

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.03.041 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.03.041

夏栋,郑荣芳,康东,等.不同地带花岗岩风化壳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(3):159-166,199.

XIA Dong, ZHENG Rongfang, KANG Dong, et al. Soil aggregate stability and soil erodibility of *Pinus massoniana* forests on granite weathering crusts in different zones[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):159-166,199.

## 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤 团聚体稳定性及土壤可蚀性

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

(1.三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌443002; 2.水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心(三峡大学),湖北宜昌443002; 3.三峡大学土木与建筑学院,湖北宜昌443002)

**摘要:** [目的] 为探究不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体稳定性及可蚀性特征。[方法] 以湖北罗田、湖北崇阳、湖南娄底、江西新余、广西南宁和广西崇左等6个典型花岗岩风化壳发育的马尾松林土壤为研究对象,采用湿筛法测定土壤团聚体的粒径分布,计算 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和土壤可蚀性K值,进一步分析理化性质对团聚体稳定性和可蚀性的影响。[结果] 1)不同样地团聚体含量差异显著,且均以 $>0.25$  mm粒级团聚体为主(82.00%~93.54%),其中新余的大团聚体含量显著高于崇左。2)各样地团聚体稳定性和可蚀性呈现显著差异,新余稳定性最优,可蚀性最低,罗田稳定性最差,可蚀性最高。3)相关性分析表明, $>2$  mm粒级团聚体与稳定性指标呈正相关,与可蚀性呈负相关,而其他粒径与团聚体稳定性指标呈负相关,与可蚀性呈正相关。4)RDA分析显示,土壤团聚体稳定性与pH呈正相关,与速效磷呈负相关,而土壤可蚀性则表现出相反的趋势,表明pH和速效磷是主导样地团聚体稳定性与可蚀性变化的核心环境因子,二者合计解释率达77.7%( $p<0.01$ )。[结论] 花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体稳定性与可蚀性受pH、速效磷及粒径组成综合影响,在评估土壤侵蚀风险时应优先关注质地和酸碱度指标,罗田、南宁和崇左等地因高可蚀性需作为水土保持优先防治区域,研究结果为花岗岩风化壳区马尾松林生态系统的水土流失防控提供科学依据。

**关键词:** 花岗岩风化壳; 马尾松林; 土壤团聚体; 土壤可蚀性; 水土流失

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2026)03-0159-08

### Soil Aggregate Stability and Soil Erodibility of *Pinus massoniana* Forests on Granite Weathering Crusts in Different Zones

XIA Dong<sup>1,2</sup>, ZHENG Rongfang<sup>1,2</sup>, KANG Dong<sup>1,2</sup>, CHEN Hongfeng<sup>1</sup>, LIU Daxiang<sup>2,3</sup>, WU Bin<sup>1,2</sup>, GUO Fei<sup>3</sup>

(1.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;  
2.Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique Using Cement-based Materials  
(China Three Gorges University), Yichang, Hubei 443002, China; 3.College of Civil Engineering & Architecture,  
China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the stability and erodibility characteristics of soil aggregates in *Pinus massoniana* forests on granite weathering crusts in different zones. [Methods] Soil samples were collected from six sites of typical *P. massoniana* forests developed on granite weathering crusts in Luotian (Hubei), Chongyang (Hubei), Loudi (Hunan), Xinyu (Jiangxi), Nanning (Guangxi), and Chongzuo (Guangxi). The particle size distribution of soil aggregates was determined using the wet sieving method. The content of water-stable aggregates  $> 0.25$  mm ( $R_{0.25}$ ), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and soil erodibility K value were calculated. Furthermore, the influence of physicochemical properties on aggregate

收稿日期:2026-02-25 修回日期:2026-04-04 录用日期:2026-04-13 网络首发日期(www.cnki.net):2026-04-22

资助项目:国家自然科学基金项目(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://stbcbx.alljournal.com.cn

stability and erodibility was analyzed. [Results] 1) The aggregate content differed significantly among sites, and aggregates  $>0.25$  mm dominated (82.00%–93.54%). Among them, the macroaggregate content in Xinyu was significantly higher than that in Chongzuo. 2) There were significant differences in aggregate stability and erodibility among the sites. The aggregates from Xinyu exhibited the highest stability and the lowest erodibility, while those from Luotian showed the lowest stability and the highest erodibility. 3) Correlation analysis indicated that aggregates  $>2$  mm were positively correlated with stability indicators and negatively correlated with erodibility, while aggregates of other sizes were negatively correlated with stability indicators and positively correlated with erodibility. 4) RDA analysis revealed that soil aggregate stability was positively correlated with pH and negatively correlated with available phosphorus, while soil erodibility showed an opposite trend. This indicated that pH and available phosphorus were the core environmental factors driving changes in aggregate stability and erodibility across the sample plots, together explaining 77.7% of the variation ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] The stability and erodibility of soil aggregates in *P. massoniana* forests on granite weathering crusts are comprehensively influenced by pH, available phosphorus, and particle size composition. When assessing soil erosion risk, priority should be given to texture and pH. Luotian, Nanning, and Chongzuo, due to their high erodibility, should be regarded as priority areas for soil and water conservation. The research findings provide a scientific basis for the prevention and control of soil erosion in the *P. massoniana* ecosystem in granite weathering crust areas.

