

# 气候变化对干旱内陆河流域水资源影响的研究进展

曾建军, 金彦兆, 孙栋元, 胡想全, 卢书超

(甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 气候变化对水资源的影响是当前全球变化研究的热点和前沿问题之一。气候变化对干旱内陆河流域水资源影响的研究也越来越引起诸多学者的关注与重视。本文回顾了国内外气候变化对水资源影响研究现状与进展,总结了相关的研究方法,并从水文要素、气候变化与人类活动对水资源的定量评估、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措施4个方面归纳了相关方面的研究成果。同时指出了气候变化对干旱内陆河流域水资源影响研究存在的问题,并展望了未来气候变化对干旱内陆河流域水资源影响研究的发展趋势。

**关键词:** 气候变化; 水资源; 极端水文事件; 水资源适应性措施; 研究进展; 干旱内陆河流域

中图分类号: P467; P339

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0072-07

## Research progress on impact of climate variation on water resources in arid inland river basin

ZENG Jianjun, JIN Yanzhao, SUN Dongyuan, HU Xiangquan, LU Shuchao

(Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The impact of climate variation on water resources is one of the current hot and frontier issues of global change study. The research on impact of climate variation on water resources in arid inland river basin is paid more and more concern and attention by many scholars. This paper reviewed the current research situation and progress of influence of climate change on water resources and summarized relative research methods. It summarized the relative research results from 4 aspects such as hydrological elements, quantitative assessment of climate and human activities for water resource, the influence of climate change on extreme hydrological events and the adaptive management countermeasures of water resource to deal with climate change. This paper outlined both the problem and the future development trend of the influence of climate change on water resources in arid region of inland river basin.

**Key words:** climate change; water resources; extreme hydrological events; adaptive countermeasures of water resources; study progress; arid inland river basin

据 IPCC 第五次评估报告结论<sup>[1-2]</sup>: ①1901 - 2012 年全球地表平均温度升高 0.89℃ (0.69 ~ 1.08℃); ②1980 - 2010 年过去的 30 a, 其每个十年都要比自 1850 年以来的任何十年都暖; ③自 1901 年以来, 北半球中纬度陆地区域平均的降水已增加; ④20 世纪中叶以来, 极端事件的强度和频率发生明显变化<sup>[3]</sup>。由此, 以全球变暖为主的气候变化已成为当今世界重要的环境问题之一<sup>[4-6]</sup>。全球气候变化所导致的气温升高、极端天气、海平面上升和气候事件

频发等问题<sup>[2,7-8]</sup>, 不仅影响自然生态系统和人类生存环境, 而且也影响经济发展和社会进步。气候变化对全球的影响业已引起各国政府和专家的高度关注和重视<sup>[9-13]</sup>。

气候变化引起全球水资源的变化, 并对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接影响<sup>[5-6]</sup>, 导致水资源在时间、空间上的重新分配及水资源总量的改变<sup>[14-19]</sup>。在气候变化背景下, 研究干旱内陆河流域水资源量受气候变化的影响程度以及未来的演变趋

收稿日期: 2014-12-01; 修回日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51369003、51369004); 水利部公益性行业科研专项(201301081); 甘肃省技术研究与开发专项计划项目(1205TCYA005)

作者简介: 曾建军(1986-), 男, 甘肃榆中人, 助理工程师, 主要从事水资源与环境方面研究。

通讯作者: 孙栋元(1978-), 男, 甘肃民乐人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源与干旱区水土资源方面的研究工作。

势,提出应对气候变化的干旱内陆河流域水资源安全的适应性管理措施和政策建议,对干旱内陆河流域生态环境综合治理和水资源高效利用及优化配置提供科学指导。为此,本文主要从气候变化对水资源影响研究的发展历程、研究方法、气候变化对干旱内陆河流域水资源影响研究进展进行综述,同时针对目前干旱内陆河流域研究中存在的问题和亟需研究解决的方向,提出了一些建议与展望。

