

HUANGHE SHUISHA TIAOKONG TIXI JIANSHE GUIHUA
GUANJIAN JISHU YANJIU

黄河水沙调控体系建设规划 关键技术研究

王 煜 李海荣 安催花 万占伟 等 著



黄河水利出版社

基金资助:

水利部公益性行业科研专项经费项目(201001012)黄河水沙调控体系运行模式及效果评价

国家科技支撑计划项目课题(2013BAC10B02)黄河流域旱情监测与水资源调配技术研究与应用

黄河水沙调控体系建设规划 关键技术研究

王 煜 李海荣 安催花 万占伟 等 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书在充分吸收以往研究成果和黄河调水调沙实践经验的基础上,采用理论和实测资料分析、数学模型计算等多种研究手段,分析了黄河水沙情势及河道冲淤演变特性,定量预估了未来 150 年流域不同河段冲淤和主槽演变及控制断面水沙变化过程,构建了黄河水沙联合调控的约束性和指导性指标体系,提出了水沙调控体系联合调控模式,创建了适应复杂水沙条件、多水库、多目标的基于 GIS 水沙调控体系模拟系统,评价了黄河水沙调控体系联合运用效果,论证了黄河水沙调控体系待建工程的开发次序和建设时机等。

本书可供从事防洪减灾、泥沙运动力学、水沙调控、水资源利用等方面研究、设计和管理的科技人员及高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河水沙调控体系建设规划关键技术研究/王煜等
著. —郑州:黄河水利出版社,2015. 1
ISBN 978 - 7 - 5509 - 1014 - 0

I. ①黄… II. ①王… III. ①黄河 - 含沙水流 - 控制 - 研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 019755 号

组稿编辑:李洪良 电话:0371 - 66026352 E-mail:hongliang0013@163.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:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:22.25

字数:562 千字

印数:1—1 000

版次:2015 年 12 月第 1 版

印次:2015 年 12 月第 1 次印刷

定价:80.00 元

序

黄河是中华民族的母亲河,数千年来,以其生命之水哺育了灿烂辉煌的华夏文明;黄河又是中华大地的“害河”,以善淤、善决、善徙闻名于世,给中华民族造成了沉重灾难。黄河水量少、沙量多和水沙地区来源、过程分布不均,形成了黄河“水少沙多,水沙关系不协调”的独特特点,也是其成为世界上最为复杂难治河流的症结所在。

为实现黄河的长治久安、促进流域和相关地区经济社会的可持续发展,必须采取有效措施,协调黄河的水沙关系。协调水沙关系的主要途径为增水、减沙、调水调沙。增水是能够增加黄河水资源量的各种措施,包括外流域调水和节水;减沙是能够减少入黄沙量的各种措施,包括水土保持减沙、水库拦沙和干流放淤等措施;调水调沙是利用干支流骨干水库群的联合调控,将不利的水沙过程调节为有利的水沙过程,减轻泥沙的淤积。

改善黄河水沙不协调问题的主要途径中,增水主要靠南水北调西线工程,但西线工程调入水量需要水库调节才能发挥作用。减沙主要靠水土保持、骨干工程拦沙和大规模的干流放淤,水土保持是减少入黄泥沙、治理黄河的根本措施,但黄土高原地区自然环境恶劣,仅靠水土保持想在短期内显著减少入黄泥沙是不现实的,骨干水库拦沙是最直接、最经济、最有效的手段,大规模的放淤也需要骨干水库对水沙过程进行调节才能取得较好的效果。调水调沙是黄河治理开发的一项重要战略措施,但单个水库作用有限,需要有由多个水库工程及相应的非工程措施构成的水沙调控体系,才能长期发挥显著的效果。由此可见,完善的黄河水沙调控体系是充分发挥增水、减沙、调水调沙作用,协调黄河关系的重要手段,也是保障黄河长治久安的重要战略措施。

黄河勘测规划设计有限公司长期以来一直致力于黄河流域的治理开发研究,先后承担和参加了多项国家“973”“八五”“九五”科技攻关、“十一五”“十二五”科技支撑计划以及“世行”项目等研究,取得了大量创新性成果,为协调黄河水沙关系、保障防洪防凌安全、优化配置水资源以及重大工程论证提供了重要的科技支撑。

本研究依托黄河水沙调控体系建设规划项目,围绕黄河治理开发的总体目标,研究了黄河长治久安对水沙调控体系的需求,论证了水沙调控体系总体布局,研究了黄河流域不同河段水沙输移规律、防洪防凌需求、流域经济社会发展用水和生态环境用水之间关系,构建了黄河水沙联合调控的约束性和指导性指标体系;以改善黄河水沙关系不协调为核心,基于多泥沙河流水沙特点,研究了泥沙、洪水、水资源等多要素,洪凌管理、减淤、供水等多目标的多水库水沙联合调控技术;结合黄河水沙调控体系对洪水调度与演进、泥沙冲淤、水资源利用与配置等决策的需求,研发了黄河水沙调控体系数学模拟系统;利用数学模型系统,计算分析了不同方案下黄河水沙调控体系联合调控作用,在此基础上比较论证待建工程开发次序和建设时机等,研究取得了许多创新性成果,在治黄实践中得到了应用。

《黄河水沙调控体系建设规划关键技术研究》一书是在总结多年来大量研究成果的基础上凝练而成的,具有多项创新性。该专著的出版将会对黄河防洪、防凌、调水调沙、水资源调度与管理、水沙调控体系建设与运用等方面的优化理论的发展和完善起到巨大的推动作用,为黄河治理开发和实现长治久安奠定了基础。

