

“九五”国家重点科技攻关计划

“黄河中下游水资源开发利用及河道减淤清淤关键技术研究”系列专著

# 三门峡以下非汛期 水量调度系统关键问题研究

薛松贵 侯传河 王煜 等 编著



黄河水利出版社

“九五”国家重点科技攻关计划

“黄河中下游水资源开发利用及河道减淤清淤关键技术研究”系列专著

# 三门峡以下非汛期水量调度系统 关键问题研究

薛松贵 侯传河 王 煜 等编著

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

“三门峡以下非汛期水量调度系统关键问题研究”系“九五”国家重点科技攻关项目“黄河中下游水资源开发利用及河道减淤清淤关键技术研究”第一课题第二专题的研究成果。主要内容包括黄河下游引黄灌区用水需求分析、径流预报模型研究、三门峡水库和小浪底水库调度模型研究、黄河下游河段配水模型研究、水环境保护研究、水资源调度风险分析、经济效益分析方法研究、水量调度决策支持系统开发等。该专题研究成果曾获得 2004 年水利部科技进步三等奖。

本书系上述专题研究成果经深化提炼后的著述,可供从事水资源开发、利用、管理和保护的科技工作者,以及从事或关心黄河治理、开发、研究的人士参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

三门峡以下非汛期水量调度系统关键问题研究/薛松贵,  
侯传河,王煜等编著. —郑州:黄河水利出版社,2005. 12  
ISBN 7-80734-025-8

I. 三… II. ①薛…②侯…③王… III. 水库调度—  
研究—三门峡市 IV. TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 154194 号

---

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:12.75

字数:295 千字

印数:1—1 100

版次:2005 年 12 月第 1 版

印次:2005 年 12 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 7-80734-025-8/TV·445

定价:32.00 元

## “九五”国家重点科技攻关项目第 928 项

项目编号: 98-928

项目名称: 黄河中下游水资源开发利用及河道减淤清淤关键技术研究

组织部门: 水利部

课题编号: 98-928-01

课题名称: 21 世纪初黄河水资源开发利用关键技术问题研究

主持单位: 水利部国际合作与科技司

专题编号: 98-928-01-02

专题名称: 三门峡以下非汛期水量调度系统关键问题研究

承担单位: 黄河水利委员会勘测规划设计研究院

专题负责人: 侯传河 薛松贵 王 煜

主要完成人: 侯传河 薛松贵 王 煜 王道席 何宏谋  
霍世青 崔树彬 杨立彬 张会言 肖素君  
安新代 张 永 饶素秋 宋世霞 王建中  
张成林 王益能 陈红莉 薛建国 连 煜

参加人员: 王 玲 印宝冲 李雪梅 李景宗 王军良  
谢宝平 刘争胜 王海政 龚 华 王怀柏  
高玉玲 王 彤 杨丽丰 王玉峰 刘晓岩  
魏广修 朱庆平 郝伏勤 张建中 石国安  
刘占松 刘晓丽 姜炳洲 王学金 毕黎明

报告执笔人: 侯传河 王 煜 王道席 杨立彬 肖素君

# 前 言

## 一、研究背景

黄河是我国西北和华北地区的重要水源,随着流域社会经济的迅速发展,各部门对黄河水资源的需求量与日俱增,水资源的供求关系随之日趋紧张。一般来水年份的用水高峰期和枯水年份的供水量严重不足,水资源问题已成为黄河流域及下游沿黄地区社会经济可持续发展的制约因素。

黄河下游引黄灌区是一个缺水地区,目前灌溉规模达 230 多万公顷,是我国的重要粮棉生产基地,在我国经济建设中占有重要战略地位,黄河水量对其生存和发展影响极大。下游水资源供求关系紧张突出表现在下游河道断流日趋严重,1999 年实行全河水量统一调度后,虽然利津站未再断流,但有时流量很小,还是靠行政手段干预实现的。黄河下游水资源供求关系紧张的原因是多方面的,既有黄河本身水资源量少的问题,也有依法用水制度不完善、中游缺乏大的调蓄工程和对水资源合理有效利用研究不够的问题。

在本专题立项时,黄河小浪底水库正在兴建,现已建成投入运用。小浪底水库是黄河干流最下端的骨干水库,正常蓄水位 275 m,原始库容 126.5 亿  $\text{m}^3$ ,长期调节库容 51 亿  $\text{m}^3$ ,水库初期运用阶段的调节库容更大,可以充分调节三门峡水库的下泄水量,合理配置下游地区的水资源。有关小浪底水库建成后汛期调水调沙、防洪调度等问题另有其他课题研究,基于目前的黄河水行政管理体制,黄河水利委员会(以下简称黄委会)可以对三门峡以下的水利工程进行有效的调度和管理,故本专题仅研究三门峡以下非汛期水量调度系统关键问题。

本专题以三门峡、小浪底水库联合调度为基础,开展有关的研究,如下游用水需求分析、径流预报、河段配水、水环境保护、调度风险、经济效益分析、决策支持系统等,提出合理可行又具有可操作价值的三门峡以下非汛期水量调度决策支持系统和调度方案,以求在现状和近期时段内,通过本专题和其他相关专题研究成果的实施,合理和高效配置黄河有限的水资源,因此本专题研究即“三门峡以下非汛期水量调度系统关键问题研究”是非常必要的。

