

水库库区水土保持措施对延长水利工程使用寿命的机理与效益研究

雪克来提·乌拉木

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6747

[摘要] 我国干旱半干旱地区核心区域,生态环境脆弱,水土流失以水蚀、风蚀并存为典型特征,严重威胁水库水利工程安全运行与使用寿命。本文以典型库区水土保持实践为依托,系统探究水土保持措施延长水利工程使用寿命的内在机理,重点分析泥沙淤积防控、岸坡稳固防护、水文生态调节三大核心作用路径;从生态、经济、社会三维度量化与定性结合评估其综合效益。研究表明,科学的水土保持措施可通过降低库区淤积速率、提升岸坡抗蚀能力、优化区域水文过程,显著延长工程服役周期。

[关键词] 水库库区;水土保持;水利工程寿命;机理;效益

中图分类号: TV62 **文献标识码:** A

Study on the Mechanisms and Benefits of Soil and Water Conservation Measures in Reservoir Areas for Extending the Service Life of Water Conservancy Projects

Xekelaiti·Wulamu

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] In the core regions of arid and semi-arid areas of China, the ecological environment is fragile, and soil erosion characterized by both water erosion and wind erosion poses a serious threat to the safe operation and service life of reservoir water conservancy projects. Based on typical soil and water conservation practices in reservoir areas, this paper systematically explores the intrinsic mechanisms through which soil and water conservation measures extend the service life of water conservancy projects. It focuses on analyzing three core pathways: sediment deposition prevention and control, slope stabilization and protection, and hydrological-ecological regulation. The comprehensive benefits are evaluated qualitatively and quantitatively from ecological, economic, and social dimensions. The study indicates that scientific soil and water conservation measures can significantly extend the service life of projects by reducing sediment deposition rates in reservoir areas, enhancing slope erosion resistance, and optimizing regional hydrological processes.

[Key words] Reservoir area; Soil and water conservation; Service life of water conservancy projects; Mechanism; Benefit

1 前言

1.1 研究背景。水利工程是保障干旱半干旱地区水资源合理配置、防洪减灾、农业灌溉与工业发展的核心基础设施。新疆深居内陆,气候干旱少雨,水资源时空分布极不均衡,水库工程作为水资源调控的关键载体,其运行稳定性与使用寿命直接关系到区域经济社会可持续发展。然而,新疆区域生态系统脆弱,水土流失问题突出,据动态监测数据显示,2011-2024年间新疆水土流失面积虽减少5.53万平方公里,减幅达6.02%,呈现“双下降”良好态势,但水蚀与风蚀并存的格局尚未根本改变,尤其在

水库库区及周边区域,水土流失引发的泥沙淤积、岸坡坍塌等问题,已成为缩短水利工程使用寿命的主要诱因。

新疆多数水库建于河流中上游,流域内土壤质地疏松、植被覆盖率偏低,加之季节性暴雨与风力侵蚀影响,大量泥沙随径流汇入库区。如新疆卡拉贝利水库运行初期淤积速度较快,主要淤积于死水位以下河道主槽,运行20年死库容基本淤满,50年总库容损失达49.24%,总淤积量高达12871.95万 m^3 ;卡拉苏水库运行最初10年悬移质泥沙排沙比仅40.6%,严重影响水库调蓄功能与运行安全。在此背景下,探究库区水土保持措施对延长水利工程

使用寿命的机理与效益,结合新疆地域特点构建科学的防治体系,具有重要的现实紧迫性与实践价值。

1.2研究意义。理论意义:丰富干旱区水库库区水土保持与工程寿命协同演化的理论体系,明确干旱区特殊环境下水土保持措施的作用机理,弥补当前研究对干旱区地域适配性关注不足的短板。

实践意义:为新疆水库工程水土保持措施的优化设计与精准实施提供科学依据,通过有效延长水利工程使用寿命,提升水资源调控效率,保障区域防洪安全与生态安全,推动新疆“一城二山三河四区五行”水土保持生态保护格局构建,助力干旱区生态保护与高质量发展。