中国科学院院士: 王光谦

2015 年 12 月

前言

黄河水少沙多、水沙关系不协调的基本特点,是其复杂难治的症结所在。由于自然原因及人类活动对水资源的过度利用和不当干预,进入黄河下游的水量急剧减少,进一步加剧了其水沙关系的不协调性,黄河下游河道发生严重淤积,河道形态日趋恶化,部分河段过流能力锐减至 2002 年汛前的 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 左右。同时,“二级悬河”迅速发展,目前最严重的河段主河槽河底高程已经高出滩地高程 4 m 多,滩地高出背河地面 $4\sim 6\text{ m}$ 。主槽萎缩,河道排洪能力降低造成同流量水位抬升、小洪水高水位及同水位下过流能力大大降低,对防洪十分不利,严重威胁黄河下游防洪安全。上游龙羊峡水库、刘家峡水库联合调度运用,又人为改变了径流年内分配,加上沿黄引水的增加,造成宁蒙河道水沙关系更加不协调、宁蒙河道淤积加剧,导致内蒙古河段成为继黄河下游之后的又一段地上悬河。河道主槽严重淤积萎缩,造成中小流量水位明显抬高,河道平滩流量减小(局部河段仅为 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右),严重威胁防凌、防洪安全。同时导致小北干流河槽排洪能力降低,河势游荡摆动频繁,冲滩塌岸加剧,危及沿河村庄及人民安全,加上引提水工程脱流,影响农业灌溉用水,还对该河段防凌带来不利影响;渭河渭南以下河道及南山支流下游河道“悬河”形成,洪涝灾害频繁,经济损失巨大,同时造成潼关高程急剧升高且居高不下,严重影响渭河下游的防洪安全。

如果水沙关系不协调的矛盾得不到解决,黄河主要冲积性河道的不利演变趋势仍将继续发展,河槽萎缩、排洪能力降低、下游“二级悬河”加剧等问题将更加严重。为实现黄河的长治久安,促进流域和相关地区经济社会的可持续发展,必须采取有效措施,协调黄河的水沙关系。协调水沙关系的措施包括流域内节水和流域外调水、黄土高原水土保持、水库拦沙、滩区放淤,以及利用水库群的科学调控进行调水调沙等方面。本书提出的黄河水沙调控体系是指能够对黄河洪水、径流、泥沙进行有效控制的、以黄河干支流骨干水库及其调度为主体的工程体系和非工程体系。

1954 年《黄河综合利用规划技术经济报告》首次提出在黄河干流修建 46 级水利枢纽,在重要的支流修建一批拦泥、防洪或综合利用水库的工程布局,并明确了各河段的开发治理任务。1997 年《黄河治理开发规划纲要》总结以往研究成果和治黄经验,首次提出以 7 大骨干工程为主体的黄河水沙调控体系布局:上游的龙羊峡、刘家峡和黑山峡 3 座骨干工程联合运用,构成黄河水量调节工程的主体;中游的碛口、古贤、三门峡和小浪底水利枢纽联合运用,构成黄河洪水和泥沙调控工程体系的主体。2002 年《黄河近期重点治理开发规划》在肯定 7 大骨干工程为主体的黄河水沙调控体系布局的同时,提出完善的水沙调控体系布局还应包括水沙测报等非工程措施。

目前黄河干流已建、在建工程包括龙羊峡、刘家峡、三门峡和小浪底等 4 座骨干工程的干流梯级工程 26 座,总库容 577.5 亿 m^3 ,这些工程在防洪(防凌)、减淤、供水、灌溉、发电等方面发挥了巨大的综合效益,有力地支持了沿黄地区经济社会的可持续发展。但由

于目前黄河水沙调控体系尚未构建完善,现状骨干工程在协调经济社会发展需求和维持黄河健康生命需求方面还存在较大的局限性,主要表现在:①现状工程条件下,能提供的水流动力条件不足,联合调节水流和泥沙比较困难,不能较长时间维持小浪底水库运用初期塑造的黄河下游中水河槽;②现状工程运用不能解决协调宁蒙河段水沙关系和供水、发电之间的矛盾,内蒙古河道淤积萎缩,防凌防洪形势严峻;③潼关高程居高不下。基于此,必须考虑协调水沙关系、有效管理洪水、优化配置黄河水资源等方面需求,充分利用近年来已开展的有关水沙调控专题研究和调水调沙试验的成果,加强水沙调控体系建设规划关键技术问题的研究工作。

本书在充分吸取以往研究成果的基础上,研究分析了黄河水沙情势及河道冲淤特性,提出了未来较长时期的设计水沙条件;总结了现状水沙调控体系工程在防洪(防凌)、减淤和水资源配置等方面的作用及存在的问题,统筹考虑洪水管理、协调全河水沙关系、合理配置和优化调度水资源等需求,研究提出了水沙调控体系总体布局,复核了黄河水沙调控体系待建骨干工程规模;系统研究了黄河不同河段水沙输移规律、河道防洪防凌要求、流域水资源变化以及经济社会发展用水和生态环境用水之间的关系,基于河道减淤、防洪防凌安全以及水资源优化配置,构建了水沙联合调控的约束性及指导性指标体系;分析了水沙调控体系各工程间的内在联合和相互关系,研究提出了黄河水沙调控体系联合运用机制;考虑不同的来水来沙条件、库区蓄水条件以及河床边界条件等因素,从有利于河道和水库减淤的目标出发,充分考虑流量演进和水沙过程的对接,研究提出了现状工程条件下以及古贤水库、黑山峡水库、碛口水库不同建设时机情况下的水沙调控体系联合调水调沙运用方式和兴利调节运行方式。研发了水沙调控体系数学模拟系统,计算了黄河水沙调控体系不同方案在协调水沙关系、有效管理洪水以及优化水资源配置方案的作用。分析了黄河水沙调控体系待建工程在黄河治理开发中的作用以及工程不同时机投入运用的影响,综合比较各待建工程开发任务、经济效果、社会影响等因素,提出待建工程古贤水库、东庄水库、黑山峡水库及碛口水库的建设时机,为国家宏观决策提供重要技术支撑。

