

拉萨河谷植被修复水土保持效益及土壤碳汇变化特征研究

平措卓玛 贡觉旺杰

西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院 西藏 拉萨 850000

【摘要】：拉萨河谷气候干旱、地形起伏明显，植被退化易引发径流增强、土壤侵蚀加剧和碳储量下降等问题。针对植被覆盖不足、土壤结构松散、碳汇能力偏弱等情况，可通过乡土草灌配置、坡面分区修复、土壤改良和长期监测评价等方式提升治理精度。修复后植被覆盖度增加，径流泥沙量降低，土壤有机碳含量提高，水土保持效益和碳汇功能呈协同增强趋势。

【关键词】：拉萨河谷；植被修复；水土保持；土壤碳汇；生态治理

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.093

引言

拉萨河谷位于青藏高原重要生态地带，河谷地貌、干旱气候和人类活动共同影响区域植被格局。部分坡面植被稀疏，土壤抗蚀能力较弱，降雨和融雪过程容易诱发径流集中，造成表层土壤流失，进一步削弱土壤养分保持能力和碳固定水平。植被修复不仅关系到地表覆盖改善，还直接影响土壤结构、水分入渗、有机质积累和碳汇变化。通过筛选适生植物、优化草灌配置、改良退化土壤、建立水土流失监测指标，可更准确识别植被修复对水土保持效益和土壤碳汇提升的影响路径，为拉萨河谷生态治理提供清晰依据。

1 拉萨河谷生态脆弱特征解析

1.1 河谷地形对坡面径流的影响

拉萨河谷地形起伏明显，山地、坡地和河谷阶地交错分布，坡面汇流路径较短，降雨和融雪水容易沿坡向快速下泄。坡度较大的区域地表水停留时间短，入渗能力不足，表层细颗粒土壤容易被径流剥离并向沟道输移。河谷两侧坡脚受径流冲刷影响较强，局部区域形成浅沟侵蚀和片状侵蚀，削弱土壤稳定性。绿色发展理念下，坡面治理需要兼顾地形分区、径流阻控和生态恢复，通过植被带拦截、微地形调蓄和坡面稳定措施降低径流冲刷强度，为后续水土保持效益评价提供基础。

1.2 干旱气候对植被生长的限制

拉萨河谷降水时空分布不均，蒸发强度较大，土壤水分亏缺成为限制植被恢复的重要因素。旱季土壤含水量下降明显，浅根植物容易出现生长缓慢、覆盖度不足和群落稳定性偏弱等情况；雨季集中降水又可能造成裸露地表冲刷，加剧水分利用和土壤保持之间的不协调。低温、强辐射和昼夜温差也会影响植物萌发、根系扩展和地上生物量积累。植被修复应突出节水优先和适地适生原则，选择耐旱、抗寒、根系发达的乡土草灌类型，配合保水覆盖、集雨补水和分季养护，提高植被建成率和水土保持连续性。

1.3 退化土壤对碳储量积累的制约

拉萨河谷部分退化坡面土层浅薄，砂砾含量较高，团聚体结构稳定性不足，土壤有机质输入和保存能力偏弱。植被稀疏

区域枯落物来源有限，根系残体积累不足，微生物活动受水热条件制约，土壤有机碳形成速度较慢。水土流失还会带走富含养分和有机碳的表层土壤，使碳库恢复受到持续干扰。低碳发展理念下，土壤碳汇提升不能仅依靠植被覆盖增加，还需要通过土壤改良、保水增肥、根系固土和枯落物归还等方式增强碳输入，提升有机碳稳定化水平，推动水土保持效益和碳汇能力同步改善。

2 植被退化引发的水土流失表现

2.1 植被覆盖不足导致地表裸露增加

植被覆盖度低导致地表大面积裸露，土壤直接暴露于降雨冲刷和风蚀作用下，细颗粒土壤易被分散并随表层径流迁移。裸露区域水分蒸发加剧，土壤干燥，微生物活动受抑，土壤团聚体破碎，进一步削弱水分保持和养分储存能力。地表缺乏植物根系固定，土壤承受降雨动能直接冲击，易形成浅沟、冲刷坑，增加坡面不均匀侵蚀风险。生态修复理念强调通过快速恢复覆盖、增加植物群落多样性和地表覆盖材料结合，提高裸露地表的抵御冲刷能力，实现水土保持初步稳固。

