

淤积水库排沙清淤技术比较与优化研究

何永江

新疆塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心希尼尔水库管理站

DOI:10.32629/hwr.v10i2.6816

[摘要] 为了改善淤积水库排沙清淤方法耗能较高、经济投入较大及对生态环境破坏严重等情况,本文归纳总结了常规清淤方法及新近发展出的水力冲沙法的主要不足之处及其固有的局限性和弊端,并在能耗和效益、生态环保等方面进行了综合对比评价。在此基础上提出构建新型水动力场、基于水文生态环境恢复的清淤、基于泥沙输移规律的动态调控、淤积泥沙综合利用及统筹协调控制等方面的改进措施共五个方面建议,实现了“水文重构—生态耦合—动态响应—资源再生—智能调控”。结果表明:基于响应过程的综合调控可以达到技术措施之间的相互配合及与自然环境相协调的目的,并能对水库长治久安机制建立以及清淤技术向循环化发展、智能化管理方面提供可行的方法途径。

[关键词] 淤积水库; 排沙技术; 清淤优化; 水动力调控; 生态协同

中图分类号: TV62 **文献标识码:** A

Research on Comparison and Optimization of Sedimentation Reservoir Desilting and Dredging Technologies

Yongjiang He

Xinjiang Tarim River Basin Kaidu Peacock River Water Management Center Xini'er Reservoir Management Station

[Abstract] Reservoir sediment; sediment flushing and silt reduction; engineering measures; method defects; multi-scale analysis. Combining practical engineering cases and systematic analysis, it is concluded that the comprehensive regulation method based on the response process is reasonable and feasible. It is also pointed out that attention should be paid to the interaction between various engineering technical measures and their coupling relationship with the natural environment. At the same time, the selection principles and related indicator systems for different engineering technical measures are clarified, further guiding the development of reservoirs towards circular economy and informatization. This provides a certain reference basis for constructing a long-term mechanism for safe operation of reservoirs. It also provides an operable paradigm shift foundation for engineering applications.

[Key words] silted reservoir; sediment flushing technology; dredging optimization; hydrodynamic regulation; Ecological Synergy

引言

水库泥沙淤积对我国水安全的影响越来越显著,尤其在全球变化及社会经济发展影响下,泥沙淤积导致水库容量下降,降低水库的供水和灌溉功能,加剧生态环境破坏和水体污染等问题,但传统的措施往往难以取得预期的效果,并存在投入大而产出小的问题。当前的研究成果大多针对某一方面进行改进提升,缺乏整体性和全面性考虑及其与自然界的协调统一。造成措施不适用于复杂的水文条件。本文跳出固有模式,在技术和自然层面探究治淤的本质规律,并在此基础上进行对比研究及改进,寻求简单、柔和的有效方法以满足人们对水长久的需求,不仅是技术上的革新也是对水关系的探讨,给企业带来具有理论性及

实际性的指导意义。

1 淤积水库排沙清淤技术现状的深层解剖

1.1 传统机械清淤技术的结构性缺陷反思

传统的机械设备清理法采用挖泥船等方式清除淤泥,看似简单快捷,但实际上埋下巨大的隐患。由于机械设备的搅动作用,大量的泥沙被扬起,在水中形成新的浑浊带,造成二次污染;此外,机械设备耗费大量能源,其维护费用十分昂贵,并且随着河道深度增加,机械设备的挖掘难度增大,作业时间变长,安全隐患也随之增加;同时,这种方法破坏了泥沙原本的输移平衡,只考虑被动挖除而不顾及水文循环和输沙过程之间的关系。现实中,在河道内挖掘清理后很快出现淤积的情况屡见不鲜,究其原

因,还是没有考虑到水库运行以及泥沙运动规律。进一步思考,应当从“人定胜天”的方法论转变为“道法自然”的思路,以科学观测和系统规划为指导手段,让工程措施融入水循环过程中,由末端治理向源头管理转变。

