

变化环境下干旱区 水文情势及水资源优化调配

杨涛 刘鹏 著



科学出版社

变化环境下干旱区水文情势 及水资源优化调配

杨 涛 刘 鹏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书分析了变化环境下我国内陆干旱区的水文情势,建立了适应气候变化的水资源优化调配技术,是国家“十二五”科技支撑课题、国家自然科学基金项目等多项研究成果的系统总结。全书共7章,第1章阐述了研究变化环境下干旱区水文情势及水资源优化调配技术的背景及意义;第2章阐述了气候变化对冰雪雨混合径流及洪水的影响;第3章分析和计算了气候变化对水库水面蒸发的影响;第4章评估了内陆干旱区的历史、现状旱情,对未来干旱情势演变进行了预估;第5章建立了适应气候变化的山区-平原水库联合调度模型;第6章对开展联合调度的综合效益进行了分析和计算;第7章对全书内容进行了总结并提出展望。

本书可供水文水资源学科、农业工程及水利工程等学科的科研人员、大学教师、研究生和本科生,以及从事水资源管理领域的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下干旱区水文情势及水资源优化调配/杨涛,刘鹏著. —北京:科学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-03-048138-2

I. ①变… II. ①杨… ②刘… III. ①水文情势-研究-新疆②资源管理-研究-新疆 IV. ①P333 ② ③TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 091621 号

责任编辑: 胡 凯 周 丹 王 希 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 100 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来,气候变化导致全球气候变暖,洪涝、干旱等灾害事件频繁发生且不断加剧,对人民生命财产和社会经济发展构成了严重的威胁,水安全问题已经成为社会、政府和科学界越来越关注的热点。对于干旱区而言,水安全问题则更为突出,特别是干旱灾害,其发生频率和造成的损失均高于非干旱区。

本书主要针对气候变化条件下我国内陆干旱区水资源综合利用的难点,以保障水资源和生态安全为切入点,重点探索山区-平原水库调节与反调节关键技术,紧密结合我国内陆干旱区水资源极端匮乏、洪涝灾害及干旱频繁发生的实际情况,从研究区的供需现状和缺水现状着手,解析气候变化对内陆干旱流域山区冰雪雨混合径流及洪水灾害、下游平原水库的蒸发渗漏及早情的影响,提出文化粒子群混沌算法和大系统协调分解算法框架,构建适应气候变化的干旱区山区水库调节-平原水库反调节优化调度模型,实现多目标(防洪、发电、灌溉和生态)集成优化调度,有效提高计算精度和效率。对联合调度从防洪、发电、灌溉、节水等角度进行综合效益分析,以实现水资源的经济、社会、生态等综合效益,为流域社会经济与生态环境保护提供科学依据,也为流域水资源规划及水资源可持续利用提供参考。

本书对内陆干旱区冰雪雨混合产流理论、水库蒸发和渗漏理论、干旱评估理论、水库联合调度理论和方法进行系统的总结与提升,是国家自然科学基金项目“气候变化条件下天山南坡出山口融雪径流灾害事件的形成机理与预测”(41371051)、国家“十二五”科技支撑项目专题“山区水库与平原水库调节与反调节技术专题”(SQ2011SF09C02489)等的研

究成果。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏与不足，恳请读者给予批评和指正。

作 者

2016 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究进展与现状	2
1.2.1 干旱指标及干旱评估研究	2
1.2.2 干旱区水资源及水文过程响应研究	4
1.2.3 山区水库—平原水库调节与反调节技术研究	6
1.2.4 水库调度风险研究	6
第 2 章 气候变化对山区冰雪雨混合径流及洪水的影响	8
2.1 引言	8
2.2 冰雪雨混合产流模型研究	10
2.2.1 技术方案	10
2.2.2 方法介绍	12
2.3 实例验证	16
2.3.1 流域概况	16
2.3.2 山区来水变化特征	19
2.3.3 山区来水模拟及预估	21
2.3.4 突发洪水对气候变化的响应	22
2.4 本章小结	23
第 3 章 气候变化对水库水面蒸发的影响	25
3.1 引言	25

