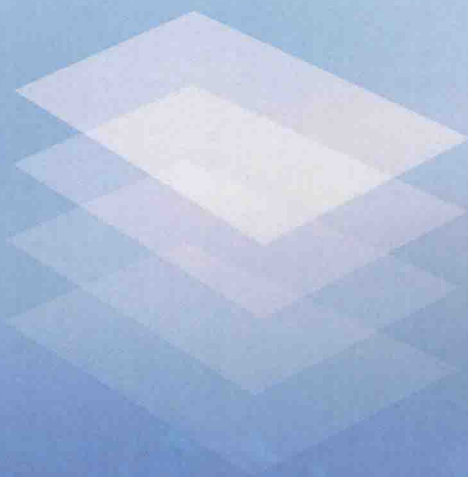


气候变化对流域水文影响评估及 水资源适应性调度研究

闻昕 方国华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本书获江苏高校优势学科建设工程项目资助

气候变化对流域水文影响评估及 水资源适应性调度研究

闻昕 方国华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书分析气候变化的概念与现象,探讨其对水文水资源系统影响,提出气候变化影响评估与水资源适应性调度研究方法 with 框架;研究 BCSD 降尺度技术,构建新安江月水量平衡模型,对水文气象要素变化特征进行分析;建立气候变化条件下水资源系统模拟和适应性调度模型,利用 ELQG 算法对模型进行求解;以钱塘江流域为实例,评估气候变化条件对流域水文水资源系统的影响,并对水资源适应性调度展开研究。

本书可供水利、气候、地理、生态、环境、农林、资源等相关领域的科学研究人员、工程技术人员、管理决策人员及大专院校、科研院所师生使用和参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

气候变化对流域水文影响评估及水资源适应性调度研究 / 闻昕, 方国华著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015.6

ISBN 978-7-5170-3903-7

I. ①气… II. ①闻… ②方… III. ①气候变化—影响—流域—区域水文学—研究②气候变化—影响—流域开发—水资源开发—研究 IV. ①P343.1②TV213.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第310903号

书 名	气候变化对流域水文影响评估及水资源适应性调度研究
作 者	闻昕 方国华 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8印张 152千字
版 次	2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

三 前言

气候作为人类赖以生存的自然环境的重要组成部分，它的任何变化都会对自然生态系统以及社会经济产生深刻影响。近百年来，气候除了自然的周期性波动以外，越来越多地受到人为因素的影响，其中最显著的是全球大气化学组成的改变，造成全球气候持续呈现以变暖为主要特征的变化。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告，1880—2012年间，全球海陆表面平均温度升高了 0.85°C ，21世纪末全球平均气温预计将比1850—1900年上升 $1.5\sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 。

水文循环是气候系统的重要组成部分，既受气候系统的制约，又对气候系统进行反馈，气候系统通过降水、气温、日照、风、相对湿度等因子直接或间接地影响着水循环过程。在全球变暖的背景下，全球水文循环过程加速，水分蒸发量增加，降水趋势呈显著的年际和年代际振荡，变化和变率进一步加剧，水循环系统中的降雨、蒸发等水文要素发生改变。流域原有的产汇流过程与特性被改变，流域水分储量和流量发生变化，区域水量平衡被打破，引起径流在数量上的改变和在时空上的重新分配，对新时期水资源保护与管理带来新的挑战。

本书深入研究气候变化背景下水文水资源系统的变化规律，揭示气候变化与水文水资源以及生态环境变化之间的关系，分析水循环演变特征，评估未来气候变化对流域水文与水资源的影响，为未来水资源系统的规划设计、开发利用和运行管理提供科学依据，这对于分析流域或区域水文水资源循环和演变规律，科学合理开发利用流域水资源以及保障流域水资源安全等均具有重要的理论和实际意义。

