

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.019

CSTR: 32310.14.stbxb.2026.05.019

夏栋, 康东, 郑荣芳, 等. 崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体稳定性及土壤可蚀性[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 134-142.

Xia Dong, Kang Dong, Zheng Rongfang, et al. Soil aggregate stability and soil erodibility of *Pinus massoniana* forest in collapsing gully erosion areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 134-142.

## 崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体稳定性及土壤可蚀性

夏栋<sup>1,2</sup>, 康东<sup>1,2</sup>, 郑荣芳<sup>1,2</sup>, 陈红凤<sup>2</sup>, 刘黎明<sup>1,3</sup>, 吴彬<sup>1,2</sup>, 郭飞<sup>3</sup>

(1. 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443000; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443000; 3. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:** [目的] 崩岗侵蚀是南方花岗岩红壤区最严重的土壤侵蚀类型, 揭示其治理先锋树种马尾松林土壤结构稳定性及抗蚀能力的区域分异规律与驱动机制, 对区域生态恢复与可持续经营具有重要意义。[方法] 选取我国南方 5 省 8 个典型崩岗侵蚀区马尾松林地[湖北崇阳(CY)、江西新余(XY)、江西赣县(GX)、江西鹰潭(YT)、广东五华(WH)、福建福州(FZ)、广东湛江(ZJ)、广西梧州(WZ)], 通过湿筛法测定土壤团聚体稳定性指标(MWD、GMD、 $R_{0.25}$ ), 计算土壤可蚀性  $K$  值, 结合冗余分析(RDA)和系统聚类分析, 探讨土壤团聚体稳定性及可蚀性的区域分异特征及其关键驱动因子。[结果] 1) 8 个样地土壤团聚体稳定性呈现显著的区域分异特征, XY 表现出极高的团聚体稳定性[MWD 1.78 mm,  $R_{0.25}$  为 93.54%,  $K$  值为  $0.074(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ], 而 WZ、WH 等样地处于低稳定性水平[MWD < 1.00 mm,  $K$  值 >  $0.220(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ], 整体呈“江西地区优于华南地区”的空间分布格局; 2) 系统聚类分析将 8 个样地划分为 3 个类型区: I 类(高稳定性-低可蚀区, 仅 XY)、II 类(中等稳定性-中等可蚀区, 包括 CY、FZ、GX、ZJ)和 III 类(低稳定性-高可蚀区, 包括 YT、WH、WZ); 3) WZ 样地呈现高有机碳(57.31 g/kg)、低团聚体稳定性(MWD 0.81 mm)、高可蚀性[ $K$  值为  $0.223(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ]的异常模式, 即高碳低稳现象, 表明在 pH < 4.50 的条件下高有机碳积累未能有效提升团聚体结构的稳定性。[结论] 崩岗侵蚀区马尾松林土壤抗蚀能力受有机-无机复合胶结机制协同调控, 区域土壤结构改良应以提升有机碳品质、调节 pH 至近中性范围、促进活性铁铝氧化物形成为核心, XY 模式(高碳、高氮、近中性 pH)可作为区域参照目标。

**关键词:** 崩岗侵蚀; 土壤团聚体稳定性; 土壤可蚀性; 马尾松林

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0134-09

## Soil Aggregate Stability and Soil Erodibility of *Pinus massoniana* Forest in Collapsing Gully Erosion Areas

Xia Dong<sup>1,2</sup>, Kang Dong<sup>1,2</sup>, Zheng Rongfang<sup>1,2</sup>, Chen Hongfeng<sup>2</sup>, Liu Liming<sup>1,3</sup>, Wu Bin<sup>1,2</sup>, Guo Fei<sup>3</sup>

(1. Hubei Provincial Engineering Research Center of Cement-based Ecological Restoration Technology, Yichang, Hubei 443000, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China)

**Abstract:** [Objective] Collapsing gully erosion is the most severe type of soil erosion in the granite red-soil region of southern China. Revealing the regional differentiation patterns and driving mechanisms of soil structural stability and erodibility in *Pinus massoniana* forest, a pioneer tree species for erosion control, is of great significance for regional ecological restoration and sustainable management. [Methods] Soil samples were collected from *P. massoniana* forest in eight typical collapsing gully erosion areas across five provinces in southern China [Chongyang, Hubei (CY); Xinyu, Jiangxi (XY); Ganxian, Jiangxi (GX); Yingtan, Jiangxi (YT); Wuhua, Guangdong (WH); Fuzhou, Fujian (FZ); Zhanjiang, Guangdong (ZJ); Wuzhou, Guangxi (WZ)]. The wet-sieving method was used to determine soil aggregate stability indicators (MWD, GMD,  $R_{0.25}$ ), and the soil

收稿日期: 2026-02-27

修回日期: 2026-04-07

录用日期: 2026-04-17

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-13

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42107489, 41601287)

第一作者: 夏栋(1985—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事边坡生态修复与水土保持研究。E-mail: xiadongsanxia@163.com

通信作者: 郭飞(1987—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事崩岗致灾机理及易发性评价研究。E-mail: ybbnui.2008@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

erodibility  $K$  factor was calculated. Redundancy analysis (RDA) and hierarchical cluster analysis were combined to examine the regional differentiation characteristics of soil aggregate stability and erodibility and their key driving factors. [Results] 1) Soil aggregate stability at the eight sampling sites showed significant regional differentiation. XY exhibited extremely high aggregate stability [MWD 1.78 mm,  $R_{0.25}$  93.54%,  $K$  value  $0.074(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ], whereas WZ and WH showed low stability levels [MWD < 1.00 mm,  $K$  value >  $0.220(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ], forming an overall spatial pattern in which the Jiangxi region was superior to the South China region. 2) Hierarchical cluster analysis divided the eight sites into three type zones: Zone I (high stability-low erodibility, XY only), Zone II (medium stability-medium erodibility, including CY, FZ, GX, and ZJ), and Zone III (low stability-high erodibility, including YT, WH, and WZ). 3) The WZ site showed an anomalous pattern of high organic carbon (57.31 g/kg), low aggregate stability (MWD 0.81 mm), and high erodibility [ $K$  value  $0.223(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ], representing a high-carbon-low-stability pattern, indicating that high organic carbon accumulation failed to effectively improve aggregate structural stability under  $\text{pH} < 4.50$ . [Conclusion] The soil erosion resistance of *P. massoniana* forest in collapsing gully erosion areas is synergistically regulated by organic-inorganic complex cementation mechanisms. Regional soil structure improvement should focus on enhancing organic carbon quality, adjusting pH to a near-neutral range, and promoting the formation of active iron and aluminum oxides. The XY model (high carbon, high nitrogen, near-neutral pH) can serve as a regional reference target.