3.2 水面蒸发模型研究	25
3.2.1 技术方案	25
3.2.2 方法介绍	26
3.2.3 大尺度气候因子选择	29
3.3 实例验证	30
3.3.1 水库水面蒸发损失预估	30
3.3.2 水库蒸发渗漏损失预估	35
3.4 本章小结	36
第 4 章 气候变化影响下内陆干旱区的旱情演变	38
4.1 引言	38
4.2 干旱评价指标选取及方法介绍	39
4.2.1 干旱评价指标选取	39
4.2.2 方法介绍	40
4.3 基于 HDI 的干旱变化规律分析	41
4.3.1 不同时间尺度的 HDI 变化规律分析	41
4.3.2 干旱频率及月数变化	43
4.3.3 干旱年际变化	44
4.3.4 季节性干旱变化特征	45
4.3.5 周期分析	46
4.3.6 气候条件下未来干旱规律分析	48
4.4 本章小结	49
第 5 章 气候变化条件下山区-平原水库群联合调度模型	51
5.1 引言	51
5.2 水库调度模型构建及优化算法介绍	53

5.2.1	水库调度	53
5.2.2	优化算法介绍	54
5.3	山区—平原水库调节与反调节技术应用实例——基于文化 粒子群混沌算法	59
5.3.1	流域水系概况	59
5.3.2	系统概化及分析	59
5.3.3	山区水库调节与平原水库反调节技术	65
5.3.4	调度规则	73
5.3.5	水库调度模型建立以及优化算法	75
5.3.6	水库群联合调度结果及分析	87
5.4	本章小结	99
第 6 章	气候变化条件下联合调度的综合效益分析	100
6.1	引言	100
6.2	水库群联合调度综合效益分析	101
6.2.1	气候变化条件下联合调度的防洪减灾效益	102
6.2.2	气候变化条件下联合调度的节水灌溉效益	104
6.2.3	气候变化条件下联合调度的生态环境效益	107
6.2.4	气候变化条件下联合调度的发电效益	109
6.3	本章小结	110
第 7 章	结论与展望	113
7.1	本书主要成果	113
7.2	本书主要结论	116
7.3	展望	117
	参考文献	119

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

水是干旱区的命脉，是制约干旱区社会经济发展的决定性因素。近年来，随着全球气候变暖，我国很多干旱地区特大洪涝、干旱等灾害性事件频繁发生并不断加剧，远高于同期多年平均水平，发生时间也异于常年，水安全问题日益严重，已经成为当今社会、政府和科学界越来越关注的焦点 (WMO, 1986; 秦大河等, 2002a)。其中地处我国干旱内陆地区的新疆维吾尔自治区尤为典型。

近年来，随着气候从暖干化向暖湿化转型，新疆水安全问题呈现出以下特点：① 20 世纪 90 年代以来，受气候变化影响，冰雪、泥石流、滑坡等衍生洪水灾害出现频次明显增加，由 80 年代的年平均 0.5 次提高到年平均 1.1 次，对流域下游的生命财产安全造成巨大威胁。② 目前已建 477 座水库，大多为平原水库，水深浅、面积大、蒸发量大。根据已有研究成果估算，新疆平原水库的年蒸发量为 26.1 亿 m^3 ，蒸发损失超过水库总库容的 40%。平原水库蒸发浪费了大量宝贵的水资源，降低了新疆水资源利用效率。③ 分布在塔里木河下游的天然胡杨林，是新疆干旱区的重要生态屏障和内地通往新疆的绿色走廊。受气候变化与人类活动的共同影响，1959~1983 年的 24 年间，塔里木河流域土地沙漠化面积占比从 66.2% 上升到 81.83%。80 年代以来，下游来水量减幅达 80% 以上，致使中下游生态环境日趋恶化。50 年代，塔里木河中下游胡杨林面积达 580 万亩^①，70 年代为 297 万亩，而到 90 年代仅剩 152.25 万亩。④ 新疆社

