

# 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述

李峰平<sup>1,2</sup>, 章光新<sup>1</sup>, 董李勤<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**以全球变暖为主的气候变化已成为当前世界最重要的环境问题之一。气候变化对水循环与水资源影响的研究越来越引起国内外学者的高度关注和重视。简要回顾了国内外气候变化对水文水资源影响研究的发展历程,着重论述了目前气候变化对水文水资源影响的重点研究领域:水循环要素变化的检测与归因分析、气候变化与人类活动对水循环与水资源影响的定量评估、未来气候变化情景下水循环与水资源的演变趋势预估、气候变化对极端水文事件的影响研究和应对气候变化的水资源适应性管理策略;并介绍了气候变化对水文水资源影响研究中的气候变化情景、水文模拟及陆-气模型耦合等重要技术手段。最后,针对目前研究中存在的问题及薄弱环节,提出未来研究的发展趋势和亟需解决的关键问题。

**关键词:**气候变化;水循环与水资源;气候变化情景;水文模拟;陆-气模型耦合

**中图分类号:**P467/P339      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2013)04-0457-08

随着工业化和经济的高速发展,大气中二氧化碳等温室气体浓度不断增加,近百年来全球气温不断升高。IPCC<sup>[1]</sup>第四次评估报告指出:1906~2005年全球地表温度的线性趋势为0.74℃,预计到2100年,全球平均气温将上升1.1~6.4℃。以全球变暖为主的气候变化已成为当前世界最重要的环境问题之一。

水是大气环流和水文循环中的重要因子,是受气候变化影响最直接和最重要的因子之一。气候变化必将引起全球水文循环的变化,并对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接影响,引起水资源在时间和空间上的重新分配以及水资源总量的改变,增加洪涝、干旱等极端灾害发生的频率和强度<sup>[2]</sup>,进而使得区域水资源短缺问题更加突出,对人类社会水资源的开发、利用以及规划和管理等诸多环节造成严重影响,并进一步影响生态环境与社会经济的可持续发展。因此,研究气候变化对水循环影响的机理及评估水资源安全影响,提出应对气候变化的水资源适应性管理策略,对水资源的合理利用和规划管理具有十分重要的现实意义。

近几十年来,国内外专家开展了大量的全球

气候变化对水文与水资源的影响研究工作,并取得了丰硕成果。本文主要从气候变化对水文水资源影响研究的发展历程、重点研究领域及技术手段等方面综合评述气候变化对水文水资源的影响研究进展,同时指出当前存在的问题与亟需加强研究的重点方向。

## 1 气候变化对水文水资源影响的研究历程

### 1.1 国际研究发展历程

国际上于20世纪70年代后期逐渐开始了对气候变化影响方面的研究,但关于气候变化对水循环和水资源影响的研究真正被高度重视还是在20世纪80年代中期以后。在这个发展过程中,国际上开展了诸多科研计划并召开了相关国际会议<sup>[3,4]</sup>(表1),促进了水文水资源对气候变化响应研究的发展。

### 1.2 国内研究发展历程

中国气候变化对水文水资源影响的研究起步于20世纪80年代<sup>[5]</sup>。自此,中国先后在黄淮海流域、长江流域、珠江流域以及松花江等诸多流域组织开展了各类重大科研项目<sup>[6-10]</sup>(表2),研究气候

