

水库泥沙淤积防治的综合管理技术进展与展望

郑 徐

四川省玉溪河灌区运管中心 四川 玉溪 611530

摘 要：水库泥沙淤积是制约水利工程长期安全运行与功能发挥的关键问题。本文系统梳理了传统泥沙淤积防治技术，包括水沙调度与排沙（如“蓄清排浑”、异重流排沙）、机械清淤与疏浚（如绞吸式挖泥船、环保型设备）以及水沙联合调控（如黄河调水调沙、三峡排沙调度）三大类方法，分析其原理、应用成效与局限性。在此基础上，重点阐述了近年来在智能化融合、资源化高值化利用及绿色低碳技术等方面的创新进展：数字孪生与AI驱动的智能决策系统显著提升调度精准度；淤积物向微晶玻璃、生态建材及农业营养载体的转化路径不断拓展；纳米材料、可再生能源与生物强化技术则推动清淤过程向低扰动、低排放转型。展望未来，泥沙防治将迈向“预报—决策—执行”一体化、资源循环化与碳中和协同发展的新阶段，为全球多沙河流治理提供中国方案。

关键词：水库泥沙；淤积防治；水沙调度；水土保持；综合管理

引言

随着全球气候变化与人类活动加剧，河流输沙量波动显著，水库泥沙淤积问题日益突出，严重威胁防洪、供水、发电及生态安全。尤其在黄河流域等高含沙河流域，部分水库有效库容已损失30%以上，亟需科学高效的防治体系。长期以来，我国在泥沙治理领域积累了丰富的经验，形成了以水沙调度为基础、机械清淤为补充、流域协同为支撑的传统技术体系，并在三门峡、小浪底、刘家峡等工程中取得显著成效。然而，面对“双碳”目标、生态文明建设与智慧水利发展新要求，传统方法在精准性、可持续性、资源效益方面面临挑战。近年来，人工智能、纳米材料、循环经济等前沿科技加速融入泥沙治理领域，催生出数字孪生调度、全级配资源化、低碳清淤等新兴方向。本文旨在系统总结既有技术脉络，深入剖析创新突破，并前瞻性探讨未来发展趋势，为构建高效、绿色、智能的现代泥沙综合管理体系提供理论支撑与实践参考。

1 泥沙淤积的形成机理与危害分析

1.1 淤积形成的主要机理

水库泥沙淤积是流域来沙条件与水库水动力环境共同作用的复杂结果。当挟带泥沙的河水进入水库后，过水断面急剧扩大，水流速度显著降低，水流挟沙能力随之大幅下降，泥沙颗粒在重力作用下沉降淤积于库底。淤积物的空间分布受入库水流流态、泥沙粒径组成和水库地形等多种因素影响，粗颗粒泥沙一般淤积在入库口附近的三角洲区域，细颗粒泥沙则随水流输移至坝前深水区沉积，形成异重流淤积。淤积体的纵向形态通常呈现为三角洲状、锥体状或带状三种基本类型，不同类型

的淤积形态对水库运行安全的影响特征各不相同。流域水土流失是水库泥沙淤积的根本来源，降雨侵蚀、坡面径流冲刷和沟道输沙构成了泥沙产生和输送的完整链条^[1]。流域内的土地利用方式变化、植被覆盖度下降以及不合理的人类开发活动均会加剧水土流失，导致入库泥沙量增加，加速水库淤积进程。特别是在暴雨频发和地质条件脆弱的山区流域，泥沙产量巨大且难以有效控制，给下游水库带来了极为沉重的淤积压力和运行管理难题。应加强技术攻关和成果转化力度。

1.2 淤积对水库功能的多重危害

泥沙淤积对水库功能的影响是全方位、多层次的。在库容方面，淤积直接导致有效库容持续减少，死库容被逐渐侵占后进一步侵蚀兴利库容和防洪库容，使水库的蓄水调节能力和防洪削峰能力不断下降。当淤积发展到一定程度，水库可能丧失原有的设计功能，无法满足供水、灌溉和发电等兴利需求。在防洪安全方面，淤积体占据库容后导致同水位下的过水断面减小，入库洪水的回水曲线明显抬高，水库上游地区的淹没范围扩大，洪水灾害风险显著增加。在工程安全方面，泥沙对泄水建筑物过流面的磨蚀作用会加速混凝土和金属结构的损坏，缩短工程使用寿命，增加维护检修成本和运行管理难度。在生态环境方面，库底泥沙淤积显著改变了底栖生境条件，吸附在泥沙颗粒上的重金属和有机污染物长期积累存在二次释放风险，影响水库水质和下游河道的生态健康。泥沙淤积还可能引起坝前泥沙压力增大，对大坝结构安全产生不利影响，需要引起高度重视和有效防范。

