

漳河流域降雨径流演变规律 及水资源优化配置研究

高云明 胡浩云 王国庆 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

漳河流域降雨径流演变规律 及水资源优化配置研究

高云明 胡浩云 王国庆 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书重点介绍水文要素变化特征的诊断方法和基于水文模拟的径流变化归因分析方法,分析漳河流域近60年实测径流变化特征,并定量评估其变化归因,以漳河为实例在供需平衡分析的基础上建立水资源优化配置模型。

本书可供水文、水资源、生态及环境等领域的科研、管理和教学人员参考使用,也可作为相关专业的本科生、研究生的专业读物。

图书在版编目(CIP)数据

漳河流域降雨径流演变规律及水资源优化配置研究 /
高云明等著. -- 北京:中国水利水电出版社,2017.6
ISBN 978-7-5170-5587-7

I. ①漳… II. ①高… III. ①漳河—流域—降雨径流
—演变—研究②漳河—流域—水资源管理—资源配置—优
化配置—研究 IV. ①TV121②TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第148446号

书 名	漳河流域降雨径流演变规律及水资源优化配置研究 ZHANGHE LIUYU JIANGYU JINGLIU YANBIAN GUILÜ JI SHUIZUYUAN YOUHUA PEIZHI YANJIU
作 者	高云明 胡浩云 王国庆 等 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 (营销中心)
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	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 296千字
版 次	2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷
定 价	60.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

漳河是海河流域南部地跨山西、河北、河南三省的重要河流，水资源开发由来已久，从战国时期西门豹治邺修建的引漳十二渠，到近代开凿的人工天河——红旗渠，古今闻名。千百年来，漳河水养育了两岸人民，支撑了流域经济社会发展。然而，进入 20 世纪 80 年代以来，受人类活动和气候变化共同影响，漳河实测径流减少尤为显著，水资源供需矛盾突出，漳河流域已成为我国水资源最短缺的地区之一，同时也一度成为全国水事矛盾最尖锐的地区之一。全面分析漳河流域降水径流变化成因、科学探寻漳河流域降雨径流演变规律和深入研究水资源优化配置，是漳河流域实施最严格水资源管理制度、支撑流域经济社会快速发展的重要基础工作。

在水利部公益性行业科研专项经费项目“漳河上游降水径流形成及演变规律研究”（项目编号：201201091）、“十三五”国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项课题“自然和人类活动对地球系统陆地水循环的影响机理”（课题编号：2016YFA0601501）、国家自然科学基金重点项目“变化环境下不同气候区河川径流变化归因定量识别研究”（项目编号：41330854）和国家自然科学基金面上项目“不同尺度流域水文循环过程对气候与植被变化的耦合响应关系及模拟”（项目编号：41371063）的支持下，本书对漳河流域降雨径流演变规律、径流变化归因及水资源优化配置等关键技术进行了深入研究。

全书共分 6 章，第 1 章介绍了本研究的科学意义、国内外研究相关进展和漳河流域概况；第 2 章介绍了水文要素变化特征的诊断方法，并对漳河流域降水时空分布、径流变化趋势、周期、变异及降雨径流关系变化进行诊断分析；第 3 章介绍了 VIC 模型和基于水文模拟的径流变化归因分析方法以及在漳河流域的应用情况；第 4 章介绍了漳河流域水资源量分析及需求预测情况；第 5 章主要介绍了水资源优化配置模型及在漳河流域的应用情况；第 6 章系统概括了主要研究结论，并提出未来研究重点。书中水量（径流量、库容）精度取四位有效数字；流量精度取三位有效数字。

本书由高云明、胡浩云、王国庆等执笔，各章节内容由项目研究的核心专家参与共同撰写，全书由高云明统稿。第 1、第 6 章由胡浩云教授（河北工

程大学)执笔,王勇、刘亮、马涛参与撰写;第2章由高云明教授级高级工程师(水利部海河水利委员会水文局)执笔,魏琳、王志国、汤欣钢、万思成、杨云霄参与了本章分析计算及撰写工作;第3章由王国庆教授(南京水利科学研究院)执笔,刘翠善、刘艳丽、鲍振鑫、金君良、万思成参与了本章分析计算及撰写工作;第4章由张展羽教授(河海大学)执笔,牛文娟、鲁冠华、李文君、林超参与了本章分析计算及撰写工作;第5章由王慧敏教授(河海大学)执笔,冯宝平、任晓敏、侯毅凯、富可荣参与了本章分析计算及撰写工作。天津市水文水资源勘测管理中心王得军教授级高级工程师和南京水利科学研究院贺瑞敏教授对全书进行了审稿。在此对所有为本书出版作出贡献的同事和朋友致以衷心感谢。

