

水利部公益性行业科研专项经费项目资助出版

黄河中下游 中常洪水水沙风险调控关键技术研究

李 勇 田 勇 张晓华 等 著
马怀宝 李小平 窦身堂



黄河水利出版社

水利部公益性行业科研专项经费项目资助出版

黄河中下游中常洪水 水沙风险调控关键技术研究

李 勇 田 勇 张晓华 等 著
马怀宝 李小平 窦身堂

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以水沙运动基本理论为基础,引进风险理论,在系统论证“泥沙淤积对洪灾风险影响研究是致灾环境变化研究问题”的基础上,定量分析了泥沙淤积及其分布引起的黄河下游防洪系统行洪环境危险性变化及滩区洪灾损失大小变化规律,建立了中下游中常洪水水沙风险调控效果评价模型;选取典型洪水,综合分析计算了小浪底水库淤积、发电、蓄水变化以及下游滩区淹没损失、河道冲淤、平滩流量变化等方面的综合效益和风险情况,提出了不同典型洪水相对较优的风险调度模式。

本书可作为水利工程、环境水利等专业的科研和教学人员以及相关专业管理人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

黄河中下游中常洪水水沙风险调控关键技术研究/
李勇等著. —郑州:黄河水利出版社,2013. 8
水利部公益性行业科研专项经费项目资助出版
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0539 - 9

I. 黄… II. ①李… III. ①黄河流域 - 洪水调度 -
研究 IV. ①TV872

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 208028 号

组稿编辑:岳德军 电话:0371-66022217 E-mail:dejunyue@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:hhsclbs@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:22.75

字数:530 千字

印数:1—1 000

版次:2013 年 8 月第 1 版

印次:2013 年 8 月第 1 次印刷

定价:80.00 元

前 言

多沙河流水库水沙风险调度问题是世界性难题。随着社会经济的发展,黄河流域水资源短缺、水沙不协调的矛盾日益恶化,如何辩证对待水资源利用和泥沙淤积灾害的矛盾,成为水利行业迫切需要解决的重大课题,其中最关键的技术难点是如何定量计算多沙河流水库洪水调度中水库泥沙淤积风险及下游河道泥沙淤积风险。

小浪底水库于 1999 年 10 月投入运用,对提高黄河下游防洪水平和增强流域水沙优化调控能力发挥了重大作用。水库投入运行以来,通过对水沙的科学调度,下游过流能力显著提高,河槽健康指标明显恢复,工农业用水和河道不断流的目标得到了更好的保证,并减少了漫滩洪水发生的概率和滩区淹没损失,取得了巨大的发电效益和生态效益。但从总体上来看,现有调度原则主要是立足于对各项调控指标的确保,由于没有引入风险调控机制,从而在一定程度上影响了水库综合效益(如发电效益、供水效益、利用洪水排沙减淤效益、利用洪水提高下游河道冲淤效率等)的发挥。例如:①严格控制花园口流量不大于下游瓶颈河段的最小平滩流量、确保调水调沙期全河段水流不漫嫩滩,虽在一定程度上减少了滩区淹没损失,但因流量偏小而明显降低了全下游主槽的冲刷塑造效果。②水库排沙水位较高(接近汛限水位 225 m)、蓄水量大,有利于拦减进入下游河道的泥沙、减小下游河道淤积,同时有利于提高供水效益和发电效益以及减小下游断流风险,但也影响了水库的排沙效果,使本可以在下游河道顺利输送(淤积比约 8%)的大量细沙(粒径小于 0.025 mm,约占来沙量的 50%)被拦蓄在水库里,加速了库容的淤积损失,降低了水库拦沙减淤的长期效果。目前,小浪底水库近坝段约 60 km 范围内,床沙中值粒径均在 0.015 mm 以下,还有通过风险调度减少中、细沙在库区淤积的余地。③控制下游中常洪水不漫滩,减少了大量的滩区淹没损失,但也失去了发挥漫滩洪水“淤滩刷槽”作用的机会。

立足于小浪底水库拦沙运用阶段 75 亿 m^3 淤沙库容没有淤满、具有较大的富余防洪库容(254 m 以上库容即可满足防洪要求)的前提条件,针对潼关、花园口 4 000 ~ 8 000 m^3/s 量级的中常洪水过程,结合水利科技的发展,辩证认识防洪、减淤和水资源利用之间的矛盾,于 2007 年编制了任务书,提出了以小浪底水库为调度核心的黄河中下游中常洪水风险调控的初步设想,主要包括:①中常洪水期水库排沙(对接)水位风险调控,以减少库区泥沙尤其库区细沙的淤积。②水库出库含沙量风险调控,以提高下游河道输沙效率。③漫滩洪水出库洪峰量级风险调控,以提高下游河道“淤滩刷槽”效果。④汛前调水调沙期最大出库流量量级风险调控,以提高下游河道冲淤效率。⑤水库汛限水位风险调控,以提高水资源利用效率和发电效益。

经过三年的系统研究,通过实测资料分析、数学模型计算、实体模型试验等研究手段,取得了以下创新性成果:①构建了以小浪底排沙水位、汛限水位和进入下游河道流量、含沙量、洪峰流量为调控指标的中常洪水水沙调控风险指标体系。②深化了对黄河下游水沙运行规律的认识,建立了全面反映水沙和边界条件关键因子作用的河道冲淤效果及空