表 1 国外关于气候变化对水资源影响研究的重要会议

时间	相关组织或会议	具体内容
1977	USNA(美国国家研究协会)	气候变化和供水之间的相互关系和影响
1985	WMO(世界气象组织)	气候变化对水文水资源影响的综述
1985	WMO(世界气象组织)	气候变化对水文水资源敏感性分析报告
1987	WMO(世界气象组织)	总结了水资源系统对未来和现代气候变化的敏感性问题
1987	IUGG - 国际大地测量学与地球物理学联合会	举办了“气候变化与气候波动对水文水资源影响”专题学术谈论会
1988	WMO(世界气象组织)和 UNEP(联合国环境计划署)	成立 IPCC(政府间气候变化专门委员会)
1990	第二次世界气候大会	气候变化对水循环和水资源管理的影响及产生的社会 - 经济系统的影响
1991	IUGG - 国际大地测量学与地球物理学联合会	探讨土壤 - 大气之间相互作用的水文过程
1992	里约热内卢环境与发展大会	气候变化淡水资源的影响,是全球性应予严重关注的问题
1993	第 6 届国际气象和大气物理科学、第 4 届国际水文科学(IAMAP - IAHS)联合大会	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
2001	IGBP(国际地圈生物圈计划)、第 6 届 IAMAP - IAHS(国际水文学协会)大会	设立了气候变化对水文水资源的影响谈论专题
2004	巴西召开的 IAHS(国际水文科学协会)	
2006	第三届水资源管理论坛、第四届世界水论坛	关于气候变化对水文水资源影响研究
2007	IUGG 国际大地测量学与地球物理学联合会	关于气候变化对水文水资源影响研究
2009	第五届世界水论坛	集中讨论了气候变化的影响及其对策
2012	第六界世界水论坛	举办“水和适应气候变化”高层圆桌会议
1990 - 2012	IPCC 政府间气候变化专门委员会	完成五次评估报告,深入分析气候变化对水文水资源的影响

## 1.2 国内研究进展

20 世纪 80 年代,在国家相关部门的支持下,先后在全国诸多流域开展了气候变化对水资源的各类重大科研项目(表 2)<sup>[5,9,11,20-27]</sup>。科研项目研究内容涵盖多个方面,主要包括<sup>[22,25,27]</sup>:①流域水量平衡、水资源量的定量评估;②研究区水文要素的检测与归因分析;③变化情景下的水文模型建立;④水资源的演变趋势预估;⑤极端水文事件的影响研究;⑥供水系统的承载能力、脆弱性、恢复性;⑦农渔业灌溉水量的平衡;⑧水资源适应性管理策略。各类重大科研项目的开展有力地促进了气候变化对中国水

## 1 国内外研究发展历程

### 1.1 国外研究发展历程

国外从 20 世纪 70 年代已经开始研究气候变化对水资源的影响,在 20 世纪 80 年代中期以后进入快速发展时期。在发展历程中,国际上展开了一系列科研计划并召开了相关国际会议(表 1),增进了水资源对气候变化响应研究的发展<sup>[5,9,11,14-15,20-27]</sup>。

资源影响研究的进展。

## 2 气候变化对水资源影响的研究方法

气候变化对水资源影响评价方法一般(主要有 3 种:相互影响、相互作用和集成方法<sup>[22,28]</sup>)。在全球气候变化对水资源影响研究中,通常采用影响方法。影响方法首先以设定未来气候变化情景为基础,结合建立的水文模型,遵从“设定未来气候情景 - 建立水文模拟 - 影响分析”的模式(即“*What - if - Then* 模式”),开展气候变化对区域水资源影响研究。其研究步骤为<sup>[9,22,25,29-31]</sup>(表 3)。