**Keywords:** granite weathering crust; *Pinus massoniana* forest; soil aggregates; soil erodibility; soil erosion

Received: 2026-02-25

Revised: 2026-04-04

Accepted: 2026-04-13

Online(www.cnki.net): 2024-04-22

我国南方花岗岩地区由于母岩结构致密、节理发育,在亚热带高温多雨气候条件下形成深厚的风化壳<sup>[1]</sup>,其内部富含疏松的石英颗粒,在高温炙烤与暴雨径流的作用下容易遭受冲刷剥离,导致崩岗侵蚀、沟蚀等剧烈土壤侵蚀频发,成为区域生态安全的重要隐患<sup>[2]</sup>。此类土壤侵蚀不仅会造成花岗岩风化壳区土壤肥力下降、土地生产力衰退<sup>[3]</sup>,还会加剧洪涝灾害、破坏生态系统稳定<sup>[4]</sup>,制约着区域的可持续发展。马尾松(*Pinus massoniana*)因其耐贫瘠、适应性强而在该区域广泛分布,成为花岗岩风化壳区植被演替的优势树种<sup>[5]</sup>,在维持区域生态稳定和水土保持等方面发挥着重要作用<sup>[6]</sup>。然而,马尾松林的土壤保持功能本质上取决于其土壤结构的稳定性,尤其是土壤团聚体的抗侵蚀能力<sup>[7]</sup>。因此,开展花岗岩风化壳区马尾松林的土壤团聚体稳定性研究,可为南方花岗岩区水土流失防控和马尾松林生态系统管理提供科学依据。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元<sup>[8]</sup>,其组成与稳定性直接影响土壤孔隙状况、水分入渗及抗侵蚀能力,是评价土壤质量的重要指标<sup>[9]</sup>。土壤可蚀性则综合反映土壤被水力侵蚀的难易程度,是土壤侵蚀预报模型中的核心参数<sup>[10]</sup>。已有研究<sup>[8-9]</sup>表明,土壤团聚体稳定性与可蚀性密切相关,一般而言,团聚体稳定性越高,土壤抗蚀能力越强,可蚀性

*K*值越低。该关系主要通过土壤胶结物质、化学环境、矿物组成及养分状况等多因子的共同调控<sup>[11]</sup>。马尾松作为南方花岗岩区分布较广的植被类型,其土壤胶结物质的形成与稳定性受母质风化程度、气候条件及植被类型的综合影响<sup>[7]</sup>,而团聚体稳定性和可蚀性则能有效反映该区域土壤结构的演化特征与抗侵蚀能力<sup>[12]</sup>。当前,针对南方马尾松林土壤团聚体及可蚀性的研究发现,马尾松林可通过根系分泌物和凋落物输入促进土壤团聚体形成<sup>[13]</sup>,且成熟的马尾松林具有更强的抗侵蚀能力<sup>[14]</sup>,但研究主要集中在林分改造对土壤结构的影响<sup>[13]</sup>、不同林龄马尾松林土壤稳定性特征<sup>[14]</sup>,以及马尾松林与裸地或其他林分的对比<sup>[15]</sup>等方面,针对花岗岩风化壳地区马尾松林土壤稳定性和可蚀性跨地带的系统对比较为缺乏。

因此,本研究以湖北罗田、湖北崇阳、湖南娄底、江西新余、广西南宁和广西崇左等6个区域天然马尾松林土壤为研究对象,测定不同花岗岩风化壳区马尾松林的粒径分布,并计算土壤团聚体稳定性和可蚀性,分析土壤团聚体稳定性与粒径及土壤可蚀性之间的关系,探讨理化性质对土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性影响,以为花岗岩风化壳区马尾松林水土保持提供数据支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于我国南方花岗岩地带的天然马尾松林,涵盖湖北、湖南、江西、广西4省(区)的6个典型采样点(22° 09'00" ~30° 41'24"N, 107° 04'48" ~115° 19'48"E),属亚热带季风气候,年平均气温 16.5~

22.8 °C,年降水量 1 200~1 800 mm,由北向南递增,降水集中于4—9月,雨热同期。各样地成土母质均为花岗岩,植被类型主要为天然马尾松林,土壤类型自北向南依次为黄棕壤、红壤、赤红壤,呈明显的地带性分布规律。地形以低山丘陵为主,坡度多在 10°~25°,是我国南方水土流失的敏感区域。样地具体信息见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