**Keywords:** collapsing gully erosion; soil aggregate stability; soil erodibility; *Pinus massoniana* forest

Received: 2026-02-27

Revised: 2026-04-07

Accepted: 2026-04-17

Online(www.cnki.net): 2026-08-13

崩岗侵蚀是指集中发育在我国南方热带、亚热带花岗岩红壤丘陵区<sup>[1]</sup>,坡面土体在多种外营力作用下,沿沟壁处不断崩坍破坏形成的一种严重土壤侵蚀地貌<sup>[2]</sup>,主要由集水坡面、崩壁、崩积堆、沟道和洪积锥5部分组成<sup>[3]</sup>。在崩岗侵蚀的诸多生态治理措施中,马尾松作为水土保持先锋树种,自20世纪80年代以来在南方红壤区被大规模营造,森林覆盖率显著提升<sup>[4]</sup>。然而,马尾松人工林林分结构与树种单一化<sup>[5]</sup>、林下植被稀疏甚至裸露<sup>[6]</sup>,导致“远看绿油油,近看水土流”的林下水土流失悖论普遍存在,浅沟侵蚀发育,土壤退化持续<sup>[7]</sup>。因此,揭示崩岗侵蚀区马尾松林土壤结构稳定性及其抗蚀能力的关键调控机制,已成为该区域生态恢复与可持续经营亟待解决的核心科学问题。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,由土壤颗粒通过有机-无机复合体等胶结物质黏结而成<sup>[8]</sup>,其稳定性直接影响土壤水分入渗<sup>[9]</sup>、养分循环<sup>[10]</sup>、抗侵蚀能力<sup>[11]</sup>。平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)及 $>0.25$  mm水稳性大团聚体含量( $R_{0.25}$ )是评价团聚体稳定性的核心指标,其值越高,表明土壤结构越稳定、抗蚀能力越强<sup>[12]</sup>。土壤可蚀性因子 $K$ 值则是定量表征土壤对侵蚀敏感程度的综合指标,其大小由土壤理化性质内在决定,广泛用于土壤侵蚀预报与水土流失定量评价<sup>[13]</sup>。稳定的团聚体能够提高土壤抗侵蚀能力,减少水土流失;而团聚体结构

破坏后,土壤易被冲刷、坍塌,进而加速崩岗侵蚀的发生<sup>[6]</sup>。土壤团聚体的稳定性则受到土壤母质、理化性质、气候条件、土地利用方式、植被等多种因素的影响<sup>[14]</sup>。近年来,学者围绕崩岗侵蚀区花岗岩风化土的结构稳定性开展了系列研究,崩岗侵蚀区土壤团聚体稳定性受花岗岩风化土物质组成强烈影响<sup>[15]</sup>、不同土层抗蚀性存在显著垂直分异规律,可通过侵蚀率、黏粒率等关键指标实现抗蚀性综合评价<sup>[16]</sup>。区域尺度上,现有研究表明马尾松林土壤团聚体主要呈现3个特征:以大团聚体为主但水稳性较差<sup>[17]</sup>、与土壤养分形态(如有机磷)存在密切关联<sup>[18]</sup>及其内部微生物活性较高但易受碳源限制<sup>[19]</sup>。然而,针对崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体稳定性的既有研究多为单个崩岗<sup>[15]</sup>、小范围单一林分<sup>[6]</sup>或单个小流域的“点状”研究<sup>[7]</sup>,尚未在南方崩岗侵蚀区开展多样地的马尾松林土壤系统对比,特别是团聚体稳定性及可蚀性的区域分异规律及普适性驱动因子仍值得深入探讨。

鉴于此,本研究以我国南方崩岗侵蚀区8个典型马尾松林地为研究对象,采集0~20 cm表层土壤,采用干筛+湿筛法测定团聚体粒径分布,计算MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 及 $K$ 值,测定8项土壤理化性质(pH、SOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK),运用Pearson相关分析、冗余分析(RDA),系统揭示崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体稳定性及可蚀性的区域分异特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

根据冯明汉等<sup>[20]</sup>对我国南方崩岗侵蚀现状的调查,崩岗主要分布于江西、广东、湖南、福建、广西、湖北、安徽 7 省(自治区)。本研究选取我国南方崩岗侵蚀区 5 省 8 个典型马尾松林地作为研究样地,具体包括湖北崇阳(CY)、江西新余(XY)、江西赣县(GX)、江西鹰潭(YT)、广东五华(WH)、福建福州(FZ)、广东湛江(ZJ)和广西梧州(WZ)。研究区属亚热带季风气候,年平均气温 16.4~21.2℃,年平均降水量 1 094.8~1 520.0 mm,降水集中于 4—9 月,雨热同季。土壤类型以花岗岩发育的红壤为主,土层深厚、质地偏砂、结构性差。植被类型以马尾松为主,林龄 15~40 a,林下植被稀疏,水土流失现象普遍。样点空间分布及样地基本信息见图 1 和表 1。

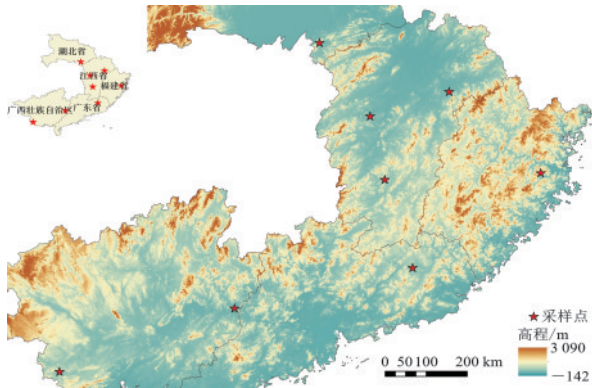


图 1 样点空间分布  
Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

| 样地       | 纬度(N)/<br>(°) | 经度(E)/<br>(°) | 土壤<br>类型 | 林龄/<br>a | 郁闭<br>度/% |
|----------|---------------|---------------|----------|----------|-----------|
| 湖北崇阳(CY) | 29.56         | 113.88        | 黄棕壤      | 27       | 82        |
| 江西赣县(GX) | 26.24         | 115.15        | 红壤       | 24       | 83        |
| 江西鹰潭(YT) | 28.13         | 116.99        | 红壤       | 24       | 82        |
| 江西新余(XY) | 27.75         | 114.96        | 红壤       | 25       | 82        |
| 广西梧州(WZ) | 23.49         | 111.27        | 赤红壤      | 25       | 82        |
| 广东湛江(ZJ) | 22.15         | 107.08        | 赤红壤      | 28       | 81        |
| 广东五华(WH) | 24.11         | 115.58        | 红壤       | 28       | 81        |
| 福建福州(FZ) | 25.98         | 118.95        | 红壤       | 24       | 83        |

