

西北旱区生态水利学术著作丛书

变化环境下渭河流域 水资源演变与配置

畅建霞 高 凡 王义民 著



科学出版社

西北旱区生态水利学术著作丛书

变化环境下渭河流域 水资源演变与配置

畅建霞 高 凡 王义民 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对渭河流域水资源供需矛盾日益加剧的现象,开展变化环境下流域水资源演变与配置研究。首先分析径流对气候和土地利用变化的响应,通过评价流域健康状况重构流域健康需水量,在此基础上构建基于“三条红线”最严格水资源管理制度的水资源合理配置模型,通过求解获得不同水平年的配置方案。本书对气候变化和人类活动影响下流域水资源管理具有重要的理论和实践意义。

本书可供水文与水资源工程、生态环境工程等相关专业的科研和管理人员参考使用,也可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下渭河流域水资源演变与配置/畅建霞,高凡,王义民著. —北京:科学出版社,2017.3

(西北旱区生态水利学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-051934-4

I. ①变… II. ①畅…②高…③王… III. ①渭河-流域-水资源-演变-研究 IV. ①TV211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 040450 号

责任编辑:祝 洁 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:张 倩 / 封面设计:速底书装

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>

北京新华印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:22 1/2

字数:450 000

定价:145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《西北旱区生态水利学术著作丛书》学术委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：王光谦

委 员：许唯临 杨志峰 沈永明

张建云 钟登华 唐洪武

谈广鸣 康绍忠

《西北旱区生态水利学术著作丛书》编写委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：周孝德

委 员：王全九 李 宁 李占斌

罗兴铤 柴军瑞 黄 强

总 序 一

水资源作为人类社会赖以延续发展的重要要素之一,主要来源于以河流、湖库为主的淡水生态系统。这个占据着少于1%地球表面的重要系统虽仅容纳了地球上全部水量的0.01%,但却给全球社会经济发展提供了十分重要的生态服务,尤其是在全球气候变化的背景下,健康的河湖及其完善的生态系统过程是适应气候变化的重要基础,也是人类赖以生存和发展的必要条件。人类在开发利用水资源的同时,对河流上下游的物理性质和生态环境特征均会产生较大影响,从而打乱了维持生态循环的水流过程,改变了河湖及其周边区域的生态环境。如何维持水利工程开发与生态环境保护之间的友好互动,构建生态友好的水利工程技术体系,成为传统水利工程发展与突破的关键。

构建生态友好的水利工程技术体系,强调的是水利工程与生态工程之间的交叉融合,由此促使生态水利工程的概念应运而生,这一概念的提出是新时期社会经济可持续发展对传统水利工程的必然要求,是水利工程发展史上的一次飞跃。作为我国水利科学的国家级科研平台,“西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)”是以生态水利为研究主旨的科研平台。该平台立足我国西北旱区,开展旱区生态水利工程领域内基础问题与应用基础研究,解决了若干旱区生态水利领域内的关键科学技术问题,已成为我国西北地区生态水利工程领域高水平研究人才聚集和高层次人才培养的重要基地。

《西北旱区生态水利学术著作丛书》作为重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内代表性成果的凝炼集成,广泛深入地探讨了西北旱区水利工程建设与生态环境保护之间的关系与作用机理,丰富了生态水利工程学科理论体系,具有较强的学术性和实用性,是生态水利工程领域内重要的学术文献。丛书的编纂出版,既是重点实验室对其研究成果的总结,又对今后西北旱区生态水利工程建设、科学管理和高效利用具有重要的指导意义,为西北旱区生态环境保护、水资源开发利用及社会经济可持续发展中亟待解决的技术及政策制定提供了重要的科技支撑。

中国科学院院士 王光谦

2016年9月

总 序 二

近 50 年来全球气候变化及人类活动的加剧,影响了水循环诸要素的时空分布特征,增加了极端水文事件发生的概率,引发了一系列社会-环境-生态问题,如洪涝、干旱灾害频繁,水土流失加剧,生态环境恶化等。这些问题对于我国生态本底本就脆弱的西北地区而言更为严重,干旱缺水(水少)、洪涝灾害(水多)、水环境恶化(水脏)等严重影响着西部地区的区域发展,制约着西部地区作为“一带一路”国家战略桥头堡作用的发挥。