^① 1 亩 $\approx 666.7\text{m}^2$

会经济的跨越式发展,带动了对发电需求的快速增长。水电作为清洁能源和可再生能源,对优化新疆能源结构具有重要的战略意义。而气候变化条件下新疆冰雪雨三元径流的变异性显著增加,极端洪水和干旱事件强度不断加剧,且重现期和出现时间和以往相差很大,给水电调度带来了巨大挑战。

针对气候变化条件下新疆水资源综合开发利用的难点,本书以保障新疆水资源和生态安全为切入点,研究气候变化下的新疆山区-平原水库群联合调度技术,以实现干旱区水资源综合效益最大化,对保障新疆社会经济的跨越式发展具有重要意义。

1.2 研究进展与现状

1.2.1 干旱指标及干旱评估研究

Mckee 于 1993 年提出了具有多功能的标准化降水指标 (standardized precipitation index, SPI)(Mckee et al., 1993)。它是基于一定时空尺度,降水的短缺对地表水、地下水、土壤湿度、积雪和流量变化的影响程度而制定的。它能识别不同的时间尺度,并能对降水量的不足提供信息。但是该指标只考虑了当时的降水量而忽略了前期干旱持续时间对后期干旱程度的影响,所以在实际应用中还存在一定的局限性。为了定义能够测定干旱程度和干旱持续时间的指数,Palmer 利用气象参数和土壤水分含量对干旱进行了初步研究,于 1965 年开发了 Z 指数和 Palmer 干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)(Palmer, 1965)。Palmer 干旱指数综合考虑降水、潜在蒸散发以及前期土壤湿度和径流。尽管 PDSI 被看成是气象干旱指标,但它可以考虑降水、蒸散发以及土壤水分等条件,所有这些是影响农业干旱和水文干旱的因素,因此也可以用 PDSI 来识别农业干旱和水文干旱。用 PDSI 的方法基本上能描述干旱发生、发展

直至结束的全过程。因此,从形式上用 Palmer 的方法可提出最难确定的干旱特性、干旱强度及其起讫时间。我国气象科学研究所的安顺清等对 PDSI 进一步修正,使之更适合我国气候特征(安顺清和邢久星,1986)。PDSI 作为一个综合类的干旱指标虽然能够比较准确地量化干旱程度,提高干旱评估的准确度和可信度,但研究过程相当复杂,不能快速地进行干旱程度的评价。在 Palmer 提出了 PDSI 这一开创性研究之后,许多水文上的参数,如降水、径流、土壤水分和空气中的水分含量等都被广泛应用于描述水文干旱的不同方面,比如径流就被国内外广泛应用于水文干旱的分析上。Shafer 和 Dezman 于 1982 年在科罗拉多州提出了地表水供水指数(surface water supply index, SWSI),用来评估积雪径流区的干旱程度(Shafer and Dezman, 1982)。在描述美国西部的可供水量时,该指标要优于 PDSI。之后, SWSI 就成了水文干旱监测中最著名的指数之一。作为地表水状况的度量, SWSI 弥补了 PDSI 未考虑降雪、水库蓄水、流量以及高地形降水情况的不足,但由于对地表水供水定义的不一致,以及权重因子会因为空间和时间的差异而不同, SWSI 具有不同的统计特性。

我国学者也针对干旱指标进行了一系列研究。朱炳瑗等(1998)用干燥度来确定干旱等级,定义为多年平均水面蒸发量与多年平均降水量之比。张存杰等(1998)对降水量进行了必要的转化,用 Z 指数描述干旱,并划分干旱等级。这个指标相比 SPI 用单一的降水效果要好一些,但是等级过多,不利于区分干旱程度。郭江勇等(1997)综合了近期降水、底墒和气温等要素定义出 I 指数来划分干旱程度,该指数除了考虑当时降水对土壤水分的补充,也考虑气温对干旱的影响,所需资料容易获取,计算方便,应用于干旱监测也有理想的效果,但是对前期降水时段的选取不易把握,对于不同的地方有不同的要求。