1.2 土壤样品采集

于 2024 年 7 月至 2025 年 8 月,在 8 个样地内分别布设 3 个 20 m×20 m 的标准样方,样方间距离≥100 m。每个样方内按五点采样法布设 5 个采样点,采集 0~20 cm 表层土壤。用不锈钢铲小心剥离地表凋落物

后,剔除石块、根系及动植物残体,采集约 1 kg 混合土样,装入自封袋,带回实验室后,自然风干,用于测定土壤团聚体和理化性质。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤基本理化性质 按照相关土壤理化指标分析标准<sup>[21]</sup>,土壤 pH 采用电位法测定(土水比 1:2.5),土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法测定;全钾(TK)采用火焰光度法测定;速效氮(AN)采用碱解扩散法测定;速效磷(AP)采用 Olsen 法测定;速效钾(AK)采用醋酸铵提取—火焰光度法测定。

1.3.2 土壤团聚体稳定性测定 参照 Elliott 湿筛法<sup>[22]</sup>并略作修改。将风干土样混匀后采用四分法称取 200 g 土样,置于孔径为 2、1、0.5、0.25、0.053 mm 的套筛上,用振荡筛分机振荡 10 min(振幅 3 mm),得到各粒径机械稳定性团聚体,称重计算百分比。

根据干筛结果,按各粒径比例配成 50 g 风干土样,置于相同孔径套筛上,放入团粒分析仪水桶中,缓慢加水至浸没土样,静置 10 min 后,以 30 r/min 的频率、4 cm 的振幅上下振荡 30 min。振荡结束后,将各筛层团聚体冲洗至铝盒中,60℃烘干称重。每个样品重复测定 3 次。

1.3.3 团聚体稳定性指标计算 土壤水稳性团聚体稳定性<sup>[23]</sup>采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)及粒径>0.25 mm 团聚体含量( $R_{0.25}$ )进行分析,计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \overline{x_i} \omega_i \tag{1}$$

$$GMD = \exp \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \ln \overline{x_i} \right) \tag{2}$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{i>0.25}}{MT} \times 100\% \tag{3}$$

式中:MWD 为平均重量直径,mm;GMD 为几何平均直径,mm; $n$  为粒径分组的组数; $\overline{x_i}$  为第  $i$  粒级土壤团聚体平均直径,mm; $\omega_i$  为第  $i$  粒级土壤团聚体所占百分比,%; $R_{0.25}$  为土壤粒径>0.25 mm 团聚体含量,%; $M_{i>0.25}$  为>0.25 mm 粒径土壤团聚体质量之和,g;MT 为各粒径土壤团聚体质量之和,g。

考虑花岗岩风化壳地区砂质含量较高的特点<sup>[24]</sup>,土壤可蚀性  $K$  按照 Shirazi 等<sup>[25]</sup>提出的公式计算:

$$K = 7.954 \left\{ 0.0017 + 0.0494 \exp \left[ -0.5 \left( \frac{1.675 + \lg GMD}{0.6986} \right)^2 \right] \right\} \tag{4}$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 软件进行数据整理,SPSS 26 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。采用 Pearson 相关分析方法检验团聚体稳定性指标与土壤理化性质间的相关性。运用 Canoco 5 软件对土壤团聚体稳定性及土壤可蚀性的影响因素进行冗余分析,其余所有图表在 OriginPro 2024 和 R 软件中完成绘制。系统聚类分析(hierarchical-cluster analysis)基于 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 、K 值 4 项指标,采用欧氏距离(euclidean distance)和 Ward 最小方差法(Ward's minimum variance method),将 8 个样地划分为不同类型区。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质区域分异特征

8 个崩岗侵蚀区马尾松林地的土壤基本理化性质呈现显著的区域分异(表 2)。土壤酸碱度方面,除 XY 呈中性(pH 为 7.13)外,其余 7 个样地均呈酸性,其中 WZ 酸性最强(pH 为 4.17)。土壤有机碳和养分含量整体表现出强空间变异性,有机碳变异系数高达 89.70%。其中,WZ 样地的 SOC、TN、TP、AN 及 AP 含量均居 8 地之首,表明其土壤养分储量最为丰富;而 WH 样地的多项指标均处于较低水平,土壤贫瘠化较为严重。

表 2 不同崩岗侵蚀区马尾松林土壤基本理化性质

| Table 2 Basic soil physicochemical properties of <i>Pinus massoniana</i> forest in different collapsing gully erosion areas |            |                               |                              |                              |                              |                              |                               |                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 样地                                                                                                                          | pH         | SOC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | TN/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | TP/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | TK/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | AN/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | AP/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | AK/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
| 湖北崇阳(CY)                                                                                                                    | 4.68±0.01c | 17.83±0.10c                   | 1.18±0.04c                   | 0.15±0c                      | 20.31±0.46a                  | 0.074±0c                     | 8.26±0.06c                    | 104.36±0.12b                  |
| 江西新余(XY)                                                                                                                    | 7.13±0.01a | 29.26±0.35b                   | 1.79±0.05b                   | 0.26±0b                      | 18.48±0.14b                  | 0.146±0b                     | 3.77±0.05e                    | 104.97±0.05b                  |
| 江西鹰潭(YT)                                                                                                                    | 4.32±0.03d | 5.60±0.20d                    | 0.35±0.01e                   | 0.15±0.04c                   | 6.68±0.16e                   | 0.037±0d                     | 4.15±0.02de                   | 27.51±0.44e                   |
| 江西赣县(GX)                                                                                                                    | 5.03±0.09b | 18.15±0.50c                   | 0.97±0.04d                   | 0.16±0.03c                   | 11.53±0.27c                  | 0.118±0.01c                  | 9.54±0.12b                    | 129.00±0.99a                  |
| 广东五华(WH)                                                                                                                    | 4.46±0.06d | 4.12±0.31d                    | 0.52±0.02e                   | 0.06±0.01d                   | 2.91±0.07f                   | 0.013±0e                     | 6.35±0.02d                    | 15.04±0.34f                   |
| 福建福州(FZ)                                                                                                                    | 4.90±0.10b | 4.70±0.06d                    | 0.41±0.01e                   | 0.13±0c                      | 19.32±0.44a                  | 0.018±0e                     | 3.21±0.09e                    | 104.99±0.21b                  |
| 广东湛江(ZJ)                                                                                                                    | 4.22±0.05d | 28.36±0.63b                   | 0.97±0.01d                   | 0.25±0.02b                   | 4.67±0.10e                   | 0.130±0.01b                  | 12.75±0.69a                   | 49.87±0.09d                   |
| 广西梧州(WZ)                                                                                                                    | 4.17±0.04d | 57.31±0.56a                   | 2.48±0.05a                   | 0.30±0a                      | 14.96±0.04c                  | 0.212±0a                     | 11.78±0.19a                   | 72.75±0.42c                   |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同样地间差异显著( $p<0.05$ )。

