

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.06.036

CSTR:32310.14.stbcb.2025.06.036

许颖,冉文建,史东梅,等.紫色土坡耕地磁化率剖面分布特征及主控因素[J].水土保持学报,2025,39(6):66-74,84.

XU Ying, RAN Wenjian, SHI Dongmei, et al. Profile distribution characteristics and main controlling factors of magnetic susceptibility in purple soil slope farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):66-74,84.

## 紫色土坡耕地磁化率剖面分布特征及主控因素

许颖<sup>1</sup>, 冉文建<sup>2</sup>, 史东梅<sup>1</sup>, 高家勇<sup>1</sup>, 江雨芙<sup>1</sup>, 刘方元<sup>1</sup>

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400715; 2.重庆市万州区水土保持中心,重庆 404020)

**摘要:** [目的] 揭示紫色土坡耕地剖面磁化率的分布特征及其主要影响因素,探索磁性示踪技术在紫色土土壤侵蚀定量评估中的应用价值。[方法] 以紫色土坡耕地为研究对象,采用铲土侵蚀模拟试验方法,设置0、5、10、15、20 cm 5种侵蚀程度,不施肥(CK)、单施化肥(F)和生物炭+化肥配施(BF)3种管理措施,研究不同侵蚀程度与管理措施下土壤剖面磁化率的分布特征,并揭示磁化率分布的主要影响因素。[结果] 1)紫色土坡耕地磁化率分布随剖面深度呈减小趋势,表层(0~10 cm)土壤磁化率值最高,具有明显的表层增强现象。2)土壤粒径是影响坡耕地磁化率的主导因素,最小数据集指标权重为0.424,其次是土壤速效养分(0.367)和有机质(0.209);当黏粒和粉粒占主导时,磁化率值较高。3)土壤侵蚀程度显著降低磁化率值( $p < 0.05$ ),且其影响独立于管理措施( $p > 0.05$ )。S<sub>5</sub>(侵蚀5 cm)、S<sub>10</sub>(侵蚀10 cm)、S<sub>15</sub>(侵蚀15 cm)、S<sub>20</sub>(侵蚀20 cm)分别平均较S<sub>0</sub>(侵蚀0 cm)下降12.50%、13.14%、24.52%和35.69%。4)紫色土坡耕地磁化率受细颗粒含量主导,与可蚀性因子呈显著负相关( $p < 0.01$ );侵蚀作用通过影响土壤剖面物质再分布改变磁化率的垂直分布特征。[结论] 紫色土坡耕地侵蚀土壤磁化率分布的重要影响因素为土壤粒径和侵蚀程度,研究结果可为定量运用磁性示踪技术评估土壤侵蚀动态变化提供科学依据。

**关键词:** 坡耕地; 磁化率; 剖面分布; 侵蚀土壤; 紫色丘陵区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0066-09

## Profile Distribution Characteristics and Main Controlling Factors of Magnetic Susceptibility in Purple Soil Slope Farmland

XU Ying<sup>1</sup>, RAN Wenjian<sup>2</sup>, SHI Dongmei<sup>1</sup>, GAO Jiayong<sup>1</sup>, JIANG Yufu<sup>1</sup>, LIU Fangyuan<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.Soil and Water Conservation Center of Wanzhou District, Chongqing 404020, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to reveal the distribution characteristics of magnetic susceptibility in profiles of purple soil slope farmland and its main influencing factors, and to explore the application value of magnetic tracing technology for the quantitative assessment of soil erosion in purple soil. [Methods] Taking purple soil slope farmland as the research object, a shovel-based soil erosion simulation method was used to establish five erosion levels at 0, 5, 10, 15, and 20 cm and three management measures: no fertilizer (CK), chemical fertilizer alone (F), and combined application of biochar and chemical fertilizer (BF). The distribution characteristics of soil profile magnetic susceptibility under different erosion levels and management measures were investigated, and the main influencing factors of magnetic susceptibility distribution were revealed. [Results] 1) The magnetic susceptibility of purple soil slope farmland decreased with profile depth. The highest value was observed in the surface layer (0~10 cm), indicating a distinct surface enhancement phenomenon. 2) Soil particle size was the dominant factor influencing the magnetic susceptibility of slope farmland, with a weight of 0.424 in the minimum dataset, followed by soil available nutrients (0.367) and organic matter (0.209). Magnetic susceptibility

