

黄河水量调度 决策支持系统的 理论方法与实践

刘晓岩 魏加华 刘晓伟 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

黄河水量调度 决策支持系统的 理论方法与实践

刘晓岩 魏加华 刘晓伟 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了黄河水量调度决策支持系统一期研究开发成果。全书共分 11 章, 内容包括: 概述、水量调度决策支持系统分析、水量调度决策支持系统总体框架、水量调度数据库建设、水量调度模型库研究、现行调度方案编制、自适应调度研究与开发、适度优化调度研究与开发、基于 GIS 的水量调度方案管理、基于 GIS 的三维仿真、回顾与展望等。本书内容新颖、权威、实用, 填补了国内空白。

本书可供水利系统各级领导、科技人员、工程技术人员、管理人员, 特别是从事调水工作的人员查阅、使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

黄河水量调度决策支持系统的理论方法与实践 / 刘晓岩等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2005

ISBN 7 - 5084 - 3496 - X

I. 黄... II. 刘... III. 黄河—需水量—水库调度—研究 IV. TV882.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 154551 号

书 名	黄河水量调度决策支持系统的理论方法与实践
作 者	刘晓岩 魏加华 刘晓伟 等 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 9.25 印张 250 千字
版 次	2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	38.00 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

为缓解黄河日趋严重的断流局面，优化配置黄河水资源，1999年3月国务院授权黄河水利委员会对全河水量实施统一调度。近几年，黄河流域遭遇了持续干旱、来水偏枯的不利局面，在水利部的正确领导下，在沿黄省（区）及枢纽管理单位的大力支持和配合下，黄河水利委员会在黄河水量调度工作中实行了行政首长负责制、省际断面流量和水利枢纽泄流控制责任制，努力构建水资源管理与调度综合保障体系，实现水资源的科学调度、优化配置、高效利用，加强科技调水，强化“精细调度”，确保了在特枯来水年黄河不断流，并顺利实施了引黄济津，取得了黄河连续6年不断流的斐然成绩，以水资源的可持续利用支持了流域及相关地区经济社会的可持续发展。

在确保实现黄河不断流的过程中，黄河水量调度管理系统功不可没。该系统是“数字黄河”工程一期建设的重点，目前已基本建成具有数字化模拟会商环境的水量调度中心，构建了面向黄河水量调度的综合数据库、模型库、方案库和数据存取接口中间件。完成水量调度业务处理、水量调度方案编制、调度运行实况综合监视、综合数据库及其管理系统等功能模块，实现了黄河

下游引黄涵闸远程自动监测、监视和监控，实现了重要控制断面小流量预警，配合行政、工程、经济、法律等措施，数次化解了断流危机。

《黄河水量调度决策支持系统的理论方法与实践》一书，是“数字水调”的硕果，以解决实际问题为导向，探讨全新的水库调度和河段配水相耦合的水量调度模型，研究开发了三种方案编制的方法：现行调度法、自适应法和优化调度法。以此为目标开发的黄河水量调度方案管理系统不仅能够按照国务院分水指标正确、快速地将黄河流域的水资源分配到各个省（区）用水单位，而且还能在三维仿真场景中对分水结果进行实时查询，为执行国务院批准的黄河可供水量分配方案提供了科学的量化手段，将水量调度方案编制与三维仿真有机结合，提高了会商决策效率和水平。

李国英
2005年12月17日



2001年7月，黄河水利委员会李国英主任提出了建设“数字黄河”工程的战略构想后，黄河水量调度管理系统作为“数字黄河”一期工程先期建设，主要建设内容为：信息采集、通信网络、决策支持系统和水量调度中心。整个项目的一期工程自2002年6月正式启动，2003年2月底基本建成并投入使用。

黄河水量调度决策支持系统是“数字水调”一期工程的精髓。它的主要功能就是将快速采集到的各类水调信息收集处理后，为编制水量调度方案、实时调度和监督调度方案的实施提供决策支持，为水量调度工作提供信息服务和分析计算手段，从而在此系统的支持下，合理配置流域水资源，发挥水资源的最大综合效益。

在水量调度决策支持系统的研发过程中，工作人员通过对近几年黄河水量调度工作探索实践过程的总结，研发出一整套适应江河水量调度工作的理论方法，构建了目前国内大江大河专用于水量调度的决策支持系统，特别是基于自适应控制和优化理论的水量调度理论方法，将水库调度与河道配水模型耦合，为执行国务院批准的黄河可供水量分配方案提供了科学的定量化手段；水量调度方案编制与三维仿真有机结合，提高了会商决