在项目执行和本书编写过程中,得到了水利部海河水利委员会水文局、河北工程大学、南京水利科学研究院、河海大学、水利部海河水利委员会漳河上游管理局等单位的大力支持,得到了河北工程大学王树谦教授、清华大学武晓峰教授和武汉大学王修贵教授等专家的指导与帮助,在此一并表示诚挚感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足和局限之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2017年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 国内外研究进展	1
1.3 漳河流域概况	10
第 2 章 漳河流域降雨径流演变规律	15
2.1 资料与分析方法	15
2.2 降水时空演变规律	21
2.3 径流演变规律	27
2.4 降雨径流关系	44
第 3 章 漳河流域径流变化归因	50
3.1 VIC 模型	50
3.2 模型参数优化技术	56
3.3 VIC 模型在漳河流域的适应性	58
3.4 径流变化归因定量识别	61
第 4 章 漳河流域水资源量分析及需求预测	69
4.1 水资源系统分区及概化	69
4.2 上游地区水资源量	72
4.3 重点区域来水量	82
4.4 水资源需求预测	89
第 5 章 漳河流域水资源优化配置	113
5.1 上游地区水资源优化配置	113
5.2 重点区域水资源优化配置	124
第 6 章 结论与展望	137
6.1 主要研究结论	137
6.2 未来研究重点	138
附录 1 上游地区水资源配置方案	140
附录 2 重点区域沿河区域水资源配置方案	170
附录 3 基市模型下重点区域四大灌区水量配置方案	172

附录 4 节水激励模型下重点区域四大灌区水量配置方案	177
附录 5 水权交易模型下重点区域四大灌区水量配置方案	182
参考文献	187

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的与意义

自 20 世纪 80 年代以来,我国多数河流实测径流量减少明显,特别是北方河流减少尤为显著。正确认识我国主要江河径流变化成因、科学分析区域水资源变化情势,是实现水资源可持续开发利用的重要保障。

漳河位于海河流域西南部,上游分清漳河和浊漳河,在河北省涉县合漳村汇合后称漳河。漳河流域属中国水资源最短缺的地区之一,人口密集,经济尤其农业相对发达,流域水资源开发利用程度已远远超过了水资源的承载能力。上游山西省境内建设了大、中、小型水库 100 多座,总库容约 14 亿 m^3 。浊漳河以下的河南省红旗渠、跃进渠以及河北省大、小跃峰渠等四大灌区(以下简称四大灌区)的总引水能力已达 $105 \text{ m}^3/\text{s}$ 。1996 年以来,河道内基流不足 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,漳河水资源已经基本上处于“吃干喝尽”状态。由于漳河水资源的时空分布与用水分布不均现象突出,且未实行全流域水资源统一调度和管理,致使上下游、左右岸水事矛盾突出,是我国水事矛盾频发地区之一。

随着人口的增加和工农业的发展,水资源的开发利用量逐年增加,经济社会发展对水资源依赖程度越来越高。《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》及实施方案明确提出,要全面推动最严格水资源管理制度贯彻落实,建立取用水总量控制指标体系。因此,正确认识降雨径流的变化成因,深入研究漳河流域降雨径流演变规律和水资源科学配置,可为漳河流域水资源的可持续开发利用、制定水量分配方案提供科学依据,对于促进流域社会经济稳定、快速和可持续发展等具有十分重要的意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水文序列分析方法

水文现象是一种自然现象,具有确定性变化规律和随机性变化规律,水文现象随时间变化的过程称为水文过程或水文时间序列。时间序列分析的一个重要内容就是分析序列的变化特性,包括趋势性、周期性、突变性等。

河川径流过程是水文学中最常见的时间序列,径流的变化通常包含“量”和“结构”的变化。前者通常是指径流总量、流量等数值上的变化,而后者则注重从径流过程线的“形状”上进行分析,它反映不同时段内径流的比例。在气候变化以及人类活动的影响下,河川径流的年内分配特征也发生着相应的变化,用于体现径流年内分配特征的指标有各



月、季径流占年径流的百分比数,汛期、非汛期占年径流的百分比数等。在20世纪80年代,汤奇成等(1982, 1983)从河川年径流的角度,给出不均匀系数的概念,讨论了年径流不均匀系数的计算方法和一些性质,并指出不均匀系数不仅可用于径流,而且可用于年降水或其他要素的年内分配分析。郑洪星等(2003)根据黄河源区主要测站1952—1997年的月天然径流资料,分析了年内分配不均匀系数、集中度和集中期、变化幅度等特性,认为20世纪90年代的径流年内分配特征较前期出现了较大的变化,突出表现在汛期径流量的减少。王金星等(2007)采用年内不均匀系数(完全调节系数)和集中度(期)等指标,从多个角度分析了中国六大江河19个重点水文站实测径流年内分配特征的变化规律。

