

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.012 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.012

吴洁玲,周琴,林强,等.红壤丘陵区植被恢复对土壤分离能力的影响及机制[J].水土保持学报,2025,39(6):205-213.

WU Jieling, ZHOU Qin, LIN Qiang, et al. Influence and mechanisms of vegetation restoration on soil detachment capacity in red soil hilly regions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):205-213.

红壤丘陵区植被恢复对土壤分离能力的影响及机制

吴洁玲^{1,3}, 周琴^{1,3}, 林强², 周诗祺^{1,3}, 习杰^{1,3}, 黄少燕^{1,3}, 查轩^{1,3}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建省水土保持试验站, 福州 350000;

3. 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要: [目的] 植被恢复通过改变土壤特性和根系特征, 显著影响土壤分离能力(SDC), 为明确红壤丘陵区植被恢复对SDC的影响机制。 [方法] 以南方红壤区常见的4种植被恢复措施为研究对象, 通过SDC冲刷试验, 系统评估各措施对SDC的影响, 并探讨土壤性质和根系特征对SDC的调控作用。 [结果] 1) 植被恢复措施均提高土壤有机质、全氮和全钾等养分含量, 降低土壤体积质量、崩解系数和SDC。 2) SDC与土壤含水量、有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾、pH及根重密度呈现显著相关, 其中SDC与pH呈显著正相关($p < 0.05$)。 3) 随机森林分析表明, 不同近地表特征在影响SDC的重要性存在显著差异。其中, 崩解系数、根重密度和有机质含量的权重较高, 累计权重达0.47。 4) 路径分析表明, 崩解系数和有机质与SDC的路径系数极显著, 分别为0.643和-0.552。因此, 建立基于土壤的崩解系数和有机质含量的SDC估算模型, 拟合效果良好($R^2=0.849$, $NSE=0.85$)。 [结论] 植被恢复措施可显著降低红壤区的SDC, 其中崩解系数和土壤有机质是预测红壤区SDC的最佳因子。研究结果为红壤丘陵区的SDC预测提供理论指导, 并为水土流失治理相关的决策提供依据。

关键词: 土壤分离能力; 植被恢复; 土壤侵蚀; 红壤

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0205-09

Influence and Mechanisms of Vegetation Restoration on Soil Detachment Capacity in Red Soil Hilly Regions

WU Jieling^{1,3}, ZHOU Qin^{1,3}, LIN Qiang², ZHOU Shiqi^{1,3}, XI Jie^{1,3}, HUANG Shaoyan^{1,3}, ZHA Xuan^{1,3}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Fujian Experimental Station of Soil and Water Conservation, Fuzhou 350000, China; 3. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-Geographical Process of Ministry-of-Education, Fuzhou 350007, China)

Abstract: [Objective] Vegetation restoration significantly influences soil detachment capacity (SDC) by altering soil properties and root characteristics. This study aims to clarify the mechanisms by which vegetation restoration influences SDC in red soil hilly regions. [Methods] Taking four commonly used vegetation restoration measures in the southern red soil regions as the research objects, soil scouring experiments were conducted to systematically evaluate the effects of different measures on SDC and to investigate the regulatory roles of soil properties and root characteristics on SDC. [Results] 1) All vegetation restoration measures increased the contents of soil organic matter, total nitrogen, and total potassium, while reducing the soil bulk density, disintegration coefficient, and SDC. 2) SDC showed significant correlations with soil water content, soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, available potassium, pH, and root weight density. Notably, SDC was significantly positively correlated with pH ($p < 0.05$). 3) Random forest analysis revealed significant differences in the importance of different near-surface characteristics in influencing SDC. Among them, the disintegration

收稿日期: 2025-04-24 修回日期: 2025-05-26 录用日期: 2025-06-12 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-29

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: 吴洁玲(1998—), 女, 博士研究生, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: jieling2020@163.com

通信作者: 查轩(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

coefficient, root mass, and soil organic matter had relatively high weights, with a cumulative weight of 0.47. 4) Path analysis indicated that the path coefficients of the disintegration coefficient and soil organic matter with SDC were highly significant, at 0.643 and -0.552, respectively. Therefore, an estimation model for SDC was established using the disintegration coefficient and soil organic matter, demonstrating good fitting performance ($R^2=0.849$, $NSE=0.85$). [Conclusion] Vegetation restoration measures can significantly reduce SDC in the red soil regions, with disintegration coefficient and soil organic matter identified as the optimal predictors of SDC. The findings provide theoretical guidance for SDC prediction in red soil hilly regions and offer a scientific basis for decision-making in soil erosion control.

Keywords: soil detachment capacity; vegetation restoration; soil erosion; red soil

Received: 2025-04-24

Revised: 2025-05-26

Accepted: 2025-06-12

Online(www.cnki.net): 2025-07-29

土壤侵蚀是指在外力作用下,土壤颗粒发生分离、输移和沉积的过程^[1]。持续的土壤侵蚀会导致土地退化、严重制约社会经济的发展^[2]。其中,土壤分离是土壤侵蚀的第1个过程,指土壤颗粒在降雨或者集中水流的冲刷下,从土壤表面特定位置移动^[3],这一过程直接决定侵蚀沉积物的数量^[1]。在特定的水力条件下,土壤性质和植物根系等近地表特征参数是影响土壤分离能力(SDC)的关键因素^[4]。因此,研究各类因子与SDC之间的关系,对于全面理解土壤侵蚀机制至关重要。