间分布的计算方法。③在综合分析溯源冲刷内在机制及前人研究成果的基础上,优化耦合了非恒定流模块、溯源冲刷模块及坝前含沙分布模块,改进和完善了水库水沙运行和调度计算模型。④通过泥沙淤积对社会经济的危害机制研究,结合黄河中下游防洪环境特点,计算分析了小浪底水库和下游河道不同淤积水平条件下,黄河中下游洪水灾害的危险性和损失大小,建立了泥沙淤积风险评价模型。⑤选取典型洪水,综合分析了小浪底水库淤积、发电、蓄水变化,下游滩区淹没损失、河道冲淤、平滩流量变化等方面的综合效益和风险情况,提出了不同典型洪水相对较优的风险调度模式。

本书研究是对多沙河流域水库优化调度理论创新的有益尝试,为多沙河流域水库调度过程中如何辩证对待水资源利用和泥沙淤积灾害的矛盾提供了新思路,成果可为小浪底水库调度、黄河下游防洪规划以及黄河防汛方案制订等治黄实践提供参考,对其他多沙河流域治理也有广泛的推广应用价值。由于多沙河流大型水库调度效益评价涉及社会、经济、环境等多个方面,特别是社会效益及环境效益的定量计算目前仍未取得广泛认同的方法,仍需要不断深入探索。限于作者认识水平和研究时间所限,书中难免存在疏漏和不妥之处,竭诚欢迎广大读者批评指正!

作 者
2013 年 4 月

目 录

前 言

1 黄河中下游中常洪水水沙调控风险指标体系研究	(1)
1.1 中常洪水定义	(1)
1.2 黄河下游防洪系统及其作用	(1)
1.3 风险指标分析	(3)
2 小浪底水库单项指标风险调控方案及风险分析	(11)
2.1 水库运用方式	(11)
2.2 水库淤积特点	(12)
2.3 水库排沙效果影响因子及估算方法	(15)
2.4 不同排沙水位风险调控方案计算及风险分析	(19)
2.5 汛限水位风险调度方案及风险分析	(29)
2.6 典型洪水适当抬高汛限水位与降低冲刷水位对冲淤和发电影响的综合分析	(30)
2.7 小 结	(33)
3 黄河下游单项指标风险调控方案及风险分析	(35)
3.1 黄河下游河道不同控制流量级及风险分析	(35)
3.2 黄河下游河道不同量级洪水控制含沙量级及风险分析	(47)
3.3 黄河下游漫滩洪水淤滩刷槽效果及风险分析	(61)
3.4 小 结	(70)
4 黄河中下游中常洪水水沙风险调控效果评价模型	(72)
4.1 洪灾损失评价	(72)
4.2 水资源利用效益评价	(74)
4.3 泥沙冲淤风险评价	(75)
4.4 黄河中下游中常洪水水沙风险调控效果评价模型计算流程	(88)
5 中常洪水风险调控典型方案及综合效果分析	(89)
5.1 中常洪水变化趋势及典型洪水水沙过程的选取	(89)
5.2 小浪底水库、下游河道冲淤数学模型的改进和完善	(104)
5.3 典型洪水基本调控方案及风险调控方案	(125)
5.4 典型风险调控方案的效果和风险损失计算	(130)
5.5 调控方案效果评价	(154)

6 主要成果和应用前景	(168)
6.1 主要成果	(168)
6.2 应用前景	(174)
附录 A 小浪底水库单项指标风险调控方案及风险分析	(175)
A.1 小浪底水库运用以来水库调度及淤积特点	(175)
A.2 分组粒径泥沙在下游河道的输移和冲淤特性	(202)
A.3 单项指标风险调控方案、风险分析方法及验证	(209)
A.4 单项指标风险调控方案计算及风险分析	(222)
A.5 汛限水位风险调度方案及风险分析	(237)
附录 B 黄河下游单项指标风险调控方案及风险分析	(241)
B.1 黄河下游河道不同控制流量量级及风险分析	(241)
B.2 黄河下游河道不同量级洪水控制含沙量分析	(269)
B.2 黄河下游漫滩洪水淤滩刷槽效果及风险分析	(291)
B.4 主要认识	(311)
附录 C 不同量级洪水淤滩刷槽效果及滩区淹没风险试验研究	(313)
C.1 概 述	(313)
C.2 黄河下游漫滩洪水分类及冲淤判别	(315)
C.3 不同量级洪水“淤滩刷槽”规律试验研究	(317)
C.4 不同量级洪水滩区淹没风险分析	(342)
C.5 主要认识及建议	(353)
参考文献	(354)

1 黄河中下游中常洪水水沙调控 风险指标体系研究

1.1 中常洪水定义

洪水有大小之分,按照水利部门的习惯,洪水可分为三个等级:常遇洪水(或普通洪水)、大洪水和特大洪水。这种分等尚缺乏明确的依据,习惯的概念是:对于中小河流,小于10年一遇的洪水为常遇洪水,10~50年一遇的洪水为大洪水,大于50年一遇的洪水为特大洪水;对于大江大河的干流及主要支流,小于20年一遇的洪水为常遇洪水,20~100年一遇的洪水为大洪水,大于100年一遇的洪水为特大洪水。

中常洪水就是常遇洪水,其洪水量级小,出现频率高,对防洪威胁相对较小。这一量级的洪水基本能够通过水库、河道等工程措施来调控,在防洪运用上不致引起太大的恐慌。不同的河流由于洪水特性、河流特性和防洪保护区不同,定量划分中常洪水级别的标准也不同。从普遍接受的频率概念上来说,中常洪水一般是指10年一遇或5年一遇以下的洪水。