## 二、研究基础和方向

由于黄河水资源量少、供求关系紧张,因此在中国的大江大河中,黄河的水量调配研究工作起步是比较早的。根据黄委会的工作成果,1987 年国务院批准了《黄河可供水量分配方案》,这在中国的大江大河中是第一个;1998 年国家计委和水利部又批准了《黄河可供水量年度分配及干流水量调度方案》和《黄河水量调度管理办法》。1987 年方案规定了沿黄各省(区)在黄河正常来水年份可以耗用的黄河水量,1998 年方案在前者的框架内规定了各省(区)年内各月的耗用水量。1999 年初黄委会设立水量调度机构,开始实施黄河干流的水量调度。由于黄河中游缺乏大的调蓄工程,与水量调度系统相关的软件研究

在此之前难以深入开展,因此如果从高效、合理使用黄河水资源,尽可能充分发挥其经济效益和社会效益来说,黄河的水量调度管理水平还有待进一步提高。

小浪底水库的建成投入运用使高效、合理调配三门峡以下非汛期水量有了硬件基础,水量调度的发展方向就是在此基础上搞好软件的开发与应用,即用现状的先进技术开发径流预报模型、下游引黄灌区用水需求模型、三门峡和小浪底水库联合调度模型、河段配水模型以及水量调度决策支持系统。概括地说,就是开发研究用现代先进技术支撑的三门峡以下非汛期水量调度决策支持系统,它能在每一时段尽量准确地获取三门峡的来水预测信息和下游引黄灌溉、生态环境需水的时空分布信息,按一定的准则快速提出多个水量调度方案,供水量调度部门决策和实施;并能按已经发生的各种累计信息,不断修正未来时期的调度配水方案,使年度水量调度方案趋近效益最大、风险最小的目的。

### 三、研究目标和子专题设置

专题旨在通过对水量调度关键问题进行研究,攻克影响水量调度的技术“瓶颈”,建立相应的决策支持系统,为三门峡以下非汛期水量调度提供科学技术手段。具体目标包括:分析黄河下游引黄灌溉非汛期用水规律,提出不同情况下的引黄灌溉需水量,制定不同方案的引黄用水过程;分析黄河主要断面的来水规律,建立具有可操作性的非汛期径流预报模型,提出三门峡入库及其以下各河段月、旬预报成果并进行滚动修正;建立三门峡以下非汛期水量调度模型系统,提出三门峡和小浪底水库月、旬调度方案和各河段配水意见;建立三门峡以下河段水质预报模型,提出下游各河段水环境目标,满足水质目标的最小流量和河口地区生态环境需水量,对重点河段提出水环境保护对策;提出三门峡以下非汛期水量调度实施意见和建议。

根据上述研究目标,进行了专题分解如下:

| 子专题编号           | 子专题名称              | 承担单位         | 子专题负责人             |
|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|
| 98-928-01-02-01 | 三门峡以下非汛期用水需求分析研究   | 黄委会勘测规划设计研究院 | 张成林 何宏谋 肖素君        |
| 98-928-01-02-02 | 黄河非汛期径流预报研究        | 黄河水文水资源科学研究所 | 王 玲 霍世青 李雪梅<br>王玉峰 |
| 98-928-01-02-03 | 三门峡以下非汛期水量调度模型系统研究 | 黄委会勘测规划设计研究院 | 王益能 王道席 王建中        |
| 98-928-01-02-04 | 三门峡以下水环境保护研究       | 黄委会水资源保护局    | 邱宝冲 崔树彬            |
| 98-928-01-02-05 | 三门峡以下非汛期水量调度综合研究   | 黄委会勘测规划设计研究院 | 王 煜 安新代 张 永        |

### 四、研究的创新点

本次攻关研究紧紧抓住黄河目前存在的水资源短缺、迫切需要进行统一调度的生产难题,理论联系实际,注重研究成果的实用性和可操作性。除了完成专题合同要求的内容



外,专题研究还在水量调度的风险分析、经济效益以及决策支持系统开发等方面取得了一些成果。总的来说,专题研究在理论、方法和手段上都有所创新。

### **(一)理论上创新**

传统水量调度主要以水库调节为核心,在一定程度上忽视了具有同等水量调节作用的水资源区域配置,即空间调节。本次研究将水库调度和河段配水相分离,既突出水量调度空间配置的作用,又体现水量调度的时程上调节效能,同时也能够解决水量调度中总量难以控制这一难题。这种水库调度和河段配水相分离的水量调度结构体系,在水量调度理论中是一种创新,也为执行国务院批准的水量分配方案提供了科学的定量化手段。

根据黄河实际状况,建立了一套黄河水量调度管理理论。该理论科学严谨,包括径流预报、用水需求分析、水库调度、河段配水、水质分析、效益计算、风险分析、水量调度决策支持、配套管理措施等,在我国北方缺水地区水量调度中具有普遍的指导意义。

### **(二)方法上创新**

利用模型群解决黄河水量调度问题也是本次研究的一个创新。模型群包括来水预报、用水计划编制、水库调度、河段配水、水质分析、风险分析、效益计算等,通过模型组合、嵌套等手段,发挥模型群的合力。