植被在生长过程中会改变土壤的特性,如土壤养分、体积质量和孔隙度等,这些变化可能影响土壤分离过程。WANG等^[5]研究发现,废弃农田在自然恢复过程中,随着年限增加土壤可蚀性和临界剪切应力显著下降,并在恢复超过28 a后趋于稳定。在后续的研究中,WANG等^[6]进一步探讨了不同植被恢复模式对土壤分离的影响,结果表明,刺槐和油松混交林是黄土高原地区在降低SDC方面的最佳恢复模式;GUO等^[7]探讨了不同植被恢复方案对黄土高原沟头水土流失的影响,强调植被恢复可显著降低SDC,增强地表对集中径流的抗冲刷能力;MA等^[8]从力学视角揭示了恢复年限对根-土复合体抗分离能力的影响,指出主导机制会由初期的流体动力作用逐渐转向根系增强土壤结构稳定性的力学效应;CHEN等^[9]研究了中国内蒙古灌木-草本植被模式对坡面SDC和水力参数的影响,指出植物根系是减少土壤侵蚀的关键因素;PARHIZKAR等^[10]研究强调,在半干旱或干旱的森林环境中,维持土壤表面适度的植被覆盖至关重要。植被恢复是调控土壤分离的关键因素^[11],相关研究多集中在黄土高原等干旱或半干旱地区,且较少关注土壤和根系等多因子综合作用对SDC的影响。相比之下,南方红壤区的年降水量普遍超过1 500 mm,降雨侵蚀力强,团聚体结构

差、有机质含量低,且植被恢复以亚热带常绿阔叶林和针阔混交林为主,植被层次性强,根系分布更复杂。因此,现有的研究结论在南方红壤区进行应用可能面临局限,需结合南方红壤区的土壤和植被特性,深入探讨植被恢复驱动的近地表特征对SDC的影响。

南方红壤区,由于土壤贫瘠、降雨集中和人类不合理活动等多种因素的共同作用,水土流失风险高^[12-13]。因此,有关部门高度重视该地区的水土保持工作。通过实施一系列植被恢复措施,区域的生境质量、土壤性质和根系特征得到改善^[14],从而导致区域的SDC发生变化。然而,近地表特征的变化对SDC的影响机制尚不清楚。已有成果多聚焦于单一变量,缺乏对土壤和根系系统协同作用的综合分析;部分研究采用相关性检验和回归分析等方法,难以有效厘清各变量之间的直接与间接关系^[15]。通径分析能够较为准确地揭示各自变量对因变量的直接和间接影响,从而识别主要影响因素,并有效处理变量间的多重共线性问题^[16]。基于此,选取红壤丘陵区4种常见的植被恢复措施,探讨不同恢复措施下近地表特征对SDC的影响,筛选出分离能力最低的措施类型。同时,通过通径分析确定影响SDC的关键因子,并对SDC进行预测。研究结果为红壤丘陵区SDC的预测提供理论支持,并为水土流失治理相关的决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省龙岩市长汀县(25°18'40"~26°02'05"N,116°00'45"~116°39'20"E),属典型的亚热带季风气候区,年平均降水量1 737 mm,年平均气温18.5℃。区域地貌以丘陵山地为主,海拔多集中在400~600 m^[13]。该区水土流失治理以促进植被恢复为核心。本研究选取4种典型且植被结构差异显著的植

被恢复模式,并以未治理的马尾松纯林作为对照进行比较。所有样地的土壤类型、高程、坡向和坡度等自然条件基本一致,成土母质类型以酸性花岗岩为主,富铝化作用强烈,主要以硅铝铁质红壤类型的土壤为主,结构

疏松,抗蚀性差。在实施治理前,这些植被恢复样地均为侵蚀严重的退化马尾松林地,土壤贫瘠,植被稀疏,林下植被缺乏。所有样地均在2010年开始治理,治理后再未受到人为干扰。样地的基本信息见表1。

表1 采样地基本信息

Table 1 Basic information of sampling sites

样地	主要植被	植被覆盖度/%	海拔/m	坡向/(°)	坡度/(°)	乔木平均胸径/cm	乔木平均树高/m
TSG	马尾松、枫香、胡枝子、宽叶雀稗	93	321	SE14	18	7.5	4.5
GG	马尾松、宽叶雀稗	90	351	SE15	18	6.6	4.2
SG	马尾松、胡枝子、宽叶雀稗	82	327	SE16	18	6.2	3.6
TS	马尾松、枫香、胡枝子	76	331	SE16	18	8.6	5.4
CK	马尾松	25	315	SE15	18	5.8	3.5

1.2 样品采集

2024年6月,对各样地进行植被调查,主要调查植被覆盖度、乔木的树高、胸径及数量。每块样地按照“S”形在上、中和下坡选择5个采样点进行土壤样品采集。采样前,用剪刀剪除植被地上部分,并去除表层结皮和枯落物后采集0~10 cm土层的土壤样品。在每个采样点用100 cm³的环刀采集3个原状土样,用于测定土壤体积质量和孔隙度。同时,用水分盒采集80 g左右土样测定土壤水分质量分数,用饭盒采集土块测定土壤崩解系数。在每个样地,将5个采样点的土样均匀混合后,采用四分法取出1 kg混合样,装入自封袋,带回实验室自然风干、研磨和过筛后,用于土壤养分和pH分析。使用0.1 m×0.1 m×0.2 m的矩形取样器采集原状土样用于土壤分离冲刷试验。当取样器上端与地面齐平后,挖除其周围的土壤和根系,仔细取出样品,并削平取样器下端的含根土体。每个采样点采集3个土壤分离样品作为重复,每个样地共采集15个,累计共采集75个土壤分离样品。为了保证试验的准确性,将用于测定SDC和土壤性质的样品尽可能在同一个正方形区域内、彼此靠近的位置采集。

