

FANLIUYU SHUIZIJYUAN XITONG YOUHUA

-YI NANSHUIBEIDIAO XIXIAN GONGCHENG WEILI

泛流域水资源系统优化

以南水北调西线工程为例

彭少明 张新海 王煜 张玫 李福生 等著



黄河水利出版社

泛流域水资源系统优化

——以南水北调西线工程为例

彭少明 张新海 王 煜 等著
张 玫 李福生

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以泛流域水系统为对象、以水循环为科学基础、以泛流域的水资源合理调配为中心,研究多层次、多目标、群决策方法,在分析水资源配置系统复杂性及其复杂适应机制的基础上,构架全新的泛流域水资源调配系统分析和配置的模型、决策机制。以压力-状态-响应(PSR法)为基本研究思路,预测区域经济社会发展对水资源的需求(压力),评价区域水系统安全(状态),提出与流域国民经济相协调的调水对策与分配方案(响应)。

本书可作为大专院校学生、研究人员以及水利技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

泛流域水资源系统优化/彭少明等著. —郑州:黄河水利出版社,2013.7

ISBN 978-7-5509-0511-5

I. ①泛… II. ①彭… III. ①流域-水资源管理-系统优化 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 157323 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhslwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:11.75

字数:270千字

印数:1—1 000

版次:2013年7月第1版

印次:2013年7月第1次印刷

定价:36.00元

前言

黄河流域是我国主要的粮食产区,粮食产量占全国粮食总产量的 12%;黄河流域矿产资源富集,煤炭、石油、天然气等储量占全国总储量的 60% 以上;黄河流域是华北和京津地区的重要生态屏障,对阻止沙漠东扩起关键作用。因此,黄河流域对于保障我国能源安全、粮食安全和生态安全具有十分重要的战略意义和不可替代的作用。

然而,由于黄河流域及西北地区水资源短缺,以及近年来在气候变化和人类活动双重影响下水资源量衰减显著(据全国水资源综合规划成果,1956~2000 年系列较 1919~1975 年系列黄河水资源量减少了 45 亿 m^3),生态环境不断恶化。水资源短缺成为制约区域经济发展的关键因素,严重影响了我国西部大开发战略的推进。

南水北调西线工程是实现我国水资源优化配置的战略举措。从中长期来看,跨流域调水是解决黄河及西北地区缺水、改善生态环境、支撑经济社会快速协调发展的根本途径,缓解黄河流域水资源的供需矛盾,减轻生态环境脆弱地区的环境压力,遏制水土流失、土地沙漠化发展的趋势,逐步实现人与自然的和谐相处。南水北调西线工程合理调水规模及其配置是一个涉及多水源、多地区、多目标、多用途的高维、跨学科、复杂的超大系统工程问题,需要做到全面规划、统筹调配,经济发展用水和河道生态环境用水并重,公平和效益兼顾,全面提高社会总福利水平和水资源可承载能力,因此开展对南水北调西线工程的水资源优化配置关键技术的研究具有十分重大的理论与现实意义。

本书是在“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调水资源综合配置关键技术研究”(2006BAB04A16)的子课题研究成果基础上的浓缩提炼,主要研究了西线工程的合理调水规模、调水时机以及调水量的合理分配等重大问题,在河川径流演变、水资源系统安全评价以及泛流域水资源系统优化问题等方面实现了一系列关键技术的创新,为南水北调西线工程的战略决策提供了科技支撑。

本书共分 9 章:第 1 章绪论,介绍了研究背景,国内外研究状况以及研究技术路线;第 2 章南水北调西线一期工程总体布局,介绍调水河流、河段以及工程的布局方案;第 3 章调水河流径流时空变化规律分析与预测,将最大熵谱法和小波分析方法结合运用于调水河流径流的周期规律识别,把灰色理论与自记忆模型理论相结合建立具有动力微分方程的预测模型,分析调水河流径流演变趋势;第 4 章调水河流的可调水量研究,基于对调水河流经济社会及生态环境的需求分析,提出各调水河流的最大可调水量;第 5 章黄河水资源供需形势,分析了未来不同时期、多种措施下黄河水资源供需形势和缺水状况,论证了南水北调西线工程合理生效时机;第 6 章区域水资源安全研究与受水区的选择,建立了水资源安全评价的压力-状态-响应(PSR)模型,评价了黄河流域各地区水资源安全状况,并在此基础上筛选了南水北调西线工程的受水区;第 7 章合理调水规模及其优化配置研究,将调水区域与受水区统一建立泛流域配置模型系统,研究求解方法,并提出了一套优化的调水规模和调水的优化配置方案;第 8 章基于 GIS 的黄河流域水资源配置决策支持

系统设计与开发,利用交互决策模式,为泛流域水系统优化提供了支持工具;第9章研究结论与展望,系统地总结了本书研究的主要结论,并展望了跨流域调水系统研究的方向。

本书撰稿人如下:第1章由王煜、彭少明撰写,李福生校核;第2章由王煜、张新海撰写,张玫校核;第3章由王煜、彭少明撰写,张新海校核;第4章由张玫、彭少明、李福生撰写,王煜校核;第5章由张新海、王煜、彭少明、杨立彬撰写,张玫校核;第6章由彭少明、王煜、靖娟撰写,张新海校核;第7章由彭少明、王煜、靖娟撰写,张玫校核;第8章由王煜、程冀、张新海撰写,彭少明校核;第9章由彭少明、王煜撰写,张新海校核。全书由彭少明、张新海、王煜统稿。

本书的编写得到了中国水利水电科学研究院王浩院士,中国工程院陈志凯院士,黄河水利委员会副主任、总工程师薛松贵教授,黄河水利委员会原副主任、总工程师陈效国教授的指导,在此表示衷心的感谢。感谢在成书过程中,韩侠、李清杰、侯红雨、魏洪涛、陈红莉、周丽艳、赵麦换、付永锋、肖素君、杨国宪等同事所做的工作。向所有支持本书出版的单位及个人一并表示感谢!