2.2 土壤团聚体稳定性区域分异特征

2.2.1 团聚体稳定性总体特征 湿筛法测定结果表明,8 个马尾松林样地土壤团聚体粒径组成存在显著差异(图 2)。

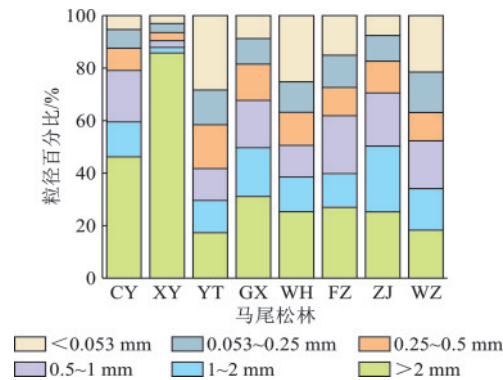


图 2 不同马尾松林土壤团聚体粒径组成特征  
Fig.2 Characteristics of soil aggregate size distribution in different *P. massoniana* forests

XY 以  $>2$  mm 水稳性大团聚体为主,含量达 85.00% 以上,显著高于其他样地, $<0.053$  mm 分散颗粒占比最低(3.03%),表明其土壤结构稳定性最佳;CY、GX 和 ZJ 大团聚体占比高、细颗粒占比低,

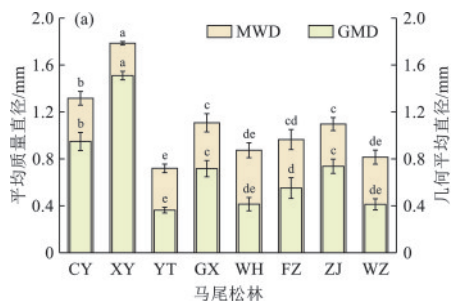
结构稳定性优异;YT 的大团聚体占比最低(17.31%), $<0.053$  mm 分散颗粒占比最高(28.35%),土壤结构最差。WH 和 WZ 大团聚体占比低、细颗粒占比高,结构稳定性较差。FZ 团聚体粒径分布均衡,结构质量中等。整体来看,XY、CY、GX、ZJ 样地土壤结构优良,YT、WH、WZ 样地土壤结构有待改善。

8 个崩岗侵蚀区马尾松林地土壤团聚体稳定性指标呈现显著的区域分异特征(图 3)。其中,XY 各项指标表现最优, $R_{0.25}$  为 93.54%,MWD 为 1.78 mm,GMD 为 1.51 mm,均为所有区域最高,K 值 $[0.074(t\cdot hm^2\cdot h)/(hm^2\cdot MJ\cdot mm)]$ 最低,表明该区域 $>0.25$  mm 水稳性大团聚体占比高,团聚体整体粒径大、分布集中,抗破碎与抗水蚀能力最强,土壤结构稳定性最优。

CY、GX、ZJ 等区域土壤结构稳定性表现良好, $R_{0.25}$  均高于 80.00%,MWD、GMD 处于较高水平,K 值均低于 $0.150(t\cdot hm^2\cdot h)/(hm^2\cdot MJ\cdot mm)$ ,大团聚体占比充足,团聚体破碎程度低,结构稳定性显著优于 YT、WH 等区域。

YT、WH、WZ 土壤结构稳定性表现最差,YT 的  $R_{0.25}$  为 58.00%,MWD 为 0.72 mm,GMD 为 0.37 mm,

均为全组最低,  $K$  值  $[0.260(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$  最高; WH、WZ 的  $R_{0.25}$  均低于 65.00%,  $K$  值均高于  $0.220(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ , 3 项稳定性核心指标 ( $R_{0.25}$ 、MWD、GMD) 显著低于 XY、CY 等区



注: 图柱上方不同小写字母表示不同马尾松林土壤在同一处理条件下差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 3 不同马尾松林土壤团聚体稳定性与土壤可蚀性

Fig.3 Soil aggregate stability and soil erodibility in different *P. massoniana* forests

2.2.2 团聚体稳定性的区域聚类特征 根据 MWD、GMD、 $R_{0.25}$  及  $K$  值的系统聚类分析(图 4), 8 个样地可划分为 3 个类型区。

I 类(高稳定性-低可蚀区): 仅 XY。该区土壤具有极显著高于其他样地的 MWD、GMD、 $R_{0.25}$  ( $p < 0.01$ ),  $K$  值最低, 表明土壤团聚体结构稳定, 抗蚀能力最强。

II 类(中等稳定性-中等可蚀区): 包括 CY、GX、ZJ、FZ。该区土壤团聚体稳定性指标显著低于 XY 但高于其余样地,  $K$  值为  $0.116 \sim 0.148(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ , 处于中等水平。

III 类(低稳定性-高可蚀区): 包括 YT、WH、WZ。该区土壤 MWD、GMD、 $R_{0.25}$  均处于低位 ( $\text{MWD} < 1.00 \text{ mm}$ ,  $\text{GMD} < 0.60 \text{ mm}$ ,  $R_{0.25} < 75.00\%$ ),  $K$  值高达  $0.183 \sim 0.256(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ , 侵蚀风险最高。

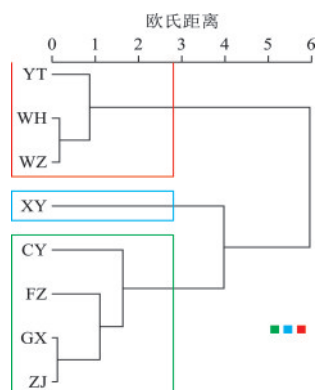
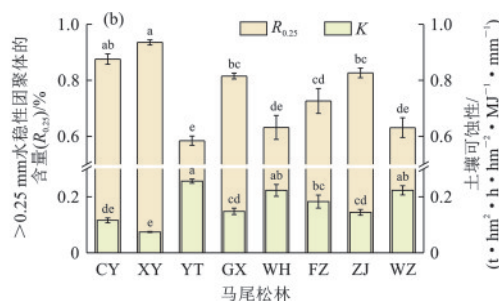