样地代码	采样点位置	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	土壤类型	林龄/a	郁闭度/%
LT	湖北省黄冈市罗田县	30°41'24"	115°19'48"	280	黄棕壤	25	83
CY	湖北省咸宁市崇阳县	29°33'36"	113°52'48"	150	黄棕壤	27	82
LD	湖南省娄底市双峰县	27°23'24"	112°10'12"	120	红壤	22	83
XY	江西省新余市渝水区	27°45'00"	114°58'12"	90	红壤	24	80
NN	广西壮族自治区南宁市	22°51'36"	108°09'36"	80	赤红壤	26	85
CZ	广西壮族自治区崇左市	22°09'00"	107°04'48"	110	赤红壤	25	83

### 1.2 土壤样品采集

2025年7—8月选取坡度、坡向、坡位一致且无明显人为干扰的6个区域的天然马尾松林土壤为研究对象。每个区域分别设置3块调查样地,样地规格为 10 m×10 m的样方,在每个样方内按五点采样法布设5个采样点,3块样地共 15个采样点。清除样地表凋落物与腐殖层后,用不锈钢铲从每个采样点采集 0~20 cm的表层原状土,去除肉眼可见的砾石、植物残体、根系和土壤动物,将同一样方内5个采样点的土样混合为1个样品,即每个区域获得3个重复样品,待土样采集完毕后将土填回,恢复样地原貌。将采集的土壤样品装入硬质塑料盒中带回实验室,自然风干用于后续团聚体含量和基本理化性质及有机碳(SOC)的测定,所有测定指标均设置3组平行重复。

### 1.3 测定方法

土壤团聚体分级方法采用湿筛法<sup>[16]</sup>,具体操作:称取风干土样 50 g于 2 mm筛上,在室温下用蒸馏水浸润 5 min,利用自动振荡筛(套筛直径为 2、1、0.5、0.25、0.053 mm),以 30次/min速度在蒸馏水中振荡 30 min,上下振幅为 3 cm,将各筛上的团聚体样品用蒸馏水冲洗至烧杯中,获得粒径分别为 >2、1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.053~0.25 mm的水稳性团聚体,将 <0.053 mm水稳性团聚体在桶内沉降 48 h,用虹吸管吸除上清液后,剩余团聚体转至烧杯中。将所

有盛有团聚体的烧杯置于 50 °C烘箱中烘干至恒重,并称重记录,每个土样设置3组重复,计算各粒级的质量分数和指标。

土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法<sup>[17]</sup>测定;pH采用电位法(1:1.25)测定;全氮采用凯氏定氮法<sup>[18]</sup>测定;全磷采用酸溶-钼锑抗比色法<sup>[19]</sup>测定;全钾采用火焰光度法<sup>[20]</sup>测定;速效氮采用碱解扩散法<sup>[17]</sup>测定;速效磷采用氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法<sup>[21]</sup>测定;速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法<sup>[17]</sup>测定。

### 1.4 数据处理与分析

土壤团聚体稳定性采用 >0.25 mm大团聚体含量( $R_{0.25}$ )、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)表示<sup>[22]</sup>,计算公式为:

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

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n \omega_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $n$ 为粒径分组的组数; $\bar{x}_i$ 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,%; $M_{>0.25}$ 为 >0.25 mm粒径土壤团聚体质量之和,g; $M_T$ 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>[23]</sup>,本研究土壤可蚀性 $K$ 按照SHIRAZI等<sup>[24]</sup>提出的计算公式:

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

所有试验数据整理和计算均使用 Excel 2021 软件进行,单因素方差分析(one-way ANOVA)和

Pearson相关性分析借助 SPSS 26 软件进行处理,使用 Origin 2024 软件进行作图,利用 Canoco 5.0 软件进

行各样地的所有土壤理化性质指标与团聚体稳定性及可蚀性之间的冗余分析,可得到不同样地土壤理化性质对团聚体稳定性及可蚀性的解释率。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤环境因子变化

由表2可知,XY的土壤pH最高,呈中性,其余样地均呈酸性。CZ的土壤有机碳质量分数为(48.9±1.35) g/kg,显著高于其他样地,LD的SOC质量分数最低,为(7.84±0.05) g/kg。NN的全氮质量分数最高,为(2.42±0.03) g/kg,显著高于其他样地,LD的

全氮质量分数最低。全磷的质量分数为0.15~0.35 g/kg,NN样地显著高于其他样地。CY和NN的全钾质量分数较高,分别为(20.31±0.48)、(20.09±0.24) g/kg,CZ的全钾质量分数最低,为(2.37±0.1) g/kg,显著低于其他样地。速效氮质量分数为0.05~0.21 g/kg,NN含量最高,LD含量最低。LT的速效磷质量分数为(29.46±0.25) mg/kg,显著高于其他样地,LD含量最低,为(3.34±0.04) mg/kg。速效钾质量分数为43.29~182.95 mg/kg,NN含量最高,显著高于其他样地,LD的含量最低。