在水量调度中,通过增加最小生态环境流量约束,实现水量和水质的统一调度。

在考虑径流预报误差的基础上,利用典型解集和统计试验等方法生成来水、用水系列,基于风险分析理论进行水资源调度风险分析,为水资源调度管理提供风险信息支持。

此外,以前期大气环流特征量为因子建立兰州以上区域月径流预报模型,研究实用的花园口站年天然径流量预报方法,这在黄河水文史上都是第一次。

### **(三)手段上创新**

基于数据库管理系统(DBMS)技术和地理信息系统(GIS)开发了水量调度决策支持系统,为决策者提供先进、智能和全面的技术支持,使决策不再是一个枯燥、呆板的过程,这在手段上是一个很大创新,体现了水量调度的发展方向。

基于面向对象(OOP)技术,提出决策方案的方法、属性和事件等概念,使水量调度决策方案的管理更为方便快捷,这是计算机新技术和思想在水资源调度管理中的最高层次的应用。

在水库调度中,采用了优化和模拟两种方法;在河段配水中采用了同比例、按权重和用户参与三种方法。这种综合运用多种方法进行的分析对比,对保证成果质量具有非常重要的意义。

## **五、研究成果及初步应用**

专题研究成果得到了国内外专家的高度肯定,水利部、中国科学院、中国工程院、中国水科院、南京水科院、河海大学、西安理工大学等单位的专家认为,本专题研究的思路正确、方法先进,对复杂的黄河非汛期水资源合理调度问题进行了深入的分析研究,在决策方法和决策支持系统的实现方面,首次提出了水库调度模型与河段配水模型相分离的体系结构,为执行国务院批准的分水方案提供了科学的定量化的手段。

黄河非汛期径流预报系统填补了黄河流域非汛期中长期旬、月径流预报的空白,为长

河段水量统一调度提供水情依据,这在全国大江、大河中也属首次。总体来说,在大江、大河枯水期的水资源管理和调度方面,研究成果整体上处于国内领先水平。

本次攻关研究作为应用基础研究,旨在对三门峡以下非汛期水量调度系统关键技术进行必要的研究,建立水量调度决策支持系统,给水量调度生产部门提供有效的辅助决策工具,因此从系统的整体规划、框架构建、研制开发、调试运行到初步应用的各个阶段,始终将实际应用作为重要追求目标。在研究过程中,决策支持系统和其他部分研究成果(如水库调度模型和河段配水模型)先后应用于《黄河河口治理规划》、《小浪底水库运用方式研究》等项目中,特别是2001年初项目组与黄委会水量调度管理局合作,共同对决策支持系统进一步修改和完善,使之更加符合黄河水量调度的实际,更加有利于该系统在黄河水量调度中的成功应用,并为将来逐步拓展为全河水量调度系统奠定了基础。

数字黄河系统工程的启动和实施,为专题成果提供了更加广阔的市场需求。黄河数字水调和水量调度系统的建设和实施,为专题成果奠定了实际应用的基础。同时,专题成果直接应用于黄河实际水量调度工作中,为黄河水量调度工作服务,并在实际工作中不断改进和完善。

## 六、致谢

《三门峡以下非汛期水量调度系统关键问题研究》从专题论证立项到组织实施期间,得到了多方面的支持和帮助。水利部国际合作和科技司、项目办公室、黄委会及所属攻关办公室对专题开展给予了大力支持和具体帮助。

黄委会原副主任、总工陈效国,黄委会勘测规划设计院原院长席家治等领导十分关心专题研究情况,多次听取汇报并进行指导,及时解决研究中出现的种种困难。专题研究组聘请了黄委会原总工、科技委员会副主任吴致尧,黄委会原副总工、科技委员会副主任邓盛明,中国水利科学研究院水资源研究所原所长陈志恺院士,中国科学院地理科学与资源所刘昌明院士,水利部水利水电规划设计总院副总工陈清濂,水利部水文司原司长王厥谋,西安理工大学黄强教授和沈冰教授,武汉水利电力大学夏军教授,中国水利科学研究院水资源研究所所长王浩和黄委会副总工常炳炎等作为常务咨询专家,多次对专题研究进行咨询,对研究思路和技术路线提出了许多极有价值的意见和建议,保证了研究的顺利进行。加拿大霍华德工程事务有限公司的查克·霍华德先生(Mr. Chuck Howard)和美国水资源管理公司的丹尼尔·希尔先生(Mr. Daniel Sheer)也对研究提出了不少有益的建议。

参加专题研究工作的黄委会勘测规划设计院、黄委会水文局、黄委会水资源保护局等单位的领导和专家都为专题研究付出了辛勤劳动,作出了重要贡献。通过专题全体研究人员的艰苦努力,实现了国家重点科技攻关的预期目标,取得了诸多创新和成果。