图 4 基于土壤团聚体稳定性及可蚀性指标的样地系统聚类

Fig.4 Cluster analysis of sample plots based on soil aggregate stability and erodibility indicators

值得注意的是, WZ 土壤有机碳含量居 8 地之首 ( $57.31 \text{ g/kg}$ ), 但其团聚体稳定性却处于低水平,  $K$  值高达  $0.223(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ , 表明高有机碳积累并未有效提升团聚体稳定性, 可能存在有机质、铁铝氧化物或黏土矿物组成的特殊调控机制。

域, 表明该类区域大团聚体占比不足, 小粒径团聚体占比高, 团聚体易破碎, 抗侵蚀能力弱, 土壤结构稳定性差。FZ 区域各项指标处于中等水平, 结构稳定性介于优良与较差区域之间。



### 2.3 土壤团聚体稳定性与理化因子的相关性

Pearson 相关分析(图 5)表明, 土壤团聚体稳定性指标与理化因子间存在显著关联。团聚体稳定性指标之间呈极显著正相关,  $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 之间呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 而三者与土壤可蚀性因子  $K$  均呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 表明水稳性大团聚体质量分数越高, 团聚体平均直径越大, 土壤抗侵蚀能力越强。



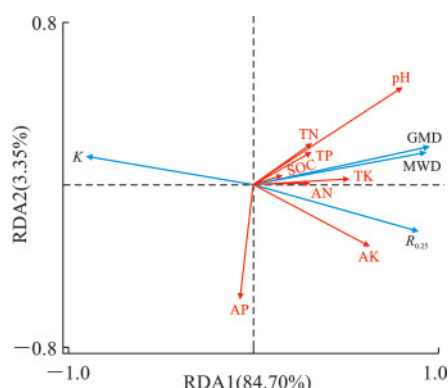
图 5 土壤团聚体稳定性指标与理化因子的相关性

Fig.5 Correlations between soil aggregate stability indicators and physicochemical properties

在理化因子中, pH 是驱动团聚体稳定性最关键的因子, 与  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与  $K$  呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 是驱动团聚体稳定性的关键因子; 速效钾与  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 亦呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 但与  $K$  无显著相关性。SOC、TN、TP、AN 和 AP 与团聚体稳定性指标均无显著相关性, 表明在该研究区, 这些因子并非团聚体稳定性的主要控制因素。全钾与  $K$  呈显著负相关 ( $r = -0.48, p < 0.05$ ), 表明钾素对土壤可蚀性具有一定抑制作用。整体而言, pH 是影响崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体稳定性的核心驱动因子, 酸性环境不利于水稳性大团聚体的形成与稳定, 进而加剧土壤侵蚀风险。

## 2.4 基于冗余分析的关键驱动因子识别

为量化各土壤理化因子对团聚体稳定性及可蚀性变异的独立贡献,以4个团聚体指标( $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 $K$ 值)为响应变量,8个理化因子(pH、SOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK)为解释变量,进行冗余分析(RDA)。由图6可知,前2排序轴分别解释总变异的84.70%和3.35%,累计解释率达88.05%。其中RDA1轴占绝对主导地位(84.70%),表明所选8个理化因子能够极好地解释团聚体稳定性及可蚀性的区域分异。在环境因子中,pH与MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 呈正相关,与 $K$ 值呈负相关,且其向量长度较长,表明pH是驱动团聚体稳定性分异最主要的环境因子。全氮(TN)、速效氮(AN)、全钾(TK)与团聚体稳定性指标呈正相关,对团聚体形成具有促进作用。全磷(TP)和速效磷(AP)的向量方向与MWD、GMD大致呈正交或钝角关系,其中AP位于第2轴负方向,对第1轴的贡献有限,表明磷素并非团聚体形成的关键胶结物质,与相关性分析中速效磷与MWD、GMD呈负相关趋势的结果相吻合。 $K$ 值与各环境因子的关系则与上述规律相反: $K$ 值与pH呈负相关,与TP、AP呈一定正相关趋势,进一步验证酸性条件下磷素积累可能伴随可蚀性升高的现象。



注:蓝色箭头表示团聚体指标,红色箭头表示环境因子。箭头方向表示因子与排序轴的相关性,箭头长度表示因子对排序的贡献强度。

图6 土壤团聚体稳定性与理化因子关系的RDA双序图

Fig.6 Redundancy analysis (RDA) biplot showing the relationship between soil aggregate stability and physico-chemical properties

## 3 讨论

### 3.1 崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体粒径分布及稳定性特征的区域分异机制

本研究发现,南方崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体稳定性呈现显著的空间异质性,I类区(XY)表现出极高的团聚体稳定性,而Ⅲ类区(YT、WH、WZ)样地则处于低稳定性水平,Ⅱ类区(CY、GX、FZ、ZJ)样地则是保持着中等稳定性。此区域分异格局可从胶结物质角度解释。I类区pH为7.13,属于中性土壤,Ⅱ类区和Ⅲ类区pH为4.17~5.03,处于酸性至弱酸性

范围。Han等<sup>[26]</sup>对马尾松人工林的研究发现, $\text{Ca}^{2+}$ 在团聚体内部胶结中的特殊作用,即当土壤中交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 充足时,大团聚体的形成和稳定得以促进,当pH低于5.00时,交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 含量显著下降,Ca-SOC的胶结功能受限;郑勤敏等<sup>[27]</sup>对福建安溪崩岗崩壁土壤的研究发现,游离态和无定形态铁铝氧化物含量与土壤黏聚力呈显著正相关,而土壤pH在不同土层间的差异显著。这意味着在较强酸性条件下(如本研究中Ⅲ类区 $\text{pH} < 4.50$ ),铁铝氧化物的胶结功能受到抑制,直接导致土壤抗剪强度下降,侵蚀风险升高。本研究中I类区样地(pH为7.13)处于中性范围,其高团聚体稳定性可能源于Ca-SOC和交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 的有效保护;Ⅱ、Ⅲ类区样地(pH为4.17~5.03)处于酸性阈值区间,Ca-SOC显著减少,但尚未完全耗竭。因此,I类区样地的团聚体稳定性优于Ⅱ、Ⅲ类区样地。