表2 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* forests on granite weathering crusts in different zones

样地	pH	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
LT	4.90±0.01b	34.98±0.61b	1.27±0.03d	0.23±0.01c	18.44±0.24b	0.15±0.04b	29.46±0.25a	124.05±0.15b
CY	4.68±0.01c	17.83±0.10d	1.18±0.04d	0.15±0e	20.31±0.48a	0.07±0c	8.26±0.06d	104.36±0.13d
LD	4.15±0.01f	7.84±0.05e	1.02±0.10e	0.26±0b	11.72±0.19c	0.05±0c	3.34±0.04f	43.29±0.03f
XY	7.13±0.01a	29.26±0.34c	1.79±0.05c	0.26±0b	18.48±0.15b	0.15±0b	3.77±0.05e	104.97±0.04c
NN	4.37±0.02d	34.17±0.17b	2.42±0.03a	0.35±0a	20.09±0.24a	0.21±0a	15.53±0b	182.95±0.05a
CZ	4.25±0.03e	48.90±1.35a	2.30±0.02b	0.18±0d	2.37±0.10d	0.19±0a	13.11±0.01c	62.92±0.05e

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

### 2.2 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体组成及稳定性

各样地土壤团聚体粒径分布见图1。湿筛后6个样地土壤水稳性团聚体粒径分布存在明显差异。其中XY>2 mm 粒级团聚体含量最高,达85.77%,大团聚体优势明显。娄底>2 mm 粒级团聚体含量仅次于XY,占比为72.31%。CY、NN和CZ>2 mm 粒级团聚体占比相似,分别为46.22%、40.07%和55.5%。LT>2 mm 粒级团聚体含量最低,为27.13%,且微团聚体占比有所提升。

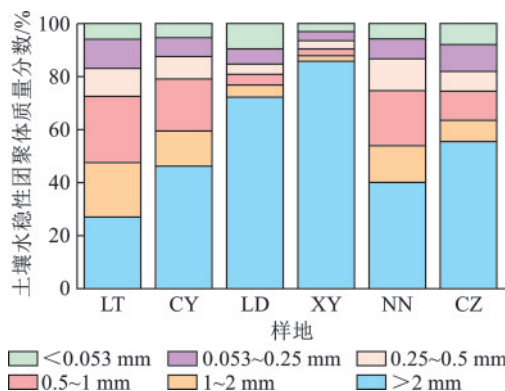


图1 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤水稳性团聚体分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of soil water-stable aggregates in *Pinus massoniana* forests on granite weathering crusts in different zones

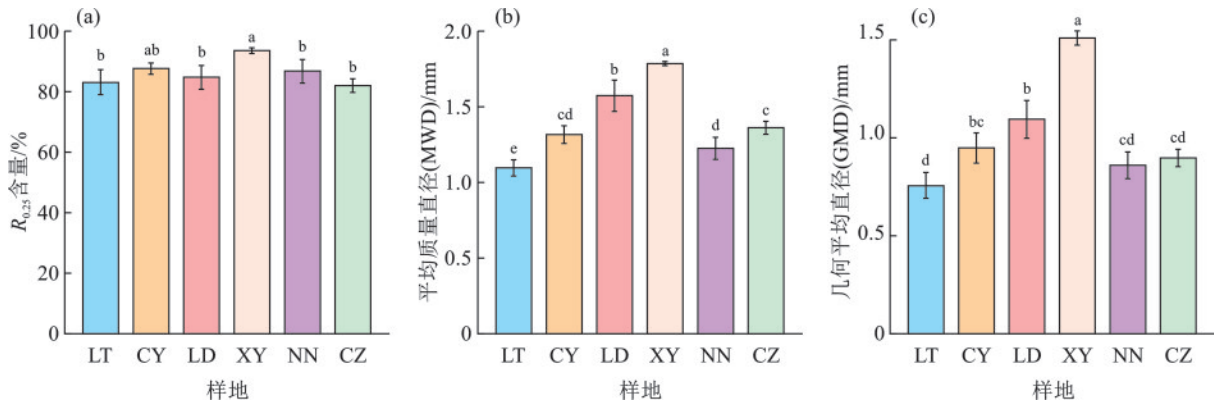
由图2可知,>2 mm 水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )以XY最高,达93.54%,显著高于其他样地;CY次之,达87.57%;CZ最低,达81.99%。MWD和GMD的变化范围分别为1.10~1.78、0.76~1.51 mm,在不同样地间具有显著性差异( $p<0.05$ ),且均以XY最高,LT最低。综上所述,XY的马尾松林土壤稳定性最佳。

