

水利枢纽泥沙淤积及排沙措施研究

杨恒玉

新疆维吾尔自治区金沟河流域水利管理中心 新疆 沙湾 832100

摘要: 本文以新疆典型内陆河流域为背景, 系统探讨水利枢纽泥沙淤积问题: 首先从泥沙运动基本理论出发, 结合新疆河流高含沙、强变幅的水沙特性, 深入剖析淤积成因、形态特征及其对工程功能、灌区土壤盐碱化、下游河道断流及荒漠河岸林退化等多维危害; 其次, 全面梳理适用于新疆的排沙减淤措施体系, 包括基于“蓄清排浑”的优化调度(如克孜尔水库汛期低水位敞泄)、水力学排沙工程(如乌鲁瓦提枢纽异重流排沙底孔)、机械清淤及流域水土保持综合治理等, 并详细论证各类措施的适用条件与技术要点; 进而, 提出构建“源头(流域治理)—过程(水库调度)—末端(清淤与资源化)”全链条协同治理模式; 最后, 展望了干旱区泥沙调控与生态修复融合的未来趋势。研究表明, 只有将工程措施与流域生态保护、近期应急与长远规划相结合, 才能有效应对新疆水利枢纽的泥沙淤积挑战, 保障水资源可持续利用。

关键词: 水利枢纽; 泥沙淤积; 排沙措施; 水库调度; 全链条治理

引言

河流泥沙是塑造地貌与维系生态的关键。新疆干旱区内陆河如塔里木河、伊犁河, 汛期冰川融水与暴雨携带大量泥沙入水库。水利枢纽建设打破天然水沙平衡, 流速骤减致泥沙淤积。例如克孜尔水库运行 20 余年库容损失超 40%, 严重影响灌溉与防洪。全球年均因淤积损失库容达数十亿立方米, 新疆多沙河流淤积速率高达全国平均 2~3 倍。淤积不仅减少库容, 还抬高上游水位, 加剧灌区次生盐碱化; 清水下泄则冲刷下游河床, 导致胡杨林退化。

以天山北坡金沟河为例, 其 194 公里流程中, 渠首至温泉段(34 公里)为高产沙区。该段坡陡、山体松散、植被稀少, 夏秋暴雨引发洪水冲刷坡面, 泥沙大量入河。多年平均推移质 9.25 万吨, 悬移质年均含沙量 1.85 kg/m^3 , 6-8 月占全年输沙量 97%。高强度瞬时产沙严重威胁费尔干式引水枢纽运行, 闸前频繁淤积。传统依赖机械清淤成本高、被动; 现代治理强调全流域、全周期管理, 通过优化枢纽设计(如设排沙底孔)、创新调度(异重流排沙、汛期敞泄)及上游水土保持等综合措施, 主动调控泥沙。本文旨在系统梳理新疆典型水利枢纽泥沙淤积机理与减淤技术, 为干旱区水利工程提供科学支撑^[1]。

1 新疆水利枢纽泥沙淤积的成因、形态与危害

新疆水利枢纽泥沙淤积主要源于水库蓄水后水流动力骤减。当地河流汛期含沙量高(如叶尔羌河平均

$5\sim 8 \text{ kg/m}^3$, 峰值超 30 kg/m^3), 入库后流速由 $2\sim 3 \text{ m/s}$ 降至 $0.2\sim 0.5 \text{ m/s}$, 挟沙能力锐减, 导致泥沙沉降。狭长库形、强烈蒸发及水温分层也影响沉降过程。淤积形态多呈“三角洲型”或“锥体”, 如克孜尔水库每年三角洲顶点向坝前推进数十米; 横断面则常全断面均匀落淤, 坝前年抬升 $0.5\sim 1.0 \text{ m}$ 。泥沙具明显分选: 库尾粗砂、库中粉砂、坝前黏粒, 后者含水率高、易再悬浮。危害显著: 一是库容损失, 如台兰河水库兴利库容减少 40%, 加剧春灌缺水; 二是排沙孔堵塞, 如托卡依水库被迫放空维修; 三是上游地下水位抬升, 致渭干河灌区次生盐碱化, 耕地减产 15%~30%; 四是下游清水冲刷河床(塔里木河下切 $1\sim 2 \text{ m}$), 岸崩频发, 且泥沙补给中断使胡杨林退化、绿洲生态恶化, 湖滨湿地萎缩。