RDA显示,土壤pH被识别为驱动团聚体稳定性的关键因子,与MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 呈显著正相关,而与 $K$ 值呈极显著负相关,此关系在本研究的聚类分异中得到直观印证。在崩岗侵蚀区极端退化环境下,土壤酸度通过削弱钙键结合有机碳(Ca-SOC)和交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 的胶结作用,间接制约有机碳对团聚体稳定性的贡献<sup>[15]</sup>。相关分析表明,速效钾与MWD、GMD呈显著正相关,说明部分样地可能通过较高的速效钾维持中等稳定性;而Ⅲ类区样地( $\text{pH} < 4.50$ )处于较强酸性范围,可能导致Ca-SOC的胶结功能基本丧失, $\text{H}^+$ 对团聚体稳定性的破坏效应趋于饱和,此时即使SOC质量分数较高(如WZ的SOC含量为57.31 g/kg),也难以弥补胶结物质的结构性缺失。pH对团聚体稳定性的影响并非直接作用,而是通过调控胶结物质的形态与有效性间接实现。

WZ样地呈现高有机碳低-团聚体稳定性-高可蚀性的异常模式,具体成因可能包括3个方面:第一,该样地土壤呈强酸性(pH为4.17),严重抑制微生物活性,使得新鲜有机质难以被分解转化为具有胶结作用的腐殖物质<sup>[28]</sup>。第二,强酸性条件下,铁铝氧化物主要以无定形态存在,其胶结效率低于晶质氧化铁,难以有效包裹有机质形成稳定的有机-无机复合体<sup>[29]</sup>。本研究虽未直接测定铁铝氧化物形态,但崩岗区相关研究为机制推断提供重要依据。郑勤敏等<sup>[27]</sup>研究表明,游离态铁铝氧化物(Fed、Ald)和无定形态铁铝氧化物(Feo、Alo)含量是影响崩壁抗剪强度的主要土壤因子。在较强酸性条件下,铁铝氧化物主要以无定形态存在,虽含量可能较高,但其单位胶结效率低于晶质形态。谯思懿等<sup>[30]</sup>研究发现,非晶形氧化铁含量主要受有机碳正向影响,而其他形态金属氧化物含量受pH负向影响,进一步说明在较强酸性条件下,即使有机碳含量高,铁铝胶结剂的形成和有效性也可能受限。可以推测,WZ样地虽SOC含

量高,但若缺乏足量且有效的铁铝氧化物作为无机桥梁,有机碳难以与矿物颗粒形成稳定的有机-无机复合体,无法有效提升团聚体稳定性。第三,WZ样地(狮卧山)作为天然林,其凋落物以马尾松针叶为主,木质素含量高、分解速率慢,导致土壤有机质以惰性组分为主,活性有机碳占比低<sup>[31]</sup>。这3个方面因素的叠加,使得高有机碳含量未能有效转化为稳定的团聚体结构。针对Ⅲ类区的分区治理,建议对 $\text{pH}<4.50$ 的样地适量施用石灰或白云石粉,将 $\text{pH}$ 提升至5.00以上,补充交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等盐基离子,促进Ca-SOC的形成。同时,优先选择深根性乔木与固氮灌木的复合配置模式,通过根系穿插和凋落物输入双重作用改善土壤结构。

### 3.2 土壤可蚀性特征及其与团聚体稳定性的耦合关系

土壤可蚀性 $K$ 值与团聚体稳定性指标呈完全相反的区域排序,XY的 $K$ 值最低 $[0.074(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})]$ ,而YT、WH、WZ的 $K$ 值高达 $0.223\sim 0.256(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$ ,变异系数达42.80%,表明不同崩岗区土壤可蚀性差异极为显著。此结果与南方红壤区土壤可蚀性的已有认识相符。何圣嘉等<sup>[32]</sup>研究指出,南方丘陵区红壤可蚀性普遍较高 $[K$ 值一般大于 $0.200(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})]$ ,马尾松林下土壤平均团聚度仅6.95%,土体分散率高达95.25%,可蚀性显著高于其他林种。本研究中Ⅲ类区(低稳定性-高可蚀区) $K$ 值达 $0.183\sim 0.256(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$ ,已接近或超过严重侵蚀阈值,侵蚀风险极高。进一步揭示在崩岗侵蚀区的极端退化环境下, $K$ 值的空间变异幅度更为显著,部分样地(如WZ)虽SOC含量极高,但 $K$ 值仍处于高位,暗示崩岗侵蚀区土壤可蚀性并非单纯受有机碳调控,而是受多重因子的复合影响。

团聚体稳定性与可蚀性的耦合关系在本研究中表现为 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD三者与 $K$ 值呈极显著负相关,表明 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性大团聚体含量和团聚体平均直径是决定土壤抗侵蚀能力的关键结构参数,此规律在马尾松林的相关研究中得到验证。赵海平等<sup>[6]</sup>对鄂中丘陵区不同林龄马尾松人工林的研究发现,土壤团聚体稳定性指标(MWD、GMD、 $R_{0.25}$ )与土壤可蚀性因子呈显著相关,且SOC分别解释团聚体稳定性和土壤可蚀性变异的22.00%和21.50%;王燕等<sup>[33]</sup>对不同林龄马尾松人工林的研究表明,土壤可蚀性 $K$ 值与黏粒、有机质含量呈极显著负相关,与粉粒呈极显著正相关,土壤质地和有机质是影响可蚀性的主要因子。

磷素在本研究中表现出与团聚体稳定性的负相关或无显著相关,RDA证实磷素不是崩岗红壤团聚体形成的关键胶结物质。本研究中速效磷与MWD、GMD呈负相关,可能与红壤区磷素的存在形态有关。在强酸性红壤中,铁铝氧化物是影响磷素形态和团聚体稳定性的关键因子。都江雪<sup>[34]</sup>基于南方典