西部大开发水利要先行,开展以水为核心的水资源-水环境-水生态演变的多过程研究,揭示水利工程开发对区域生态环境影响的作用机理,提出水利工程开发的生态约束阈值及减缓措施,发展适用于我国西北旱区河流、湖库生态环境保护的理论与技术体系,确保区域生态系统健康及生态安全,既是水资源开发利用与环境规划管理范畴内的核心问题,又是实现我国西部地区社会经济、资源与环境协调发展的现实需求,同时也是对“把生态文明建设放在突出地位”重要指导思路的响应。

在此背景下,作为我国西部地区水利学科的重要科研基地,西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)依托其在水利及生态环境保护方面的学科优势,汇集近年来主要研究成果,组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。该丛书兼顾理论基础研究与工程实际应用,对相关领域专业技术人员的工作起到了启发和引领作用,对丰富生态水利工程学科内涵、推动生态水利工程领域的科技创新具有重要指导意义。

在发展水利事业的同时,保护好生态环境,是历史赋予我们的重任。生态水利工程作为一个新的交叉学科,相关研究尚处于起步阶段,期望以此丛书的出版为契机,促使更多的年轻学者发挥其聪明才智,为生态水利工程学科的完善、提升做出自己应有的贡献。

中国工程院院士

2016 年 9 月

总 序 三

我国西北干旱地区地域辽阔、自然条件复杂、气候条件差异显著、地貌类型多样,是生态环境最为脆弱的区域。20 世纪 80 年代以来,随着经济的快速发展,生态环境承载负荷加大,遭受的破坏亦日趋严重,由此导致各类自然灾害呈现分布渐广、频次显增、危害趋重的发展态势。生态环境问题已成为制约西北旱区社会经济可持续发展的主要因素之一。

水是生态环境存在与发展的基础,以水为核心的生态问题是环境变化的主要原因。西北干旱生态脆弱区由于地理条件特殊,资源性缺水及其时空分布不均的问题同时存在,加之水土流失严重导致水体含沙量高,对种类繁多的污染物具有显著的吸附作用。多重矛盾的叠加,使得西北旱区面临的水问题更为突出,急需在相关理论、方法及技术上有所突破。

长期以来,在解决如上述水问题方面,通常是从传统水利工程的逻辑出发,以人类自身的需求为中心,忽略甚至破坏了原有生态系统的固有服务功能,对环境造成了不可逆的损伤。老子曰“人法地,地法天,天法道,道法自然”,水利工程的发展绝不应仅是工程理论及技术的突破与创新,而应调整以人为中心的思维与态度,遵循顺其自然而成其所以然之规律,实现由传统水利向以生态水利为代表的现代水利、可持续发展水利的转变。

西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)从其自身建设实践出发,立足于西北旱区,围绕旱区生态水文、旱区水土资源利用、旱区环境水利及早区生态水工程四个主旨研究方向,历时两年筹备,组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。

该丛书面向推进生态文明建设和构筑生态安全屏障、保障生态安全的国家需求,瞄准生态水利工程学科前沿,集成了重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内取得的主要成果。这些成果既关注科学问题的辨识、机理的阐述,又不失在工程实践应用中的推广,对推动我国生态水利工程领域的科技创新,服务区域社会经济与生态环境保护协调发展具有重要的意义。

中国工程院院士

2016 年 9 月

前 言

渭河是黄河的第一大支流,是陕西人民的“母亲河”。渭河流域物华天宝、人杰地灵,孕育了千年华夏文明。历史上的渭河流域气候温润、水草丰茂、沃野千里,但近年来上游水土流失、中游水污染、下游河道淤积等问题日趋严重,生态环境持续恶化,小水大灾成为常态。2011年,陕西省实施了渭河综合治理工程。该工程以改善生态环境为根本,以节水、治污和水资源优化配置为重点,在水资源开发利用方面的基本思路是:节水优先、适度开源、调水补充和优化配置。为了实现渭河流域综合治理目标,水利部2011年设立了公益性行业科研专项《渭河流域水资源合理配置及生态问题研究》,该项目由西安理工大学和陕西省水资源管理办公室共同承担,历时3年完成。

