水利工程排沙技术对下游河道河床稳定性的影响研究

武国全　李志超

焦作黄河河务局沁阳沁河河务局　河南　焦作　454550

摘　要：为破解水利工程泥沙淤积难题、保障下游河道安全，本文聚焦排沙技术对下游河道河床稳定性的影响展开研究。阐述库区泥沙淤积成因与危害、常用排沙技术及河床稳定性评价体系，分析排沙技术对河床冲淤演变、形态结构的双重影响，剖析其引发的河岸坍塌、工程隐患等风险，结合工程实例提出技术优化、防护加固及长效管理对策，为水利工程排沙调度优化、下游河道河床保护提供理论支撑与实践参考。

关键词：水利工程；排沙技术；下游河道河床；稳定性；影响

引言：泥沙淤积是水利工程运行中的突出难题，我国主要河流输沙量常年居高不下，库区淤积不仅削弱工程效益，还打破下游河道水沙平衡，威胁河床稳定与行洪安全。排沙技术作为缓解淤积的核心手段，其选型与调度直接影响下游河床冲淤状态、形态结构及整体稳定性。基于此，本文结合 2024 年相关实测数据与工程实例，系统探究排沙技术对下游河道河床稳定性的影响，提出针对性优化防控措施，助力水利工程安全高效运行。

1 水利工程排沙技术及下游河床稳定性基础理论

1.1 水利工程泥沙淤积成因与危害

（1）库区泥沙淤积成因。库区泥沙淤积由多重因素引发。2024 年数据显示，我国主要河流总径流量较多年平均偏大 9%，总输沙量较上年增幅达 101%，黄河、塔里木河平均含沙量超 3 千克/立方米，是主要沙源[1]。水流入库后流速骤减，挟沙能力下降，泥沙沉降淤积且粗细颗粒分布有差异。如金沙江下游梯级水库 2013-2020 年累计淤积 5.98 亿 m³，溪洛渡库区占比 92.5%[2]。水库蓄水期高水位、小流量调度，进一步加速淤积，多因素叠加形成库区淤积。（2）泥沙淤积的主要危害。泥沙淤积损耗水库库容，2024 年三峡水库淤积 0.492 亿吨、丹江口水库淤积 568 万吨，削弱调蓄、供水、发电效益，缩短工程寿命。同时打破水沙平衡，减少下游水量，缩窄行洪断面，降低行洪能力，还会改变河床形态、破坏生态，威胁输水安全。

1.2 水利工程常用排沙技术

（1）机械排沙技术。依靠机械设备清淤，常用清淤船、机械疏浚、吸沙泵等方式，配套旋流除砂器（分离粒度 47-76μm，处理量≤ 240m³/h）[3]。清淤船适用于大面积疏浚，机械疏浚适配浅水区，吸沙泵效率高、能耗低但水深受限，需结合工况选用。（2）水力排沙技术。借助水流动力输沙，泄空排沙彻底但耗水量大；异重流排沙高效节水，适用于高含沙水库，如小浪底水库 2024 年调水调沙排沙比达 81%；调水调沙、人工扰沙可提升排沙效率，各类技术适用条件与效率差异显著。（3）联合排沙技术。分为水力与机械结合、多工程协同两类，可弥补单一技术短板，适配复杂工况，如金沙江下游梯级水库采用该技术控制坝下冲刷，实施时需做好工况勘测与流程衔接。

1.3 下游河道河床稳定性评价体系

（1）河床稳定性核心内涵。指河床抵御冲刷、维持形态完整的能力，核心包括抗冲性、断面形态稳定性等，是保障河道安全的关键。如 2024 年长江荆江河段平滩河槽冲刷 2207 万立方米，稳定性取决于冲刷强度与河床抗冲能力的平衡。（2）河床稳定性评价指标。分定量与定性两类，定量指标含冲淤量、河岸抗剪强度（软土河段≤ 15kPa）等，定性指标含断面形态、河势变化等。2024 年珠江石角站断面主槽冲淤交替，需多指标综合衡量。（3）河床稳定性评价方法。常用现场监测法（数据精准，高含沙监测突破 938 千克/立方米）、数值模拟法、经验公式法、综合评分法，按需选用即可。

2 排沙技术对下游河道河床稳定性的影响分析

2.1 排沙技术对下游河床冲淤演变的影响

（1）对河床冲刷的影响。排沙期间，水库集中下泄大流量、高含沙水流，如黄河调水调沙期间下泄流量可达 3000m³/s 以上，水流挟沙能力与冲刷力大幅提升，强力下切刷深下游河床，改变河床高程与地形。冲刷强度、范围与下泄流量、流速、含沙浓度、冲刷时长等参数密切相关，排沙强度越大、持续越久，冲刷越深、影