策效率和水平。由于系统研发面向应用，解决了水量调度工作中的实际问题，成为了名副其实的决策支持系统，所以，一期工程建成后，随即投入应用，并在黄河水量调度的实践中发挥了重要作用。同时，在研发的过程中，工作人员也形成了较为完整的理论体系和工作方法，探索出水量调度决策支持系统合理构架和建设策略。本书则是研发过程的初步成果。

本书分为 11 章，重点介绍了水量调度决策支持系统一期研究开发成果。由刘晓岩任主编，魏加华任副主编。刘晓岩、魏加华、刘晓伟等参加了编写工作，全书由刘晓岩负责统稿。王恒斌同志为本书的编写提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢。

鉴于流域水资源调度管理的复杂性和黄河流域水资源问题的特殊性，我国流域水量调度工作还处于探索阶段，加之作者理论水平和经验有限，书中疏漏和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 10 月

目 录

序

前 言

第 1 章 概述	1
1.1 黄河水资源概况	1
1.2 黄河水资源开发利用情况	4
1.3 面临的形势及存在的问题	5
1.4 黄河水量调度	9
1.5 数字黄河与数字水量调度	14
第 2 章 水量调度决策支持系统分析	20
2.1 水量调度决策支持系统	20
2.2 水量调度业务分析	27
2.3 水量调度决策的特征	36
2.4 水量调度决策模式	38
第 3 章 水量调度决策支持系统总体架构	42
3.1 系统总体框架	42
3.2 决策支持系统结构	43
3.3 系统功能	48
3.4 决策支持中心	53
3.5 系统集成	54
第 4 章 水量调度数据库建设	57
4.1 数据分析	57
4.2 数据库系统总体结构	65

4.3	数据库设计	67
4.4	数据库管理及其实现	100
4.5	数据库的安全性与其一致性	102
第5章	水量调度模型库研究	105
5.1	模型库及其管理系统	106
5.2	径流预报模型	112
5.3	旱情分析模型	115
5.4	需水预测	117
5.5	河道水流演进模型	118
5.6	水量调度模型	122
5.7	方案评价模型	134
第6章	现行调度方案编制	141
6.1	方案编制计算原理及流程	141
6.2	花园口天然径流量统计分析	145
6.3	可供水量、耗水量统计分析	154
6.4	年水量调度预案生成	157
6.5	月水量调度方案编制	158
6.6	旬水量调度方案编制与调控	164
6.7	月旬方案参数的确定	166
6.8	模型算例	171
第7章	自适应调度研究与开发	183
7.1	调度原则	183
7.2	系统控制的目标轨迹	184
7.3	系统划分	186
7.4	系统控制参数	187
7.5	调节器及被控对象参数设计	190
7.6	水量分配过程	192
7.7	计算流程	196
7.8	算例分析	199

第 8 章 适度优化调度研究与开发	213
8.1 建模基本原则	213
8.2 基本思路	214
8.3 模型原理	214
8.4 模型体系结构	218
8.5 方案编制流程	227
第 9 章 基于 GIS 的水量调度方案管理	229
9.1 水量调度方案库	230
9.2 方案管理	231
9.3 基于 GIS 的调度方案可视化	239
9.4 综合监视与预警	247
9.5 调度方案总结与评价	250
第 10 章 基于 GIS 的三维仿真	255
10.1 水量调度虚拟仿真技术	256
10.2 水量调度三维仿真主要功能	260
10.3 全流域三维仿真	261
10.4 干流河道水流演进	266
10.5 骨干水库模拟仿真	267
10.6 基于三维场景的动态信息查询	272
第 11 章 回顾与展望	273
11.1 回顾	273
11.2 展望	277
参考文献	279

第 1 章

概 述

黄河属资源型缺水流域。自 20 世纪 70 年代以来,由于流域和下游沿黄地区经济社会的迅猛发展,黄河水资源供需矛盾日益尖锐,河道频繁发生断流,生态环境遭到破坏。河流迫切呼唤统一调度,以呵护其健康生命。