收稿日期:2012-06-11; 修订日期:2013-01-30

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428404)资助。

作者简介:李峰平(1988-),女,内蒙古扎兰屯人,博士研究生,主要研究方向为水文水资源。E-mail: fir-babyandjustice@163.com

通讯作者:章光新,研究员。E-mail: zhgx@neigae.ac.cn

表1 国外关于气候变化对水文水资源影响研究的重要会议

Table 1 Significant researches /conferences about impact of climate change on hydrology and water resources abroad				
发展阶段		时间	相关组织或会议	具体内容
20 世纪 70 年代后期	起步阶段	1977 年	WMO、ICSU、UNEP、	开展实施世界气候计划(WCP)、全球能量与水循环试验
			IAHS 等	(GEWEX)等科研计划
			USNA	组织气候变化与供水之间相互关系及其影响讨论会
20 世纪 80 年代中期以后	社会高度重视	1985 年	WMO	气候变化对水文水资源影响的综述报告
		1987 年		水文水资源对气候变化的敏感性分析报告
		1987 年	第 19 届 IUGG 大会	举办“气候变化和气候波动对水文水资源影响”专题讨论会
		1988 年	WMO 和 UNEP	共同组建成立政府间气候变化专门委员会(IPCC)
		1990~2007 年	IPCC	完成四次评估报告,深入分析气候变化对水文水资源的影响
		1991 年	第二十届 IUGG 大会	以土壤-大气之间相互作用的水文过程作为主题
		1992 年	里约热内卢环境与发展大会	发表 21 世纪议程,指出气候变化对水文水资源的影响问题应给予全球性关注
		2001 年	荷兰 IGBP 大会	均设立专题讨论气候变化对水文水资源的影响
		2004 年	巴西 IAHS 大会	
		2006 年	第三届水资源管理论坛	讨论了关于气候变化对水文水资源影响研究的问题
			第四届世界水论坛	
		2007 年	IUGG 国际大会	
		2009 年	第五届世界水论坛	集中讨论了全球气候变化的影响及其对策
		2012 年	第六届世界水论坛	举办“水和适应气候变化”高层圆桌会议

注:WMO-世界气象组织;ICSU-国际科学理事会;UNEP-联合国环境规划署;IAHS-国际水文科学协会;USNA-美国国家研究协会;IUGG-国际大地测量学与地球物理学联合会;IPCC-政府间气候变化专门委员会;IGBP-国际地圈生物圈计划。

表2 中国关于气候变化对水文水资源影响研究的重大科学研究计划

Table 2 Significant researches about impact of climate change on hydrology and water resources in China		
项目分类	开展时间	项目名称
国家科技攻关(科技支撑计划)项目	“八五”期间	“气候变化对水文水资源的影响及适应对策研究”
	“九五”期间	“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估模型研究”专项
	“十五”期间	“气候异常对我国淡水资源的影响阈值及综合评价”专题
	“十一五”期间	“典型脆弱区域气候变化适应技术示范”
	“十二五”期间	“沿海地区适应气候变化技术开发与应用”
各部门支持的相关项目	1988 年	中国科学院及国家自然科学基金“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”
	2008 年	水利行业重大研究专项“气候变化对我国水安全影响及适应性对策研究”
国家“973”项目	2009 年	“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”
全球变化国家重大科学研究计划项目	2010 年	“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”
	2010 年	“气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究”

变化对水循环与水资源的影响,研究内容涵盖气候变化影响下水资源变化趋势、影响评估模型以及气候变化阈值研究等。从全国和典型区域的不同层次开展气候变化对水循环与水资源的影响及水资源安全与适应对策研究是目前中国研究发展的重要方向<sup>[6]</sup>,对于保障粮食安全、生态安全和社会经济可持续发展具有重要意义。

2 气候变化对水文水资源影响的重点研究领域

2.1 水循环要素变化的检测与归因分析

利用长序列历史资料分析各水循环要素演变

的趋势、周期以及空间分异等特征是气候变化对区域水资源影响研究的基础,国内外学者对此开展了大量的研究工作。Stockton<sup>[11]</sup>早在1979年就通过经验关系法来评价水文因子对气温、降水变化的响应程度。Nigel<sup>[12]</sup>通过对径流变化趋势的研究表明在不同的区域气候变化对径流量的影响不同。中国在长江<sup>[13]</sup>、黄河<sup>[14]</sup>、海河<sup>[15]</sup>、塔里木河<sup>[16]</sup>、松花江<sup>[17]</sup>等多个流域开展了水循环要素演变规律方面的研究。徐东霞等<sup>[18]</sup>根据嫩江主要代表水文站1956~2006年径流资料,应用数理统计、累积滤波器、Mann-Kendall 秩相关法及小波分析法等多种方法,分析了嫩江径流年内、年际变化特征及其影响因素。陈利群等<sup>[19]</sup>基于多年历史数据,通过径流系数分析了气候对黄河源区径流的影响,并针对降水和气温对径流的影响进行了对比分析。秦年秀等<sup>[20]</sup>利用宜昌、汉口和大通站多年月平均流量资料,对长江流域年代际、月、季径流变化趋势及突变进行了分析,并通过Mann-Kendall 法检验。结果表明:20世纪90年代长江流域径流呈微弱增加趋势,夏季和冬季径流增加趋势明显;90年代汛期径流也呈现出增加趋势,在一定程度上加大了洪灾发生的可能性。除了对流域径流的影响分析,一些学者还利用多年历史资料针对冰川<sup>[21]</sup>、积雪<sup>[22]</sup>以及湖泊<sup>[23]</sup>水体等开展研究,分析其演变规律和驱动因素。

