平衡模型在中国不同气候区的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(5): 34-41.
- [89] 邓慧平, 唐来华. 沱江流域水文对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 1998, 51(1): 42-47.
- [90] 傅国斌, 刘昌明. 全球变暖对区域水资源影响的计算分析——以海南岛万泉河为例[J]. *地理学报*, 1991, 47(3): 277-288.
- [91] 陈英, 刘新仁. 淮河流域气候变化对水资源的影响[J]. *河海大学学报*, 1996, 24(5): 111-114.
- [92] 英爱文, 姜广斌. 辽河流域水资源对气候变化的影响[J]. *水科学进展*, 1996, 7(增刊): 67-72.
- [93] 郭靖, 郭生练, 陈华等. 丹江口水库未来径流变化趋势预测研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, 6(4): 78-82.
- [94] Y. B. Dibikey, P. Coulibaly. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 2005, 307(1): 145-163.
- [95] A. Loukas, M. C. Quick. Effect of Climate change on hydrologic regime of two climatically different watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1996, 4: 77-87.
- [96] M. Kirby, F. H. Chiew, et al. Catchment water yield and water demand projections under climate change scenarios for the Australian Capital Territory. Consultancy for ACT Electricity and Water, 2003.
- [97] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流形势的影响研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 853-858.

- [98] 贺瑞敏, 王建国, 张建云. 环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 297-301.
- [99] 陈利群, 刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 559-565.
- [100] 刘昌明, 李道峰, 田英等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437-445.
- [101] 袁飞, 谢正飞, 任立良等. 气候变化对海河流域水文特性的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 274-279.
- [102] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 河海大学, 2006.
- [103] 王兆礼. 气候与土地利用变化的流域水文系统响应[D]. 中山大学, 2007.
- [104] 陈军锋, 张明. 梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响的模拟研究[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 73-78.
- [105] 郝振纯, 王加虎, 李丽等. 气候变化对黄河源区水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 1-7.
- [106] 王国庆, 李健. 气候异常对黄河中游水资源影响评价网格化水文模型及其应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(6): 387-391.
- [107] L. H. Xiong, S. L. Guo. A two-parameter monthly water balance model and its application. *Journal of Hydrology*, 1999, 216: 111-123.
- [108] 刘家宏, 王光谦, 李铁健. 黄河数字流域模型的建立和应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 186-195.
- [109] 郝振纯, 苏凤阁. 新安江网格化月水文模型的改进[J]. 水科学进展, 2000, 11(6): 358-361.
- [110] 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: 32-49.
- [111] W. C. Boughton. An Australian water balance model for semi-arid watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50(5): 454-457.
- [112] N. Arnell. A simple water balance model for the simulation of stream flow over a large geographic domain. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3-4): 314-355.
- [113] 詹姆斯·韦斯特韦尔特, 著. 程国栋等, 译. 流域管理的模拟建模[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004: 26-55.
- [114] W. Bewket, G. Sterk. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*, 2000.