响河段越广。顺直河段水流均匀，冲刷规整平缓；弯道河段受离心力作用，凹岸集中受冲，岸坡侵蚀加剧，冲刷幅度随排沙强度增大而提升。（2）对河床淤积的影响。排沙末期，下泄流量减小、流速放缓，水流挟沙能力骤降，泥沙沉降淤积且存在明显粒径差异。粗沙重量大、沉降快，在排沙口下游近河段大量堆积，抬高局部河床；细沙悬浮久、运移远，抵达下游远段形成薄层淤积。如 2024 年洞庭湖淤积 90.0 万吨、鄱阳湖淤积 164 万吨，均呈现近源厚、远源薄的特征，与水流动力衰减趋势一致。（3）冲淤平衡变化规律。不同排沙技术的冲淤转换节点差异明显：水力排沙靠水流动力，冲刷力强、见效快，冲淤转换迅速；机械排沙以人工清淤为主，输沙量小、水流扰动小，冲淤变化平缓。单次排沙通常先冲刷、后淤积，长期反复排沙会打破天然冲淤平衡。科学调水调沙可调控冲淤量，维持河床动态平衡；不合理的高强度、无规律排沙会破坏水沙平衡，导致河道持续冲刷或反复淤积，改变河床长期演变趋势。

2.2 排沙技术对河床形态与结构的影响

（1）对河道纵断面形态的影响。排沙运行会直接改变河床比降与高程，深刻影响河道纵断面形态。高强度水流冲刷会掏深河床，降低局部河床高程，使河道纵断面坡度变陡；排沙后期泥沙落淤，又会抬高河床，放缓河床比降。如向家坝下游河床 2000m³/s 下枯水位累计降幅约 0.43m，纵断面坡度略有变陡。规范合理的排沙作业，能整平河床凸起河段，削峰填谷，让纵断面变得平顺连续，提升河道输水行洪效率。反之，不均衡、无规划的冲刷，会加剧河床高低起伏，形成深浅交错的坑槽，破坏纵断面连贯性，增大水流阻力，阻碍水流输送，降低河道行洪输水能力。（2）对河道横断面形态的影响。排沙水流能强力改造河道横断面，改变河道宽深比，冲刷加深主槽，优化滩槽结构，提升河道过流能力。但过度、失控的排沙冲刷，会引发一系列负面形态变化。水流冲击会导致河道主槽大幅摆动，偏离原有河道走向；持续侵蚀河岸土体，破坏岸坡结构，引发河岸坍塌、边坡退缩；滩地冲淤分布不均，部分滩地被冲刷流失，部分河段淤积抬高滩面，破坏原有规整对称的横断面形态，加剧河道形态畸变，加大河道治理难度。（3）对河床土体结构的影响。水流冲刷与泥沙淤积从内部改变河床土体结构，影响稳定性。持续冲刷掏空表层松散土体，降低密实度与土颗粒黏聚力，导致土体抗剪强度下降、渗透性增强；泥沙落淤会在表层形成松散淤积层，进一步弱化稳定性。长期冲淤交替会彻底破坏土体原有结构，降低河床整体抗冲能力，诱发土体失稳、不均匀沉降等问题，揭示土体稳定性变差的内在机理。

2.3 排沙技术对河床稳定性的不利影响与风险

（1）河岸坍塌与河道改道风险。高强度、长时间排沙作业，水流会持续侵蚀、淘刷河岸坡脚，破坏边坡受力平衡，导致边坡失稳坍塌。若是河岸土质松软、土体抗冲性差，坍塌范围会持续扩大，带动河道主槽大幅偏移。极端工况下，水流冲击力远超河岸承受极限，会冲破原有河岸束缚，舍弃原有河道，开辟新的水流通道，引发河道改道，损毁沿岸耕地、民居与工程设施，破坏周边生态环境。（2）河床局部冲刷与工程隐患。排沙口下游水流集中、流速湍急，冲击力极强，极易在河床形成深且广的局部冲刷坑，带动河床深泓点持续下移。冲刷坑会直接威胁沿岸堤防根基，掏空堤脚土体，造成堤防塌陷开裂，危及堤坝整体安全。同时还会损伤河道内桥梁、取水口、闸坝等涉水工程基础，引发基础裸露、不均匀沉降、移位变形等问题，埋下严重的工程安全隐患，影响工程正常运行。（3）河势失控与行洪能力下降风险。不合理的排沙调度，会打破天然水沙平衡，扰乱河道水流态势，引发河势紊乱，出现河道分叉、主支槽交替更替、河道摆动加剧等问题。如 2024 年珠江流域因洪水导致河道输沙量激增，部分河段河势紊乱，河床凹凸不平、滩槽结构混乱，会大幅增大水流阻力，缩减有效行洪断面面积，降低河道行洪能力。汛期泄洪不畅，水位快速抬高，洪水漫滩风险加剧，极易引发洪涝灾害，严重威胁沿岸居民生命财产安全与区域防洪安全。