本书编制过程中,黄河勘测规划设计有限公司、黄河水利委员会、中国水利水电科学研究院、黄河水利委员会黄河水利科学研究院等单位的领导、专家和项目组成员都为课题研究付出了辛勤劳动,作出了重要贡献。本书主要完成人员有:王煜、李海荣、安催花、张俊峰、万占伟、胡春宏、赵麦换、崔萌、赵银亮、钱裕、李保国、陈建国、段高云、赵连军、武见、陈雄波、李庆国、崔长勇、程冀、张建、张乐天等。本书主要编写人员有:王煜、李海荣、安催花、万占伟、崔萌、钱裕、李保国、段高云、李庆国、崔长勇、张乐天。通过所有参与人员的刻苦攻关、并肩奋战,才实现了预期目标,取得了诸多创新和丰硕的成果。对于以上单位和相关工作人员,以及给予本课题研究大力指导和支持的单位、专家、学者及工作人员致以深深的谢意!

黄河水沙调控体系是一项非常庞杂的系统工程,本书仅对黄河水沙调控体系建设规划关键技术问题进行了系统的概括和总结,仍有许多问题需要进一步研究,加之作者水平有限,书中谬误难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2015年9月

目 录

序

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 黄河流域概况及自然水沙特性	(1)
1.2 黄河水沙调控体系建设现状及局限性	(2)
1.3 水沙调控研究现状	(9)
1.4 研究内容和研究成果	(13)
第2章 黄河水沙情势及河道冲淤变化研究	(16)
2.1 洪 水	(16)
2.2 天然径流	(19)
2.3 泥沙及近期水沙变化	(23)
2.4 未来水沙变化趋势及预估	(42)
2.5 河道冲淤变化	(46)
2.6 小 结	(50)
第3章 黄河水沙调控体系建设总体布局研究	(52)
3.1 以往研究概况	(52)
3.2 黄河治理开发对水沙调控体系工程布局的要求	(53)
3.3 黄河水沙调控体系总体布局	(64)
3.4 待建及在建工程规模分析	(70)
3.5 小 结	(89)
第4章 黄河水沙调控指标体系研究	(91)
4.1 维持河道排洪输沙功能的调控指标	(91)
4.2 各河段防洪防凌调控指标	(112)
4.3 实现对水资源有效管理的调控指标	(115)
4.4 小 结	(119)
第5章 水沙调控体系水库联合调度运用模式研究	(122)
5.1 水沙联合调度目标	(122)
5.2 水沙调控体系联合运用的机制	(122)
5.3 现状工程条件下水库联合运用方式	(128)
5.4 古贤水库投入运用后水沙调控体系联合运用方式	(132)
5.5 古贤水库、黑山峡水库投入运用后水沙调控体系联合运用方式	(143)

5.6 古贤水库、黑山峡水库、碛口水库投入运用后水沙调控体系联合运用方式	(146)
5.7 小 结	(159)
第6章 黄河水沙调控体系数学模拟系统研究	(161)
6.1 数学模拟系统总体构架	(161)
6.2 水流泥沙数学模拟子系统	(164)
6.3 洪水调度数学模拟子系统	(176)
6.4 水资源调控模拟子系统	(180)
6.5 系统集成	(187)
6.6 系统功能模块设计开发	(187)
6.7 小 结	(202)
第7章 水沙调控体系联合调控效果研究——水沙变化及河道冲淤	(204)
7.1 建设方案设置	(204)
7.2 计算边界条件	(205)
7.3 水库泥沙冲淤计算成果	(205)
7.4 宁蒙河道冲淤变化	(211)
7.5 禹潼河段河道冲淤变化	(220)
7.6 潼关高程变化分析	(233)
7.7 黄河下游水沙及河道冲淤变化	(240)
7.8 小 结	(270)
第8章 水沙调控体系联合调控效果研究——防洪、防凌及水资源调控效果	(272)
8.1 水沙调控体系的防洪作用	(272)
8.2 水沙调控体系的防凌作用	(281)
8.3 水沙调控体系的水资源调控和发电作用	(290)
8.4 小 结	(299)
第9章 待建工程的开发次序和建设时机	(302)
9.1 待建骨干工程作用分析	(302)
9.2 干流骨干工程开发次序	(309)
9.3 待建骨干工程建设时机	(319)
9.4 小 结	(327)
第10章 主要结论和认识	(329)
10.1 主要结论	(329)
10.2 主要认识	(336)
参考文献	(341)

第 1 章 绪 论

1.1 黄河流域概况及自然水沙特性

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等九省(区),在山东垦利县注入渤海,干流河道全长 5 464 km,流域面积 79.5 万 km^2 (包括内流区 4.2 万 km^2)。内蒙古托克托县河口镇以上为黄河上游,干流河道长 3 472 km,流域面积 42.82 万 km^2 ,汇入的较大支流(流域面积 1 000 km^2 以上)有 43 条。河源段的扎陵湖、鄂陵湖是我国最大的高原淡水湖;兰州以下河谷盆地及河套平原是黄河流域重要的引黄灌区,也是我国重要的粮食基地;河口镇至桃花峪为黄河中游,干流河道长 1 206 km,流域面积 34.38 万 km^2 ,汇入的较大支流有 30 条。河段内绝大部分支流流经黄土高原,暴雨集中,水土流失十分严重,是黄河洪水和泥沙的主要来源区。其中,河口镇至禹门口是黄河干流上最长的一段连续峡谷,峡谷下段有著名的壶口瀑布,深槽宽仅 30~50 m,枯水水面落差约 18 m,气势宏伟壮观。黄河上中游水力资源丰富,均是全国重点开发建设的水电基地之一;桃花峪以下为黄河下游,干流河道长 786 km,流域面积 2.27 万 km^2 ,汇入的较大支流只有 3 条。黄河下游两岸是广袤的黄淮海平原,是重要的自流引黄灌区,年引水量达 100 亿 m^3 ,有效灌溉面积约 4 000 万亩(1 亩 = 1/15 hm^2 ,下同),是我国重要的粮食产区。