1.3 指标测定

1.3.1 土壤分离能力 冲刷试验于2024年8月进行,采用变坡不锈钢水槽进行土壤分离冲刷试验。试验水槽尺寸为长2 m、宽0.1 m、高0.05 m的不锈钢水槽。根据当地降雨实际情况,冲刷流量设计为4 L/min,坡度为18°。冲刷试验前,将土壤样品浸泡于水中12 h,确保待测样品完全饱和之后,将样品从水中取出并放在不锈钢网架上,自由排水12 h,以去除重力水。将样品放置于距水槽出口0.1 m的水槽冲刷室中进行冲刷,径流开始后每个样品的冲刷试验持续10 min。冲刷结束后,将收集到的泥沙样品放入烘箱

中,105 °C烘干至恒重,并记录干土质量。土壤分离的计算公式为:

$$SDC = \frac{M}{TA} \quad (1)$$

式中:SDC为土壤分离能力,kg/(m²·s),M为冲刷掉的泥沙干重,kg;T为水流冲刷的时间,s;A为取样器的投影面积,m²。

1.3.2 土壤理化和根系测定 土壤水分质量分数采用烘干法测量,土壤体积质量和孔隙度采用环刀法测量,土壤崩解性用原状土崩解法^[17]测定。土壤有机质、全氮使用碳氮元素分析仪测定,土壤全磷、速效磷使用连续流动元素分析仪测定。土壤全钾、速效钾用火焰光度计测量,土壤pH用1:2.5水浸电位法测定。冲刷试验完成后,将取样器中的土样放置于0.25 mm的筛网上反复冲洗,以获得根系样品。根系干重通过烘干法获得。

1.3.3 精度的判别方法 采用纳什效率系数(NSE)和决定系数(R²)对所构建模型的可靠性进行评价。NSE是衡量模型预测值与实测值吻合程度的重要统计指标,其基本思想是通过比较模型预测误差与实测数据离均差平方和之间的关系,评价模型的拟合能力。R²是衡量模型拟合优度的常用统计指标,用于评价自变量对因变量的解释程度。其数值为0~1,数值越大,表示模型对观测数据的拟合程度越高。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum (\bar{a}_i - \bar{x}_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (3)$$

式中:x_i为模拟值;a_i为实测值; \bar{x} 为实测值的平均值;n为样本数量。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据记录与处理,利用 SPSS 21.0 软件对近地表特征(包括土壤性质和根系)和 SDC 进行单因素方差分析,并通过 K-S 检验评估各变量数据的正态分布情况。为识别影响 SDC 的关键驱动因子,采用随机森林回归模型进行变量重要性评估,模型使用 R 语言中的“randomForest”包实现,以 SDC 为响应变量,土壤理化性质和根系为自变量。为进一步探究近地表特征之间的交互作用及其对 SDC 的影响,采用路径分析对各因子对 SDC 的直接和间接效应进行量化,从而明确其相对贡献。在路径分析中,使用 F 检验筛选对 SDC 无显著影响的变量,以提高模型解释力。自变量与因变量之间的相关系数可以分解为自变量的直接路径系数和自变量通过其他自变量间接影响因变量的间接路径系数。直接路径系数是自变量标准化的局部回归系数,间接路径系数是自变量与因变量之间相关系数的乘积。首先,通过相关分析得出各影响因子与 SDC 之间的相关系数以及各影响因子之间的相关系数;其次,通过逐步回归法剔除一些影响较小或存在多重共线性的因子;得到主导因子。最后,对主导因素的回归系数进行标准化处理,得到直接路径系数,计算间接路径系数,得到各因素对 SDC 的相对影响。图形绘制和可视化分析使用 Origin 2025 软件完成。

2 结果与分析

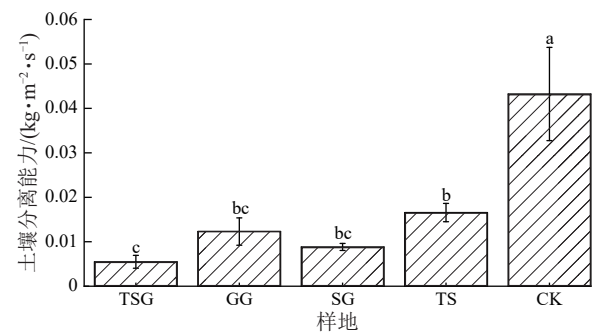
2.1 植被恢复模式对土壤分离能力的影响

由图 1 可知,不同恢复措施下土壤分离能力(SDC)为 $0.003\sim 0.600\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,存在显著差异($p<0.05$)。就平均土壤分离能力而言,CK 的 SDC 最高($0.043\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),显著高于其他措施,且误差范围最大。其次是 TS [$0.017\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] > GG [$0.012\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] > SG [$0.009\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] > TSG [$0.005\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$],其中,GG 和 SG 的差异不显著。CK 的平均 SDC 分别是 TSG、GG、SG 和 TS 的 7.87、3.51、4.89、2.61 倍。在 4 种植被恢复措施中,植被结构最复杂的 TSG 分离能力最低,相较于 GG 下降 58.33%,相较于 SG 下降 44.44%,相较于 TS 下降 70.58%。

