

小浪底水库高滩深槽塑造及 支流库容利用研究

李文学 安催花 付 健 著



黄河水利出版社

小浪底水库高滩深槽塑造及 支流库容利用研究

李文学 安催花 付 健 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书紧密围绕小浪底水库延长拦沙年限和长期保留有效库容的关键技术问题开展研究,共9章,主要包括:小浪底水库入库水沙条件研究,水库排沙和降低水位冲刷的调控指标研究,小浪底水库淤积形态分析,冲刷模式和数学模拟技术研究,水库冲刷水位及冲刷时机研究,不同水库运用方式对水库冲淤形态影响研究,水库拦沙库容和有效库容论证等。提出的水库冲刷模式、排沙和冲刷的调控指标、冲刷模拟技术、降水冲刷时机、高滩深槽塑造和支流库容有效利用等创新性成果,丰富了河流泥沙运动力学和河床演变学的理论,推动了学科发展和治黄科技进步。

本书可供从事水利水电工程规划、设计、科研人员 and 高等院校相关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

小浪底水库高滩深槽塑造及支流库容利用研究/李文学,
安催花,付健著. —郑州:黄河水利出版社,2015.7

ISBN 978-7-5509-1018-8

I. ①小… II. ①李…②安…③付… III. ①水库泥
沙-研究-洛阳市②库容-利用-研究-洛阳市 IV. ①TV145
②TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 023480 号

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

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13.5

字数:310千字

版次:2015年7月第1版

印数:1—1 000

印次:2015年7月第1次印刷

定价:52.00元

前 言

小浪底水库位于黄河中游最后一个峡谷出口,是黄河治理开发和水沙调控体系中的控制性骨干工程,是解决黄河下游防洪、减淤等问题的不可替代的关键工程,在黄河综合治理开发中具有重要的战略地位。工程于1997年10月截流,1999年10月25日下闸蓄水,水库自投入运用以来,在防洪(防凌)、减淤、供水、灌溉、发电等方面发挥了巨大作用。通过水库拦沙和调水调沙运用,下游河道持续冲刷,截至2011年4月,黄河下游利津以上河道累计冲刷泥沙20.15亿t,下游河道最小平滩流量已由2002年汛前的 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $4\,100\text{ m}^3/\text{s}$,主槽行洪输沙能力得到提高,防洪形势有所好转。小浪底水库运用以来,确保了下游河道年年不断流,并基本满足了灌溉、供水的需要,还多次向天津应急供水,缓解了当地用水危机。至2011年,电站累计发电量为534亿kWh,取得了巨大的社会效益和经济效益。

小浪底水库总库容126.5亿 m^3 ,其中支流库容约占40%,设计长期有效库容51亿 m^3 ,拦沙库容75.5亿 m^3 。要充分发挥小浪底水库的防洪、减淤功能,有两个重要条件:一是正常运用期要形成高滩深槽形态,利用10亿 m^3 槽库容长期调水调沙运用;二是要能够有效利用支流库容拦沙减淤。自1997年10月小浪底工程截流以后,随着水库的持续运行,库区淤积量不断增加,至2007年4月,库区累计淤积泥沙21.95亿 m^3 ,其中支流淤积3.43亿 m^3 ,占总淤积量的15.6%。水库运用由拦沙初期运用阶段进入拦沙后期运用阶段,面临运用方式调整,调整后对高滩深槽塑造和支流库容的影响如何,直接关系到长期有效库容能否保持,从而影响水库能否充分发挥综合利用效益。因此,水库运用方式调整对高滩深槽塑造及支流库容利用的影响已成为业界关注的焦点,是当时迫切需要解决的关键问题之一。在此背景下,水利部安排对此问题开展了系统研究,形成本研究成果,支撑了小浪底水库运用调度实践和治黄规划。

本书是在总结2007年以来的大量研究成果的基础上形成的,共分为9章,主要内容及编写人员分工如下:第1章绪论,由李文学、安催花执笔;第2章小浪底水库入库水沙条件研究,由万占伟、盖永岗执笔;第3章水库排沙和降低水位冲刷的调控指标研究,由韦诗涛、钱胜执笔;第4章小浪底水库淤积形态分析,由陈松伟、付健执笔;第5章冲刷模式和数学模拟技术研究,由付健、韦诗涛、陈松伟执笔;第6章水库冲刷水位及冲刷时机研究,由刘继祥、李世滢执笔;第7章不同水库运用方式对水库冲淤形态影响研究,由安催花、张俊华、马怀宝执笔;第8章水库拦沙库容和有效库容论证,由李庆国、李涛、张厚军执笔;第9章主要结论,由李文学、安催花执笔。全书由李文学、安催花、付健统稿。

本研究成果是许多同事经过多年的共同努力完成的,主要完成人员有:李文学、安催花、付健、刘继祥、张俊华、万占伟、陈松伟、马怀宝、韦诗涛、李庆国、李涛、张厚军、李世滢、王婷、钱胜、盖永岗等。在研究过程中,全体研究人员密切配合,相互支持,圆满地完成了

研究任务,在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢!