收稿日期: 2025-04-22

修回日期: 2025-06-10

录用日期: 2025-07-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2340215, 41771310); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2024TIAD-GPX0043)

第一作者: 许颖(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 2794701442@qq.com

通信作者: 史东梅(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、流域管理研究。E-mail: shidm\_1970@126.com

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

was higher when clay and silt particles were dominant. 3) The erosion level significantly reduced the magnetic susceptibility values ( $p < 0.05$ ), and its effect was independent of the management measures ( $p > 0.05$ ). Compared to  $S_{-0}$  (erosion of 0 cm), the treatments  $S_{-5}$  (erosion of 5 cm),  $S_{-10}$  (erosion of 10 cm),  $S_{-15}$  (erosion of 15 cm), and  $S_{-20}$  (erosion of 20 cm) showed decreases in magnetic susceptibility by an average of 12.50%, 13.14%, 24.52%, and 35.69%, respectively. 4) The magnetic susceptibility of purple soil slope farmland was dominated by fine particle content and was significantly negatively correlated with the erodibility factor ( $p < 0.01$ ). Erosion altered the vertical distribution characteristics of magnetic susceptibility by influencing the redistribution of materials in the soil profile. [Conclusion] The important influencing factors of the magnetic susceptibility distribution in eroded soil of purple soil slope farmland are soil particle size and erosion level. The findings of this study can provide a scientific basis for the quantitative application of magnetic tracing technology to assess dynamic changes in soil erosion.

**Keywords:** slope farmland; magnetic susceptibility; profile distribution; eroded soil; purple hilly region

Received: 2025-04-22

Revised: 2025-06-10

Accepted: 2025-07-01

Online (www.cnki.net): 2025-09-23

磁化率(MS,  $\chi$ )是土壤中磁性物质在弱外磁场中产生的感应磁化强度与磁场强度的比值,通常被认为是土壤最简单的实测磁学参数<sup>[1]</sup>。近年来,土壤磁测技术已逐渐应用于土壤侵蚀研究,例如,确定沉积泥沙来源<sup>[2]</sup>,研究土壤侵蚀的空间分布特征<sup>[3]</sup>,以及建立土壤侵蚀预测模型<sup>[4]</sup>等。与放射性沉降示踪法相比,磁测法是一种低成本且快速的替代方法,可用于长期估计土壤侵蚀或沉积速率<sup>[5-8]</sup>。已有研究<sup>[9]</sup>表明,质量磁化率的数值与土壤中亚铁磁性矿物的含量呈正比,而这些矿物的含量与成土过程密切相关。受侵蚀作用影响,磁化率随土壤颗粒的搬运及沉积发生变化,因此,分析磁化率( $\chi$ )在土壤剖面上的分异特征,对于反演长时间序列的土壤侵蚀及物质再分布具有重要意义<sup>[10]</sup>。

国内外学者对磁化率与各影响因素的相关性进行了大量研究。一般而言,未受扰动的土壤剖面磁化率具有表层增强现象,且剖面磁化率值整体大小与成土环境密切相关<sup>[11]</sup>。前人<sup>[12]</sup>将磁性示踪技术与长期耕作的坡耕地不同坡面位置的剖面特征建立联系,证实了土壤磁化率的表层增强性,并指出基于不同坡位剖面的磁化率特征,可以有效评估土壤侵蚀与沉积状况;卢升高<sup>[13]</sup>研究发现,土壤磁化率的垂直分布特征与其成土环境密切相关,这种剖面特征能指示侵蚀环境变化;董元杰等<sup>[3]</sup>探讨了坡面磁化率与土壤侵蚀状况的关系发现,磁化率呈中坡>下坡>上坡的特征,且其与土壤粒径密切相关;王小刚等<sup>[14]</sup>研究发现,表层土壤磁化率随土壤侵蚀程度加剧而降低;LIU等<sup>[6]</sup>对比测量坡耕地与长期未开垦再造林土壤的磁化率发现,磁化率的分异规律不仅受地形、水热条件、生物等外部环境因素影响,还与土壤含水