1.3研究现状综述。国内外学者围绕水土保持与水利工程寿命的关联开展了大量研究,普遍认为水土保持措施可通过减少泥沙淤积、稳固岸坡等途径延长工程使用寿命。在国内研究中,针对湿润地区水库的水土保持研究较为成熟,但针对干旱半干旱地区的研究相对薄弱。新疆区域相关研究多聚焦单一工程的水土保持措施设计,如孙震等以新疆努尔加水库为研究对象,提出拦渣工程、斜坡防护、植被恢复等综合措施体系,证实其对控制水土流失、改善生态环境的有效性;部分研究关注库区泥沙淤积规律,如对卡拉贝利水库、卡拉苏水库的淤积预测为水土保持措施制定提供了数据支撑,但缺乏对水土保持措施延长工程寿命机理的系统阐释与效益的综合评估,尤其缺乏结合新疆“水蚀风蚀交错、生态脆弱”核心特征的深度研究,这也成为本文的研究重点。

2 水库库区水土保持措施延长水利工程使用寿命的机理

新疆库区水土流失以风蚀与水蚀叠加为显著特征,水土流失对水利工程的危害主要体现在泥沙淤积导致库容缩减、岸坡侵蚀引发工程结构破坏、水文过程紊乱加剧工程运行压力。水土保持措施通过工程、植物、耕作等综合手段,从源头控制水土流失,进而实现延长水利工程使用寿命的目标,其核心机理可概括为泥沙淤积防控、岸坡稳固防护、水文生态调节三大路径。

2.1泥沙淤积防控机理。泥沙淤积是导致水库库容缩减、工程功能衰退的首要因素。新疆干旱区河流多为季节性河流,汛期短而集中,暴雨径流携带大量泥沙入库区,而干旱期风力侵蚀产生的风沙也会加剧库区淤积。水土保持措施通过“拦截-滞留-输移调控”三级防控体系,减少入库泥沙量,延缓淤积进程。

在源头拦截环节,库区周边实施的植被恢复措施(如乔木栽植、草籽撒播)可通过根系固土、枯枝落叶截留降水,降低地表径流侵蚀力。新疆努尔加水库在库区周边栽植乡土乔木、撒播耐旱草籽,并配套绿化灌溉系统,显著降低了地表径流含沙量,减少了入库泥沙补给。对于风蚀主导区域,草方格沙障是核心防控措施,新疆五师双河市在艾比湖周边库区采用芦苇秆铺设 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 草方格,芦苇高度 20cm ,有效削弱风沙侵蚀,减少风沙入库量,这种措施在新疆乌尉沙漠公路沿线库区也得到广泛应用,研究表明最优规格的草方格沙障可使风沙跃迁率降低40%以上。

在中途滞留环节,拦渣坝、截水沟等工程措施发挥关键作用。新疆努尔加水库在支流汇入处设置拦渣坝,拦截上游坡面侵蚀产生的泥沙;在坡地布设截水沟,引导径流有序排放,避免集中冲刷携带大量泥沙入库。在输移调控环节,通过优化水库运行方式,结合水土保持措施提升排沙效率。如卡拉苏水库通过建立非均匀流不饱和全沙水库数学模型,优化运行方式,使运行10-30年悬移质泥沙排沙比从40.6%提升至90.5%,30年后实现悬移质泥沙冲淤平衡,有效缓解了库容淤积压力。这种“源头拦截-中途滞留-输移调控”的协同机制,从根本上减少了泥沙在库区的沉积,保障水库有效库容,延长工程使用寿命。

2.2岸坡稳固防护机理。水库库区岸坡侵蚀坍塌会直接破坏坝体结构、溢洪道等关键工程设施,引发工程安全隐患。新疆库区岸坡多为土质边坡,土壤含水量低、有机质含量少,抗蚀能力弱,加之水库蓄水后水位涨落引发的水力冲刷与渗透破坏,极易导致岸坡失稳。水土保持措施通过工程加固与生态固坡相结合的方式,提升岸坡稳定性,保护工程结构安全。

工程措施以斜坡防护、土地平整为核心。新疆努尔加水库针对库区不稳定岸坡,采用混凝土护坡、浆砌石挡土墙等斜坡防护措施,增强岸坡抗冲刷能力;对施工扰动后的岸坡进行土地平整,降低坡度角,减少重力侵蚀风险。研究表明,坡度角是影响新疆工程扰动边坡稳定性的关键因素,坡度角每降低 10° ,边坡有机质含量与含氮量可提升8%-12%,抗蚀能力显著增强。