1.1 黄河水资源概况

1.1.1 黄河水资源量

黄河流域地处干旱、半干旱地区。根据 1919~1975 年水文资料统计,黄河花园口站多年平均实测年径流量为 470 亿 m^3 。考虑人类活动的影响,将历史上逐年灌溉耗水量及大型水库调蓄量还原后,花园口站多年平均天然年径流量为 559 亿 m^3 ,计入花园口以下支流金堤河、天然文岩渠、大汶河的天然年径流量 21 亿 m^3 ,黄河流域多年平均天然年径流总量为 580 亿 m^3 (见表 1-1),加上地下水与地表水不重复部分的可开采量 110 亿 m^3 ,黄河流域水资源可利用总量为 690 亿 m^3 。

根据 1956~1979 年 24 年同步系列资料,国家组织有关单位对全国各流域的水资源进行了第一次评价。当时估算黄河流域的水资源总量为 744.2 亿 m^3 ,约占同期全国水资源总量的 2.64%。

2003 年 1 月,根据国家发改委和水利部的通知,黄河水利委员会(简称“黄委”)开展了第二次黄河流域水资源及其开发利用情况调查评价。新的初步评价成果显示,产汇流条件的变

化, 导致黄河天然径流量有所减少。经一致性处理后, 黄河流域水资源总量为 706.6 亿 m^3 , 见表 1-2。

表 1-1 黄河流域天然年径流地区分布表

(1919~1975 年 56 年系列资料)

区 间	控 制 面 积		平均天然年径流量		年径流深 (mm)
	km ²	占全河 (%)	亿 m ³	占全河 (%)	
兰州以上	222551	29.6	322.6	55.6	145.0
兰州至河口镇区间	163415	21.7	-10.0	-1.7	—
河口镇至龙门区间	111586	14.8	72.5	12.5	65.0
龙门至三门峡区间	190869	25.4	113.3	19.5	59.4
三门峡至花园口区间	41616	5.5	60.8	10.5	146.1
花园口	730036	97.0	559.2	96.4	76.7
下游支流	22407	3.0	21.0	3.6	93.7
花园口+下游支流	752443	100.0	580.2	100.0	77.1

表 1-2 两次评价成果对比

评价成果	评价时段	降水量 (mm)	地表水 资源量 (亿 m ³)	地下水资 源量 (亿 m ³)	降水入渗 净补给量 (亿 m ³)	水资源总量 (亿 m ³)
第一次水资源 调查评价成果	1956~1979 年	465.7	662.0	405.8	82.2	744.2
第二次水资源 调查评价成果	1956~2000 年	447.1	594.4	377.6	112.3	706.6
两次成果比较 (%)		-4.0	-10.2	-6.9	36.6	-5.1

从表 1-2 中可看出, 与第一次水资源评价结果比较, 降水量、地表水资源量、地下水资源量及水资源总量都有所减少。

黄河水资源特点主要有:

(1) 水少沙多。黄河虽为我国第二条大河, 但河川径流量仅为全国的 2%, 居我国七大江河的第四位。流域内人均占有河川

径流量 527m^3 ，约为全国人均水平的 22%；耕地亩均占有河川径流量 324m^3 ，相当于全国亩均水平的 18%。若扣除调往流域外的 100 多亿 m^3 水量，流域内人均和耕地亩均占有水量则更少。

黄河多年平均输沙量高达 16 亿 t，平均含沙量 $35\text{kg}/\text{m}^3$ ，是世界上大江大河中输沙量最大、含沙量最高的河流（见图 1-1）。

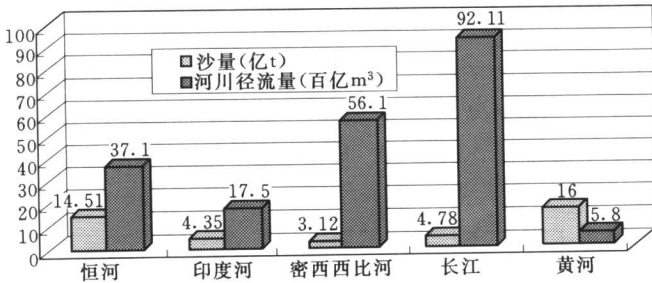


图 1-1 黄河与世界其他大江大河沙量、水量对比示意图

(2) 水沙异源，水土资源分布不一致。黄河 55.6% 的径流来自兰州以上，90% 以上的沙量来自中游。

(3) 年内、年际变化大。黄河干流及主要支流汛期（7~10 月）河川径流量占全年的 60% 以上，干流主要测站最大年径流量为最小年径流量的 3.1~3.5 倍，支流达 5~12 倍。

