

# 大型水库拦蓄条件下下游河床持续调整过程中的输沙能力响应机制

刘鹏

513022\*\*\*\*\*3078

**摘要:** 大型水库的修建与运用显著改变了下游河道的来水来沙条件, 引发河床的持续调整, 进而重塑河道的水沙输移特性。本文系统分析了水库拦蓄作用下下游河床的调整过程与机理, 揭示了河床持续调整过程中输沙能力的时空响应机制。研究表明, 水库拦蓄导致下游河道发生长距离累积性冲刷, 河床粗化显著, 床沙质补给减少, 悬移质输沙的造床作用减弱。输沙能力的响应表现为: 沿程恢复的非平衡特征、粗细颗粒泥沙恢复程度的差异性、以及临界响应阈值的动态变化。在此基础上, 探讨了水库群联合调度、人工塑造异重流等调控技术对输沙效能的提升作用, 并从水沙运动与河床边界动态互馈的角度, 阐明了调水调沙“1+1>2”效应的内在机理。研究成果可为大型水库群联合调度及下游河道综合治理提供理论依据。

**关键词:** 大型水库; 河床调整; 输沙能力; 水沙关系; 水库群调度; 河床粗化

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.04.036

## 引言

水库作为人类调控水资源分配、利用水能资源、防控流域水旱灾害的重要工程措施, 在发挥巨大综合效益的同时, 也深刻改变着河流的水文情势与地貌演化过程。大型水库的拦蓄作用, 切断了河流上游与下游之间的泥沙输移通道, 导致下泄水流趋于清澈, 泥沙通量锐减。这种水沙条件的突变, 打破了天然河流长期形成的动态平衡状态, 引发坝下河段进入持续调整的“河流再造床”过程。自20世纪以来, 随着全球范围内大型水利工程的相继建成投运, 水库下游河道的河床演变与水沙输移规律已成为河流动力学与河流管理领域的核心科学问题。

## 1 水库拦蓄与下游河床的持续调整过程

### 1.1 水沙条件的突变特征

大型水库的拦蓄作用从根本上改变了下泄水沙条件。从径流过程看, 水库调蓄使径流的年内分配发生显著变化, 洪峰削减、枯水流量增大, 径流过程的脉动程度降低。从泥沙输移看, 水库拦截了绝大部分来自上游的推移质和悬移质泥沙。三峡水库蓄水后, 入库泥沙的76.33%被拦蓄在库内, 细颗粒与粗颗粒泥沙的排沙比分别为24.26%和11.69%。小浪底水库在拦沙初期以蓄水拦沙为主, 尽管后期通过降低水位排沙、塑造异重流等方式提高了排沙效率, 但下泄沙量仍远小于天然状态。

这种水沙条件的突变, 使水库下游河道面临“清水下泄”或“低含沙水流下泄”的全新水沙环境。值得注意的是, 径流总量的变化相对较小, 而泥沙通量的锐减极为显著, 导致水沙关系发生根本性重构。

### 1.2 河床调整的时空演化规律

在水库下泄清水的持续作用下, 下游河道自坝址开始发生沿程冲刷。冲刷呈现出明显的时空演化规律: 在空间上, 冲刷强度由上游向下游逐渐减弱, 近坝段冲刷最为剧烈, 随着流程增加而趋于缓和。三峡水库下游的实测资料表明, 冲刷已从宜昌段向下游传播至湖口附近, 形成长达数百公里的累积性冲刷带。在时间上, 冲刷强度随水库运用年限增长而逐渐衰减, 这既与河床粗化保护层的形成有关, 也与冲刷向深部发展时阻力增加有关<sup>[1]</sup>。

河床调整的形态响应因河段边界条件而异。对于边界条件较好的单一窄深河段, 冲刷主要表现为河床下切, 主槽刷深, 航道条件相对改善; 而对于边界条件较差的游荡性河段, 冲刷往往伴随河岸崩塌与河槽展宽, 甚至形成新的洲滩与汉道, 导致主流摆动加剧。

### 1.3 河床粗化与再造床过程

伴随河床冲刷下切, 床沙组成发生显著变化。细颗粒泥沙被水流选择性输移带走, 粗颗粒泥沙滞留床面, 形成抗冲刷粗化层。汉江丹江口水库下游的研究表明,

太平店以上河段河床粗化已基本完成,转化为相对稳定的分汊河型与单一弯曲河型相间的河道,而太平店以下河段粗化仍在进行中。这种粗化过程不仅改变床面阻力特性,更重要的是改变了水流与床面的相互作用方式。

河床调整本质上是一个“河流再造床”过程。水库修建后,下游河道在水沙条件改变驱动下,从原有的平衡状态向新的平衡状态逐渐演化。这一过程涉及河槽形态重塑、河型转化、纵剖面调整等多个维度,其演化路径取决于来水来沙条件与河道边界条件的组合<sup>[2]</sup>。