在此,谨向给专题研究以关怀、支持和帮助,付出辛劳并作出贡献的有关单位、领导、专家和学者,致以深深的谢意。

作 者

2005年6月



# 目 录

## 前 言

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第一章 概 述                  | (1)  |
| 第一节 黄河水资源利用概况            | (1)  |
| 第二节 黄河水量调度管理现状及发展方向      | (5)  |
| 第三节 水量调度技术研究现状及发展方向      | (6)  |
| 第四节 研究目标、主要内容和技术路线       | (8)  |
| 参考文献                     | (11) |
| 第二章 研究区基本情况              | (14) |
| 第一节 三门峡—桃花峪河段基本情况        | (14) |
| 第二节 下游引黄灌区社会经济和自然地理特点    | (16) |
| 第三节 下游引黄灌区的水资源情况         | (18) |
| 第四节 下游引黄灌区引黄供水概况         | (20) |
| 第五节 下游引黄灌区引黄水利用现状        | (23) |
| 第六节 下游引黄灌区水资源利用存在的主要问题   | (26) |
| 第七节 小 结                  | (28) |
| 参考文献                     | (29) |
| 第三章 引黄灌区用水需求分析           | (30) |
| 第一节 引黄灌溉用水的影响因素分析        | (30) |
| 第二节 引黄灌区用水需求分析计算         | (31) |
| 第三节 农作物供关键水分析            | (38) |
| 第四节 国务院水量分配指标的利用程度分析     | (41) |
| 第五节 豫、鲁两省不同条件用水方案引黄过程线拟定 | (45) |
| 第六节 小 结                  | (51) |
| 参考文献                     | (51) |
| 第四章 黄河中下游非汛期径流预报         | (52) |
| 第一节 黄河中下游非汛期径流特点及影响因素    | (52) |
| 第二节 径流预报模型建立的方法及资料选取     | (54) |
| 第三节 非汛期径流总量预报模型          | (56) |
| 第四节 非汛期旬、月径流预报模型         | (57) |
| 第五节 黄河桃汛洪水预报模型           | (63) |
| 第六节 小 结                  | (64) |
| 参考文献                     | (65) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| <b>第五章 三门峡水库和小浪底水库非汛期多目标联合调度模型</b>    | (66)  |
| 第一节 基本思路和技术路线                         | (66)  |
| 第二节 水库运用方式及水流传播时间分析                   | (67)  |
| 第三节 等级优化调度模型                          | (69)  |
| 第四节 模拟调度模型                            | (72)  |
| 第五节 模型求解                              | (73)  |
| 第六节 模型验证                              | (73)  |
| 第七节 小 结                               | (74)  |
| 参考文献                                  | (75)  |
| <b>第六章 黄河下游河段配水模型</b>                 | (76)  |
| 第一节 水资源配置模型                           | (76)  |
| 第二节 河段配水基本原则                          | (77)  |
| 第三节 河段配水模型                            | (79)  |
| 第四节 小 结                               | (83)  |
| 参考文献                                  | (84)  |
| <b>第七章 三门峡以下地区最小生态环境需水量研究和水环境保护对策</b> | (85)  |
| 第一节 河流水环境和生态概况                        | (85)  |
| 第二节 河道内生态环境需水量计算                      | (92)  |
| 第三节 河口地区生态环境需水量计算                     | (102) |
| 第四节 河道内最小流量与最小入海水量的确定                 | (108) |
| 第五节 污染物总量控制方案与水环境保护对策意见               | (109) |
| 参考文献                                  | (117) |
| <b>第八章 水量调度风险分析</b>                   | (118) |
| 第一节 水量调度风险分析理论和方法                     | (118) |
| 第二节 水量调度风险分析                          | (121) |
| 第三节 计算实例与成果分析                         | (124) |
| 第四节 小 结                               | (125) |
| 参考文献                                  | (126) |
| <b>第九章 水量调配方案经济效益计算方法研究</b>           | (127) |
| 第一节 概 述                               | (127) |
| 第二节 灌溉经济效益                            | (128) |
| 第三节 城市工业及生活供水经济效益                     | (131) |
| 第四节 水力发电经济效益                          | (135) |
| 第五节 生态环境供水经济效益                        | (139) |
| 第六节 水资源调配方案经济效益计算算例                   | (141) |
| 第七节 小 结                               | (145) |
| 参考文献                                  | (145) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第十章 三门峡以下非汛期水量调度决策支持系统开发</b> | (146) |
| 第一节 基于面向对象技术的系统分析               | (146) |
| 第二节 系统开发目标、原则、结构和功能             | (148) |
| 第三节 系统开发                        | (155) |
| 第四节 系统验证                        | (171) |
| 第五节 系统的初步应用                     | (173) |
| 第六节 小 结                         | (180) |
| 参考文献                            | (181) |
| <b>第十一章 水资源调度管理实施意见和建议</b>      | (182) |
| 第一节 实施意见                        | (182) |
| 第二节 建 议                         | (185) |
| 第三节 小 结                         | (187) |
| <b>第十二章 结 语</b>                 | (188) |
| 第一节 主要成果                        | (188) |
| 第二节 主要创新点                       | (190) |
| 第三节 成果初步应用                      | (191) |
| 第四节 今后工作意见                      | (191) |