2 新疆水利枢纽主要排沙减淤措施体系

2.1 基于水库优化调度的排沙措施

“蓄清排浑”是新疆水库最核心的主动排沙手段。由于汛期(6-9 月)来水来沙占全年 80% 以上, 调度上采取汛期将库水位降至死水位(甚至更低), 利用洪水自身能量冲沙。典型成功案例: 克孜尔水库通过汛期敞泄, 将排沙比(出库沙量/入库沙量)从 0.3 提升至 0.6~0.7, 每年恢复库容约 200 万 m^3 。阿尔塔什水利枢纽设计调度规则中明确规定了汛期低水位运行的排沙时段。此外, 针对突发暴雨洪峰, 可制造人造洪峰冲刷引水口前淤积体, 保证灌溉引水顺畅。

2.2 基于水力学原理的工程排沙措施

新疆多沙河流水库广泛采用异重流排沙技术。当高含沙浑水（含沙量 $> 10\text{kg/m}^3$ ）潜入清水形成底部异重流后，适时开启坝体低位排沙底孔，可高效排出细颗粒泥沙^[2]。某水利枢纽设置了多层排沙孔，实测异重流排沙浓度可达入口含沙量的 80%~90%，排沙耗水率低。在引水渠首，如喀什噶尔河上的卡尔马克渠首，设置沉沙池——将上游来水扩宽减速，使粗沙沉降后定期冲排，保护了下游水轮机及干渠免于磨蚀。导沙坎、拦沙坎等辅助设施也在阿湖水库排沙洞进口得到应用。

2.3 机械与物理清淤措施

对于已形成顽固性淤积且水力排沙效果有限的库区（如小型平原水库），需采用机械清淤。新疆常用水力冲挖机组和绞吸式挖泥船，在某水库清淤工程中，累计清出淤积物 120 万 m^3 ，短期内恢复了部分库容。但机械清淤成本高昂（约 15~30 元/ m^3 ），且淤泥处置困难——若用于改良周边荒漠土壤则需检测盐分及重金属含量。虹吸排沙在焉耆盆地某些小型水库试验显示，可低成本排除表层细颗粒淤积，但效率受库水位差限制。气举排沙、射流扰沙等新技术仍在试验阶段。

2.4 流域尺度的源头治理措施

新疆流域面积广阔，水土流失是泥沙的主要来源。在天山北坡、昆仑山北麓等前山地带，过度放牧和开垦导致坡面侵蚀加剧。通过实施退耕还林还草、建设梯田和谷坊，以及推广保护性耕作（如免耕覆盖），可有效减少侵蚀产沙。例如，在库车河流域开展的小流域综合治理示范，五年内使河道输沙模数下降约 30%。塔里木河上游的乔灌木结合植被恢复工程，也显著遏制了沟道侵蚀。同时，严格管控山区矿产开发和道路建设，避免人为加速侵蚀。这类措施虽然见效周期长（5~10 年），但能从根源上降低入库泥沙通量，是新疆水利枢纽可持续发展的根本保障。

3 构建全链条协同治理模式的必要性与路径

3.1 单一措施的局限性分析

新疆水利枢纽的泥沙问题具有高度复杂性：单一调度受制于灌溉供水刚性需求和下游生态基流约束；异重流排沙需要入库含沙量足够高且形成稳定潜流，在洪水退水阶段难以奏效；机械清淤成本高、处理困难；流域治理涉及多个行政单元和民族聚居区，协调难度大^[3]。例如，仅依赖汛期敞泄排沙可能导致下游灌区引水不足，引发矛盾。因此，必须构建协同模式。