步骤1:设定未来气候变化情景。 步骤4:分析未来气候变化对水文水资源的影响,进而提出相应措施。

步骤2:选择、建立适宜于流域水文水资源的专业模型。 在研究步骤的过程中,气候变化情景的设定与水文模型的构建是影响评价的关键。

步骤3:未来气候变化情景与建立的水文模型耦合。

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

	开展时间	项目名称
国家攻关项目	“七五”(1986-1990)	中国气候与海面变化及其趋势和影响研究:“气候变化对西北华北水资源影响研究”专题
	“八五”(1991-1995)	全球变化预测、影响和对策研究:“气候变化对水文水资源的影响及适应对策”专题
	“九五”(1996-2000)	我国短期气候预测系统:“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估模型研究”专题
	“十五”(2001-2005)	中国可持续发展信息共享系统的开发研究:“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”(2006-2010)	全球环境变化应对技术与示范:“典型脆弱区域气候变化适应技术示范”专题
	“十二五”(2006-2010)	沿海地区适应气候变化技术开发与应用:“沿海地区应对海平面上升适应技术集成与应用”等专题
国家“973”项目	2009	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
	2010	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
	2010	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
中国科学院和国家自然科学基金委员会	1988	中国气候与海面变化及其趋势和影响研究
中国科学院	2004	中国西部气候与环境演化科学评估
全国水资源综合规划	2007	气候变化对我国水资源情势影响综合研究
水利部公益性行业	2011	气候变化对我国水安全影响及对策研究

表3 气候变化对水文水资源影响的研究步骤

步骤流程	主要分类	说明
设定未来气候变化情景	①任意情景法;②时间类比法;③空间类比法;④时间序列分析法;⑤大气环流模式(GCMs)(Verhaar P M, 2011);	GCMs <sup>[32]</sup> 是探讨气候变化对水文水资源影响最为常用,也是最为有效的方法之一。
建立水文模型	①统计回归模型;②水量平衡模型;③概念性水文模型;④分布式物理水文模型(SWAT、Mike-SHE、ModFlow、VIC等模型) <sup>[33-34]</sup>	分布式水文模型在现阶段应用比较多,比较成熟。
降尺度处理	①动力降尺度法;②统计降尺度法;③统计-动力相结合的方法	统计降尺度法在国内外得到广泛应用,统计-动力相结合的方法将是未来发展的趋势 <sup>[35]</sup> 现阶段以单向连接为主;
未来气候变化情景与水文模型的耦合影响研究及适应性对策研究	①单向连接;②双向耦合	根据研究区域制定适应性对策

## 3 气候变化对干旱内陆河流域水资源影响研究

### 3.1 气候变化对干旱区内陆河流域水文要素影响的研究

在干旱内陆河,水文气候情势导致水循环对气候变化十分敏感,气候变化对水文要素产生极大的影响<sup>[36]</sup>。Shi Yafeng<sup>[37]</sup>通过对径流量的模拟和预测,阐述了干旱区内陆河流域径流变化的区域分布,并模拟计算了气候变化对高山区径流的影响。叶佰生等<sup>[38]</sup>也利用水量平衡模型分别对乌鲁木齐河流域和伊犁河流域的径流进行模拟计算。陈仁升等<sup>[39]</sup>对黑河流域出山口径流的非线性特征进行分析模拟,并认为流量和降水量呈良好的线性关系,与气温呈良好的指数关系。此外,从时间序列分解模型、Kalman 滤波方法、概念性水文模型、分布式水文模型等方法对径流的预测和模拟,都得到良好应用,效果较好<sup>[39-44]</sup>。除了对径流的预测和模拟外,大批学者利用长序列历史资料 and 不同数学方法与模型对塔里木河、乌鲁木齐河、台兰河、和田河、黑河、石羊河、疏勒河等干旱内陆河流域各水文要素演变的趋势、变化周期、空间分异特征及水文驱动因素进行了研究分析<sup>[33-34,45-49]</sup>。