尽管对于水循环要素演变规律的研究已经非常多,但人们对这方面的认识还不够全面。多数研究都会分析降水和蒸发等气象因素对径流的影响,但并不能证明这些与气候变化的关联有多大,而且历史资料的长短及质量也限制了水循环要素变化的研究。

2.2 气候变化与人类活动对水循环与水资源影响的定量评估

流域水文要素除了受气候因素的影响还与人

类活动有着密切的联系。而不同流域内气候变化和人类活动对径流的影响程度是不同的<sup>[24]</sup>。在过去的研究中,大部分只是单一地针对气候变化<sup>[25,26]</sup>或人类活动<sup>[27]</sup>对水文水资源的影响,而综合分析二者的影响的研究很少,且多数集中在定性研究上。随着气候变化和人类活动对水资源影响的不断加剧,定量区分二者对径流变化的贡献率越来越引起社会的关注,已经成为当前研究的重点内容之一。

目前,定量区分气候变化和人类活动对水文水资源影响的研究主要采用的方法有分项调查法、灰色关联分析法<sup>[28]</sup>、线性分析法<sup>[29]</sup>、弹性系数法<sup>[30]</sup>、流域水文模型法<sup>[31,32]</sup>等。表3列出了中国在气候变化和人类活动对流域径流变化贡献率方面的相关研究<sup>[24,29-33]</sup>。

目前应用较多的研究思路是:根据流域的具体条件选取适宜的水文模型,将天然序列水文阶段划分为天然时期和人类活动影响时期,通过模型模拟2个时期的天然径流量,并结合实测径流量进行计算,将气候变化和人类活动对径流的影响进行分离<sup>[24]</sup>(图1)。其中水文模型可以选择集总式模型,也可以选择分布式模型,但分布式模型应用居多。

对于未来径流变化影响因子的贡献率分析,首先要预测未来气候和人类活动的变化趋势,假定二者是径流变化的两个相互独立的影响因子,利用水文模型分别模拟单一因子变化下的未来径流变化,最后比较二者的影响程度大小<sup>[34]</sup>。但至今为止,限于未来气候变化和土地利用变化情景的预测及其不确定性,大部分研究主要针对过去气候变化和人类活动对水文要素的影响,有关未来水文要素变化的驱动因素定量分析的研究还比较少。

表3 中国气候变化和人类活动对流域径流影响的定量分析相关研究

Table 3 Researches about distinguishing effects of climate change and human activity on runoff in China

专家学者	研究方法	研究流域	研究时段	主导因素	对径流的影响	贡献率
栗晓玲等(2007年)	回归分析法	渭河流域	1956~2000年	气候变化	减少	62.8 %
叶许春等(2009年)	径流对降水和潜在	鄱阳湖流域	1961~2000年	气候变化	增加	133 %
江善虎等(2010年)	蒸发的敏感性分析	老哈河流域	1964~2008年	人类活动	减少	6.3~17.9 mm
王纲胜等(2006年)	DTVGM模型	潮、白河流域	1961~1966年	人类活动	减少	54 %
			1973~2001年			74 %
王国庆等(2008年)	水文模拟 SIMHYD模型	三川河流域	1958~2000年	人类活动	减少	约70 %
胡珊珊等(2012年)	HIMS模型	唐河上游	1960~2008年	人类活动	减少	60%~62 %