随着时间的增长,对水文序列各值的平均值而言,或是增加或是减少,形成序列在相当长时期内向上或向下缓慢地变动,这种有一定规则的变化称为趋势。时间序列的趋势线变化既可能是线性的,也可能是非线性的。常用的趋势检验方法主要包括:滑动平均法、线性回归法、累积距平法、二次平滑法、三次样条函数法、Mann-Kendall 秩次相关检验法及 Spearman 秩次相关检验法、小波分析法等。线性回归法和滑动平均法简单明了,可以直观地给出时间序列是否具有递增或递减的趋势,并且线性方程的斜率定量表征了时间序列的平均趋势变化率;然而,这两种方法只能给出序列的演变趋势,很难定量判别趋势变化是否显著。Mann-Kendall 秩次相关检验法及 Spearman 秩次相关检验法则通过相关统计量的计算,可以定量地判别序列变化趋势是否显著,其中, Mann-Kendall 趋势检验法(简称 M-K 趋势检验法)是一种非参数统计检验方法,与参数统计检验法相比,该方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,而且计算也比较简单,是比较常用的趋势诊断方法。叶茂等(2006)采用线性回归、M-K 趋势检验方法,分析了塔里木河水资源利用及趋势,认为自1995年以来,塔里木河水资源增加趋势明显,这种现象与全球变暖不无关系。徐宗学等(2006)分析了北京地区降水的时空分布规律和黄河流域近50年降水的变化趋势。曹建廷等(2007)采用类似的方法,分析了长江源区1956—2000年径流量变化,认为长江源区年径流量在1956—2000年间呈微弱的减少趋势,该时段流域内升温明显,降水也呈微弱减少趋势,降水量减少是该时段径流量减少的直接原因。张建云等(2009)分析了黄河中游径流量在1951—2005年的变化趋势,指出,在全球变暖背景下,黄河中游花园口站实测径流量的平均年线性递减率为 6.05 亿 m^3 , M-K 统计量明显超过信度为0.05水平的临界值,序列呈现显著性减少趋势,径流量的减少是气候变化和人类活动等多种因素综合作用的结果。趋势性研究为探讨其变化原因(气候因素、人类活动)奠定了基础。

水文时间序列也会发生从一种状态过渡到另一种状态的变化特性,即表现出变异性(也称跳跃)。突变是跳跃的一种特殊形式,是瞬间行为。突变发生后,水文序列一般又保持原来的特性。水文序列中的跳跃一般是由于人为的或自然的原因引起的。例如,修筑水库前坝下最大流量序列与修建水库后经水库调节的年最大流量序列,就是人为的原因引起的跳跃;又如,一个流域若突发大面积的森林火灾,则径流量会突然变化,形成由自然引起的跳跃成分。在洪水频率分析中,通常以洪水时间序列的平稳性为基础,要求资料具有一致性。但是流域系统一旦受到干扰(例如人类活动的影响、自然灾害的发生),则其平稳性遭受破坏,发生突变而演变为非平稳性序列。对于受到干扰影响的水文序列,推估出



突变的时刻,即突变点,在洪水分析中具有实际的意义。水文变异分析中,现应用较多的几种方法包括:有序聚类分析法、游程检验法、秩和检验法、Mann-Kendall 突变检验法、R/S 法以及逐时段滑动分割模型。杨莲梅(2003)分析了40年来新疆极端降水的气候变化、发展趋势和空间分布差异,并用 Mann-Kendall 法对年极端降水量进行了突变检验;杨志峰等(2004)采用 EOF 技术分析了黄河上游降水的时空结构特征与变化,并用 Mann-Kendall 法检验了降水序列的突变现象;王国庆等(2001,2006)以黄河中游无定河为研究对象,采用有序聚类分析方法,分析了由于水土保持等人类活动引起的水文序列的突变年份,以汾河流域为研究对象,在诊断实测径流发生突变的基础上,分析了气候变化和人类活动对河川径流的影响。

年径流的多年变化,主要取决于气候因素的变化,而气候因素则取决于大气环流的特点,大气环流的变化受太阳活动制约,太阳活动具有一定的循环周期,因而年径流量多年变化也可能存在一定周期性。由于影响周期因素变化的复杂性,往往周期之间并不可通约,所以隐含在年径流量序列中的这种周期一般称为近似周期。识别周期成分的常用方法很多,有方差分析、功率谱分析、谐波分析、小波分析等方法。波谱分析方法很早就被应用到研究水文气象要素变化的周期性,其分析原理是利用傅立叶级数能够将周期函数展开为无穷多个频率为基频整数倍的谐振动之和。黄忠恕(1983)较早地出版了《波谱分析方法及其在水文气象学中的应用》;李栋梁等(1997)利用中国西北5省(自治区)90个测站,1960—1990年6—8月降水量资料,采用波谱分析及大气环流模式,对夏季降水量的空间异常特征、时间变化规律以及降水异常的主要成因进行了诊断研究;王栋等(2001)系统总结了最大熵原理在水文水资源学中的应用;Rigozo等(2005)对4种波谱分析方法进行了系统比较;S. L. Jeng等(2008)基于波谱分析对水文时间序列进行了分类;张明(2009)在对最大熵谱求解方法改进的基础上,提取了三川河流域实测径流量的周期特性。

现关于时间序列变异点的推求、周期特征的提取、变化趋势显著性的诊断有很多方法,然而不同方法分析的结果可能存在差异,如何选取有效的诊断分析方法、如何利用多种评估结果对时间序列变化特征给出比较科学的综合评估是亟须解决的科学问题。

1.2.2 人类活动对水文的影响研究

人类生产的发展,越来越快地改变着自然环境,从而在一定条件下改变水文循环状况和流域的产汇流条件。目前,快速的经济发展和人口增长对水文循环已经产生了巨大的影响,致使人们在水文计算、流域规划、水资源评价等各个方面都不可避免地考虑这种影响。

从水文循环角度出发,人类活动对水文水资源影响的主要因素包括:

(1) 引起流域水文特性变化的土地利用等下垫面变化。包括农田开垦、放牧、森林砍伐、围湖造田以及大规模城镇化建设等人类活动造成流域下垫面变化,从而改变了流域蒸发、土壤下渗、地表糙率和包气带水力传导度等天然状态下的水循环机制。

