

水土保持工程对土壤质量改善的作用机理及长期效应

张雄伟¹ 牛帅强²

1. 佳县水利工作服务中心 陕西 榆林 719200

2. 佳县水土保持工作中心 陕西 榆林 719200

摘要: 本文旨在系统阐述水土保持工程措施的主要类型,并从物理、化学和生物三个维度,深入剖析其改善土壤质量的作用机理。在此基础上,重点探讨这些工程措施在长时间尺度下对土壤质量产生的累积性、协同性与动态演变等长期效应。研究表明,水土保持工程通过重塑微地形、调控水文过程、促进物质积累与能量流动,能够有效提升土壤结构稳定性、增强养分保蓄能力、激活微生物群落功能,从而实现土壤质量的系统性修复与提升。然而,其长期效应受气候、地质、植被演替及后期管护等多重因素影响,呈现出复杂性与动态性。未来研究应加强多学科交叉融合,深化对水土保持工程-土壤系统耦合机制的理解,为构建高效、稳定、可持续的土壤资源保护体系提供坚实的科学基础。

关键词: 水土保持工程; 土壤质量; 作用机理; 长期效应

引言

土壤质量是反映土壤维持生产力、保障环境及促进生态健康能力的综合指标,涵盖其物理、化学与生物学特性。在全球变化和高强度人类活动双重压力下,水土流失已成为土壤退化的主要驱动因素,不仅剥离肥沃表土,还破坏结构、改变水文、降低生物多样性,引发连锁退化效应。水土保持工程作为防治水土流失的重要手段,通过改变微地形、拦截径流、减缓流速,为土壤修复创造条件。然而,现有研究多聚焦于短期减蚀减沙效果,对其如何系统性改善土壤内部结构、调控养分循环、激活生物过程,以及这些效应在数十年至百年尺度上的动态演变,仍缺乏深入整合。本文超越传统“减蚀”视角,将水土保持工程纳入土壤生态系统修复框架,整合多学科知识,系统探讨其改善土壤质量的级联机制:即工程如何通过物理干预启动土壤修复,进而优化化学性质(如有机质、养分、pH),并重塑微生物群落结构与功能;同时分析长期尺度下效应的累积性、协同性及制约因素,旨在构建一个评估与优化水土保持长期生态效益的系统性理论框架。

1 水土保持工程措施的主要类型

水土保持工程措施是一个多样化的技术体系,其核心目标是通过工程手段改变地表形态或水文路径,以达到拦蓄径流、削减侵蚀动能、固持土壤的目的。根据其作用对象和工程形式,主要可分为以下几类:

1.1 坡面治理工程

坡面是水土流失发生的初始场所,因此坡面治理是水土保持的基础。此类工程主要通过改变坡面微地形来

分散、拦截和入渗降雨径流。

(1) 梯田工程: 通过将陡坡改造成阶梯状的台地,显著缩短了坡长,降低了坡度,从根本上改变了产流产沙的动力学条件。水平梯田能有效拦截全部坡面径流,使其就地入渗,是集水、保土、增产于一体的经典工程。(2) 水平沟/鱼鳞坑: 在坡面上沿等高线开挖的沟或坑,用于拦截坡面径流,增加水分入渗,并为林草种植提供良好的立地条件。它们是适用于造林地、经济林地的重要坡面工程。(3) 坡面截排水系统: 包括山坡截水沟和坡面排水沟。前者位于坡顶上方,用于拦截坡外来水;后者则引导已形成的径流有序排走,防止其在坡面无序汇集冲刷。

1.2 沟道治理工程

当坡面侵蚀产物进入沟道后,会形成强烈的沟壑侵蚀。沟道治理工程旨在稳定沟床、防止沟头前进和沟岸扩张。(1) 谷坊工程: 在沟道中修建的低矮坝体(材料可为石、土、柳桩等),抬高侵蚀基准面,减缓沟底比降,促使泥沙在谷坊上游淤积,逐步填平沟道,变荒沟为良田^[1]。(2) 淤地坝: 一种规模更大的沟道拦蓄工程,主要分布于黄土高原地区。其不仅能拦蓄大量泥沙,还能形成面积可观的坝地,兼具防洪、减沙、造地、蓄水等多重效益。(3) 沟头防护工程: 在沟头处修建围埂、涝池等设施,防止水流直泻沟底,有效阻止沟头溯源侵蚀。