已有的国内外研究常用单一干旱指标对干旱程度进行研究和预测,

但是为了克服单一指标的限制和它们各自的缺点,更好地对具体的区域进行干旱的预测,把气象干旱指标、水文干旱指标和农业干旱指标综合起来是未来干旱预测的主要方向,具有十分重要的意义。在综合干旱指标的研究方面,Karamouz 等 (2009) 做了先行的尝试和研究,把气象干旱指标、水文干旱指标和农业干旱指标中的 SPI、SWSI 和 PDSI 通过干旱事件造成的相关损失整合成一个综合干旱指标 (hybrid drought index, HDI)。结果表明,综合干旱指标在预测方面对比单个指标有更好的表现。基于干旱造成的经济损失的综合干旱指标,能够帮助政府管理者研究、预测干旱的程度,具有广泛的应用前景。

1.2.2 干旱区水资源及水文过程响应研究

气候变化对我国水文水资源的影响研究始于 20 世纪 80 年代。考虑到华北和西北地区是我国主要的缺水地区,1988 年在国家自然科学基金及中国科学院支持的“中国海面与气候变化及其趋势和影响研究”重大项目中,首次设立了气候变化对华北、西北水资源影响研究专项。1991 年,水利部和国家科委 (现科学技术部) 共同组织了“八五”国家科技攻关计划项目“气候变化对水文水资源的影响及适应对策研究”。1994 年中美合作开展了“气候变化对水文水资源的影响及适应对策”研究。“九五”国家科技攻关计划重点项目“我国短期气候预测系统的研究”包括了“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,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。“十五”国家科技攻关计划重点项目“中国可持续发展信息共享系统的开发研究”中设立了“气候异常对我国淡水资源的影响阈值及综合评价”专题,基于对未来水资源的模拟及水资源的需求预测进行气候变化阈值研究。近年开展的国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目“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”针

对全球变暖问题重点研究我国北方干旱地区未来的气候情势、人类活动和水资源相互作用关系以及适应对策。通过上述项目研究,取得了众多成果。

在气候变化对径流影响研究方面,施雅风和张祥松(1995)研究了我国西北地区在 CO_2 倍增的情况下,水资源可能受到的影响,研究结论为季节性积雪趋于减少,冰川将继续后退萎缩,多年平均径流量相对稳定或少量增加。秦大河等(2002b)对长江源区水文资料进行分析,认为气温的上升与降水量的下降是长江源区年径流量逐年减少的主要原因。刘昌明等(2003)对黄河源区土地覆被与气候变化的水文效应进行分析,认为气候变化是黄河源区径流变化的重要原因。陈志恺(2003)长期从事西北水资源配置研究,认为在全球变暖背景下,黄河流域径流量减少的幅度比降水量大,而西北内陆河流域径流量有所增加。张建云(2008)论述了我国水资源系统对气候变化的敏感性以及未来气候变化下我国水资源的情势。

在水面蒸发变化规律研究方面,依据区域实测蒸发资料和气象资料开发的蒸发模型较多,大多的蒸发模型是根据区域地理条件和气候条件对彭曼公式和道尔顿模型参数进行修正而来的。施成熙等(1984)通过对比直线型气候指数模型、曲线型气候指数模型和质量转移模型的优劣,确定在不同情况下选用不同的水面蒸发模型。洪嘉琏和傅国斌(1993)应用相似理论,提出一个考虑自由对流和强迫对流相结合的水面蒸发模式。濮培民(1994)通过对水面蒸发与散热系数公式进行研究,从而提高公式的精度和适用性。多数模型在水面蒸发模拟时,采用单站实测资料,模型对单站水面蒸发量的模拟效果较好,但异地移用后效果不是很理想,因为水面蒸发对地理条件、气象条件等因素非常敏感,这些水面蒸发实验模型具有很强的局限性和区域性,缺乏空间上的适应性。