尽管对干旱内陆河流域径流的研究已经非常多,但是研究主要集中在气候变化对径流的平均变化的影响上,并不能证明气候和径流的关联有多大。因此,水文要素对气候变化的影响认识还不够全面。而且干旱内陆河流域特殊地理位置、复杂环境以及收集的水文历史资料的长短及质量也都极大限制了气候变化对水资源影响研究。

### 3.2 气候变化与人类活动对干旱内陆河流域水资源的影响定量评估

水文因素除了受气候因素的影响,也与人类活动密切相关。尤其在干旱内陆河流域,如何定量区分二者对水文要素的影响?二者的影响谁起主导作用?贡献率究竟有多大?以上众多未知研究是解决气候变化与人类活动对水资源的影响定量评估的关键所在。

定量区分气候变化和人类活动对水资源的影响的方法有很多,通常主要涉及到灰色关联分析法、线性分析法、弹性系数法、流域水文模型等方法,研究者利用这些方法将对流域径流变化贡献率方面做了一些相关研究<sup>[50-54]</sup>。其研究思路是:首先选择合理的影响指标,其次确定适宜的分析方法建立数

学模型,再次进行分析计算。在干旱内陆河流域,常见的方法有 GI 赋权法、熵权法、综合赋值法、回归分析法<sup>[55-56]</sup>。其中,主客观赋权法是目前干旱区内陆河流域最常用的方法<sup>[55-56]</sup>。

气候变化和人类活动对于未来径流的影响及贡献率研究的发展方向,应该以预测二者未来变化趋势为基础,并假定二者作为独立的因子同时作用于径流情况下,通过应用水文模型分别模拟在气候变化和人类活动的单一因子下的未来径流变化,定量的比较二者影响程度的大小。但至今为止,在干旱区内陆河流域,二者主要是针对过去水文要素的影响,对未来水文要素定量分析的研究还比较少。

### 3.3 气候变化对极端水文事件的影响研究

气候变暖背景下极端水文事件的研究主要包括极端降水、极端洪涝和极端干旱 3 个方面。在干旱内陆河流域,赵庆云等<sup>[57]</sup>、鲍艳等<sup>[58]</sup>、李红军等<sup>[59]</sup>利用应用面积权重、Mann - kendall 统计资料、Z 指数变换、最大熵谱和气候趋势系数等方法对所在研究区极端水文事件(降水、洪涝、干旱)趋势时空变化进行了研究分析。

通常预测气候变化下水文极端事件的最有效方法是统计降尺度模型和水文模型的耦合。Müller - Wohlfeil 等<sup>[60]</sup>利用降尺度模型对研究区极端水文事件进行了模拟和研究。陈威霖等<sup>[61]</sup>以多元线性回归为主要方法,利用随机天气发生器的统计降尺度模型,对江淮流域极端气候模拟与预估。樊慧静等<sup>[62]</sup>在大气环流模式下利用主成分法、SWAT 模型和降尺度模型对流域径流进行趋势演变分析。统计降尺度法在国内外得到广泛应用,在干旱区内陆河流域的利用研究较少。

在干旱区内陆河流域,极端水文事件的影响研究主要是通过对其发生的频率和强度大小及时空变化进行的统计分析。目前的研究仍然停留在定性研究的层面上,需进一步加强量化研究。在加强极端水文事件形成机理研究基础上,分析其分布特征和变化规律。深入研究对未来可能发生极端水文事件的预估及其空间分布特征的变化规律。

### 3.4 气候变化影响下干旱内陆河流域水资源适应措施

针对气候变化对干旱区水资源的影响,国家科技部、国家自然科学基金委、教育部等部门从不同方面,不同层次建立了不同的研究计划,试图解决气候变化影响下干旱内陆河水资源应对策略与措施。如气候变化对干旱内陆河流域影响重大项目的开展,