3.2 全链条协同治理的理念内涵

全链条协同治理强调从“流域产沙—河道输沙—水

库沉积—排沙出库—下游输沙”全过程进行系统调控。其核心理念是在保障新疆绿洲经济用水需求的同时，最大限度地实现泥沙的动态平衡，减少库区淤积和下游生态负效应。

3.3 协同治理模式的实施路径

3.3.1 规划与设计层面：泥沙问题前置化

在新疆新建水利枢纽的可行性研究阶段，必须将泥沙调控能力作为核心设计指标。首先，基于长序列水沙资料（含冰川融水型与暴雨型洪水泥沙级配）开展三维泥沙输移数值模拟，预测不同工况下库区淤积时空分布。以阿尔塔什水利枢纽为例，设计阶段采用 MIKE21 模拟高含沙异重流运动，据此优化排沙底孔布置高程（距原河床 8m、12m、16m 三层）及单孔尺寸（ $4\text{m} \times 5\text{m}$ ），确保汛期低水位时仍能高效排沙。其次，库容分配中应预留“动态冲沙库容”，即死库容以下设置“排沙限制水位”，该部分库容不参与兴利，专用于汛期集中冲沙。同时，引水式枢纽（如喀什噶尔河流域电站）应在渠首上游设置导沙坎和沉沙槽，利用弯道环流分离底层高含沙水流。

3.3.2 运行与管理层面：水沙智能感知与多目标调度

需建立“预报—预警—调度—评估”闭环系统。一是完善水沙监测网络，在入库控制站（如克孜尔水库上游沙里桂兰克站）增设在线测沙仪与 ADCP，实现含沙量、颗粒级配的 15 分钟级实时传输。二是构建基于人工智能的水库泥沙联合调度模型，输入 72 小时气象融水预报及实时水沙数据，滚动模拟不同方案的排沙比、灌溉缺水量及下游冲刷程度。乌鲁瓦提枢纽已部署的调度平台能自动识别异重流前锋到达时间，30 秒内生成开启底层排沙孔指令，使排沙浓度达入库含沙量的 85% 以上，排沙耗水率控制在 $15\text{m}^3\text{水}/\text{m}^3\text{泥}$ 以内。三是建立多目标动态权衡机制，汛期首峰优先实施“先敞泄排沙，后蓄水”的运行策略。以新疆金沟河引水枢纽为例，该枢纽采用内外库布置型式，外库由泄洪冲砂闸、上游挡水墙及右岸河道山坡围成，主要承担拦截沉积推移质泥沙的任务；内库用于沉积悬移质泥沙并进行短时调节。泄洪冲砂闸共设 3 孔，采用钢筋混凝土结构。在实际运行管理中，当接收到洪水预警信息后，运行人员提前将外库蓄水全部排空，使库区处于低水位状态。待洪水来临后，通过三孔泄洪闸的非均匀开启方式实施定向冲沙——具体做法并非三孔均衡开启，而是根据淤积分布情况，采取差异化的闸门开度，例如东侧闸门开启 1.5m、中间和西侧闸门分别开启 1.0m，使洪水从不同方向以不均匀的

流量涌出,形成东侧水流冲击力集中、西侧相对较弱的水力格局。这种非均匀开启方式使得冲击力强的一侧能够集中水流能量,有效冲刷对应区域的渠底淤积;在后续的洪峰过程中,通过轮换调整各孔闸门的开启高度与次序,依次对东、中、西三个区域实施针对性冲刷,从而实现对外库不同部位淤积泥沙的分区清理。该运行方式充分利用了洪水自身的天然水动力,在不额外消耗水资源的前提下完成外库清淤,有效解决了外库推移质泥沙的淤积问题。梯级水库联合运行时,上游拦粗沙、下游排细沙。此外,将排沙与生态补水结合——阿尔塔什枢纽2024年“生态排沙调度”试验中,利用下泄浑水冲刷塔里木河干流枯水河槽,同时促进胡杨林种子萌发。