由于南水北调西线工程范围广、泛流域水资源系统问题复杂,作者水平有限,加之时间仓促,对于泛流域水资源系统优化问题研究还不够深入,提出的理论方法还不尽完善,难免有所纰漏,敬请广大读者批评指正。

作 者

2012 年 9 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 国内外跨流域调水工程概况	(2)
1.3 跨流域水资源优化配置研究进展	(5)
1.4 研究技术路线	(8)
第 2 章 南水北调西线一期工程总体布局	(10)
2.1 调水河流及调水河段	(10)
2.2 工程总布置	(11)
第 3 章 调水河流径流时空变化规律分析与预测	(14)
3.1 调水河流概况	(14)
3.2 调水坝址河川径流系列特征分析	(15)
3.3 调水坝址径流的变化周期研究	(17)
3.4 径流的变化趋势研究	(29)
3.5 径流过程的灰色自记忆预测	(32)
3.6 径流变化对可调水量的影响	(42)
3.7 小 结	(43)
第 4 章 调水河流的可调水量研究	(45)
4.1 调水河流的供需分析	(45)
4.2 调水坝址下游的生态环境需水量研究	(48)
4.3 可调水量分析	(59)
4.4 小 结	(62)
第 5 章 黄河水资源供需形势	(63)
5.1 黄河流域在我国战略格局中的定位	(63)
5.2 黄河河道内基本生态环境需水量	(64)
5.3 黄河流域经济社会发展及其对水资源的需求	(72)
5.4 水资源供需分析	(84)
5.5 缓解黄河水资源短缺的途径	(90)
5.6 南水北调适宜的调水时机	(93)
5.7 小 结	(94)
第 6 章 区域水资源安全研究与受水区的选择	(96)
6.1 区域水资源安全及其研究概况	(96)
6.2 水资源安全(PSR)评价	(97)

6.3	水资源安全评价模型与方法	(99)
6.4	南水北调西线工程调水目标	(114)
6.5	南水北调西线一期工程受水区选择	(115)
6.6	小 结	(117)
第7章	合理调水规模及其优化配置研究	(118)
7.1	泛流域水资源系统的认识	(118)
7.2	泛流域水资源优化配置模型	(118)
7.3	模型运行主要参数	(134)
7.4	模型优化结果	(152)
7.5	推荐方案调水影响	(160)
7.6	小 结	(167)
第8章	基于GIS的黄河流域水资源配置决策支持系统设计与开发	(168)
8.1	系统概述	(168)
8.2	系统开发原则及功能	(168)
8.3	系统结构设计	(170)
8.4	系统功能模块设计与开发	(171)
8.5	数据库系统结构设计	(173)
8.6	系统界面设计与开发	(173)
8.7	小 结	(175)
第9章	研究结论与展望	(176)
9.1	主要研究结论	(176)
9.2	展 望	(177)
参考文献		(178)

第1章 绪论

1.1 研究背景

黄河是我国西北、华北地区的重要水源。随着经济社会的迅速发展和西部大开发战略的全面实施,国民经济用水大量增加,黄河水资源供需矛盾日益突出。黄河正面临水资源短缺、洪水灾害加剧、生态环境恶化三大问题交织的严峻局面:

(1) 水资源供需失衡,缺水断流日趋严重。黄河流域及其邻近地区对黄河的供水需求,远远超过了黄河水资源的承载能力,供需矛盾日益尖锐,国民经济用水大量挤占河道内生态环境用水,导致河道频繁断流、二级悬河日益加剧,水资源短缺已成为制约流域可持续发展的“瓶颈”。

(2) 洪灾威胁依然存在,“小水大灾”特点凸显。黄河一向以洪水频繁、泥沙严重而闻名于世,虽然水资源贫乏,但暴雨集中,含沙量大,大量泥沙进入下游后不能全部输送入海,特别是河道断流的影响,造成河床淤积,河道过洪能力降低,形成了“小洪峰,高水位,大漫滩,大灾害”的不利局面。

(3) 生态环境持续恶化。黄河流域生态环境恶化的问题,突出表现在上游宁蒙河段泥沙淤积、中游黄土高原地区的水土流失、干支流的水污染和下游断流引起的一系列生态问题。断流也使黄河三角洲湿地水环境条件失衡,严重威胁到湿地保护区的水生生物、野生植物的生存,导致生态环境系统的退化和生物多样性减少。同时,在河道内流量减小的情况下,水体自净能力降低,污染物在河道内大量积存,水质严重恶化。此外,黄河上中游段地处干旱、半干旱地区,水资源短缺,生态环境十分脆弱。由于长期以来人类过度开发利用自然资源,生态系统遭到严重破坏,并呈现恶化的趋势,土壤沙漠化、草场退化、荒漠面积扩大和土地盐渍化加重。