量、土壤有机质及母质等土壤属性密切相关,并在较短时间尺度和区域尺度上表现出一致性。

目前,关于磁化率表征土壤侵蚀的研究多聚焦于表层土壤,主要通过识别不同坡位的磁化率特征来反映土壤再分布过程<sup>[15-16]</sup>。耕作区土壤虽受耕作活动扰动,但其磁化率空间变异特征仍能有效反映土壤侵蚀过程<sup>[6-8]</sup>。然而,我国坡耕地土壤磁化率的研究主要集中于东北黑土区和鲁中丘陵区<sup>[17-18]</sup>等区域,而对西南紫色土区的研究相对匮乏;此外,耕层土壤磁化率影响因素尚不明晰。西南紫色丘陵区由于降雨集中,雨量充沛且雨势迅猛,加之紫色土土层浅薄、母岩疏松,抗蚀能力较弱,土壤侵蚀问题极为严峻,已然成为威胁区域生态安全的关键制约因素与亟待解决的重大环境问题。因此,在该区域开展磁化率调查,揭示其剖面垂直特征及其影响因素,探讨磁化率对土壤侵蚀过程的响应机制,可为运用磁性示踪技术定量评估土壤侵蚀量及其动态变化提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市万州区(30°24'00"~31°14'58"N, 107°55'22"~108°53'25"E),属三峡库区腹地,亚热带湿润季风气候,年平均日照时间为1484.4 h,年平均气温17.7℃,降水多集中在5—9月,年平均降水量为1243 mm,季节性干旱严重。土壤类型以中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥页岩母质上发育的中性紫色土为主,土层浅薄、疏松,土层厚度20~60 cm,抗侵蚀能力弱。坡耕地分布广,垦殖指数49.04%,复种指数180%。

## 1.2 试验设计与采样

本文以土壤侵蚀程度和管理措施 2 个因素设置裂区试验小区,采用铲土侵蚀法模拟自然状态下的

$$m' = h_0 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^n + h_1 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-1} + h_2 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-2} + \dots + h_i \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-i} + h_n \left(1 - \frac{d}{m}\right) + h_n \quad (1)$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$$

式中: $h_i$ 为原始土层*i*的厚度,cm; $d$ 为多年平均侵蚀厚度,cm; $m'$ 、 $m$ 为耕层土壤厚度,cm; $n$ 为侵蚀年限。

根据重庆紫色丘陵区实际土壤侵蚀和研究区耕作状况,本文将耕层土壤厚度  $m$  拟定为 20 cm,多年平均侵蚀厚度  $d$  为 0.25 cm,设置侵蚀 0(S<sub>0</sub>)、5(S<sub>5</sub>)、10(S<sub>10</sub>)、15(S<sub>15</sub>)、20(S<sub>20</sub>)cm 5 种不同侵蚀程度,分别代表模拟的侵蚀年限为 0、20、40、60、80 a。另外,采用不施肥(CK)、单施化肥(F)和生物炭+化肥(BF)配施 3 种管理措施,各处理设置 3 次重复,共计 45 个试验小区。试验小区面积均为 12 m<sup>2</sup>(4 m×3 m),田面坡度为 15°。根据当地种植习惯,小区主要种植方式为玉米/油菜,耕作深度为 20 cm。施肥水平为复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=25:12:18),并采用尿素(总氮≥46.4%)每年对 F 和 BF 措施小区进行 2 次追肥。选用的生物炭原料为水稻秸秆,在 400~500 °C 缺氧条件下热解 4 h,过 150 目筛,pH>7,含碳量>80%。

选择 2022 年 8 月玉米收获前 1 周进行土壤样品采集,共选取 135 个土壤采样点。磁化率采用便携式磁化率仪进行测定。在样点处深挖土壤剖面至母质层,以 3 cm 深度为 1 个单位,由浅入深进行测量。于

$$K_{\text{EPIC}} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{Sand}(1 - \text{Silt}/100)]\} \times \left(\frac{\text{Silt}}{\text{Clay} + \text{Silt}}\right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times \left[1.0 - \frac{0.7\text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(22.9\text{SN}_1 - 5.51)}\right] \quad (4)$$