限于作者水平,书中欠妥之处敬请读者批评指正。

作 者

2014 年 8 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究目标和内容	(2)
1.3 技术路线	(4)
1.4 研究取得的主要成果	(4)
1.5 研究成果的创新性	(8)
1.6 推广应用情况	(8)
第 2 章 小浪底水库入库水沙条件研究	(9)
2.1 黄河水沙基本特征	(9)
2.2 近期水沙变化特征	(12)
2.3 未来水沙变化趋势	(22)
2.4 水沙代表系列	(25)
2.5 三门峡入库水沙条件	(28)
2.6 小浪底入库水沙条件	(29)
2.7 本章小结	(30)
第 3 章 水库排沙和降低水位冲刷的调控指标研究	(32)
3.1 水库的基本输沙流态	(32)
3.2 不同条件下水库排沙效果分析	(33)
3.3 水库冲刷的临界条件	(48)
3.4 水库排沙和降低水位冲刷的调控指标	(49)
3.5 本章小结	(49)
第 4 章 小浪底水库淤积形态分析	(50)
4.1 小浪底水库运用以来干支流淤积量及库容变化	(50)
4.2 小浪底水库运用以来干支流淤积形态变化	(51)
4.3 水库运用方式对干支流淤积形态的影响分析	(60)
4.4 入库水沙条件对干支流淤积形态的影响分析	(60)
4.5 支流沟口淤积特性	(61)
4.6 本章小结	(62)
第 5 章 冲刷模式和数学模拟技术研究	(63)
5.1 冲刷模式	(63)
5.2 水文学模拟技术	(66)
5.3 水动力学模拟技术	(70)

5.4 本章小结	(85)
第6章 水库冲刷水位及冲刷时机研究	(86)
6.1 库水位下降速率和最低冲刷水位	(86)
6.2 降水冲刷时机研究	(86)
6.3 本章小结	(138)
第7章 不同水库运用方式对水库冲淤形态影响研究	(139)
7.1 运用方式研究基础	(139)
7.2 数学模型计算成果分析研究	(149)
7.3 实体模型试验研究	(159)
7.4 拦沙后期推荐运用方式	(167)
7.5 本章小结	(167)
第8章 水库拦沙库容和有效库容论证	(169)
8.1 理论与经验分析	(169)
8.2 数学模型计算研究	(186)
8.3 实体模型试验研究	(194)
8.4 本章小结	(206)
第9章 主要结论	(207)
参考文献	(210)

第1章 绪论

1.1 研究背景

黄河小浪底水利枢纽位于洛阳以北的黄河干流上,在黄河中游最后一段峡谷的出口处,上距三门峡水利枢纽 130 km,向下俯视黄淮海平原,距郑州花园口 128 km。坝址控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河流域总面积的 92.3%;控制黄河径流量的 87% 和近 100% 的输沙量。工程开发任务是“以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉、发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用”。按照黄河开发治理规划,小浪底水利枢纽与上游龙羊峡、刘家峡、黑山峡和中游碛口、古贤、三门峡构成七大控制性骨干工程,由于小浪底工程处在控制黄河下游水沙的关键部位,是解决黄河下游防洪减淤问题的不可替代的关键工程,在黄河综合治理开发中具有重要的战略地位。

小浪底水库正常蓄水位 275 m,正常死水位 230 m,非常死水位 220 m。水库最高运用水位 275 m 时总库容 126.5 亿 m^3 ,防洪库容 40.5 亿 m^3 ,调水调沙库容 10 亿 m^3 ,拦沙库容 75.5 亿 m^3 。小浪底水库长期保持 51 亿 m^3 的有效库容,汛期以防洪和调水调沙运用为主,非汛期调节径流,发挥灌溉、供水、发电等综合效益,凌汛期预留 20 亿 m^3 的防凌库容进行防凌运用。

黄河下游的主要问题是洪水,下游洪水问题的症结在于泥沙,由于泥沙淤积,下游河床以每年大约 10 cm 的速度抬升,随河床抬高而不断加高大堤,河床高悬于两岸地面形成地上悬河,且随着大堤的不断加高,悬河态势愈演愈烈,防洪形势日益恶化。公元前 602 年至 1938 年的 2540 年间,黄河下游决口 1590 次,改道 26 次,其中有 5 次大的迁徙改道,洪灾波及范围北抵天津,南至江苏夺淮入海,波及面积达 25 万 km^2 ,成为中华民族的心腹之患。据分析,现黄河不论从南岸还是北岸决口,直接受灾面积将超过 30 000 km^2 。人民治黄以来,黄河下游已初步形成了上拦(黄河三门峡水库、洛河故县水库和伊河陆浑水库)、下排(三次加高加固两岸堤防)、两岸分滞(北岸北金堤滞洪区和南岸东平湖滞洪区)的防洪体系,防洪设计标准为 1958 年洪水 22 300 m^3/s 。由于三门峡水库严重淤积,潼关高程抬高,改变了原水库的防洪运用条件,“75·8”淮河大水警示,三门峡—花园口区间仍有发生 40 000 m^3/s 以上洪水的可能,下游防洪形势依然十分严峻。黄河小浪底水利枢纽建成后,利用 40.5 亿 m^3 的防洪库容,与三门峡、故县和陆浑水库联合调度,可使黄河下游花园口断面百年一遇洪水 29 500 m^3/s 削减为 15 700 m^3/s ;千年一遇洪水 42 300 m^3/s 削减为 22 600 m^3/s ,将下游防洪标准从不足 60 年一遇提高到近千年一遇。黄河下游从低纬度的河南向北流入高纬度的山东由渤海湾入海,每年封河和开河季节,凌汛问题十分突出,仅靠三门峡水库 15 亿 m^3 的防凌库容远不能满足防凌要求,在 20 世纪 50 年代 2 次发生凌汛决口。小浪底设有 20 亿 m^3 的防凌库容,并可首先投入防凌运用,不足部分