旨在为结合实证研究,对其研究已有成果总结分析,进而深入探讨气候变化下干旱内陆河流域水资源适应性管理的制度、模式及保障途径和对适应性措施的成本效益与制约因素,提出应对气候风险、保障干旱内陆河流域水资源安全的适应性管理措施和政策建议。

同时,国家相关部门对于干旱内陆河流域进行了研究和规划工作,批复流域重点治理工作由地方省级政府负总责,建立流域管理委员会为重点治理工作省内最高管理机构。如塔里木河流域管理局、石羊河管理局等一系列管理机构的建立和设定对规划流域水中长期供求和水量配置,协调取水许可工作,合理部署农业结构、决定流域重点治理重大事项进行了统筹和布局。

然而现行干旱区内陆河流域水资源规划和管理,较少考虑气候变化的动态影响。必须加强水资源管理对气候变化的适应性对策研究,结合当前流域管委会及水利部门的方针政策,从水资源管理工作的角度,提出减缓气候变化所带来的不利影响的适应性对策<sup>[25,63-64]</sup>。建议从以下几个方面着手:开展流域水资源脆弱性诊断及恢复性措施;提高大中型灌区对水资源调控能力,加强雨水集蓄利用,加快节水高效利用;调整经济发展方式和产业结构,在气候变化与水资源影响两者之间寻求合适的发展道路<sup>[25]</sup>。

## 4 结论与展望

在干旱内陆河流域,尽管气候变化对水资源的影响研究已经取得了很大成绩,但是针对气候模型及水文模型开发研制工作等方面问题研究仍然相对较少。就研究内容而言:目前的研究主要集中在气候变化对流域径流平均变化的影响上;其次是利用长序列历史水文资料 and 一系列方法与模型分析诸多流域水文要素演变的趋势、周期、空间分异特征及水文驱动因素。虽然取得了丰硕成果,但在气候变化情景与水文模型的耦合方面仍需加强研究,提高模拟的准确性及精度;而对于流域水文因素除了受气候因素的影响,也与人类活动密切相关,在研究中往往只考虑了气候变化,而忽略了人类活动的影响,且已有的研究也主要是针对过去水文要素的影响,对未来水文要素定量分析的研究还比较少;对于气候变化对极端水文事件的影响研究停留在定性研究的层面上,对于量化研究,建立相应的预测、预警相应机制和适应对策较少;现行干旱区内陆河流域水

资源规划和管理,较少研究考虑干旱区内陆河流域气候变化的动态影响。为保证对未来气候变化情景下干旱内陆河流域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。气候变化情景设定与水文模型的构建是关键。因地制宜,结合流域自身情况,研制具有更高分辨率的气候情景,深入气候变化情景设定与水文模型的耦合技术,提高水文模型在不确定气候状况下的模拟水平。

(2)研究背景。农林垦殖、建设用地、水土保持生态工程与水利工程修建、旅游业的发展及城市化等人类活动必然对未来下垫面造成影响。而人类活动对水资源的影响不容忽视,结合由于人类活动引起的土地利用和未来气候变化对水资源影响必将成为一个前沿研究趋势。因此,应该加强干旱内陆河流域水文、气象、地理、生态和社会科学的多学科交叉性结合的水资源研究。

(3)研究对象。地下水作为水资源不容忽视的一部分在水文小循环中扮演很重要的角色,面对内陆河流域严峻缺水形势,有必要加强流域地表水-地下水联合调度,达到水资源优化配置和高效利用。因此,迫切需要关注地下水复杂的补给形式,并不断完善对地下水研究情况。

(4)研究内容。目前的研究主要集中在气候变化对流域径流平均变化的影响上。未来有必要加强对流域径流等水文要素的检测及归因分析,并且在气候变化对流域径流平均变化影响研究基础上,开展气候变化对供水系统、需水量、水质、农业灌溉、水文极端事件的研究。此外,在今后,深入基础数据和资料的分析研究,充分认识气候变化动态影响下的干旱内陆河水资源,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,为干旱内陆河流域综合规划和健康提供依据。