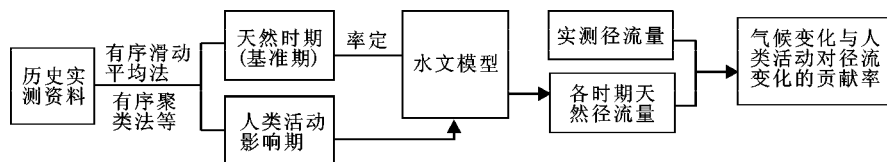


图1 气候变化与人类活动对径流变化的贡献率研究框架

Fig.1 Method of distinguishing effects of climate change and human activity on runoff

## 2.3 未来气候变化情景下水循环与水资源的演变趋势预估

未来气候变化情景下水循环与水资源演变趋势预测是气候变化对水文水资源影响研究中最主要的一个内容。国内外学者已经在多个流域<sup>[35-43]</sup>开展了此方面的研究,并取得了丰硕的成果。未来气候变化背景下水资源响应研究常遵循图2所示的模式,即“未来气候情景设置-水文模拟-影响研究”模式。其中,气候变化情景的选择和水文模型的构建以及陆-气模型耦合在研究中至关重要。

### 2.3.1 气候变化情景

气候变化情景是建立在一系列科学假设基础之上的,对未来世界气候情况进行连续、内在一致的合理描述。目前对于未来气候变化的情况还不能准确预估,只能通过各种方法制定可能出现的气候情景。未来气候变化情景的设计通常采用图2所示的5种方法:任意假设法<sup>[37,38]</sup>、时间类比法、空间类比法、时间序列分析法和基于GCMs输出方法<sup>[35,36]</sup>。其中,全球气候模式是目前气候变化预估最主要和最有效的工具。目前,基于GCMs输出的气候情景已由平衡试验情景和渐变试验情景(IS92)发展到当前的SRES情景。其中,平衡试验情景和渐变试验情景都是通过对基准气候的调整得到的<sup>[44]</sup>,而SRES情景则是综合考虑了社会经济的发展情况。SRES主要分为4个情景族,包含6组共40个温室气体排放参考情景,A1和A2强调经济发展,但在经济和社会发展程度上有所不同;B1和B2强调可持续

发展,但在有关发展程度上存在不同<sup>[4]</sup>。

至今为止,已有许多研究机构研制了全球大气环流模式,但由于对气候系统的客观认识和资料可靠性的限制,不同模式的输出结果有很大差异。因此,当前对未来气候变化的预测还具有相当大的不确定性,应增强对气候系统的认识,提高气候模型的模拟和预测精度。

### 2.3.2 水文模型

当气候情景选定后,选择合适的水文模型十分关键。水文模型是一种用于概化和模拟自然界水文现象的方法和工具,是水文水资源研究中的一个重要的分支和热点研究问题。尤其是气候变化和人类活动对水文水资源影响研究的兴起,使得水文模型得到了更好地发展和应用。当前用于估算气候变化影响的水文模型主要有:统计回归模型<sup>[45]</sup>、水量平衡模型<sup>[38]</sup>、概念性水文模型以及分布式物理模型<sup>[39-41]</sup>。概念性水文模型向分布式水文模型发展将是目前发展的重要趋势之一,研究的尺度也正在由流域、大陆尺度向全球尺度发展<sup>[5]</sup>。目前应用较多的分布式水文模型有VIC模型、SWAT模型和SHE模型、DTVGM模型等。在选择水文模型进行气候变化对水文水资源影响研究时,应综合考虑模型的内在精度、模型率定和参数变化、现有资料及精度、模型的通用性和是否便于应用以及与GCMs的兼容性等几方面内容<sup>[46]</sup>。表4中总结了以往研究中水文模型、气候变化情景及降尺度方法的应用情况<sup>[35-43]</sup>。

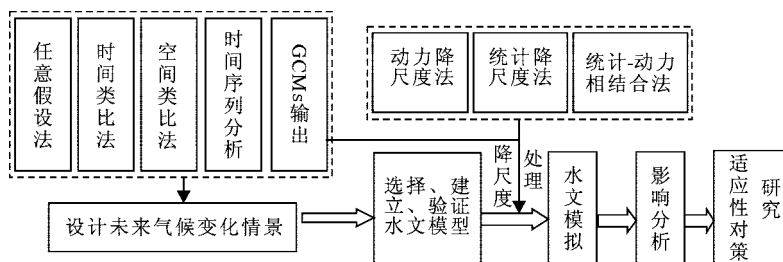


图2 未来气候变化情景下水文水资源的响应研究框架

Fig.2 Research method of impact of climate change in the future on hydrology and water resources