黄河是中华民族的母亲河,哺育了灿烂辉煌的华夏文明;黄河又是中华大地的“害河”,以善淤、善决、善徙闻名于世,历史上下游河段决口泛滥频繁,滚滚洪流不知淹没了多少鲜活的生命和宝贵的财物。天然情况下,黄河下游年来沙量达 16 亿 t,一方面泥沙在下游强烈堆积,造就了广袤的黄淮海大平原;另一方面洪水在黄淮海平原泛滥成灾,给人们带来了沉重的灾难。公元前 602 年至 1938 年的 2 540 年中,黄河下游决口泛滥年份有 543 年共 1 593 次,经历了五次大改道和迁徙。洪灾波及范围北达天津,南抵江淮,包括冀、鲁、豫、苏、皖五省的黄淮海平原,纵横 25 万 km^2 。千百年来,人们在与黄河的共生共存中,始终与黄河水害抗争,为了生存与发展,在黄河两岸筑堤防洪。堤防的存在,在控制洪灾损失的同时,也限制了黄河下游淤积范围。黄河下游河道逐渐发展为举世闻名的“地上悬河”,河床高出大堤背河地面 4~6 m,比两岸平原高出更多。黄河下游的悬河之势严重威胁着黄淮海平原的安全,是黄河治理和防洪安全最重要的河段。

黄河虽为我国的第二条大河,但全河 535 亿 m^3 的天然径流量(1956~2000 年 45 年水文系列)仅占全国河川径流总量的 2%,约为长江的 1/20。流域内人均水量 527 m^3 ,为全国人均水量的 22%;耕地亩均水量 294 m^3 ,仅为全国耕地亩均水量的 16%。黄河多沙,举世闻名,天然情况下多年平均输沙量约 16 亿 t(1919~1960 年系列,陕县站),平均含沙量 35 kg/m^3 ,最大年输沙量达 39.1 亿 t(1933 年),最高含沙量 911 kg/m^3 (1977 年),其输

沙量及含沙量均为世界大江大河之最。黄河水、沙的来源地区不同,水量主要来自兰州以上地区,占全河水量的 53%,泥沙主要来自河口镇至三门峡区间(简称河三间)地区,占全河沙量的 90%。黄河的泥沙年内分配十分集中,90%的泥沙集中在汛期,年际变化悬殊,最大年输沙量是最小年输沙量 3.3 亿 t(1987 年)的 13 倍。水量少、沙量多和水沙地区来源、过程分布不均,形成黄河“水少沙多,水沙关系不协调”的独特特点。

黄河洪水主要来自中游地区和上游兰州以上地区。黄河中游地区暴雨频繁、强度大、历时短,形成的洪水具有洪峰高、历时短、陡涨陡落的特点,是黄河下游的主要成灾洪水,对下游威胁极大。中游洪水有 3 个来源区,一是河口镇至龙门区间(简称河龙间),二是龙门至三门峡区间(简称龙三间),三是三门峡至花园口区间(简称三花间)。不同来源区的洪水以不同的组合形成花园口站的大洪水和特大洪水。以三门峡以上的河口镇至龙门区间和龙门至三门峡区间来水为主形成的上大洪水,洪峰高、洪量大。以三门峡至花园口区间来水为主形成的下大洪水,涨势猛、洪峰高、含沙量相对较小、预见期短。兰州以上地区暴雨强度较小,洪水洪峰流量不大,但历时较长。黄河上游的大洪水与中游大洪水不遭遇,上游洪水组成下游洪水的基流。

1.2 黄河水沙调控体系建设现状及局限性

1.2.1 水沙调控体系已建骨干工程概况

目前,黄河干流龙羊峡水库以下已建设 20 余座梯级水库,其中龙羊峡、刘家峡、三门峡和小浪底等 4 座水库为控制性骨干工程,总库容 526.9 亿 m³,死库容 144 亿 m³,总装机容量 4 870 MW,多年平均发电量 186.6 亿 kWh,主要技术经济指标见表 1-1,已建支流骨干水库有陆浑水库、故县水库等。

表 1-1 黄河干流已建骨干工程主要技术经济指标

工程名称	建设地址	控制面积 (万 km ²)	正常蓄水位 (m)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	多年平均发电量 (亿 kWh)	最大坝高 (m)	淹没耕地 (万亩)	迁移人口 (万)
龙羊峡水库	青海共和	13.1	2 600.0	247.0	1 280	59.4	178.0	8.67	2.97
刘家峡水库	甘肃永靖	18.2	1 735.0	57.0	1 390	55.8	147.0	7.72	3.26
三门峡水库	晋平陆、豫陕县	68.8	335.0	96.4	400	13.0	106.0	96.00	31.80
小浪底水库	豫孟津、孟县	69.4	275.0	126.5	1 800	58.4	173.0	16.95	13.76
合计				526.9	4 870	186.6		129.34	51.79

注:水位为黄海标高。

1.2.2 水沙调控体系已建骨干工程作用

黄河干支流骨干水库与下游堤防、河道整治工程、分滞洪区等构筑“上拦下排、两岸分滞”防洪工程体系的主体,在防洪(防凌)、减淤、调水调沙和水量调度等方面发挥了巨

大作用,有力地支持了沿黄地区经济、社会的持续发展。

1.2.2.1 在黄河防洪中的作用

三门峡水库建成后,黄河下游尚未发生超过 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的大洪水,但自 1964 年以来,三门峡以上地区曾 6 次出现流量大于 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的大洪水,三门峡水库削减洪峰,在一定程度上缓解了黄河下游防洪抢险的紧张局面,减轻了黄河下游的防洪负担,为黄河下游几十年伏秋大汛不决口发挥了重要的作用。如 1977 年 8 月 6 日发生了三门峡水库入库洪峰流量为 $15\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水,三门峡 8 月 7 日最大下泄流量 $8\,900\text{ m}^3/\text{s}$,削减洪峰流量 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$,使这次洪水安全入海。