### 2.3 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤可蚀性

由图3可知,6个样地的土壤可蚀性K值存在显著差异,变化范围为0.025~0.047 ( $t\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}$ )/( $\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm}$ ),从大到小依次为LT、NN、CZ、CY、LD和XY。整体来看,XY土壤可蚀性最低,而LT土壤可蚀性最高。

### 2.4 土壤理化性质与团聚体稳定性和可蚀性的相关性分析

不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤理化性质与团聚体稳定性及可蚀性的相关性分析见图4。pH与稳定性指标( $R_{0.25}$ 、MWD和GMD)呈极显著正相关,与可蚀性K值呈极显著负相关;全钾与 $R_{0.25}$ 呈显著正相关,与K值不相关;速效磷与MWD和GMD呈极显著负相关,与K值呈极显著正相关; $R_{0.25}$ 、MWD和GMD均与K值呈极显著负相关。综上所述,pH和速效磷是影响团聚体稳定性和可蚀性的关键因素。



注:图柱上方不同小写字母表示不同样地间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图2 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体稳定性特征

Fig.2 Stability characteristics of soil aggregates in *Pinus massoniana* forests on granite weathering crusts in different zones

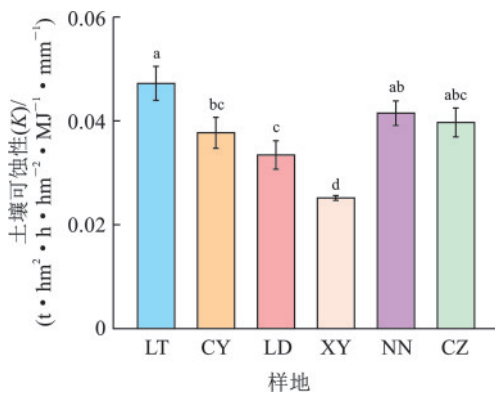
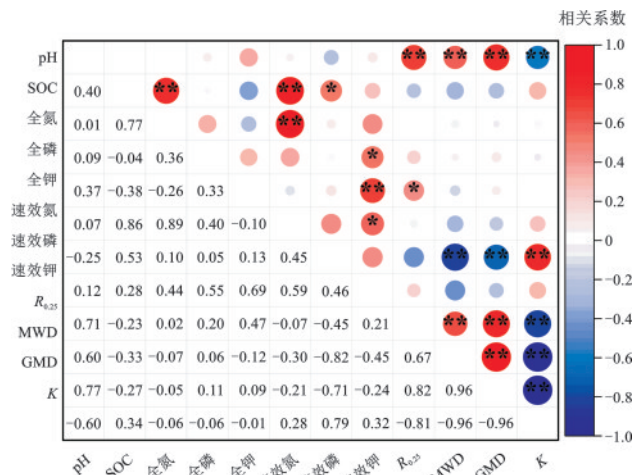


图3 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤可蚀性

Fig.3 Soil erodibility of *Pinus massoniana* forests on granite weathering crusts in different zones

相关;0.053~0.25、<0.053 mm 与  $R_{0.25}$  呈极显著负相关,其中 <0.053 mm 与 GMD 呈显著正相关,与 MWD 和 K 值相关性不显著。总体而言,大团聚体 (>2 mm)是提升土壤结构稳定性和降低可蚀性的重要粒径组分,而微团聚体的增加则会削弱土壤结构稳定性和抗侵蚀能力。



注:\*表示显著相关( $p < 0.05$ );\*\*表示极显著相关( $p < 0.01$ )。下同。

图4 土壤理化性质与团聚体稳定性和可蚀性的相关性分析  
Fig.4 Correlation analysis of soil physicochemical properties with aggregate stability and erodibility

土壤团聚体粒径与稳定性指标及可蚀性的相关性见图5。>2 mm 粒径团聚体与稳定性指标呈极显著正相关,与可蚀性 K 值呈极显著负相关;1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.053~0.25 mm 粒径团聚体与 MWD 和 GMD 呈极显著负相关,与 K 值呈极显著负