(2) 通过拦截蓄水等直接改变原有径流方式的水利工程的建设。由于我国洪涝干旱灾害严重、能源紧张等原因,造成了对水利工程的强有力的社会发展需求,在社会经济



发展的推动下,修建了一系列具有防洪、发电、灌溉以及供水等功能的水利设施。这些水利设施直接影响了河川径流、造成河道形态改变甚至是流域水系的结构变化,对自然水循环造成了直接影响。

(3) 人类直接取用水影响,包括生活用水和生产用水等。随着社会经济的发展和人们生活水平的提高,形成了生产生活用水的强大需求,人们对地表地下水大量开发开采,造成了天然水资源时空上的重新分配,进而直接影响了自然水循环的空间分布状况。

如何科学地评估人类活动对水文情势的影响已成为国内外专家学者的研究焦点。国际水文十年(IHD)和国际水文计划(IHP)自20世纪60年代就将这作为重要课题,组织各国的水文学者开展相关研究。IHP第6阶段计划的第1个主题就是全球变化与水资源,将气候变化和土地利用对水文的影响作为重要课题研究。国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心项目(GAIM/BAHC/GCTE/LUCC)也将水文模拟和土地利用变化的水文响应作为核心内容,土地利用变化不仅将直接影响到流域水资源的分布、洪涝灾害、流域管理,而且关系到社会经济的可持续发展。人类活动的水文效应也逐步引起了我国科学家的重视,1980年10月在武汉召开了“人类对水文要素影响的研究”学术交流会,拟定了展开研究的主要专题,包括水利工程、农业措施对水文要素的影响,森林的水文效应和城市化的水文效应。

对比试验是研究土地利用变化等人类活动对区域水文影响、认识水文循环规律的基本途径。1889年,在瑞士Emmental试验区就开始了森林流域与牧场流域水文特性差异的对比分析研究,并得出森林流域的洪水及径流均比牧场流域小的结论;1902年,在阿尔卑斯建立的Sperbelgraben和Rappengraben试验流域是较早研究森林水文效应的试验流域;1909年,在科罗拉多的Wagon Wheel峡谷设立了试验径流站,首先采用“控制流域法”研究森林的水文效应,并提出了选择试验流域的准则;1935年,南非的Jonkershoek森林水文研究站设立了6个对比流域,系统地深入分析了森林对水文要素的影响,同一时期,苏联设立的Valday水文实验流域也系统分析了流域水平衡要素的变化规律和各种农业、森林的水文效应;此后,北卡罗林纳的Coweeta、东非的Mokobulaan、英国的Plynlimon、印度的Niligris和澳大利亚的Perth供水区也开展了类似研究(Maidment, 2002)。Bosch和Hewlett(1982)通过对比分析世界94个流域的试验结果认为,对草地覆盖的流域来讲,当10%的面积改为松树时,年径流量将减少40mm;当10%的面积改为灌木或者落叶林时,相应的年径流量将减少10~25mm。Bavaria的研究结果表明,造林后,随着树木的生长,洪峰流量也随着削减,大部分削减出现在最初的10年,而且对于较小的暴雨,削减的比例较大。Douglas(1981)对美国Coweeta流域的研究结果认为,森林砍伐对雨洪过程的影响是渐增的,一般是洪量和雨洪历时增加,这种影响随着树林的恢复呈现对数减小。Buytaert等人(2006)利用对比试验的方法研究了放牧、耕种、种植松树等人类活动对Andean地区的水文影响;Alvarez-Rogel等(2007)基于对比观测数据(1991—1993年和2002—2004年),分析了地中海湿地人类活动引起的植被和土壤变化。

我国对人类活动影响的试验研究,始于20世纪50年代,在1958年前后,先后设立了一大批径流实验站,其中比较著名的有:安徽省的青沟、湖北省的石桥铺、浙江省的姜



湾、辽宁省的叶柏寿、湖南省的宝盖洞、水利部黄河水利委员会在陕西省设立的子洲、水利部长江水利委员会在四川省设立的凯江实验站等。郝建中(1985)分析了黄河流域韭园沟流域综合治理对年径流泥沙的影响,认为治理后的径流较治理前减少 44.9%~94.9%,尽管其中包含了降水变化的影响,但流域治理的影响也是非常明显的。周圣杰等(1985)采用相邻相似流域对比分析方法研究了水土保持措施对水文的影响,结果表明:在同一降水条件下,治理流域的平均入渗率较未治理流域增大 20%~40%,同一径流深下,较未治理的洪峰模数平均削减 59%左右;洪水越小,径流深减小的百分数越大,洪水越大,径流深减小的百分数越小,但到一定大水时,径流深的减小量不再增加,而是趋于一定值,减小范围在 8%~50%之间。扈祥来(2000)分析了黄土丘陵地森林植被对水资源的影响,对比分析结果表明,森林地区的年径流系数明显高于植被较差的流域,这点除了受流域岩性的影响外,森林植被在涵养水分和储蓄径流方面有明显的作用,对于植被好的流域,径流的年内分配也相对均匀。对于暴雨洪水而言,森林植被区的暴雨洪水径流系数明显小于植被稀少地区,说明森林植被区的下渗能力和调蓄能力较强,从而可以有效地削减洪峰,延长洪水历时,减缓洪水过程。