在“黄河下游长远防洪形势和对策研究”中研究了黄河下游中常洪水控制流量,对黄河下游中常洪水的约定考虑了下游河道的过流能力、小浪底水库的拦蓄作用等因素,认为通过水库防洪调度基本可以控制5年一遇洪水黄河下游的防洪安全。在成果中以5年一遇洪水作为中常洪水的上限,即黄河花园口站中常洪水是5年一遇及其以下天然洪水,5年一遇设计洪水的天然洪峰流量为 $12\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 。但也有研究认为,花园口5年一遇洪水的量级约为 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$,因此选取中常洪水的上限流量为 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。随着沿黄用水量的增加以及龙羊峡、刘家峡、小浪底、三门峡等骨干水库调节作用的增强,中常洪水出现的频次显著降低,洪量显著减少。尤其1986年龙羊峡水库投入运用后,只有1988年、1992年、1996年发生过3次较大的洪水过程,最大洪峰流量不大于 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$,下游编号洪水洪峰流量的标准也由 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 调整为 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (按设计洪水频率约为一年3次)。在近期黄河中下游洪水调度方案中,研究了1980~1999年花园口站、潼关站实测各量级洪水的变化特点,针对下游防洪要求,认为实测中常洪水洪峰流量量级范围为 $3\,000\sim 8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。同时,国家“十五”、“十一五”科技支撑计划有关维持黄河下游河道排洪输沙关键技术和黄河环境流等方面的研究成果确定,下游河道低限过洪能力标准为主槽平滩流量 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

综合分析结果,本次研究的中常洪水主要为花园口站、潼关站实测洪峰流量在 $4\,000\sim 8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水过程。

1.2 黄河下游防洪系统及其作用

下游防洪一直是治黄的首要任务,经过多年坚持不懈的治理,通过一系列防洪工程的

修建,已初步形成了以中游干支流水库、下游堤防、河道整治、分滞洪工程为主体的“上拦下排,两岸分滞”防洪工程体系。同时,加强了防洪非工程措施建设和人防体系建设。

1.2.1 下排工程

新中国成立后,黄河由分区治理走向统一治理,首要任务是保证黄河不决口。按照各个时期河道淤积情况,对黄河下游大堤进行了4次大规模的加高培厚,自下而上开展了河道整治,并对河口进行了治理,控制洪水泥沙排泄入海。

黄河下游河道善淤多变,水流散乱,主流摆动频繁,容易产生大溜顶冲大堤的被动局面,抢护不及即导致冲决。为了控导河势,减少洪水直冲堤防的威胁,20世纪50年代以来,自冻口以下河段开始,有计划地向上进行了河道整治。在充分利用险工的基础上,修建了大量的控导工程,与险工共同控导河势,减少了“横河”、“斜河”发生的概率。经过多年的建设,黄河下游目前已建成控导工程205处,坝垛3887道。陶城铺以下河段已成为河势得到控制的弯曲性河道,高村至陶城铺过渡性河段的河势得到了基本控制,高村以上游荡性河段布设了一部分控导工程,还需要进行大规模的整治。

1.2.2 上拦工程

为了有效地拦截洪水和泥沙,在黄土高原坚持不懈地开展了水土保持,在中游干支流上先后修建了三门峡水利枢纽、陆浑水库、故县水库和小浪底水利枢纽。本次中常洪水风险调控主要是通过对小浪底水库的风险运用来进行的。

小浪底水库已于1999年10月下旬蓄水投入运用。小浪底水利枢纽位于黄河干流最后一个峡谷的下口,上距三门峡大坝130 km,控制流域面积69.4万 km^2 (占黄河总流域面积的92%),控制黄河90%的水量和几乎全部的泥沙,具有承上启下的作用,是防治黄河下游水害、开发黄河水利的重大战略措施。枢纽的开发任务为:以防洪(包括防凌)减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,除害兴利,综合利用。小浪底水库正常蓄水位275 m,总库容126.5亿 m^3 ,其中长期有效库容51亿 m^3 (防洪库容40.5亿 m^3 ,调水调沙库容10.5亿 m^3),拦沙库容75.5亿 m^3 。

1.2.3 两岸分滞工程

为了防御更大洪水和减轻凌汛威胁,开辟了北金堤、东平湖滞洪区及齐河、垦利展宽区、大宫分洪区,用于分滞超过河道排洪能力的洪水。根据国务院2008年批复的《黄河流域防洪规划》,东平湖滞洪区为重点滞洪区,分滞黄河设防标准以内的洪水;北金堤滞洪区为保留滞洪区,作为处理超标准特大洪水的临时分洪措施;其余三处取消。

东平湖滞洪区处于黄河与大汶河下游冲积平原的洼地上,用于削减艾山以下窄河段的洪水。滞洪区由隔堤(称为二级湖堤)隔为新、老两湖区,大汶河注入老湖区。滞洪区工程包括:围坝77.829 km,二级湖堤26.73 km;进水闸有石洼、林辛、十里堡3座;退水闸为陈山口、清河门2座,由于黄河淤积抬高,退水越来越困难。湖区总面积627 km^2 ,容积30.5亿 m^3 ,人口33.81万人,耕地47.7万亩^①。围坝设计分洪水位45 m,全湖区设计最