2 传统泥沙淤积防治技术

2.1 水沙调度与排沙技术

水沙调度排沙是依托水库自身泄洪排沙设施,通过优化运行方式将库内淤积泥沙排出的技术手段。其中,“蓄清排浑”是最广泛应用的调度模式:汛期高含沙水流期间降低库水位、开启泄洪排沙孔洞,利用大流量清水冲刷或高含沙异重流将泥沙排出;非汛期则蓄清水以满足供水、发电等兴利需求。该方式在多沙河流的中小型水库中效果显著,有助于控制淤积甚至实现冲淤平衡。异重流排沙是利用高含沙洪水入库存水后因密度差异形成的潜流,在其潜入点适时开启底孔,引导异重流沿库底输送至坝前并经排沙洞高效排出。该技术充分契合自然水沙运动规律,已在三门峡、刘家峡等水库成功应用。例如,刘家峡水电厂在1973–1989年间开展60余次异重流排沙试验,累计排沙超1亿吨;三门峡水库自1970年代起亦尝试低水位运行配合异重流排沙,有效减缓淤积。此外,空库排沙和溯源冲刷等措施在特定条件下也被采用,通过放空或大幅降低库水位,借助自然水流或人工造峰对淤积体实施集中冲刷,适用于应急清淤或局部治理。

2.2 机械清淤与疏浚技术

当水沙调度难以有效控制淤积时,常辅以机械清淤手段。该方法通过专用设备直接清除库底淤积物,具有见效快、针对性强的特点,尤其适用于严重淤损或调度受限的水库。绞吸式挖泥船是主流设备,通过绞刀切削淤泥并由泥浆泵经管道输送至处置场地,具备连续作业与高效率优势;浅水区或小型水库则多采用抓斗式挖泥船或水陆两用挖掘机^[2]。近年来,环保型清淤设备日益受到重视,强调施工过程中减少水体扰动、抑制底泥污染物扩散,以降低二次污染风险。同时,淤积物的资源化利用成为关键环节——经脱水固化处理后的底泥可用于制砖、路基填筑或土壤改良,不仅提升资源价值,也降低工程综合成本与环境影响。尽管机械清淤初期投资较高,但其在恢复库容、保障水库功能方面成效显著,已被广泛应用于应急清淤与库容修复工程。

2.3 水沙联合调控技术

随着流域梯级开发推进,单库调度已难以满足整体泥沙管理需求,水沙联合调控技术应运而生。该技术以水库群为系统单元,统筹上下游水沙过程,通过协同调度实现泥沙输移优化与淤积最小化。典型代表如黄河自2002年小浪底水库建成后实施的调水调沙工程,逐步形成“单库调节—空间水沙对接—干流水库群联合调度”三种基本模式,截至当前已开展32次调度,累计输沙入海36.5亿吨,下游河槽平均下切3.1米,过流能力由不足1800 m³/s提升至5000 m³/s。长江流域亦探索三峡水库汛

期排沙调度,结合导流洞与排沙孔,2003–2010年间累计排沙11.68亿吨,悬移质排出率达63%。此类联合调控依赖于对泥沙运动规律的深入认知(如长江科学院卢金友团队建立的壅水条件下推移质输沙率、悬移质沉降速度等基础公式),并需借助水文泥沙数学模型与计算机仿真,对多目标、多约束调度方案进行模拟优化。随着监测网络与数值模拟能力提升,水沙联合调控的科学性与精准度持续增强,已成为现代水库群泥沙管理的核心技术路径。

3 泥沙淤积防治的新技术进展

3.1 智能化技术深度融合

智能化技术在未来水库泥沙淤积防治中将扮演重要角色,其中数字孪生与AI的深度融合尤为关键。通过小浪底和长江流域等实例可以看出,这种融合不仅促进了从预报到自主决策的跨越,还实现了泥沙运动过程的精确预测与调度方案的自动化生成,极大地减少了人工干预并提高了效率。同时,《水利感知网技术蓝皮书》提出的三层架构将进一步推动水库泥沙监测实现全要素实时感知,采用多维融合泛在感知技术,并利用云计算与智算资源体系进行精准预测与仿真支撑。此外,智能决策系统也将逐步向自主决策发展,如刘家峡水电厂研发的技术,为高泥沙水库运行提供了新范式。

3.2 资源化高值化技术突破

未来,在资源化高值化技术方面将有显著突破,特别是淤积物建材转化技术和农业利用技术创新。前者将朝着全级配高值化产品方向升级,包括微晶玻璃制备技术的应用扩展至淤积物领域以及环保透水砖、生态护坡材料等新型建材的使用;后者则致力于从简单肥力提升转向精准营养管理,借助“空天地室”一体化监测技术进行全面分析,并开发淤积物与微生物菌剂结合的复合产品以提高肥效和生态效益^[3]。尾水处理技术将从末端治理转变为全过程管控,纳米技术将在重金属污染处理及防止藻类爆发等方面发挥重要作用,同时纳米防腐涂层也能延长设备使用寿命。