土地利用/覆被变化(land use/cover change, LUCC)是引起地表各种物理过程变化的主要原因之一,进而对产流规律、流域蒸散发、土壤下渗、水质、水循环产生显著影响。众多的水库、堤坝、引水工程、灌区建设等,大大改变了河川径流,对河流生态系统、河道形态等也产生了一定影响。由于大量生产、生活用水需求,人类从河湖等地表水体以及地下含水层中大量取用水,直接影响了水文循环,造成了河川径流锐减甚至断流以及大面积地下漏斗,如河北省沧州市地下水漏斗等现象。上述人类活动均是通过改变水文循环进而直接或间接影响河川径流的,而流域水文模型是对区域水文循环的定量数学描述,流域水文模拟技术的快速发展无疑为定量评估人类活动对区域水文影响的评估提供了良好的工具。

20 世纪 60 年代以来,国外许多学者采用模型模拟手段来评估 LUCC 对流域水文过程的影响。Onstad C A 等(1970)最先尝试运用水文模型预测土地利用变化对径流的影响;Legesse 等(2004)利用水文模型研究了人类取用水活动对 Abiyata 湖水位的影响;王浩等(2005)应用分布式流域水文模型 WEP_L 模型对比是否考虑人工取用水条件的模拟结果,分析了其对水文水资源的影响;王纲胜等(2006)通过建立分布式月水量平衡模型研究了人类活动在潮白河流域径流量影响的贡献率;Li 等(2007)应用生态系统模型(I-BIS)和分布式水文模型 THMB 相结合,研究了南非西部地区土地利用变化对水循环的响应;梁兆擎等(2008)基于统计的方法研究了人类活动对别拉洪河流域水文情势的影响;王国庆等(2008)以黄河中游三川河流域为例,采用流域水文模拟途径分析评估了气候变化和人类活动对该流域径流量的影响;欧春平等(2009)应用 SWAT 模型定量评估了海河流域土地覆被变化对径流、蒸发和洪峰流量的影响;Cong 等(2009)采用 GBHM 模型,基于不同气候及土地利用情景模拟出未考虑人工取用水的径流,通过该模拟径流与实际径流对比得到人工取用水对水文的定量影响;史艳华等(2009)以故县水库为例,基于 Richter 提出的 IHA 法分析了洛河流域长水站的生态水文特征变化,探求了故县水利枢纽对河流天然径流的影响;李帆等(2010)分析了葛洲坝水利枢纽工程对宜昌河段水位



—流量关系、断面形状和水位变化规律的影响。目前主要通过对比水利工程相关数据加入/不加入模型的计算结果来评价水利工程对水文的影响,如用 SWAT。

水文循环过程是一个涉及多个圈层的复杂的非线性过程,人类活动与气候变化等多个因素共同影响着水文水循环,很难直接量化两者对水文产生影响的贡献,通过长期水文观测资料的对比分析以及水文模拟天然径流量,是评估人类活动和气候变化的重要途径。

1.2.3 气候变化对水文的影响研究

气候变化通过大气环流、冰川和积雪等条件变化引起降雨、蒸发、入渗、土壤湿度、河川径流、地下水等一系列的变化,进而改变全球水循环的现状,引起水资源在时空上的重新分配,并进一步影响到水资源管理系统及经济社会系统(张建云等,2007;Mimikou,1996)。

气候变化与水循环及其相互作用是当前全球变化研究的热点和前沿问题。为了推动对全球变化及其对水循环的可能影响的研究,世界气象组织(WMO)、联合国教育、科学和文化组织(UNESCO)、联合国环境规划署(UNEP)、联合国开发计划署(UNDP)和国际水文科学协会(IAHS)等一些国际组织积极发起并推动开展了国际合作研究,制定实施了一些相应的研究计划,如:世界气候研究计划(WCRP)、国际地球生物圈计划(IGBP)、国际水文计划(UNESCO-IHP)等。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)是1988年由联合国环境规划署与世界气象组织共同组建的联合国政府间气候变化专门委员会,其主要任务是为政府决策者提供气候变化的事实和对未来气候的可能变化进行预测,以使决策者认识人类对气候系统造成的危害并采取对策。最新的IPCC技术报告专门论述了“气候变化与水”问题,总结了气候变化对水影响的最新认知,指出:观测记录和气候预估提供的大量证据表明,地球上淡水资源是脆弱的,且可能受到气候变化的强烈影响,同时给人类社会和生态系统带来一系列后果(Bates等,2008)。

利用气候情景驱动水文模型评价气候变化对水资源的影响时,采用的气候情景包括两种类型:一是根据气候变化趋势假定的气候变化情景,利用该情景主要分析水资源对气候变化的敏感性;二是全球气候模式预测的情景,分析未来气候变化对水资源的可能影响,进而评价水资源系统对气候变化的脆弱性(张建云等,2007)。