① 1亩=1/15 hm^2 ,全书同。

大分洪流量 $7\,500\text{ m}^3/\text{s}$, 考虑老湖区底水 4 亿 m^3 , 汶河来水 9 亿 m^3 , 设计分蓄黄河洪水 17.5 亿 m^3 。

1.3 风险指标分析

黄河问题十分复杂, 经过几代人的不懈努力, 对黄河洪水运行及冲淤规律的研究取得了长足的进展, 在小浪底水库运用方式, 尤其调水调沙运用方面, 积累了丰富的经验。本书在已有大量研究的基础上, 系统总结并深化、细化了对小浪底水库库区和下游河道输沙特性及冲淤演变规律的认识。基于调控指标的可操作性以及调控指标对库区及下游河道冲淤演变、对漫滩洪水淹没损失、对水库发电供水灌溉等效益影响的敏感性, 引入风险机制, 遴选出了小浪底水库排沙水位、出库(进入下游)含沙量、下游漫滩洪水洪峰流量量级、调水调沙期流量量级以及小浪底水库主汛期汛限水位等 5 个主导因子, 作为黄河中下游中常洪水的主要调控指标, 初步构建了中常洪水水沙调控风险指标体系。现分述如下: ①中常洪水期水库排沙水位风险调控, 目标为减少库区中细沙的淤积。②水库出库含沙量风险调控, 目标为提高下游河道输沙效率。③漫滩洪水出库洪峰量级风险调控, 目标为提高下游河道淤滩刷槽效果。④调水调沙期最大出库流量量级风险调控, 目标为提高下游河道冲淤效率。⑤水库汛限水位风险调控, 目标为提高水资源利用效率和发电效益。

1.3.1 调水调沙期最大出库流量量级风险调控, 提高下游河道冲淤效率

现阶段的调水调沙, 按照下游河道瓶颈河段的最小平滩流量控制花园口断面的流量过程, 确保了全下游滩区包括生产堤至主槽间嫩滩的安全, 但大部分河段达不到平滩流量, 冲淤效率较低, 影响了全下游河道的冲刷效果。如果能够实施风险调度, 允许所占河长权重较小的瓶颈河段部分漫滩, 虽然增加了少量的嫩滩淹没损失, 但可更大程度地发挥较大流量在全下游大部分河段冲刷塑槽的潜力, 同时可得到瓶颈河段“淤滩刷槽”效益, 提高主槽过流能力, 将有利于明显提高调水调沙期的冲刷塑槽效果。

1.3.1.1 清水或低含沙水流洪水平均流量对下游河道冲淤的影响

黄河调水调沙分为汛前调水调沙和汛期调水调沙, 小浪底水库拦沙运用初期库容大、蓄水水位相对较高, 主要是以异重流方式排沙, 出库含沙量低, 泥沙级配细, 泥沙含量对河道冲刷效果影响不大, 因此冲刷效果主要取决于洪水平均流量。由小浪底水库拦沙前 5 年和三门峡水库拦沙期的资料可见, 随着洪峰平均流量的增大, 下游河道冲淤效率(单位水量冲淤量)也显著增大(见图 1-1); 当流量大于 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 后(不漫滩), 冲淤效率随流量增大而增大的幅度则明显减小; 当流量增大到 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 后(不漫滩), 冲淤效率基本维持在 20 kg/m^3 左右。

同时, 洪水平均流量大小对小浪底水库异重流排沙或清水冲刷条件下, 下游河道冲淤的沿程分布也具有决定性的影响。从小浪底运用前 5 年的实测资料来看(见图 1-2): 当洪水平均流量大于 $2\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 全下游均发生冲刷; 在平均流量为 $800\text{ m}^3/\text{s}$ 的条件下, 高村以上河段发生显著冲刷, 高村—艾山河段淤积最为严重(平均含沙量衰减约 2 kg/m^3), 艾山—利津窄河段淤积不明显; 当平均流量为 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 冲刷发展到艾山,

