

淤地坝系在黄土高原水土保持中的功能优化与稳定性分析

翟小宇

安阳市水土保持监测站 河南 安阳 455000

摘要: 淤地坝作为黄土高原最具特色的水土保持工程措施,通过在沟道中梯级布设形成坝系,实现了对流域产沙过程的有效调控。然而,现有淤地坝系在拦沙功能持续性、泥沙空间配置合理性及工程结构安全性方面仍存在显著短板,制约了其水土保持效益的最大化发挥。本文立足于水土保持核心目标,系统剖析淤地坝系在拦截-输移-淤积全过程中的功能机制,识别当前在坝系布局、运行调度及结构安全等方面影响水土保持效能的关键瓶颈。在此基础上,从优化坝系空间配置以提升系统拦沙效率、改进运行管理策略以延长有效拦沙寿命、以及强化结构稳定性以保障水土保持功能的长期可靠三个维度,提出针对性的功能优化与稳定性提升路径。研究表明,只有将坝系视为一个动态演化的水沙调控系统,并围绕“高效拦沙、安全运行、长效服役”进行一体化设计与管理,才能真正实现淤地坝系在黄土高原水土保持中的核心价值。

关键词: 淤地坝系; 黄土高原; 水土保持; 拦沙效率; 功能优化; 稳定性分析

引言

黄土高原的生态治理是一场旷日持久的攻坚战,而水土保持是这场战役的主旋律。淤地坝系,作为一项根植于黄土、服务于黄土的独特工程,自诞生之日起,其根本使命就是拦截泥沙、保持水土。数十年来,十余万座淤地坝构筑起一道道“绿色长城”,为黄河减负、为大地增绿、为农民增收,其历史功绩彪炳史册^[1]。然而,进入新发展阶段,我们面临的核心问题已从“有没有”转向“好不好”、“久不久”。大量早期建设的淤地坝,或因设计标准低而“体弱”,或因缺乏管护而“带病运行”,或因库容淤满而“功能休眠”。这些问题直接导致其最核心的水土保持功能——拦沙、减蚀、保水——出现不同程度的衰减甚至丧失。更严峻的是,部分病险坝的存在,不仅自身无法发挥效益,反而可能成为新的水土流失源和安全隐患点。因此,本研究的核心命题清晰而聚焦:如何对现有淤地坝系进行科学、系统的功能优化,以最大限度地、可持续地提升其在黄土高原水土保持中的综合效能?

1 淤地坝系在水土保持中的核心功能机制

淤地坝系的水土保持功能,本质上是通过改变沟道侵蚀基准面和水流动力条件,干预泥沙的产生、输移与沉积过程。

1.1 拦截泥沙,直接削减流域产沙量

这是淤地坝最直接、最核心的水土保持功能。坝体拦截上游坡面和沟壑侵蚀产生的泥沙,使其在坝前库区

淤积,从而直接从水沙输移链条中移除大量泥沙。梯级坝系通过多级拦截,可将单次洪水事件中的大部分泥沙就地滞留,显著降低出口断面的输沙量。研究表明,一个设计合理的坝系,其拦沙效率可达70%以上。

1.2 抬高侵蚀基准,抑制沟道侵蚀

沟道侵蚀(包括沟头前进、沟底下切和沟岸扩张)是黄土高原水土流失的重要形式。淤地坝抬高了局部侵蚀基准面,有效遏制了沟底下切的趋势。同时,稳定的坝体阻断了沟头溯源侵蚀的动力,保护了上游坡耕地和林草地,从源头上减少了新的侵蚀发生。

1.3 调节径流,削减洪峰,减轻冲刷

淤地坝具有一定的调蓄能力。在洪水期,库区可以暂时滞蓄部分洪水,削减洪峰流量,降低下游沟道的水流流速和挟沙能力,从而减轻对沟床和岸坡的冲刷侵蚀。这种径流调节作用,对于保护下游已建工程和土地资源具有重要意义。

2 当前淤地坝系在水土保持功能发挥中的主要问题

2.1 坝系布局与配置不合理,系统拦沙效率低下

部分早期建设的淤地坝系缺乏统一规划,存在“重数量、轻布局”的问题。例如,上游缺乏控制性骨干坝,导致大量泥沙直接冲击下游中小型坝,加速其淤满报废;或坝间距过大,形成拦截盲区,使部分泥沙未经拦截便直接输出流域。这种不合理的空间配置,严重削弱了坝系的整体协同拦沙能力。

2.2 运行管理粗放,有效拦沙寿命缩短

淤地坝的拦沙能力并非无限。一旦库区淤积至溢洪道底板高程,其调洪和拦沙功能将基本丧失。然而,目前普遍缺乏对坝系淤积状态的动态监测和科学评估,更无有效的排沙或清淤机制。许多坝在淤满后仍被视作“正常运行”,实际上已失去水土保持功能,甚至成为潜在的安全隐患^[2]。这种“带病运行”状态,极大地浪费了工程投资,降低了水土保持的长期效益。