# 第一章 概 述

## 第一节 黄河水资源利用概况

### 一、黄河水资源

#### (一)水资源量

黄河流域的水资源包括河川径流和地下水两部分。在秋冬季节,受极地大陆冷气团(以蒙古高压为主)控制,多西北风,流域气候寒冷干燥,雨雪稀少;在春夏季节,蒙古高压逐渐北移,流域大部受西太平洋副高压的影响,雨量充沛,并从东南向西北递减。印度洋暖湿气流自孟加拉湾登陆后主要影响我国西藏、云南的西部地区,也波及到黄河流域青海、甘肃等省,为青海和甘肃省南部地区降水的主要来源。

黄河流域各地年平均气温在 $-4\sim 15^{\circ}\text{C}$ 之间,年蒸发量 $1\,000\sim 3\,000\text{ mm}$ ,多年平均降水量为 $452\text{ mm}$ ,年降水总量达 $3\,600\text{ 亿 m}^3$ 。降水量的地区分布很不均匀,大体上分为三个地带:①兰州以上,年降水量 $400\sim 800\text{ mm}$ ;②兰州至河口镇,年降水量 $150\sim 400\text{ mm}$ ;③河口镇以下,年降水量 $400\sim 600\text{ mm}$ ,部分地区 $600\sim 800\text{ mm}$ 。黄河流域地跨干旱、半干旱、半湿润气候带,由于气候的影响,降水量年内分配不均,主要集中于 $6\sim 10$ 月,该时期降水量占年降水总量的 $65\%\sim 80\%$ ,其中7、8月为降水的全盛时期。

据1919~1975年56年系列资料统计,黄河花园口站多年平均实测径流量为 $470\text{ 亿 m}^3$ ,考虑人类活动的影响,将历史上逐年的灌溉耗水及大型水库调蓄量还原后,花园口站的多年平均天然径流量为 $559\text{ 亿 m}^3$ ,加上花园口以下支流金堤河、天然文岩渠、大汶河的 $21\text{ 亿 m}^3$ 天然径流量,黄河流域多年平均天然径流量为 $580\text{ 亿 m}^3$ 。

根据地矿部的研究成果,黄河流域(包括内流区)地下水资源总量为 $404\text{ 亿 m}^3$ (矿化度 $<1\text{ g/L}$ ),地下水与地表水之间的不重复量为 $139\text{ 亿 m}^3$ 。另据《黄河流域(片)水资源评价》(1986年)成果,黄河流域地下水资源量为 $406\text{ 亿 m}^3$ ,地下水与地表水之间的不重复量为 $82\text{ 亿 m}^3$ 。

考虑到黄河流域地下水成果受到基础资料及工作深度的限制,其地下水和地表水不重复量有待进一步落实。综合上述地下水资源评价成果,目前采用的黄河流域地下水与地表水不重复计算量为 $110\text{ 亿 m}^3$ 。

综上所述,黄河流域水资源总量为 $690\text{ 亿 m}^3$ ,其中河川径流量为 $580\text{ 亿 m}^3$ ,地下水与地表水之间的不重复量为 $110\text{ 亿 m}^3$ 。

#### (二)水资源特性

黄河水资源不仅具有地区分布不均、年内分配集中、年际变化大等北方河流的共性,更兼有水少、沙多、含沙量高、水沙异源及连续枯水段等突出特征。

### 1. 水资源贫乏

黄河流域多年平均天然径流量为 580 亿  $\text{m}^3$ , 位居我国七大江河的第 4 位。黄河流域面积占全国国土面积的 8%, 而河川径流量仅占全国总量的 2%。流域内人均占有水量为 527  $\text{m}^3$ , 为全国人均的 22%; 耕地平均每公顷占有水量为 4 410  $\text{m}^3$ , 仅为全国耕地平均每公顷占有水量的 16%。如果包括向邻近地区的供水, 则黄河流域的水资源紧缺程度更高。

### 2. 地区分布不均

由于受地形、气候、产汇流条件的影响, 河川径流在地区上的分布极不均匀。兰州以上流域面积占全河的 29.6%, 但兰州站多年平均径流量却占全河的 55.6%, 龙门至三门峡区间流域面积占全河流域面积的 25.4%, 年径流量占全河的 19.5%。可见大部分径流来自于兰州以上及龙门至三门峡区间。

河川径流地区分布不均还表现在径流深由流域的南部向北部递减。大致西起吉迈, 过积石山, 到大夏河、洮河, 沿渭河干流至汾河与沁河分水岭一线东南侧, 年降水量丰沛, 植被较好, 年平均降水量大于 600 mm, 年径流深在 100~200 mm 以上; 流域北部经皋兰, 过海源、同心、定边到包头一线的西北部, 气候干燥, 年平均降水量小于 300 mm, 年径流深在 10 mm 以下; 流域中部黄土高原区, 年降水量一般为 400~500 mm, 年径流深 25~50 mm, 这一地区由于生态环境长期受到破坏, 水土流失严重, 是黄河流域泥沙的主要来源区。

### 3. 年际、年内变化大

黄河是降水补给型河流, 黄河流域又属典型的季风气候区, 降水的年际、年内变化决定了河川径流量时程分布不均。黄河干流各站年最大径流量一般为年最小径流量的 3.1~3.5 倍, 支流一般达 5~12 倍; 径流量的年内分布集中, 干流及主要支流汛期 7~10 月的径流量占年的比例高达 60% 以上, 且汛期径流量主要以洪水的形式出现, 中下游汛期径流含沙量较大, 利用困难; 非汛期径流含沙量小, 主要由地下水补给, 大部分可以利用。自有实测资料记录以来, 黄河出现了 3 个连续枯水段, 分别为 1922~1932 年、1969~1974 年和 1990~2002 年, 其中 1922~1932 年枯水段长达 11 年, 年平均天然径流量仅占多年平均的 70%。