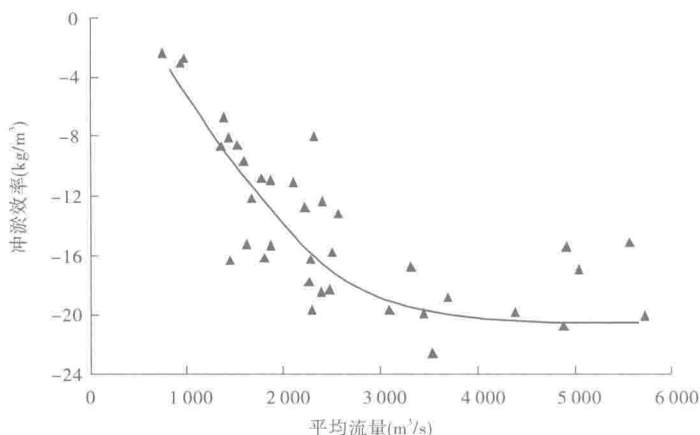


图 1-1 水库拦沙运用初期下游冲淤效率与平均流量的关系

高村—艾山河段也有一定的冲刷,淤积主要集中在艾山—利津窄河段(平均含沙量衰减约 2 kg/m^3)。

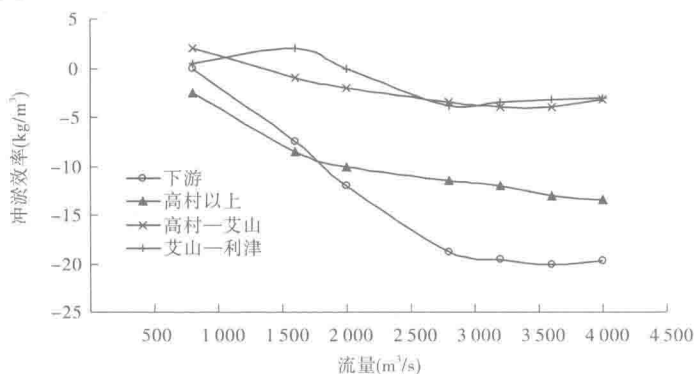


图 1-2 黄河下游低含沙冲刷前期各河段不同流量的冲淤效率

1.3.1.2 洪水平均流量与最大洪峰流量的关系

调水调沙期小浪底水库下泄流量量级的大小取决于洪水平均流量对下游冲淤效率的影响,但更主要地受制于下游河道平滩流量的大小。为了确保下游嫩滩不淹没,花园口控制最大流量应不大于下游驼峰河段(排洪能力最小的瓶颈)的最小平滩流量。

根据小浪底水库拦沙运用期洪水期洪峰流量与平均流量的关系(见图 1-3)可知,洪峰流量约为 1.3 倍的洪水平均流量。清水冲刷条件下洪水平均流量 $3\,500 \sim 4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的冲淤效率最高,所相应的洪峰流量为 $4\,550 \sim 5\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

显然,这一量级的洪水在下游高村以下的大部分河段要发生漫滩。

1.3.1.3 允许局部河段嫩滩淹没的风险调控设想

黄河下游平滩流量一般具有上段偏大、下段偏小、总体沿程差异不明显的特点。部分时段也会出现平滩流量沿程差异较大的现象;例如,河口流路变化会导致近河口河段平滩流量的显著增大。小浪底投入运用以来,2002 年汛前夹河滩—艾山河段表现出了十分突

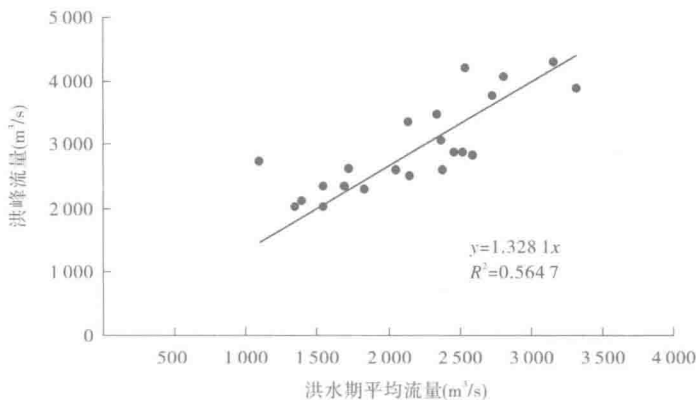


图 1-3 小浪底水库拦沙运用期洪峰流量与平均流量的关系

出的、平滩流量显著偏小的“驼峰”现象,尤其高村附近河段平滩流量仅约 $1\,850\text{ m}^3/\text{s}$ (见图 1-4)。若以驼峰河段最小平滩流量作为花园口控制最大流量,则因为冲刷流量太小必然导致冲淤效率的显著降低,为此,设想允许驼峰河段局部、短河段的嫩滩淹没、增大调水调沙期流量,以换得全下游冲刷效率的显著提高。

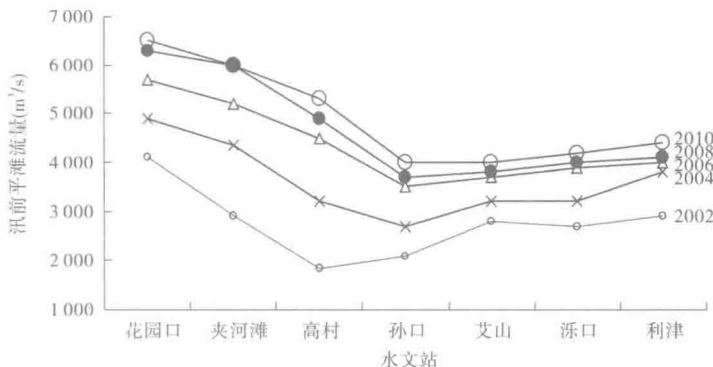


图 1-4 小浪底水库运用后各水文站平滩流量变化

由上述可见,调水调沙期花园口控制流量直接关系到全下游冲刷塑槽的效果以及可能的嫩滩淹没风险。因此,设置小浪底水库调水调沙期控制流量量级为黄河中下游中常洪水风险调控的特征指标之一。

1.3.2 增大出库含沙量量级,提高下游河道输沙效率

黄河泥沙主要依靠洪水输送,尤其是随着洪水频次的减少、洪峰和洪量量级的降低,中常洪水在输沙、塑槽、维持河道排洪输沙基本功能方面的作用更加重要。现有研究表明:增大洪水期含沙量可提高下游河道输沙效率、减小输沙需水量,但同时河道淤积程度也相应增大。若要减少下游河道淤积程度,则需要小浪底水库多拦沙,这样就会面临另一个突出问题:小浪底库区淤积增大。因此,设置小浪底水库出库(进入下游)洪水的含沙量量级为黄河中下游中常洪水风险调控的特征指标之一。

