

引调水水利工程沿线水土流失防治体系构建与关键技术创新

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.v10i2.6810

[摘要] 引调水水利工程是破解水资源时空分布不均、保障区域发展的关键支撑,但工程建设与运行易加剧沿线水土流失,威胁生态安全。本文结合干旱少雨、风蚀水蚀并存的生态特征,基于相关区域水土保持研究成果,构建“预防-治理-监管”三位一体的引调水工程沿线水土流失防治体系,明确体系构建的生态优先、因地制宜等原则及核心框架。重点探讨微地形营造、干旱区植被近自然修复、智慧水土保持监测等关键技术创新路径,结合工程实践阐述技术应用成效。研究可为干旱区引调水工程水土流失防治提供技术参考,助力筑牢区域生态安全屏障。

[关键词] 引调水工程; 水土流失; 防治体系; 技术创新; 干旱区

中图分类号: K826.16 文献标识码: A

Construction of a Soil Erosion Prevention and Control System and Key Technological Innovations along Water Diversion and Transfer Projects

Xekelaiti Wulamu

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

[Abstract] Water diversion and transfer projects are critical for addressing the spatiotemporal uneven distribution of water resources and supporting regional development. However, project construction and operation can exacerbate soil erosion along the routes, threatening ecological security. Based on the ecological characteristics of arid, low-precipitation regions with concurrent wind and water erosion, and drawing on relevant research findings in soil and water conservation, this paper constructs a trinity "prevention-control-monitoring" system for soil erosion prevention and control along water diversion and transfer projects. It clarifies the principles for system construction, such as ecological priority and site-specific adaptation, along with the core framework. The paper focuses on exploring key technological innovation pathways, including micro-topography shaping, near-natural vegetation restoration in arid areas, and intelligent soil and water conservation monitoring. The application effectiveness of these technologies is illustrated with engineering practices. This research can provide technical references for soil erosion prevention and control in water diversion projects in arid regions, contributing to the reinforcement of regional ecological security barriers.

[Key words] water diversion and transfer projects; soil erosion; prevention and control system; technological innovations; arid regions

1 研究背景与意义

新疆地域辽阔,国土面积占全国约六分之一,但水资源总量仅占全国3%左右,“有水是绿洲,无水是荒漠”是区域最显著的生态特征^[1]。引调水水利工程作为优化水资源配置的核心手段,在新疆经济社会发展与生态保护中发挥着不可替代的作用,从阿尔塔什水利枢纽到引额济克工程,再到博斯腾灌区改造项目,一系列重大工程构建起区域水安全保障网络。然而,新疆引调水工程沿线多穿越戈壁、荒漠等生态脆弱区域,工程施工中的渠道开挖、路基平整等作业会破坏地表植被与土壤结构,加剧水土流

失;同时区域干旱少雨、蒸发强烈,大风及沙尘暴频发,风蚀与水蚀叠加,进一步放大了水土流失风险,不仅影响工程运行安全,更威胁西北生态安全屏障稳定。构建科学完善的水土流失防治体系,创新适配新疆生态特征的关键技术,是引调水工程提质增效与生态保护协同推进的必然要求。这一研究不仅能解决新疆引调水工程沿线水土流失防治的实际难题,保障工程长期稳定运行,还能为全球干旱区同类工程提供可复制的技术模式与实践经验,具有重要的理论与现实意义。

1.1 研究现状综述

国内外学者针对引调水工程水土流失防治开展了大量研究,在工程措施优化、植被恢复技术等方面取得诸多成果。但新疆区域生态环境独特,水土流失以风蚀为主、水蚀为辅,且土壤贫瘠、水资源匮乏,常规防治技术难以直接适配。目前新疆本地研究多聚焦单一工程的水土保持措施设计,如贾国贤针对渭干河灌区麻扎干渠节水改造工程,提出了工程措施与植物措施结合的防治方案^[2];李旗进通过分析白杨河兰州湾渠首段水土保持项目,明确了风蚀、水蚀对区域水生态环境的影响^[3]。但现有研究缺乏对引调水工程沿线水土流失防治体系的系统性构建,关键技术的创新性与集成性不足,难以满足大规模引调水工程的综合防治需求。基于此,本文结合新疆区域特征,开展防治体系构建与关键技术创新研究,填补现有研究空白。