## 2 河床调整过程中输沙能力的响应机理

### 2.1 输沙能力的时间演化与沿程恢复特征

水库下游河道的输沙能力并非一成不变,而是随河床调整呈动态演化。蓄水初期,下泄水流含沙量极低,水流处于“次饱和”状态,具有强烈的挟沙能力,促使河床发生剧烈冲刷。随着冲刷向下游发展,河床粗化层逐渐形成,冲刷速率减缓,水流的实际含沙量因河床补给而沿程增加,与输沙能力之间的差距逐步缩小。

三峡水库下游的实测资料揭示了泥沙的“沿程恢复”现象:自宜昌至湖口,总沙量和细颗粒泥沙沿程得到恢复,但恢复量值仍低于蓄水前的平均水平。这种恢复是河床冲刷补给与水流输移能力的综合体现——水流从河床上摄取泥沙,含沙量逐渐增加,但当含沙量接近该河段水流输沙能力时,冲刷趋于停止。

### 2.2 粗细颗粒泥沙的分异响应

不同粒径组的泥沙在输移过程中表现出显著的分异响应特征。粗颗粒泥沙主要来源于河床冲刷补给,其运动方式以推移或跃移为主,输移速率较慢,恢复距离较长<sup>[3]</sup>。细颗粒泥沙既可来自河床补给,也可随水流远距离输移,其沿程恢复速率相对较快。

三峡水库的观测表明,水库拦蓄导致粗、细颗粒排沙比均低于25%,但在下游河道中,细颗粒泥沙的恢复程度明显高于粗颗粒。黄河下游的研究也证实,调水调沙期间排沙的泥沙中,粗沙占比最大(44.4%),中沙和细沙分别占29.0%和26.6%,这些粗泥沙主要淤积在花园口以上河段。这种分异响应的内在机理在于:粗颗粒泥沙的输移需要更强的水流动力,且受床面粗化层的阻滞作用更为明显;而细颗粒泥沙一旦悬浮,可随水流长距离输移,受河床边界的影响相对较小。

随着河床粗化的持续发展,粗颗粒泥沙的恢复程度呈减弱态势。这是因为粗化层形成后,其下的细颗粒被

覆盖保护,水流难以继续摄取;同时粗化层本身稳定性增强,抵抗冲刷的能力提高。这种“自限性”机制使河床调整逐渐趋向新的平衡状态。

### 2.3 河床边界与输沙能力的动态互馈

河床调整与输沙能力之间存在着复杂的动态互馈关系。一方面,河床形态与组成的调整直接改变输沙能力。河床粗化增加床面糙率,降低近底流速,抑制泥沙起动;河槽断面形态变化改变流速分布与水流动力轴线;纵比降调整影响势能分布与沿程能量耗散<sup>[4]</sup>。另一方面,输沙能力的空间差异又驱动着河床的进一步调整——在输沙能力大于来沙含沙量的河段,水流处于次饱和状态,将继续从河床摄取泥沙,引发冲刷;反之,在输沙能力小于来沙含沙量的河段,将发生淤积。

## 3 水库调控对输沙能力的主动塑造

### 3.1 水库群联合调度的叠加效应

面对水库拦蓄造成的下游河道持续调整与输沙能力演变,水库调度已从单一水库的被动应对转向水库群的主动调控。黄河已形成以小浪底水库为核心,三门峡、万家寨、陆浑、故县等干流水库相互配合的联合调度体系。这种联合调度不是各水库调度的简单叠加,而是通过空间尺度上的精准对接,产生显著的“叠加效应”。

水库群联合调度的核心技术是空间尺度的水沙对接。以三门峡与小浪底的“接力”调度为例:三门峡水库先期泄放高含沙水流,该水流经过约10小时演进至小浪底坝前;小浪底水库则提前降低库水位至预定高程(如217米),使高含沙水流能够以异重流形式穿越库区、顺畅下泄。这种厘米级的“水流对接”技术,使两座水库的排沙效能得到充分发挥,2023年汛前调水调沙期间两库合计排沙量创下同期历史之最。

水库群联合调控对下游输沙能力的塑造体现在多个层面:通过合理分配各水库的蓄泄时机与排沙任务,可塑造有利于河床冲刷的流量过程;通过控制下泄水流的含沙量与级配,可调节下游河道的泥沙补给与输移状态;通过干支流洪水错峰补偿,可减轻下游防洪压力、延长冲刷作用时间。这种多目标、多尺度的协同调控,使水库群成为重塑下游河道输沙能力的强大外力。