陆浑水库、故县水库建成后,与三门峡水库联合防洪调度运用,可减少下游花园口洪峰流量超过 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 洪水出现的机遇,使黄河下游的防洪标准由 30 年一遇提高到 60 年一遇,增加了黄河下游防洪调度的灵活性和可靠性。

小浪底水库建成后,通过对三门峡水库、小浪底水库、陆浑水库和故县水库的联合调度运用,显著削减了黄河下游稀遇洪水,使花园口断面 100 年一遇洪峰流量由 $29\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 削减到 $15\,700\text{ m}^3/\text{s}$,1 000 年一遇洪峰流量由 $42\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 削减到 $22\,600\text{ m}^3/\text{s}$,接近花园口设防流量 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。由此可见,三门峡水库、小浪底水库、陆浑水库和故县水库的建设,对黄河下游防洪起到了重要作用,增强了堤防抗御大洪水的能力,大大减轻了黄河下游的防洪压力。

龙羊峡水库、刘家峡水库的建成运用,使发电效益、灌溉效益、供水效益和社会效益明显,而且在削减黄河上游的洪峰流量方面也发挥了巨大作用。同时,龙羊峡水库、刘家峡水库联合作用,可使兰州市区的防洪标准达到 100 年一遇,不超过其安全泄量。

1.2.2.2 在黄河防凌中的作用

历史上黄河下游凌汛灾害比较严重,据不完全统计,1883~1936 年 54 年间有 21 年凌汛期决口。1949 年以来至三门峡水库建成前,黄河下游曾有二次凌汛决口,造成了较大的凌汛灾害:1951 年 2 月 3 日发生在利津王庄,淹没村庄 91 个,受灾人口 7 万,受灾面积 43 万亩;1955 年 1 月 29 日发生在利津五庄,受灾人口 20.5 万,受灾面积 86 万亩。

三门峡水库建成运用以来,由于三门峡水库改变了下游河道凌期的流量,水库下泄水温升高也影响黄河下游河段的冰情,不仅推迟了封河时间,而且使下游封冻河段长度明显减小,封、开河冰塞、冰坝次数减少,大大地减轻了黄河下游的防凌威胁。1960~2000 年的 40 年中,特别是下游凌汛严重的 1969 年、1970 年、1976 年、1977 年等,由于利用三门峡水库调节凌汛期河道水量,推迟了开河时间,避免了“武开河”的不利局面,安全度过凌汛期。此后,黄河下游再没有出现凌汛决口,在保障黄河下游的凌汛安全方面发挥了重要的作用。

小浪底水库运用后,在水库运用初期具有足够的防凌库容,能够对下游河道的流量进行更加直接的调节,在已建成的三门峡、故县、陆浑等水库配合运用下,基本解除了黄河下游的凌汛威胁。2001 年冬季,黄河下游气温较常年偏低,防凌形势严峻,在即将封河的关键时期,小浪底水库持续以 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量向下游补水,使封河形势得到缓解,开创了严寒之年下游不封河的先例。2002 年凌汛期,在来水极枯、封河流量较小的条件下,由于封冻期合理控泄,下游河道 107 km 封河河段开河平稳。2003 年济南、北镇站 1 月上旬平均

气温为 1970 年以来同期最低值,黄河下游出现两次封河、开河,最大封冻长度达 330.6 km 的严重凌情,封冻期小浪底水库控泄流量仅为 $120 \sim 170 \text{ m}^3/\text{s}$,实现了全线“文开河”。2003 年 12 月至 2004 年 2 月凌汛期间,小浪底水库实际泄水 47.39 亿 m^3 ,各月平均流量分别为 $805 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $501 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $495 \text{ m}^3/\text{s}$ 。2004 年 12 月至 2005 年 2 月下游凌汛期间,小浪底水库实际泄水 21.06 亿 m^3 ,各月平均流量分别为 $312 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $251 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $247 \text{ m}^3/\text{s}$,有效缓解了凌汛形势。2008 年 1 月下旬黄河下游气温异常偏低,郑州、济南、北镇三站比多年平均值分别偏低 2.8°C 、 3.6°C 和 1.4°C ,并且气温偏低的持续时间较长,小浪底水库加大出库流量,确保了下游防凌安全和水资源调度的正常秩序。小浪底水库正常运用期,仍可提供 20 亿 m^3 的防凌库容,三门峡水库可提供 15 亿 m^3 的防凌库容,可以通过合理控制下泄流量,减少凌汛期间河道槽蓄水量,减少开河时的凌峰流量,满足下游防凌减灾的需要。

刘家峡水库建成运行以后,特别是 1989 年按《黄河刘家峡水库凌期水量调度暂行办法》进行凌汛期调度以来,刘家峡水库一是调节凌汛期水量,增大封河流量,提高了冰下过流能力,并使冰期河道保持比较平稳的流量过程;二是使出库水温有所提高,库尾河段不再封冻,大大减轻了宁夏河段的防凌压力,并推迟了内蒙古河段流凌、封河日期,对缓解内蒙古河段的防凌压力、减轻凌汛灾害发挥了作用。

1.2.2.3 在协调黄河水沙关系和减少河道淤积中的作用

黄河是一条多泥沙河流,骨干工程在黄河减淤中也发挥着重要的作用。三门峡水库自 1960 年 9 月至 1964 年 10 月拦沙 44.7 亿 t,使黄河下游河道冲刷 22.3 亿 t。第一次改建后到 1973 年黄河下游河道又发生回淤。水库自 1973 年 11 月采用“蓄清排浑”运用方式以来,每年非汛期水库蓄水拦沙,下泄清水,汛期泄水排沙,充分发挥了黄河下游河道大水带大沙的特点,有利于下游河道输沙入海,减少河道淤积。

