

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.004 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.004

周琴,吴洁玲,刘梦莹,等.花岗岩红壤侵蚀退化地植被恢复措施的水土保持调控效应[J].水土保持学报,2026,40(2):175-185.

ZHOU Qin, WU Jieling, LIU Mengying, et al. Regulation effects of vegetation restoration measures on soil and water conservation in eroded and degraded granite red soil areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 175-185.

花岗岩红壤侵蚀退化地植被恢复措施的水土保持调控效应

周琴^{1,3}, 吴洁玲^{1,3}, 刘梦莹², 黄少燕^{1,3}, 查轩^{1,3}

(1. 福建师范大学地理科学学院、碳中和未来技术学院, 福州 350117; 2. 南平市乡村振兴服务中心, 福建 南平 354200;

3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350117)

摘要: [目的] 为探究南方花岗岩红壤侵蚀退化地不同植被恢复措施对土壤质量改善情况及水土保持效益, 获得不同植被恢复措施的综合调控效应, 筛选最优措施。 [方法] 在福建省长汀县布设鱼鳞坑+阔叶树补植(Z1)、草灌乔立体混交(Z2)、条沟播草+阔叶树补植(Z3)、密穴播草(Z4)和等高草灌带(Z5)5种植被恢复措施, 以马尾松纯林(CK)为对照, 分析不同措施下土壤性质的差异, 并对各措施的土壤质量和坡面减流减沙效益进行综合评估。 [结果] 1) 各类植被恢复措施显著改善土壤理化性质, 水分体积分数、孔隙度及平均重量直径(MWD)较CK分别提升16.91%~37.97%、4.56%~22.81%和25.68%~59.62%, 土壤体积质量、崩解系数和可蚀性K值分别降低3.74%~18.69%、32.85%~63.41%和10.35%~17.27%。 2) 土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷和速效钾质量分数较CK分别提升129.49%~321.46%、89.47%~137.99%、22.70%~78.09%、118.08%~190.88%和3.88%~166.01%, 并具有明显的表层集聚效应, 全钾质量分数变化无明显规律。 3) 土壤质量指数(SQI)评价表现为Z1(0.746)>Z3(0.717)>Z2(0.697)>Z5(0.552)>Z4(0.551)>CK(0.280)。 4) 各类植被恢复措施均具有较好的减流效益(27.93%~39.02%)和减沙效益(75.86%~82.87%), 其中Z3措施效果最优。 [结论] 不同植被恢复措施均可改善土壤理化性质, 提高土壤综合质量, 有效降低地表径流与坡面泥沙流失。综合评判以Z3措施在土壤改良及水土保持方面表现最优, Z1和Z2次之。研究结果为红壤侵蚀退化地区水土保持措施的优化配置提供指导, 并为水土流失防治策略的制定与实施提供依据。

关键词: 侵蚀退化地; 植被恢复措施; 土壤理化性质; 土壤质量综合评价

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0175-11

Regulation Effects of Vegetation Restoration Measures on Soil and Water Conservation in Eroded and Degraded Granite Red Soil Areas

ZHOU Qin^{1,3}, WU Jieling^{1,3}, LIU Mengying², HUANG Shaoyan^{1,3}, ZHA Xuan^{1,3}

(1. School of Geographical Sciences, School of Carbon Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2. Nanping Rural Revitalization Service Center, Nanping, Fujian 354200, China; 3. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different vegetation restoration measures on improving soil physicochemical properties and soil-water conservation characteristics in granite red soil erosion-degraded areas of southern China, evaluate their comprehensive regulatory benefits, and identify optimal restoration measures. [Methods] The study selected five vegetation restoration measures in Changting County, Fujian Province: replanting broadleaf tree + fish scale pit (Z1), grass-shrub-arbor mixture (Z2), replanting broadleaf tree + strip ditch sowing grass (Z3), dense-hole grass sowing (Z4), and contour grass filling belt

收稿日期: 2025-08-04

修回日期: 2025-09-10

录用日期: 2025-09-17

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(42377326); 福建水利科技项目(MSK202308); 国家重点研发计划项目(2017YFC05054)

第一作者: 周琴(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: 3313497482@qq.com

通信作者: 查轩(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

(Z5), with *Pinus massoniana* forest (CK) as the control. Differences in soil physicochemical properties among treatments were analyzed, and a comprehensive assessment of soil quality and slope runoff-sediment reduction benefits was conducted for each measure. [Results] 1) All vegetation restoration measures significantly improved soil physicochemical properties. Compared with CK, they increased volumetric water content, porosity, and mean weight diameter (MWD) by 16.91%–37.97%, 4.56%–22.81%, and 25.68%–59.62%, respectively, while reducing bulk density, disintegration coefficient, and erodibility *K* value by 3.74%–18.69%, 32.85%–63.41%, and 10.35%–17.27%, respectively. 2) Soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, and available potassium contents increased by 129.49%–321.46%, 89.47%–137.99%, 22.70%–78.09%, 118.08%–190.88%, and 3.88%–166.01% compared to CK, respectively, exhibiting significant surface layer accumulation effects. However, no obvious pattern was observed in the variation of total potassium content. 3) Soil Quality Index (SQI) evaluation showed the following order: Z1 (0.746) > Z3 (0.717) > Z2 (0.697) > Z5 (0.552) > Z4 (0.551) > CK (0.280). 4) The vegetation restoration measures exhibited significant runoff reduction (27.93%–39.02%) and sediment reduction benefits (75.86%–82.87%), among which the Z3 measure demonstrated the optimal effect. [Conclusion] All vegetation restoration measures improved soil physicochemical properties, enhanced overall soil quality, and effectively reduced surface runoff and slope sediment loss. Comprehensive assessment demonstrated that the Z3 measure delivered the best performance in soil improvement and soil-water conservation, followed by Z1 and Z2. The research findings provide guidance for the optimal allocation of soil-water conservation measures in red soil erosion-degraded areas and offer a scientific basis for formulating and implementing soil erosion prevention strategies.

Keywords: erosion and degradation land; vegetation restoration measures; soil physicochemical properties; comprehensive evaluation of soil quality

Received: 2025-08-04

Revised: 2025-09-10

Accepted: 2025-09-17

Online(www.cnki.net): 2025-12-23

土壤侵蚀是造成全球土地退化的主要形式之一,广泛发生在坡耕地、退化林地及生态脆弱区,严重威胁生态系统结构与功能的稳定性,制约区域可持续发展^[1]。花岗岩红壤区风化壳结构疏松,抗冲刷能力弱^[2],强降雨集中,加上人为扰动,导致该地区土壤侵蚀问题尤为突出,主要表现为水土流失加剧和土壤质量下降等。

福建省长汀县作为南方红壤区土壤侵蚀治理的典范,自 20 世纪 40 年代起开展系统化水土保持实践,创新构建了以“工程固土+生物提质”为特征的“长汀模式”^[3],推动水土流失率持续下降,从 1985 年的 31.50% 逐步降低至 2024 年的 6.57%,成为全国生态修复的典范。然而,随着治理工程进入提质阶段,以马尾松(*Pinus massoniana*)单一林分为主导的恢复模式逐渐暴露出矛盾:破碎化侵蚀斑块导致地表径流路径复杂化,加剧治理难度^[4],人工林生态系统稳定性持续降低^[5],土壤质量退化风险显著增加,这些问题的交织正在动摇“长汀模式”的可持续性基础。植被是土壤侵蚀过程的关键调控因子,近年来植被恢复被广泛应用于水土保持与生态恢复中^[6],其在改善土壤结构^[7]、提高持水抗蚀能力、控制地表径流和