式中: $K$ 为土壤可蚀性因子,(t·hm<sup>2</sup>·h)/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>);Sand、Silt、Clay 分别为砂粒、粉粒、黏粒占比,%; $C$ 为有机碳质量分数,%; $\text{SN}_1=1-\text{Sand}/100$ 。

## 1.4 数据处理

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行显著性水平检验( $p<0.05$ );采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验不同侵蚀程度、管理措施对磁化率的影响;利用 Pearson 相关分析方法分析 135 个样品的磁化率与土壤理化性质的相关性;使用主成分分析方法分析影响磁化率的主控因子并建立最小数据集;采用线性拟合方法分析磁化率与土壤粒径、 $K$  因子的相关性。本文采用 Excel 2021 和 SPSS 20.0 软件进行数据整理与统计分析,并在 Origin 2022 软件完成相关性分析及作图。

不同土壤侵蚀程度<sup>[19-21]</sup>,即人工去除不同厚度的耕层土壤构建侵蚀小区,并根据公式计算  $n$  年不同侵蚀程度耕层土壤组成特征。

各样点处分 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 进行分层多点采样,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀及 55 mm×35 mm 铝盒采集原状土样。同时,采集 1~2 kg 土壤混合散土样,带回室内实验室进行理化性质分析。其中,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤体积质量采用环刀法测定;土壤质地以散土样经自然风干、去除杂质和研磨处理过不同孔径土壤筛后,采用吸管法测定;磁化率根据测定到的体积磁化率,计算获得质量磁化率<sup>[22]</sup>。

$$\chi = \kappa/d \quad (2)$$

式中: $\chi$ 为质量磁化率,10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/kg; $\kappa$ 为体积磁化率,无量纲; $d$ 为土壤体积质量,g/cm<sup>3</sup>。

## 1.3 土壤可蚀性计算

土壤侵蚀强度与土壤抗侵蚀的能力直接相关,通常采用量化土壤可蚀性的方法评估土壤抗侵蚀的能力。土壤可蚀性可以用许多指标来表征,其中最常用的是  $K$  因子<sup>[23]</sup>。 $K$  因子的计算公式采用张科利等<sup>[24]</sup>修正后的 EPIC 模型<sup>[25]</sup>,计算公式为:

$$K = (-0.01383 + 0.51575 \times K_{\text{EPIC}}) \times 0.1317 \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 侵蚀土壤磁化率与土壤性质分布

由表 1 可知,坡耕地侵蚀土壤  $\chi$  为 3.55×10<sup>-8</sup>~21.71×10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/kg,平均值为 11.03×10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/kg;土壤体积质量平均值为 1.49 g/cm<sup>3</sup>。黏粒(<0.002 mm)为 17.20%~46.00%,粉粒(0.002~0.005 mm)为 32.00%~55.60%,砂粒(>0.005 mm)为 11.20%~48.80%,平均值分别为 27.11%、41.63%、31.26%。依据国际制土壤质地分类标准<sup>[26]</sup>,研究区土壤为黏壤土至黏土。SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 平均值分别为 18.28、1.07、0.67、23.45、46.23、17.32、75.65 mg/kg。土壤体积质量变异系数最小为 0.07,可见,体积质量是土壤最稳定的属性。相较之下,土壤化学性质变异系数较大,其中 SOM、TN、AP、AK 对外部环境的波动更加敏感。