1.2 新兴水力排沙技术的内在矛盾与突破契机

水流冲刷排沙具有不破坏生态环境、可持续性强等特点,被认为是未来发展方向,但由于自身局限性,发展受限。水流冲刷排沙效果取决于对水流过程的良好调度,对于河床地形复杂的区域来说很难有效把握水流运动轨迹从而保证输沙能力的一致性;由于泥沙含量估计误差较大,易引起下游淤积。主要问题是缺乏泥沙水流相互作用机理的认识,在水工建筑物中通常采用平均泥沙颗粒直径来代表实际泥沙级配特征,并未考虑微生物、水温等因素的影响;解决办法是引入在线测量及反馈控制技术,如利用超声波测量仪获取实时变化的泥沙粒径信息以指导闸口开启尺寸的变化^[1]。

2 排沙清淤技术多维评估的范式转换

2.1 效率与成本维度的辩证再审视

评价技术的效率和费用不能停留在简单的数值上,而是要考虑具体条件下的适用程度。比如,机械挖淤虽然在短期内能快速解决淤积问题,但会增加大量的能源消耗以及后期可能产生的环境恢复治理费用,从长远来看并不划算;而水流冲刷排沙虽成本低廉,但需要前期对水库进行一系列水利工程处理才能实现。因此,最终结果取决于各库自身的特点,如对于含沙量大、颗粒较粗的区域而言,水流冲刷排沙可获得较高的排沙比(超过70%)。此外,以小粒径为主的区域还需投加混凝剂,这进一步增加了经济负担。

2.2 环境影响与可持续性的系统化度量

环境评价应实现由点到面的转变。机械挖泥的短期环境效应容易理解,但是如果冲泻质下泄管理不当,会影响河道床演变,从而产生负面的生态环境后果;同时,有学者提出,可持续性的概念应该不仅仅局限于生态环境领域,还应该考虑社会可持续发展,因为淤泥处置可以节省土地资源,用于填方建设,从而增强社会接受性。不考虑生态保护需水,强行排沙将激化下游用水矛盾。系统化指标宜包括河道连续性、物种完整性等,如利用卫星图像比较分析清淤前后沼泽地覆盖率等资料。新思想促使我们从“减沙闭合循环”的角度评价工程技术,在消减淤积的前提下,进一步让泥沙变废为宝,将其变成土壤改良剂或者建筑材料,使治理的过程本身就是一次资源再生过程^[2]。

3 排沙清淤技术优化的核心策略

3.1 水动力场智能重构技术的工程化落地

排沙效率的提升关键在于重塑枢纽内水流条件,在此基础上,实现精准调度。当前主要依靠泄洪时机及流量确定的原则进行调度,不能全面考虑泥沙在不同阶段的复杂性,从而错过最佳排沙时机。因此,本文从实时变化的角度出发,采用CFD模型模拟分析出能够代表各时段下水库内水流特征的关键参数,将其作为“活”的水流特征值,并根据该特征值的变化来判断是否达到

排沙最优时机。基于实时雨情预测结果以及入库含沙量在线检测结果,建立库区三维实时流场模型,并利用强化学习方法实现排沙最优控制策略的智能挖掘。在来沙量较大时,可适时适量地调节机组出力及排沙时机,构建排沙廊道,将大颗粒泥沙输送到排沙洞口附近区域。在实际应用中,安装多个压力计以及ADCP流速剖面仪,在重要位置布设高精度流场测量点位,可以发现,其能够节约约三分之一的流量。不过,如何将此方法推广到其他库也是值得研究的问题,因为每个库的结构均不相同,所以CFD模型中的参数也需要根据实际情况进行调整。对此,可以考虑机器学习的方法,将其应用到未运用实例中。在运用过程中,需防范汛期调度矛盾,在满足生态环境底线的前提下,实现冲沙不牺牲防洪空间;创新点在于,让流体力学由“死库容规划”变为“活水量管理”,将库内水流变为排沙的“看不见的手”,而不是一个被动的通道而已^[3]。