泥沙流失^[8]等方面作用显著。有研究^[9]表明,部分恢复工程在短期取得初步成效后常陷入“治理-退化”循环,其核心问题在于植被恢复未能有效同步提升土壤质量,导致生态系统服务功能恢复不稳定。因此,深入研究不同植被恢复措施对土壤质量的改善情况及减流减沙效益,已成为当前南方红壤区生态治理面临的关键科学问题。

土壤质量是表征土壤生态系统服务功能的关键指标^[10],近年来土壤质量研究重点逐渐从侧重土壤固有属性转向探讨不同管理措施对土壤质量的动态影响。例如,田英等^[11]研究表明,不同人工林栽植地土壤质量均有所提升;张宇恒等^[12]通过比较 4 种治理模式发现,乔草混交模式的土壤质量最优;李奇奇等^[13]研究表明,等高反坡阶(CRT)工程能显著提高坡耕地土壤质量。目前,针对花岗岩红壤区不同植被恢复措施对土壤理化特性调控作用的系统评估仍较薄弱,且大多研究集中于单一指标或短期响应^[13-16],缺乏多维度、多功能综合评价,限制了科学指导生态修复实践的能力。基于此,本研究以福建省长汀县花岗岩红壤侵蚀退化地为研究区域,选取南方红壤区在长期实践中实施效果较好、恢复年限为 9 a

的5种典型植被恢复措施,系统评估不同植被恢复措施对土壤理化性质的改良效果,基于土壤质量指数法构建综合评价体系,结合减流减沙效益分析,识别最优植被恢复模式。研究结果旨在为南方红壤区侵蚀退化地的植被恢复提供科学依据,并为优化水土保持措施与促进生态系统可持续发展提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长汀县(25°18'40"~26°02'05"N,116°00'45"~116°39'20"E)位于武夷山脉东段南麓,是福建省西部典型的生态敏感区。以花岗岩风化侵蚀地貌为主,具有显著的亚热带季风气候特征,降水分布不均且集中于3—9月,多年平均降水量1712.7 mm,年平均径流深达470 mm。属典型南方花岗岩红壤区,土壤贫瘠,抗蚀性差且酸性强。原生亚热带常绿阔叶林

植被因受长期人为干扰已严重退化,现植被覆盖以人工马尾松纯林占优势。

1.2 样地设置与样品采集

1.2.1 样地设置 在福建省长汀县河田镇设立野外定位观测小区,共设置5种典型花岗岩红壤侵蚀退化地植被恢复措施,分别为鱼鳞坑+阔叶树补植(Z1)、草灌乔立体混交(Z2)、条沟播草+阔叶树补植(Z3)、密穴播草(Z4)和等高草灌带(Z5),以马尾松纯林为对照样地(CK),每组处理设置2个独立重复。于2015年初完成定位观测小区建设,共设置12个20 m(坡长)×5 m(坡宽)的矩形样地,坡向一致且坡度统一为15°。各试验小区在土壤性质、水热条件及植被生长特征等方面具有较高的一致性,通过水泥围堰进行物理隔离,以确保试验数据的独立性和可比性。不同植被恢复措施样地的实施情况见表1。

表1 各样地基本情况

Table 1 Basic information of different sampling plots

样地编号	植被及种植方式	作用机制
Z1	沿等高线挖“品”字形鱼鳞坑,深30 cm,半径50 cm,坑内播撒105 kg/hm ² 宽叶雀稗(<i>Paspalum wettsteinii</i>)并补植木荷(<i>Schima superba</i>)或枫香(<i>Liquidambar formosana</i>)	鱼鳞坑集水+乔草植被结构优化
Z2	按底宽30 cm、面宽50 cm、深40 cm挖种植坑,种植600株/hm ² 木荷、枫香等乔木,300株/hm ² 黄栀子(<i>Gardenia jasminoides</i> Ellis)等灌木,种105 kg/hm ² 宽叶雀稗草籽	种植穴蓄水+垂直生态位互补
Z3	等高线按“品”字排列,按3000 cm/hm ² 间距离挖40条水平沟,种植木荷、枫香等乔木,胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)、黄栀子等灌木,播宽叶雀稗	沟体分散径流+乔草复合层截留泥沙
Z4	按面宽40 cm、深30 cm、底宽30 cm,行距170 cm挖栽植坑,规划密度3450坑/hm ² ,每坑定植胡枝子1株,坑内播宽叶雀稗草籽	草本覆盖降低雨滴击溅,根系固结浅层土壤
Z5	沿等高线挖水平沟,沟内种植胡枝子、黄栀子沟埂及沟内播种宽叶雀稗,坡面播种105 kg/hm ² 宽叶雀稗草籽或45 kg/hm ² 百喜草(<i>Paspalum notatum</i>)草籽	沟体截流+植物根系固土,降低侵蚀能力
CK	维持马尾松林原始侵蚀地貌,未实施任何植被恢复措施,作为试验对照组	未实施任何措施,仅作为侵蚀基准参照

1.2.2 样品采集 2023年12月,在各样地按照随机抽样原则,依据“S”形布点法选取5个采样点进行采样。使用内径5 cm的不锈钢土钻钻取0~10、10~20、20~40 cm 3层土样。每层土样混合均匀后,通过四分法分取约1 kg样品,标记后置于避光通风处自然风干,用于土壤理化性质分析。同步采用环刀法(100 cm³)采集各土层土壤,用于测定土壤水分体积分数、土壤体积质量和孔隙度;采集原状土样进行室内崩解试验,各指标采样及测定均进行3组重复。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤理化性质测定 有机碳及全氮通过元素分析仪检测,土壤全磷和速效磷采用流动分析仪测定,全钾和速效钾采用火焰光度计测定。土壤水分体积分数采用烘箱干燥法获取,土壤体积质量与孔

隙度参数采用环刀法测定。针对土壤抗侵蚀能力,引入EPIC模型^[17]进行可蚀性数值计算;借助激光粒度仪对微团聚体结构进行测定,其稳定性通过平均重量直径(MWD)进行量化。计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i \bar{X}_i \quad (1)$$

式中: W_i 为第*i*级团聚体的质量分数,%; \bar{X}_i 为第*i*级团聚体的平均直径,mm。

土壤崩解系数依据陈东等^[18]改进的原状土崩解法测定。计算公式为:

$$P(T_x) = 1 - 1.6061 \times \frac{M_s + M(x) - M(T_x)}{M_s} \quad (2)$$

式中: $P(T_x)$ 为土壤崩解系数; M_s 为土壤样品初始质量,g; $M(x)$ 为空崩解盒浸水后质量,g; $M(T_x)$ 为土样未崩解时崩解盒与土样总质量,g。

1.3.2 土壤质量综合评价 采用土壤质量指数法 (soil quality index, SQI) 评价土壤质量^[12], 通过选取关键土壤特性指标构建评价体系, 利用隶属度函数对原始数据进行标准化处理以消除量纲差异, 对表征土壤退化风险的指标选用降型隶属度函数计算,

$$F(x) = \begin{cases} 1.0 & x > x_2 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0.1 & x > x_2 \\ 0.9(x_2 - x)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F(x)$ 为第 i 项指标的隶属度值; x_1, x_2 为第 i 项指标的下限阈值和上限阈值。

$$SQI = \sum_{i=1}^n PC_i \times F(x_i) \quad (5)$$

式中: PC_i 为第 i 项指标的主成分复合权重; n 为评价体系包含的指标总数。

1.3.3 降雨与径流泥沙观测 利用布设于试验场的 RG3-M 型雨量计实测降雨数据, 以 24 h 累计降雨量为基准划分为: 小雨 (0.1~10 mm)、中雨 (10~25 mm)、大雨 (25~50 mm) 和暴雨 (>50 mm)。