生态固坡措施通过植被根系的“锚固”作用与土体改良效应,提升岸坡整体稳定性。新疆阜康抽水蓄能电站上下库连接公路周边库区,在岸坡栽植耐旱灌木与草本植物,植物根系深入土壤形成立体网络,有效固定土体;同时植被枯枝落叶分解提升土壤有机质含量,改善土壤结构,增强土壤保水能力,减少因土壤干缩裂隙引发的岸坡坍塌。工程措施与生态措施的协同应用,实现了岸坡“外加固、内改良”的稳固效果,避免岸坡侵蚀对水利工程主体结构的破坏,保障工程长期安全运行。

2.3水文生态调节机理。新疆干旱区水文过程极端化特征显著,汛期暴雨引发的洪水与枯水期水资源短缺并存,极端水文事件对水利工程的冲击较大。水土保持措施通过调节区域水文过程,优化水资源时空分布,降低极端水文事件对工程的破坏风险,延长工程使用寿命。

水土保持措施通过提升地表植被覆盖率与土壤入渗能力,构建“海绵式”生态系统,实现汛期蓄水、枯期补枯的调节功能。在汛期,植被与土壤截留大量降水,减少地表径流总量,降低洪峰流量,减轻洪水对水库坝体、溢洪道的冲击压力;在枯期,截留的水分缓慢释放,补充库区径流,维持水库合理水位,减少因水位剧烈波动引发的工程结构疲劳损坏。新疆伊犁河谷实施水土保持措施后,年均水土保持量达 $2.64\times 10^8\text{t}$,区域水文过程显著优化,汛期洪峰流量降低15%-20%,枯期径流补给量提升10%以上,有效缓解了极端水文事件对库区工程的影响。

同时,水土保持措施改善区域生态环境,提升生态系统稳定性,减少因生态退化引发的次生灾害对水利工程的影响。新疆通

过实施山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,加强库区周边生态修复,使水土流失面积持续减少,2024年较2011年减少5.53万平方公里,生态系统水土保持功能显著增强,降低了风沙掩埋、土壤沙化等次生灾害对水库工程设施的破坏,为水利工程长期稳定运行提供了生态保障。

3 水库库区水土保持措施的综合效益

新疆库区水土保持措施通过上述机理延长水利工程使用寿命的同时,还产生了显著的生态效益、经济效益与社会效益,形成“工程长效运维-生态保护-经济社会发展”的协同共赢格局。

3.1生态效益:提升区域生态系统稳定性。水土保持措施的核心生态效益体现为控制水土流失、恢复植被覆盖、改善生态环境。新疆实施库区水土保持措施后,水土流失得到有效遏制,呈现水土流失面积与强度“双下降”、水蚀与风蚀“双减少”的良好态势。如努尔加水库通过综合水土保持措施,工程区水土流失得到有效控制,植被覆盖率从施工后的30%提升至65%以上,区域生态环境显著改善。

植被恢复与生态修复促进了生物多样性保护,库区周边形成的林草植被为鸟类、小型哺乳动物提供了栖息地与食物来源,提升了生态系统多样性与稳定性。伊犁河谷实施水土保持措施后,生态服务土壤价值年均达 23.95×10^8 元,昭苏县、特克斯县等水土保持较优区域形成了稳定的生态系统。同时,水土保持措施减少了泥沙入河入库,降低了水体含沙量,改善了水质,为水生生物生存提供了良好环境,如若羌水库实施水土保持措施后,有效缓解了工程建设对水生生态的不利影响,使生态影响控制在可承受限度内。

3.2经济效益:降低运维成本与提升资源利用效率。水土保持措施通过延长水利工程使用寿命,显著降低了工程维修、加固与重建的成本。新疆卡拉贝利水库若不采取有效水土保持措施,运行50年总库容损失将达49.24%,需投入大量资金进行清淤与加固;而通过实施综合水土保持措施,结合优化运行方式,淤积速度显著减缓,30年后泥沙基本达到平衡状态,大幅降低了清淤与维修成本。呼图壁红山水库通过除险加固配套水土保持措施,解决了长期泥沙淤积问题,避免了因工程失效导致的重建成本,项目总投资18943.8万元,相较于重建成本节省近60%。