表4 未来气候变化情景下水文与水资源的响应研究

Table 4 Researches about impact of potential climate change on hydrology and water resources

作 者	使用模型		模型耦合处理方法		气候变化情景	研究区域
	水文模型	气候模式				
Bekele等(2010年)	SWAT	GCM	Delta方法		A2、A1B、B1	Fox河流域
Zhang等(2011年)	SWAT	PRECIS CRCM	WXGEN、LARS-WG		A2	Assiniboia流域
冯夏清等(2010年)	SWAT	-	-		假定情景	乌裕尔河流域
王国庆等(2011年)	考虑融雪的水量 平衡模型	-	-		假定情景	太子河流域
袁飞等(2005年)	VIC模型	PRECIS	根据实测资料修正		A2、B2	海河流域
郭靖等(2009年)	VIC模型	CGCM2 HadCM3	基于光滑支持向量机	统计降尺度	A2	汉江流域
张利平等(2011年)	SWAT	WCRP	天气发生器	时间尺度降解	A2、A1B、B1	漳卫河流域
张光辉等(2006年)	SWAT	HadCM3	Delta方法	空间尺度降解	A2、B2	黄河流域
张永勇等(2012年)	SWAT	CSIRO NCAR	插值		A1、B1	三江源区

2.3.3 陆-气模型耦合

与流域水文模型尺度相比,GCMs网格格距较大,直接将其输出结果应用于水文模型是非常困难的。因此,流域未来水资源预测研究通常会采用流域水文模型与未来气候变化情景耦合的方法<sup>[35,39,41]</sup>。长期以来大部分的研究主要采用气候模式与水文模型的单向连接,即将气候模式输出的结果,通过降尺度方法处理后直接作为水文模型的输入,模拟流域径流等水文要素的变化。如图2中所示,目前降尺度方法有动力降尺度、统计降尺度和动力-统计相结合的方法,其中,统计降尺度法在国内外得到广泛应用<sup>[36,40]</sup>,动力-统计相结合的方法将是未来的发展趋势<sup>[47]</sup>。

这种单向连接的方法与实际的气候与水文过程间的双向交互作用不符,国内外专家已开始注重对陆-气模型的双向耦合研究。此外,气候情景及水文模型等环节中的不确定性问题也一直是全球气候变化对未来水资源影响研究的一个难点,需要进一步研制具有更高分辨率的气候情景,同时提高水文模型在不确定气候状况下的模拟水平。

2.4 气候变化对极端水文事件的影响研究

研究全球变暖背景下极端水文事件的变化规律已成为当今人们关注的热点。国内外学者就气候变化对水文极端事件的影响展开了相关的研究。已有研究表明,美国、加拿大等多个国家的极端降水事件发生频率均有所增加<sup>[48,49]</sup>。中国研究

也表明大气中CO<sub>2</sub>浓度增加可能导致南方极端天气增多<sup>[50]</sup>。

极端水文事件的研究主要包括极端降水<sup>[51]</sup>、极端洪涝<sup>[52]</sup>和极端干旱<sup>[25]</sup>3个方面。Wigley<sup>[53]</sup>基于英格兰和威尔士近20 a的历史降水记录,计算、分析了洪涝和干旱极值变化规律及出现的频率。吴志勇等<sup>[54]</sup>利用VIC模型并基于气候变化情景数据研究了气候变化影响下黑河流域极端水文事件的变化趋势。

多种统计降尺度模型和水文模型的耦合是预测气候变化情景下水文极端事件变化的有效途径之一。Müller-Wohlfeil等<sup>[55]</sup>采用降尺度模型对德国北部的Stör流域上游极端气候事件和未来水文过程进行了模拟和研究。张勇等<sup>[56]</sup>利用区域气候模式PRECIS单向嵌套HadAM3P,分析了PRECIS模拟当代中国区域极端降水事件的能力和B2情景下21世纪80年代时段中国区域极端降水事件的可能变化趋势。