型红壤长期施肥定位试验的研究表明,外源添加的磷能与土壤有机碳竞争铁铝氧化物表面的吸附位点,进而影响有机碳的分布和团聚体稳定性。在崩岗侵蚀区强酸性红壤中,外源磷或土壤原生磷素极易被铁铝氧化物固定,形成难溶性的磷酸铁和磷酸铝沉淀。这些沉淀物附着在黏粒矿物表面,可能占据有机质的吸附位点,反而抑制有机-无机复合体的形成<sup>[35]</sup>,从而对团聚体稳定性产生负向效应。过高的速效磷可能改变土壤微生物群落结构,抑制真菌的生长,而真菌菌丝是促进大团聚体形成的重要生物因素<sup>[36]</sup>。姜灿烂<sup>[37]</sup>对旱地红壤的研究发现,不同粒级团聚体中磷形态的差异直接影响团聚体对磷的固持与释放能力。由此可见,速效磷含量过高可能通过抑制真菌生长间接削弱团聚体稳定性。对于崩岗侵蚀区酸性红壤,本研究未直接测定铁铝氧化物形态、团聚体各粒级磷形态及真菌群落组成。建议后续研究开展磷素梯度培养试验,结合土壤磷分级分析、铁铝氧化物形态测定及真菌群落高通量测序,以明确磷素与崩岗红壤团聚体稳定性的关系。

系统聚类分析将8个样地划分为高稳定性-低可蚀区(Ⅰ类)、中等稳定性-中等可蚀区(Ⅱ类)和低稳定性-高可蚀区(Ⅲ类),此分类框架为崩岗侵蚀区马尾松林土壤质量评估提供定量依据。值得注意的是,Ⅲ类区样地(YT、WH、WZ)虽分属江西、广东、广西三省,但均表现出相似的低团聚体稳定性特征,暗示在区域尺度上,成土母质特性、地形部位和经营历史可能比地理位置更能决定土壤抗蚀能力<sup>[38]</sup>。因此,崩岗侵蚀区马尾松林土壤结构改良应关注 $\text{pH}$ 调节和铁铝氧化物形态的优化。XY样地可作为区域土壤结构改良的参照目标,而WZ样地则需进一步分析其有机质和铁铝胶结剂的关系。

## 4 结 论

1)南方崩岗侵蚀区马尾松林土壤团聚体稳定性呈现极显著的空间异质性。XY为高稳定性-低可蚀区,YT、WH、WZ为低稳定性-高可蚀区,CY、GX、ZJ、FZ处于中等水平。

2)WZ呈高有机碳-低团聚体稳定性-高可蚀性的异常特征,提示在 $\text{pH}<4.50$ 条件下高有机碳积累未能有效提升团聚体稳定性。

3)土壤 $\text{pH}$ 是驱动团聚体稳定性区域分异的關鍵因子。 $\text{pH}<4.50$ 条件下不利于交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 保存和Ca-SOC胶结功能发挥。

4)磷素对崩岗红壤团聚体形成的胶结作用有限,非区域分异的主导因子。

5)XY样地的模式(高碳、高氮、近中性 $\text{pH}$ )可作为崩岗侵蚀区马尾松林土壤结构改良的参照目标;WZ样地需进一步分析高碳氮转化机制。

## 参考文献:

- [1] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J].土壤学报,2018,55(6):1297-1312.  
Liao Yishan, Tang Changyuan, Yuan Zaijian, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of Southern China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6):1297-1312.
- [2] 张婉璐,袁再健,李定强,等.“崩岗”概念及其英文译法探析[J].中国水土保持科学,2020,18(5):136-143.  
Zhang Wanlu, Yuan Zaijian, Li Dingqiang, et al. Discussion of the “Benggang” concept and its English translation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(5):136-143.
- [3] 韦江杏,邓羽松,廖达兰,等.桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素[J].土壤学报,2023,60(3):749-761.  
Wei Jiangxing, Deng Yusong, Liao Dalan, et al. Spatial variation and influencing factors of soil limiting water content of granite collapsing gullies in southeast Guangxi[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3):749-761.
- [4] Wu Jiuling, Zha Ruibo, Zha Xuan, et al. Regulatory mechanism of soil and water conservation measures on understorey erosion in a subtropical hilly region [J]. Catena, 2024, 246: e108427.
- [5] 陈会玲,勾蒙蒙,刘常富,等.鄂中丘陵区不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质关系[J].生态环境学报,2024,33(10):1525-1533.  
Chen Huiling, Gou Mengmeng, Liu Changfu, et al. Relationship between understory plant diversity and soil physico-chemical properties of different aged pinus massoniana plantations in hilly region of central Hubei Province [J]. Ecology and Environment Sciences, 2024, 33(10):1525-1533.
- [6] 赵海平,勾蒙蒙,陈会玲,等.林龄对鄂中丘陵区马尾松人工林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性的影响[J].应用生态学报,2025,36(9):2729-2736.  
Zhao Haiping, Gou Mengmeng, Chen Huiling, et al. Effects of stand age on soil aggregate stability and soil erodibility in *Pinus massoniana* plantations in the hilly region of central Hubei Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(9):2729-2736.
- [7] 杨俊.南方红壤区马尾松人工林地浅沟表层土壤水稳性团聚体空间差异性[D].南昌:南昌工程学院,2019.  
Yang Jun. Spatial variability of water stable aggregates on ephemeral gully soil of *Pinus massoniana* artificial forest in southern red soil region [D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2019.
- [8] 谭文峰,许运,史志华,等.胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J].土壤学报,2023,60(5):1297-1308.  
Tan Wenfeng, Xu Yun, Shi Zhihua, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5):1297-1308.
- [9] Hamza A, Karčauskienė D, Mockevičienė I, et al. Soil aggregate dynamics and stability: Natural and anthropogenic drivers [J]. Agriculture, 2025, 15(23): e2500.
- [10] Wu Meixuan, Deng Boling, Qiu Guankai, et al. Seasonal freeze-thaw cycles drive soil aggregate turnover and nutrient redistribution in black soil, Northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2026, 255: e106807.
- [11] Dai Wei, Feng G, Huang Yanbo, et al. Soil aggregate stability and erosion resistance in response to integration of cover crops and poultry litter in a no-till rainfed soybean cropping system [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 244: e106245.
- [12] 王珊,毛玲.应用Le Bissonnais法研究不同植烟年限土壤团聚体的稳定性[J].西南农业学报,2017,30(5):1153-1157.  
Wang Shan, Mao Ling. Application of Le Bissonnais method to study stability of soil aggregate in different tobacco planting years [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(5):1153-1157.
- [13] Yang Miaomiao, Yang Qinke, Zhang Keli, et al. Global soil erodibility factor (K) mapping and algorithm applicability analysis [J]. Catena, 2024, 239: e107943.
- [14] 冷暖,邓羽松,林立文,等.南亚热带不同母质发育土壤团聚体特征及其稳定性[J].水土保持学报,2021,35(5):80-86.  
Leng Nuan, Deng Yusong, Lin Liwen, et al. Characteristics and stability of soil aggregates developed from different parent materials in the south subtropical region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5):80-86.
- [15] 彭子烨,谢美霞,林幸池,等.桂东南花岗岩崩岗区土壤团聚体稳定性及影响因素研究[J].土壤学报,2025,62(4):1010-1021.  
Peng Ziyue, Xie Meixia, Lin Xingchi, et al. Study on soil aggregate stability and influencing factors in granite Benggang area of southeast Guangxi [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4):1010-1021.
- [16] 张德斌.南方花岗岩区崩岗不同土层抗蚀性评价因子研究[D].福州:福建农林大学,2010.  
Zhang Debin. Studies on soil antierodibility assessment factors of different soil horizons of collapse gullies in granite region of Southern China [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [17] 杨洪炳,肖以华,许涵,等.城乡梯度下不同林分类型土壤团聚体分布及其稳定性[J].林业科学研究,2022,35(3):82-92.  
Yang Hongbing, Xiao Yihua, Xu Han, et al. Distribution and stability of soil aggregates in different forest types under an urban-rural gradient [J]. Forest Research, 2022, 35(3):82-92.
- [18] 覃慧婷,颜金柳,黄海梅,等.近自然化改造对马尾松人工林土壤团聚体有机磷组分含量变化的影响[J].广西植物,2024,44(7):1218-1231.  
Qin Huiting, Yan Jinliu, Huang Haimei, et al. Effects of close-to-nature transformation on content of soil organic phosphorus fractions in soil aggregates of *Pinus massoniana* plantations [J]. Guihaia, 2024, 44(7):1218-1231.
- [19] 黄海梅,颜金柳,李佳君,等.马尾松人工林异龄混交改造对土壤团聚体酶活性及酶化学计量比的影响[J].广西科学,2024,31(3):427-438.