2.3 结构安全隐患突出,威胁水土保持成果的可持续性

大量早期淤地坝设计标准低、施工质量差,加之长期超负荷运行,普遍存在裂缝、渗漏、管涌等病险问题。在极端暴雨条件下,一旦发生溃坝,不仅会瞬间释放巨量泥沙,造成灾难性的二次水土流失,冲毁下游农田、道路和其他水保设施,更会彻底摧毁多年积累的水土保持成果。因此,结构稳定性是保障水土保持功能得以持续发挥的先决条件。

3 面向水土保持目标的功能优化路径

3.1 优化坝系空间配置,构建高效拦截网络

3.1.1 强化骨干坝的流域控制性作用

骨干坝须布设于主沟道出口或关键汇流节点,其库容和防洪标准必须足以控制整个子流域的产沙输出。通过骨干坝的有效调控,可为下游中小型坝创造安全的运行环境,形成“上游控沙、中游缓冲、下游保安”的梯级防御体系。这种体系不仅能显著提升整个沟道系统的水土保持能力,更能有效防止因上游突发性大产沙事件(如特大暴雨引发的滑坡、崩塌)对下游造成毁灭性冲击。因此,在新一轮淤地坝建设规划中,必须优先保障骨干坝的建设,并赋予其足够的控制面积和调蓄能力,这是构建长效水土保持屏障的基石。

3.1.2 基于水沙平衡的坝间距与等级匹配

必须摒弃经验主义,转向基于定量分析的科学决策。应充分利用高分辨率数字高程模型(DEM),结合土壤侵蚀模型(如USLE/RUSLE)和分布式水文模型,精确模拟计算各沟段在不同降雨情景下的产沙模数、输沙量及洪水泥沙过程。据此,科学确定各级坝(骨干、中型、小型)的布设密度、控制面积与相互间的最优距离,确保泥沙在向下游输移过程中被逐级、高效地拦截、沉淀,避免泥沙长距离输送造成的能量累积和对下游的集中冲刷,从而实现流域泥沙的“源头管控、过程拦截、末端保安”。

3.1.3 推行“一坝一策”的精细化单体设计

须推行“一坝一策”的精细化设计理念。例如,对于产沙强度高、洪水陡涨陡落的支毛沟,应适当增大拦

泥库容占总库容的比例,并设计宽浅式溢洪道以实现快速泄洪排沙;而对于沟道平缓、产沙相对均匀的区域,则可侧重于增加淤地造田的面积^[3]。通过这种定制化设计,确保每一座淤地坝都能在其特定的水沙环境下,以最高的效率完成其预设的水土保持核心任务。

3.2 创新运行管理模式,延长有效拦沙寿命

3.2.1 建立基于遥感的淤积动态监测体系

必须构建现代化的动态监测体系。该体系应以无人机倾斜摄影测量和机载激光雷达(LiDAR)技术为核心,辅以高分卫星影像,建立定期(如每年汛后)的监测机制。通过对比不同时相获取的高精度数字表面模型(DSM)和数字高程模型(DEM),可自动、精确地计算出库区的三维淤积形态、淤积厚度、体积及其平面分布特征,并生成直观的“淤积等值线图”和“库容-淤积量”关系曲线。这套量化数据是评估各坝剩余拦沙能力和预测其失效时间的唯一科学依据。

3.2.2 实施分级预警与差异化管护

可将淤地坝划分为三个管理等级:“健康”(淤积量 $< 50%$,功能完好)、“亚健康”(50% \leq 淤积量 $< 80%$,功能开始受限)和“濒危”(淤积量 $\geq 80%$,功能基本丧失,安全风险剧增)。对于“濒危”坝,应立即启动应急预案,限制其蓄水运用,将其定位为“淤地”而非“拦沙”功能,并优先安排除险加固或在其上游新建替代工程;对于“健康”坝,则可正常发挥其核心拦沙功能。这种精准化、差异化的管护模式,能将有限的人力、物力和财力资源,精准投向最需要、效益最高的环节,从而在宏观上最大化整个区域的水土保持综合效益。

3.2.3 探索主动排沙与库容再生技术

可在非汛期枯水季节,利用虹吸原理或小型移动泵站,有计划地将库区表层富含有机质和养分的细颗粒泥沙(粉砂、粘粒)抽出,通过管道输送到周边贫瘠的坡耕地上,用于土壤改良。此举具有双重水土保持效益:一方面,腾出的库容可以继续用于拦蓄后续洪水中的粗颗粒泥沙(砂砾),这些粗颗粒更利于形成结构稳定、不易被再次侵蚀的优质坝地;另一方面,将泥沙作为一种宝贵的土壤资源进行内部循环利用,变废为宝,从源头上延长了工程的有效拦沙寿命,巩固了来之不易的水土保持成果。