小浪底水库主要通过水库拦沙和调水调沙对下游河道发挥其减淤作用。按照工程设计,小浪底水库拦沙约 100 亿 t,可使下游河道减淤 78 亿 t 左右,约相当于下游河道 20 年的淤积量。根据下游河道断面法冲淤量计算结果,小浪底水库下闸蓄水运用以来(1999 年 10 月至 2010 年 4 月),黄河下游各个河段都发生了冲刷,黄河下游利津以上河段累计冲刷 18.15 亿 t。伴随着下游河道的持续冲刷,各河段平滩流量不断增大,黄河下游河道的最小平滩流量由 2002 年的 $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 2010 年的 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

1.2.2.4 在确保黄河不断流和供水安全中的作用

上游的龙羊峡水库、刘家峡水库联合运用,将丰水年的多余水量调至枯水年或特枯水年,补充枯水年全河水量之不足,实现年际间水资源的合理调配,同时两水库拦蓄黄河汛期水量以补充枯水期水量之不足,提高了沿黄两岸的供水保证率,增加了上游梯级水电基地的发电效益。分析 1998 年 7 月至 2009 年 6 月系列,从水资源年内分配来看,龙羊峡、刘家峡两库汛期(7~10 月)多年平均蓄水为 50.6 亿 m^3 ,最大蓄水量达 122 亿 m^3 (2005 年),非汛期(11 月至次年 6 月)补水多年平均为 44.3 亿 m^3 ,最大补水量达 64.4 亿 m^3 (2005~2006 年度);从水资源年际配置来看,两水库年最大蓄水量达 56.3 亿 m^3 (2005~2006 年度),年最大供水量为 39.0 亿 m^3 (2002~2003 年度);2000~2003 年度连续三个年度黄河来水特枯,龙羊峡水库合计跨年度补水 75.2 亿 m^3 ,对特枯水年黄河不断流、保障生活和基本的生产用水起到了关键作用。

小浪底水库建成运用后,通过黄河干流骨干工程联合调度,在作物生长的关键季节实施水量集中下泄,缓解了下游两岸地区的旱情,保证了生活生产供水的安全,发挥了灌溉供水效益。同时小浪底建成以来黄河下游河段没有发生断流现象,入海水量增大,河口地区生态环境显著改善。1999~2009年,除2003年发生秋汛外,黄河流域来水持续偏枯,2002~2003年度花园口站天然径流量仅255.0亿 m^3 ,不足多年均值的50%,是有实测资料以来的最小值。由于小浪底水库的合理调蓄,不仅确保了黄河下游连续11年不断流,保障了黄河下游沿黄地区按照国家批准的年度用水计划用水,还5次向河北、天津应急调水,3次实施引黄济淀,并在2003年旱情紧急调度、2009年流域应急抗旱中发挥了重要作用。

1.2.2.5 发电作用

黄河干流峡谷众多,水力资源丰富。据2004年完成的全国水力资源复查结果,黄河流域水力资源理论蕴藏量共43312MW,其中干流32827MW,占75.8%,具有良好的水电开发条件。新中国成立后,黄河干流水电资源得到了高度开发。截至2008年,黄河干流已建、在建水电站27座,装机容量达18945MW。已经建成的龙羊峡、李家峡、公伯峡、刘家峡、万家寨、三门峡、小浪底等水利枢纽和水电站工程19座,装机容量12084MW,正在建设的水电站有拉西瓦、积石峡、乌金峡、龙口等8座,装机容量6861MW。龙羊峡、李家峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡等上游10余座水电站组成了中国目前最大的梯级水电站群。截止到2008年底黄河干流水电站已累计发电约7000亿kWh。

1.2.3 水沙调控体系已建骨干工程在协调水沙关系和综合治理方面的局限性

已建的龙羊峡水库、刘家峡水库、三门峡水库、小浪底水库等骨干工程,在防洪、防凌、工农业供水、发电等方面发挥了重要作用,但现状骨干工程在调控黄河水沙和综合治理方面还有很大的局限性,主要表现在以下几个方面。

1.2.3.1 已建工程在协调黄河下游水沙关系方面的局限性

(1) 现状工程条件下仅靠小浪底水库来完成调水与调沙任务存在较大困难。

调水调沙的目的是依靠水库蓄水和河道来水,人工塑造大流量过程,充分发挥大流量级水流的输沙能力,输沙入海。小浪底单库调水调沙运用,若要满足调水调沙所需水量,在水库蓄水较多时,不仅不能冲刷本水库进行泥沙调节,且在中游发生高含沙洪水时,小浪底水库仅能依靠异重流排沙,也不能充分发挥水流的输沙能力,还会造成大量泥沙在库区淤积,缩短水库拦沙库容的使用年限。根据水库泥沙的运行规律,当使水库排沙比较大,同时遇合适的水沙条件时能够冲刷库区淤积的泥沙、延长拦沙库容的使用年限,水库需要维持较低运用水位,但水库以较低水位运行时蓄水量很少,又不能调节足够的水量满足较长历时、较大流量冲刷黄河下游主槽和输送泥沙的要求,因此小浪底水库单库进行调水和调沙之间存在着明显的困难。