目前气候变化对极端水文事件的影响研究大多是对极端水文事件出现的频率和强度等时空变化的统计分析,还停留在定性研究的层面上<sup>[57]</sup>,需进一步加强量化研究。

2.5 应对气候变化的水资源适应性管理策略

国内外已开始重视此方面的研究。2009年美国推出气候变化与水资源管理报告,督促各部门积极应对气候变化对水资源的影响<sup>[58]</sup>。英国<sup>[59]</sup>在

新一轮的水资源规划中充分考虑了未来气候情景下水资源的变化。近些年,中国多次强调通过开展重大课题和项目加强水资源适应性对策的研究<sup>[6]</sup>。刘昌明<sup>[60]</sup>指出:应针对气候变化背景下水循环变化规律制定相应的适应性对策,保证流域水资源的可再生性。张威等<sup>[61]</sup>结合黄河水生态现状和气候变化可能造成的影响,提出黄河水生态系统适应性对策。国家重点基础研究发展计划《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》中专门设立“气候变化影响下我国水资源的脆弱性与适应对策”专题,旨在结合实证研究与模型模拟成果进行综合分析,研究气候变化下水资源适应性管理对策的理论和方法,并对适应性措施的成本效益与制约因素进行分析,探讨气候变化下水资源适应性管理的制度、模式及保障途径,进而提出应对气候风险、保障水资源安全的适应性管理措施与政策建议。目前,该专题已取得了一定的成果。夏军等<sup>[62]</sup>综合考虑水资源系统对气候变化的敏感性和适应性,采用有水资源基础的关键性指标体系方法,提出了气候变化和人类活动背景下水资源脆弱性评估理论体系和一般性公式。并将模型应用于严重缺水的海河流域,评价其当前和未来情景下水资源脆弱性情况。结果表明:海河流域水资源脆弱性总体偏高,平原区较山区严重;气候因素为主要影响因素,如不采取措施,未来海河流域的水资源脆弱性将进一步加重。

开展气候变化下水资源适应性管理策略研究必须以未来气候情景下水循环要素对气候变化的响应规律、极端水文事件发生的概率和程度以及气候变化对水文水资源影响研究的不确定性等基础研究为前提。然而由于以上方面研究的限制和公众对这方面问题的意识不够,中国在应对气候变化的水资源适应性管理策略方面的研究还比较薄弱。因此,要充分认识气候变化对水文水资源影响研究的重要性和艰巨性,加强水资源适应性对策研究。

### 3 结论与展望

综合分析国内外气候变化对水文水资源的影响研究现状及发展动态可见,相对而言,中国研究起步较晚,尤其是气候模型及水文模型的开发研制工作中国开展较少。就研究内容而言:对径流

等水文要素的演变规律分析是国内外开展的较早也是相对较多的一个内容;其次,目前已在多个流域开展了未来气候变化背景下水文水资源的响应研究,取得了丰硕成果,但在陆-气模型耦合方面仍需进行深入研究,且模拟精度有待提高;而对于气候变化对极端水文事件的影响以及水资源适应性对策研究开展的相对较少;研究多只考虑气候变化,而忽略了人类活动的影响,不能更准确地预估未来水资源演变,且多数研究重点分析的是径流的变化,对地下水及水环境、水生态的影响研究甚少。为保证对未来气候变化情景下水资源状况开展深入、全面、系统的研究,综合已有研究成果,针对目前研究中存在的一些问题,提出以下几方面建议与展望:

1) 研究手段:对于气候情景和水文模型,一方面需要深入研究气候模型与水文模型的双向耦合技术,提高两者之间尺度转化和模拟的精度。另一方面,需要进一步提高气候情景的预测精度和分辨率,结合流域特点改进传统水文模型,解决未来水资源研究中的不确定性问题。

2) 研究背景:受气候和人类活动双重影响,未来下垫面条件必然会发生变化并对未来水资源造成影响。因此,结合未来土地利用变化趋势研究气候变化对水资源的影响是非常必要的。目前,未来水资源的研究已开始考虑土地利用的变化,但还需进一步加强。