水资源短缺已成为制约渭河流域经济社会可持续发展的全局性、基础性问题,当前需要关注的具体科学问题包括:过去五十年中,尤其是近二三十年,流域水资源变化的原因是什么;未来气候变化下水资源又将如何响应;如何根据最严格水资源管理制度的要求对有限的水资源进行合理利用。解决这些问题是保障流域水资源安全的前提。本书针对渭河流域水资源开发利用问题,结合流域气候变化和人类活动影响,分析径流对气候和土地利用变化的响应过程;通过评价流域健康状况重构流域健康需水量,在此基础上研究基于“三条红线”最严格水资源管理制度下的水资源合理配置方案。

本书内容丰富、结构清晰,理论与实践结合紧密,对研究和指导渭河流域水资源优化配置及综合治理具有重要的学术价值和实用性,同时也对气候变化和人类活动影响下流域水资源系统的规划、管理、开发利用和环境生态保护具有重要的理论与实践意义。

多年来,课题组成员间相互帮助、联合攻关,完成了课题研究和本书撰写。畅建霞等撰写第1章、第8~12章,王义民等撰写第2~5章、第13章,高凡等撰写第6章、第7章。西安理工大学黄强教授、刘登峰副教授、白涛博士为本书的出版提出了宝贵意见,硕士研究生霍磊、黎云云、张鸿雪、袁梦、阚艳彬、郭爱军、陈昱潼、孙佳宁、翟城武、朱悦璐、赵静、雷江群和魏洁等也参编了本书的部分章节,在此深表感谢!

本书的出版得到了许多单位、同行以及专家的大力相助,在此表示衷心的感谢!

目 录

总序一

总序二

总序三

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 气候变化对水资源的影响	3
1.2.2 人类活动对流域水资源的影响	9
1.2.3 水资源配置研究进展	10
1.2.4 河流健康评价研究进展	12
1.3 研究内容	16
第 2 章 渭河流域概况及基本资料	18
2.1 自然地理概况	18
2.1.1 地理位置	18
2.1.2 地形地貌	18
2.1.3 河流水系	18
2.1.4 植被土壤	20
2.2 水文气象特征	20
2.3 社会经济及水资源概况	21
2.3.1 社会经济情况	21
2.3.2 水资源分区及水资源量	22
2.3.3 水资源开发利用情况	24
2.4 基本资料	27
2.4.1 气象及水文资料	27
2.4.2 土地利用及土壤数据	28
2.4.3 主要水利工程	28
2.4.4 陕西省引汉济渭工程	31
第 3 章 渭河流域气象水文要素及土地利用变化分析	32
3.1 渭河流域水文气象要素演变规律	32

3.1.1 降水演变规律	32
3.1.2 蒸发演变规律	36
3.1.3 气温演变规律	37
3.1.4 径流演变规律	39
3.2 渭河流域未来降水、气温变化研究	44
3.2.1 CMIP5 模式数据处理及排放情景简介	44
3.2.2 统计降尺度研究	45
3.2.3 降水模拟结果分析	49
3.2.4 气温模拟结果分析	51
3.2.5 渭河流域未来降水、气温变化	52
3.3 渭河流域土地利用变化特征分析	61
3.3.1 不同时期土地利用类型构成	61
3.3.2 土地利用变化率	62
3.3.3 土地利用转移矩阵	63
3.3.4 渭河流域土地利用变化驱动力分析	66
第 4 章 气候变化和人类活动对径流影响的研究	68
4.1 研究方法	68
4.2 TOPMODEL 分布式水文模型	69
4.2.1 TOPMODEL 模型的原理	70
4.2.2 TOPMODEL 模型的结构	74
4.3 VIC 分布式水文模型	75
4.4 SWAT 分布式水文模型	81
4.4.1 水文循环的陆地过程	82
4.4.2 水文循环的水面过程	85
第 5 章 渭河流域气候变化和人类活动对径流的影响研究	87
5.1 基于水文统计法的气候变化和人类活动对径流的影响	87
5.1.1 累积径流量变化曲线	87
5.1.2 累积降水量、累积蒸发量变化曲线	89
5.1.3 气候变化和人类活动对径流量的影响	89
5.2 基于 TOPMODEL 模型的泾河流域气候变化和人类活动对径流的 影响	90
5.2.1 TOPMODEL 模型数据库的建立	90
5.2.2 基于 DEM 的水文参数提取	92
5.2.3 气候变化和人类活动对径流影响的定量分析	96
5.3 基于 SWAT 模型的渭河流域气候变化和人类活动对径流的影响	98