黄河具有以上三大问题,因此是世界上最复杂难治的河流。导致上述问题的根本性原因在于:黄河流域水资源匮乏,人类对水资源的开发利用超过了其承载能力,对水资源的不合理开发和过度利用导致了水资源系统功能的衰退。水资源短缺问题已经对维持黄河本体的健康生命和流域经济社会的可持续发展构成严重威胁。

南水北调西线工程是实现我国水资源优化配置的战略举措,是一项超大型的基础设施工程,是解决黄河及其邻近地区水资源严重短缺的一项不可替代的战略性工程措施。从中长期来看,实施跨流域调水,从水量丰沛的长江上游干支流调水入黄河是解决西北地区缺水、改善生态环境的根本途径,可以从一定程度上解决黄河水资源短缺问题,同时可协调东、中、西部经济社会发展对水资源的需求关系,遏制水土流失、土地沙漠化发展的趋势,减轻生态环境脆弱地区的环境压力,恢复天然植被,逐步实现人与自然的和谐相处,是支撑 21 世纪黄河流域可持续发展的根本措施。西线调水对于保证和促进华北与西北地

区的经济发展、生态环境改善和社会稳定都具有十分重要的战略意义。

跨流域调水和水资源配置密不可分,水资源的持续高效利用和人类经济社会的发展息息相关。南水北调西线工程合理调水规模及其配置是一个涉及多水源、多地区、多目标、多用途的高维、跨学科、复杂的系统工程问题,需要做到全面规划、统筹调配,经济发展用水和河道生态环境用水并重,公平和效益兼顾,全面提高社会总福利水平和水资源可承载能力。因此,需要利用现代理论技术,研究泛流域水资源优化调配理论和方法,提出一套合理的调水规模和高效率的水量配置方案,为复杂条件下的跨流域调水工程的规划、设计和管理提供科技支撑。

1.2 国内外跨流域调水工程概况

1.2.1 国外跨流域调水工程及其效果

跨流域调水工程是人类为了改善生存环境、发展经济而实施的改变水资源天然分布状态,解决产水和用水需求异地性矛盾,实现水资源在时间和空间上重新配置的工程调控措施。

据有关史料记载,跨流域调水工程的发展历史悠久,早在公元前 2400 年前古埃及兴建了世界上第一条跨流域调水工程,引尼罗河水灌溉沿线土地,发展为今埃塞俄比亚境内南部的灌溉和航运,促进了埃及文明的发展和繁荣。但直到 19 世纪中叶,才开始大量兴建跨流域调水工程,20 世纪 50 年代以来,国外实施了大规模的跨流域调水工程规划和建设,其中年调水量超过 10 亿 m^3 的大型跨流域调水工程就有 19 项。目前跨流域调水的项目几乎涉及世界各个地区,据不完全统计,国外已有 39 个国家建成了 345 项调水工程(不包括年调水量 1000 万 m^3 以下的小型引水工程),调水量约 6000 亿 m^3 。由于国情、水资源条件的不同,国外调水工程的调水目标、调度运行方式、管理方式各异。下面介绍几个典型的国外调水工程:

(1)巴基斯坦西水东调工程,从印度河自流引水向巴基斯坦东部地区供水,共建 8 条输水渠,总长 622 km ,输水流量 $116 \sim 614 \text{ m}^3/\text{s}$,是目前世界上调水量最大的工程。

(2)美国中央河谷工程,从萨克拉门托流域引水,经 1151 m 高扬程提水泵站,向圣华金三角洲地区供水,输水渠道总长 800 km ,年调水量 37 亿 m^3 ,是最早建成的单级提水扬程最大(达 857 m)的跨流域调水工程。

(3)美国加利福尼亚州调水工程,从萨克拉门托河左岸支流费瑟河引水,经 7 级 22 座大型提水泵站(总扬程达 2085 m)提水输送 1318 km 至加州南部地区,是目前调水扬程最高、输水距离最长的跨流域调水工程。

(4)澳大利亚雪山调水工程,从雪山河向墨累河水系调水,利用自然落差建立水电站 7 座,总装机容量 375.6 万 kW ,年发电量 $50 \text{ 亿 kW} \cdot \text{h}$,是目前世界上装机容量最大的跨流域调水发电工程。

(5)秘鲁马赫斯-西瓜斯调水工程,建在安第斯山区,全部在海拔 $3600 \sim 4200 \text{ m}$ 的

高原上施工,工程引水流量为 $260 \text{ m}^3/\text{s}$,灌溉干旱区耕地面积为 90 万亩^①,是迄今为止世界上已建的海拔最高的调水工程,开创了高山地区调水的先河。

(6) 哈萨克斯坦额尔齐斯调水工程,年调水量 25 亿 m^3 ,输水沿线有 22 级提水泵站共 26 座,总扬程 418 m,是目前世界上梯级泵站级数最多的大流量、低扬程跨流域调水工程。