1.3 小型蓄水用水工程

此类工程旨在将宝贵的降水和径流资源就地拦蓄起来,变害为利。(1) 水窖、旱井: 在干旱半干旱地区,

用于收集和储存屋顶、场院及坡面径流,解决人畜饮水和补充灌溉水源。(2)小型塘坝:在山坳、溪涧处修建的小型蓄水工程,可用于灌溉、养殖和改善区域小气候。

这些工程措施往往不是孤立存在的,而是根据流域的地形地貌、土壤植被、气候水文等条件,进行优化配置,形成一个多层次、多功能的综合防护体系。

2 水土保持工程改善土壤质量的作用机理

水土保持工程对土壤质量的改善并非一蹴而就,而是一个由物理干预触发,进而引发化学和生物过程响应的级联反应链。其作用机理可以从以下三个层面进行解析。

2.1 物理层面:重塑土壤结构与水文环境

水土保持工程最直接的作用是改变土壤的物理环境,这是后续所有改善效应的基础。

2.1.1 减少侵蚀应力,保护表土

梯田、水平沟等工程通过拦截和分散径流,极大地降低了雨滴击溅和地表径流对土壤颗粒的剥离与搬运能力。这直接保护了富含有机质、养分和微生物的宝贵表层土壤不被流失,为土壤质量的维持提供了物质前提。

2.1.2 改善土壤结构,增强稳定性

侵蚀过程的减弱使得土壤颗粒有更多机会通过物理、化学和生物作用形成稳定的团聚体。研究表明,实施水土保持措施后,土壤中 $> 0.25\text{mm}$ 的水稳性大团聚体含量显著增加。这些大团聚体是土壤结构的骨架,能有效抵抗水力和风力的分散作用,提高土壤的抗蚀性和抗冲性^[2]。同时,团聚体内部形成的微孔隙和团聚体间的宏孔隙,共同构成了良好的土壤孔隙系统。

2.1.3 优化水文过程,调节水分状况

水土保持工程通过增加水分入渗、减少地表径流,显著提高了土壤的蓄水保墒能力。梯田和淤地坝所形成的平坦地形,延长了水分在土壤中的滞留时间,使土壤含水量在干旱季节得以维持在较高水平。良好的水分状况不仅是植物生长的关键,也是土壤物理、化学和生物过程正常运行的必要条件。

2.2 化学层面:促进养分积累与循环

物理环境的改善为土壤化学性质的优化创造了有利条件。

2.2.1 增加有机质输入与积累

一方面,侵蚀的减少直接减少了有机质的物理损失。另一方面,水土保持工程营造的良好微环境(水分、温度适宜,侵蚀干扰小)促进了植被(无论是人工种植还是自然恢复)的生长与覆盖。植被的凋落物和根系分泌物成为土壤有机质的主要来源。随着时间推移,这些有机物质在土壤中不断积累、转化,形成腐殖质,

显著提升了土壤有机质含量。有机质是土壤肥力的核心,它不仅能直接提供植物所需的养分,还是土壤养分库和缓冲库。

2.2.2 提升养分保蓄与供应能力

土壤有机质和粘粒是土壤阳离子交换量(CEC)的主要贡献者。水土保持工程通过增加有机质含量和改善土壤质地(如淤地坝沉积物通常较细),有效提高了土壤的CEC。这意味着土壤能吸附和保蓄更多的钾、钙、镁、铵等植物必需的阳离子养分,减少其淋失风险,并在植物需要时缓慢释放,形成一个稳定而长效的养分供应系统。此外,一些研究也发现,长期实施水土保持措施的土壤,其速效氮、磷、钾等养分的有效性也得到同步提升。

2.2.3 调节土壤酸碱度与缓冲性

有机质的积累和特定矿物的风化过程,有助于改善土壤的缓冲性能,使其pH值趋于中性或更适合作物生长的范围,减少极端酸碱环境对植物和微生物的胁迫。

2.3 生物层面:激活土壤生命系统

土壤不仅是非生命的矿物质和有机质的混合物,更是一个充满活力的生物系统。水土保持工程通过改善物理和化学环境,深刻地影响着土壤生物群落。

2.3.1 改善微生物栖息地

稳定的团聚体结构为微生物提供了多样化的微环境。团聚体内部的厌氧微环境和外部的好氧环境,满足了不同类型微生物的生存需求。充足的水分和适宜的温度,为微生物的代谢活动提供了能量保障。

2.3.2 丰富微生物群落结构与功能

与未治理的侵蚀地相比,实施水土保持工程的土壤中,细菌、真菌、放线菌等微生物的总量和多样性均显著增加。特别是与养分循环密切相关的功能微生物,如固氮菌、解磷菌、纤维素分解菌等,其丰度和活性得到明显提升^[3]。这表明土壤的生物地球化学循环功能被有效激活。

2.3.3 促进土壤动物活动

蚯蚓、线虫等土壤动物对土壤结构的形成和有机质的分解具有重要作用。水土保持工程创造的湿润、疏松、富含有机质的环境,为这些土壤动物的繁衍生息提供了理想家园。它们的活动进一步促进了土壤的通气、排水和养分混合,形成了良性循环。