2.2 坡面径流集中造成泥沙流失加重

坡面植被稀疏和地形坡度大导致降雨径流快速汇聚，水流速度增加，使表层松散土壤颗粒被强力剥离并沿坡向下迁移，形成沟蚀和泥沙沉积带。径流集中区域土壤结构易破坏，冲刷力沿坡向累积，导致坡面侵蚀呈线性扩展特征，泥沙流失量显著上升。水土流失与泥沙迁移过程密切关联，影响河谷水质和下游沉积物动态。绿色发展理念提出通过植被分带、微地形调节和雨水缓控措施，将径流分散与滞蓄，减缓泥沙流失速度，提高坡面土壤稳定性和生态安全。

2.3 土壤结构疏松削弱抗蚀能力

退化区域土壤孔隙率高而团聚体弱，表层土壤颗粒易被水动力分离，缺乏黏结力，抗蚀能力下降。雨滴直接冲击破坏土壤表面结构，降雨入渗能力受限，地表径流增强，进一步加剧泥沙输移和沟蚀扩展。疏松土壤微生物活性降低，有机质分解速度快，团聚体再生缓慢，碳储量累积受阻。可持续生态修复策略要求结合土壤改良、表层覆盖和根系加固，通过增加土壤

有机质和改善团聚体稳定性,增强抗侵蚀能力,实现水土保持与碳汇协同提升。

3 水土流失问题对应的植被修复方法

3.1 裸露坡面采用乡土草本快速覆盖

裸露坡面土壤直接暴露于降雨冲刷和风力侵蚀下,易造成细颗粒流失和表层破碎。采用乡土草本快速覆盖,可通过选择耐旱、根系发达、适应土壤贫瘠的本地草种,在短时间内形成稳定的植被覆盖层。覆盖过程中,可结合播种密度优化、分层覆土及保水覆盖技术,提高种子萌发率和幼苗存活率。植被快速建立后,根系与土壤结合形成稳固的土壤团聚体,增强坡面抗冲刷能力,地表径流速度减缓,同时通过植被冠层截留降雨,降低雨滴对土壤表面的直接打击。此方法兼顾生态修复与水土保持双重目标,能够在保障坡面生态安全的同时,为土壤碳储量提升创造条件,并符合绿色发展和低碳生态治理理念。

3.2 径流集中区域配置灌草拦截带

径流集中区域水流动能强,容易形成冲刷沟和泥沙迁移通道,对坡面土壤稳定性构成严重威胁。通过设置灌草拦截带,可在径流主流路径上建立植被缓冲区,使流速减弱,泥沙沉积于拦截带中,从而降低下游侵蚀风险。拦截带选择根系密集、耐湿、地被能力强的灌木或草本组合,结合地形微调和表土改善,提高拦截效率和水土保持持续性。此类配置可形成多层次生态防护结构,减少冲刷力作用于裸露土壤,提高径流分散和水分下渗效率,并通过枯落物返回增加土壤有机质输入,促进碳汇功能增强,实现径流管理和土壤改善的协同效益。

3.3 松散土层实施客土改良和保水处理

松散、结构疏松的坡面土壤抗侵蚀能力低,有机质含量偏低,易被径流剥离,限制水土保持效果。实施客土改良和保水处理,通过向土壤中补充有机质、黏粒和改良剂,提高土壤团聚体稳定性和持水能力,增强土壤结构韧性。改良后土壤孔隙率和毛管水分保持能力增强,根系生长更易深入,土壤水分利用效率提升,降低径流产生和表层冲刷。结合微地形调蓄和表层覆盖,可进一步减缓水流速度,提升水土保持效果,同时改善土壤微生物活性,加速有机碳积累和固定,形成水土保持与碳汇协同提升的可持续治理模式。此方法通过土壤物理、化学和生物多重改善手段,实现生态修复与碳储量双重优化。

4 土壤碳汇偏弱问题对应的提升路径

4.1 增加枯落物输入促进有机碳积累

土壤有机碳储量不足是拉萨河谷退化坡面常见问题,枯落物输入不足导致碳源匮乏,微生物分解能力受限,土壤碳固定效率低。通过增加枯落物输入,可以直接补充表层有机质,形成连续的有机物供给链,促进碳在土壤微生物作用下转化为稳定有机碳。枯落物种类和质量对碳积累效率具有显著影响,高