1.3.2.1 下游河道冲淤效率随含沙量增大而增大

黄河下游河道洪水冲淤效率与含沙量密切相关,具有“多来、多排、多淤”的特点。由图 1-5 黄河下游洪水冲淤效率与平均含沙量的关系可以看出,洪水平均含沙量较低时河道发生冲刷,且随着含沙量的降低冲淤效率增大;当含沙量约大于 50 kg/m^3 后,基本上呈淤积状态,且水流含沙量越高,冲淤效率越大。

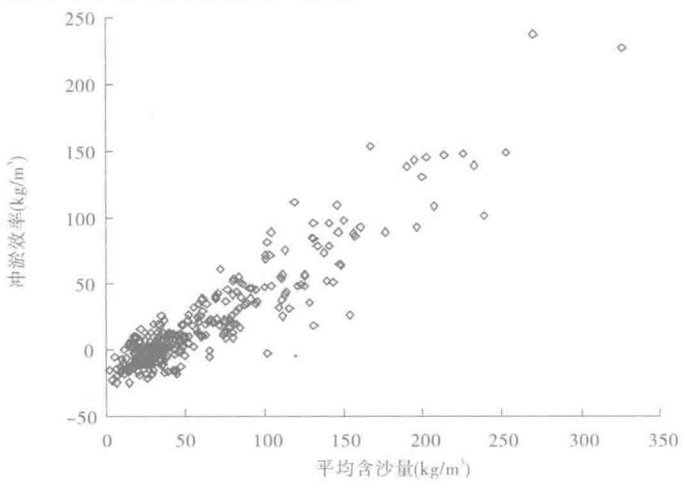


图 1-5 黄河下游洪水冲淤效率与平均含沙量的关系

1.3.2.2 泥沙组成变细可有效减小下游河道的淤积比

将细沙($d \leq 0.025 \text{ mm}$)含量按小于 40%、40% ~ 60%、60% ~ 80% 和大于 80% 分为 4 组,点绘洪水期不同细沙含量条件下冲淤效率与平均含沙量的关系(见图 1-6)。可见,随着细沙含量的增大,冲淤效率有明显的降低趋势。

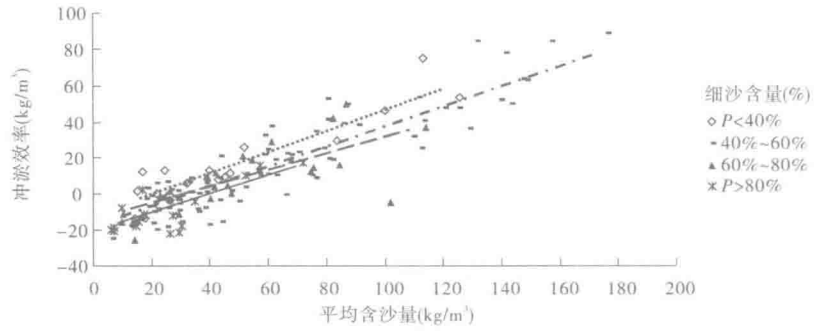


图 1-6 洪水期不同细沙含量条件下冲淤效率与平均含沙量的关系

综上分析可以看出,下游河道冲淤效率随洪水平均含沙量的增大而增大,为此需要尽可能控制(减小)小浪底水库出库含沙量;但是,通过小浪底水库拦沙来实现减小下游含沙量则会增大小浪底库区淤积。为此,从细沙在河道的淤积程度小的规律出发,可以利用改变出库泥沙组成来协调水库排沙与下游河道淤积的矛盾,水库尽量多排细沙,以减少库区淤积,而细沙来量增加也不至于引起下游河道大量淤积。因此,设置小浪底水库出库

(进入下游)洪水的含沙量量级为黄河中下游中常洪水风险调控的特征指标之一。

1.3.3 调控出库洪峰流量量级,提高下游河道“淤滩刷槽”效果

黄河下游漫滩洪水具有“淤滩刷槽”的特性,洪水漫滩有利于遏制主槽淤积抬升、维持长时期滩槽同步淤积、增大平滩流量,但漫滩洪水同时又威胁到下游滩区人民生命财产的安全。为此,研究探讨不同洪峰流量量级洪水的淤滩刷槽效果和相应的滩区损失,进而探讨适宜漫滩的洪峰流量量级,对漫滩洪水风险调度具有重大的指导意义。

1.3.3.1 漫滩洪水“淤滩刷槽”效果与洪峰流量量级的关系

黄河下游大漫滩洪水实测资料点绘的花园口—利津河段滩地淤积量、主槽冲刷量与花园口洪峰流量的关系(见图 1-7)表明,随着漫滩洪水洪峰流量量级的增大,滩地淤积量、主槽冲刷量均明显增大,相应平滩流量也显著增加,因此有“大水出好河”之称。