黄河河川径流年际变化大、年内分布集中、连续枯水段时间长。因此, 开发利用黄河河川径流必须加强对径流的充分调节。

### 4. 水沙异源、水土资源分布不一致

据统计, 黄河兰州以上的径流量占全河来水量的 55.6%, 来沙量仅占全河来沙量的 9%, 是黄河清水的主要来源区; 黄河沙量的 91% 来自中游, 其中河口镇至龙门区间的输沙量占全河的 56%, 是黄河的主要产沙区。

黄河流域及下游引黄灌区具有丰富的土地资源, 但是水土资源的分布很不协调。大部分耕地集中在干旱少雨的宁蒙沿黄地区, 中游汾河、渭河河谷盆地, 以及当地河川径流较少的下游平原引黄灌区。

黄河流域水沙异源、水土资源分布不一致的状况, 要求黄河水资源的开发利用必须统筹兼顾上、中、下游用水的关系, 统一调度全河的水量, 上游水库的调蓄和工农业用水必须

兼顾中下游的工农业用水和输沙用水的需要。

### (三)天然水质

河流的天然水化学状况是指河流在未受到人为污染影响的自然状态的化学组成。目前,黄河水资源已高度开发利用,很难再找到绝对不受污染影响的水体,黄河天然水化学组成此时实际上是一个相对概念,可作为判别水体受污染影响程度的参考指标。黄河天然水化学状况,主要受流域气候、降雨径流、土壤植被、地质地貌等自然环境制约。

流域各产流区天然水化学状况差异很大。兰州以上是黄河的主要产流区之一,该区地势高、气温低、蒸发量小,且多草原湖泊或石质山区,河水矿化度  $200 \sim 300 \text{ mg/L}$ ,总硬度  $85 \sim 110 \text{ mg/L}$ ,按阿列金分类法,属  $C_I^{\text{Ca}}$  型水。兰州至河口镇区间,为干旱、半干旱盐碱区,且有宁蒙灌区,产水少,用水多,产流水质较差,如祖厉河、清水河、苦水河等,矿化度在  $4000 \text{ mg/L}$  以上,总硬度  $600 \sim 2400 \text{ mg/L}$ ,水质苦涩,人畜不能饮用。但该区间产水量不到花园口站径流量的  $1\%$ ,对黄河水质影响不大,干流水型由  $C_{II}^{\text{Ca}}$  过渡到  $Cl_{II}^{\text{Na}}$  或  $C_{II}^{\text{Na}}$ 。河口镇至潼关区间,大多数支流天然水质良好,仅有些小支流或大支流的河源段,如泾河的西川、北洛河上游等,水体中含有大量的硫酸盐和氯化物,矿化度大于  $1000 \text{ mg/L}$ ,但由于入黄水量较小,未对黄河干流水质产生明显影响,干流水型仍为  $C_{II}^{\text{Na}}$ 。潼关至花园口区间,产水较丰,天然水质较好,干流仍属  $C_{II}^{\text{Na}}$  型水。花园口至河口区间基本无径流汇入,干流水型为  $C_{II}^{\text{Na}}$  或  $C_{II}^{\text{Ca}}$ 。

总的看来,20 世纪 90 年代黄河干流天然水化学状况尚好,pH 值略大于 8,呈微碱性,除个别河段属  $Cl_{II}^{\text{Na}}$  型水外,均为重碳酸类水。兰州以上河段为  $C_I^{\text{Ca}}$  型水,矿化度  $200 \sim 300 \text{ mg/L}$ ,总硬度  $85 \sim 110 \text{ mg/L}$ ;兰州以下大部分河段为  $C_{II}^{\text{Na}}$  或  $C_{II}^{\text{Ca}}$  型水,矿化度  $300 \sim 750 \text{ mg/L}$ ,总硬度  $100 \sim 180 \text{ mg/L}$ 。将 90 年代与 80 年代黄河干流天然水化学状况比较,两个年代水化学类型都是重碳酸类水, $C_{II}^{\text{Na}}$  或  $C_{II}^{\text{Ca}}$  居多;兰州以上河段,两个年代离子总量大体一致;兰州以下河段,特别是河口镇以下河段,河水中离子总量 90 年代较 80 年代明显升高,离子总量年均值约增加  $150 \text{ mg/L}$ 。其主要原因是 90 年代黄河水量偏枯,流域气候变暖,蒸发量大,以及农灌退水量、碱性废污水排放量增加,水资源重复利用率提高等自然和人为因素的共同作用,导致离子总量升高。虽然黄河干流离子总量发生了变化,但由于水中阴阳离子间相互比对关系尚未有大的改变,因此黄河干流水化学类型基本没变。