3) 研究对象:地下水是水循环系统和水资源的重要组成部分,目前已针对气候变化对地下水的影响开展了一些研究并取得了一定的成果,但由于地下水与气候变化的关系以及地下水的补给方式要比地表水复杂得多,加上日益突出的用水矛盾,迫使我们有必要更加关注并不断完善气候变化对地下水影响的研究,并结合地表水研究成果,更加完整的刻画水循环和水资源演变的轨迹。

4) 研究内容:目前研究主要集中在气候变化背景下径流变化趋势方面,关于气候变化对水文极端事件的影响和水文水资源变化驱动因素贡献率量化等方面研究在方法上还有待进一步发展完善。此外,由于资料和技术手段的限制,气候变化对水环境、水生态以及重大水利工程等方面的影响研究相对薄弱,今后应进一步加强,并结合未来气候变化情景下中国水资源的整体变化趋势,提



出水资源适应性管理策略,指导水资源的合理开发利用和战略规划管理。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 张建云, 王国庆, 刘九夫, 等. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 39~41.
- [3] WMO. Water resources and climatic change: sensitivity of water resources system to climate change and variability[M]. Geneva: WMO/TO, 1987.
- [4] 张利平, 陈小风, 赵志鹏, 等. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27(3): 60~67.
- [5] 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.
- [6] 夏军, 刘春葵, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1~12.
- [7] 水利部应对气候变化研究中心. 气候变化对水文水资源影响研究综述[J]. 中国水利, 2008, (2): 47~51.
- [8] 张建云. 短期气候异常对我国水资源的影响评估——国家“九五”重中之重科技攻关专题96-908-03-02专题简介[J]. 水科学进展, 1996, 7(增刊): 1~3.
- [9] 王国庆, 张建云, 章四龙. 全球气候变化对中国淡水资源及其脆弱性影响研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 7~10.
- [10] 施雅风. 中国气候与海面变化及其趋势和影响[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.
- [11] Stockton C W, Boggess W R. Geohydrological implications of climate change on water resource development[R/OL]. 1979. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA204483>.
- [12] Nigel W Arnell. Climate change and global water resources: SRES emissions and socioeconomic scenarios[J]. Global Environmental Change, 2004, 14(1): 31~52.
- [13] 赵红莉, 陈宁, 蒋云钟, 等. 汉江上游水资源时空演变及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 90~93.
- [14] 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.
- [15] 刘春葵, 刘志雨, 谢正辉. 近50年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 385~393.
- [16] 徐长春, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河流域近50年气候变化及其水文过程响应[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊): 21~30.
- [17] 陆志华, 夏自强, 于岚岚, 等. 松花江干流中游段径流年内分配变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 63~69.
- [18] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近50年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 416~421.
- [19] 陈利群, 刘昌明, 郝芳华, 等. 黄河源区气候对径流的影响分析[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 321~329.
- [20] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 589~594.
- [21] 张凯, 王润元, 韩海涛, 等. 黑河流域气候变化的水文水资源效应[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 77~83.
- [22] 王建, 沈永平, 鲁安新, 等. 气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 28~33.
- [23] 孙永亮, 李小雁, 汤佳, 等. 青海湖流域气候变化及其水文效应[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 354~362.
- [24] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008, (2): 55~58.
- [25] Wilby R L, Harris I. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK [J]. Water Resource Res, 2006, 42(2): W02419.
- [26] 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.
- [27] 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 211~224.
- [28] 杨新, 延军平, 刘宝元. 无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 637~642.
- [29] 栗晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 981~990.
- [30] 江善虎, 任立良, 雍武, 等. 气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 1~4.
- [31] 王纲胜, 夏军, 万东晖, 等. 气候变化及人类活动影响下的潮白河月水量平衡模拟[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 86~91.
- [32] 胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62~70.
- [33] 叶许春, 张奇, 刘健, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流变化的影响研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 835~842.
- [34] 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, 2(2): 286~293.
- [35] Bekele E G, Knapp H V. Watershed modeling to assessing impacts of potential climate change on water supply availability[J]. Water Resources Management, 2010, 24(13): 3299~3320.
- [36] Zhang H, Huang G H, Dunling Wang, et al. Uncertainty assessment of climate change impacts on the hydrology of small prairie wetlands[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1-2): 94~103.
- [37] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于SWAT模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展, 2010, 29(7): 827~832.
- [38] 王国庆, 王兴泽, 张建云, 等. 中国东北地区典型流域水文变化特性及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 641~646.
- [39] 袁飞, 谢正辉, 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.
- [40] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究[J]. 水文, 2009, 29(5): 18~22.
- [41] 张利平, 曾思栋, 夏军, 等. 漳卫河流域水文循环过程对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1217~1226.
- [42] 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.
- [43] 张永勇, 张士锋, 翟晓燕, 等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 71~82.