2 新疆引调水工程沿线水土流失特征

2.1 区域生态环境基础特征

新疆深居内陆,属典型的温带大陆性气候,引调水工程沿线多分布于干旱、半干旱区域,具有“干旱少雨、蒸发强烈、风力强劲、植被稀疏”的共性特征。区域年均降水量普遍不足200mm,部分荒漠区域不足50mm,而蒸发量可达2000-3000mm,水资源极度匮乏限制了植被自然恢复。土壤类型以风沙土、灰漠土为主,土壤质地疏松,抗侵蚀能力弱;植被以耐旱、耐盐碱的灌木和草本为主,如梭梭、驼绒藜、猪毛菜等,植被盖度普遍低于15%,地表防护能力差。同时,区域“春旱、夏洪、秋缺、冬枯”的降水特征,叠加频繁的大风天气,导致工程沿线水土流失呈现风蚀与水蚀并存、时空分布不均的特点。

2.2 引调水工程沿线水土流失核心特征

一是人为扰动加剧水土流失。引调水工程施工需开挖大量渠道、平整路基,破坏地表原生植被与土壤结构,形成大面积裸露创面,在风力与降水作用下易产生强烈侵蚀。如引额济克工程西干渠建设过程中,渠道开挖导致沿线表层土壤流失,加剧了区域沙化风险。二是侵蚀类型复合多样。工程沿线以风蚀为主,大风天气易引发沙尘暴,导致土壤颗粒搬运;在夏季暴雨集中时段,渠道边坡、施工创面易发生水力侵蚀,形成沟蚀、面蚀等;部分区域还存在风蚀与水蚀交替作用,进一步加重水土流失程度。三是水土流失影响范围广、危害大。工程沿线水土流失不仅导致土壤肥力下降、土地退化,还可能造成渠道淤积、输水效率降低,甚至威胁周边绿洲生态系统稳定。如塔里木河下游曾因水资源过度开发导致断流,引发大面积胡杨林死亡、土地沙化,水土流失面积大幅增加。

3 引调水工程沿线水土流失防治体系构建

3.1 体系构建原则

一是生态优先原则。充分尊重新疆干旱区生态系统的脆弱性与稳定性,将生态保护贯穿防治体系构建全过程,优先采用生态友好型措施,避免过度人工干预,实现水土流失防治与生态修复协同推进。二是因地制宜原则。结合新疆不同区域引调水工程沿线的地形地貌、气候条件、土壤类型及水土流失特征,针对性制定防治措施,如荒漠区域重点强化防风固沙措施,灌区周边

重点防控水力侵蚀。三是系统协同原则。构建“预防-治理-监管”三位一体的综合防治体系,实现工程措施、植物措施、临时措施的有机结合,前期预防、中期治理、后期监管的无缝衔接,提升防治体系的整体性与有效性。四是技术创新原则。立足新疆水资源匮乏、植被恢复困难的现实瓶颈,集成创新干旱区适配性强的防治技术,提升防治体系的科技含量与可持续性。

3.2 防治体系核心框架

本文构建的引调水工程沿线水土流失防治体系以“源头预防、过程治理、全程监管”为核心逻辑,涵盖预防体系、治理体系与监管体系三个子系统,各子系统相互关联、协同发力。

(1) 源头预防体系是防治工作的基础,重点聚焦工程规划设计与施工准备阶段。在规划设计环节,优化工程线路布局,尽量避开生态敏感区域,减少地表扰动范围;合理设计渠道边坡坡度、路基高度等参数,提升工程自身抗侵蚀能力。在施工准备环节,对工程沿线进行全面的水土流失现状调查与风险评估,划分水土流失敏感区、重点防治区;提前落实临时防护措施,如在施工区域周边设置防风障、截水沟等,减少施工初期的水土流失。(2) 过程治理体系是防治工作的核心,覆盖工程施工期与运行初期,采用“工程措施+植物措施+生态修复措施”的综合治理模式。工程措施聚焦重点侵蚀区域,如在渠道边坡采用生态袋护坡、格宾网防护等技术,在风沙区设置草方格沙障;植物措施以干旱区乡土植被为主,构建乔灌草复合植被带,提升地表植被盖度;生态修复措施则结合微地形营造等技术,改善局部生态环境,促进植被自然恢复。针对新疆引调水工程沿线的风蚀主导特征,重点强化防风固沙措施;针对灌区周边的水蚀风险,重点完善排水防冲体系。(3) 全程监管体系是防治工作的保障,贯穿工程全生命周期。构建“地面监测+遥感监测+智慧平台”的立体化监测网络,实时监测工程沿线水土流失量、植被盖度、土壤含水量等指标;建立水土流失风险预警机制,针对极端天气等突发情况及时发出预警并启动应急响应;完善监管责任体系,明确建设单位、施工单位、监理单位的水土保持责任,加强过程监督与考核验收,确保防治措施落实到位。