(2) 现状工程条件下,万家寨水库、三门峡水库调节库容较小,能提供的水流动力条件不足,水库联合调节泥沙比较困难。

现状条件下,黄河上游进入中下游的中等以上流量低含沙洪水的概率很小,难以依赖天然洪水冲刷恢复水库调水调沙库容,而河口镇—三门峡区间洪水具有含沙量大、历时短

的特点,若利用高含沙洪水冲刷库区淤积物,则会造成出库水流含沙量大幅度增加,进入下游的水沙关系更加恶化,造成下游河槽大量淤积。2004年以来在干支流没有发生洪水时,通过调度万家寨水库、三门峡水库、小浪底水库,人工塑造洪水,并辅以库区淤积三角洲和下游卡口处的人工扰沙措施,冲刷小浪底库区和黄河下游淤积的泥沙,为调控黄河水沙关系、减少下游河道淤积、延长水库使用寿命找到了一种较好的模式。但万家寨水库、三门峡水库调节库容较小,所能提供的水流动力条件不足,水库出库含沙量较小,作用有限。

(3) 小浪底拦沙库容淤满后协调黄河下游水沙关系作用将受到限制。

水库拦沙和调水调沙是协调黄河下游水沙关系、恢复中水河槽的关键措施。小浪底水利枢纽投入运用后,通过水库拦沙和调水调沙运用,黄河下游普遍发生冲刷,下游河道主槽过流能力不断恢复,至2010年平滩流量恢复到 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。但自1999年10月小浪底下闸蓄水至2010年4月,库区已淤积泥沙25.6亿 m^3 ,随着小浪底水库拦沙库容的不断淤积,水库调节库容将不断减小。小浪底水库设计拦沙库容72.5亿 m^3 ,水库拦沙完成后,在入库泥沙没有明显减少、水沙关系依旧严重不协调的情况下,仅依靠水库10亿 m^3 的调水调沙槽库容已难以有效协调黄河下游水沙关系,进入黄河下游的沙量将大大增加,黄河下游河道仍会严重淤积,水库拦沙初期恢复的中水河槽将难以维持。

按照本次规划选取的水沙条件计算,小浪底水库于2020年完成主要拦沙期,水库淤积量达到78.5亿 m^3 ,此后水库有冲有淤,不再减少进入黄河下游河道的泥沙。2020~2030年进入黄河下游河道的泥沙年平均将增加到9.59亿t,下游河道年平均淤积量将达到2.73亿t。2026年左右黄河下游河道的平滩流量下降到 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下,已经满足不了维持黄河下游河道中水河槽的综合治理的要求。

因此,小浪底拦沙库容淤满后协调黄河下游水沙关系作用将受到限制。单依靠小浪底水库调水调沙不能实现长期协调水沙关系、维持黄河下游河道中水河槽的目的,因此需要在中游修建骨干工程,尽快完善黄河水沙调控体系,提供拦沙和调水调沙库容,协调黄河水沙关系,达到较长期维持黄河下游中水河槽、减少下游河道淤积的目的。

1.2.3.2 已建工程不能解决协调宁蒙河段水沙关系和供水、发电之间的矛盾

天然情况下宁蒙河段常有长历时、低含沙量、流量大于 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水发生,水流造床作用明显,河道平滩流量能够长期保持在 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上,维持了较高的行洪输沙能力。1986年龙羊峡水库、刘家峡水库联合调度运用后,虽然发挥了巨大的兴利效益,但同时也改变了径流分配。随着经济社会的快速发展,工农业生产用水和城乡生活用水大幅度增加,河道内水量明显减少,使有利于保持中水河槽的洪水被大量削减,造成宁蒙河段水沙关系不协调,淤积加重,内蒙古河段1999~2006年平均淤积量达0.55亿t,且大部分淤积在主槽内,内蒙古河段已成为继黄河下游之后的又一段地上悬河。由于河道主槽严重淤积萎缩,中小流量水位明显抬高,局部河段平滩流量下降到 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右,导致河道宽浅散乱,摆动加剧,排洪能力下降,严重威胁防凌、防洪安全。2003年内蒙古河段大河湾流量 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时堤防发生决口;2008年3月20日三湖河口流量 $1\,450\text{ m}^3/\text{s}$ 时水位连续5次突破历史最高纪录,致使内蒙古杭锦旗独贵特拉奎素段两处溃堤,均与河道严重淤积有关。

1.2.3.3 已建工程在控制潼关高程方面的局限性

降低潼关高程对于减轻渭河下游和小北干流河道淤积具有重要意义。影响潼关高程变化的因素十分复杂,不仅与三门峡水库的运用方式和库区冲淤情况相关,还与渭河下游、黄河禹潼河段的来水来沙条件和河道冲淤密切相关。多年研究与实践表明,降低或控制潼关高程需要采取多种措施相互配合、综合治理,才能取得明显效果。其中增水减沙,实施水沙调节,改变不利水沙搭配,对于降低潼关高程十分有效。根据有关研究成果,修建黄河北干流大型调节水库,可利用水库拦沙和调水调沙降低潼关高程,即使在水库拦沙库容淤满之后,还可对抑制潼关高程发挥积极作用。但由于北干流目前尚没有一座控制性骨干工程,这种局面难以改变。

渭河在潼关以上汇入黄河,由于黄河比降大、渭河比降小,当黄河出现较大洪水时,顶托倒灌渭河的现象时有发生。在黄河洪水倒灌渭河时,如果渭河无洪水,而后期渭河又连续发生高含沙小洪水,或者渭河洪水与北洛河洪水遭遇,受北洛河洪水顶托的影响,华阴一带水位再次壅高,遇此情况,洪水漫滩范围大,河槽淤积数量多,渭河河口容易形成长期堆积,并引起淤积上延,对渭河下游防洪十分不利,三门峡水库控制运用后的 1974 ~ 1991 年,实测黄河倒灌渭河的洪水就有 13 次。研究表明,渭河口壅水位与潼关断面洪峰流量直接相关,潼关洪峰流量越大,倒灌渭河的流量也越大,倒灌长度也越长;当潼关流量小于 $6\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,不仅倒灌流量较小,倒灌影响长度也较短。由于北干流控制性骨干工程建设滞后,尚不能有效控制北干流的洪水,难以减轻黄河洪水倒灌渭河的不利影响。