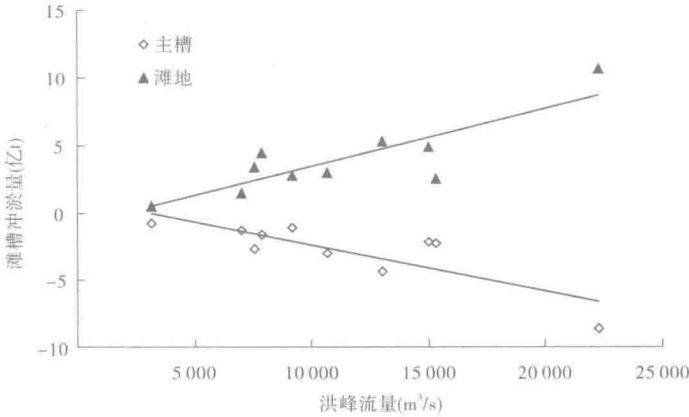


图1-7 黄河下游花园口—利津河段滩槽冲淤量与洪峰流量的关系

1.3.3.2 漫滩洪水淹没损失与洪峰流量量级的关系

基于 2004 年汛后和 2009 年汛前地形,利用黄河下游洪水演进及灾情评估模型 (YRCC2D)进行了不同量级洪水的数值模拟计算,结合滩区村庄、耕地等社会经济信息,统计得出不同量级洪水滩区的直接淹没损失及其分布情况。结果表明:随着洪峰流量量级的增加,滩区直接经济损失显著增大;当洪峰流量量级超过 10 000 m³/s 后,直接损失的增幅明显减小(见图 1-8)。

对比可见,漫滩洪水洪峰流量量级的增大有利于获得更大的“淤滩刷槽”效果,但滩区经济损失也会增大。因此,非常有必要分析漫滩洪水的调控洪峰流量,探讨将小漫滩洪水量级分化处理、尽量避免 6 000 ~ 10 000 m³/s 量级洪水漫滩的调控方式。

1.3.4 降低水库排沙水位,减少库区中细沙的淤积

目前,小浪底水库汛期蓄水水位基本稳定在 220 ~ 225 m(汛限水位)附近,即使在相对较高含沙量洪水条件下,为保障下游河道不断流、提高供水保障率,水位也基本维持在汛限水位附近,从而导致了大量泥沙,包括本可以在下游河道顺利输送的大量中、细沙在库区的淤积。统计表明:小浪底库区近坝段 60 km 范围淤积的全部为细沙,中值粒径在

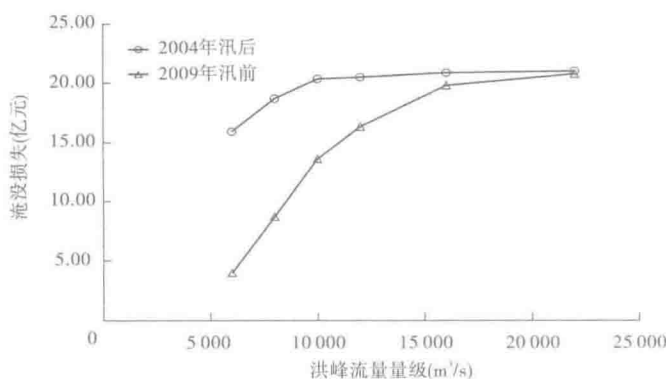


图 1-8 不同量级洪水滩区淹没直接经济损失情况

0.015 mm 以下(见图 1-9)。这种运用方式加快了水库的淤积速度,降低了水库拦沙及其对下游河道的减淤效益。

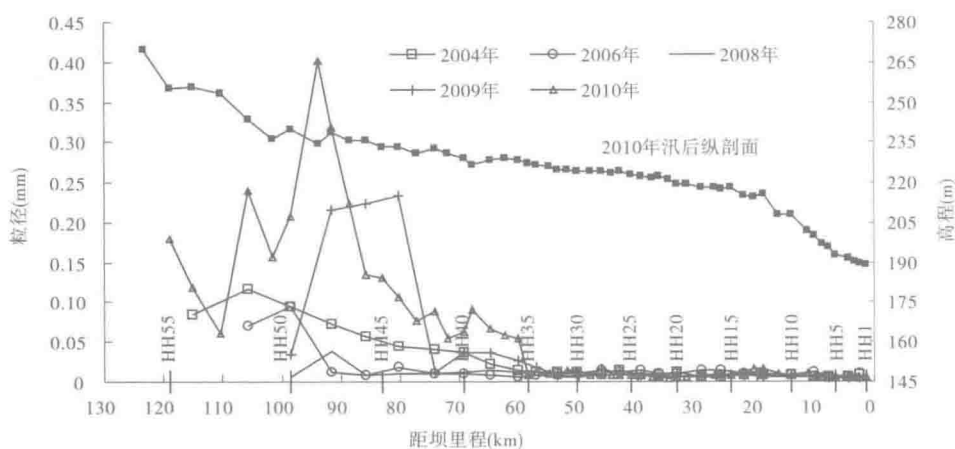


图 1-9 小浪底水库淤积纵剖面及床沙中值粒径的沿程变化

立足于发挥下游河道输沙潜力、减小库区中细沙淤积比例,如果能够在中常洪水期较大幅度地降低坝前水位,短时间内进行明流排沙,并尽可能把前期淤积在坝前 60 km 范围内的细沙冲刷出库,虽然可能导致短时段发电、灌溉效益的损失,但对小浪底水库库容的长期维持、长期发挥水库的综合效益将十分有利。实践表明:洪水期小浪底水库最低运用水位对水库排沙比具有显著的影响,随着水位的降低,排沙比迅速增大(见图 1-10)。尤其是 2010 年汛前调水调沙期间,运用水位低于三角洲顶点高程,引发三角洲顶点及其上游顶坡段的溯源冲刷,使得全沙排沙比高达 137%,并且全沙排沙比的增大主要是细沙排沙比的大幅度增加,中、粗沙排沙比的增幅要相对小得多(见图 1-11)。但同时需要指出的是,随着全沙排沙比的增大,细沙排沙比的增大幅度在减小,而中、粗沙排沙比的增大幅度在明显增大,出库泥沙组成有趋于偏粗的趋势(见图 1-12)。