4 引调水工程沿线水土流失防治关键技术创新

4.1 干旱区微地形营造与植被近自然修复技术

针对新疆干旱区水资源匮乏、植被恢复困难的瓶颈,创新集成微地形营造与植被近自然修复技术。该技术借鉴中国科学院新疆生态与地理研究所研发的“利用微地形营造实现干旱区植被近自然修复的关键技术”,通过人工塑造浅沟、垄脊等微地形,布置保水构件,实现水分、土壤、种子的局部富集,破解水分胁迫制约。在引调水工程沿线的裸露创面,先通过机械塑造微地形,提升局部土壤含水量;再筛选梭梭、驼绒藜等乡土耐旱植被种子,采用人工播种与自然扩散相结合的方式,促进植被群落形成。实践表明,该技术应用2年后,无灌溉条件下的植被可利用水分效率提升5至7倍,植被盖度增加20%;5年后植被盖度超50%,形成稳定的植被群落。与传统修复技术相比,该技术治理成本降低50%,且无需长期人工灌溉,大幅提升了干旱区工程沿线植被

恢复的可持续性, 已在新疆准噶尔盆地、塔里木盆地周边等荒漠区引调水工程中大面积应用。

4.2 风蚀区生态友好型工程防护技术

针对新疆引调水工程沿线风蚀强烈的特征, 创新研发风蚀区生态友好型工程防护技术, 替代传统的硬质防护措施。核心技术包括蒸汽爆破棉秆纤维无土喷播技术与生态袋-草方格复合防护技术。

(1) 蒸汽爆破棉秆纤维无土喷播技术以新疆本地丰富的棉秆为原料, 经高温高压蒸汽爆破处理后, 形成多孔结构的纤维基质, 兼具保水、保肥、透气功能, 同时释放天然营养物质, 为植物生长提供支撑。该技术通过三层喷播模式: 底层喷洒蒸汽爆破棉秆纤维基质层, 中层喷洒乡土草种混合层, 顶层覆盖棉秆纤维保护层, 有效提升植被成活率。在S21阿乌高速克拉美丽服务区的引调水配套工程中应用表明, 该技术可使植被成活率提升至70%以上, 形成的生物结皮可抵御八级大风和雨水冲刷, 防风固沙效果显著。(2) 生态袋-草方格复合防护技术将传统草方格沙障与生态袋结合, 在工程边坡与风沙区先铺设草方格固定表层土壤, 再在草方格内放置填充本地土壤与有机肥的生态袋, 袋内种植沙拐枣、碱蓬等耐旱植被。该技术既发挥了草方格的防风固沙作用, 又通过生态袋改善了局部土壤条件, 促进植被生长, 形成“工程防护+生态修复”的双重保障, 适用于引调水工程渠道边坡、路基两侧等重点风蚀区域。

4.3 智慧水土保持监测与精准调控技术

依托数字孪生、物联网等技术, 构建新疆引调水工程沿线智慧水土保持监测与精准调控技术体系, 实现水土流失防治的智能化、精准化。该技术体系由监测感知网络、数据传输网络与智慧调控平台三部分组成。