纤维素和半纤维素比例适中的植物残体能够延长分解周期,缓慢释放养分并提高土壤团聚体稳定性。输入枯落物的空间分布应与坡度、植被覆盖及水分条件匹配,保证水土保持与碳储量同步优化。枯落物与表层土壤结合后,通过增加地表覆盖率降低雨滴冲击,减缓表层侵蚀,同时为微生物提供碳源和栖息环境,增强土壤微生物活性和有机质转化效率,从而在生态修复与低碳发展理念下实现水土保持与碳汇协同提升。

4.2 改善土壤团聚体增强碳稳定性

退化土壤团聚体脆弱,微结构松散,导致表层有机碳易被径流剥离和风蚀损失。通过土壤团聚体改善,可增强土壤物理稳定性和碳固定能力。改善措施包括添加有机质、黏粒及天然胶体物质,增强微团聚体结合力,同时促进根系分泌物参与土壤团聚体形成。稳固的团聚体不仅提高土壤抗侵蚀能力,还能增加微孔和毛管水分储存,改善水分和养分保持能力,为微生物活动提供稳定环境,延长有机碳在土壤中的停留时间。团聚体增强后,枯落物和根系残体在微结构中分布均匀,提高碳在不同土壤层次的固定效率,实现表层与深层土壤碳储量协同增长,形成可持续碳汇稳定系统,同时支持生态修复与水土保持综合效益提升。

4.3 分层监测土壤碳含量变化规律

土壤碳储量在不同土层存在显著差异,表层碳积累受植被覆盖和枯落物输入影响大,而深层碳储量受根系分布和土壤团聚体结构控制。分层监测可明确碳输入、转化及流失路径,识别碳库动态变化规律,为针对性修复提供数据支撑。监测指标包括有机碳含量、可分解有机质比例、微生物活性及土壤团聚体分布等,通过连续采样和长期跟踪评估修复效果。分层数据可指导枯落物投放、根系优化种植和土壤改良策略,保证碳输入与固定在不同深度的均衡性,形成表层与底层协同的碳库结构,增强碳稳定性和可持续性。同时,分层监测可与水土保持效益评价结合,量化植被修复对水文过程和泥沙控制的贡献,实现水土保持与碳汇功能同步优化,推动拉萨河谷生态治理的科学化和精细化管理。

5 植被修复后的水土保持效益评价

5.1 植被覆盖度提升对径流削减的影响

植被覆盖度提升后,坡面降雨接触地表的方式发生改变,植物冠层能够截留部分降水,减弱雨滴对表层土壤的直接冲击,降低土粒分散和表面结皮形成概率。草本和灌木覆盖形成连续地表保护层,增加坡面粗糙度,使径流流速下降,水分在坡面停留时间延长,入渗量随之增加。覆盖度较高区域可削弱径流汇集强度,减少短历时强降雨条件下的快速产流,降低浅沟侵蚀发生概率。效益评价应重点关注植被盖度、径流系数、土壤含水量、入渗速率和坡面产流时间等指标,通过多指标对比识别植被修复对水文过程的调节程度。绿色发展理念下,径

流削减不应只关注水量减少，还需关注水分留存对植被生长、土壤碳输入和生态系统稳定性的促进效果。

5.2 根系固土能力对侵蚀控制的影响

根系固土能力直接影响坡面抗蚀强度，植被修复后，根系在表层土壤中形成交织结构，可增强土颗粒之间的黏结力，提高土壤剪切强度和抗冲刷能力。须根密集的草本植物主要稳定浅层土壤，灌木根系则可向较深土层延伸，增强不同土层之间的连接性，降低坡面滑移和沟蚀扩展风险。根系分泌物还能促进土壤团聚体形成，提高有机质固定能力，使土壤结构由松散状态逐步转向稳定状态。评价根系固土效益时，应结合根长密度、根系生物量、根土复合体强度、团聚体稳定性和侵蚀模数等指标，分析根系结构与侵蚀控制之间的关系。低碳生态治理要求把根系固土、水土保持和土壤碳汇纳入同一评价框架，突出植被地下部分对生态修复效益的支撑。

5.3 泥沙输出减少对河谷生态稳定的影响

泥沙输出减少能够降低坡面水土流失强度，保留富含养分和有机碳的土壤层，为植被持续恢复和土壤碳汇提升提供基础。植被修复后，坡面径流被分散、滞缓和过滤，泥沙颗粒在坡面或拦截带内沉积，下游沟道和河道承受的泥沙负荷下降，河谷生态系统的水文连通和物质循环趋于稳定。泥沙减少还可降低河岸淤积和水体浑浊风险，改善河谷生境质量，增强区域生态安全。效益评价可选取输沙量、泥沙浓度、侵蚀沟发育程度、表土厚度、有机碳流失量等指标，判断植被修复对泥沙控制的实际效果。新发展理念强调系统治理和协同增效，泥沙输出减少不仅体现水土保持成效，也反映土壤资源保护、碳库稳定和河谷生态韧性提升的综合水平。