再动用三门峡水库防凌,这样可基本解除下游的凌汛威胁,也减少了三门峡水库防凌运用的概率和由于防凌运用带来的不利影响。利用小浪底水库 75.5 亿 m^3 的拦沙库容进行水库拦沙和调水调沙运用,可减少下游河床淤积约 78 亿 t ,使下游河床 20 年左右不淤积抬升。小浪底水库具有不完全年调节功能,经小浪底水库对径流的调节,平均每年可增加调节水量 17.9 亿 m^3 ,在保证沿黄 50 多座大中城市供水的前提下,可提高下游 $1\,500 \text{ 万亩}$ ($1 \text{ 亩} = 1/15 \text{ hm}^2$) 引黄灌区的灌溉保证率,并可相机为其他 $2\,000 \text{ 余万亩}$ 的沿黄耕地补充水源。小浪底水电站装机容量 $1\,800 \text{ MW}$,以火电为主的河南电网担任调峰、调频和事故备用,设计多年平均年发电量前 10 年为 45.99 亿 kWh ,10 年后为 58.51 亿 kWh ,可大大改善电网的供电质量。小浪底水库以其不可替代的社会经济效益,成为黄河治理的里程碑工程。

小浪底水库在黄河综合治理开发中具有重要的战略地位,利用干支流 51 亿 m^3 的长期有效库容可长期发挥防洪(包括防凌)、减淤、供水、灌溉、发电等综合利用效益。小浪底水库运用方式对高滩深槽塑造及支流库容利用研究是实现其开发目标的关键,也是黄河治理开发的关键。

进入 21 世纪以来,水利行业以科学发展观为指导,提出了从传统水利向现代水利、可持续发展水利转变的治水新思路,黄河水利委员会(简称黄委)提出了“维持黄河健康生命”的治河新理念,这些新思路、新理念的提出和不断实践,需要深入研究泥沙处理、水沙调控等黄河治理开发中的重大问题。小浪底水库是黄河治理开发和水沙调控体系中的骨干工程,其开发目标和作用的充分发挥对黄河治理开发意义重大。按照《小浪底水利枢纽拦沙初期运用调度规程》定义,小浪底水库运用分为三个时期,即拦沙初期、拦沙后期和正常运用期。其中,拦沙初期是指水库淤积量达到 $21 \text{ 亿} \sim 22 \text{ 亿 m}^3$ 以前。拦沙后期指拦沙初期之后至库区形成高滩深槽,坝前滩面高程达 254 m 。正常运用期是指在长期保持 254 m 高程以上防洪库容的前提下,利用 254 m 高程的槽库容长期进行调水调沙。2007 年汛前,小浪底库区累计淤积泥沙已达 21.95 亿 m^3 ,水库运用即将进入拦沙后期,拦沙后期高滩深槽塑造和库区支流库容能否有效利用并影响小浪底水库在黄河下游防洪减淤、水资源优化配置等方面作用发挥,是小浪底水库运用实践急需解决的问题,也是治水新思路 and “维持黄河健康生命”新理念需要深入研究的泥沙处理、水沙调控等黄河治理开发中重大问题的范畴。为此,2007 年小浪底水库运用方式对高滩深槽塑造及支流库容利用研究被列为水利部公益性行业科研专项经费项目开展研究。

1.2 研究目标和内容

1.2.1 研究目标

小浪底水库是黄河治理开发的骨干工程,1999 年 10 月下闸蓄水运用以来,至 2007 年汛前库区已淤积泥沙 21.95 亿 m^3 ,即将进入水库的拦沙后期,完成水库拦沙和坝前滩面高程 254 m 、坝前河底工程 226.3 m 的高滩深槽淤积形态的形成。拦沙后期高滩深槽如何塑造、库区干支流淤积形态是否合理、支流库容能否有效利用将是影响到能否充分发

挥小浪底水库防洪(包括防凌)、减淤、供水、灌溉、发电等综合利用效益的关键问题,是小浪底水库运用实践急需解决的问题,对其进行研究迫在眉睫。

“小浪底水库运用方式对高滩深槽塑造及支流库容利用研究”项目确定的目标是:提出小浪底水库运用方式对高滩深槽塑造和支流库容有效利用的影响,从库区泥沙冲淤及淤积形态角度提出水库可采取的运用方式。论证水库的拦沙库容和有效库容,提出小浪底水库可拦减的泥沙量,干、支流库容,以及支流库容的可利用程度等研究成果。

1.2.2 研究内容

本书围绕小浪底水库运用方式对高滩深槽塑造及支流库容利用的关键技术问题开展研究,主要研究内容有:

(1) 分析拟定研究采用的水沙条件。

由于气候降雨的影响以及人类活动的加剧,进入黄河的水沙量呈逐年减少趋势,尤其是1986年以来减少幅度更大。在以往研究工作的基础上,分析黄河水沙变化,预估小浪底水库入库水沙变化趋势,结合研究需要选定水沙代表系列,拟定研究采用的水沙条件。

(2) 水库排沙和降低水位冲刷的调控指标研究。

水库不同运用阶段应该采取不同的排沙方式,运用初期,蓄水体大,壅水程度高,水库主要的排沙方式为异重流和浑水水库排沙;运用至中、后期,随着库区的持续淤积,水库壅水明流排沙和均匀流排沙机遇逐渐增多。以实测资料分析为主要手段,研究不同的水沙条件和水库运用条件下水库的输沙效果、淤积部位,研究降低运用水位冲刷时不同出库流量和历时条件下水库的冲刷效果、冲刷部位、冲刷形态及恢复库容效果,提出降低水位冲刷的流量及历时。