(7) 加拿大调水工程,在 20 世纪 50 ~ 90 年代加拿大实施了大量的调水工程。根据加拿大环境保护部门的资料,到 1985 年加拿大南方 9 个省共实施了 60 项调水工程,年总调水量为 1 410 亿 m^3 ,其中 95% 的调水用于水力发电。

(8) 德国巴伐利亚调水工程,以生态环保为主要目的,从阿尔特米尔河和多瑙河调水 1.5 亿 m^3 至雷格尼兹河和美因河。

(9) 南非莱索托高原调水工程,跨莱索托和南非两国,调引莱索托国家境内 Senqu 河一半的水量送到南非 Vaal 河,工程于 2004 年 3 月竣工,年调水量 7.8 亿 m^3 ,设计输水流量 $28.5 \text{ m}^3/\text{s}$,调水量占河道径流量的 74% 左右。

(10) 利比亚人工运河工程,以地下水为调水水源,年调水量为 25 亿 m^3 ,输水总干线长 4 500 km,现第一、二期工程已经结束,第三期正在施工之中。利比亚人工运河工程是世界上已建和在建的最长的管道调水工程。

(11) 希腊雅典调水二期工程,因连续大旱,坝址处的最小下泄基流 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$,年调水量占坝址处径流量的 72% ~ 85%。

跨流域调水工程在改善地区水资源状况、促进自然资源的合理开发利用、提高人类生存环境的质量、促进社会进步和经济发展等方面都有着不可替代的重要作用,工程调水不仅能促进人类的生存和发展,而且能带来巨大的社会、经济和生态环境效益。但跨流域调水人为地改变了地区水情,改变了原有的生态环境,打破了原有的生态平衡,因此跨流域调水存在双重的影响。

1.2.1.1 跨流域调水的有利影响

跨流域调水工程可改善缺水地区的生态状况和人类的自然生存环境,促进人与自然的和谐发展;提高抗旱和防洪能力,最大限度地减少灾害损失;改变缺水地区的经济结构,促进缺水地区的工业发展,从而增加工农业净产值。因此,跨流域调水的有利影响如下:

(1) 调水能改善区域水资源供需形势。通过调入水量的补充,增加了受水区水资源可利用量,缓解了受水区水资源短缺的局面。

(2) 调水有利于水循环。调水使受水区增加了广阔的水域,导致大气圈与含水层之间的垂直水气交换加强,增加地下水入渗和回灌,控制和防止地面沉降对环境的危害,有利于水循环。

(3) 调水能形成湿地。调水长年形成的湿地,可净化污水和空气,汇集和储存水分,补偿调节江湖水量,调节气候,有助于形成食物链基地,为珍稀和濒危野生动物提供栖息的场所,保护生物多样性。

(4) 调水能改善水质和环境。调水量增加,使径污比增高、水质控制条件趋于稳定,

① 1 亩 = $1/15 \text{ hm}^2$,全书同。

改善水质,改善和美化生态环境,进一步促进休闲和旅游业的发展。

(5)调水灌溉有利于环境的良性循环。调水灌溉后,可以改变灌区的各种特性,如地形、地貌、水面、森林、农田、草地、土壤、植被、陆生生物、水生生物和城镇等,使生态环境朝有利的方向发展。

1.2.1.2 跨流域调水的不利影响

跨流域调水工程的一大特点就是水资源的再分配,调水区水资源量的减少会对生态环境和经济社会的不利影响,其主要不利影响如下:

(1)影响经济社会发展。调水使调水区水资源量减少,如果不能充分考虑调水区自身发展需求,经济社会发展用水量的减少会在一定程度上影响调水区发展,对调水河流航道的航运和发电影响尤为明显。

(2)影响调水区生态安全。调水致使调水区河道水量减少,如果影响河道内生态环境水量以及沿河湿地,将危及河道内及湿地生态系统稳定。

(3)淹没和移民问题。跨流域兴建的大型水库、输水渠道等工程,造成大范围的土地淹没和占压,移民被迫搬迁或重新安置,给安置区增加土地负担。

(4)水污染问题。调水工程的源头和沿线范围内会有许多污染源,如果处理不当,将会调来受污染的水,加剧受水地区的水污染程度。

(5)河口咸水入侵问题。在水量调出区的下游及河口地区,因下泄流量减少,如调度不当,将引起河口咸水倒灌,水质恶化,破坏下游及河口的生态环境。

1.2.2 国内跨流域调水工程概况

我国是世界上最早进行调水工程建设国家之一,早在2 000多年前就建造了著名的都江堰、灵渠等。新中国成立以来,我国跨流域调水工程得到长足发展,为了解决缺水城市和水地区的水资源紧张状况,我国修建了20座大型跨流域调水工程。

新中国成立后,我国跨流域调水工程的建设更加蓬勃发展,综合利用跨流域调水工程已达12处,居世界第3位,年调水量约156亿 m^3 ,其中最著名的跨流域调水工程有:南水北调工程、江苏省的江水北调工程、广东省的东深供水工程、引滦工程、引黄济青工程、引大入秦工程等。自20世纪70年代以来,我国不少城市发生了水危机,先后兴建了引碧入连(大连)、引滦入津(天津)、引黄济青(青岛)、引松入长(长春)、引黄入晋(山西)等调水工程,这些调水工程都以城市供水为主,在推动经济社会发展和生态环境建设方面发挥了重要作用,在运行调度管理方面积累了丰富的经验。