2.2 不同恢复措施的近地表特征变化

由表 2 可知,不同植被恢复措施下,土壤理化性质表现出显著差异($p<0.05$)。水分质量分数方面,SG 样地最高(18.22%),CK 最低(12.02%)。与 CK 相比,TSG、GG 和 TS 样地水分质量分数分别提高 4.79%、19.36% 和 5.63%,表明植被恢复措施有助于提升土壤的保水能力。土壤体积质量在 CK 和

GG 样地较高,分别为 1.12 、 $1.09\text{ g}/\text{cm}^3$,TSG 最低($0.99\text{ g}/\text{cm}^3$),比 CK 和 GG 分别降低 12.9% 和 10.08%。与土壤体积质量变化相一致,TSG 样地的总孔隙度最高,TSG、SG 和 TS 样地分别较 CK 提高 15.4%、7.3% 和 11.4%。SG 样地的崩解系数最低(0.156),较 CK 降低 67.84%,表明植被恢复措施增强了土壤的抗崩解能力。在养分方面,CK 样地的有机质、全氮和全磷含量最低,分别为 12.65、0.86、0.05 g/kg ,而 TSG 样地的对应指标最高,分别较 CK 提高 324.80%、112.65% 和 610.91%。全钾含量在 SG 样地最高,其次为 GG 样地,分别相较于 CK 样地提高 130.24% 和 88.42%。速效钾、速效磷在 TSG 显著高于其他样地,远超 CK 样地。pH 为 4.17~4.73,总体表现为偏酸性,其中 TS 样地最高,TSG 样地最低。根重密度在 GG 样地最高,其次是 TSG 样地,分别比 CK 样地提升 5.96、3.22 倍,表明植被恢复显著提高了土壤根系密度,从而有助于增强了土壤结构的稳定性。



注:图柱上方不同小写字母表示不同植被恢复措施间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同植被恢复措施的土壤分离能力变化

Fig. 1 Variations in soil detachment capacity under different vegetation restoration measures

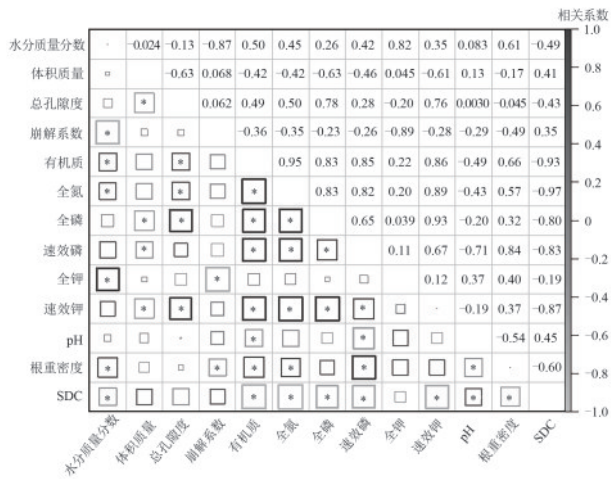
2.3 近地表特征对土壤分离能力的影响

为了全面评估土壤理化性质和根系对 SDC 的影响,对近地表特征因子与 SDC 进行相关性分析(图 2)。结果表明,有机质与全氮、全磷、速效磷和速效钾之间均呈显著正相关($p<0.05$)。土壤体积质量与总孔隙度、有机质和全氮和全磷呈负相关,表明体积质量越大,越不利于养分累积和土壤结构稳定。总孔隙度与崩解系数呈正相关,表明孔隙度过大可能降低结构稳定性。根重密度与有机质、全氮和速效磷之间呈显著正相关($p<0.05$),表明根系越发达,越有利于维持土壤肥力。SDC 与水分质量分数、有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾、pH 和根重密度呈现显著相关($p<0.05$),其中与 pH 呈正相关,与有机质等养分指标呈负相关。

表 2 不同植被恢复措施下的近地表特征
Table 2 Near-surface characteristics under different vegetation restoration measures

近地表特征	TSG	GG	SG	TS	CK
水分质量分数/%	12.60±0.29	14.35±0.46	18.22±0.54	12.70±0.42	12.02±0.21
体积质量/(g·cm ⁻³)	0.99±0.03	1.09±0.09	1.04±0.01	1.03±0.07	1.12±0.05
总孔隙度/%	65.22±2.77	55.43±0.86	60.62±1.46	62.96±0.57	56.51±0.84
崩解系数	0.33±0.02	0.22±0.02	0.15±0.02	0.26±0.01	0.48±0.01
有机质/(g·kg ⁻¹)	53.75±1.07	23.45±1.10	28.62±0.92	20.44±0.41	12.65±0.53
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.84±0.08	1.30±0.05	1.56±0.04	1.25±0.05	0.86±0.09
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.39±0.06	0.11±0.01	0.16±0.02	0.14±0.01	0.05±0.01
全钾/(g·kg ⁻¹)	3.70±0.10	6.65±0.18	8.13±0.03	4.09±0.05	3.53±0.44
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	3.39±0.12	2.87±0.13	2.00±0.04	0.72±0.04	0.58±0.07
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	246.66±14.01	79.17±2.41	121.6±5.40	107.23±4.91	71.19±2.26
pH	4.17±0.13	4.33±0.01	4.66±0.17	4.73±0.08	4.55±0.07
根重密度/(mg·cm ⁻³)	15.77±0.20	29.18±0.11	13.61±0.11	7.89±0.14	4.89±0.04