本书主要研究内容包括：深入分析气候变化的概念与现象，探

讨其对水文水资源系统影响,研究提出气候变化影响评估与适应性调度研究方法 with 框架。同时,定义气候变化情景,研究误差订正与空间分解 (Bias Correction Spatial Disaggregation, BCSD) 降尺度技术,构建新安江月水量平衡模型,利用遗传算法对模型参数进行估计,并对水文气象要素变化特征进行识别分析。建立气候变化条件下水资源系统模拟和适应性调度模型,利用扩展性线性二次高斯算法 (Extended Linear Quadratic Gussian, ELQG) 对模型进行求解。以钱塘江流域为实例,全面评估气候变化条件对于流域水文水资源的影响,并对水资源适应性调度展开研究。

本书主要创新内容有:提出气候变化条件下水资源适应性调度与管理的研究框架与方法;探索运用 ELQG 法求解复杂水资源系统调度问题;基于 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 数据,全面评估气候变化对于水文水资源系统的影响;以钱塘江流域为实例,评估气候变化对流域水文系统的综合影响,并对水资源适应性调度展开研究。

在书稿完成之际,作者向关心、支持我们编写出版工作的所有领导、专家学者和编辑同志表示衷心的感谢!

气候变化对水文水资源的影响评估是 21 世纪水文科学研究的前沿问题之一,也是水文科学发展战略性高层次问题,该领域许多科学技术问题仍是未来较长时期内研究的热点和难点。限于时间和水平,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者与同行专家批评指正。

作者

2015 年 3 月

二 目录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外相关研究动态	2
1.2.1 气候变化对流域水文及水资源影响评估研究动态	3
1.2.2 气候变化条件下水资源适应性调度研究动态	5
1.2.3 降尺度技术研究动态	7
1.2.4 气候变化条件下流域水文模拟技术研究动态	9
1.3 主要研究内容及技术路线	10
1.3.1 主要研究内容	10
1.3.2 研究技术路线	12
第2章 气候变化对流域水文影响评估与水资源适应性调度基本理论	13
2.1 气候系统与气候变化	13
2.1.1 气候系统	13
2.1.2 气候变化	14
2.2 气候变化对流域水文循环系统影响分析	17
2.2.1 气候变化对水文循环影响机理分析	17
2.2.2 气候变化对降水影响分析	18
2.2.3 气候变化对蒸散发影响分析	19
2.2.4 气候变化对径流影响分析	19
2.3 气候变化对流域水资源系统影响分析	20
2.3.1 水资源系统概念与组成	20
2.3.2 气候变化对水资源量的影响	21
2.3.3 气候变化对防洪减灾的影响	21
2.3.4 气候变化对水资源开发利用的影响	21
2.3.5 气候变化对水资源需求的影响	22
2.3.6 气候变化对水质的影响	22
2.3.7 气候变化对水生态的影响	23

2.4	气候变化条件下水资源的适应性调度	23
2.4.1	气候变化条件下水资源调度面临的挑战	23
2.4.2	气候变化条件下水资源适应性调度概念与主要内容	24
2.5	气候变化对流域水文影响评估与水资源适应性调度研究方法	25
第3章	气候变化条件下流域水文响应模拟与分析	26
3.1	气候变化情景与模式	26
3.1.1	气候变化情景	26
3.1.2	排放情景	26
3.1.3	全球气候模式	27
3.2	基于误差订正与空间分解方法(BCSD)的统计降尺度技术	28
3.2.1	统计降尺度方法概述	28
3.2.2	BCSD降尺度原理与方法	28
3.2.3	BCSD降尺度法适应性与局限性分析	29
3.3	基于新安江月水量平衡模型的流域水文模拟技术	31
3.3.1	新安江月水量平衡模型	31
3.3.2	基于遗传算法的新安江模型参数估计研究	37
3.4	水文气象要素时空演变特征分析方法	40
3.4.1	线性回归法	40
3.4.2	滑动平均法	40
3.4.3	Mann-Kendall显著性检验法	41
第4章	气候变化条件下流域水资源适应性调度研究	43
4.1	气候变化条件下水资源适应性调度研究方法	43
4.2	水资源系统概化与模拟	44
4.2.1	水资源系统概化	44
4.2.2	水资源系统模拟	45
4.3	气候变化条件下水资源适应性调度模型	45
4.3.1	目标函数	45
4.3.2	约束条件	47
4.4	扩展线性二次高斯(ELQG)模型求解算法研究	48
4.4.1	线性二次型最优控制方法(LQG)控制算法的基本原理	48
4.4.2	基于LQG控制算法的模型求解研究	49
4.4.3	基于ELQG控制算法的模型求解研究	51
4.4.4	ELQG算法适应性与局限性分析	55