各径流小区配置 5 m³ 梯形径流池, 配备水位计, 通过水位高度计算其径流量。径流池底泥样本经 105 °C 恒温烘箱烘干至恒重, 通过质量差值确定泥沙产量。计算方法为:

$$M = \frac{M_0 - M_{si}}{M_0} \times 100\% \quad (6)$$

$$S = \frac{S_0 - S_{si}}{S_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: M 为减流率, %; M_0 为对照小区径流量, L; M_{si} 为各措施小区径流量, L; S 为减沙率, %; S_0 为对照小区泥沙流失量, kg; S_{si} 为各措施小区泥沙流失量, kg。

1.4 数据分析

利用 Excel 2019 软件进行异常值筛查、数据标准化和隶属度计算等数据预处理; 运用 SPSS 29 软件进行单因素方差分析、主成分分析和函数拟合, 采用 Duncan 多重范围检验法进行显著性判定; 使用 R 4.3.2 软件进行相关性分析; 通过 Origin Pro 2025 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复措施对土壤物理性质的调控

不同植被恢复措施极大地改善了土壤物理性质, 在不同措施中表现出明显的变化趋势 (图 1)。

Z3 样地的最高水分体积分数为 24.13%, CK 最低为 17.49%。与 CK 相比, Z1、Z2、Z3 和 Z4 样地的水分体积分数分别提高 16.91%、23.31%、37.97% 和 31.14%。孔隙度分析表明, Z1、Z2、Z3、Z4 和 Z5 样地

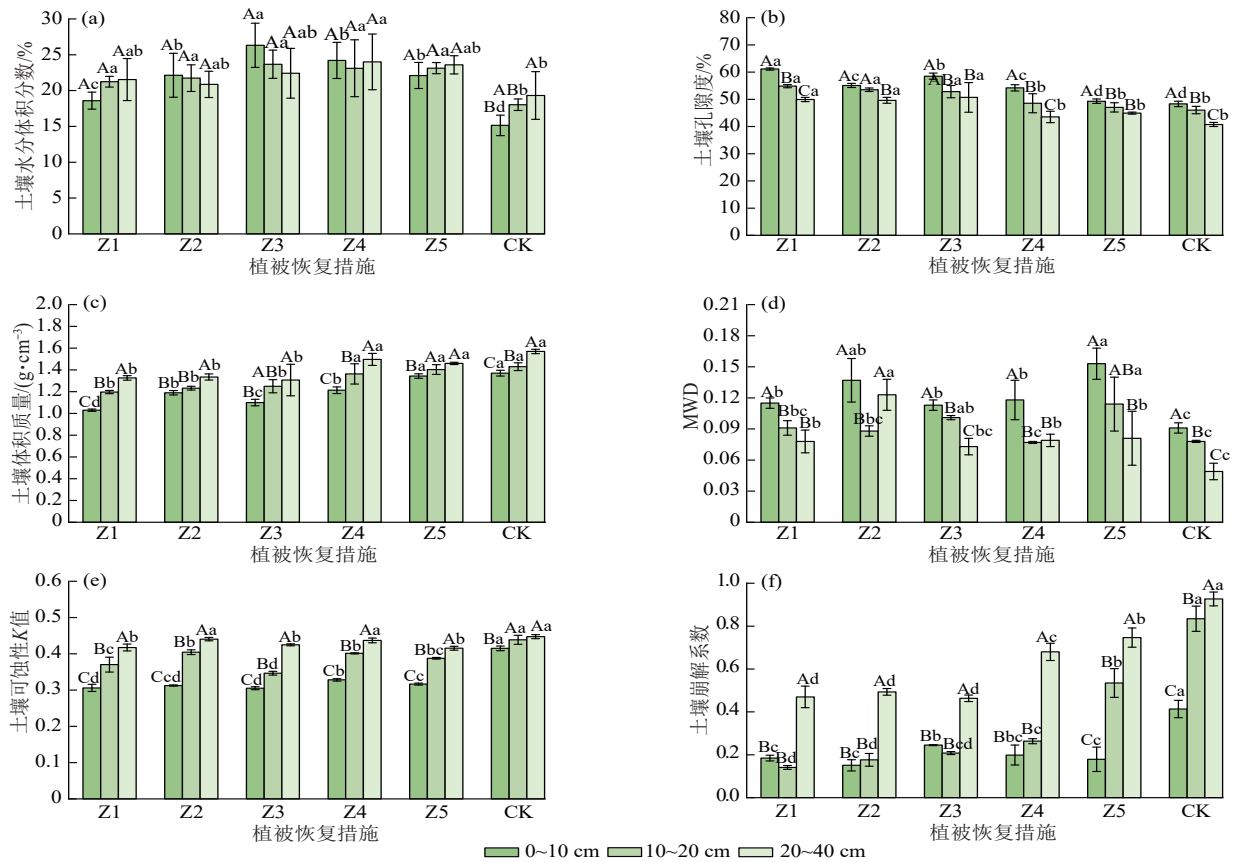
其余指标选用升型隶属函数进行隶属度计算; 并基于主成分分析 (PCA) 的特征值贡献率确定各指标权重, 权重等于各指标的公因子方差占总方差的比值^[11]。最终采用线性加权模型计算得到土壤质量指数。

较 CK 平均提升幅度分别为 22.81%、17.12%、19.92%、8.28% 和 4.56%, 其中 Z1、Z4 和 CK 样地不同土层之间均表现出显著差异性 ($p < 0.05$)。土壤体积质量随土层深度增加, 在 0~10 cm 土层中, Z1 (1.03 g/cm³) 和 Z3 (1.11 g/cm³) 土壤体积质量最低, 较 CK (1.37 g/cm³) 降幅最大 (24.81% 和 18.97%); 10~20 cm 土层中, Z1、Z2、Z3 样地较 CK (1.43 g/cm³) 分别显著降低 16.31%、13.84% 和 12.59% ($p < 0.05$); 20~40 cm 土层中, Z3 样地土壤体积质量最低, 较 CK 显著降低 16.77% ($p < 0.05$)。Z1、Z2 和 Z3 样地间无显著差异, 表明草本和木本植物组合的根系穿透作用对降低土壤体积质量的贡献率更高。

土壤抗蚀性指标呈显著改善趋势。措施样地 MWD 为 0.09~0.12 mm, 较 CK 增加 25.68%~59.62%。各措施样地 0~10、10~20 cm 土层的土壤可蚀性 K 值相较于 CK 分别显著降低 20.91%~26.51%、7.79%~21.02% ($p < 0.05$)。Z1 和 Z2 样地土壤崩解系数最低 (0.26 和 0.27), 较 CK 分别降低 63.41% 和 62.26%。抗蚀性指标表明, 植被恢复能够通过增强团聚体稳定性和降低崩解速率, 提升土壤的抗侵蚀能力。