1.1.2 20 世纪 90 年代以来黄河来水变化

1990 年以后黄河处于连续枯水段。据统计，20 世纪 90 年代

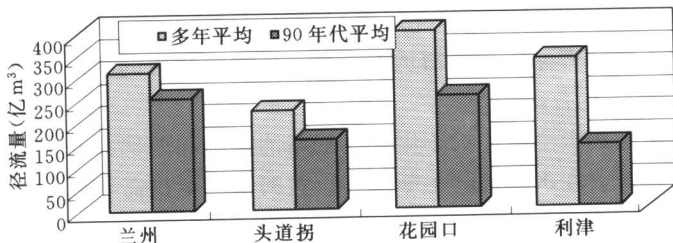


图 1-2 黄河干流主要控制站径流变化示意图



以来,花园口天然径流量比多年均值减少约20%,黄河干流主要测站实测径流量均有大幅度地减少趋势(见图1-2),利津站减幅最大,达60%。2002年黄河流域来水严重偏枯,黄河主要来水区实际来水量241.1亿 m^3 ,比多年同期均值偏枯53%。2003年上半年来水继续偏枯,在4月1日~7月10日用水高峰期,黄河实测来水64.4亿 m^3 ,比同期均值偏少50%。

1.2 黄河水资源开发利用情况

随着沿黄省区经济社会的高速发展,黄河河川径流利用率已达53%,与国内外大江大河比较,黄河水资源利用程度属较高水平。据有关统计资料显示,目前,黄河流域内已建大、中、小型水库3100余座,总库容近 $720 \times 10^8 m^3$;修建引水工程4600余处,提水工程2.9万处;黄河下游修建了向黄淮海平原地区供水的引黄涵闸、虹吸120多处,全河引水能力达 $6000 m^3/s$,仅黄河下游就达 $4000 m^3/s$ 。供水范围已扩大到沿黄九省区和河北、天津,引黄灌溉面积由1950年的80万 hm^2 ,发展到目前的753.33万 hm^2 。此外,黄河还担负着沿黄50多座大中城市、420个县(旗)城镇人口、晋陕宁蒙部分地区能源基地和中原、胜利油田的供水任务。据用水统计,黄河供水地区年平均引用黄河河川径流量 $395 \times 10^8 m^3$,耗用水量 $307 \times 10^8 m^3$,其中,上游地区年耗水量 $131 \times 10^8 m^3$,中游地区耗水量 $54 \times 10^8 m^3$,下游两岸引黄灌区及城市供水耗水量 $122 \times 10^8 m^3$,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 $362 \times 10^8 m^3$,耗用水量 $284 \times 10^8 m^3$,占总耗用河川径流量的92%。目前,上游地区耗水量一直保持持续增加的趋势,黄河水资源的开发利用程度已达70%左右。

随着我国全面建设小康社会战略的实施和西部大开发速度的加快,引黄耗水量还将不断增加,黄河水资源供需矛盾将进一步加剧。

1.3 面临的形势及存在的问题

黄河水资源供需矛盾集中表现的形式就是黄河断流。根据1919年以来的黄河水文观测资料统计,在1972年之前,黄河下游除1938年的花园口扒口改道、1960年花园口枢纽大坝截流及1960年12月三门峡枢纽关闸蓄水造成黄河下游断流外,未出现过自然断流现象。进入20世纪90年代后,断流加剧,主要表现为:

(1) 断流频率提高、次数增多。1972~1999年的28年间,除1973、1977、1984、1985、1986、1990年外,已有22年发生断流,累计88次共1092天,其中20世纪70年代有6年发生过断流,80年代有7年发生过断流,进入90年代连续9年发生断流,断流天数急剧增加(见图1-3)。

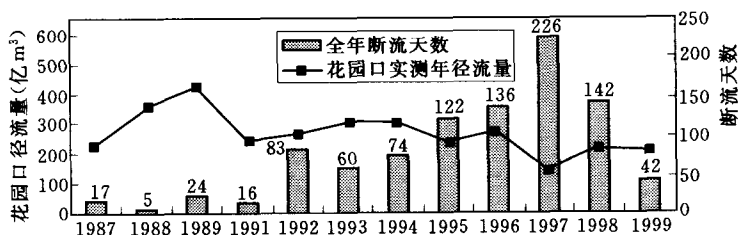


图 1-3 利津断流天数与花园口实测径流量

(2) 年内首次断流时间提前。20世纪90年代以前,断流最早发生在4月份,断流时间主要集中在5~7月;进入90年代,断流最早发生时间提前至1月份(1998年)。90年代以前,断流主要出现在5、6月份;以后逐年提前,1991年为5月6日断流,1992年4月30日断流,1993年2月13日断流,1995年3月4日断流,1996年2月14日断流,1997年2月7日断流,1998年1月1日断流。