5.3.1	SWAT 分布式水文模型的本地化构建	98
5.3.2	气候变化和人类活动对径流影响的定量分析	112
5.3.3	流域径流量演变的归因分析	117
5.3.4	径流对气候和土地利用变化的响应过程	119
5.4	渭河流域未来径流变化	128
5.4.1	植被参数	132
5.4.2	土壤参数	134
5.4.3	模型输入汇流文件	135
5.4.4	基准期模型参数率定	136
5.4.5	渭河流域未来径流变化	140
第6章	渭河流域系统健康评价	144
6.1	概述	144
6.2	渭河流域主要生态环境问题	144
6.3	渭河流域系统健康的概念和标志	149
6.3.1	渭河流域系统健康的概念	149
6.3.2	渭河流域系统健康的标志	151
6.4	渭河流域系统健康评价对象与评价尺度	151
6.5	渭河流域系统健康评价指标体系构建	153
6.5.1	指标体系构建原则	153
6.5.2	基于“压力-状态-响应”模型的河流健康评价指标体系框架	154
6.5.3	基于粗糙集和极大不相关法的渭河健康关键影响因子识别方法	162
6.5.4	渭河流域健康评价指标体系建立	168
6.6	渭河流域系统健康评价标准	171
6.7	渭河流域系统健康评价模型	175
6.7.1	权重的确定	175
6.7.2	综合评价模型的选择	177
6.7.3	评价结果	183
第7章	渭河流域系统健康流量重构	191
7.1	概述	191
7.2	河流健康流量重构的基本原理	191
7.2.1	流量与河流健康的关系	191
7.2.2	河流生态水文季节	192
7.2.3	水量平衡原理	192
7.3	渭河流域生态保护目标的识别及与流量的对应关系	192
7.4	不同功能需求流量过程的推求	195

7.4.1	生态基础流量与适宜生态流量	196
7.4.2	自净流量	200
7.4.3	输沙需水量	202
7.4.4	水生生物生存需水流量	203
7.5	渭河流域不同保护目标下健康流量过程重构	207
7.6	计算结果的合理性分析	210
第8章	基于“三条红线”的渭河流域水资源合理配置理论基础	213
8.1	水资源合理配置的目标	213
8.2	“三条红线”概念	213
8.2.1	“三条红线”的提出	213
8.2.2	“三条红线”之间的关系	214
8.2.3	基于“三条红线”的水资源合理配置原则	215
8.3	基于“三条红线”渭河流域水资源配置基本条件	216
8.3.1	水资源开发利用红线控制	216
8.3.2	用水效率红线控制	222
8.3.3	限制纳污控制	223
第9章	基于“用水效率控制红线”的渭河流域需水量预测	226
9.1	渭河流域经济社会发展指标分析	226
9.1.1	陕西省渭河流域经济社会发展总体部署	226
9.1.2	人口与城镇化	226
9.1.3	国民经济各行业发展主要指标	227
9.1.4	农业发展预测	228
9.1.5	生态环境建设目标	230
9.2	渭河流域需水量预测	230
9.2.1	基本需水预测	230
9.2.2	基于用水效率控制红线的需水预测	232
9.2.3	引汉济渭工程受水区主要城市及工业园区需水预测	235
第10章	现状年渭河流域水量水质耦合配置模型及结果	239
10.1	渭河流域水量水质耦合配置模型建立及求解	239
10.1.1	河流概化及节点图	239
10.1.2	渭河流域水质水量耦合配置模型建立	241
10.1.3	约束条件	243
10.2	现状水平年方案设置及配置结果	245
10.2.1	方案设置	245
10.2.2	配置结果	245