注:表中数据均为平均值±标准差。



注:SDC为土壤分离能力;*表示在0.05水平显著相关。

图 2 近地表特征与土壤分离能力的相关性

Fig. 2 Correlation between near-surface characteristics and soil detachment capacity

随机森林结果表明,不同土壤与根系特征对 SDC 的重要性存在显著差异。其中,崩解系数的权重最高(0.18),表明其在土壤抗扰动与稳定性方面起主导作用。根重密度(权重 0.15)和有机质含量(权重 0.14),表明植物根系对土壤颗粒的物理缠绕作用,以及有机质对团粒结构的增强效应,是降低 SDC 的核心因素。土壤全氮含量、水分质量分数及速效钾含量的权重也相对较高(均为 0.11~0.12),表明土壤养分状况与水分条件通过调控植被生长和根系发育,间接影响土壤结构稳定性。相比之下,土壤 pH、体积质量和总孔隙度的权重较低(≤ 0.02),表明这些因素对 SDC 的解释力有限(图 3)。

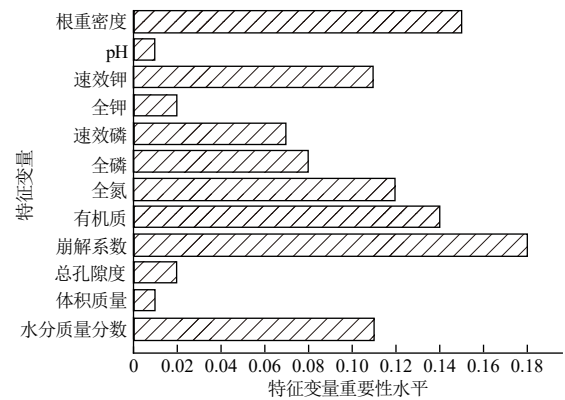


图 3 随机森林特征变量重要性水平

Fig. 3 Analysis of feature variable importance levels in random forest

2.4 土壤分离能力的路径分析及预测模型

基于随机森林分析发现,崩解系数、根重密度、有机质、全氮、速效钾和水分质量分数对 SDC 的贡献比重合计占 0.797,因此选取这 6 个自变量进行路径分析。分析结果表明,崩解系数(x_1)和有机质(x_2)对 SDC 的路径系数极显著,分别为 0.643 和 -0.552,而其余 4 个因素与 SDC 间的路径系数不显著(表 3)。因此,崩解系数和有机质是影响 SDC 的关键因素。由表 4 可知,SDC 与崩解系数和有机质之间的通径系数和间接通径系数分别为 0.643、-0.199 和 -0.552, -0.231。崩解系数对 SDC 的通径系数大于有机质,而有机质的间接通径系数大于崩解系数。此外,崩解系数和有机质对 SDC 的通径系数大于间接通径系数。崩解系数和有机质的偏回归系数、方程截距及显著性检验结果。基于此,构建了南方红壤区的 SDC 预测模型,其计算公式为:

$$\text{SDC} = 0.0093 + 0.081x_1 - 0.0005x_2 \quad (4)$$

$$(R^2 = 0.849)$$

表 3 消除非显著路径系数因子对土壤分离能力的路径分析
Table 3 Path analysis of each factor on soil detachment capacity after eliminating non-significant path coefficients

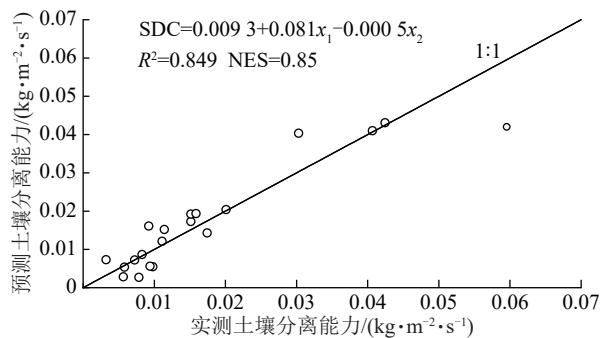
模型	未标准化系数		标准化系数		显著性
	Beta	标准错误	Beta	t	
(常量)	0.0093	0.005		1.768	0.004
崩解系数(x_1)	0.0810	0.012	0.643	6.707	0
有机质含量(x_2)	-0.0005	0	-0.552	-5.758	0

表 4 回归系数输出结果

Table 4 Output results of regression coefficients

变量	与 SDC 的相关系数	通路系数	间接通路系数
崩解系数(x_1)	0.35	0.643	0.199
有机质含量(x_2)	-0.93	-0.552	-0.231

通过将公式(4)计算得到的 SDC 预测值与实际测量值进行比较发现,所构建的 SDC 预测模型拟合效果较好,数据点大致位于 1:1 线附近,具有较高的预测精度(图 4)。该模型一定程度上可以有效地预测真实的 SDC。在野外条件下测量 SDC 通常费时又费力,尤其是在植被茂盛的丘陵区。因此,有必要根据一些易于测量的变量建立 SDC 的估计模型。以往的模型大多数基于 3 个或 3 个以上因子,增加了获得估计 SDC 所需因子的难度。本研究通过路径分析表明,崩解系数和有机质是影响 SDC 的直接因子,因此建立了基于崩解系数和有机质含量的 SDC 预测模型。基于这些因素,该模型具有较高的预测质量。