(3) 小浪底水库干、支流淤积形态分析。

库区淤积形态的变化与水库水位的变化幅度、异重流产生及运行情况、来水来沙条件等因素有密切关系。利用原型观测资料,分析小浪底水库运用以来库区干流、各个重要支流淤积形态;研究不同水沙条件和水库运用条件下库区干流、各个重要支流滩槽淤积形态变化;研究支流沟口倒灌淤积特性,以及淤积后的支流库容特性。

(4) 冲刷模式和数学模拟技术研究。

依据已建水库实测资料分析,结合模型试验,研究库区沿程冲刷、溯源冲刷等冲刷方式、影响因素和冲刷效果;研究库区淤积物的粗细和固结历时对库区冲刷效果的影响;研究不同降低水位冲刷方式下干、支流的纵向、横向形态,对支流沟口“倒锥体”的影响和对支流的影响范围;研究库区冲刷计算的方法和模拟技术。

(5) 水库冲刷时机和冲刷方式研究。

降水冲刷时机是指水库可以泄空冲刷的起始时间,用水库淤积量达到一定数值来表示。根据小浪底水库的实际情况,考虑泥沙淤积物固结、黄河水沙条件变化、水库敞泄排沙和库区冲刷的条件及黄河下游河道减淤要求,研究小浪底水库开始冲刷的库区淤积量或淤积面条件;考虑枢纽工程安全等因素,研究库水位下降速率和最低冲刷水位。

(6) 不同运用方式对水库高滩深槽的塑造模式研究。

方式一是拦粗排细运用方式,利用黄河下游河道大水输沙,泥沙越细输沙能力越大,

且有一定输送粒径大于 0.05 mm 粗沙能力的特性,所以水库保持低壅水、合理地拦粗排细,实现下游河道减淤。方式二运用重点考虑高村以下河段的减淤,增大高村以下河道挟沙力、减少淤积和维持中水河槽的关键是要用一定持续时间的较大流量输沙。采用库区泥沙冲淤计算数学模型,拟定不同水库运用方式,计算分析小浪底水库干、支流泥沙冲淤变化和高滩深槽的塑造过程,结合库区模型试验,分析比较不同水库运用条件下库区干、支流淤积的纵剖面、横断面形态变化,高滩深槽塑造的时间,支流倒锥体变化,库区干、支流库容变化,以及支流库容的利用程度。从库区泥沙冲淤及淤积形态角度提出水库可采取的运用方式。

(7) 水库拦沙库容和有效库容的论证。

随着水库淤积发展,水库库容也随之变化。在以上研究的基础上,结合理论和实测资料分析、数学模型计算、实体模型试验等多种方法,分析论证小浪底库区干支流河槽、滩地平衡纵剖面比降,以不影响三门峡坝下尾水为控制条件,分析论证小浪底水库冲淤平衡的坝前滩面高程、河底高程。分析论证库区冲淤平衡的横断面形态。分析支流倒锥体冲开的可能性。分析论证库区最终的拦沙库容及有效库容。

1.3 技术路线

在调查研究的基础上,采用理论和实测资料分析、数学模型计算、实体模型试验等多种研究手段,分基础层、技术层和方案层三个层次开展研究工作。基础层预测了基于人类活动影响的水沙条件,识别了水库干、支流淤积形态的主要影响因子;技术层包括冲刷临界条件研究、水库冲刷模式和数学模型研究、排沙调控指标及冲刷时机研究、水位下降速率及最低冲刷水位研究;方案层研究提出了运用方式与高滩深槽塑造及支流库容利用的响应关系,论证了拦沙库容和有效库容,评价了支流库容的可利用程度。研究的技术路线图见图 1-1。

1.4 研究取得的主要成果

本研究紧密结合小浪底水库运用实践,从理论研究、实测资料分析、数学模型模拟计算和实体模型试验等方面开展研究工作,同时与库区原型观测和运行总结紧密结合,取得了如下主要研究成果:

(1) 分析了黄河近期水沙变化特性,研究了黄河水沙变化趋势,提出了研究采用的小浪底水库入库水沙条件。

预估未来 50 年黄河龙华河淤四站多年平均水量为 285 亿 m^3 左右,多年平均沙量为 10 亿 t 左右。在 2020 年水平 1956~2000 年水沙系列中选取前 10 年平水平沙的 1968 系列、水沙偏丰的 1960 系列、水沙偏枯的 1990 系列三个系列进行本项目的研究。三个系列 50 年平均水沙量差别不大,龙华河淤四站水量分别为 293.1 亿 m^3 、292.3 亿 m^3 、287.6 亿 m^3 ,沙量分别为 10.56 亿 t、10.44 亿 t、10.52 亿 t,前 10 年平均水量分别为 288.0 亿 m^3 、339.8 亿 m^3 、234.4 亿 m^3 ,平均沙量分别为 11.81 亿 t、13.10 亿 t、8.35 亿 t。