## 二、水资源利用现状

黄河是我国西北、华北地区最大的供水水源,以其占全国河川径流  $2\%$  的有限水资源量,承担着本流域和下游沿黄地区占全国  $15\%$  耕地面积和  $12\%$  人口的供水任务,同时还承担着向流域外部分地区远距离调水的任务。目前,流域内已建大、中、小型水库 3100 余座,总库容 580 亿  $\text{m}^3$ ,修建引水工程 4500 余处、提水工程 2.9 万处;在黄河下游,兴建了向黄淮海平原地区供水的引黄涵闸、虹吸 120 多处。全河段下游沿黄地区引黄灌溉面积由 1950 年的 80 万  $\text{hm}^2$  发展到目前的 753.3 万  $\text{hm}^2$ 。灌溉面积发展最快的地区是下游引黄灌区,灌溉面积由 50 年代的 30 万  $\text{hm}^2$  增大到目前的 230 多万  $\text{hm}^2$ ,而其耗水

量已由 50 年代的 19 亿  $\text{m}^3$  增至 90 年代的 122 亿  $\text{m}^3$ 。此外,黄河还担负着沿黄 50 多座大中城市、420 个县(旗)、晋陕宁蒙部分地区能源基地和中原油田、胜利油田的供水任务。黄河水资源的综合开发利用,改善了上中游部分地区的生态环境,解决了农村 2 727 万人的饮水困难。

据 1988~1992 年用水统计,黄河供水地区年均引用黄河河川径流量 395 亿  $\text{m}^3$ ,耗用水量 307 亿  $\text{m}^3$ (其中流域外 106 亿  $\text{m}^3$ ),流域内地下水开采量为 110 亿  $\text{m}^3$ 。黄河河川径流利用率已达 53%,与国内外大江大河相比,水资源利用程度属较高水平。用水的主要部门是农业灌溉,平均每年引用黄河河川径流量 362 亿  $\text{m}^3$ ,耗用水量 284 亿  $\text{m}^3$ ,占总耗用河川径流量的 92%。

黄河水资源利用存在的问题主要表现在水资源供需矛盾日趋尖锐、缺乏全河水资源统一管理的体制和有效监督机制、用水管理粗放、水污染严重和中游干流河段水库调节能力不足等。

持续增长的供水要求,超过了黄河水资源的承载能力,造成供需矛盾尖锐、下游频繁断流。黄河下游 1972 年出现首次断流,以后逐渐加重。年断流平均天数,70、80 年代分别为 14 天和 15 天,90 年代为 107 天;断流平均长度,70、80 年代分别为 242 km 和 256 km,90 年代为 438 km。河川径流的过量开发,也导致黄河部分支流经常发生断流。沁河的武陟站、伊河的龙门站、汾河的河津站和延河的甘谷驿站多次出现断流;黄河的最大支流渭河的华县站 1997 年也首次出现断流。地下水的超采,造成部分地区出现严重的环境地质危害;上中下游之间、地区之间供水矛盾加剧;工农业用水与河道内输沙、防凌、环境、发电、渔业、航运用水之间矛盾日趋突出;上游发电与中下游输沙也存在用水矛盾。

针对黄河水资源供需矛盾突出、下游断流严重等问题,在对策措施上,除了要建立和健全全流域水资源统一管理体制、制定有关水资源管理法规、采取有力措施节约用水、实行黄河水资源有偿使用制度等之外,还必须结合骨干工程的建设,采用先进的技术和方法,开展水资源调度的系统研究,提高黄河水资源实时预报、调度和管理水平。

### 三、水资源利用展望

2010 年黄河流域总人口将达到 12 100 万,城市化率 40%左右,人均工业产值 16 000 元,有效灌溉面积 548 万  $\text{hm}^2$ ,人均拥有粮食达到 380 kg。流域内在充分考虑节水的情况下,黄河下游流域外供水按国务院分水指标控制,2010 年黄河流域及相关地区国民经济总需耗水量 520 亿  $\text{m}^3$ 。在考虑下游河道汛期输沙和非汛期生态基流低限需水量后,正常来水年份黄河流域可供国民经济最大耗水量为 480 亿  $\text{m}^3$ (其中河川径流 370 亿  $\text{m}^3$ 、地下水 110 亿  $\text{m}^3$ ),缺水 40 亿  $\text{m}^3$ ;在中等枯水年份,黄河流域可供国民经济最大耗水量 420 亿  $\text{m}^3$ (其中河川径流 310 亿  $\text{m}^3$ 、地下水 110 亿  $\text{m}^3$ ),缺水 100 亿  $\text{m}^3$ ,缺水主要位于上中游地区。

随着经济社会的发展,对黄河水资源的需求将不断增加,水资源供需矛盾将越来越突出,缺水将成为黄河流域和相关地区经济社会可持续发展的主要制约因素。



## 第二节 黄河水量调度管理现状及发展方向

### 一、水量调度管理现状

1987年,国务院批准的《黄河可供水量分配方案》起到了加强宏观调控、合理布局水源工程、促进节约用水的作用。由于分配指标是正常来水年份耗水量,对沿黄省(区)制定用水计划具有指导意义,但是对年际、年内水量调度的指导作用有限。同时,全流域水资源统一调度管理的体制尚未形成,造成枯水年份下游断流严重。为了减少断流的损失和影响,缓和河口地区的供水紧张局面,20世纪90年代以来,在国家防汛抗旱总指挥部办公室(简称国家防总)的直接干预下,先后3次从黄河上游调水。