3.3.3 流域治理层面:跨区域补偿与水土保持协同

须打破行政壁垒,建立“下游受益—上游治理”补偿机制。由枢纽管理单位联合下游灌区,从水费收入中提取5%~8%作为生态补偿基金,专项用于上游牧区围栏封育、草场改良及沟道谷坊建设。克孜尔水库管理局与拜城县政府已签订《上游泥沙源头控制合作协议》,按每减少1吨泥沙补偿40元的标准拨付资金,用于库车河流域梯田与人工草地恢复^[4]。同时,将泥沙治理纳入塔里木河流域综合规划强制性条款,对超许可开垦、无序采矿实行“泥沙损害赔偿”制度。通过上述协同路径,从源头降低产沙模数,实现流域治理与水库调度的良性互动。

4 新疆水利枢纽泥沙淤积研究与治理技术的未来趋势

面向新疆干旱区的特殊需求,未来趋势包括:

一是精准化监测与模拟——利用无人机+声学多普勒流速剖面仪(ADCP)实时监测库区异重流运动,结合卫星遥感反演流域土壤侵蚀模数,建立新疆主要河流的“数字水沙”孪生模型。

二是智能化调度——引入强化学习算法,训练水库调度智能体,使其自动适应新疆极端天气下的洪水-高含沙过程,实现“预报-调度-评估”闭环。

三是淤积物资源化利用,特别是针对新疆土壤普遍偏碱性的特点,库区淤积物富含粉砂和黏粒,且常携带一定量的有机质和矿物质,可作为优质的土壤改良剂。具体方式包括:将清淤淤泥经过简单晾晒、破碎后,与当地盐碱土按一定比例(如1:3~1:5)混合,可显著增加

土壤孔隙度,降低容重,使板结的碱性土壤变得疏松透气;同时,淤积物中的黏粒具有较强离子吸附能力,能置换土壤中的钠离子,促进盐分淋洗,有效缓解碱化危害。台兰河水库已开展试点,利用清淤淤泥培肥苗圃土壤,使苗木成活率提高20%以上,棉花试验田出苗率提升15%。未来应建立淤积物分级利用体系:粗砂用于建筑材料(制砖、陶粒),细粒组分定向用于周边中低产田改良或荒漠化土地修复,形成“清淤—处理—应用”产业链,既消纳淤积物又降低治理成本。

四是生态化治理——将排沙过程与下游生态补水相结合,模拟自然洪峰过程,在排沙的同时冲刷下游河道、激活河岸林更新。阿尔塔什水利枢纽已探索“生态排沙调度”,在满足灌溉的前提下,适时放水以促进塔里木河下游胡杨林种子萌发。未来更应融合生态需水规律,制定排沙—生态联合调度规程,使泥沙调控成为恢复流域健康水循环的手段,而非单纯工程问题。

5 结语

新疆水利枢纽泥沙淤积是一个融合自然地理、工程技术与生态保护的复杂问题。本文结合新疆典型内陆河流域的地理环境特征,系统分析了泥沙淤积的成因、形态及多维度危害,梳理了适用于新疆的优化调度、水力学排沙、机械清淤和流域治理等措施,指出单一措施的局限,进而提出构建“源头-过程-末端”全链条协同治理模式。研究表明,只有将工程措施与流域生态保护、短期应急与长期规划、局部优化与区域统筹有机整合,才能有效应对新疆水利枢纽的泥沙挑战,保障干旱区水资源安全与绿洲可持续发展。未来应继续深化对冰川融水-暴雨混合型洪水产沙机理的认识,推动治理技术的智能化、资源化和生态化转型。

参考文献

- [1] 高航. 水利水电工程中泥沙治理技术要点研究[J]. 水上安全,2025,(20):82-84.
- [2] 郑敏,曾瀚杰. 水利工程施工中泥沙淤积对河流生态影响及减缓措施研究[J]. 水上安全,2026,(06):115-117.
- [3] 庄杨,杨超,张兴,等. 基于泥沙动力学分析水利工程调度对改善河道淤积的影响[J]. 江苏水利,2021,(10):56-58.
- [4] 李东阳,倪菲菲. 水利工程河道泥沙冲淤规律及水沙调节仿真[J]. 系统仿真技术,2022,18(02):77-80.