南水北调工程是实现我国水资源优化配置的战略举措,是一项超大型的基础设施工程,是解决京、津、华北地区、黄淮海平原和黄河上中游地区水资源严重短缺的一项不可替代的战略性工程措施。南水北调总体规划分东线、中线和西线三条调水线路。通过三条调水线路与长江、黄河、淮河和海河四大江河的联系,构成以“四横三纵”为主体的总体布局,实现我国水资源南北调配、东西互济的合理配置格局。2002年我国南水北调东线工程正式开工,这是目前全世界正在实施的最大规模的调水工程,也是我国实施跨流域调水的标志性工程。

1.2.2.1 东线工程

利用江苏省已有的江水北调工程,逐步扩大调水规模并延长输水线路。东线工程从长江下游扬州抽引长江水,利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送,并连接起调蓄作用的洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖。出东平湖后分两路输水:一路向北,在位山附近经隧洞穿过黄河;另一路向东,通过胶东地区输水干线经济南输水到烟台、威海。

1.2.2.2 中线工程

从加坝扩容后的丹江口水库陶岔渠首闸引水,沿唐白河流域西侧过长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口后,经黄淮海平原西部边缘,在郑州以西孤柏嘴处穿过黄河,继续沿京广铁路西侧北上,可基本自流到北京、天津。

1.2.2.3 西线工程

在长江上游通天河、支流雅砻江和大渡河上游筑坝建库,开凿穿过长江与黄河的分水岭巴颜喀拉山的输水隧洞,调长江水入黄河上游。西线工程的供水目标主要是解决涉及青、甘、宁、蒙、陕、晋等6省(自治区)黄河上中游地区和渭河关中平原的缺水问题。结合兴建黄河干流上的骨干水利枢纽工程,还可以向邻近黄河流域的甘肃河西走廊地区供水,必要时也可向黄河下游补水。

1.2.3 跨流域调水工程分类

跨流域调水工程按功能可以划分为以下六种类型:

- (1)以航运为主体的跨流域调水工程,如中国古代的京杭大运河等。
- (2)以灌溉为主的跨流域灌溉工程,如甘肃省的引大入秦工程等。
- (3)以供水为主的跨流域供水工程,如山东省的引黄济青工程、广东省的东深供水工程等。
- (4)以水电开发为主的跨流域水电开发工程,如澳大利亚的雪山工程、我国云南省的以礼河梯级水电站开发工程等。
- (5)以除害为主要目的的跨流域分洪工程,如江苏、山东两省的沂沭泗水系供水东调南下工程等。
- (6)跨流域综合开发利用工程,如中国南水北调工程和美国中央河谷工程等。

大型跨流域调水工程通常具有发电、供水、航运、灌溉、防洪、旅游及改善生态环境等目标和用途。

1.3 跨流域水资源优化配置研究进展

1.3.1 跨流域水资源优化研究进展

跨流域调水(Interbasin Water Transfer, IWT)是典型的大系统,结构复杂,涉及多水源、多地区、多目标、多用途的高维、跨学科、复杂的系统工程问题。

国外在跨流域调水方面做了大量研究,涉及跨流域调水的技术、经济、社会、法律和法规等方面。Grigg Neil 在《水资源管理原理、规则和实例》中全面介绍了水资源管理涉及的

技术、理论、应用进展和现状,并通过具体实例阐述了水资源管理规划、设计中遇到的问题;LeMoigne G 就涉及跨流域调水的水市场建立和政策制定等方面进行了论述;Loomis 论述了大型调水项目的环境影响评价理论和方法;在美国西部水资源管理委员会的报告《西部调水:效率、公平和环境》中全面论述了跨流域调水在调出、调入水资源方面产生的环境问题,如何公平处理水权,平衡各方利益,以及如何提高跨流域调水的效率。

国内许多专家及学者对跨流域调水的各个方面都进行了深入研究。刘昌明研究了跨流域调水对环境影响的过程,将其归纳为调水—改变河流原来的水文情势—自然环境变化—经济社会变化的模式,并以此分析、评价南水北调对生态环境的影响。柴国荣等从经济分析的角度,分析水资源的经济特点,结合南水北调中线工程,对水资源跨流域配置的市场供求、成本收益等资源经济学问题进行阐述,并对水资源跨流域配置的利益分配机制进行了探讨。赵建世等基于复杂适应系统理论,建立流域水资源系统整体模型,分析研究流域水资源管理和配置。模型将水资源系统中的水文、生产、生活、生态环境和管理制度等子系统的相互作用通过内生变量进行联接,提出了求解这个高维度非线性模型的嵌套遗传算法,并以南水北调西线工程的合理调水量及其边际效益分析为例进行了实证研究。冯耀龙等从跨流域调水的合理性分析入手,论证了合理确定调水量的问题是跨流域调水规划决策面临的核心问题,以水资源承载力为切入点分析跨流域调水合理性的思想,从水资源承载力分析的角度,提出了跨流域调水应遵循的几条原则,并通过模糊数学方法建立了各原则实现程度评价的隶属函数,给出了跨流域调水合理性评价的综合评价方法,最后以引滦入津跨流域调水系统为对象,分析评价了 2000 年度引滦入津调水量的合理性。王宏江研究了跨流域调水系统水资源承载力体系和水价、水市场、水质管理及核心枢纽优化调度问题,提出了区域水资源组成量与质统一描述的矩阵表达式,将水资源承载力运用到跨流域调水系统调水合理性的研究中,对跨流域调水系统进行优化调度,提出跨流域调水系统水环境质量管理模糊优化模型。