2.2 不同植被恢复措施对土壤化学性质的调控

不同植被恢复措施对土壤养分特征具有改良效应 (图 2)。各措施下土壤有机碳质量分数均显著高于 CK (3.30 g/kg), 为 CK 的 2.29~4.21 倍, 且土层及措施间差异显著 ($p < 0.05$), Z3 样地土壤有机碳质量分数最高 (13.90 g/kg), 较 Z1、Z2、Z4 和 Z5 样地分别显著提升 19.25%、16.23%、83.65% 和 34.52% ($p < 0.05$)。措施样地全氮质量分数为 0.54~0.68 g/kg, 较 CK 提升 89.47%~137.99%。CK 的土壤全磷和速效磷质量分数最低, 分别为 0.09、0.69 mg/kg, 相对应的 Z1 样地措施土壤全磷和速效磷的质量分数最高, 较 CK 分别提升 78.09% 和 190.88%。Z1、Z2 和 Z3 样地土壤全钾质量分数分别为 8.57、11.02、9.43 g/kg, 较 CK 分别显著提升 54.08%、98.05% 和 69.48% ($p < 0.05$), Z4、Z5 与 CK 无显著差异 ($p > 0.05$)。



注:图柱上方不同大写字母表示同一措施样地不同土层间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一土层不同措施样地间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同植被恢复措施土壤物理性质特征

Fig. 1 Characteristics of soil physical properties under different vegetation restoration measures

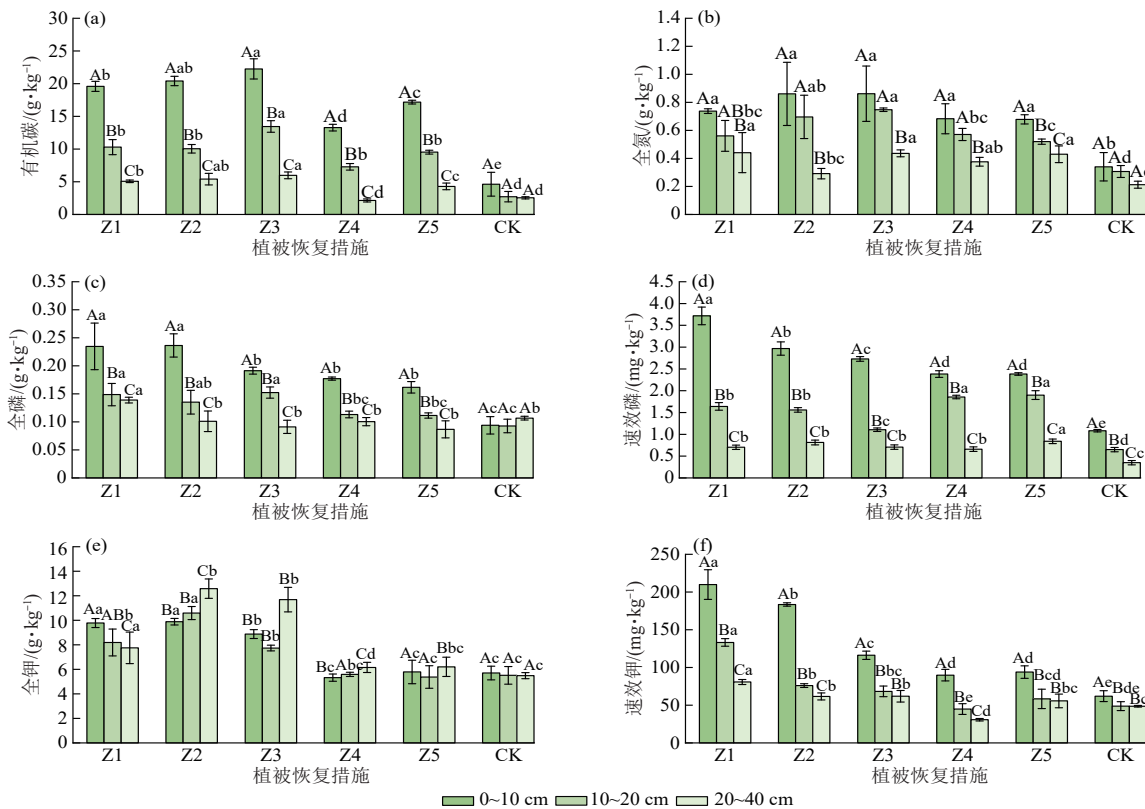


图 2 不同植被恢复措施土壤化学性质特征

Fig. 2 Characteristics of soil chemical properties under different vegetation restoration measures

土壤速效钾质量分数对植被恢复措施的响应则更为敏感,各土层平均值(55.16~141.26 mg/kg)为CK(53.10 mg/kg)的1.04~2.66倍。除全钾外,其余养分质量分数均随土层的加深呈递减趋势,且表层集聚效应明显。

2.3 不同植被恢复措施的土壤质量综合评价

针对南方红壤水土流失区治理的多元指标评价需求,考虑现有研究中土壤指标选取的频度与代表性,本研究构建了包含土壤物理特性、化学特性及稳定性指标的12项核心指标作为土壤质量评价的总数据集进行主成分分析。统计检验结果表明,KMO检验值达0.807>0.5,Bartlett球形检验达到极显著水平($p<0.001$),满足主成分分析的前提条件。依据特征值>1标准,最终提取前2个主成分PC1和PC2,其方差贡献率分别为67.77%和11.21%,累计解释率达78.97%。表明所选主成分能有效解释原始变量的大部分变异信息,基于此结果评价不同植被恢复措施的土壤综合质量具有可靠性。由表2和图3可知,PC1表征土壤综合肥力,PC2则表征侵蚀风险。其中,可蚀性(0.099)为土壤质量的重要风险指标,孔隙度(0.094)、有机碳(0.095)、全磷(0.094)及全钾(0.090)具有高复合权重,是构建土壤质量指数的核心参数。

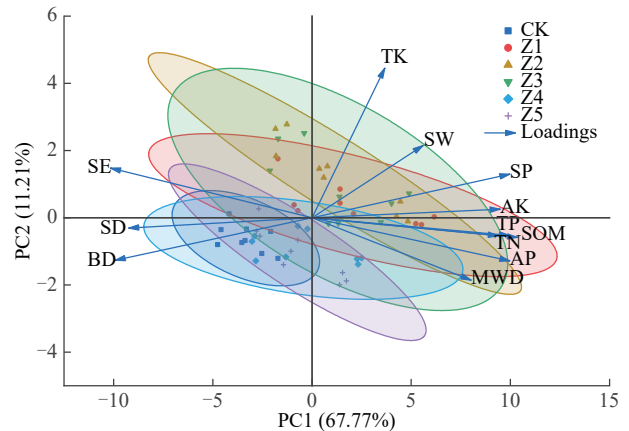
表2 各指标载荷矩阵及复合权重

Table 2 The load matrix and composite weights of each index

土壤质量指标	载荷矩阵		公因子方差	复合权重
	主成分1	主成分2		
有机碳	0.944	-0.102	0.902	0.095
可蚀性	-0.920	0.293	0.937	0.099
全磷	0.900	-0.252	0.887	0.094
速效磷	0.928	-0.083	0.832	0.088
速效钾	0.871	0.069	0.748	0.079
孔隙度	0.893	0.284	0.887	0.094
全氮	0.831	-0.110	0.742	0.078
崩解系数	-0.814	-0.590	0.712	0.075
MWD	0.679	-0.436	0.662	0.070
全钾	0.271	0.872	0.848	0.090
水分体积分数	0.511	0.403	0.431	0.046
土壤体积质量	-0.893	-0.285	0.875	0.093
因子特征值	8.131	1.345		
方差贡献率/%	67.765	11.206		
累积贡献率/%	70.822	78.972		