为此,设置洪水期最低排沙水位作为黄河中下游中常洪水风险调控的特征指标之一。

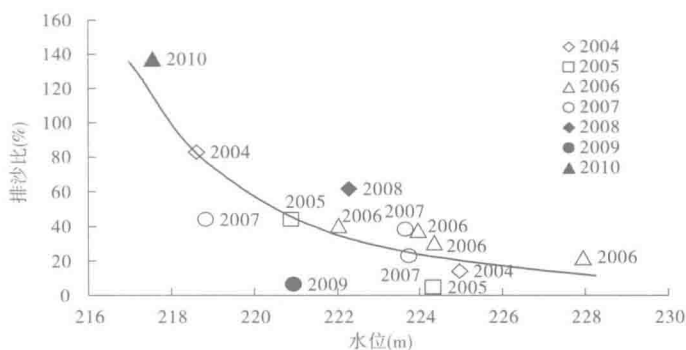


图 1-10 小浪底水库异重流排沙比与洪水期最低水位之间的关系

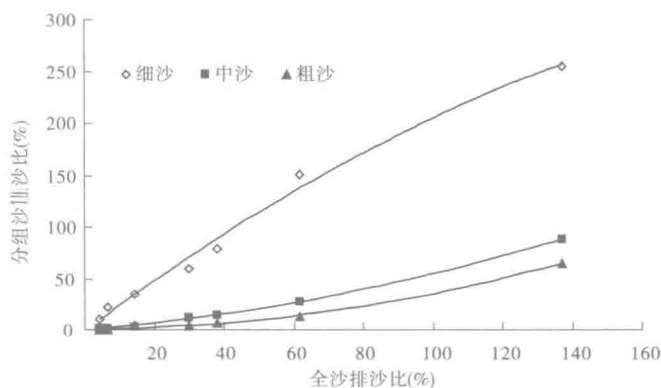


图 1-11 小浪底水库异重流分组排沙比与全沙排沙比之间的关系

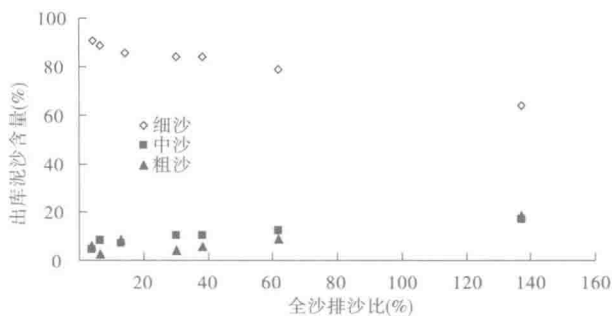


图 1-12 出库泥沙分组沙含量与全沙排沙比的关系

1.3.5 优化水库汛限水位,提高水资源利用效率和发电效益

前述降低中常洪水期排沙水位、增大下泄流量都是立足于显著减少水库淤积的,尤其是中、细沙的淤积。从发电的角度看,水位降低引起水头减小、过机水量减少,相应发电量相应会有所减少,考虑历时较短,影响不会很大。为弥补发电损失,设想在非洪水期适当提高汛限水位,由于历时较长,可明显增加发电效益;同时由于流量小,并以异重流排沙为主,所以对排沙效果的影响不大。两者相综合,求得在相同入库水沙条件下,水库淤积、河

道淤积、发电、漫滩淹没等正负效益的总体最优。

随着洪水预报技术的不断进步和防洪保安体系的逐步完善,防御洪水的能力在增强,小浪底水库能否通过汛限水位的风险调控,获得一定的风险效益,特别是在拦沙运用初期和拦沙运用后期,254 m 以上库容即可满足防洪要求的条件下,对中常洪水实行风险运用,可充分发挥水库较大的潜力,获得综合效益。

1.3.6 黄河中下游中常洪水水沙调控风险指标体系

通过对小浪底、三门峡水库场次洪水排沙规律分析可知,在水库调度过程中,坝前水位是决定场次洪水排沙效果的关键因素,因此排沙水位、汛限水位可作为中常洪水风险调控的“可调控指标”。同时,无论是异重流排沙还是敞泄排沙,排沙效果(或冲刷效果)都受来水来沙条件以及水库淤积状态(特别是淤积重心位置)的影响,在预报来水来沙条件下,对水库当前和可能发生的淤积作初步估计是非常关键的,因此水库淤积状态应作为中常洪水风险调控的“判断指标”。

黄河下游河道洪水期冲淤演变规律研究表明,流量、含沙量、泥沙级配以及洪峰流量是影响河道冲淤变化的关键因素,考虑到泥沙级配当前难以调控,可将流量、含沙量以及洪峰流量作为中常洪水风险调控的“可调控指标”。同时,相同的洪水在不同前期河道平滩流量条件下的冲淤规律也不相同,因此前期河道平滩流量应作为中常洪水风险调控的“判断指标”,综合得到小浪底水库中常洪水风险调控指标体系(见表 1-1)。

表 1-1 小浪底水库中常洪水水沙调控风险指标体系

项目	水库		下游河道控制站		
判断指标	淤积状态		平滩流量		
调控指标	排沙水位	汛限水位	流量	含沙量	洪峰流量