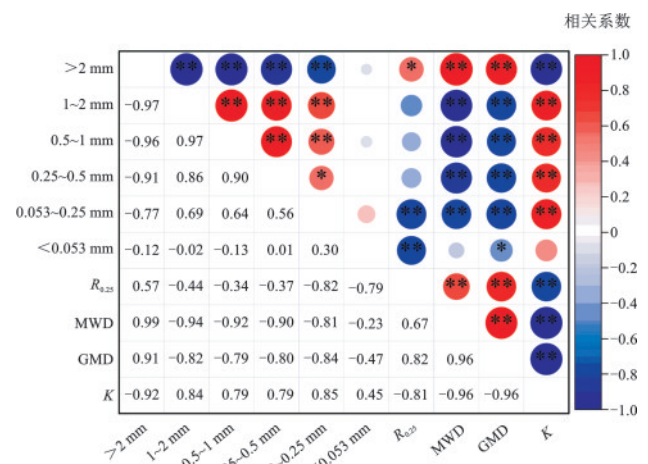
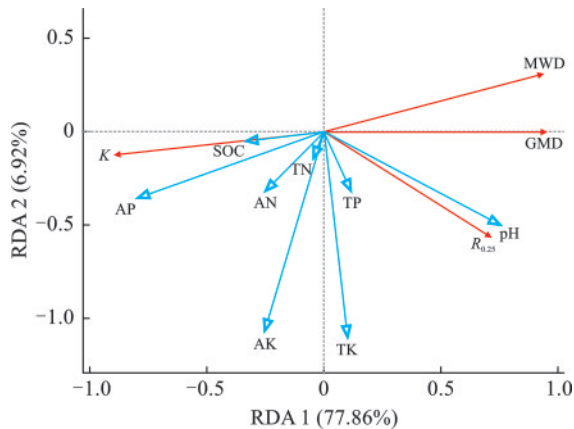


图5 土壤团聚体粒径与稳定性指标和可蚀性的相关性分析  
Fig.5 Correlation analysis of soil aggregate particle size with stability indicators and erodibility

由图6可知,第1轴和第2轴分别解释土壤团聚体稳定性指标( $R_{0.25}$ 、MWD、GMD)及可蚀性因子K值总变异的77.86%和6.92%,累计解释率达84.78%。RDA1轴主要反映pH与团聚体稳定性指标的正向关系,与速效磷(AP)、K值的负向关系。由表3可知,AP和pH是影响团聚体稳定性和可蚀性变异的主导环境因子,二者解释量分别达50.4%( $p = 0.004$ )和27.3%( $p = 0.002$ ),贡献率合计达77.7%,且均达到极显著水平;TK的解释量仅为3.8%( $p = 0.084$ ),未达到显著水平。综上,AP和pH是影响研究区花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体稳定性和可蚀性的关键因子。



注:空心箭头表示土壤理化性质,包括pH、SOC(有机碳)、TN(总氮)、TP(总磷)、TK(总钾)、AN(速效氮)、AP(速效磷)、AK(速效钾);实心箭头表示土壤团聚体稳定性指标和可蚀性;空心箭头和实心箭头的夹角可以反映各土壤理化性质与土壤团聚体稳定性及可蚀性之间的关系。

图6 土壤理化性质对团聚体稳定性和可蚀性的冗余分析

Fig.6 Redundancy analysis of soil physicochemical properties on aggregate stability and erodibility

表3 RDA分析中土壤理化性质对团聚体稳定性和可蚀性的解释率

Table 3 Explanation rates of soil physicochemical properties in RDA analysis for aggregate stability and erodibility

土壤性质	解释率/%	贡献率/%	F	p
AP	50.4	59.1	16.3	0.004
pH	27.3	32.0	18.4	0.002
TK	3.8	4.4	2.9	0.084

### 3 讨论

#### 3.1 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体粒径分布及稳定性特征

土壤团聚体是土壤结构的基本单元<sup>[25]</sup>,其组成与稳定性直接影响土壤的孔隙状况、水分入渗及抗侵蚀能力,是评价土壤质量的重要指标<sup>[11]</sup>。本研究发现,不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体粒径分布及稳定性指标存在显著的空间分异,大团聚体粒径含量和稳定性从高到低依次为XY、LD、CZ、CY、NN、LT。一方面XY因其接近中性的土壤条件,导致盐基饱和度相对较高,有利于钙、镁离子作为胶结剂促进微团聚体胶结成大团聚体<sup>[26]</sup>,同时适宜的pH环境也有利于微生物活动及其代谢产物(如多糖、菌丝)对团聚体的胶结作用<sup>[26-27]</sup>;另一方面,XY和LD等地气候相对湿润,马尾松林凋落物输入量较大,有机质分解与腐殖化过程较为活跃,腐殖质作为重要的胶结物质,能够有效促进微团聚体聚合为大团聚体并增强其稳定性<sup>[28]</sup>。更重要的是,红壤中丰富的游离氧化铁(针铁矿、赤铁矿)与有机质形

成有机-无机复合胶结物质,显著增强团聚体的水稳性<sup>[29]</sup>。NN和CZ等地作为花岗岩风化程度较高的地区,主要以高岭石等1:1型黏土矿物为主,其胶结能力较弱,加之酸性环境下铁铝氧化物的活化与胶结作用受到抑制,导致团聚体稳定性并未随黏粒含量增加而提升<sup>[30]</sup>。LT虽作为风化程度较弱的地区,但黄棕壤的黏粒含量受母质影响显著,花岗岩风化壳发育的黄棕壤黏粒含量通常低于30%,砂性母质导致土壤质地偏砂,缺乏细颗粒胶结物质,导致难以形成大粒径团聚体<sup>[31]</sup>;且高SOC因砂性母质和低温积累而以惰性组分为主,胶结效率有限<sup>[32]</sup>。因此,气候、母质、土壤性质及植被的长期综合作用导致花岗岩风化壳马尾松林土壤结构的区域差异。