第 5 章 气候变化对钱塘江流域水文及水资源影响评估	57
5.1 钱塘江流域概况	57
5.1.1 自然地理	57
5.1.2 河流水系	57
5.1.3 水文气象	58
5.1.4 社会经济	58
5.1.5 主要水利工程	59
5.2 基于 BCSD 方法的钱塘江流域气象数据降尺度分析	60
5.2.1 研究数据	60
5.2.2 BCSD 降尺度分析过程	61
5.2.3 BCSD 降尺度效果分析	63
5.3 气候变化条件下钱塘江流域径流响应分析	65
5.3.1 钱塘江流域分区	65
5.3.2 新安江月水量平衡模型参数估计与验证	67
5.3.3 未来气候变化条件下钱塘江流域径流变化预测	69
5.4 钱塘江流域主要水文气象要素时空变化分析	71
5.4.1 流域气温时空分布与变化特征分析	71
5.4.2 流域降水时空分布与变化特征分析	75
5.4.3 流域蒸发发时空分布与变化特征分析	78
5.4.4 流域径流时空分布与变化特征分析	82
5.5 气候变化对钱塘江流域水文与水资源综合影响评估	88
第 6 章 气候变化条件下钱塘江流域水资源适应性调度研究	91
6.1 钱塘江流域水资源系统模拟模型	91
6.2 气候变化条件下钱塘江流域水资源适应性调度模型构建	92
6.2.1 水资源适应性调度任务分析	92
6.2.2 目标函数	93
6.2.3 约束条件	94
6.3 气候变化条件下钱塘江流域水资源适应性调度模型求解	95
6.3.1 计算条件	95
6.3.2 ELQG 主要参数选取	95
6.4 气候变化条件下钱塘江流域水资源适应性调度模型结果分析	96
6.4.1 发电效益分析	96
6.4.2 防洪效益分析	97
6.4.3 水资源利用效率分析	101
6.5 气候变化条件下钱塘江流域水资源调度管理适应对策研究	103

第 7 章 总结与展望.....	105
7.1 总结	105
7.2 展望	107
参考文献	109

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

气候作为人类赖以生存的自然环境的重要组成部分，它的任何变化都会对自然生态系统以及社会经济产生深刻影响。近百年来，气候除了自然的周期性波动以外，越来越多地受到人为因素的影响，其中最显著的是全球大气化学组成的改变，主要表现为臭氧耗减和温室气体的增加，造成全球气候持续呈现以变暖为主要特征的变化。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告，1880—2012 年间，全球海陆表面平均温度升高了 0.85°C ，并且在过去 30 年（1983—2012 年），每 10 年地表温度的上升幅度高于 1850 年以来的任何时期，同时预期 21 世纪末全球平均气温将比 1850—1900 年上升 $1.5\sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 。

水文循环是气候系统的重要组成部分，既受气候系统的制约，又对气候系统进行反馈，气候系统通过降水、气温、日照、风、相对湿度等因子直接或间接地影响着水循环过程。在全球变暖的背景下，全球水文循环过程加速，水分蒸发量增加，降水趋势呈显著的年际和年代际振荡，变化和变率进一步加剧，水循环系统中的降雨、蒸发等水文要素发生改变。流域原有的产汇流过程与特性被改变，流域水分储量和流量发生变化，区域水量平衡被打破，引起径流在数量上的改变和在时空上的重新分配。