### 3.2 异重流塑造与排沙效率提升

异重流是水库排沙的重要动力机制,也是水库主动调控输沙能力的关键技术手段。浑水较重、潜流在下,

当高含沙洪水进入水库库区后,可潜入清水层之下形成异重流,沿库底向坝前运移。若能准确把握异重流的潜入时机与运移路径,在异重流到达坝前时开启底孔闸门,即可将高浓度泥沙直接排至下游,实现“排浑蓄清”<sup>[5]</sup>。

小浪底水库在2004年第三次调水调沙试验中首次成功塑造人工异重流,将440万吨泥沙带出库外。这一技术突破意味着水库调度从被动适应泥沙淤积转向主动调控泥沙输移。此后,异重流排沙技术不断完善,建立了异重流排沙比与水库回水长度特征值的对数关系表达式,提高了排沙效果的可预测性与可控性。

异重流的成功塑造对下游输沙能力具有双重意义:一方面,它显著提高了水库排沙比,延长了水库拦沙库容的使用寿命,小浪底水库运用26年来泥沙淤积量仅占拦沙库容的47%,远低于设计预期;另一方面,它使下泄水流的含沙量更接近天然状态,减缓了下游河道的“饥饿冲刷”程度,有利于维持相对协调的水沙关系。

### 3.3 “三条黄河”联动的科学支撑

水库调控与输沙能力响应的定量研究,离不开原型观测、物理模型与数学模拟的深度融合。黄河构建的“原型黄河、模型黄河、数字孪生黄河”联动科研范式,为揭示输沙能力响应机制、优化调度方案提供了强有力的技术支撑。

原型黄河是认识的基础。通过在小浪底库区、下游河道与河口等重点河段布设监测断面,开展常态化查勘与洪水期加密观测,获取了数以千万计的关键数据。这些实测资料揭示了河床调整的真实过程,为理论分析提供了第一手依据。

模型黄河是验证的手段。在黄河水利科学研究院“模型黄河”试验基地,800米长的河道模型可复现黄河下游480公里的游荡性和过渡性河段。调水调沙方案提前在“微缩黄河”中预演,可发现潜在问题、优化关键参数,提高方案的科学性与可靠性。

数字孪生黄河是预测的工具。依托5.5亿条数据构建的数字孪生平台,集成2943支坝体监测仪器、遥感卫星全覆盖监测、12个水利专业模型,可对15天的大流量过程进行水沙演进与河道冲淤模拟,在10分钟内完成十几套调度方案的比选评价。洪峰增值等复杂现象的预报误差已控制在10%以内,为精细化调度提供了决策支撑。

“三条黄河”的相互参证、迭代优化,使水库调控

从经验型走向数字化、智能化,为输沙能力的主动塑造提供了科学依据。

## 4 结论

大型水库拦蓄条件下下游河床持续调整过程中的输沙能力响应,是一个涉及水沙运动、河床演变、水库调控等多因素相互作用的复杂科学问题。通过本文的分析,可得出以下主要结论:

第一,水库拦蓄从根本上改变了下游河道的水沙条件,清水下泄驱动河床发生长距离累积性冲刷。河床调整表现出“上游强于下游、初期快于后期”的时空演化规律,河床粗化是调整过程中的关键响应特征,粗化层的形成与发展制约着后续冲刷强度与输沙能力演化。

第二,输沙能力在河床调整过程中表现出动态响应特征:泥沙沿程恢复具有非平衡性,粗细颗粒恢复程度存在显著分异,粗颗粒恢复随河床粗化呈减弱态势。河床边界与输沙能力之间存在复杂的动态互馈关系,这种互馈具有临界响应特征,为水库调控提供了理论依据。

第三,水库群联合调度可主动塑造下游河道的输沙能力。空间尺度的水沙对接技术产生显著的叠加效应,人工异重流塑造大幅提升排沙效率,“三条黄河”联动的科研范式为精细化调控提供了科学支撑。黄河20余年的调水调沙实践证明,通过主动调控可有效遏制下游河床抬升趋势、显著提升河道过流能力。

## 参考文献

- [1]程亦菲,夏军强,周美蓉,等.黄河下游河床持续调整过程中输沙能力的变化规律[J].水利学报,2025,56(11):1443-1453.
- [2]沈铭晖,胡春宏,李雨晨,等.三峡水库蓄水运用后荆江段输沙能力及其与多因素的响应[J/OL].工程科学与技术,1-11[2026-03-03].<https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20250526.1021.003>.
- [3]杨旭良,谢良涛,周宁,等.罗田水库—铁岗水库输水隧洞输水能力及糙率敏感性[J].人民长江,2024,55(S1):203-206.
- [4]陈翠霞,刘俊秀,付健.基于黄河中游水库群调控的下游河道输沙能力分析[J].人民黄河,2023,45(06):37-42.
- [5]姚仕明,邢国栋,陈栋.三峡建库前后长江中游河道输沙率变化分析[J].长江科学院院报,2022,39(08):10-16.