由于黄河北干流河段缺少控制性骨干工程,不能控制北干流的洪水泥沙,造成小北干流河段淤积萎缩严重,河势游荡摆动和冲淤变化剧烈,给河道整治带来严重困难,当发生较大洪水时(约 10 年一遇),就会造成禹门口—潼关河段滩区 62.96 万亩滩地遭受洪水灾害。三门峡库区 335 m 以下现居住有返迁移民 7 万多人,其中 1.3 万人无任何防洪设施,5.7 万人靠防洪标准仅 5 ~ 10 年一遇的土堤防洪,人民生命财产的安全基本没有保障。

1.2.3.4 调整龙羊峡水库、刘家峡水库运用方式的作用和影响

针对目前宁蒙河段汛期水量和有利于输沙、塑槽的大流量大幅度减少,导致主槽严重淤积萎缩的局面,调整水库运用方式的思路就是减少龙羊峡、刘家峡两水库的汛期蓄水,并根据河道泥沙冲淤特性泄放大流量的过程。按现状运用方式和设计水沙条件运用龙羊峡水库、刘家峡水库多年平均拦蓄汛期水量 48 亿 m^3 。本次研究调整龙羊峡水库、刘家峡水库运用方式,以汛期少蓄水 10 亿 m^3 、20 亿 m^3 、30 亿 m^3 、40 亿 m^3 四个可能方案对河道淤积、流域水资源配置以及发电的作用和影响。

不同调度运行方式的河道泥沙冲淤计算成果(见表 1-2)表明,调整龙羊峡水库、刘家峡水库运用方式,当汛期蓄水逐步减少时(即汛期下泄水量逐步增加时),无论宁蒙河道还是黄河下游,河道泥沙淤积量随之减少,平滩流量有所增加。汛期分别少蓄水 10 亿 m^3 、20 亿 m^3 、30 亿 m^3 、40 亿 m^3 时,年均减少宁蒙河道淤积分别为 0.095 亿 t、0.174 亿 t、0.222 亿 t、0.275 亿 t,占现状运用方式下淤积量的 15.8%、25.2%、32.2%、39.9%,最小平滩流量分别增加了 3.5%、11.3%、17.2%、23.1%,对宁蒙河段有一定的减淤作用;黄河下游年平均减淤量分别为 0.046 亿 t、0.150 亿 t、0.202 亿 t、0.300 亿 t,分别占现状运用

方式下淤积量的 2.1%、6.7%、9.0% 和 13.4%，且平滩流量在现状运用方式的基础上也有所增加。

表 1-2 龙羊峡水库、刘家峡水库汛期少蓄水方案不同河段淤积量和减淤量成果
(单位:亿 t)

方案设置	淤积量				减淤量				减淤总量
	宁蒙河段	小北干流	三小水库	黄河下游	宁蒙河段	小北干流	三小水库	黄河下游	
现状运用	0.696	0.638	1.479	2.236	—	—	—	—	—
汛期少蓄 10 亿 m ³	0.601	0.570	1.417	2.190	0.095	0.068	0.062	0.046	0.271
汛期少蓄 20 亿 m ³	0.522	0.514	1.347	2.086	0.174	0.124	0.132	0.150	0.58
汛期少蓄 30 亿 m ³	0.474	0.461	1.388	2.034	0.222	0.177	0.091	0.202	0.692
汛期少蓄 40 亿 m ³	0.421	0.408	1.384	1.936	0.275	0.23	0.095	0.300	0.900

但随着龙羊峡、刘家峡两水库汛期少蓄水量的增加,两水库在黄河水资源配置中的作用将受到明显影响,流域内缺水量增加,尤其是连续枯水段缺水明显增加。与现状运用方式供水相比,汛期少蓄水量越多,经济社会供水量减少越大,汛期少蓄水 10 亿 m³、20 亿 m³、30 亿 m³、40 亿 m³ 方案,多年平均供水量分别减少了 0.7 亿 m³、5.1 亿 m³、12.6 亿 m³、24.3 亿 m³,连续枯水段年供水量分别减少 1.1 亿 m³、6.6 亿 m³、21.0 亿 m³、37.0 亿 m³,特殊枯水年份供水量分别减少了 4.0 亿 m³、11.8 亿 m³、28.7 亿 m³ 和 44.3 亿 m³,严重影响流域经济社会供水和黄河防断流。随汛期少蓄水量增大,龙羊峡以下梯级电站的发电效益急剧下降,汛期少蓄 40 亿 m³ 方案保证出力将降低 2 606 MW,梯级总发电量减少 30.35 亿 kWh,影响西北电网调峰和“西电东送”的高峰期送电任务,严重影响电网的供电安全,龙羊峡、刘家峡水库汛期少蓄水方案对流域供水及发电影响见表 1-3。

表 1-3 龙羊峡、刘家峡水库汛期少蓄水方案流域内供水量和电能指标对比

方案设置	流域内 供水量 (亿 m ³)	与现状相比 减少值 (亿 m ³)	发电量 (亿 kWh)	与现状相比 减少值 (亿 kWh)	保证出力 (MW)	与现状相比 减少值 (MW)
现状运用	441.9	—	673.89	—	6 408	—
汛期少蓄 10 亿 m ³	441.2	0.7	665.27	8.62	6 045	363
汛期少蓄 20 亿 m ³	436.8	5.1	655.43	18.46	5 432	976
汛期少蓄 30 亿 m ³	429.3	12.6	648.14	25.75	4 776	1 632
汛期少蓄 40 亿 m ³	417.6	24.3	643.54	30.35	3 802	2 606

采用类比货币化方法计算各调整方案的综合效益与现状运用方式的差值,龙羊峡水库、刘家峡水库汛期少蓄 20 亿 m³ 水量时,每少蓄 1 亿 m³ 的水量,经济效益损失为