#### 3.2 不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤可蚀性特征

土壤可蚀性是评价土壤抗侵蚀能力和水土流失风险的重要指标<sup>[10]</sup>,其大小主要受土壤团聚体稳定性、颗粒组成、有机碳含量等因素的调控<sup>[33]</sup>。本研究表明,不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤可蚀性呈现显著的空间分异特征,从大到小依次为LT、NN、CZ、CY、LD、XY;且土壤可蚀性与团聚体稳定性呈负相关,其主要原因在于团聚体稳定性越高,土壤抗径流分散能力越强,可蚀性越低<sup>[11]</sup>。XY和LD样地的>2 mm粒级团聚体含量较高,提高团聚体的稳定性(图5),进而降低土壤的侵蚀性(图4),且两地的红壤交换性Na<sup>+</sup>含量较低,高价阳离子(Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>)占比高,减少黏粒分散风险,削弱土壤的可蚀性<sup>[34]</sup>,而LT和NN等地较高的微团聚体占比及LT黄棕壤中的高交换性Na<sup>+</sup>含量等则加剧土壤侵蚀风险。此外,本研究结果表明,pH和速效磷是本研究区调控土壤可蚀性的核心环境因子(表3),XY较高的pH通过强化团聚体胶结作用提升土壤结构稳定性,进而显著降低可蚀性<sup>[35]</sup>,而其余酸性样地不利于植物的根系生长,土壤胶结作用减弱,团聚体结构稳定性下降<sup>[27]</sup>,可蚀性呈上升趋势(图4)。LT较高的速效磷与土壤颗粒表面的胶结物质结合,降低颗粒间的黏结力,削弱微团聚体向大团聚体的聚合能力,导致团聚体稳定性下降、土壤结构松散,进而提高土壤可蚀性<sup>[36]</sup>。CZ、NN和LT等地虽SOC含量较高,但因土壤强酸性环境抑制SOC的腐殖化与胶结效率,使其难以有效形成稳定胶结物质促进团聚体聚合<sup>[37]</sup>;同时,较低的全钾含量很难协同SOC维持土壤结构,致使SOC难以发挥抗蚀作用<sup>[38]</sup>。其次,南方温暖湿热的气候导致花岗岩发育成深厚的风化壳,其内部富含疏松的石英颗粒组分,这些颗粒容易遭到破坏导致崩岗侵蚀过程加剧<sup>[39]</sup>。总体而言,不同地

带花岗岩风化壳马尾松林土壤可蚀性的区域分异,并非单一因素作用的结果,而是土壤团聚体稳定性、pH、速效养分、颗粒组成、土壤类型等多因素的影响,而团聚体稳定性作为中间变量,成为连接土壤理化性质与可蚀性的关键纽带。

#### 4 结论

1)不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤团聚体均以 $>2\text{ mm}$  粒度大团聚体为主,其中新余 $>2\text{ mm}$  团聚体含量和稳定性最高,罗田最低。

2)不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤可蚀性差异显著,其中罗田面临的侵蚀风险最高,新余最低。

3)相关性分析表明,不同地带花岗岩风化壳马尾松林土壤 $>2\text{ mm}$  粒度团聚体和pH与团聚体稳定性呈正相关,与可蚀性呈负相关;速效磷与团聚体稳定性呈负相关,与可蚀性呈正相关。

4)建议今后在南方花岗岩区林分管理中,控制土壤pH和磷水平在一定范围内,以及保护或恢复大团聚体来增强土壤抗蚀能力;且评估花岗岩风化壳区土壤侵蚀风险时,应优先关注质地和酸碱度指标,罗田和娄底样地因高可蚀性需作为水土保持优先防治区域。

#### 参考文献:

- [1] 韦江杏,邓羽松.花岗岩红壤丘陵区崩岗侵蚀与典型切沟侵蚀的异同点探析[J].土壤,2024,56(4):718-725.  
WEI J X, DENG Y S. Analysis of similarities and differences between Benggang erosion in granitic red soil hilly area and typical gully erosion[J].Soils,2024,56(4):718-725.
- [2] 谢福倩,韦真茜,廖达兰,等.桂东南花岗岩红壤区典型崩岗剖面风化强度对理化特性的影响[J].水土保持学报,2024,38(4):122-131.  
XIE F Q, WEI Z X, LIAO D L, et al. Effect of weathering intensity on physical and chemical properties of typical Benggang profile in granite red soil area of southeast Guangxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 122-131.
- [3] 杨武德,王兆骞,陆国平,等.土壤侵蚀对土壤肥力及土地生物生产力的影响[J].应用生态学报,1999,10(2):175-178.  
YANG W D, WANG Z J, SUI G P, et al. Impact of soil erosion on soil fertility and land productivity[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(2): 175-178.
- [4] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.  
LIU Y, ZHAO W W, JIA L Z. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 432-440.
- [5] MAO L H, ZHA R B, CHEN S F, et al. Mixture com-

pound fertilizer and super absorbent polymer application significantly promoted growth and increased nutrient levels in *Pinus massoniana* seedlings and soil in seriously eroded degradation region of southern China[J].Frontiers in Plant Science, 2021, 12:e763175.