1.2.3 山区水库—平原水库调节与反调节技术研究

在水库调度技术研究方面,1955 年美国学者 Little 提出了水库随机优化调度模型,以美国的大古力水电站水库为实例,并用随机动态规划法求解,标志着用系统科学方法研究水库优化调度的开始。随着系统理论在水库优化调度领域的不断发展,大量的研究成果不断问世,针对不同问题的各种形式的模型也相继出现,尤其是 20 世纪 70~80 年代研究成果最为丰富,水库优化调度最基本的模型有线性规划模型 LP、动态规划模型 DP、逐步优化法 POA、非线性规划模型 NLP 等。在我国,水库优化调度研究相对较晚,20 世纪 60 年代初期吴沧浦提出了年调节水库最优运行的 DP 模型。1986 年董子敖等提出了计入径流时空相关关系的多目标层次优化法。80 年代后期至 90 年代初,大连理工大学陈守煜、王子茹(2006)提出了水电站水库群模糊优化调度模型。韦柳涛等(1992)提出了水库群调度的人工神经网络模型。四川大学王黎、马光文(1998)提出了水电站水库群调度的遗传算法模型等。随着计算机及人工智能技术的发展与计算机及人工智能技术相结合技术的出现,新的理论不断引入,如人工神经网络、专家系统、遗传算法、粒子群算法等智能算法成为热点,依靠计算机的快速运算及大容量存储能力来研究探讨快速、准确地求解水库优化调度模型的方法及算法,提高了模型成效。

1.2.4 水库调度风险研究

水库调度风险研究是从水库大坝的安全风险和洪灾风险研究开始的。国外在 20 世纪 70 年代初期,就开始了大坝安全风险分析的研究工作,美国、加拿大、澳大利亚等国家在大坝的安全评估和决策方面开展了许多研究工作,提出了一系列大坝风险评估的理论和方法,荷兰等国家在防洪风险评估和大坝设计标准方面也取得了丰富的研究成果,受到各国重视。20 世纪 90 年代,我国学者也将风险分析理论引入大坝的

安全和洪灾区的风险分析中来,内容多涉及大坝的安全标准、水库防洪调度洪水风险图的制作、水库泄洪风险等,而涉及水库调度兴利方面的风险研究成果较少。进入 21 世纪,关于发电、供水等水利部门的风险分析研究成果才逐渐丰富起来。而对于水库调度涉及的防洪、发电、供水、航运、生态等风险,却很少有以提出指标体系的方式来进行风险评估的研究,而且一般都是考虑某一个或几个风险因子对防洪、发电或生态等影响的单独研究,而对于水库调度而言,一般具有综合利用功能,是一个复杂的多目标协调问题,仅片面地考虑某一类风险因子或风险显然是欠妥当的。纵观风险评估方法的研究过程,从 20 世纪 50 年代左右风险概念提出,到现在风险评估方法主要有直接积分法、蒙特卡罗方法 (Monte Carlo method, MCM)、均值一次两阶矩方法 (mean-value first-order second-moment, MFOSM)、改进一次两阶矩方法 (advanced first-order second-moment, AFOSM) 和 JC (joint commission) 法等。目前,国内外有关风险评估方法的发展相对较为缓慢,虽然现有风险评估 (或计算) 方法已有多种,但对于水库调度风险分析这一复杂系统来说仍然存在不足。水库调度风险在未来研究中必然会涉及各类型和各方面的风险评估,考虑的因素之间具有复杂的内在与外在的联系,这一复杂的大系统的风险评估必然需要新技术、新方法予以支撑。