以我国为例，在过去 100 年中全国平均气温升高 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。由地域和时间上来看，年平均气温升高以北方为主，夏季高温热浪增多。全国范围内降水量变化也表现出明显的区域特征，华北及东北南部降水量有减少趋势，而西北和长江流域等南方地区的降水则有所增加，且极端降水和干旱事件也同时表现出增多、增强的趋势。受此影响，我国水资源情势和格局也发生了改变，近 50 年我国六大江河（长江、黄河、珠江、松花江、海河、淮河）实测径流量均呈下降趋势。其中，1980—2000 年水文系列与 1956—1979 年水文系列相比，北方黄河、淮河、海河和辽河 4 个流域降水平均减少了 6%，地表水资源量和水资源总量的减少幅度分别为 17% 和 25%，南丰北枯的矛盾进一步加剧。

我国人口众多，且水资源先天条件并不优越，气候变化势必将对水资源系统带来一定影响。首先，气象要素的改变将打破流域水文循环平衡，特别是降



水总量、强度、形态、历时的变化,融雪时间的变化,蒸发和散发的变化,将直接引起区域水资源量的改变。第二,以极端降水为代表的极端天气事件发生的强度、频率、历时等在全球范围均呈加剧趋势,水旱灾害的年、季交替越来越突出,特别是超常规的洪水和干旱事件,对流域的防洪抗旱安全构成了严峻威胁。第三,农业、工业以及生活需水均发生变化,水资源供需矛盾更加突出,危机进一步加剧。第四,气候系统中气温、降水等因素与水体中营养物质和污染物的循环紧密相关,在气候变暖背景下,这些因素的变化也将引起水环境系统的变化,对水质和水生态系统构成影响。

为适应气候变化的影响,未来流域水资源的开发利用面临诸多挑战与变革。首先,水资源开发利用体系亟需得到全面提升和优化。其中,工程体系亟需得到进一步巩固和提升,对于病危老旧的水利工程应及时进行维护、改造和加固,新建水利工程应充分论证,进一步提升和优化其综合效益,一方面满足新形势下水资源开发利用的需求,另一方面适应流域水文规律的变化,同时新时期节能减排的压力也对以水资源为代表清洁能源的利用率和利用方式提出了更高的要求。水资源开发利用非工程措施也亟需得到进一步优化,如水文监测预报、水资源实施优化调度等先进科学技术的应用与推广,水资源管理制度的改革与创新等。同时,当前水利工程调度运行方式多基于历史气象水文资料的分析,其背景是水文序列平稳性的基本假定,而在流域水文循环过程和水资源时空分布规律发生改变后,水文条件变化不确定性也相应增加,传统调度方式如何适应气候的变化,应对其非稳态特性和不确定性风险,在保证流域安全的前提下,充分发挥新形势下水资源的综合效益,这对水资源的科学开发利用提出了更新和更高的要求。

气候变化对水文水资源的影响评估是21世纪水文科学研究的前沿问题之一,也是水文科学发展战略性的多层次问题。该领域不仅着眼于全球性气候系统的变化,而且着眼于区域性和全球性的水文循环和水文过程,不仅涉及全球生态、环境,而且涉及一系列社会经济乃至政治问题。本书深入研究气候变化背景下水文水资源系统的变化规律,揭示气候变化与水文水资源以及生态环境变化之间的关系,分析水循环演变特征,评估未来气候变化对流域水文与水资源的影响,为未来水资源系统的规划设计、开发利用和运行管理提供科学依据,这对于分析流域或区域水文水资源循环和演变规律,科学合理开发利用流域水资源以及保障流域水资源安全等均具有重要的理论和实际意义。

1.2 国内外相关研究动态

气候变化对水文水资源影响评估与水资源适应性管理研究是全球性重要课



题之一，也是新时期水文水资源科学发展战略性的高层次问题。近年来，国内外学者在该领域已开展了广泛研究，取得了一定的成果。

1.2.1 气候变化对流域水文及水资源影响评估研究动态

气候变化对于水文与水资源影响相关的研究开始于 20 世纪 70 年代，世界气象组织（WMO）、联合国教科文组织（UNESCO）、联合国环境规划署（UNEP）、联合国发展署（UNDP）以及国际水文科学协会（IAHS）等组织陆续开展了世界气候影响研究计划（WCIP）、全球能量水循环试验（GEWEX）、国际地球生物圈计划（IGBP）、国际水文计划（IHP）等项目的研究。