综上所述,水土保持工程通过“物理固持—化学富集—生物激活”的级联作用机制,系统性地修复和提升了土壤质量。这三个层面相互依存、相互促进,共同构成了一个完整的土壤质量改善链条。

3 水土保持工程对土壤质量改善的长期效应

水土保持工程的效益并非静态不变,而是随着时间的推移呈现出动态演变的长期效应。理解这些长期效应对于评估工程的可持续性、指导后期管护和优化未来设计至关重要。

3.1 效应的累积性与滞后性

土壤质量的改善是一个缓慢的生物地球化学过程。水土保持工程的初期效应主要体现在物理层面,即侵蚀量的迅速下降。然而,化学和生物层面的改善则表现出明显的滞后性。例如,土壤有机质的积累需要数年甚至数十年的植被恢复和凋落物归还才能显现显著效果。同样,一个复杂而稳定的微生物群落网络的重建也需要漫长的时间。这种滞后性意味着,对水土保持工程效益的评价不能仅着眼于短期,而必须有长远的眼光。一旦度过初期的“投入期”,其改善效应便会随着时间呈累积式增长,最终形成一个稳定、高产、健康的土壤生态系统。

3.2 效应的协同性与系统性

单一的水土保持工程措施虽然有效,但其长期效应往往是有限的。实践中,将工程措施与生物措施(如植树种草)、农业技术措施(如等高耕作、覆盖作物)相结合,能产生强大的协同效应。例如,梯田为林草生长提供了稳定平台,而林草的根系又能进一步加固梯田埂坎,其凋落物则持续为土壤补充有机质^[4]。这种“工程固形、生物固土、农艺养地”的综合治理模式,能够从多个维度同时作用于土壤系统,其长期效应远大于各单项措施的简单叠加,体现出高度的系统性和整体性。

3.3 效应的动态演变与阈值特征

长期来看,水土保持工程对土壤质量的影响并非线性增长。在工程实施的早期,土壤质量各项指标(如有机质、团聚体稳定性)可能会快速提升。但随着系统逐渐趋于稳定,其改善速率会放缓,最终可能达到一个新的动态平衡点。这个平衡点的高低,取决于当地的气候、母质、植被类型以及工程本身的维护状况。此外,某些关键过程可能存在阈值效应。例如,只有当土壤有机质含量超过某一临界值时,土壤的结构稳定性和持水能力才会发生质的飞跃。识别这些阈值对于精准管理和效益最大化具有重要意义。

3.4 长期效应的制约因素

尽管水土保持工程具有积极的长期效应,但其效果

的发挥也受到多种外部因素的制约。(1)气候变化:极端降雨事件的频率和强度增加,可能超出既有工程的设计防御标准,导致工程损毁和效益丧失。长期的干旱则会限制植被恢复,进而影响土壤有机质的输入。(2)后期管护缺失:许多水土保持工程(如梯田、谷坊)需要定期维护。如果缺乏有效的后期管护,工程设施可能因自然老化或人为破坏而失效,导致前期的投入付诸东流,甚至可能因工程损毁而引发新的集中冲刷。(3)土地利用方式转变:如果在治理后的土地上进行不合理的高强度开发(如过度放牧、陡坡垦殖),会重新加剧土壤扰动,抵消甚至逆转水土保持工程带来的积极效应。因此,要确保水土保持工程长期、稳定地发挥改善土壤质量的作用,必须将其纳入一个包含科学规划、精心施工、持续监测和有效管护在内的全生命周期管理体系中。

4 结语

水土保持工程不仅是减少泥沙入河的手段,更是通过物理、化学与生物三重机制系统性提升土壤质量的关键实践:物理上重塑结构、优化水文,化学上促进养分积累与循环,生物上激活土壤生命系统。其效应具有累积性、协同性与动态演变特征,指向更健康、肥沃且具韧性的土壤未来。展望未来,应深化机理研究,运用分子生物学、同位素示踪等技术解析碳氮循环与微生物网络;强化长期定位观测,构建覆盖多生态区的试验站网络;推动智慧化管理,融合遥感、物联网与大数据实现工程与土壤状态的实时监测与调控;同时完善政策与管护体系,将后期管护纳入法治化轨道,并探索生态补偿与碳汇交易等市场化机制,确保水土保持效益长效可持续。

参考文献

- [1]曹洋.水土保持措施对土壤物理性状的影响分析[J].水土保持应用技术,2025,(04):9-11.
- [2]杨江,马建刚.水土保持措施对土壤水分含量与入渗过程的影响研究进展[J].现代农业研究,2025,31(10):48-52+59.
- [3]卢博.水土保持措施对土壤性质和作物产量的影响[C]//广西生产力学会.新质生产力与科技发展学术研讨会论文集.礼泉县水土保持工作站,2025:225-227.
- [4]李梅.农业水土保持措施对土壤质量改良的效果研究[J].农村科学实验,2024,(08):25-27.