第 11 章 规划水平年渭河流域水资源配置结果	257
11.1 规划水平年渭河流域水量水质耦合配置模型建立	257
11.1.1 水资源配置节点图	257
11.1.2 水资源配置模拟原则	261
11.2 水资源配置方案设置及结果分析	263
11.2.1 方案设置	263
11.2.2 2020 水平年配置结果	264
11.2.3 2030 水平年配置结果	286
第 12 章 渭河流域水资源合理配置方案综合评价	308
12.1 评价目的及准则	308
12.1.1 社会合理性准则	308
12.1.2 生态环境合理性准则	309
12.1.3 效率合理性准则	309
12.1.4 经济合理性准则	309
12.1.5 资源合理性准则	309
12.2 评价指标的选取	311
12.2.1 目标层	311
12.2.2 准则层	311
12.2.3 指标层	311
12.3 综合评价模型选取	313
12.3.1 单层次模糊优选模型	313
12.3.2 多层次模糊优选模型	315
12.4 渭河流域水资源合理配置综合评价结果分析	315
12.4.1 指标权重	315
12.4.2 评价模型结果	319
12.4.3 评价结果合理性分析	323
第 13 章 结论	326
参考文献	329

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

水是人类生存和发展过程中不可替代的基础性自然资源,是一切生物的生命之源,是构成生态环境的关键性要素。受气候变化和人类活动的双重影响,全球范围内各种尺度上的流域产汇流过程发生了剧烈变化,导致大多数河流的径流过程发生变化。在气候方面,二氧化碳浓度由 18 世纪的 280mg/kg 增加到 2011 年的 391mg/kg,其他温室气体如甲烷和氧化亚氮的浓度也已达 1803mg/kg 和 324mg/kg,3 种气体浓度分别超出工业化时代以前的 40%、150%和 20%;地球表面的平均温度在过去一百年间(1906~2005 年)升高了 0.74℃,其中过去五十年(1956~2005 年)的增长速率约为过去一百年的 2 倍(IPCC,2007a;IPCC,2007b),与此同时,全球降水也发生了显著变化。联合政府气候变异专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的评估报告指出:气候变化与其他因素间相互作用对流域生态水文循环过程造成了不可恢复的负面影响;气候变化对全球水资源的响应程度随河流地理位置不同而呈现出不同的变化趋势:高纬度地区的河流年平均径流量增加了 10%~40%,而中纬度地区的河流年平均径流量减少了 10%~30%(刘昌明等,2008)。中国气候变化趋势与全球气候变化趋势大致相同,自 20 世纪中期以来,全国年平均气温上升趋势尤为明显,上升幅度略高于同期的全球平均气温。全国年平均降水量增加,但波动幅度减小,且不同区域的降水季节分布差异明显。90 年代以后,长江以南地区夏季降水显著增加,而西北和东北地区夏季降水却明显减少(宋晓猛等,2013)。气候系统的能量平衡遭到破坏,导致自然环境演化发生变异,造成冰川融化、海平面上升,极端天气和水文事件(如洪水、干旱等)频发(张强等,2011;夏军等,2011)。近五十年来,我国极端气候事件频频发生,强度增大。例如,在 1952~2007 年,我国连续出现了 15 个全国性暖冬(夏军等,2015;陈峪等,2009)。在此背景下,我国六大江河的径流量均出现整体下降趋势。

与此同时,全球气候变化伴随着剧烈的人类活动,土地利用的改变导致覆被发生变化,大规模水利工程的修建以及水土保持工程改变了流域下垫面的状态,影响了水资源循环的蒸发、入渗和产汇流等,改变了流域水资源循环过程。土地利用或覆被变化作为流域下垫面变化的主要表现形式,是引起流域相应地表物理过程发生剧烈变化的主要诱因,与其他环境要素的综合作用直接或间接地影响着流域水文循环过程(Alvaro et al., 2015; Meneses et al., 2015; 曾思栋等, 2014; Alejandro et al.,

2007)。土地利用或覆被变化虽与自然环境的演变有关,但更与不断增强的人类活动息息相关(张翔等,2014;刘纪远等,2014;董磊华等,2012)。20世纪以来,随着人口的剧增和经济的快速发展,大面积的植树造林、农田开垦、围湖造田、城镇道路建设等人类活动改变了相应区域的土地利用或覆被现状,进而改变了区域的截留、蒸散发、下渗和产流等水循环过程,对流域水资源的转化、形成和时空分布产生了剧烈影响(郝振纯等,2014;刘晓燕等,2014;周凤岐等,2005)。