1988 年，联合国环境规划署及世界气象组织共同组建了政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC），对全球气候变化情况进行评估，并定期发布具有权威性的气候评估报告。目前，IPCC 已正式发布（1990，1995，2001，2007，2013）五份评估报告，为国际社会认识和了解气候变化问题提供了重要科学依据。

20 世纪 90 年代以来，气候变化的影响越来越引起社会的关注，同时越来越多的科研工作者加入 IGBP、GEWEX 等项目，水文水资源领域相关的研究成果也日渐丰富。1991 年，第 20 届国际 IUGG 大会深入探讨了土壤和大气之间的相互作用的水文过程。1993 年，第四届水文科学大会（IAMAP-IAHS）、第 6 届国际气象和大气物理科学大会中心议题是气候变化、水圈和大气圈的相互作用和相互影响、大尺度气候和水文模拟技术。

进入 21 世纪以来，气候变化影响评估的研究范围进一步扩展，与水文、生物、环境、物理、人文等多学科的交叉研究显著增加，并且更注重气候、陆地、人类活动等各方面的相互影响及反馈作用，变化环境中水资源的脆弱性研究、变化环境下的人地关系的影响研究、水文循环及其生态环境演化过程逐渐成为当时的热点。例如，IAHS 会议（2004）、系统科学联盟（ESSP）和全球水系统计划（GSWP）联合会议（2006）、IUGG 国际会议（2007）、世界气候研究计划（WCRP）（2007）等均对新时期气候变化影响评估展开了广泛深入的讨论。2013—2014 年，IPCC 第五份气候评估报告（AR5）陆续发布，对 2007 年以来的气候变化研究新进展进行了全新的评估，为新一轮国际气候变化政策和行动提供新的科学支持。

我国在气候变化对水文水资源影响评价领域的研究开始于 20 世纪 80 年代。1988 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水资源的影响研究。刘春纂、杨针娘、曹梅盛（1988—1991）先后回顾了当时国际上气候变化评估研究领域研究进展，并指出了我国未来阶段的主要研究方向。赖祖铭等（1990）通过构建水量平衡模型，研究



了气候变化对冰川区水文的影响,结果表明未来全球气候变暖,将导致我国西北高寒山区以冰川融水补给为主的河川径流量逐渐减少。1991年,国家科学技术委员会启动的“八五”国家科技攻关项目“全球气候变化的预测、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。郭生练等(1995)应用 Monte Carlo 和非参数方法研究气候变化对区域水文评价模型参数和径流的不确定性,发现径流对降水的变化要比对气温升高敏感,径流系数较小的流域,其变化幅度反而大。张永勤等(1999)耦合地表热量平衡和水量平衡模型,分析长三角地区不同气候情景对水资源变化的影响,发现水资源量随温度的升高而减少,随降水的增加而增加,并且温度上升 1°C 与降水减少 3.3% 对水资源的影响相当。

进入 21 世纪以来,我国在气候变化领域的研究得到进一步深化和拓展,取得了一定的研究成果。2001—2005 年,“十五”科技攻关重点项目“中国可持续发展信息共享系统的开发研究”中“气候异常对我国淡水资源的影响阈值及综合评价”专题构建了 VIC 分布式水文模型,在对未来需水预测和未来水资源量形势分析的基础上,研究了未来气候变化情景下我国水资源的脆弱性和气候变化对我国淡水资源的影响阈值。2009 年,“973 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”课题启动,该课题主要针对我国东部季风区的大江大河流域水循环及水资源格局变化以及南方洪涝灾害与北方水资源短缺等重大水问题,开展气候变化背景下陆地水循环响应机理、气候变化对我国区域水资源安全与适应对策研究。2010 年,全球变化国家重大科学研究计划中也包含“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研究”和“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”两个课题。2011 年,国务院新闻办公室发表《中国应对气候变化的政策与行动(2011)》白皮书,其中也包含了对气候变化形势下我国水资源的适应对策研究。