综上所述,当前水资源调配研究大多针对特定地区和(或)特定流域来开展,南水北调西线工程涉及长江、黄河、淮河、海河四大流域,其水量调配过程极其复杂,涉及众多水利工程,需研究调水与当地水资源之间以及水利工程之间的联合优化调度,以协调好系统内各地区、各部门之间的用水矛盾,促进系统内社会经济发展和生态环境恢复。

1.3.2 水资源安全研究进展

全球可利用的水资源有限,随着人口的增长,需水量的增加,人类活动的加剧,尤其是污染物排放量的增加等,21 世纪全球水资源面临的压力将逐渐增加。如何在满足可持续发展的条件下,保证水资源的安全,是水资源学研究面临的一个十分严峻又富有挑战性和方向性的问题。

在这种形势下,20 世纪 90 年代以后有关国际组织实施了一系列国际水科学计划,如国际水文计划、世界气候研究计划、国际地圈生物圈计划、全球能量与水分循环 21 世纪研究计划等,目的是从全球、区域和流域不同尺度和交叉学科途径,探讨环境变化下的水资源安全问题。另外,联合国环境规划署(UNEP)、联合国开发计划署(UNDP)、国际能源机构(IEA)、经济合作与发展组织(OECD)、世界银行(WB)、联合国粮食及农业组织

(FAO)、世界资源研究院(WRI)、美国未来资源研究所(RFF)等国际研究机构,都或多或少地对水资源安全给予关注。

2000年3月,在荷兰海牙召开了“第二届世界水论坛及部长级会议”。会议主题是“水的安全:从洞察到行动”。全世界140多个国家的首脑或部长和3000名科学家出席会议,指出21世纪水资源安全面临7个主要挑战:满足基本需求、保护生态、食品安全、水资源共享、处理灾害、水价值、科学管水。因此,水资源安全已经成为水资源研究的国家前沿热点,受到世界范围的注目。此次会议通过了关于21世纪确保水安全的《海牙宣言》,并制订了相关行动计划。

2006年3月,21世纪世界水资源委员会提出《世界水资源开发报告》,在研究方法上建立了全球水资源预测模型,其水资源安全研究的总体思路是对世界各个国家及地区的水资源量、水资源可利用量和人口进行预测,并根据人类生活和生产的人均、地均水量指标划分水资源的余缺程度分区,识别水资源危机区域,并提出相应对策。

我国的水资源安全研究起步略晚于国际同类研究,但发展迅速。自1980年以来,华北地区持续出现干旱与缺水危机,推动了我国水资源科学研究工作的发展。在“六五”期间设立了“华北地区水资源评价”项目;在“七五”期间设立了“华北地区及山西能源基地水资源研究”项目;在“八五”期间设立了“黄河治理与水资源研究”项目;在“九五”期间设立了“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”和“黄河中下游水资源开发利用及河道清淤关键技术研究”项目等,进一步将水资源开发利用与区域经济发展和生态环境保护结合起来;“十一五”国家科技支撑计划项目“黄河流域生态修复关键技术研究”以及国家重大基础科学研究计划(973项目)设立的“黄河流域水资源演化与可再生性维持机制”项目系统分析了黄河流域水资源问题,并提出水资源合理调控和生态修复的对策。以上项目,虽然主要是研究水资源的开发利用,但也从不同方面涉及了水资源安全问题。

从20世纪80年代到2008年先后完成了全国第一次与第二次水资源评价工作,摸清了我国水资源的家底与基本变化情势;在应用基础研究方面,提出了“四水”转化规律,揭示了地表水资源量和地下水资源量之间的内在联系,明确了水资源形成与演化的机制及其在空间和时间上的变化规律;在应用上则是根据“四水”转化规律提出了地表水和地下水补偿调节的概念、方法与模型,对缓解缺水地区的工农业用水矛盾起到了很大的推动作用。接着,提出了基于宏观经济的区域水资源优化配置理论与方法,揭示了近期与远期之间、有关地区之间、区域发展的诸目标之间、水资源需求与供给之间、水量与水质之间的基本规律,为需水管理、供水管理、水质管理和水价管理中有关政策的制定提供了依据。进而,针对我国西北内陆干旱区的特点,注意到突出水资源开发利用过程中的生态环境保护问题,从经济与水的关系研究拓展为经济、生态环境与水的相互关系研究。在应用基础方面则致力于与水有关的生态环境问题、考虑经济发展与生态环境保护条件下的水资源合理配置方法、干旱内陆区水资源承载能力计算方法等问题研究,开展了水资源开发利用过程中的生态环境保护及经济发展问题研究等,有力地推动了我国水资源安全研究的深入开展。