3 提升下游河床稳定性的排沙技术优化与防控对策

3.1 排沙技术优化原则与方案

（1）优化基本原则。排沙技术优化需严守四大核心原则，以安全可控为底线，杜绝高强度、无序排沙引发河床失稳风险；以高效排沙为核心，精准清除库区淤积，保障水库正常效益，如三峡水库通过优化排沙调度，将排沙比控制在 13% 左右；坚守生态友好底线，减少对河道生态、岸坡植被的破坏；坚持因地制宜，结合库区淤积情况、下游河道土质与地形特点定制方案，兼顾排沙效果与河床保护双重目标，实现水沙调控与河道防护双赢。（2）排沙参数精细化调控。摒弃粗放式排沙模式，针对不同河道特性，实施排沙参数精细化调控。根据河床抗冲能力、河道宽窄、土质软硬，合理设定排沙流量（软土河段控制在 500-1000m³/s）、下泄含沙量，严控单次排沙时长与年度排沙频率。对抗冲性弱、土质松软的河段，降低水流冲击力，采用小流量、分次

排沙；对稳定河段，可适度加大排沙强度，制定差异化调度方案，减少水流对河床的剧烈冲击。（3）排沙技术选型优化。结合库区淤积厚度、分布范围以及下游河道承受能力，科学优选排沙技术。轻度淤积河段选用常规水力排沙，降低成本；重度淤积、工况复杂河段，优先采用水力机械联合排沙，兼顾效率与安全性；大力推广生态友好型排沙模式，减少对河床与河岸的剧烈扰动，贴合河道保护需求，延长工程使用寿命。

3.2 下游河道河床防护与加固措施

（1）河岸加固工程措施。针对河岸易坍塌、易侵蚀河段，实施工程加固。采用浆砌石护坡、混凝土护坡、格宾网护岸等方式防护坡面，筑牢堤脚护脚工程，抵御水流淘刷；修建丁坝、顺坝等控导工程，改变水流方向，减轻水流对河岸的直接冲击，全方位提升河岸抗冲能力，遏制边坡坍塌、河道侧向侵蚀。（2）河床形态调控措施。通过人工河道疏浚，清除河床局部淤积凸起，平整河床地形；开展滩槽整治，稳固主槽位置，修复规整河道横断面，严控滩地高差；修建河道控导工程，约束河势摆动，维持合理的河床比降与宽深比，保障河道形态规整，提升输水行洪稳定性。（3）泥沙资源化利用措施。将水库排出的泥沙变废为宝，推行资源化利用。2024 年长江干流及湖区采砂与疏浚砂综合利用量超 1 亿吨，筛选优质泥沙用于河道低洼段回填、堤防加固培厚，补足工程短板；将泥沙用于周边土地整治、坑塘填埋，改良土壤地形，实现减淤增效、河床保护与资源利用的多重共赢，减少泥沙堆积危害。

3.3 排沙运行监测与长效管理机制

（1）全流程水沙监测体系。搭建全方位实时监测系统，覆盖库区排沙全过程、下游河道全河段，配套高含沙监测设备，实现 0-1000 千克/立方米含沙量精准监测。动态监测排沙流量、含沙量，实时追踪河床高程、冲淤量、岸坡变形情况，收集完整水沙与形变数据，精准掌握河道冲淤变化与河床稳定状态，为调度调整提供数据支撑。（2）风险预警与应急处置。结合河道实际情况，设定河床失稳、冲刷过量、河岸坍塌等风险预警阈值，如河床冲刷深度超 0.5m 立即预警，一旦数据超标立即发出预警。提前制定专项应急处置预案，配备应急物资与设备，针对突发边坡坍塌、局部冲刷加剧等险情，快速开展抢险处置，严控风险扩大。（3）长效管理与制度保障。完善水利工程排沙专项调度管理制度，规范排沙流程、操作标准与管控要求；加强水利、生态、河道管理等多部门协同联动，形成管控合力；强化日常工程运维，定期检修排沙设施，做好河道常态化管护，如定期检测旋流除砂器（每 2000-4200 小时检修一次），筑牢河床稳定长效保障。

结束语

本文系统研究了水利工程排沙技术对下游河道河床稳定性的影响，明确机械、水力、联合三种排沙技术对河床冲淤演变及形态结构的双重作用，剖析潜在风险并提出综合优化对策。研究表明，科学选型排沙调度是维持河床动态稳定的关键，未来需结合数字孪生等新技术优化排沙参数与监测体系，推动排沙技术向高效、安全、生态方向发展，为水利工程可持续运行与河道安全提供保障。

参考文献

[1] 李明. 排沙技术优化与河道生态稳定性研究 [J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):89-94.

[2] 张伟, 王芳. 河道排沙技术的生态影响及其应对策略探讨 [J]. 水利科技与经济,2021,27(6):51-55.

[3] 刘晓, 陈峰. 基于生态保护的河道排沙技术优化研究 [J]. 中国水利,2020,9(10):46-49.