王国庆(2006)构建 YRWBM 水文模型,实现了参数的网格化和黄河中游地区径流量的分布式计算,并提出了气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分割方法。刘春蓁(2004)、丁一汇(2008)、宋晓猛等(2013)、李峰平等(2013)均从大气温度、降水、海平面上升和蒸散发的变化说明了全球气候变化对于全球水资源系统和水资源管理的影响。郭靖(2010)应用 SDSM 等统计降尺度方法预测汉江流域未来降水、气温变化,分别采用两参数月水量平衡模型和 VIC 分布式水文模型与 GCM 进行耦合,预测汉江流域径流量情况,并对汉江上游径流极值事件的变化情况进行研究。仕玉治(2011)针对历史气候变化和人类活动影响的贡献量化问题,提出一种基于 SWAT 的新的分项量化方法,并以东北地区辉发河流域为实例,分离出降雨丰枯变化量、气候变化



量以及人类活动的影响量。刘艳丽（2012）等提出一种基于拉丁超立方体抽样技术的季节分段抽样模拟方法，实现对气候自然变异的模拟，并应用 TOP-MODEL 水文模型对基准期和未来期的径流时空分布进行模拟和预估。董李勤（2013）分别计算气候变化和人类活动对嫩江流域径流变化影响的贡献率，利用流域湿地遥感资料以及土地利用资料对流域湿地景观动态变化及其影响湿地景观动态变化的因素进行分析，并对气候变化情景下湿地生态需水量进行预测计算。冯靖（2014）结合 SWAT 水文模型和现代水资源评价技术，根据水循环的演变规律识别气候变化对水资源量、可利用水资源量和供水量的影响，逐级反映气候变化对供水的影响过程。夏军等（2014）评价了气候变化情景下黄河水资源的脆弱性，并从配置、利用、调度、管理方面系统地提出了适应性对策，包括水资源优化配置方案、水沙调控体系、非常规水资源开发、梯级水库优化运用、外流域调水等。

1.2.2 气候变化条件下水资源适应性调度研究动态

适应性的概念起源于进化生态学，指组织或系统为了生存、繁殖而增强应对环境变化的基因和行为特征。近年来，适应性也被引入气候变化相关研究领域，指通过适应性调整，评估缓和与削减气候变化负面影响、认识正面作用、避免气候变化对人类和生态系统生风险的程度。

自 21 世纪以来，国内外学者已在不同领域和不同空间尺度上开展响应气候变化的适应性研究。Yao 和 Aris（2001）研发气候变化情景下的水资源预报-决策支持系统，指导 Folsom 湖的调度管理。Brekke 等（2009）分析了气候变化给水库调度带来的风险，并以此为基础研究水库适应性调度的策略与方法。Raje 等（2010）模拟了未来气候变化对于 Hirakud 水库防洪、供水、灌溉等方面的影响，并采用动态规划的方法研究提出适应性调度策略。Vicuna 等（2010）提出了在气候变化不确定性下水资源系统的调度方法。Sowers 等（2011）从政治、经济和机构决策者的角度分析了中东和北非地区在气候变化条件下水资源管理的适应性策略。Watts 等（2011）总结了极端气候事件下水库调度的教训，提出改变传统调度方式，增强调度方式的灵活性。Maran 等（2014）着重从适应性管理策略的角度分析了气候变化对于 alpine 流域水能开发活动的影响。Acosta 和 Martinez（2014）构建 REA 模型，对 Lerma - Chapala 流域在 21 世纪 A1B 情景下的水资源脆弱性进行评估。Ahmadi 等（2015）用 HadCM3 模式输出驱动 IHACRES 水文模型，对 Karoon - 4 水库流域在 A2 情景下 21 世纪来水情况进行预测，并构建适应性调度模型，利用 NSGA - II 进行求解，提出适应性调度对策。

目前，我国对于水资源适应性管理的研究成果尚不丰富，特别是对于气候



变化条件下水资源调度管理的定量研究仍处于起步阶段。“973 项目”“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”(2009)针对我国东部季风气候区特点开展气候变化下水资源脆弱性与适应性理论与方法研究,为气候变化条件下水资源适应性管理提供对策。周研来等(2014)以丹江口水库为研究对象,构建 VIC 分布式水文模型,预测气候变化条件下汉江流域的径流变化,发展多目标调度图优化模型指导气候变化情景下水库调度运行。夏军等(2014)研究和评价了气候变化情景下黄河水资源的脆弱性,并初步探讨了有序适应的黄河流域水资源优化配置方案。