- [6] 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.
- [7] 刘讯,石燕,姚思雨,等.贵州脆弱生态区不同龄组马尾松人工林土壤团聚体稳定性与养分含量[J].中南林业科技大学学报,2024,44(8):104-113.  
LIU X, SHI Y, YAO S Y, et al. Soil aggregate stability and nutrient content of *Pinus massoniana* plantation at different age groups in fragile ecological area of Guizhou[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2024, 44(8): 104-113.
- [8] DU H P, BI J L. The formation mechanisms, stability, and dynamic effects of soil aggregates under specific environments[J].Geographical Research Bulletin, 2025, 4: 445-464.
- [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] 田芷源,梁音,赵院,等.中国水蚀区土壤可蚀性因子更新方法与应用[J].中国水土保持科学,2023,21(6):63-70.  
TIAN Z Y, LIANG Y, ZHAO Y, et al. Updating method of soil erodibility factor in water-erosion areas of China and its application [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(6): 63-70.
- [11] 张琪,方海兰,史志华,等.侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J].林业科学,2007,43(S1):77-82.  
ZHANG Q, FANG H L, SHI Z H, et al. Advances in influence factors of aggregate stability under erosion [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(S1): 77-82.
- [12] 马佳鑫,夏栋,艾尚进,等.植被混凝土边坡土壤团聚体的稳定性与可蚀性[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2023,49(6):702-707.  
MA J X, XIA D, AI S J, et al. Soil aggregate stability and erodibility of vegetation concrete slope [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2023, 49(6): 702-707.
- [13] 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 H T, YAN J L, HUANG H M, 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.
- [14] 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 H P, GOU M M, CHEN H L, 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.
- [15] 黎宏祥, 王彬, 王玉杰, 等. 不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(5):84-91.  
LI H X, WANG B, WANG Y J, et al. Impact of different forest types on stability and organic carbon of soil aggregates [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(5):84-91.
- [16] ELLIOT T 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.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] BREMNER J M. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1960, 55(1):11-33.
- [19] PARKINSON J A, ALLEN S E. A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1975, 6(1):1-11.
- [20] BILIAS F, BARBAYIANNIS N. Potassium availability: An approach using thermodynamic parameters derived from quantity-intensity relationships[J]. *Geoderma*, 2019, 338:355-364.
- [21] 国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Determination of total phosphorus in forest soil: LY/T 1232—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [22] REN C, LIU K S, DOU P P, 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.
- [23] 谢红霞, 陈琼, 李锦龙, 等. 长沙市东郊不同母质发育耕型红壤的可蚀性因子  $K$  值估算[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(3):133-135.  
XIE H X, CHEN Q, LI J L, et al. Calculation of soil erodibility factor  $K$  value of cultivated red soils developed from two different parent materials in eastern suburb of Changsha City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(3):133-135.
- [24] SHIRAZI M A, BOERSMA L. A unifying quantitative analysis of soil texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(1):142-147.
- [25] 李娟, 韩霖昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1):248-253.  
LI J, HAN J C, CHEN C, et al. Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1):248-253.
- [26] 冯晓彤, 翟车宇, 刘昌杰, 等. 东北典型黑土坡耕地不同坡位土壤团聚体特征分析[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(1):43-49.  
FENG X T, ZHAI C Y, LIU C J, et al. Analysis of characteristics of soil aggregates at different slope positions of typical black soil sloping farmland in northeast China [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2024, 55(1):43-49.
- [27] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(2):702-709.  
XIE J S, YANG Y S, CHEN G S, et al. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2):702-709.
- [28] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(9):2588-2596.  
WANG X H, YANG Z J, LIU X F, et al. Effects of different forms of Fe and Al oxides on soil aggregate stability in mid-subtropical mountainous area of southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9):2588-2596.
- [29] 唐贤, 黄伟濠, 卢瑛, 等. 广东省赤红壤区土壤团聚体有机碳和铁氧化物特征及稳定性[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2):200-209.  
TANG X, HUANG W H, LU Y, et al. Characteristics and stability of organic carbon and ferric oxide in soil aggregates and aggregate stability in lateritic red soil region, Guangdong Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2):200-209.
- [30] 彭子焯, 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 Z Y, XIE M X, LIN X C, 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.
- [31] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011, 478(7367):49-56.