同时,水土保持措施提升水资源利用效率,带动农业、工业发展,产生间接经济效益。如若羌水库通过水土保持与水资源调控,解决了流域下游灌区季节性缺水问题,促进农业增产,同时缓解了工业用水矛盾,提高了地表水利用率,加速了当地经济发展。伊犁河谷水土保持措施保障了水资源稳定供给,支撑了区域农业灌溉与特色产业发展,推动了经济高质量发展。此外,水土保持措施推动绿色矿山建设、生态旅游等产业发展,完善了水土保持产业链,实现了“绿水青山”向“金山银山”的转化。

3.3社会效益:保障区域安全与促进社会稳定。水土保持措施通过延长水利工程使用寿命,保障了防洪、灌溉、供水等核心功能的长期稳定发挥,为区域社会安全与稳定提供了坚实保障。新疆多数水库承担着防洪与灌溉双重功能,如若羌水库实施

水土保持措施后,下游灌区防洪标准从20年一遇提高到50年一遇,降低了洪水灾害风险,保障了下游人民群众生命财产安全。

水资源稳定供给支撑了农业生产稳定,保障了粮食安全,如伊犁河谷、昌吉州等区域通过库区水土保持措施保障了灌溉用水,稳定了粮食产量。同时,水土保持工程建设与管护为当地群众提供了就业机会,如新疆推行水土保持工程以奖代补、以工代赈等模式,组织动员治理区群众参与水土流失治理,增加了群众收入。此外,水土保持措施改善了库区周边人居环境,提升了群众生活质量,增强了公众对水利工程建设的支持与信任,提升了社会认可度与公众满意度,为区域社会稳定发展奠定了基础。

4 结束语

本文结合新疆知网文献实证数据,系统探究了水库库区水土保持措施延长水利工程使用寿命的机理与综合效益,得出以下结论:(1)水土保持措施通过泥沙淤积防控、岸坡稳固防护、水文生态调节三大核心机理延长水利工程使用寿命,其中泥沙淤积防控通过“源头拦截-中途滞留-输移调控”三级体系减少入库泥沙,岸坡稳固防护通过工程与生态协同措施提升抗蚀能力,水文生态调节通过优化水文过程降低极端事件冲击;(2)新疆库区水土保持措施产生了显著的综合效益,生态效益体现为控制水土流失、恢复植被、提升生态系统稳定性,经济效益体现为降低工程运维成本、提升水资源利用效率,社会效益体现为保障防洪安全、促进就业与社会稳定;(3)适配新疆干旱区水蚀风蚀并存、生态脆弱特征的水库水土保持技术体系(如草方格沙障、乡土植被恢复、拦渣工程等),是实现水利工程长效运维与生态保护协同发展的关键。

未来新疆库区水土保持工作应进一步强化科技支撑,结合数字化、智能化技术提升防治效果,如利用遥感技术开展水土流失动态监测,建立数字孪生系统优化水土保持措施配置;加强不同水土保持措施的协同优化研究,针对新疆不同区域(如天山北坡、塔里木河流域)的特点,构建差异化的综合防治体系;深化水土保持效益量化评估研究,建立科学的效益评估指标体系,为措施优化与政策制定提供更精准的依据。同时,应持续推进“一城二山三河四区五行业”水土保持生态保护格局构建,创新建管机制,引导社会资本参与,实现水利工程使用寿命延长与生态环境高质量发展的长期协同。

[参考文献]

[1]王磊,张宏,李娟.水电工程公路边坡的土质分析——以新疆阜康抽水蓄能电站上下库连接公路为例[J].水利与建筑工程学报,2023,21(3):174-179.

[2]孙震.新疆努尔加水库水土保持工程措施探析[J].陕西水利,2020(2):77-78+85.

[3]李明,王浩,张丽.新疆卡拉贝利水库淤积现状分析及预测[J].水资源与水工程学报,2025,36(3):168-174.

作者简介:

雪克来提·乌拉木(1982—),男,维吾尔族,新疆乌鲁木齐人,本科,工程师,研究方向为水利水电工程、水土保持。