参照现行广泛使用的分级标准^[11],将土壤质量指数(SQI)划分为极优(0.8<SQI≤1.0)、优(0.6<SQI≤0.8)、良(0.4<SQI≤0.6)、差(0.2<SQI≤0.4)

和极差(0<SQI≤0.2)5个等级。土壤质量评价(表3)表明,Z1、Z3和Z2样地土壤质量为优,其SQI值分别为0.746、0.717和0.697,以Z1样地最高;Z4与Z5样地为良,SQI值分别为0.552和0.551;CK土壤质量为差。综上可知,现行植被恢复措施显著提升土壤质量,其中Z1、Z3和Z2样地效果最优。



注:SP为土壤孔隙度;BD为土壤体积质量;SW为土壤水分体积分数;MWD为微团聚体平均直径;SD为崩解系数;SE为可蚀性;SOM为有机碳;TN为全氮;TP为全磷;AP为速效磷;TK为全钾;AK为速效钾。下同。

图3 不同植被恢复措施土壤理化性质的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of soil physicochemical properties for vegetation restoration measures

表3 土壤综合质量评价

Table 3 Comprehensive quality evaluation of soil

综合评价	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	CK
土壤综合质量得分	0.746	0.697	0.717	0.552	0.551	0.280
土壤综合质量等级	优	优	优	良	良	差

2.4 不同植被恢复措施对坡面产流产沙的调控效应

2.4.1 水沙对降雨的响应机制 基于2023年36场典型次降雨事件的观测数据(其中小雨5场,中雨17场,大雨10场,暴雨4场),探究植被恢复措施下坡面产流与输沙对降雨的响应规律。由图4和图5可知,降雨量(x)与径流量(y)、产沙量(y)均呈幂函数关系($y=ax^b$)。当降雨量逐渐增大时,各措施样地的径流量增长呈明显的非线性减缓趋势。在小雨至大雨条件下,植被冠层和枯落物层能有效截留降水,产生径流受到明显抑制;在暴雨条件下,植被结构仍可通过延长径流路径等方式削弱径流能量。产沙量在整个观测雨量范围内均保持在较低水平,未随降雨量的增加而显著增加。相比之下,对对照样地的降雨量与径流量、产沙量均呈二次函数关系($y=ax^2+bx+c$, R^2 分别为0.71和0.78),显示其径流量和泥沙量对降雨量的增加响应更为敏感。尤其在大雨及暴雨条件下,产流率与产沙量均呈指数级增长。归因于对对照样地表覆盖率低,降雨量增加导致地表径流冲刷加剧,沟壑发育与坍塌引发侵蚀加剧。

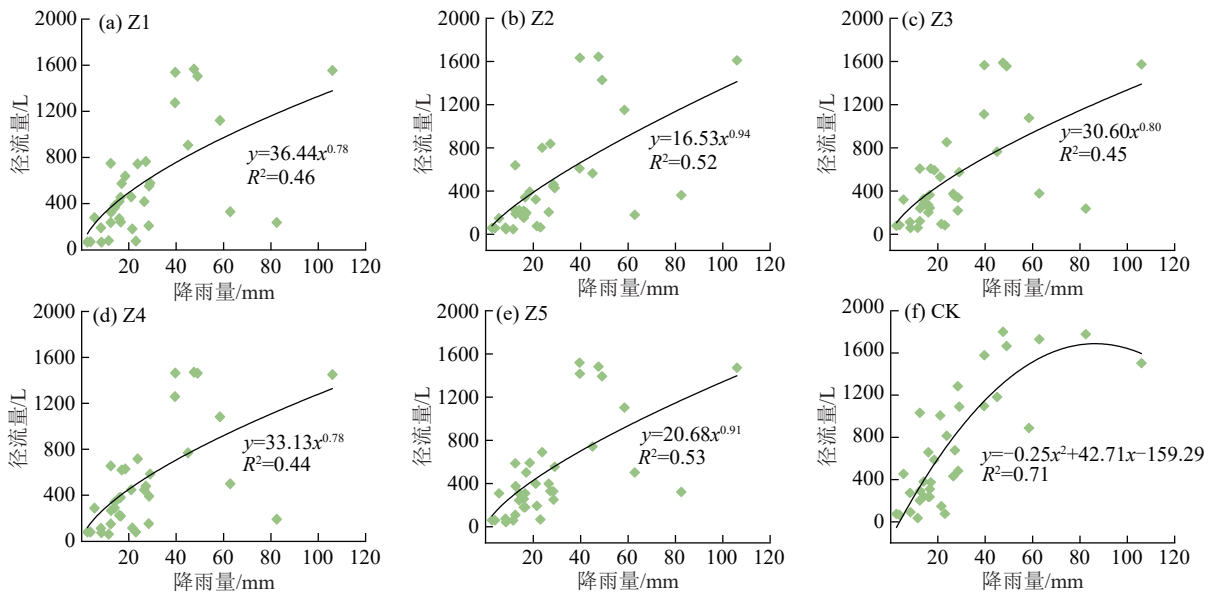


图 4 不同植被恢复措施的产流特征

Fig. 4 Runoff generation characteristics of different vegetation restoration measures

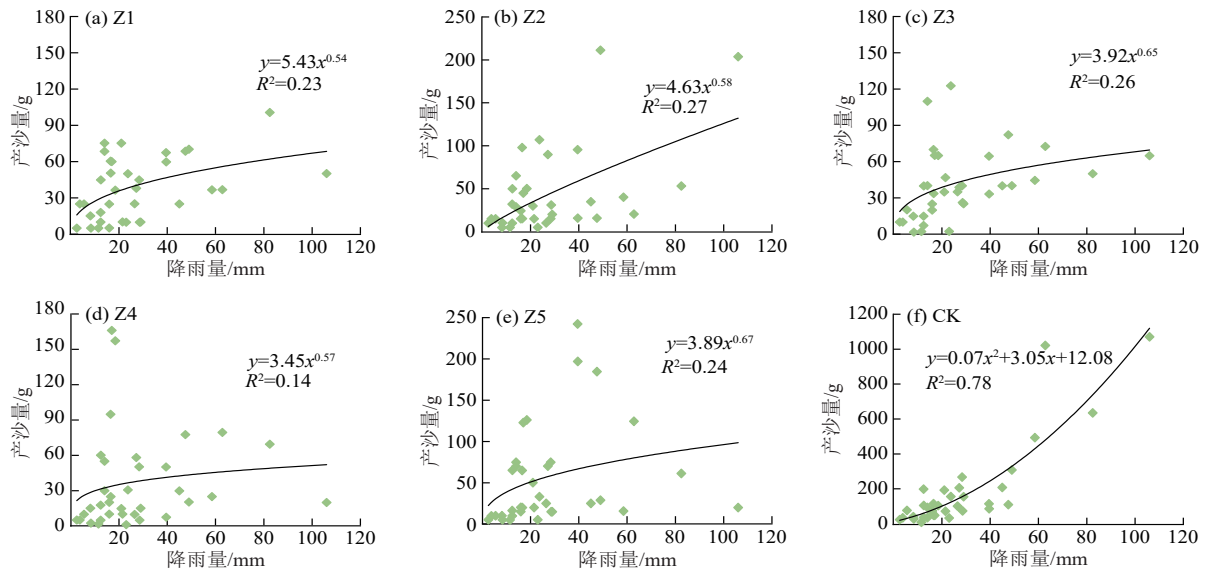


图 5 不同植被恢复措施的产沙特征

Fig. 5 Sediment yield characteristics of different vegetation restoration measures