## 参考文献:

- [1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 翟建青, 占明锦, 苏布达, 等. 对 IPCC 第五次评估报告中有关淡水资源相关结论的解读[J]. 气候变化变化研究进展, 2014, 10(4): 240-245.
- [3] 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.
- [4] Verhaar P M, Biron P M, Ferguson R I, et al. Implications

- of climate change in the twenty-first century for simulated magnitude and frequency of bed-material transport in tributaries of the Saint-Lawrence River [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(10): 1558 - 1573.
- [5] 刘昌明,刘小莽,郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. *科学对社会的影响*, 2008(2): 21 - 27.
- [6] Houghton J T, Meria Filho L G, Callander B A, et al. *Climate change 1995, the science of climate change* [M]. London: Cambridge University Press, 1996.
- [7] Arnell N W. Climate change and global water resource: SRES emissions and socio-economic scenarios [J]. *Global Environmental Change*, 2004, 14(1): 31 - 52.
- [8] Nearing M A. Potential changes in rainfall erosivity in the U.S. with climate change during the 21st century [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(3): 229 - 232.
- [9] 江涛,陈永勤,陈俊合. 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(Z2): 151 - 157.
- [10] McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, et al. *IPCC Climate change 2001, impacts, adaptation, and vulnerability* [M]. London: Cambridge University press, 2001.
- [11] 夏军,翟金良,占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(9): 905 - 915.
- [12] Menzel L, Burger G. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany) [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(1): 53 - 64.
- [13] Pruski F F, Nearing M A. Runoff and soil loss responses to changes in precipitation: a computer simulation study [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(1): 7 - 15.
- [14] 刘春蓁. 气候变异与气候变化对水循环影响研究综述[J]. *水文*, 2003, 23(4): 1 - 7.
- [15] 邓慧平,吴正方,唐来华. 气候变化对水文和水资源影响研究综述[J]. *地理学报*, 1996, 51(S1): 161 - 170.
- [16] Walter M T, Wilks D S, Parlange J, et al. Increasing evapotranspiration from the conterminous United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3): 405 - 408.
- [17] Groisman P Y, Knight R W, Karl T R, et al. Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: trends derived from in situ observations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(1): 64 - 85.
- [18] Tebakari T, Yoshitani J, Suvanpimol C. Time-space trend analysis in pan evaporation over Kingdom of Thailand [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2005, 10(3): 205 - 215.
- [19] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 Years [J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410 - 1411.
- [20] Allen M R, Ingram W J. Constrains on future changes in climate and the hydrologic cycle [J]. *Nature*, 2002, 419: 224 - 232.
- [21] 刘春蓁. 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.
- [22] 张利平,陈小凤,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.
- [23] Gedney N, Cox P M, Betts R A, et al. Detection of a direct carbon dioxide effect in Continental river runoff records [J]. *Nature*, 2006, 439(7078): 835 - 838.
- [24] World Water Assessment Programme. *The 3rd united nations world water development report: Water in a changing world (WWDR-3)* [R]. Paris: UNESCO, 2009.
- [25] 李峰平,章光新,董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. *地理科学*, 2013, 33(4): 457 - 464.
- [26] IPCC. *Climate change 2007: The physical science basis* [M]. Cambridge University Press, 2007.
- [27] Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States [J]. *Science*, 2008, 319: 1080 - 1083.
- [28] World Meteorological Organization. *Water resources and climatic change: sensitivity of water resources systems to climate change and variability* [R]. Norwich U. K, 1987.
- [29] 王顺久. 全球气候变化对水文与水资源的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(5): 223 - 227.
- [30] 董李勤,章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 429 - 436.
- [31] 刘萍,许卓首,王玲,等. 气候变化对黄河流域水资源影响研究进展[J]. *气象与环境科学*, 2009, 32(Z1): 275 - 278.
- [32] Verhaar P M, Biron P M, Ferguson R I, et al. Implications of climate change in the twenty-first century for simulated magnitude and frequency of bed-material transport in tributaries of the Saint-Lawrence River [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(10): 1558 - 1573.
- [33] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 278 - 289.
- [34] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 水文模型研究综述[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 221 - 229.
- [35] 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的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 320 - 329.
- [36] 康尔泗. 寒区和干旱区水文研究的回顾和展望[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(3): 238 - 244.
- [37] Shi Yafeng, Zhang Xiangsong. Impact of climate change on surface water resource and tendency in the future in the