Schwarz等(1977)分析了美国东北部现有的水文条件,试图评价气候对供水的影响,研究结果表明,河川径流对气候变化十分敏感。Gleick等(1986)针对美国加州萨克拉门托流域,根据8种不同的GCMS模型输出的气温和降水结果,应用水量平衡模型研究了气候变化对该流域水文情势的影响,结果表明, CO_2 加倍将导致流域的夏季径流减少30%~60%,冬季径流量增加16%~81%;夏季土壤湿度降低14%~36%。引起这些水文响应最主要的内在机制是降雪和融雪的条件发生了显著变化。Nash等(1990)用一个修正的水平衡模型研究了科罗拉多河水文系统的响应并与之前统计模型的研究结果进行了比较,结果表明,以前采用统计模型过高地估计了各种情景(包括气温增加)下径流的减小量,并认为在选择温度变化范围内($\pm 4^\circ\text{C}$),预期的径流量变化与历史记录并无统计意义上的差异,降水是影响径流变化的主要因素。美国环境保护署根据GCMS模型的输出结果,评估了美国未来水资源情势,认为在 CO_2 倍增的情景下,西北部径流将增加



20%~60%，中部则减少 26%；在西北太平洋地区的年径流和洪水都将进一步加剧；根据假定的暖干（气温升高 2℃，降水减少 10%）和冷湿（气温降低 2℃，降水增加 10%）情景分析结果表明，在美国的大多数地区暖干情景下的水资源量只是冷湿情景下的 50%~70%左右。

中国幅员辽阔，南北气候差异大，水资源对气候变化的响应具有明显的区域性。中国学者以典型流域为研究对象，采用不同的水文模型，分析了不同气候区域典型流域水资源系统对气候变化的敏感性。假定不同的降水变化和气温变幅，采用考虑融雪的水量平衡模型、简化的新安江模型和两参数水量平衡模型分析了黄河中下游（王国庆等，2000）、海河流域（刘九夫，2000）、淮河流域（郝振纯，2000）、汉江和赣江（郭生练，2000）径流对气候变化的敏感性。叶佰生等（1996）、康尔泗等（1999）采用冰川动力模型分析了西部高寒内陆河伊犁河和黑河出山径流对气候变化的响应；英爱文等（1996）、邓慧平等（1998）分别采用 WatBal 模型和类似于 abcd 水量平衡模型的模拟技术分析了东北地区辽河流域和西南地区沱江流域水文对全球气候变化的敏感性。以上研究结果表明，径流对降水的敏感性远大于对气温的敏感性；相同变化幅度时，径流对降雨增加比对降雨减少敏感；气候过渡区的径流敏感性小于干旱区，湿润地区最弱；气温升高使得冰川对年径流的调节作用减小，可以明显增加春季径流，减少其他季节径流（张建云、王国庆等，2009）。

利用径流对降水变化响应的敏感程度或弹性系数结合全球气候模式的模拟结果，预计 21 世纪中期和后期，在人类活动引起的全球气候继续变暖情况下，长江、黄河、松花江和珠江 4 条河流的径流量都可能呈增加趋势，其中，长江和黄河增幅可能略小（任国玉等，2008）。黄艳等（2009）以三种排放情景（A1B、A2、B1）下气候模式输出成果作为径流模型的输入，模拟了长江流域径流量的可能变化趋势，认为未来 10~30 年长江流域径流量将以减小为主，2060 年以后将转变为显著增大的变化趋势。张建云等（2007）根据 SRES 情景下的未来可能气候变化，采用 VIC 模型模拟了 4 种气候情景下全国径流量的可能变化，认为，全国径流量以增加趋势为主，个别地区存在减少的可能，其中，华北和东北的个别省份减幅可能较大。特别强调的是，对未来水资源变化的评价结果在很大程度上依赖于未来的气候变化情景。限于目前对大气过程的认知水平，对未来气候变化预估存在较大的不确定性；同时，由于对水文过程认知的不足，评价模型本身也存在一定程度的不确定性，因此，对未来水资源变化预估也存在较大不确定性（贺瑞敏、刘九夫等，2008）。

1.2.4 水资源调配研究

1. 国外研究综述

国外对水资源配置最早的研究开始于 20 世纪 40 年代，Mass 从单个水库库存水量的优化调度角度研究水资源配置。进入 20 世纪 50 年代以后，随着运筹学和计算机科学的发展，水资源系统模拟技术开始出现，其中比较著名的应用有美国陆军工程师兵团（USACE）设计的密苏里河流域的多个水库调度模拟模型和 Emery 和 Meek（1960）提出的尼罗河流域水库群调度模拟模型。随着水资源模拟技术的发展，其应用领域进一步扩大，从单纯的水库调度模拟向整个流域或者地区的水资源系统模拟发展。Haimes（1975）应



用模拟模型技术对地表水库以及地下含水层的联合调度进行了研究,同年 J. A. Dracup 和 A. D. Fudmar 用系统模拟的方法对南斯拉夫 Morana 流域的水资源规划进行了研究。除了美国的这些研究之外,苏联、加拿大、英国、法国等,也都先后开始用系统模拟和系统分析方法研究水资源配置问题。