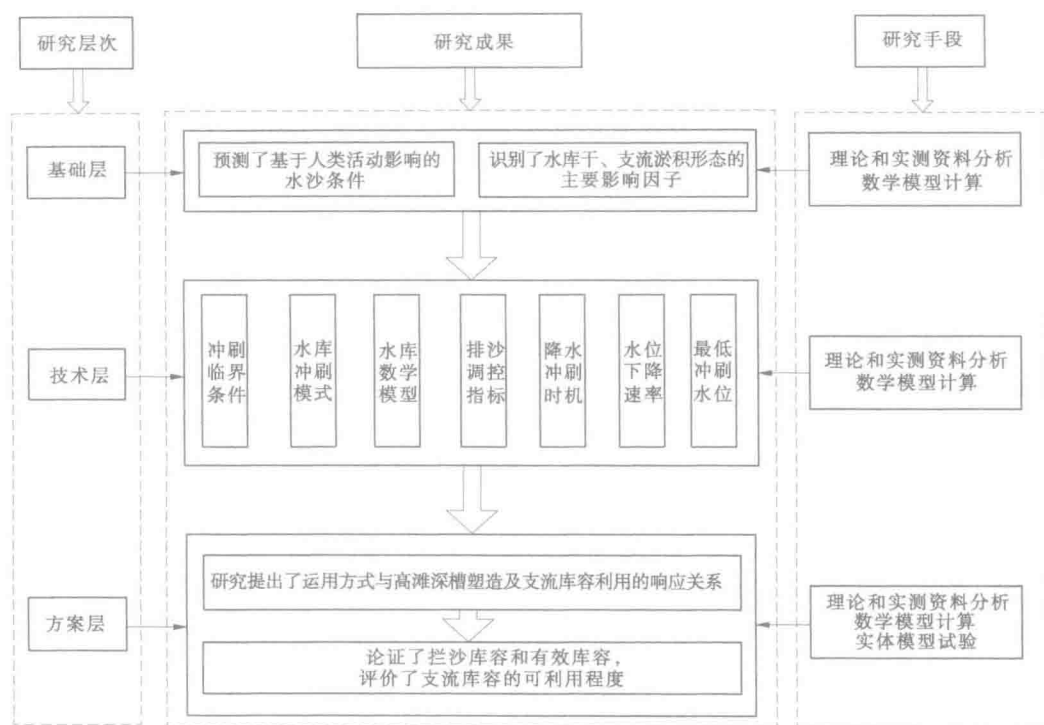


图 1-1 研究的技术路线

考虑三门峡水库的调节作用,以及龙华河淤至三门峡河段的工农业用水和冲淤调整,小浪底水库入库 50 年平均水量分别为 273.2 亿 m^3 、272.6 亿 m^3 、268.0 亿 m^3 ,沙量分别为 9.92 亿 t、9.84 亿 t、9.81 亿 t。1968 系列、1960 系列、1990 系列前 10 年平均水量分别为 268.0 亿 m^3 、320.0 亿 m^3 、215.4 亿 m^3 ,多年平均沙量分别为 10.98 亿 t、11.99 亿 t、7.87 亿 t。

(2) 以实测资料分析和理论探讨为手段,研究了不同水沙条件的输沙效果,不同运用方式对冲刷形态的影响,降低运用水位冲刷时不同出库流量和历时条件下水库的冲刷效果、冲刷部位、冲刷形态及恢复库容效果,提出了小浪底水库排沙和冲刷的调控指标。

水库降低水位冲刷效果主要与库区前期冲淤状态、入库流量、入库含沙量、冲刷历时等因素相关。水库前期为淤积状态时,降低水位冲刷效果好,而前期库区为冲刷状态时,则冲刷效果差,后者的平均冲刷强度和冲刷效率仅为前者的 1/3 左右。平均流量为 2 000 ~ 3 000 m^3/s 量级的洪水,综合冲刷效果较好,且入库过程中有一定的发生机遇,适合用于降低水位冲刷排沙;冲刷历时保持 6 d 左右比较适宜。

(3) 利用原型观测资料,分析完成小浪底水库运用以来库区干流、各个重要支流淤积形态,不同水沙条件和水库运用条件下库区干流、各个重要支流滩槽淤积形态变化,支流沟口淤积特性,以及淤积后的支流库容特性。

小浪底水库运用以来干流淤积为三角洲淤积形态,水库的淤积形态与运用水位关系密切。运用水位降低,淤积三角洲顶点向坝前推进,顶点高程随之降低;运用水位升高,淤积三角洲顶点向上游移动,顶点高程随之升高。总体而言,随着水库的淤积发展,三角洲

逐渐向坝前推移,截至2011年10月,三角洲顶点推进至距坝16.39 km,顶点高程约215.2 m。

库区支流淤积形态,有些时段形成了一定高度的支流拦门沙坎,但随着时间的推移,拦门沙坎逐渐又被泥沙淤平,并未形成较为严重的拦门沙坎。大峪河、畛水河、石井河距坝较近,干流以异重流输沙为主,支流未形成拦门沙坎;而西阳河、流西河距坝相对较远,处于干流淤积三角洲顶点上游,干流以浑水明流输沙为主,支流已初步呈现拦门沙坎雏形;毫清河距坝最远,虽然位于干流浑水明流运动区,但由于其回水长度较短,也未形成拦门沙坎。

(4)依据已建水库实测资料分析,结合降水冲刷专题试验,研究了库区沿程冲刷、溯源冲刷等冲刷方式、影响因素和冲刷效果,提出了冲刷模式研究成果。根据有关水库实测资料和模型基本理论,研究了水库冲淤计算方法和模拟技术,开发提出了小浪底水库水文学和水动力学两套数学模型,进一步深化了水库泥沙数学模型研究与应用。