1.4 研究技术路线

基于跨流域调水的泛流域水资源系统是一个极其复杂的巨型系统,调水的合理配置要求在宏观层面上协调调水河流与受水河流之间、流域经济与生态之间、区域与区域之间的用水需求,在微观层面上协调区域内城市与农村、不同水源、不同行业、不同配置措施之间的关系,因此要求所构建的模型既能实现跨流域调水工程水资源配置中多目标、层次化和群决策的方案优选,又能实现整体优化下局部模拟和优化。

以压力-状态-响应(PSR法)为基本研究思路,通过预测区域经济社会发展对水资源的需求(压力),进行区域水系统安全评价(状态),提出与流域国民经济相协调的调水对策与分配方案(响应)。

(1) 基于水资源安全理论,开展南水北调西线工程调水时机选择、受水范围与调水量优化配置的研究,确定供水目标与受水范围,并研究确定西线调水复杂大系统的优化理论、技术、方法,提出调水的配置方案。

研究以区域水安全系统危机为对象,分析、界定水安全系统危机的内涵与外延,综合考虑水量、水质、生态环境的可生存性及经济社会的可持续等方面,深入探讨区域水安全系统危机的诱发、传播及调控机制,构建区域水安全系统危机的早期诊断与临界预警理论框架、分析方法、指标和模型体系。

将区域水安全系统危机的诊断技术用于流域水危机识别,从中划定出或圈定受水区范围,并针对危机的诱发因子,从区域水安全系统危机的预防、规避、综合调控的角度,提出西线调水的供水目标。从水系统安全的角度提出西线调水的适宜时机,为西线供水目标及受水区的确定提供决策方法和技术支持。

西线工程供水既要解决西部民族地区经济社会发展及生态环境改善用水需求,也要兼顾黄河干流河道内的生态环境,不仅是单纯的效率和效益问题,还涉及公平、伦理问题,利用系统科学研究最新成果,综合运用模拟、协同、优化、系统仿真等系统工程理论与方法,通过伦理、效益经济原理和生态环境的研究,建立融合伦理、效益与生态的西线调水分配的综合模式,以协调好系统内各地区、各部门之间的用水矛盾,实现调水经济效益和社会福利总量的最大化。

(2) 分析水源区经济社会及生态环境用水需求,开展水源区适宜调水量的研究。针对西线工程调出区河流来水的随机性,受水区需水的不确定性,建立联系调出区和受水区的泛流域水系统多维尺度时空优化配置模型,采用动态调节机制,求解能否调水、调多少水、调水如何分配等方面问题,从调水区和受水区双向需求研究复杂调水系统的适宜时机、调水量以及水量调配方案,协调泛流域水资源的配置、开发、利用、节约和保护,为西线工程的水量调配研究提供完整的框架体系。

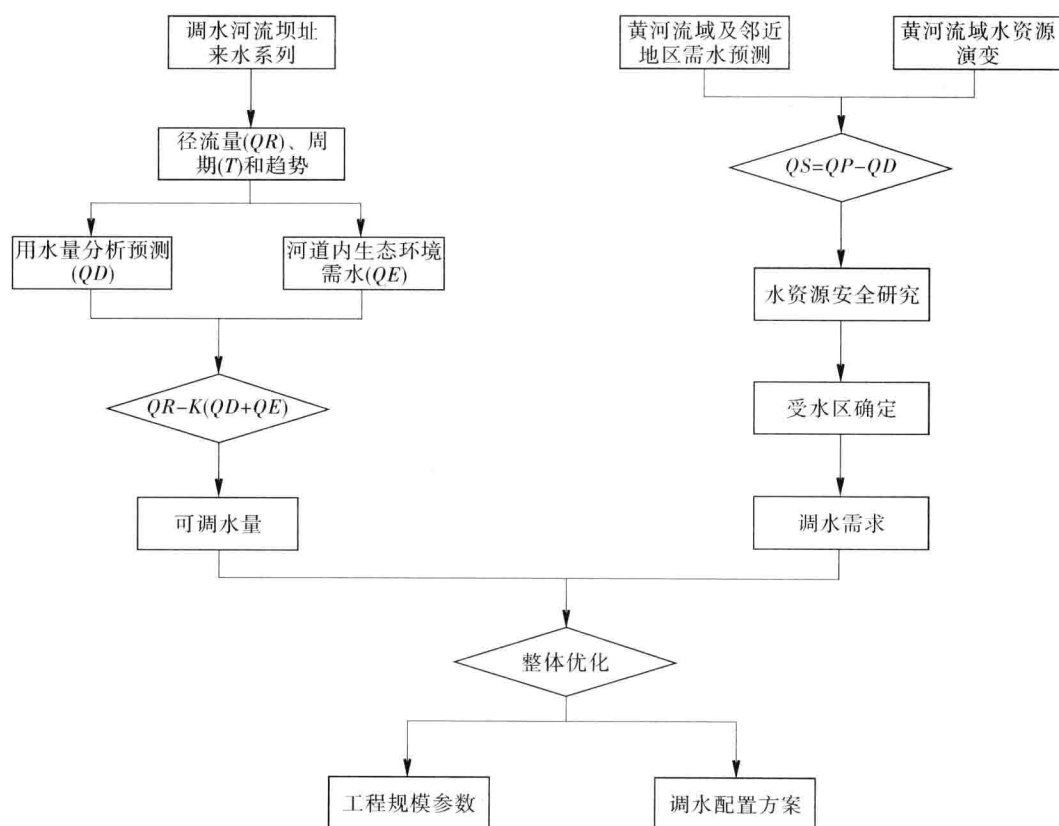
以泛流域水系统为对象、以水循环为科学基础、以泛流域的水资源合理调配为中心,研究多层次、多目标、群决策方法,在分析水资源配置系统复杂性及其复杂适应机制的基础上,构架全新的跨泛流域水资源调配系统分析模型、决策机制。