- arid zone of northwestern China[J]. Science in China(Series B), 1995,38(11):1395-1408.
- [38] 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]. 冰川冻土,1996,18(1):29-36.
- [39] 陈仁升,康尔泗,张济世. 应用 GRNN 神经网络模型计算西北干旱区内陆河流域出山径流[J]. 水科学进展,2002,13(1):87-92.
- [40] 徐中民,蓝永超,程国栋. 人工神经网络方法在径流预报中的应用[J]. 冰川冻土,2000,22(4):372-375.
- [41] 陈仁升,康尔泗,张济世. 基于小波变换和 GRNN 神经网络的黑河出山径流模型[J]. 中国沙漠,2001,21(Z1):12-16.
- [42] 蓝永超,曾群柱. 河西地区融雪径流的灰色预测方法[J]. 冰川冻土,1997,19(2):154-160.
- [43] 张闻胜,王银堂. 时间序列分解模型在水文要素中长期预报中的应用[J]. 水文,2001,21(1):21-24.
- [44] 蓝永超,康尔泗. Kalman 滤波方法在黑河出山径流年平均流量预报中的应用[J]. 中国沙漠,1999,19(2):156-159.
- [45] 邓振镛,张强,王润元,等. 河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1267-1275.
- [46] 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.
- [47] 宁宝英,何元庆,和献中,等. 黑河流域水资源研究进展[J]. 中国沙漠,2008,28(6):1180-1185.
- [48] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [49] 李卓仑,王乃昂,李育,等. 近 50 年来黑河出山径流对气候变化的响应[J]. 水土保持通报,2012,32(2):7-11+16.
- [50] 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.
- [51] 粟晓玲,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):153-159.
- [52] 江善虎,任立良,雍斌,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+15.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 张彧瑞,马金珠,齐识. 人类活动和气候变化对石羊河流域水资源的影响——基于主客观综合赋权分析法[J]. 资源科学,2012,34(10):1922-1928.
- [56] 张辉. 气候变化和人类活动对黑河流域水资源的影响[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [57] 赵庆云,张武,王式功,等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠,2005,25(6):904-909.
- [58] 鲍艳,吕世华,陆登荣,等. RegCM3 模式在西北地区的应用研究 I:对极端干旱事件的模拟[J]. 冰川冻土,2006,28(2):164-174.
- [59] 李红军,江志红,魏文寿. 近 40 年来塔里木河流域旱涝的气候变化[J]. 地理科学,2007,27(6):801-807.
- [60] Müller-wohlfeil D, Bürger G, LAHMER W. Response of a river catchment to climatic change: Application of expanded downscaling to Northern Germany[J]. Climatic Change, 2000,47(1-2):61-89.
- [61] 陈威霖,江志红,黄强. 基于统计降尺度模型的江淮流域极端气候的模拟与预估[J]. 大气科学学报,2012,35(5):578-590.
- [62] 樊慧静,赵红莉,蒋云钟. 气候变化条件下流域径流演变趋势分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2012,10(3):174-179.
- [63] 夏军,陈俊旭,翁建武,等. 气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望[J]. 气候变化研究进展,2012,8(6):391-396.
- [64] 郭生练,刘春蓁. 大尺度水文模型及其与气候模型的耦合研究[J]. 水利学报,1997,28(7):37-41.