水库运用方式,特别是坝前水位的变化,与水库冲刷形态关系密切。前期有一定的淤积量,淤积面相对较高的情况下,降低水位易发生溯源冲刷,冲刷效果好,若入库流量较大,配合沿程冲刷则冲刷可发展至全库区。由于黄河水资源供需矛盾越来越突出,小浪底水库拦沙后期要冲刷水库恢复库容可以利用的大流量机遇少,选择溯源加沿程这种冲刷方式,在来大流量时迅速降低水位,提前泄空蓄水,待大流量到来时集中排沙,这种冲刷模式的冲刷效率最高,且利于高滩深槽的形成。

(5)根据小浪底水库的实际情况,考虑泥沙淤积物固结、黄河水沙条件变化、水库敞泄排沙和库区冲刷的条件及黄河下游河道减淤要求,提出了小浪底水库开始冲刷的库区淤积量范围,完成了水库冲刷时机和冲刷方式研究,并考虑枢纽工程安全等因素,研究提出了库水位下降速率和最低冲刷水位。

采用调控上限流量为 $3\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 的不同冲刷时机的对比分析可知,两个调控上限流量表现相同的规律,水库降水冲刷时机越早,降水冲刷的次数越多,库区淤积越慢,拦沙后期越长,综合利用效益越好,在库区淤积量达42亿 m^3 之前,水库坝前淤积面较低,尚不具备降低水位冲刷恢复库容的条件,因此选定冲刷时机为水库淤积42亿 m^3 开始进行降水冲刷。

小浪底水库坝前水位不宜骤升骤降,库水位为275~250 m时,连续24 h下降最大幅度不应大于4 m;库水位在250 m以下时,连续24 h下降最大幅度不应大于3 m;当库水位连续下降时,7 d内最大下降幅度不应大于15 m。库水位在260 m以上连续24 h的上升幅度不应大于5.0 m。分析小浪底水库减淤要求的拦沙库容和调水调沙库容、防洪要求的防洪库容和综合利用要求的调节库容,以及枢纽的设计思想,综合考虑小浪底水库拦沙期最低运用水位为210 m,正常运用期最低运用水位为230 m。

(6)采用理论研究、实测资料分析、数学模型计算和实体模型试验等手段,对逐步抬高坝前水位拦粗排细的运用方式(方式一)和多年调节泥沙、相机降水冲刷调水调沙的运用方式(方式二)进行分析论证,分析了水库高滩深槽的形成过程,提出了小浪底水库不同运用方式和高滩深槽塑造及支流库容有效利用的响应关系。

两种运用方式,方式一主汛期水库蓄水量按照拦粗排细的运用要求控制,库水位在一

个较小的范围内有升降变化,但总趋势是逐步升高的,滩槽淤积面同时逐步上升,当坝前淤积面淤至 245 m 后,再降低库水位冲刷下切,形成高滩深槽,之后利用槽库容拦粗排细调节运用,水库持续淤积,拦沙期较短。方式二小水时蓄水拦沙,拦粗排细运用,大水时降低水位排沙或冲刷恢复库容,库区冲淤交替进行,滩槽同步形成,水库库容可以重复利用,拦沙期较方式一延长。两个数学模型计算的 1968 系列结果表明,水库形成高滩的年限方式一为 11 年,方式二为 16~18 年,由于降水冲刷恢复库容,方式二比方式一延长了水库拦沙期 5~7 年。实体模型试验的 1990 系列具有相同的性质,由于该系列前期来水较枯,方式二降水冲刷恢复库容机会相对较少,即便如此,水库形成高滩的年限的长度方式一为 15 年,方式二为 16 年,方式二比方式一延长水库拦沙期 1 年。

数学模型计算结果,两种运用方式第 18 年水库都形成了滩槽淤积形态,坝前滩面高程都达到 254 m,但深槽的河床高程有所不同,坝前 30 km 范围内方式一河槽纵剖面较方式二高 5~10 m。支流淤积形态没有十分明显的差别,支流沟口的高程随着干流滩面的淤积高程而逐步抬高,在支流沟口处形成高度约 4 m 的拦门沙坎,拦门沙坎后的支流库容由泥沙淤积填充。水库运用过程中,方式一淤积速度较方式二快,其支流无效库容也发展相对较快,但最终两种运用方式支流无效库容差别不大。方式一至第 11 年完成拦沙期,其无效库容为 3.18 亿 m^3 ,有效库容为 46.17 亿 m^3 (其中干流库容为 22.39 亿 m^3 ,支流库容为 23.78 亿 m^3);方式二至第 18 年拦沙后期完成,其无效库容为 3.21 亿 m^3 ,有效库容为 48.84 亿 m^3 (其中干流库容为 24.89 亿 m^3 ,支流库容为 22.95 亿 m^3)。两种运用方式拦沙期完成后,库区冲淤交替出现,库区干、支流库容差别不大。

实体模型试验 20 年成果表明,两方式相比,支流口门处高程和滩面高程基本相同,拦门沙坎高度方式二略小于方式一。水库总库容方式二和方式一分别为 53.629 亿 m^3 和 52.153 亿 m^3 ,其中干流库容分别为 21.225 亿 m^3 及 16.064 亿 m^3 ,支流库容分别为 32.404 亿 m^3 及 36.089 亿 m^3 。方式二与方式一相比,干流库容多 5.161 亿 m^3 ,支流库容少 3.685 亿 m^3 ,总库容多 1.476 亿 m^3 。