6 水土保持和土壤碳汇协同提升机制

6.1 植被恢复促进水分入渗增加

植被恢复后，地表覆盖层、根系孔隙和枯落物层共同改变坡面水分运行过程。植物冠层削弱降雨动能，枯落物层延缓水流启动时间，根系生长形成连续孔道，使降水由快速汇流逐步转向下渗储存。水分入渗增加后，坡面产流量减少，表层土壤被剥离的概率降低，富含有机质和细颗粒的土层得到保留。土壤含水量提升还能改善根系活力和微生物代谢条件，促进植物残体分解和有机碳转化，使水土保持过程与碳积累过程形成联动。高质量生态修复要求将覆盖度、入渗率、土壤含水量和有机碳变化纳入同一评价链条，通过草灌合理配置、地表覆盖保

护和坡面水分调蓄，提高降水资源利用效率，减少无效径流和泥沙外排，推动拉萨河谷植被恢复由表层绿化转向水分保持、土壤稳固和碳汇提升的协同治理。

6.2 土壤改良带动有机碳储量提高

土壤改良通过改善物理结构、增加养分供给和提升生物活性，能够提高有机碳输入、转化和保存效率。退化坡面土壤质地粗、保水保肥能力弱，碳源进入土壤后容易受侵蚀和分解影响而损失。添加有机质、改良表层质地、提升团聚体稳定性，可增强土壤对植物残体、根系分泌物和微生物代谢产物的固定能力。团聚体内部形成相对稳定的微环境，能够降低有机碳暴露程度，延长碳在土壤中的停留时间。水分和养分条件改善后，植被根系向深层扩展，深层碳输入增加，碳储量结构由表层单一积累转向多层次稳定储存。新发展理念下，土壤改良不能停留在增肥保苗层面，还应服务于水土保持和低碳治理目标，通过保水、固土、增碳、稳碳协同设计，提高拉萨河谷修复地块的碳汇能力和生态韧性。

6.3 综合治理形成河谷生态稳定格局

综合治理需要把坡面植被恢复、径流调控、土壤改良和碳汇监测连接成完整技术体系。坡上通过草本覆盖减少裸露地表，坡中利用灌草结构分散径流，坡脚设置沉积缓冲空间，形成分区拦截和逐级消能格局。土壤层面同步实施有机质补充、保水处理和团聚体稳定化管理，降低表土流失风险，增强碳输入和碳保存能力。监测层面建立植被盖度、径流泥沙量、土壤含水率、有机碳含量和碳密度变化指标，及时识别治理薄弱区域，调整植物配置和养护方式。创新、协调、绿色、开放、共享理念融入河谷生态修复，可促进单项工程治理向系统治理转变，使水分循环、土壤稳定、植被生长和碳汇积累形成互相支撑的格局。拉萨河谷生态稳定并非依赖单一措施，而是通过多层次修复、多过程协同和长期监测形成持续稳定的治理体系。

7 结语

拉萨河谷植被修复显著改善了坡面覆盖度，增强了土壤稳定性和根系固土能力，减缓了径流速率，降低泥沙输出，提升水土保持效益。同时，枯落物输入和土壤改良措施有效增加了土壤有机碳储量，改善团聚体结构，促进碳在不同土层稳定积累。综合治理策略将植被恢复、径流调控与土壤改良协同设计，形成系统化、持续化的生态稳定格局，实现水土保持和土壤碳汇功能同步提升，为拉萨河谷生态治理提供可操作的技术路径和科学依据。

参考文献：

- [1] 乔伟,翟亚军,牟涛,等.拉萨河谷地区施氮磷肥对小黑麦生产性能和营养品质的影响[J].高原农业,2025,9(5):637-646.
- [2] 刘峰,丁亚丽,尤勇刚,等.拉萨河谷区云杉树干液流变化特征及其对环境因子的响应[J].干旱区资源与环境,2025,39(8):188-197.
- [3] 夏格旺堆,白玛次旦.吐蕃时期拉萨河谷宗教遗址的考古发现与研究[J].西藏大学学报(社会科学版),2024,39(3):19-30+40.