- Huang Haimei, Yan Jinliu, Li Jiajun, et al. Effects of introducing other tree species of different ages into *Pinus massoniana* plantation on activities and stoichiometric ratios of enzymes associated with soil aggregates [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3): 427-438.
- [20] 冯明汉, 廖纯艳, 李双喜, 等. 我国南方崩岗侵蚀现状调查[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 66-68.
- Feng Minghan, Liao Chunyan, Li Shuangxi, et al. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in southern China [J]. Yangtze River, 2009, 40(8): 66-68.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- Lu Rukun. Methods of soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [23] Ren Cheng, Liu Kesi, Dou Pengpeng, et al. The changes in soil microorganisms and soil chemical properties affect the heterogeneity and stability of soil aggregates before and after grassland conversion [J]. Agriculture, 2022, 12(2): e307.
- [24] Zhu Xuchao, Liang Yin, Tian Zhiyuan, et al. Simulating soil erodibility in southeastern China using a sequential Gaussian algorithm [J]. Pedosphere, 2021, 31(5): 715-724.
- [25] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(1): 142-147.
- [26] Han Z G, Zhou Y C, Ren J J. Effects of organic matter-bound multivalent cations on the internal and external formation of soil aggregates under *Pinus massoniana* forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 76(6): 568-576.
- [27] 郑勤敏, 王祖梅, 黄奕铭, 等. 东南崩岗侵蚀区崩壁土壤岩石特性的空间分异特征[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(1): 53-62.
- Zheng Qinmin, Wang Zumei, Huang Yiming, et al. Spatial differentiation of geotechnical characteristics of soil in a Benggang gully wall in southeast China [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(1): 53-62.
- [28] 张雪, 梅莉, 宋利豪, 等. 模拟氮沉降对马尾松土壤微生物群落结构及温室气体释放的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1917-1925.
- Zhang Xue, Mei Li, Song Lihao, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on microbial community and greenhouse gases emission of *Pinus massoniana* soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1917-1925.
- [29] 郭杏妹, 吴宏海, 罗媚, 等. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6): 515-521.
- Guo Xingmei, Wu Honghai, Luo Mei, et al. The morphological change of Fe/Al-oxide minerals in red soils in the process of acidification and its environmental significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(6): 515-521.
- [30] 譙思懿, 李璇, 王辰玉, 等. 不同胶结类型土壤团聚体中金属氧化物的粒径分异规律[J/OL]. 中国水土保持科学(中英文), 1-16 [2026-05-27]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20251201.1131.002>.
- Qiao Siyi, Li Xuan, Wang Chenyu, et al. Distribution of metal oxides among aggregate size classes for soils in different cementing types [J/OL]. Science of Soil and Water Conservation (Chinese and English), 1-16 [2026-05-27]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20251201.1131.002>.
- [31] 陈甜. 亚热带典型森林凋落物添加对土壤有机碳周转和稳定性影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.
- Chen Tian. Effects of litter addition on soil organic carbon turnover and stability in typical subtropical forests [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022.
- [32] 何圣嘉, 谢锦升, 杨智杰, 等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2011, 9(6): 65-70.
- He Shengjia, Xie Jinsheng, Yang Zhijie, et al. Status, causes and prevention of soil and water loss in *Pinus massoniana* woodland in hilly red soil region of southern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 65-70.
- [33] 王燕, 宫渊波, 尹艳杰, 等. 不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 23-27.
- Wang Yan, Gong Yuanbo, Yin Yanjie, et al. Soil and water conservation functions of *Pinus massoniana* plantation at different forest ages [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 23-27.
- [34] 都江雪. 施磷对土壤团聚体中有机碳分布的影响机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- Du Jiangxue. The mechanism of phosphorus addition affecting on organic carbon distribution in soil aggregates [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.
- [35] 杨威. 茶园根际土壤磷的形态特征及其吸附解吸动力学研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- Yang Wei. Phosphorus form characteristics and its adsorption-desorption kinetics on rhizosphere soil in tea garden of South China [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [36] 董仲伟, 鲁娜. 农田生态系统中土壤微生物群落结构对长期施肥的响应机制[J]. 广西农业机械化, 2025(2): 21-23.
- Dong Zhongwei, Lu Na. Response mechanism of soil microbial community structure to long-term fertilization in farmland ecosystem [J]. Guang Xi Agricultural Mechanization, 2025(2): 21-23.
- [37] 姜灿烂. 长期不同施肥制度下红壤旱地团聚体特性及其无机磷分级研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- Jiang Canlan. Study on soil aggregates characteristic and soil inorganic P fraction in upland red soil under long-term different fertilization [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [38] Eger A, Koele N, Caspari T, et al. Quantifying the importance of soil-forming factors using multivariate soil data at landscape scale [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2021, 126(8): e238854399.