(7) 采用经验分析、数学模型计算和实体模型试验多种方法,考虑不同水沙条件,分析论证了小浪底水库平衡淤积形态、拦沙库容和有效库容,深入评价了小浪底水库支流库容的可利用程度。

理论与经验分析结果表明,采用不同水沙系列分析计算,水库形成高滩深槽平衡形态后总有效库容为 51.3 亿~51.7 亿 m^3 ,拦沙库容为 75.2 亿~74.8 亿 m^3 ,扣除支流无效库容 3 亿 m^3 ,可拦沙量 72.2 亿~71.8 亿 m^3 ,与规划设计阶段成果基本相当。

数学模型计算结果表明,1960 系列、1968 系列和 1990 系列拦沙期完成年限分别为 15 年、17 年和 16 年。从拦沙期完成至水库运用到第 50 年,各系列有效库容平均值分别为 47.80 亿 m^3 、48.04 亿 m^3 和 48.48 亿 m^3 ,其中汛限水位 254 m 以上历年水库总有效库容平均值分别为 42.21 亿 m^3 、41.90 亿 m^3 和 42.20 亿 m^3 ,满足防洪库容不小于 40.5 亿 m^3 的设计要求。从拦沙期完成至水库运用到第 50 年各系列平均拦沙量为 76.40 亿 m^3 、76.11 亿 m^3 和 75.74 亿 m^3 ,与规划设计阶段采用的 72.5 亿 m^3 比较接近。

实体模型试验成果表明,采用 1960 系列,按照推荐运用方式运用,水库 14 年完成拦沙期。拦沙期结束时水库有效库容为 41.58 亿 m^3 ,水库拦沙量为 79.19 亿 m^3 。

1.5 研究成果的创新性

成果紧密围绕小浪底水库延长拦沙年限和长期保留有效库容的关键技术问题深入研究,取得了多项创新性研究成果,主要创新点如下:

(1)系统研究了水库不同水沙条件下的输沙效果,不同运用方式对库区冲淤形态的影响,降低运用水位冲刷时不同出库流量和历时条件下水库的冲刷效果、冲刷部位、冲刷形态及恢复库容效果,首次提出了小浪底水库高效排沙和冲刷的调控指标,为延长小浪底水库拦沙库容使用年限提供了科学依据。

(2)深入研究了库区沿程冲刷、溯源冲刷及复合冲刷模式、影响因素和冲刷效果。深化了水库泥沙数学模型的研究,在干流倒灌支流淤积、水库降低水位冲刷模拟技术方面取得了新的突破。

(3)考虑黄河水沙条件变化、泥沙淤积物固结、水库敞泄排沙和库区冲刷的条件及黄河下游河道减淤要求等多种因素,首次明确了小浪底水库开始冲刷的库区淤积量范围、冲刷时机和冲刷方式、库水位下降速率和最低冲刷水位。

(4)对逐步抬高坝前水位的拦粗排细运用方式和多年调节泥沙、结合下游冲淤相机降低库水位冲刷运用方式进行分析论证,首次得出了小浪底水库不同运用方式与高滩深槽塑造及支流库容有效利用的响应关系。

(5)首次分析了小浪底水库支流库容的可利用程度,为客观评价小浪底水库干支流的拦沙库容提供了技术支撑。

1.6 推广应用情况

研究提出的小浪底水库入库水沙条件、水库泥沙冲淤计算数学模型、水库冲刷时机等成果已在《黄河流域综合规划》中得到应用;水库泥沙冲淤计算数学模型、水库排沙调控指标等主要研究成果已在小浪底水库 2009 年以来的调水调沙调度预案和防洪调度预案编制中得到应用;水库淤积量达 42 亿 m^3 开始降水冲刷等运用指标已应用于《小浪底水利枢纽拦沙后期(第一阶段)运用调度规程》的编制,指导了小浪底水库的运用调度实践,对充分发挥小浪底水库以防洪减淤为主的综合利用效益具有十分重要的意义,产生了显著的社会效益、经济效益和环境效益。

研究提出的水库冲刷模式、排沙和冲刷的调控指标、冲刷模拟技术、降水冲刷时机、高滩深槽塑造和支流库容有效利用等创新性成果,在多沙河流水库调度实践中可进一步推广应用,持续发挥显著的社会效益、经济效益和环境效益。

第2章 小浪底水库入库水沙条件研究

2.1 黄河水沙基本特征

2.1.1 水少沙多,水沙关系不协调

黄河以泥沙多而闻名于世。在我国的大江大河中,黄河的面积仅次于长江而居第二位,但由于大部分地区处于半干旱和干旱地带,流域水资源量极为贫乏,与流域面积相比很不相称。黄河多年平均天然径流量仅 535 亿 m^3 ,来沙量高达 16 亿 t,实测多年平均含沙量达 $35 \text{ kg}/\text{m}^3$ (1919 ~ 1960 年陕县站)。黄河的径流量不及长江的 $1/20$,而来沙量为长江的 3 倍,与世界多泥沙河流相比,孟加拉国的恒河年沙量 14.5 亿 t,与黄河相近,但恒河水量达 3 710 亿 m^3 ,是黄河的 7 倍,而含沙量较小,只有 $3.9 \text{ kg}/\text{m}^3$,远小于黄河;美国的柯罗拉多河的含沙量为 $27.5 \text{ kg}/\text{m}^3$,与黄河相近,而年沙量仅有 1.35 亿 t。由此可见,黄河沙量之多,含沙量之高,在世界大江大河中是绝无仅有的。水沙关系不协调主要体现为干支流含沙量高和来沙系数(含沙量和流量之比)大,河口镇至龙门区间的来水含沙量高达 $123.10 \text{ kg}/\text{m}^3$,来沙系数高达 $0.67 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$,黄河支流渭河华县的来水含沙量也达 $50.22 \text{ kg}/\text{m}^3$,来沙系数达到 $0.22 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 。