注:SDC 为土壤分离能力; x_1 为崩解系数; x_2 为有机质含量。

图 4 土壤分离能力实测值与预测值的比较

Fig. 4 Comparison between measured and predicted values of soil detachment capacity

3 讨论

3.1 不同植被恢复措施对土壤分离能力的影响

本研究中 4 种不同的恢复措施的土壤抗蚀能力存在差异的,与姜兴雪等^[18]研究结果一致。土壤近地表特征是由植被类型决定,这些植被结构直接或间接地改变了土壤结构,从而影响了土壤的抗蚀能

力。本研究表明,4 种植被恢复措施能显著降低 SDC,CK 的平均 SDC 显著高于其他植被恢复措施,与已有研究^[19]结论一致,即植被恢复能显著改善土壤特性,降低 SDC。同时,植被恢复措施明显增加了土壤有机质、全氮、全磷和根重密度等关键指标的含量,进而降低了 SDC(表 2)。一方面,植被恢复提高了土壤的有机质等养分含量,土壤有机质作为土壤胶结剂,促进土壤微团聚体的形成,并增强颗粒间的黏结力,进而提高土壤的抗崩解能力;另一方面,根系的发育有助于提高土壤质量,直接增强土壤的物理支撑力,植被的生长会形成根网,将土壤可以包裹起来,进而减少 SDC^[20]。并能通过根系分泌物促进微生物活动,增加团聚体含量,从而进一步增强土壤抗扰动能力。当根重密度较高时,减少 SDC 的效果更为显著^[21]。本研究结果也证明这一点,GG 和 SG 的 SDC 远小于 TS(图 1),可能是因为草本的根直径小于乔木,而 GG 和 SG 样地中均有宽叶雀稗这一草本植物,而 TS 样地只有灌木和乔木。草本植物根系较浅而密集,能快速覆盖地表,其根系分泌物也有助于胶结细颗粒形成水稳性团聚体,增加有机质含量,从而提高土壤结构稳定性。灌木根系较乔木分布更均匀,具有良好的穿透性和侧向扩展能力,可疏松土壤、优化孔隙结构,其落叶和小枝分解速率适中,能够持续供给腐殖质,有助于促进微生物活动。相比之下,乔木虽然具有发达的垂直根系,有利于深层水分养分吸收,但林冠闭合度高一定程度上抑制草本层生长^[13],减少了表层有机质输入和根系扰动,也证实了先前的研究结论,即草本根系比灌木根和乔木根具有更大的降低 SDC 的潜力,细根植物对土壤抗侵蚀性的增强效果明显优于粗根植物^[22]。细根植物能够分泌更多的土壤胶结物质,并提供比粗根植物更大的拉伸强度,从而显著提高土壤抗分离能力^[23]。pH 与根重密度呈显著负相关($p < 0.05$)(图 2),表明过酸环境可能抑制根系生长,在选择恢复措施时,土壤 pH 的影响不容忽视。此外,生物多样性也是影响 SDC 的因素之一。在本研究中,生物多样性最为丰富的 TSG 在改善土壤结构和提高土壤抗蚀能力方面表现最为突出,TSG 样地具有草本、灌木和乔木,植被结构多样,且植被覆盖度最高。

值得注意的是,本研究中的 SDC 比同类研究中低 1 个数量级。该差异可解释为不同研究区域的土壤特性和侵蚀特征具有差异。在不同地质背景下形成的土壤物理和化学特性存在很大差异,导致 SDC 的敏感性不同。例如,黄土高原的土壤质地较为均一,主要为沙质土,土壤抗侵蚀能力较弱^[24]。西南喀

斯特地区土壤中粉粒和黏粒含量较高,侵蚀敏感性较强^[22]。南方红壤区的土壤黏粒含量较高,抗侵蚀能力相对较强。而紫色土主要是由砂页岩发育而成的岩性土,土层浅,砾石含量高,极易发生侵蚀^[4]。此外,坡度和水流功率也可能是造成本研究与其他研究差异较大的另一个重要原因。虽然本研究设计的水流功率和坡度处于南方红壤丘陵区研究的合理范围^[25-27],但即便是相对较小的坡度与水动力变化,对SDC产生的影响不容忽视。因此,今后的研究应尽可能保持试验条件的一致,以更准确地厘清红壤丘陵地区与其他区域SDC的差异。