针对黄河水资源分布及其特征,结合西线调水研究成果,从宏观、中观和微观三个层

面系统地研究实现水资源合理配置的目标、对策和措施。

在宏观层面上,以流域经济、社会发展及生态与环境保护对水资源的需求为前提,以水资源、环境的可承载能力为限度,通过对流域水资源的重新分配,解决黄河流域水资源分布不平衡和社会经济发展布局不协调的矛盾。在中观层面上,在区域水资源系统中,合理分配农业用水、工业用水、城镇生活用水、生态用水,实现水资源合理配置。从供水与需水矛盾的关键环节入手,通过地表水的蓄、引、提工程,地下水开发,田间设施与污水处理以及跨流域调水等工程措施,调配利用好各种水源,提高供水能力和供水保证率,建立节水型社会,调整生产力布局和产业结构,逐步恢复和增加生态用水。在微观需水层面上,研究和实施各种开源和节水措施,运用水价的经济杠杆作用,抑制需水增长,使供需关系逐步协调,相互匹配。

针对南水北调西线调水配置的实际需求,在以“优化-模拟-配置”为基本环节的跨流域调水水量配置三层总控结构框架下,运用大系统多目标群决策理论,构建多层次、多准则自适应水量配置模型,协调水资源的配置、开发、利用、节约和保护,提出基于西线调水的黄河流域水资源可持续利用模式。南水北调西线工程调水规模和配置的研究技术路线见图 1-1。



QS—区域缺水量;QP—区域可供水量;QD—区域需水量;QR—水源区河川径流量;
QE—河道内生态环境需水量;K—水资源安全系数

图 1-1 南水北调西线工程调水规模和配置的研究技术路线

第2章 南水北调西线一期工程总体布局

2.1 调水河流及调水河段

根据多年的研究,南水北调西线一期工程的主要调水河流为雅砻江干流,雅砻江支流达曲、泥曲,大渡河支流色曲、杜柯河、玛柯河、阿柯河。

雅砻江、大渡河流域距离黄河最近的河流从远到近依次为雅砻江干流、达曲、泥曲、色曲、杜柯河、玛柯河和阿柯河,各河流大体均匀分布,为输水线路的布置提供了较好的地形条件,输水线路可沿程调引这些河流的水量,并利用这些河流对穿越分水岭的输水隧洞进行自然分段。

各调水河流调水河段的选择主要考虑了河床高程、与受水河段的距离以及河段径流量等因素,各调水河流近于平行、高程差别大以及入黄口位置相对确定等特点,决定了调水河段的选择范围不大,考虑输水线路尽量与各调水河段、受水河段正交分布,初选各调水河流调水河段见图 2-1 和表 2-1。

由表 2-1 可见,7 条调水河流各调水河段中,雅砻江干流水量最多,但是距离受水河段最远,阿柯河距离受水河段最近,但水量较少。除色曲外,其余河流调水河段与受水河段高程差别不大。这些特点决定了为满足自流输送较大的水量入黄,南水北调西线一期调水工程输水线路必然要修建高坝和长隧洞,且工程规模较大。

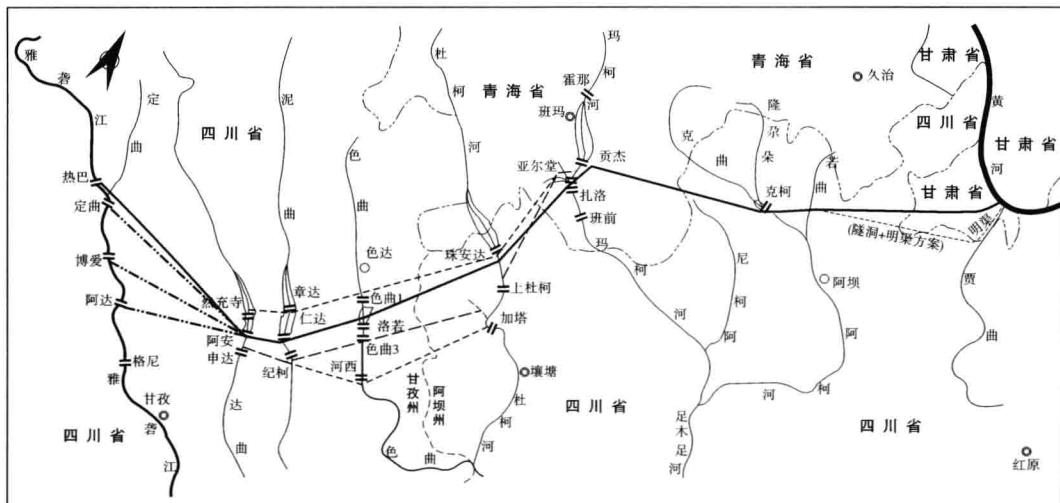


图 2-1 南水北调西线一期工程调水河流及调水河段