水资源适应性调度模型构建与求解技术是气候变化条件下水资源适应性调度研究的核心。目前,适应性调度模型的构建多在传统水资源优化调度模型的基础上,加入适应气候变化的相关目标和约束。同时,模型的求解技术仍多沿用传统水资源优化调度模型的求解方法。

传统水资源调度研究始于 20 世纪 40 年代 Masse 提出的水库优化调度问题,50 年代中期,系统工程技术在水库优化调度中得到广泛应用。我国水资源调度研究起步于 20 世纪 60 年代初的以水库优化调度为先导的水资源分配研究。20 世纪 80 年代,水资源优化调度手段与技术进一步丰富,涵盖了发电调度、防洪调度等多个方面。近年来,随着数学规划理论的日渐完善和计算机技术的广泛应用,水资源优化调度的技术与方法进一步丰富,主要包括常规方法、系统分析方法、多目标优化技术、大系统协调分解、模拟模型法以及现代启发式智能方法等。

(1) 常规方法。常规方法是指以调度准则为依据,利用水资源配置理论和径流调节相关计算方法,综合水资源调度图等经验性图表实施的水资源调度方式,是一种半经验、半理论的调度方法,该方法简单明确便于操作,但调度结果并非最优,难以充分发挥水资源的综合效益。

(2) 数学规划方法。20 世纪 50 年代以来,系统工程理论与技术迅速发展,数学规划方法也被引入水资源优化调度研究之中。常用的数学规划方法包括线性规划、非线性规划以及动态规划等。其中,动态规划法可将复杂系统分析问题分解为多阶段的决策过程,逐次求出各阶段的最优解,进而求得整个系统的最优策略,是处理多阶段决策问题的有效方法,广泛应用于水资源调度研究之中。陈守煜(1990)提出多阶段多目标决策系统模糊优选理论,应用于复杂水资源系统中方案优选之中。在此基础上,崔振才等(2000)提出模糊优化多维动态规划模型。翟晓烨(2010)采用动态规划法为北京市供水系统建立了水资源调度系统模型。

(3) 多目标优化技术。多目标决策方法是从 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种决策分析方法,可从众多非劣解中选出最佳均衡解,求解存在竞争性和



矛盾性多目标的水资源优化调度问题。董子敖等（1986）提出了计入径流时空相关关系的多目标多层次优化法。王宏伟等（2012）建立水资源多目标优化配置模型，并利用遗传算法对西宁市水资源配置进行了优化研究。彭晶（2013）耦合多目标动态水资源优化配置模型与地理信息系统（GIS），形成了基于 GIS 的水资源优化配置系统。

（4）大系统协调分解。流域水资源优化调度问题是具有高维性、不确定性、规模庞大、结构复杂、功能综合、因素众多等特征的大系统优化问题。大系统分解协调是将流域水资源系统分解成若干相对独立的子系统并构建协调机制处理各子系统间的关联作用的一种递阶控制方法，在现代水资源优化调度与管理中得到了广泛的应用。谢新民（1992）提出基于大系统理论和传统动态规划技术的水电站水库群优化调度模型，采用两级动态结构研究流域水资源大系统的谱系管理问题。金鑫（2012）提出了面向河流生态健康的供水水库群联合调度模式，并用大系统分解协调法进行求解分析。王莹（2013）用大系统分解协调法求解三峡、清江梯级水电站联合优化调度问题，并通过与逐步优化等算法的分析对比，证明了大系统分解协调法在解决复杂水资源系统优化问题时的优越性。