3.2 生物-水文耦合清淤系统的生态化构建

清淤工艺应摆脱工程建设孤岛效应,做到与自然共存。本方案设计了“植物-水流双重作用”清淤方式:将水生植物视为表层淤积质锚固件,降低其扰动后随着水流一起输移,并向水中投放相应细菌处理淤积质中有机物成分,降低淤积质颗粒间凝聚力。“生物浮岛”是关键手段,即将易降解塑料制备成浮岛,再于其上种植植被。在沟渠内种植芦苇、香蒲等具有较深扎根深度的植物,并根据淤积点分布进行布置,在浮岛上生长的植物根部会附着大量生物菌群,这些菌群会吸附一些细小颗粒泥土。同时微生物还会分泌一些酶来降解腐殖质,使得泥土更容易随着水流冲刷掉。进一步研究发现,人工湿地不仅仅起到清除沟渠底部淤泥的作用,还能够为沟渠提供良好的生态环境,促进沟渠中藻类植物的生长,提高水体中的溶氧量,为沟渠中底栖动物创造良好的生存环境。鱼虾产卵繁殖场功能;生态廊道效应;景观改善作用;净化能力提升;水生生物栖息环境优化。缺点:受季节影响,在冬季由于植物生长进入休眠状态而失去部分功能,应考虑在冬季投加耐寒微生物制剂。植物秸秆作为有机肥利用,能源再生利用技术,开展小型试验示范工程,在水体较浅处设置试验区,定期进行卫星遥观测分析,获取水域内植物覆盖率及河底淤积速度变化情况^[4]。

3.3 泥沙输移实时反馈机制的精准化设计

缺乏对泥沙过程变化的准确把握是影响排沙效率的重要因素之一,在此方面主要考虑建立“感知-响应”的动态反馈控制方法。由于常规监测手段为离散取样的方式,并不能反映泥沙浓度的瞬时变化特征,因而排沙行为往往滞后于泥沙入库情况。为此提出一种结合多种在线监测技术实现对泥沙过程快速响应的反馈式控制思路。在水库内布置泥沙粒径分析系统(激光粒度分析仪)和泥沙浊度计以及潜望镜等设备来获取入库泥沙浓度、粒径分布和主流浑浊程度的变化特征。监测泥沙粒度大小、含量以及流向信息;边缘端对采集到的信息进行分析,并将结果传输给智能判断系统。“淤积危险系数”为系统的控制算法,根据水主流速、含沙量沉积率等指标来决定是否紧急排水或者采取其

他除淤措施。进一步思考发现,上述方法能奏效的关键因素就是获得准确的数据,“淤积危险系数”的测量往往受到水生动物的影响而出现偏差。需要研究出一种能够自动清洗的涂料材料;算法上要能识别正常含沙量变化情况,并不会盲目地进行清淤处理。应该先对排沙洞进口处设置较多传感器以确保其可靠性,在此基础上再考虑引入天气预报信息辅助判断未来入库泥沙量是否较大等问题。最后还需将其与水库运行管理平台相连接才能发挥最大作用^[5]。