(1) 监测感知网络在工程沿线布设土壤含水量传感器、风速传感器、水土流失监测仪等设备, 结合遥感卫星与无人机航拍, 实现对风蚀量、水蚀量、植被盖度、土壤墒情等指标的实时监测。在博斯腾灌区和静县莫呼查汗片区改造工程中, 已布设12个墒情监测点, 实时捕捉土壤水分变化, 为精准灌溉与水土保持调控提供数据支撑。数据传输网络采用5G与物联网技术, 将监测数据实时传输至智慧调控平台, 确保数据传输的及时性与稳定性。(2) 智慧调控平台集成数据存储、分析、预警与调控功能, 通过大数据分析模型对监测数据进行深度处理, 评估水土流失风险等级; 针对不同区域的侵蚀特征, 自动生成精准调控方案, 如通过智慧灌溉系统调整植被灌溉量, 通过应急调度系统启动防风固沙应急措施。该技术实现了引调水工程沿线水土流失防治的“精准监测、科学评估、智能调控”, 大幅提升了防治工作的效率与效果。

5 防治体系与技术应用成效展望

将本文构建的防治体系与创新技术应用于新疆引调水工程, 可有效解决沿线水土流失问题, 实现生态效益、经济效益与社会效益的协同提升。在生态效益方面, 通过植被恢复与防风固沙措施, 可显著提升工程沿线植被盖度, 减少水土流失面积, 遏制土

地沙化趋势; 如借鉴台特玛湖生态输水的成效, 生态修复后区域水土流失面积可减少437.51km², 植被盖度从14.83%提升至22.26%。同时, 植被恢复可改善局部小气候, 增加空气湿度, 减少沙尘暴等自然灾害发生频率, 助力筑牢西北生态安全屏障。在经济效益方面, 有效的水土流失防治可减少渠道淤积, 提升输水效率, 降低工程维护成本; 如新疆大河沿子灌区通过智慧水利与水土保持技术集成, 渠系水利用系数由0.67提高到0.86, 年节水894万立方米, 大幅降低了灌溉成本。同时, 植被恢复与生态改善可带动周边生态旅游发展, 促进区域经济多元化发展。在社会效益方面, 防治体系的实施可保障引调水工程长期稳定运行, 为区域农业灌溉、城乡供水提供安全保障, 改善民生福祉; 同时, 工程建设与管护可创造大量就业岗位, 促进民族团结与社会稳定。

6 结论与展望

6.1 结论

新疆引调水工程沿线水土流失呈现风蚀水蚀并存、人为扰动加剧、影响范围广的特征, 传统防治模式难以适配区域生态需求。本文构建的“预防-治理-监管”三位一体水土流失防治体系, 遵循生态优先、因地制宜等原则, 实现了工程全生命周期的综合防治覆盖。创新研发的干旱区微地形营造与植被近自然修复技术、风蚀区生态友好型工程防护技术、智慧水土保持监测与精准调控技术, 针对性解决了新疆干旱区水资源匮乏、植被恢复困难、风蚀强烈等核心瓶颈, 具有显著的区域适配性与创新性。研究表明, 该防治体系与关键技术可有效提升引调水工程沿线水土流失防治效果, 促进植被恢复与生态改善, 为工程安全稳定运行提供保障。相关研究成果丰富了干旱区引调水工程水土保持理论与技术体系, 为新疆及同类区域工程实践提供了科学参考。

6.2 展望

未来研究可进一步深化防治体系的动态优化机制, 结合新疆不同区域引调水工程的具体特征, 细化防治措施方案; 加强关键技术的集成与升级, 如探索无人机精准播种与微地形营造技术的协同应用, 提升技术应用效率。同时, 可开展长期定位监测研究, 系统评估防治体系与技术的长期效益, 为技术模式的持续优化与推广提供数据支撑。此外, 还应加强跨区域合作与技术交流, 借鉴国内外干旱区水土保持先进经验, 推动新疆引调水工程水土流失防治工作迈向更高水平, 助力区域高质量发展与生态文明建设。

[参考文献]

- [1] 张国建, 曹雪峰, 李晶晶. 生态输水对台特玛湖生态改善情况分析评价[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 316-320.
- [2] 贾国贤. 干渠节水改造工程水土流失预测及防治措施[J]. 水利科技与经济, 2025, 31(9): 78-82.
- [3] 李旗进. 新疆白杨河兰州湾渠首段水土保持项目分析[J]. 陕西水利, 2025(10): 156-158.

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。