（5）智能方法。随着系统工程理论和现代计算机技术的发展，近年来现代智能启发算法在水资源系统优化问题中得到了深入的探索和广泛的应用。与常规优化算法相比，现代智能优化算法通过利用生物学上的智能体的行为和机理进行建模，模拟人类的智能活动，通过自适应学习的特性，达到了全局优化的目的，具有自学习、自组织、自适应的特征和简单、通用、鲁棒性强、适于并行处理等优势。目前，常用于水资源优化问题求解的智能算法包括遗传算法（GA）、模拟退火算法（CSA）、人工神经网络（ANN）等。Savic 等（1997）利用遗传算法研究以最小花费为目标的水资源调配问题，系统提出遗传算法在水资源优化问题中的应用步骤与方法。金菊良（2000）对标准遗传算法进行改进，提出了基于实数编码的加速遗传算法和基于整数编码的单亲遗传算法，并成功应用于径流预报、洪灾评估、气候区划等水资源问题。陈守煜（2005）耦合 Kohonen 聚类网络与自适应谐振理论，提出新的模糊聚类神经网络，并将其应用于区域水资源评价中。赵恩龙（2013）利用遗传算法求解多目标决策问题，对灌区水资源优化调度开展了研究。

1.2.3 降尺度技术研究动态

GCM 输出的空间分辨率一般较低，无法对区域尺度的复杂地形、地表植被分布及次网格尺度的物理过程进行正确的描述，也难以反映局地性的气候变化特征。气候变化影响评估中，降尺度技术主要目的是将 GCM 的粗空间分辨率输出降解至地表区域尺度，驱动流域水文模型对未来流域水文时空演变过程



进行预估。目前,主要的降尺度方法主要包括:①动力降尺度,即区域气候模式 (Regional Climate Model, RCM);②统计降尺度;③动力与统计相结合的降尺度方法。

统计降尺度方法是指利用多年观测资料建立大尺度气候要素和区域气候要素之间的统计关系,然后将此关系应用到 GCM 输出的大尺度气候信息,用以预估区域未来的气候变化情景。该方法可将 GCM 中物理意义较好,模拟较准确的气候信息应用于统计模式,纠正 GCM 的系统误差,且不用考虑边界条件对预测结果的影响,具有计算效率高,输出分辨率高,适用性强等优势,特别对于温度、降水等气象要素的模拟具有更好的效果,可有效弥补动力降尺度方法的部分不足,在气候变化评估领域的研究中得到了广泛的应用。该方法由 Kim 等于 1984 年率先提出,后经 Wilby 等多次改进,现已发展为转换函数法 (Transfer Function Method)、天气分型法 (Weather Pattern Method) 和天气发生器 (Stochastic Weather Generator) 三大类。

1. 转换函数法

转换函数法首先从大尺度观测数据或 GCM 输出变量中选择预报因子,并对其进行必要的转换(如标准化或偏差订正),然后根据一定的统计规则建立大尺度预报因子和区域变量之间的转换模型。根据其转换函数的类型,转换函数法可分为线性模型和非线性转换函数法。其中,传统线性模型主要方法包括多元线性回归法 (Multiple Linear Regression, MLR)、奇异值分解法 (Singular Value Decomposition, SVD)、支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)、典型相关分析法 (Canonic Correlation Analysis, CCA) 等,该方法对于线性关系的降尺度问题具有较好的效果。例如,崔妍等 (2010) 采用典型相关分析法评估降尺度模型对当前极端降水指数的模拟能力,并对未来极端降水变化进行预估。非线性模型可较准确地描述变量的统计分布特征,对具有不同数据分布特征的变量的降尺度以及改善极端值模拟精度可起到较好的效果,主要有神经网络 (Artificial Neural Network, ANN)、广义加法模型以及分位数回归等方法。例如, Fernandez - Ferrero 等 (2009) 将神经网络与线性回归等线性方法用于统计降尺度的对比研究,表明多数情形下人工神经网络的降尺度效果更好。

2. 天气分型法

天气分型法是一种非参数方法,可以克服传递函数法中参数拟合难的问题。该方法首先对历史大气环流信息进行分类,然后根据未来环流信息与过去环流类型的相似性来确定未来区域的天气特征,包括主观分型法和客观分型法。其中,主观分型技术的结果不能被重建,且只能应用于特定的区域,因此该方法的应用存在较大的局限性。客观分型技术是以统计方法为基础的分型技