3.3 绿色低碳技术引领

绿色低碳技术将在水库泥沙淤积防治中起到引领作用,强调碳汇价值的最大化和绿色能源的融合。例如,通过开发多种类型的淤积物生态修复工程碳汇方法学扩大碳汇交易范围,并建立碳足迹核算体系量化减碳效益。另外,水库淤积防治过程中将与绿色能源开发相结合,比如利用水力或光伏发电提供动力,开发可再生能源产品如淤积物生物炭用于能源生产,实现循环利用。未来还将出现更多低碳清淤工艺,如太阳能驱动的清淤

设备、生物强化清淤技术以及智能调度的低碳清淤方案,这些都将有助于降低能源消耗和碳排放。

4 防治管理的未来展望

4.1 数字孪生与AI深度融合

数字孪生与人工智能(AI)的深度融合将成为水库管理的核心驱动力。通过构建高保真度的数字孪生模型,实时映射水库水文、泥沙输移、结构安全等多维动态信息,并结合AI算法进行深度学习与预测分析,系统不仅能实现对来水来沙过程的精准“预报”,更能基于多目标优化模型自主生成调度方案,实现从“被动响应”到“主动决策”的跃升。例如,在汛期来临前,系统可自动调整库容分配、优化排沙时机,最大限度减少淤积;在枯水期,则可智能协调供水、发电与生态流量需求,提升整体运行效能。

4.2 纳米技术在淤积物处理中的应用

传统清淤后的底泥常含有重金属、有机污染物及富营养化物质,处置难度大、成本高。而纳米零价铁($nZVI$)具有强还原性,可高效降解沉积物中的铬、砷等重金属;纳米吸附材料(如石墨烯基复合材料)则能选择性去除氮、磷等营养盐,有效缓解水体富营养化风险^[4]。此外,纳米防腐涂层可应用于水下闸门、泵站等关键设施,显著提升其抗腐蚀能力,延长服役寿命,降低维护成本,为水库长期安全运行提供材料级保障。

4.3 淤积物全级配资源化利用技术突破

过去,淤积物多被简单填埋或低值利用,造成资源浪费。未来,通过分级筛分、热处理、化学改性等工艺,可将不同粒径和成分的淤积物转化为高附加值产品:细颗粒可用于制备微晶玻璃或陶瓷釉料,中粗颗粒可烧结成轻质陶粒用于建筑保温,富含硅铝的组分则可作为环保建材(如透水砖、路基材料)的原料。这种“全级配—全链条—高值化”的资源化路径,不仅解决淤积难题,更将“生态包袱”转化为“绿色财富”,推

动循环经济在水利领域的落地。

4.4 低碳清淤工艺创新

传统机械清淤能耗高、碳排放大,难以满足“双碳”目标要求。未来将大力发展以太阳能、风能等可再生能源驱动的智能清淤装备,结合生物强化技术(如引入特定微生物群落促进有机质分解、改善底泥结构),实现低扰动、低能耗、低排放的生态清淤。同时,通过优化清淤时机与方式,减少对水生态系统的人为干扰,兼顾工程效益与生态健康。

5 结语

水库泥沙淤积防治已从单一工程应对走向系统化、智能化与生态化综合治理的新时代。传统技术如“蓄清排浑”与机械清淤虽仍具现实价值,但其局限性正被新一代技术所弥补。数字孪生与AI深度融合,使泥沙管理从经验驱动迈向数据驱动与自主决策;淤积物由“废弃物”转变为高值建材、土壤改良剂乃至碳汇载体,体现了循环经济理念的深度践行;而纳米技术、可再生能源与生物强化手段的引入,则显著降低了治理过程的环境足迹,契合绿色低碳发展主旋律。未来,泥沙防治需进一步强化多学科交叉、多尺度协同与全生命周期管理,推动形成“控源—输移—处置—利用—减碳”一体化的技术链条。这不仅关乎水利工程的可持续运行,更对保障国家水安全、促进流域高质量发展具有深远战略意义。

参考文献

- [1]张红武,王卫红.水库泥沙淤积治理技术研究进展与展望[J].泥沙研究,2022(5):56-63.
- [2]李文学,陈建国.基于多目标优化的水库水沙联合调度技术研究[J].水利学报,2023,54(3):253-263.
- [3]王协康,方铎.大型水库泥沙淤积预测模型及应用研究[J].水科学进展,2021,32(4):518-527.
- [4]刘兴年,黄尔.水库淤积物资源化利用技术与生态效应研究[J].水利水电技术,2022,53(8):45-53.