第2章 气候变化对山区冰雪雨混合径流

及洪水的影响

2.1 引言

叶尔羌河流域是新疆典型的冰雪补给型河流,叶尔羌河水源一是来自乔戈里峰的冰雪融水;二是河床西岸岩层中涌出的泉水;三是雨水。叶尔羌河以其良好的水质,成为喀什地区工农业及居民生活用水的主要来源。根据中国科学院寒区旱区环境与工程研究所最新研究成果,叶尔羌河径流组成是:冰川融水占径流量的 64.0%,地下水占 22.6%,雨、雪水混合补给占 13.4%,其年内径流量多集中在夏季,卡群水文站夏季(6~8月)径流量占年径流量的 68.5%。由此可以看出,冰川融水是叶尔羌河径流量的主要补给来源。全球气温的升高导致冰川融雪加剧,使山区径流发生改变,因此研究叶尔羌河流域出山口径流的变化非常重要。本章通过构建内陆河冰雪径流模型,利用历史径流数据对模型进行率定、验证,从而对山区径流进行预测。

随着全球气候的变化,气温将不断地升高。据清华大学著名气候学家赵宗慈研究预测中国西北地区到 2020 年气温将升高 1.85 °C,到 2050 年升高 2.55 °C,到 2080 年将升高 4.47 °C 左右。气温的升高必然导致冰川融水加剧,融水量加大,使得雪崩、冰川、泥石流和冰湖洪水等冰雪灾害发生频率也呈上升趋势。近年来,新疆洪灾发生的频次有如下特点:

- ① 20 世纪 90 年代洪灾发生的频次高于 80 年代,并有逐年增加的趋势;
- ② 暴雨洪水是 90 年代成灾的主要因素,年均发生的频次为 14.4 次,冰

川、泥石流、滑坡阻塞洪水成灾的频次有明显的增加,冰川和泥石流阻塞洪水分别由 80 年代的年平均 0.5 次、0.7 次提高到了 1.0 次、0.9 次,这是因为气温升高,冰川融水增多使冰湖突发洪水的概率增大。

发源于喀喇昆仑山叶尔羌河源的突发性洪水是上游分布在喀喇昆仑山北坡一系列与克勒青河河谷呈正交的冰川融化导致的。由于有四五条冰川下伸到主河谷阻塞冰川融水的下排,包括克亚吉尔冰川、特拉本坎力冰川、迦雪布鲁姆冰川等,经常形成冰川阻塞湖,当冰坝浮起或冰下排水道打开,就会发生冰湖溃决洪水。在经历了 1986 年的冰湖溃决洪水后,由于冰川排水道打开,直到 1996 年再没有发生溃决洪水。当时施雅风和张祥松(1995)根据喀喇昆仑山冰川进退变化,认为 20 世纪克勒青河上游的克亚吉尔冰川和特拉本坎力冰川 10 年时间尺度的冰川前进脉动已经过去,目前处于相对稳定和退缩、变薄的阶段,预计在 21 世纪初气温持续升高的情况下,多数冰川必将后退变薄,冰川阻塞湖溃决(突发)洪水的规模也相应减小,出现数千秒立方米流量的溃决(突发)洪水的可能性很小,叶尔羌河流域冰川洪水的危害将日益减轻。但在 20 世纪 90 年代的剧烈增温过程中,冰温升高,冰川消融加剧,冰川融水量增加,冰川流速加快,冰川再次阻塞河道形成冰湖,发生了频繁的大冰湖溃决洪水,历史记载 1970~2002 年历史冰湖溃决发生的洪水(沈永平等, 2004),显示冰湖溃决洪水的洪峰流量和洪水总量越来越大,冰湖的规模相应扩大,溃决的危险程度也不断增加。随着全球气温的持续变暖,叶尔羌河的冰川湖溃决洪水的频率和幅度将会继续增加,对下游人们的生命财产安全和社会经济发展带来严重威胁。

冰川湖溃决洪水变化对全球变暖的响应机理主要是:①冰床变软,变形加大,冰底部滑动量大,加快冰川流动和融化;②冰川流速加大,阻塞河谷,冰川湖形成;③冰温升高,冰川软化,冰湖水更易打开排水通道;④气温升高,冰川消融加剧,径流量增大,洪水发生频率加快;