3.2 近地表特征对土壤分离能力的影响

近地表特征在降低土壤分离过程中起着关键作用^[28]。植被生长可改善土壤理化性质,增强土壤结构稳定性,从而影响SDC^[11,29]。本研究发现,SDC主要受崩解系数、根系特征及有机质含量的综合影响,其权重分别为0.18、0.15和0.14,显著高于其他指标(图3)。其中,崩解系数权重最高,表明土体自身结构强度在抵御侵蚀扰动中具有重要作用,尤其在黏粒含量高的红壤中更为关键。有机质则作为土壤结构的“黏结剂”,有助于将土壤颗粒和较小团聚体黏结在一起,促进稳定团聚体的形成,改善土壤通气性和保水性,提升土壤的抗分离能力^[26]。植物生长不仅通过输入有机质促进土壤结构改善,还借助其发达的根系网络增强土壤结构稳定性,从而有效缓解雨滴溅蚀和径流冲刷对土体的侵蚀。根系不仅通过物理缠绕作用增强土壤颗粒间的连接,还通过生物化学作用稳定团聚体结构,形成“生物加固带”,有效降低土壤颗粒分离风险^[21]。相关分析表明,在不同植被恢复措施中,SDC与含水量、pH、根重密度和养分指标呈显著相关($p < 0.05$)。此外,土壤体积质量与含水量、根中密度呈负相关,而与SDC间呈正相关。说明结构紧密、孔隙度低的土壤限制水分渗透和根系发育,从而可能增加土壤颗粒的脱落和迁移。然而,在本研究中SDC与体积质量之间的相关性并未达到显著水平,可能是因为不同植被恢复措施之间的体积质量差异较小,变化仅为0.91~1.19 g/cm³,可能不足以显著改变孔隙结构或团聚体稳定性,从而对SDC影响不显著。而在喀斯特地区,由于独特的水文地质结构,体积质量往往与砾质含量、压实程度及孔隙分布密切相关,对水分渗透和微团聚体稳定性具有更直接的影响。已有喀斯特研究^[22]则表明,土壤体积质量的增加导致土壤变得更加致密,从而提高其内聚力更耐水流的分离。综上所述,不同植被恢复措施通过改善土壤物理结构和养分状况,为根系生长和水分循环提供了良好

基础,从而间接降低了SDC。

不同类型土壤中,土壤理化性质对SDC的影响存在显著差异。已有研究^[30]表明,在质地较细、结构较好的土壤类型中(如黄壤或砂壤土),水分质量分数与养分指标(如全氮、速效钾)对SDC的作用相对突出,可能与水分和养分调节植物生长与根系发育密切相关。在伊朗北部的研究^[31]也发现,壤土的SDC与根系密度和有机质呈负相关,在摩洛哥基于石灰岩和泥灰岩母质的研究^[32]也表明,植被覆盖度和有机质含量会显著降低SDC。而在南方红壤区,土壤主要发育于风化花岗岩母质,具有质地黏重、结构疏松、有机质含量低等特点,极易发生水土流失^[13]。由于红壤普遍存在结构脆弱性与贫瘠问题,其降低SDC更依赖于提高土壤力学强度与外源有机质的持续输入,本研究也发现,崩解系数和有机质对SDC的作用更为突出(图3)。因此,在红壤丘陵区开展水土保持和植被恢复实践时,应优先关注土壤结构的改善与有机质状况的提升。

本研究对影响SDC的6个因素进行路径分析,包括崩解系数、根重密度、有机质、全氮、速效钾和含水量。分析结果表明,崩解系数和有机质是影响红壤丘陵区SDC的主要因素。基于崩解系数和有机质建立的SDC预测模型具有良好的拟合效果,可实现对SDC的有效预测。然而,路径分析中其他残留项的较高路径系数约为0.388,表明可能存在其他因素对SDC有较大的影响,但在这项研究中没有考虑。此外,该模型是在南方红壤丘陵区样本的基础上建立的,土壤类型以酸性红壤为主,有机质含量较低,结构松散。因此,模型对有机质和颗粒稳定性因子的敏感性较高,但在碳酸盐类土壤或黏粒含量更高的土壤中,其预测效能可能降低。在将模型应用至其他区域或生态系统时,应结合当地的土壤类型、植被结构及气候条件进行再验证。未来可以在不同季节和多样化植被类型下开展多点对比试验,以提升模型的适用性。因此,该模型主要适用于南方红壤侵蚀退化区相似类型的水土流失评估与管理,在更广泛的土壤类型与气候条件下使用时,需进行本地化校准与验证,以提高其稳定性和可靠性。

4 结论

1)不同植被恢复措施显著影响SDC。与CK相比,植被恢复措施显著降低SDC,且不同恢复模式的影响程度存在差异,其中植被覆盖度最高的TSG样地的SDC最低,其次是TS、GG、SG。CK的平均SDC分别是GST、GG、SG、TS的7.87、3.51、4.89、2.61倍,表明植被恢复措施能显著降低SDC。

2) 植被恢复显著改善土壤特性和根系特征。相关分析表明, SDC 与养分含量等指标呈负相关, 与体积质量和崩解系数呈正相关。随机森林分析进一步识别出, 崩解系数、根重密度、有机质、全氮、速效钾和水分质量分数是影响土壤分离能力的主要因子, 其累计解释权重达 0.797。

3) 路径分析结果表明, 不同近地表特征变量之间存在高相关性或者共线性。其中崩解系数和有机质是影响 SDC 的关键因子, 可作为评估红壤丘陵区 SDC 的有效指标。基于 2 个因子构建的预测模型具有良好的拟合性能 ($R^2=0.849$, $NSE=0.85$), 可为区域水土流失风险评估与植被恢复策略优化提供科学依据。

参考文献:

- [1] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 21-30.
ZHANG G H. Several ideas related to soil erosion research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 21-30.
- [2] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015—2070) [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [3] GOVERS G, EVERAERT W, POESEN J, et al. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(4): 313-328.
- [4] 张冠华, 易亮, 丁文峰, 等. 三峡库区生物结皮对土壤分离过程的影响及其机制[J]. 土壤, 2021, 53(3): 610-619.
ZHANG G H, YI L, DING W F, et al. Effects and mechanism of biocrusts on soil detachment process by overland flow in the Three Gorges Reservoir area [J]. Soils, 2021, 53(3): 610-619.
- [5] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(14): 1725-1734.
- [6] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2014, 116: 51-59.
- [7] 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.
- [8] MA J Y, ZHANG S J, SHE F T, et al. Influence of the vegetation restoration age on the soil detachment of root-soil composites on the Loess Plateau of China [J]. European Journal of Soil Science, 2024, 75(6): e70011.
- [9] CHEN P, GUO J Y, ZHANG T G, et al. Effects of shrub-grass patterns on soil detachment and hydraulic parameters of slope in the Pisha sandstone area of Inner Mongolia, China [J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(2): 519-528.
- [10] PARHIZKAR M, SHABANPOUR M, MIRALLES I, et al. Evaluating the effects of forest tree species on rill detachment capacity in a semi-arid environment [J]. Ecological Engineering, 2021, 161: e106158.
- [11] 张光辉. 植被恢复背景下土壤侵蚀研究需要加强的内容 [J]. 中国水土保持, 2020(9): 76-79.
ZHANG G H. Research contents of soil erosion under the background of vegetation restoration [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(9): 76-79.
- [12] 习杰, 吴泽华, 林强, 等. 不同植被恢复措施对红壤区马尾松侵蚀退化地土壤崩解特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 35-43.
XI J, WU Z H, LIN Q, et al. Effects of different vegetation restoration measures on the disintegration characteristics of eroded degraded land of *Pinus massoniana* in red soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 35-43.
- [13] 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.
- [14] HAO H X, DI H Y, JIAO X, et al. Fine roots benefit soil physical properties key to mitigate soil detachment capacity following the restoration of eroded land [J]. Plant and Soil, 2020, 446(1): 487-501.
- [15] QAMARUZ-ZAMAN N, ABDUL-SUKOR N S, ABRAHMAN S A, et al. The influence of moisture content on the production of odor from food waste using path analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(13): 13658-13663
- [16] 史志华, 杨洁, 李忠武, 等. 南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 6-9.
SHI Z H, YANG J, LI Z W, et al. Soil conservation in the hilly red soil region of Southern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 6-9.
- [17] 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.
- [18] 姜兴雪, 查瑞波, 毛兰花, 等. 花岗岩红壤侵蚀退化地不

- 同治理模式土壤抗蚀性评价[J].水土保持学报,2021,35(6):31-37.
- JIANG X X, ZHA R B, MAO L H, et al. Evaluation of soil erosion resistance under different treatment modes in erosion degraded land of granite red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6):31-37.
- [19] 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.
- [20] 李强,杨俊诚,张加琼,等.植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展[J].农业资源与环境学报,2020,37(1):17-23.
- LI Q, YANG J C, ZHANG J Q, et al. Progress of research on soil erosion resistance of plant roots and future prospects [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(1):17-23.
- [21] YAN J X, ZHANG K D, CHEN J Y, et al. Effects of different land-use types on soil detachment capacity in loess areas [J]. Catena, 2024, 247: e108523.
- [22] ZI R Y, ZHAO L S, FANG Q, et al. Path analysis of the effects of hydraulic conditions, soil properties and plant roots on the soil detachment capacity of karst hill-slopes [J]. Catena, 2023, 228: e107177.
- [23] LIU J Y, ZHOU Z C, ZHU B B, et al. Quantifying the effects of the plant canopy, plant roots, and biological soil crust on soil detachment by overland flow [J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22(2):457-469.
- [24] 郭文芳,李鑫,陈艳梅,等.太行山坡地不同管理措施植被-土壤系统耦合关系[J].生态学报,2023,43(15):6170-6181.
- GUO W F, LI X, CHEN Y M, et al. Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different management measures in Taihang Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15):6170-6181.
- [25] ZHAO Y J, PING Y, MI G Y, et al. Extreme summer drought increased soil detachment capacity of biocrusts in subtropical China [J]. Soil and Tillage Research, 2025, 247: e106372.
- [26] 蒋莉沙,甘凤玲,谭晓红,等.岩层倾向对喀斯特槽谷区不同土地利用类型土壤分离能力的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):130-139.
- JIANG L S, GAN F L, TAN X H, et al. Effect of rock strata dip on soil detachment capacity of different land use types in karst trough valley area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):130-139.
- [27] 耿韧,张光辉,洪大林,等.我国水蚀区坡耕地土壤分离能力的空间分布与影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):156-161.
- GENG R, ZHANG G H, HONG D L, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil detachment capacity of sloping farmland in water erosion zone of China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):156-161.
- [28] 常恒,方怒放,王卓霄,等.不同梯田修筑方式下土壤分离能力变化及影响因素[J].水土保持研究,2025,32(3):91-97.
- CHANG H, FANG N F, WANG Z X, et al. Variations in soil detachment capacity and influencing factors under different terrace construction methods [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3):91-97.
- [29] PENG L, TANG C J, ZHANG X Y, et al. Quantifying the effects of root and soil properties on soil detachment capacity in agricultural land use of southern China [J]. Forests, 2022, 13(11): e1788.
- [30] YAO C, ZHANG Q W, CHEN K B, et al. Response of seasonal variation in soil detachment capacity to straw incorporation in sloping farmland on the Loess Plateau [J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(6):1740-1751.
- [31] PARHIZKAR M, SHABANPOUR M, KHALEDIAN M, et al. Assessing and modeling soil detachment capacity by overland flow in forest and woodland of northern Iran [J]. Forests, 2025, 11(1):65.
- [32] MAKHCHANE M, FATTASS H, LAHRICHI K, et al. Soil type impacts on semi-arid hydrodynamic behavior and erosion: Case from Morocco's Lower Oued El-Kert Watershed [J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2025, 10:2837-2849.