4 保障水土保持功能的稳定性分析与提升策略

4.1 水土保持视角下的稳定性分析核心内容

4.1.1 抗滑与抗倾覆稳定分析

在正常蓄水、设计洪水及校核洪水等多种荷载组

合下,必须采用成熟的极限平衡法(如简化Bishop法、Morgenstern-Price法)对坝体进行严格的抗滑稳定分析,验算其沿坝基接触面或深层潜在滑动面的整体安全系数。同时,还需核算坝体在偏心荷载(如单侧高水位)作用下的抗倾覆力矩与倾覆力矩之比。所有计算结果必须满足国家现行规范(如《水坠坝技术规范》SL302)的强制性要求。

4.1.2 渗透稳定与管涌风险分析

应利用专业的岩土渗流数值模拟软件(如GeoStudio中的SEEP/W模块),根据坝体和坝基的实际土层参数,精确模拟各种工况下的渗流场,确定浸润线位置、渗透比降及渗流量。在此基础上,重点校核反滤层(包括垫层和排水体)的设计是否符合“保土、透水、防堵”的原则,能否有效阻止坝体内部的细颗粒土被渗流带走。只有确保渗透稳定,才能从根本上杜绝因内部侵蚀导致的渐进式破坏。

4.1.3 泄洪能力与漫顶风险复核

必须严格、保守地复核其在设计洪水和校核洪水下的过流能力。特别要关注在全球气候变化背景下,短历时、高强度的局地暴雨事件频发,其形成的洪峰流量可能远超历史记录。因此,不能仅依赖过去的水文统计资料,还需引入基于气象预报的可能最大洪水(PMF)概念进行校核。一旦入库洪水超过溢洪道的泄流能力,将导致洪水漫顶。高速水流对土坝的冲刷是毁灭性的,往往在极短时间内就能导致全坝溃决。因此,泄洪能力的充分保障,是防止水土保持功能因漫顶而瞬间清零的最后一道、也是最关键的防线。

4.2 面向长效水土保持的稳定性提升策略

4.2.1 适应气候变化的防洪标准提升

对于新建的骨干坝和重要中型坝,其校核洪水标准应进行战略性提升,建议从过去的50年一遇普遍提高至100年一遇甚至更高。相应地,必须增加调洪库容,确保在遭遇超常洪水时,仍有足够的余量容纳超额洪水,避免漫顶风险。这种“留有余地”的韧性设计理念,是从根本上保障工程长期安全、维系其水土保持功能不中断的战略举措。

4.2.2 关键部位的防渗与排水系统强化

应在坝体中央设置连续、密实的粘土心墙,或铺设高密度聚乙烯(HDPE)复合土工膜作为主要防渗屏障。

在下游坝脚处,必须设置由粗砂、碎石构成的棱体排水,并在其与坝体之间严格按照反滤准则设置2-3层级的反滤层(如细砂-粗砂-碎石)^[4]。这套“防-排-滤”一体化的系统,能有效降低坝体浸润线,控制渗流量,将渗透压力消散于无形,是构筑坝体长期稳定、抵御内部侵蚀的坚固堡垒。

4.2.3 病险坝除险加固与安全监测预警一体化

应采用高压旋喷桩、混凝土防渗墙、充填灌浆等成熟、可靠的工程技术进行除险加固,彻底根除裂缝、渗漏、管涌等安全隐患,使其恢复应有的水土保持功能。在此物理加固的基础上,亟需构建“空-天-地”一体化的安全监测预警网络。利用卫星InSAR技术进行大范围、长时序的坝体形变普查;在重点骨干坝部署自动化传感器(渗压计、位移计、量水堰)实时感知“工情”;并打通与气象部门的短临(0-3小时)暴雨预报数据链。通过融合这些多源信息,建立“降雨预报-入库洪水模拟-坝体响应预测”的智能耦合预警模型,实现对潜在险情的分钟级精准预警,为应急抢险赢得黄金时间。

5 结语

淤地坝系是黄土高原水土流失治理的国之重器,其核心价值在于高效、持久地拦截泥沙,稳定沟道,从而实现流域尺度的水土保持目标。本文严格围绕这一核心,系统分析了当前淤地坝系在功能发挥与结构安全方面存在的突出问题,并提出了针对性的优化与提升路径。研究认为,未来的淤地坝系建设与管理,必须实现从“单体工程思维”向“系统水沙调控思维”的转变。功能优化的重点在于通过科学的空间配置和精细化运行管理,构建一个高效、协同、长寿的泥沙拦截网络;而稳定性分析与提升,则是确保这一网络能够安全、可靠、长期运行的根本保障。二者相辅相成,缺一不可。

参考文献

- [1]袁水龙.黄土高原淤地坝系对流域水文泥沙过程调节作用研究[D].西安理工大学,2021.
- [2]王飞超.黄土高原淤地坝系安全运行与水沙资源利用潜力研究[D].西安理工大学,2023.
- [3]王鹏.淤地坝系统对陕北黄土高原流域产流和汇流影响分析[J].地下水,2025,47(04):120-122.
- [4]陈平,马丽,刘有为.新时代推动黄土高原地区淤地坝工程高质量发展的模式探析[J].当代农机,2025,(04):14-15.