由于系统工程的原理和方法的引入,20 世纪 80 年代以后的许多水资源规划目标,都由以前的单一强调经济发展,逐步过渡到更广泛的社会需求方面,即多目标规划,尤其是 1982 年美国召开的“水资源多目标分析”会议,推动了水资源管理多目标决策技术的研究和应用。荷兰的水资源配置专家 E Romijn, M Taminga 在考虑了水的多功能性和多种利益关系的基础上,强调决策者和决策分析者之间的合作,建立了 Gelderlandt Doenthe 的水资源量分配问题的层次模型,体现了水资源配置问题的多目标和层次结构的特点。1985 年 G. Yeh 对当时的水资源配置方法进行了系统的总结,将水资源配置的方法归纳为线性规划、动态规划、非线性规划和模拟技术等几类。

随着工业化的发展,水资源配置不仅仅是水资源短缺问题,水污染问题也逐渐引起了人们的关注,因此从 20 世纪 90 年代开始,国外的水资源配置从单纯的水量配置转向水量与水质的并重,从水资源可持续利用的角度对配置问题进行研究。Watkins 和 David W Jr (1995) 在一种伴随风险和不确定性的可持续水资源规划模型框架的基础上建立了有代表性的水资源联合调度模型。该研究通过建立一个两阶段的扩展模型来解决水资源的配置问题,在第一阶段得到投资决策变量后将其代入第二阶段后可以得到运行决策变量,运用大系统的分解聚合算法求解最终的非线性混合整数规划模型。Bana (1990), El-Swaify (1998) 以及 Beinat 等 (1998) 分别利用多准则分析评估的方法来解决水资源配置中的环境问题,通过不同的数学运算法则来支持水资源配置的复杂决策。另外,还有部分学者从经济学的角度通过成本-收益分析法来进行水资源配置中的环境评估,在环境经济学的基础上进行资源配置的最优化决策。

20 世纪 90 年代中期以后,流域水资源配置模型出现了另外一个新趋势:一方面,基因算法和灰色模拟等计算技术不断引入模型中,出现了一些基于新的算法和对原有算法进行改进的水资源配置模型;另一方面,则表现为水资源管理模型与地理信息系统、水文模型和经济模型的耦合。Minsker 等 (2000) 应用遗传算法 (Genetic Algorithms) 建立了不确定性条件下的水资源配置多目标分析模型,通过遗传计算模拟自然进化过程来搜索水资源配置多目标的最优解,但从本质上看,这种算法的思路并没有跳出多目标规划寻优的范畴;Rosegrant 等 (2000) 为评价改善水资源配置和利用的效益,将经济模型与水文模型进行耦合,并把模型应用于智利的 Maipo 流域;Xu 等 (2001) 将分布式水文模型与地理信息系统有机结合,解决了传统方法不能解决的大量水资源配置方案的检验问题,同时,能形象展示决策者由于条件变化对流域水资源管理的改变,为开发流域水资源管理空间决策支持系统 (SDSS) 奠定了基础。

除了采用水资源配置模型进行配置之外,国外也有一些国家开展了以水权市场交易为基础的配置。智利的宪法规定个人或者企业在通过法律获取水权后,不仅有使用水的权利,并且还有处置水权的权利,水权可以脱离土地作为抵押品、附属担保品进行市场经济活动。Chales W. Howe 等曾以美国的科罗拉多河为例,研究了通过水权市场进行水资源



配置的优缺点。美国加州地区由于长期缺水,也开展了以水银行为核心的水权交易试点,取得了一定的实际效果。另外,澳大利亚从1994年开始也引入了水权市场交易理论进行水资源配置的改革,将水权从地权中分离出来,允许水权独立运作和流转。

2. 国内研究综述

我国在水资源科学配置方面的研究起步比欧美的研究要迟,最早是20世纪60年代以水库优化调度为先导的流域水资源配置的系列研究,这些方法发展至80年代形成了基于水库调度图的常规调度方法和以运筹学为基础的线性规划方法、非线性规划以及动态规划方法,基于寻优为目的的神经网络方法、遗传算法及其改进的一些算法(如蚁群算法)等,水资源多目标决策方法,水文模拟技术与控制方法,考虑水文随机性因素的优化方法、水资源系统模糊优化算法以及衍生的一些其他方法等。张勇传等(1982)提出在水库优化调度中将变向探索法引入动态规划来解决调度问题;马光文等(1987)提出采用关联平衡法来进行水电站群补偿调节的递阶控制,以水电站群保证出力最大为准则、供水期出力相等作为关联条件,通过上、下级反复协调迭代来求水库群调度问题的最优解,解决了库群数目的增加带来的“维数灾”问题;董子敖等(1989)考虑了随机径流的自相关关系和互相关关系,提出了一种求解串并混联水电站水库群补偿调节和调度的多目标多层次优化法。

20世纪90年代以来,我国基于系统工程理论为科学基础的水资源开发、配置与管理的理论及方法研究方面随着系统工程学科的发展,经历了从按照物理系统运动形式和规律来研究复杂系统的还原论方法,向复杂性科学与复杂系统的整体论和还原论结合的方法发展。冯尚友(1991)提出水资源大系统递阶控制理论,而后(2000)又提出水资源生态经济复合系统理论;刘国纬(1995,2000)首次把水资源系统的运行调度由以往视为结构化问题推进到视为半结构化问题的新阶段;王慧敏等(2000)提出流域复合系统理论以及流域可持续发展系统综合集成研讨体系;赵建世、王忠静(2002)提出水资源复杂适应系统配置模型;王浩、秦大庸等(2003)提出面向全属性功能的水资源配置理念;王慧敏等(2005)提出基于供应链的跨流域调水运营管理理论,基于复杂适应系统范式的水资源管理及建模等。随着计算机信息技术的飞速进步,特别是将分布式水文模型与地理信息系统有机结合,开发出流域水资源管理决策支持系统(DSS)。如金水工程东方世纪科技公司的洪水预报调度及水资源管理SRFFA系统,南瑞集团公司的WRMS流域水资源监控调度管理系统等。