2.1.2 水沙异源

黄河流经不同的自然地理单元,流域地形、地貌和气候等条件差别很大,受其影响,黄河具有水沙异源的特点(见表 2-1)。黄河水量主要来自上游,中游是黄河泥沙的主要来源区。

上游河口镇以上流域面积为 38 万 km^2 ,占全流域面积的 51%,年水量占全河(采用三黑武代表,下同)水量的 55.7%,而年沙量仅占 9.4%。上游径流又集中来源于流域面积仅占全河流域面积 18% 的兰州以上,其天然径流量占全河的 75.2%,是黄河水量的主要来源区;兰州以上泥沙约占河口镇来沙的 68.8%。

中游河口镇至三门峡区间是黄河泥沙的主要来源区。其中,河口镇至龙门区间流域面积 11 万 km^2 ,占全流域面积的 15%,该区间有祖厉河、皇甫川、无定河、窟野河等众多支流汇入,年水量占全河水量的 14.1%,而年沙量却占 57.1%,是黄河泥沙尤其是粗沙的集中来源区;龙门至三门峡区间面积 19 万 km^2 ,该区间有渭河、泾河、汾河等支流汇入,年水量占全河水量的 22.0%,年沙量占 37.3%,该区间部分地区也属于黄河泥沙的主要来源区。

三门峡以下的伊河、洛河和沁河是黄河的清水来源区之一,年水量占全河水量的 9.6%,年沙量仅占 1.8%。

2.1.3 水沙年际变化大

受大气环流和季风的影响,黄河水沙,特别是沙量年际变化大。

以三门峡水文站为例,实测最大年径流量为 659.1 亿 m^3 (1937 年),最小年径流量仅为 120.3 亿 m^3 (2002 年),丰枯极值比为 5.5。在 1919 ~ 2008 年长系列中,出现了 1922 ~ 1932 年、1969 ~ 1974 年和 1986 ~ 2008 年三个枯水时段,分别持续了 11 年、6 年和 23 年,花园口断面三个枯水段水量分别相当于长系列的 85%、78% 和 62%;1981 ~ 1985 年为连续 5 年的丰水时段,该时段水量为长系列平均水量的 1.24 倍。

表 2-1 黄河主要站区水沙特征值统计 (1919 ~ 2008 年)

站名	项目								
	水量(亿 m^3)			沙量(亿 t)			含沙量(kg/m^3)		
	7 ~ 10 月	11 ~ 次年 6 月	7 ~ 次年 6 月	7 ~ 10 月	11 ~ 次年 6 月	7 ~ 次年 6 月	7 ~ 10 月	11 ~ 次年 6 月	7 ~ 次年 6 月
贵德	114.44	86.43	200.87	0.12	0.05	0.17	1.02	0.53	0.81
兰州	169.54	140.09	309.63	0.66	0.14	0.80	3.92	1.02	2.61
下河沿	166.95	133.13	300.08	1.21	0.21	1.42	7.23	1.58	4.73
河口镇	129.73	99.37	229.10	0.93	0.24	1.17	7.16	2.46	5.12
龙门	160.70	126.53	287.23	7.29	1.04	8.33	45.35	8.23	29.00
河龙区间	30.97	27.16	58.13	6.36	0.80	7.16	205.32	29.35	123.10
渭洛汾河	55.90	34.60	90.50	4.27	0.40	4.67	76.38	11.58	51.60
四站	216.60	161.13	377.73	11.56	1.44	13.00	53.36	8.95	34.41
三门峡	211.77	160.56	372.33	10.56	1.74	12.30	49.87	10.84	33.04
潼关	187.76	154.99	342.75	8.81	1.82	10.63	46.94	11.72	31.01
伊洛沁河	24.88	14.44	39.32	0.20	0.02	0.22	8.13	1.55	5.72
三黑武	236.65	175.00	411.65	10.76	1.76	12.52	45.48	10.07	30.43
花园口	238.96	176.75	415.71	9.43	1.82	11.25	39.44	10.29	27.05
利津	189.83	121.05	310.88	6.40	1.16	7.56	33.70	9.62	24.32

注:1. 四站指龙门、华县、河津、淤头之和。

2. 利津站水沙为 1950 年 7 月至 2009 年 6 月年平均值。

三门峡水文站年输沙量最大为 37.26 亿 t (1933 年),最小为 1.75 亿 t (1961 年),丰枯极值比为 21.3。由于输沙量年际变化较大,黄河泥沙主要集中在几个大沙年份,20 世纪 80 年代以前,各年代最大 3 年输沙量所占比例在 40% 左右;1980 年以来,黄河来沙进入一个长时期枯水时段,潼关站年最大沙量为 14.44 亿 t,多年平均沙量为 6.95 亿 t,但大沙年份所占比例依然较高,潼关站年来沙量大于 10 亿 t 的 1981 年、1988 年、1994 年和 1996 年 4 年沙量占 1981 ~ 2008 年总沙量的 27.4%。