- [44] 吴金栋, 王馥棠. 气候变化情景生成技术研究综述[J]. 气象, 1998, **24**(2): 3~8.
- [45] 张济世, 康尔泗, 姚尽忠. 气候变化对洮河流域水资源的影响[J]. 中国沙漠, 2003, **23**(3): 263~267.
- [46] 江 涛, 陈永勤, 陈俊合, 等. 未来气候变化对我国水文水资源影响的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, **39**(增刊): 151~157.
- [47] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(3): 320~326.
- [48] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency and intensity in the United States[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1998, **79** (2): 231-241.
- [49] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. Climate Res., 2002, **19**(3): 193-212.
- [50] Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model[J]. Advances in Atmosphere Sciences, 2001, **18**(6): 1224-1230.
- [51] 江志红, 丁裕国, 蔡 敏, 等. 未来极端降水对气候平均变暖敏感性的蒙特卡罗模拟试验[J]. 气象学报, 2009, **67**(2): 272~279.
- [52] 刘九夫, 张建云, 关铁生. 20世纪我国暴雨和洪水极值的变化[J]. 中国水利, 2008, **2**: 35~37.
- [53] Wigley T, Lough J, Jones P D, et al. Spatial patterns of precipitation in England and Wales and a revised, homogeneous England and Wales precipitation series[J]. Journal of Climatology, 1984, **4**(1): 1-25.
- [54] 吴志勇, 郭红丽, 金君良, 等. 气候变化对黑河流域极端水文事件的影响[J]. 水电能源科学, 2010, **28**(2): 7~9.
- [55] Müller-Wohlfeil D I, Bürger G., LAHMER W. Response of a river catchment to climatic change: Application of expanded downscaling to Northern Germany[J]. Climatic Change, 2000, **47**(1): 61-89.
- [56] 张 勇, 许吟隆, 董文杰, 等. 中国未来极端降水事件的变化-基于气候变化预估结果的分析[J]. 自然灾害学报, 2006, **15** (6): 228~234.
- [57] 张利平, 杜 鸿, 夏 军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, **30**(11): 1370~1379.
- [58] Brekke L D, Kiang J E, Olsen J R, et al. Climate change and water resources management-A federal perspective[M]. Virginia, U. S.A: U.S. Geological Survey, Circular 1331, 2009.
- [59] 曹建廷. 气候变化对水资源管理的影响与适应性对策[J]. 中国水利, 2010, (1): 7.
- [60] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展, 2004, **15**(5): 608~614.
- [61] 张 威, 付新锋. 黄河流域水生态现状与气候变化适应性对策[J]. 人民黄河, 2011, **33**(5): 51~54.
- [62] 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): 443~451.

## Studies for Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources

LI Feng-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Guang-xin<sup>1</sup>, DONG Li-qin<sup>1,2</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130102, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Climate change characterized by global warming has become one of the world's most important environmental issues. Its impact on hydrology and water resources has attracted more and more concern from international scholars. This article briefly reviews the development of studies for impact of climate change on hydrology and water resources, and then focuses on the key fields in the studies: analysis of variation trends in runoff and related driving forces, quantitative assessment for climate change and human activities impact on water resources, watershed modeling to assess impact of potential climate change on hydrology and water resources, study of extreme hydrologic events under climate change scenarios, and adaptation strategy for climate change impact on water resources. It also introduces the important techniques in the related studies, including hydrologic simulation, future climate change scenarios, and connection of hydrological model with climatic model. Finally, it raises problems and weakness in study and puts forward some suggestions, including development trends of future research and key problems to be solved.

**Key words:** climate change; hydrology and water resources; climate change scenarios; hydrologic simulation; connection of hydrological model with climatic model