2.4.2 植被恢复措施的减流减沙效益 由图6可知,减流效益以Z3样地最高,达39.02%,Z2和Z1样地次之,分别为38.76%和35.07%。各措施减沙效益更为显著,均达到75%以上,且植被结构差异对减沙效果的影响较小。其中Z3样地效益最高,达82.87%;Z4和Z1样地分别为81.86%和78.97%;Z2与Z5样地效益略低,分别为77.41%和75.86%,但仍保持较高水平。综上可知,所有植被恢复措施均可有效减少地表径流和泥沙流失。Z3样地效应最优,其乔灌草复合结构为区域生态恢复提供重要参考。

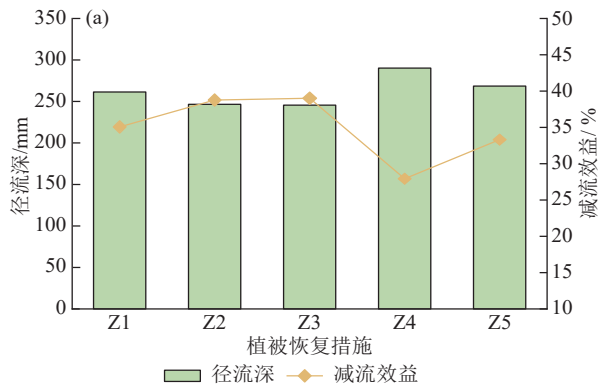
3 讨论

3.1 植被恢复措施对土壤理化性质的调控

土壤物理性质的改善和养分元素的积累是指示

植被群落演替的关键指标,并与植物群落结构的稳定性及功能的优化呈显著协同关系^[14]。植被与土壤间的反馈作用是驱动生态系统演替的核心机制。本研究得出,合理的植被恢复措施能够有效提高土壤含水率,增加孔隙度,降低土壤体积质量,提升土壤结构稳定性,增强抗侵蚀能力,该结果与李鹏等^[19]、王艳琪等^[20]研究结论一致。从图7可以看出,孔隙度与土壤体积质量、土壤体积质量与水分体积分率呈极显著负相关($p<0.001$),印证植物根系通过物理穿透与伸展推动根孔网络的形成,促进水分下渗,增加大孔隙比例,进而降低土壤体积质量,增强土壤持水能力。在此基础上,根系分泌的有机物质通过增强土壤颗粒间黏结力促进土壤团聚体形成^[21],加上植物生长持续输入的有机质,耦合微生物代谢产生的多糖类物质,

共同强化团聚体的胶结强度^[22-23],进而提高MWD,最终降低土壤的可蚀性与崩解速率。在Z1、Z2和Z3样地中,宽叶雀稗等浅根系草本通过分泌物胶结细颗粒促进表土团聚体形成,增强抗蚀性;胡枝子和黄栀子等强穿透性灌木根系侧向扩展,有效破碎中层土壤



板结层,优化孔隙连通性,其凋落物分解持续供给腐殖质以激活微生物活动;枫香和木荷等深根乔木则构建深层水分养分输导通道,提升土壤水分体积分数及孔隙度。相较之下,Z4和Z5样地因缺乏灌木与乔木的生态位互补,土壤结构改良相对有限。

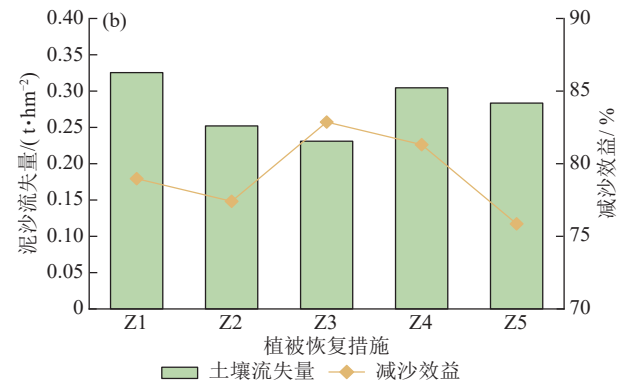
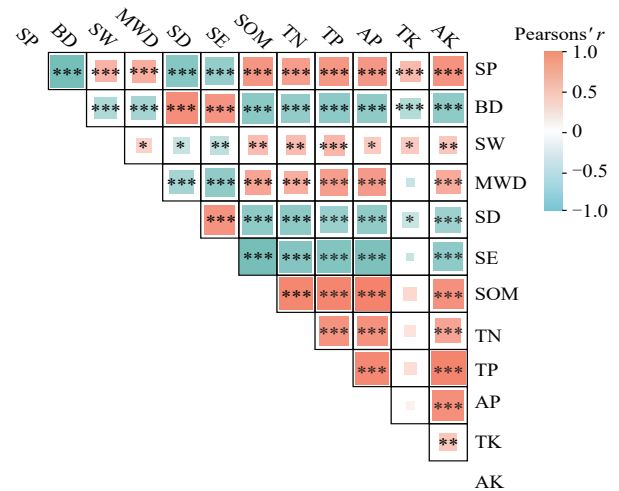


图 6 不同植被恢复措施减流减沙效益

Fig. 6 The benefit of runoff reduction and sediment reduction under different vegetation restorations

不同植被恢复措施下土壤养分存在差异,其根本原因在于植物物种组成与群落结构层次的差异性。有研究^[19-20,24]表明,植被地下生物量是土壤有机碳与全氮积累的核心驱动力,其凋落物输入则构成有机质和全氮的主要来源,并调控养分积累效率,土壤磷库和有效性受地下生物量与黏粒的协同调控。本研究中土壤有机碳、全氮、全磷及速效磷呈极显著正相关($p < 0.001$)(图 7),该协同积累模式反映生物量和凋落物的核心作用,在驱动碳氮积累的同时,通过缓解黏粒的固磷效应促进磷素的有效积累。本研究中 5 种样地土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷及速效钾质量分数较 CK 均大幅提升,与张跃进等^[25]提出的植被恢复提升土壤养分水平的结论一致。其中,Z3 样地土壤有机碳(13.90 g/kg)和全氮(0.68 g/kg)各土层平均质量分数最高,分别为 CK 的 4.21、2.38 倍,Z1 样地全磷(0.17 g/kg)和速效磷(2.02 mg/kg)质量分数则在各措施中最高。归因于措施 Z3 和 Z1 样地中,在工程措施方面通过挖条沟和挖鱼鳞坑改变微地形,促进土壤碳、氮、磷的积累;在生物措施方面通过植被结构调整提高植被覆盖度、物种丰富度及地下生物量。一方面,木荷、枫香等阔叶树种凋落物输入量大且分解缓慢,草本凋落物分解快速,二者形成互补;另一方面,植被地下生物量增加促使其释放更多分泌物,从而强化土壤碳氮磷的积累。CK 样地,马尾松仍为优势树种,植被组成单一,且松针较硬具有较高的纤维含量和较慢的分解速率,因此其养分质量分数较低。田培等^[26]的研究指出,植被通过根系分泌和凋落物输入可改善土壤养分循环,与本研究化学性质改善的驱动机制相吻合。综合来看,复

合型恢复模式通过植物功能群互补实现养分均衡积累,需根据治理目标权衡选择。



注: *表示在 0.05 水平显著相关; **表示在 0.01 水平显著相关; ***表示在 0.001 水平显著相关。

图 7 土壤理化性质相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of soil physical and chemical properties