在气候变化和人类活动双重影响的变化环境下,河川径流量呈递减趋势。另外,随着社会经济的发展以及工业化、城镇化进程的加快,各行业对水资源的需求越来越大,由此引起的水资源短缺已经成为社会经济发展亟待解决的问题。近年来,我国出台了许多有关水资源利用和保护的管理制度。2002年颁布的《中华人民共和国水法》中明确规定了“国家对用水实行总量控制与定额管理相结合的制度”;2009年召开的全国水利工作会议上,提出了实行最严格水资源管理制度的要求;2011年中央一号文件和中央水利工作会议明确要求实行最严格水资源管理制度,确立了水资源开发利用控制、用水效率控制和水功能区限制纳污“三条红线”(王义民等,2015;左其亭等,2011)。

受气候变化和人类活动的影响,下垫面改变,我国水资源情势和格局发生了较大变化,其中西北地区近三十年来径流变化尤为显著。我国西北地区处于干旱、半干旱地带,降水稀少,蒸发能力为降水量的4~10倍,水资源短缺,生态环境脆弱,合理开发和有效利用水资源是西部大开发的关键因素。同时,该地区也是气候变化的敏感区域,气候变化对区域的生态过程、水文循环和水资源有显著的影响。

处于西北地区的渭河是黄河第一大支流,流经甘肃、宁夏及陕西三省(自治区),被誉为陕西人民的“母亲河”。历史上,渭河曾是陕西省关中地区的重要航道,并担负着经济最为发达地区的灌溉任务,在中华文明形成和发展中发挥着重要作用,现在渭河流域仍然是我国重要的工业、农业、国防和科研教育基地。然而,作为西北典型的干旱、半干旱区域,渭河流域气候变暖趋势明显,对流域水循环造成了强烈影响;另外,人类活动极大地改变了传统的流域水循环模式,导致河川径流量显著减少,从而由缺水衍生出一系列诸如以“上游水少、中游水脏、下游泥水淤积”为标志的水生态环境问题,尤其是近五十年来,恶化趋势进一步加快(左德鹏等,2013;武玮等,2012;穆兴民,2000)。

水资源短缺已发展成为制约渭河流域经济社会可持续发展的全局性、基础性问题,当前需要关注的具体科学问题包括:过去五十年中,尤其是近二三十年,流域水资源变化的原因是什么;未来气候变化条件下流域水资源又将如何响应;如何根据最严格水资源管理制度对有限的水资源进行合理利用。解决这些问题是保障流域水资源安全的前提,由于流域水文响应、水资源系统本身的复杂性,相关的研究仍不能满足现实管理的需求,在气候变化和人类活动双重影响下,迫切需要加强相

关基础性研究。

本书以渭河流域为例,开展变化环境下流域水资源演变规律研究,分析径流对气候和土地利用变化的响应过程。同时,针对渭河流域治理开发中出现的问题和特点,通过评价渭河流域系统健康状况,重构流域健康需水量及其过程,在此基础上研究基于“三条红线”最严格水资源管理制度下的水资源合理配置,研究成果不仅对气候变化和人类活动影响下流域水资源评价和管理具有重要的理论、实践意义,而且对于解决与工业、农业和城市发展等经济领域密切相关的水文水资源系统的规划管理、开发利用和环境生态保护等问题具有重要的现实意义,可为社会经济可持续发展提供科学依据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 气候变化对水资源的影响

目前,气候变化对流域水资源的影响研究主要分为两类:①历史气候变化对水资源的影响,该类研究主要侧重于当前水文气象要素的变化特征,通过对历史径流演变规律及归因因素进行分析,定量分离出气候变化对流域水资源的影响程度和贡献率;②未来气候变化对水资源的影响,这类研究注重于分析流域径流对未来气候变化的响应。针对这两种不同类型,其研究方法也有所不同。