(3) 断流距离延长。进入20世纪90年代断流从河口开始的距离持续增加,1995年便达到夹河滩断面以上,断流长度占花



园口以下河长的 88%，1997 年更是达到 704km。

(4) 断流历时增加。从 20 世纪 70、80 年代的几天到几十天增加到 90 年代中后期的 100 天以上，断流持续时间不断延长，1992~1997 年断流历时分别为 82、60、75、118、125、226 天，1998 年断流历时为 148 天。

(5) 主汛期断流时间延长。主汛期（7~9 月）断流时间延长，1997 年主汛期涿口站断流 48 天，利津站达 76 天。

另外，黄河中游各主要支流把口站也多次出现断流，如 1997 年沁河、伊洛河、汾河、大汶河、渭河等相继出现断流。黄河断流历时不断延长，断流时间不断提前，1997 年更是创造了前所未有的纪录，自 2 月 7 日开始断流，长达 226 天，断流多达 13 次，断流河段延伸至开封附近的黑岗口，断流里程达 704km。1997 年 6 月 28 日黄河干流头道拐和潼关站出现了有记载以来的最小流量，分别为 $6.9\text{m}^3/\text{s}$ 和 $28\text{m}^3/\text{s}$ 。黄河下游断流对工农业生产和居民生活、下游河道的排洪能力、生态环境等均产生不利影响。黄河下游利津站断流情况见表 1-3^①。

表 1-3 黄河下游利津站断流情况统计表

年份	断流最早日期 (月·日)	7~9 月 断流天数	断流 次数	全年断流天数 (天)			断流长度 (km)
				全日	间歇性	总计	
1972	4.23	0	3	15	4	19	310
1974	5.14	11	2	18	2	20	316
1975	5.31	0	2	11	2	13	278
1976	5.18	0	1	6	2	8	166
1978	6.3	0	4	—	5	5	104
1979	5.27	9	2	19	2	21	278
1980	5.14	1	3	4	4	8	104
1981	5.17	0	5	26	10	36	662

① 黄河水量调度管理局，水量调度管理系统建设项目建议书，2001。

续表

年份	断流最早日期 (月·日)	7~9月 断流天数	断流 次数	全年断流天数(天)			断流长度 (km)
				全日	间歇性	总计	
1982	6.8	0	1	8	2	10	278
1983	6.26	0	1	3	2	5	104
1987	10.1	0	2	14	3	17	216
1988	6.27	1	2	3	2	5	150
1989	4.4	14	3	19	5	24	277
1991	5.15	0	2	13	3	16	131
1992	3.16	27	5	73	10	83	303
1993	2.13	0	5	49	11	60	278
1994	4.3	1	4	66	8	74	380
1995	3.4	23	3	117	5	122	683
1996	2.14	15	6	122	14	136	579
1997	2.7	76	13	202	24	226	704
1998	1.1	19	16	114	28	142	449
1999	2.6	1	3	41	1	42	278

1997年6月28日黄河干流头道拐站出现了有记载以来的最小流量 $6.9\text{m}^3/\text{s}$, 2001年7月黄河干流吴堡、龙门和潼关站也出现了历史上最小流量, 分别为 25 、 $31\text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.9\text{m}^3/\text{s}$ 。

为缓解日趋严峻的黄河水资源供需矛盾和黄河下游断流形势, 根据国务院授权, 黄委从1999年3月实施对全河水量统一调度, 通过努力工作, 实现了黄河6年连续枯水没有断流, 初步遏制了黄河下游频繁断流的局面, 缓解了用水矛盾, 部分地区的生态环境得到改善, 但潜在的问题和面临的挑战仍很突出。

1.3.1 需水量持续增加, 已超出黄河水资源的承载能力

随着流域及相关地区经济社会的发展, 特别是国家西部大开发战略的实施, 黄河流域需水量将长期维持持续增长的趋势。据分析, 近10年黄河来水相当于70%的中等枯水年, 黄河流域缺