本研究中,除土壤全钾外土壤养分指标呈现表层集聚效应,与 SONG 等^[27]在研究三峡库区不同土地管理措施下土壤养分的分异行为时所得出的结论相符。土壤养分的富集主要源于 2 个关键过程,表层疏松多孔结构对养分的物理截留,以及微生物分解凋落物与有机碎屑释放养分的持续输入。相比之下,随着土壤剖面加深,植物根系与生物量减少,深层土壤养分主要依赖根系分泌物与微生物活动供给,导致底土层养分贫瘠;而全钾缺乏表层集聚的机制则在于其以矿物钾形态赋存,化学性质稳定且淋失风险低,其质量分数主要受母岩风化物组成控制。

3.2 植被恢复措施综合评价与模式优选

在南方红壤侵蚀区,水土保持工作面临提质增效与高质量发展的迫切需求。然而,传统评价标准存在局限。主要体现在过度侧重土壤质量提升可能筛选出长期侵蚀防控效能不足的措施;仅强调减流减沙效益,则忽视了措施对生态恢复的可持续性的影响。本研究创新性融合土壤质量提升与减流减沙效益双维评价体系,系统筛选适宜花岗岩侵蚀退化区的植被恢复措施,以协同实现水土保持与生态恢复目标。

本研究实施的植被恢复措施,通过优化植被结构配置与微地形改造,促进土壤理化性质的协同改善,进而提升土壤质量,SQI较CK显著提升($p < 0.05$)。构建土壤质量指数(SQI)时,纳入总数据集(TDS)指标有助于全面表征土壤质量的多维特征。目前国内外土壤质量评价研究主要基于常规物理和化学指标。本研究所选取的12个指标,其中8个指标使用频率超过40%,且土壤体积质量、有机碳、全氮、速效磷和速效钾的使用频率超过70%,所选指标具有较好的代表性^[10]。主成分分析表明,有机碳、孔隙度、全钾和全磷在南方红壤区土壤质量评价中具有高载荷和高权重,被筛选为关键指标。然而,不同土壤类型区的核心评价指标存在差异。南方红壤区,强淋溶作用导致盐基离子(尤其 K^+)严重流失,加之酸性土壤普遍存在的有机质和磷缺乏问题,使全磷与有机碳成为关键,高黏粒特性则依赖孔隙度维持结构通透性。相较之下,黄土以均质粉砂为主,抗蚀性弱且碳酸钙对磷固定作用强,核心指标聚焦粉粒百分比和全磷^[28];紫色土砾石质量分数高,其质量评价则以土壤体积质量、孔隙度和速效养分为主^[29]。因此,土壤质量评价需结合区域特征以构建具有区域适宜性的评价体系,避免核心指标的机械移植。

在水土保持过程中,植被恢复与工程措施的协同治理是实现坡面减流减沙的有效手段^[30]。本研究表明,植被恢复措施下径流量、产沙量与降雨量之间存在幂函数关系,尽管雨强和雨量的增加可导致径流与产沙的潜在风险,但植被覆盖能有效抑制二者的增长,且对产沙量的抑制效率显著高于对径流量的抑制,揭示植被恢复在控制水土流失方面的关键作用。本研究中Z3样地依托乔灌木垂直结构与径流分散工程的协同作用,实现39.02%的减流率与82.87%的减沙率的双优表现,Z2和Z1措施次之,与短期观测^[14]结论基本一致,证实Z3措施不仅在恢复初期效益最优,且在恢复9a后仍保持高效与稳定。从生物措施角度而言,植被重建通过多重机制减少水流失风险^[31],即根系网络通过物理固结作用增强

土壤抗剪强度,同时其分泌物促进团聚体形成,以提高土壤抗分离能力;凋落物层作为天然屏障,可消减雨滴击溅侵蚀^[32-33],其分解过程释放的有机质与养分进一步改良土壤结构;冠层截留则通过延长降水入渗时间,降低地表径流峰值。从工程措施角度而言,微地形改造可以优化水文过程。首先,鱼鳞坑和水平沟的建立增加地表粗糙度,增强土壤抗冲刷能力并降低径流连通性。相较于原始坡面,能更有效地捕获降水,延缓产流,促进水分入渗,从而提升水土保持效果。其次,微地形的改变减弱水力对凋落物和沉积物的搬运,促进凋落物在地表的积累。

本研究揭示,生物与工程措施相结合能够切实改良土壤结构,提高土壤养分质量分数,增强其稳定性。结合水沙调控机制,可以有效减少坡面径流和泥沙输移,降低土壤侵蚀强度,从而实现水土保持效益的系统性提升。

4 结论

1) 植被恢复措施显著改善土壤理化性质。相较于CK,各措施土壤水分体积分数提升16.91%~37.97%,孔隙度增加4.56%~22.81%,MWD增加25.68%~59.62%,土壤体积质量降低3.74%~18.69%,崩解系数降低32.85%~63.41%,可蚀性降低10.35%~17.27%。土壤化学肥力显著提升($p < 0.05$),有机碳、全氮、全磷、速效磷和速效钾质量分数分别提升129.49%~321.46%、89.47%~137.99%、22.70%~78.09%、118.08%~190.88%和3.88%~166.01%,并具有明显的表层集聚效应,全钾质量分数变化无明显规律。总体而言,植被恢复措施可有效遏制土壤退化趋势。

2) 基于土壤质量指数(SQI)的综合评价表明,植被恢复措施显著提升土壤整体质量。SQI值排序为Z1(0.746,优)>Z3(0.717,优)>Z2(0.697,优)>Z5(0.552,良)>Z4(0.551,良)>CK(0.280,差)。其中Z1、Z2、Z3措施通过植物功能群互补提升土壤综合质量,效果优于Z4和Z5措施。

3) 基于试验小区产流产沙量定位观测表明,5种措施均具有较好的减流(27.93%~39.02%)和减沙效益(75.86%~82.87%)。减流效益表现为Z3>Z2>Z1>Z5>Z4,减沙效益表现为Z3>Z4>Z1>Z2>Z5。

4) 基于土壤质量提升与减流减沙效益综合评估,Z3措施为该区域最具推广价值的水土保持措施,Z1和Z2措施可作为重要的补充和优化选择。Z3措施兼具土壤质量提升、坡面控蚀与长期生态修复潜力,可作为马尾松低效林改造关键技术,建议配套以条沟、鱼鳞坑等微地形为基本控蚀单元,构建草灌乔

立体混交配置体系。该范式不仅有助于缓解马尾松林下水土流失和土壤退化的问题,更指向低效林生态系统功能恢复与提升的可持续路径。未来研究将开展长期定位观测,阐明恢复年限对水土保持效应的驱动机制及措施效果的长期稳定性,以期为南方红壤侵蚀退化地植被恢复措施的精准配置与持续优化提供更坚实的科学依据。

参考文献:

- [1] CHAPPELL A, BALDOCK J, SANDERMAN J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 187-191.
- [2] 陈国光,刘红樱,陈进全,等.福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策[J].*水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 26-35.
CHEN G G, LIU H Y, CHEN J Q, et al. Geological influence factors of soil erosion in Changting County, Fujian Province and the countermeasures to prevent and control [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, 47(6): 26-35.
- [3] 阮伏水,韩永刚.新中国成立以来福建省水土保持工作情况[J].*中国水土保持*, 2019(10): 8-12.
RUAN F S, HAN Y G. Soil and water conservation work of Fujian Province since the founding of the people's republic of China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(10): 8-12.
- [4] 张腾飞,查轩,黄少燕.南方花岗岩红壤侵蚀区马尾松林下流失斑成因及治理技术研究[J].*亚热带水土保持*, 2013, 25(4): 44-48.
ZHANG T F, ZHA X, HUANG S Y. Study on the causes and control techniques of loss spots under *Pinus massoniana* forest in granite red soil erosion area of South China [J]. *Sub-tropical Soil and Water Conservation*, 2013, 25(4): 44-48.
- [5] CAO L X, LIANG Y, WANG Y, et al. Runoff and soil loss from *Pinus massoniana* forest in southern China after simulated rainfall [J]. *Catena*, 2015, 129: 1-8.
- [6] GUO M M, WANG W L, WANG T C, et al. Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(4): 1038-1050.
- [7] 白永会,查轩,吴伟成,等.不同植被恢复模式对退化花岗岩红壤渗透性和持水量的影响[J].*水土保持通报*, 2023, 43(2): 9-15.
BAI Y H, ZHA X, WU W C, et al. Effects of different vegetation restoration types on permeability and water holding capacity of degraded granite red soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2): 9-15.
- [8] 周飞华,查轩,吴洁玲,等.长汀花岗岩红壤不同植草措施对马尾松幼林坡面侵蚀过程影响试验研究[J].*地理研究*, 2023, 42(9): 2520-2537.
ZHOU F H, ZHA X, WU J L, et al. Experimental study on the effects of different grass-planting measures on slope erosion process of young *Pinus massoniana* forest in Changting granite red soil area [J]. *Geographical Research*, 2023, 42(9): 2520-2537.
- [9] 朱鹤健.从长汀水土保持看地理学应用[N].2019-08-22(003).
ZHU H J. The application of geography from the perspective of soil and water conservation in Changting [N]. 2019-08-22(003).
- [10] 李鑫,张文菊,邬磊,等.土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J].*中国农业科学*, 2021, 54(14): 3043-3056.
LI X, ZHANG W J, WU L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [11] 田英,许喆,王娅丽,等.宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价[J].*生态学报*, 2023, 43(4): 1515-1525.
TIAN Y, XU Z, WANG Y L, et al. Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan plain, Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1515-1525.
- [12] 张宇恒,王忠诚,王亚楠,等.基于最小数据集沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量评价[J].*水土保持研究*, 2023, 30(1): 241-247.
ZHANG Y H, WANG Z C, WANG Y N, et al. Soil quality evaluation with different treatment models in Yimeng mountainous area based on minimum data set [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 241-247.
- [13] 李奇奇,徐其静,侯磊,等.基于团聚体性质的等高反坡阶改良土壤结构评价[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(4): 93-101.
LI Q Q, XU Q J, HOU L, et al. Structure evaluation of the improved soil with contour reverse-slope terrace based on soil aggregates property [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(4): 93-101.
- [14] 毛兰花.红壤侵蚀退化马尾松林地不同植被恢复措施的水土保持调控效应[D].福州:福建师范大学, 2022.
MAO L H. Effect of soil and water conservation regulation of different vegetation restoration on red soil region and eroded-degraded *pinus massoniana* woodland [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2022.
- [15] 林根根.不同治理模式对侵蚀退化马尾松林地土壤质量的影响[J].*亚热带水土保持*, 2018, 30(4): 11-16.
LIN G G. Impact of different management patterns on soil quality of eroded degraded *Pinus massoniana* forest [J]. *Sub-tropical Soil and Water Conservation*, 2018, 30(4): 11-16.
- [16] ZHOU F H, ZHA R B, WU Z H, et al. Runoff and sediment reduction effects of different *Paspalum wettsteinii* planting measures on the slopes of Masson pine plantation

- in the red soil region of southern China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2024, 49(13): 4187-4201.
- [17] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
WANG B. Dynamic mechanism of soil erodibility and soil erodibility calculation model[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [18] 陈东, 王道杰, 陈晓艳, 等. 一种测定土壤崩解动态的方法[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1137-1141.
CHEN D, WANG D J, CHEN X Y, et al. Method to show dynamic process of soil disintegration [J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1137-1141.
- [19] 李鹏, 齐实, 张林, 等. 北京山区不同植被恢复类型土壤质量综合评价[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 337-346.
LI P, QI S, ZHANG L, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different vegetation restoration types in mountainous areas of Beijing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 337-346.
- [20] 王艳琪, 白芹菲, 鲍玉海, 等. 黑龙江水库消落带不同植被恢复模式对土壤物理性质的影响[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 281-289.
WANG Y Q, BAI Q F, BAO Y H, et al. Effects of different vegetation restoration patterns on soil physical properties in the riparian zone of the Heilongtan Reservoir [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 281-289.
- [21] 汪建芳. 黄土高原典型草地植物根系几何构型和力学特征及其对土壤分离过程的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2023.
WANG J F. Effects of geometric configuration and mechanical characteristics of typical herbaceous roots systems on soil detachment process on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [22] 周诗祺, 吴洁玲, 吴泽华, 等. 不同植被恢复模式下退化红壤团聚体特征及土壤分离速率的差异[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(3): 868-876.
ZHOU S Q, WU J L, WU Z H, et al. Differences in soil aggregates characteristics and soil detachment rate in degraded red soil among different vegetation restoration modes [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(3): 868-876.
- [23] WANG B, ZHANG G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1567-1576.
- [24] ZHANG B, HU G, XU C H, et al. Effects of natural vegetation restoration on soil physicochemical properties in tropical karst areas, southwestern China [J]. *Forests*, 2024, 15(7): e1270.
- [25] 张跃进, 李沁谊, 王好才, 等. 中国西南喀斯特地区植被自然恢复演替典型群落土壤碳氮储量特征[J]. *林业科学*, 2023, 59(7): 45-53.
ZHANG Y J, LI Q Y, WANG H C, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen storage in typical communities of natural restoration and succession of vegetation in karst areas of southwest China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(7): 45-53.
- [26] 田培, 毛梦培, 潘成忠. 植被调控水土流失机制研究进展及展望[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(1): 131-140.
TIAN P, MAO M P, PAN C Z. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(1): 131-140.
- [27] SONG M X, TANG Q, HAN C, et al. Divergent behaviour of soil nutrients imprinted by different land management practices in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(4): 896-907.
- [28] ZHANG J H, HUANG H Y, DING Q D, et al. Soil quality evaluation and obstacle diagnosis of saline-alkali cultivated land in the Hetao Plain [J]. *Huanjing Kexue*, 2025, 46(4): 2325-2336.
- [29] JIN H F, SHI D M, LOU Y B, et al. Evaluation of the quality of cultivated-layer soil based on different degrees of erosion in sloping farmland with purple soil in China [J]. *Catena*, 2021, 198: e105048.
- [30] GUAN H L, FAN J W. Effects of vegetation restoration on soil quality in fragile karst ecosystems of southwest China [J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9456.
- [31] WU J L, ZHA R B, ZHA X, et al. Regulatory mechanism of soil and water conservation measures on understorey erosion in a subtropical hilly region [J]. *Catena*, 2024, 246: e108427.
- [32] TANG C J, LIU Y, LI Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: e107956.
- [33] LI J M, LI L, WANG Z G, et al. The contributions of the roots, stems, and leaves of three grass species to water erosion reduction on spoil heaps [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: e127003.