1. 历史气候变化对水资源的影响

气候变暖是无可争辩的事实,政府间气候变化专门委员会在第四次评估报告中指出,过去一百年(1906~2005年)全球地表平均温度升高 $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$,而最近五十年的变暖速率($0.13^{\circ}\text{C} \pm 0.03^{\circ}\text{C}$)是过去一百年的近两倍(IPCC, 2007a)。全球变暖将加快区域的水循环,从而影响流域的径流过程,也有可能導致洪涝和干旱的发生(IPCC, 2007b; 2001)。因此,历史气候变化对流域水文的影响已成为学术界关注的热点问题之一,也是人类社会经济可持续发展所面临的巨大挑战之一。自20世纪80年代起,关于历史气候变化对水文水资源影响的研究已经在国内外积累了很多丰富的研究成果(Rong et al., 2015; 邵霜霜等, 2015; 贺瑞敏等, 2015; 胡彩虹等, 2013; Liu et al., 2011; Oberhänsli et al., 2011; Gautam et al., 2010; IPCC, 2007b)。从研究方法和研究思路上,可以将其概括为以下两大类:①利用气候水文要素的历史资料进行时间序列分析;②采用水文模型模拟研究人类活动时期相对于天然时期的径流变化量,来表征历史气候变化对水资源的影响程度。

1) 时间序列分析

时间序列分析方法基于长序列气候水文要素的观测资料来分析各要素在历史

演变过程中的变化特征,主要采用数理统计的方法来研究不同要素之间的关系。Roos 在 1987 年利用此方法首次发现了加利福尼亚州北部主要河流径流量的变化,并通过研究 4 条主要河流 1906~1990 年的径流量后认为,春季融雪径流的降低与降水和温度的季节变化有关;Cayan 等(2001)研究了美国西部 1957~1994 年的春季气温与径流的关系,结果表明,春季气温的上升是引起春季径流降低的主要原因;Wang 等(2007)认为黄河利津站径流降低量 51%,是由恩索(ENSO)现象引起的;Xu 等(2008)的研究表明:长江三峡以下流域夏季降水和径流量有所增加,而秋季降水和径流量下降明显;Chen 等(2009)研究了我国塔里木河上游 1958~2004 年气候水文要素的时空变化特征,得出结论:20 世纪 80 年代中期,流域温度和降水量开始显著升高,90 年代是过去五十多年中温度最高的时期,90 年代以后阿克苏河的径流量增加了 10.9%;Xu 等(2010)在塔里木河利用 1960~2007 年的观测资料研究温度与径流的关系后得出:温度对径流的影响取决于季节和位置,在山区由于融雪和冰川融化,温度对径流量的增加有积极作用,而在平原,由于夏季蒸发量的增加,温度对径流有消极作用;Xue 等(2011)利用波谱分析法研究了湄公河 1950~2005 年径流与气候变化的关系,认为中下游地区的径流量与印度洋季风的变化相关;刘志方等(2014)运用交叉小波对黑河上游野牛沟气象站 1959~2010 年和祁连气象站 1957~2010 年年降水(AP)与年均气温(AAT)、北极涛动指数(AOI)和莺落峡站(1944~2010 年)的年均径流量(AAR)进行了多尺度分析,结果表明:AOI 存在 3~5 年尺度的显著周期,AAT 存在 3 年尺度的显著周期,AP 存在 3 年和 4~6 年尺度的显著周期,AAR 存在 3 年、2.5~4 年和 5 年比较显著的周期,黑河上游径流的增加主要是受“暖湿”气候影响,降水和气温是影响径流变化的主导因素;杨鹏鹏等(2015)选取南水北调西线工程引水区 5 个水文站与相应气象站近 50 年径流、降水、温度和日照时间序列资料,首先对自相关性显著水平 5% 的序列进行去白化处理,运用 MK 法进行趋势检验和突变分析,并通过 Pearson 法(Pearson, 1982)和双累积曲线图形法对结果进行验证,结果表明:虽然引水区年径流量变化趋势总体不明显,但气候变化是流域径流量变化的主要影响因素。

2) 水文模型模拟

该类方法主要是在降水径流要素趋势变化分析的基础上划分天然时期和人类活动时期,利用天然时期数据资料建立水文模型,模拟研究人类活动时期相对于天然时期径流的变化量来表征气候变化对流域水循环要素的影响量(徐宗学, 2010)。常用的水文模型有三大类:一是系统模型,二是集总式概念性水文模型,三是分布式水文模型。发展的趋势是从集总式的概念性模型向分布式水文模型发展。

系统模型是将研究流域作为一个整体,利用输入与输出资料,建立某种关系式。常用的模型有统计回归模型和人工神经网络模型等。王钊(2004)根据基准期的数据建立降水-径流一元回归方程,输入人类活动影响期间的降水求解人类活动