进入21世纪以后,面对当今更为复杂的“人—水”关系、“人—人”关系,国内已有一些零散的从制度、政策等角度研究水资源协商管理的研究。秦大庸(2005)在初始水权分配的原则中提到在尊重历史基础上协商调整原则;王浩(2006)则进一步指出:用水现状是水权初始分配的重要参考依据,通过科学论证和民主协商确定,使其具有可操作性;徐邦斌(2006)建立了淮河流域初始水权分配协商机制,提出由水利部淮河水利委员会负责组织召开由各方代表参加的淮河流域初始水权分配协商联席会议方案;李向阳(2007)结合鄂豫丹江荆紫关水事纠纷、同民河水事纠纷、浙闽边界大岩坑水电站跨流域引水水事纠纷等8个地区水事纠纷案例,从定性分析的角度对跨界水资源管理协商的经验作了总结。从2004年开始,水利部松辽水利委员会为了减少该流域范围内水资源利用过程中的矛盾,率先开展了流域初始水权分配方面的研究和试点工作。陈丽芳等(2009)对松辽流域水资源管理制度建设进行了初步探索,在水资源管理体制、用水管理制度、水权制度、



水价机制、流域水资源统一调度方面提出了建议；粟晓玲（2009）根据石羊河流域的情况，从供水、节水、结构调整、虚拟水等措施假设不同的水资源模拟配置情景，通过计算单元优化配置模型和水资源转化模拟模型的耦合模型得到各方案的配置结果，由多目标评价函数评价各方案的优劣，提出了该流域水资源合理配置的方案。

总之，在已有的以水利工程科学为基础的水资源配置研究中，流域水资源配置从最初小规模、单目标的水库优化调度，发展到较大规模、多目标、全局优化算法的流域水资源合理配置，并且随着研究的深入，由于常规数学规划方法的局限性已不能满足规划者的要求，因此各种方法的联合运用以及人工智能等计算机模拟技术的应用不断出现。

随着经济规模的不断扩大和人口的增长，人类对水资源的需求也越来越大，水资源的缺口不断增大，因此要在流域水资源的管理中局部引入市场化的模式来进行水资源的优化配置。在可持续发展和市场环境的大背景下，不同类型主体的利益取向不同，如何对这些不同的利益主体之间的利益关系进行协调以达到利益均衡，从而最终形成各方都比较满意的方案成了流域水资源配置新的目标和任务。

1.3 漳河流域概况

1.3.1 河流水系

漳河位于海河流域西南部，属漳卫河水系一级支流，跨山西、河北、河南三省。上游分清漳河和浊漳河两条支流，在河北省涉县合漳村汇合后始称漳河。漳河自浊漳河南源源头至漳河、卫河汇流处徐万仓，全长 460km，流域总面积 19220km²，其中观台水文站断面以上流域面积 17800km²（本书重点研究区域，以下简称漳河流域）。

漳河流域支流众多，水系呈扇形分布，上源可分东、西两区。东区为石质山区，山高谷深，岩石裸露，坡陡流急，含沙量小，故称清漳河；西区为山丘和盆地区，盆地内黄土覆盖较厚，植被较差，水土流失严重，洪水挟带泥沙较多，故称浊漳河。

清漳河流域有支流清漳东源和清漳西源。清漳东源发源于山西省昔阳县西寨乡白家川村，东南流至左权县下交漳村汇清漳西源；清漳西源发源于山西省和顺县横岭镇上北社村虎子沟，东南流经石拐、横岭、左权县至下交漳村，东、西两源汇流后称清漳河，继续向东南经黎城下清泉村出山西省进河北省，流经刘家庄、涉县、匡门口至合漳村汇浊漳河。清漳河东、西两源所经地区峡谷小盆地交错，峡谷宽约 200m，河道比降 18‰。

浊漳河发源于太行山区，上游有浊漳南源、浊漳西源和浊漳北源三大支流。浊漳南源发源于山西省长子县石哲镇良坪村发鸠山，浊漳西源发源于山西省沁县漳源镇余岩村，浊漳北源发源于山西省榆社县社城镇大牛村三县窑。南源由南向北，西源由西北向东南汇合于襄垣县甘村，然后流向西北与北源汇合于襄垣县小蛟村，三源合流后称浊漳河，由西北向东南流经黎城、潞城、平顺三县流出山西省，在三省桥以下为河南省、河北省界河，在河北省涉县合漳村与清漳河汇合后称漳河，向东流至岳城水库出山进入平原，再向东流至河北省馆陶县徐万仓与卫河汇合。

浊漳河三大支流上分别建有漳泽、后湾、关河 3 座大型水库；在侯（侯壁）匡（匡门