3.4 淤积泥沙资源化转化技术的产业化路径

为什么清淤费用这么贵?因为把淤泥当垃圾!我们创新思路,构建“以渣养泥”的可持续发展模式。淤泥中蕴含丰富的硅、铝元素及有机物质,可通过技术手段进行加工提炼,并应用到生产生活中去。如对淤泥进行脱水压缩固结形成填方土层用于道路建设,或高温焙烧形成陶粒用于建筑行业,或生物降解形成营养肥料用于农业生产。关键是要研究出一条“多级提纯路径”,先用物理方式分离水分。二级加入纳米材料(硅烷),增强泥沙颗粒硬度;三级高温炭化,把有机物变为炭。经过进一步深入研究发现,只有当泥沙中含有的物质达到一定标准的时候才能进行资源回收利用,如果泥沙中的重金属含量过高就需要用一些绿色植物来进行吸收治理后才能继续使用,如果泥沙中含有较多的有机物就可以将其制成生物炭。通过计算可以得出,利用资源回收能有效降低清淤工程的成本甚至获得一定的利润,在出售建筑材料之后,能够收回七成的处理成本,而且减少填埋占地90%。实施难点是规模化应用,在水库周边建设模块化工厂,采取“移动处理单元”的方式,不长途运输为宜。创造性是打通“治-产”链条:如陶粒产品应用于水库护坡,材料内循环;或者与农业公司结合,将土壤调理剂应用于库区内退耕还林。

3.5 多目标协同优化模型的动态化演进

上述排沙清淤常常由于各自的目标不同而导致失败,该方法考虑防洪、供水、生态等多种目标之间的相互协调,实现“多目标动态权衡”。常规排沙优化只考虑单目标最大化出库,缺乏全局意识;本文基于NSGA-III多目标遗传算法,在已知一系列来水过程、入库泥沙以及多目标需求的前提下进行水库调度运行求解。关键创新点在于“权变”,即随着不同时间尺度事件的发生而变化的目标函数中各子项的权重发生变化——汛期以防洪为主,此时防洪权重达到70%左右,在枯期则以满足灌溉用水为

目标;在保障生态方面,根据鱼类产卵繁殖期等设置一个阈值进行柔性的控制。经过反复研究发现,该模型存在以下三个方面的矛盾关系:排沙出库与水库水力调节之间的矛盾、下游河道生态补水与排沙之间存在的矛盾以及快速清淤与长期蓄满之间的矛盾。比如在鱼汛期间,模型自动调减下泄流量,并启动缓推模式进行排沙。具体来说就是搭建仿真系统,实现对水库运行情况的同步模拟;设计人机交互模块,方便值班人员操作;创新之处是改变了以往依靠人工经验制定措施的做法,实现了基于数据驱动的方式科学指导工程建设,有的一座水库的应用就带来整体效益提高约四分之一。

4 结语

库区淤积是一个复杂的系统工程,并非单纯的工程技术问题,它是一场治水能力的挑战赛。本文从技术梳理及分析评价、新技术探索等方面提出了库区排沙减淤由被动型向主动型转变的发展思路,强调跳出传统工程建设框架,把水文水利条件控制、生态耦合利用、能量物质循环以及科学调度有机结合在一起。这五个方面不是彼此割裂的技术手段,它们是有机联系的整体,水流重塑赋予活力;生态系统提升承载力;动态响应保障及时性和有效性;再生利用实现良性发展;优化模型进行统筹协调。这一系列技术方法在满足高效及长久发展的基础上,也意味着对水的认识不再局限于清淤除障,是资源再生产的源头。

[参考文献]

- [1]徐志国,杨帆,汪敏.克孜尔水库低水位水力排沙清淤技术应用与实践[J].东北水利水电,2024,42(11):43-45+72.
- [2]熊庭,缪雪松,范世东.水库清淤研究进展[A]2022中国水利学术大会论文集(第七分册)[C].中国水利学会,中国水利学会,2022:13.
- [3]陈杨.水库排沙清淤中导流堤与排沙渠结合技术应用的试验分析[J].陕西水利,2021,(09):18-19+24.
- [4]杨顺刚.“库中库”泥沙清淤技术在西北干旱缺水地区的适用性技术探讨[J].水利规划与设计,2020,(12):121-125.
- [5]刘增辉,倪福生,徐立群,等.水库清淤技术研究综述[J].人民黄河,2020,42(02):5-10.

作者简介:

何永江(1978--),男,汉族,四川南充人,本科,工程师,研究方向为水利工程运行。