1998年,黄委会根据1987年《黄河可供水量分配方案》,制定了《黄河可供水量年度分配及干流水量调度方案》和《黄河水量调度管理办法》,上报国家计划委员会(简称国家计委)和水利部,由国家计委和水利部以国家计委、水利部计地区[1998]2520号文颁布实施,针对一条大河制定调度方案和管理办法在我国还是第一次。为贯彻落实水量调度管理办法,做好水量调度工作,还专门成立了水量调度管理机构,并于1999年5月开始实施黄河干流水量调度。但是,如何实施管理和调度还有一些亟待解决的问题,如流域机构缺乏强有力的行政管理能力和经济手段、技术措施比较落后、取水许可制度的有效监督尚不到位等。

水资源调度分配的理论已相当完善,而且黄委会过去也开展了大量的黄河水资源规划、研究工作。但由于黄河水资源利用比较复杂,如针对流达时间、引退水关系、降雨和径流预报、信息采集等技术研究滞后,目前还没有可以投入实际运用的全河水量调度系统,尤其是缺乏基于来水和用水预报的全河水量调度决策支持系统。现状采用的是经验调度方法,以水量宏观控制为目标,分黄河上游和中下游分别进行调度。

### 二、水量调度的发展方向

黄河水资源供需矛盾日趋尖锐的客观事实,使人们更加认识到黄河水量统一调度势在必行,已建的三门峡水库和2000年投入运用的小浪底水库,为三门峡以下水量调度提供了必要的工程条件。三门峡以下干流河段的引黄工程由黄委会统一管理,为水量调度提供了必要的管理条件,因此目前的当务之急是尽快研究、开发三门峡以下非汛期水量调度决策支持系统,为水量调度提供技术和决策支持。黄河可供水量的合理分配只有在良好的技术和政策环境中,经过持续不断地有效调度和管理才能实现。

综观国内外水量调度的研究和应用情况,以预报技术和信息的自动监测、采集、传递和组织管理为基础,采用先进的计算机系统为操作平台,开发功能丰富、实用的程序模块,为调度管理人员和决策者提供快速、灵活、可视化的信息支持,是今后水量调度的发展方向。然而即使是最完善的水量调度系统,系统本身也不能代替决策者,决策的主体始终是人。

### 第三节 水量调度技术研究现状及发展方向

水量调度是一个复杂的系统工程,其技术随着现代科技进步,特别是信息科学的进步而不断发展。总的来看,水量调度技术涵盖水库(群)调度、区域水资源配置、决策支持系统(DSS)、风险分析和地理信息系统(GIS)等,下面分别对其研究现状及发展方向予以介绍。

#### 一、水库调度

水库调度学科的迅速发展始于 20 世纪初,当时由于大量的水库电站的兴建,促进了河川径流调节理论的发展,开始应用经验方法,利用水库对洪水和枯水进行调节。1926 年莫洛佐夫提出水电站水库调节的概念,其后逐步发展形成以水库调度图为指南的水库调度方法,这种方法至今仍被广泛采用。

自 20 世纪 40 年代马斯提出水库优化调度问题以来,国内外许多专家学者就水库优化调度进行了大量研究。随着系统工程理论和计算机技术的发展,以最大经济效益为目标的水库优化调度的理论和方法有很大进展,线性规划、动态规划、图论和网络理论、排队理论、模糊理论和大系统递阶控制理论广泛应用于水库调度中。近年来,随着神经网络、基因遗传算法等理论的出现,这些新的理论方法也逐渐应用于水库调度中。

水库优化调度模型和模拟调度模型互有优缺点,优化调度模型通常都对实际问题进行简化,所求“最优解”是基于特定条件的,未必是系统真正的最优解,且缺乏灵活性;模拟调度模型虽然能够对系统进行充分描述,比较灵活,但不能得到最优解,往往需要经过多方案计算进行选优。未来模型算法研究的重点将是使优化调度模型和模拟调度模型有机结合。

水库实时调度和径流、用水及电力负荷预报水平紧密相关,将来除了研究提高来水、用水预报精度之外,还要研究电力负荷预测方法和水库调度的实时校正技术。

由于预报水平和传统观念的影响,水库优化调度在生产中还很少应用,将来要根据生产要求,研究实用的水库优化调度模型。

#### 二、水量分配

目前,国内外水量分配的方法主要有优化配水和折扣配水两种。由于效益函数难以获得和在实际中应用困难等原因,优化配水方法很难应用于生产实践中。折扣配水方法简单,在生产实践中应用较为广泛。

水资源分配问题实质上是在缺水情况下如何减少供水的问题。在黄河上,黄委会水政局和河海大学等单位采用供水系数,西安理工大学采用折扣系数,进行黄河干流水量分配研究。这些方法简单灵活,可充分发挥决策者的经验知识,在实用性方面有一些进展。

水量分配不仅要考虑地区生存与发展,同时还要考虑发挥水资源供水效益和传统用水习惯等因素的影响,实用水量分配方法研究仍将是摆在水资源专家学者面前的一道难题。