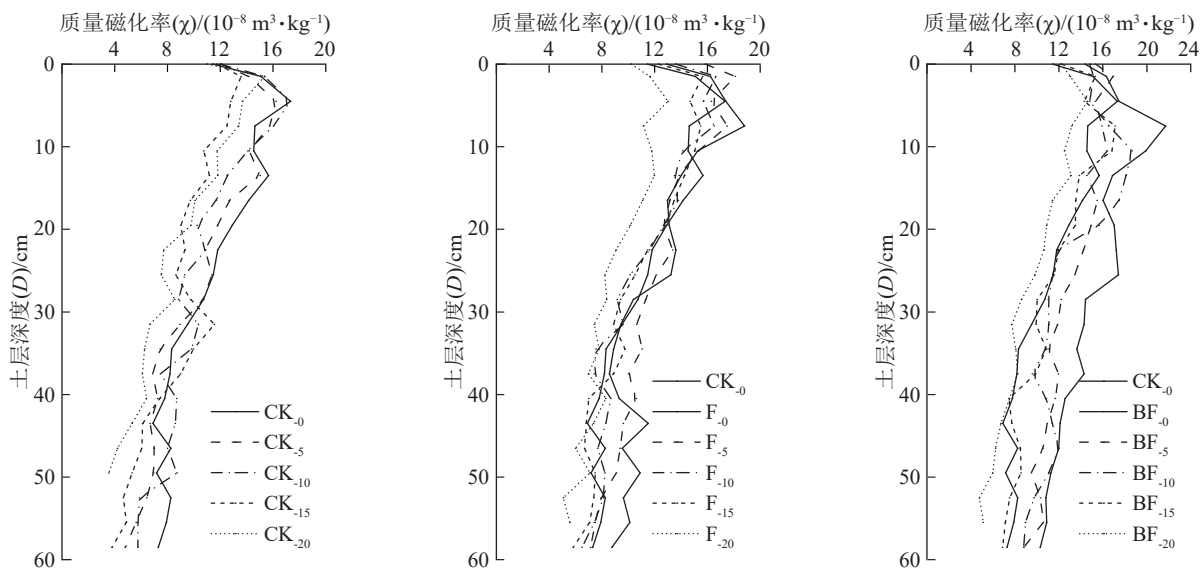
表 1 坡耕地侵蚀土壤数据集的统计特征  
Table 1 Statistical characteristics of eroded soil dataset in slope cropland

变量	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
质量磁化率( $\chi$ )/( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	21.71	3.55	11.03	3.47	0.31
土壤体积质量(BD)/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.70	1.18	1.49	0.10	0.07
黏粒(Clay)/%	46.00	17.20	27.11	6.54	0.24
粉粒(Silt)/%	55.60	32.00	41.63	6.14	0.15
砂粒(Sand)/%	48.80	11.20	31.26	9.38	0.30
有机质(SOM)/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	47.20	1.37	18.28	9.12	0.50
全氮(TN)/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.21	0.07	1.07	0.57	0.53
全磷(TP)/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.87	0.48	0.67	0.09	0.14
全钾(TK)/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	30.12	10.79	23.45	6.16	0.26
速效氮(AN)/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	76.63	26.12	46.23	11.84	0.26
有效磷(AP)/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	34.68	8.77	17.32	6.63	0.38
速效钾(AK)/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	330.00	38.00	75.65	61.83	0.82

紫色土坡耕地不同侵蚀程度和管理措施下的磁化率剖面分布规律见图 1。随着土层深度增加,5 种侵蚀程度的磁化率均呈先增大再逐渐减小的趋势。在 0~10 cm 的表层土壤中,磁化率出现峰值,而后随深度增加迅速降低,且变率逐渐减小,呈现明显的表层增强性。至母质层时,磁化率降至最小值,这种现象与弱磁性母质发育的土壤磁性特征相契合。但这种表层增强性随侵蚀程度的加剧而逐渐减弱,与未侵蚀的土壤表层相比,侵蚀明显降低表层土壤的磁化率峰值,说

明随着侵蚀程度的加剧,土壤再分配过程愈发剧烈,且表层土壤的变化最能反映土壤侵蚀过程,这一现象可能与侵蚀对土壤中磁性矿物的影响有关。

对于同一侵蚀程度,BF 措施下的  $\chi$  均值最大,其次是 F 措施。对于同一管理措施,随着侵蚀程度加剧,磁化率呈降低趋势。除 BF 措施以外,当土层深度 >30 cm,磁化率分布曲线较为集中,磁化率趋于稳定,产生这种差异的原因可能与有机物的累积作用有关。



注:CK 为不施肥;F 为单施化肥;BF 为生物炭+化肥配施;右下标数字代表侵蚀程度。

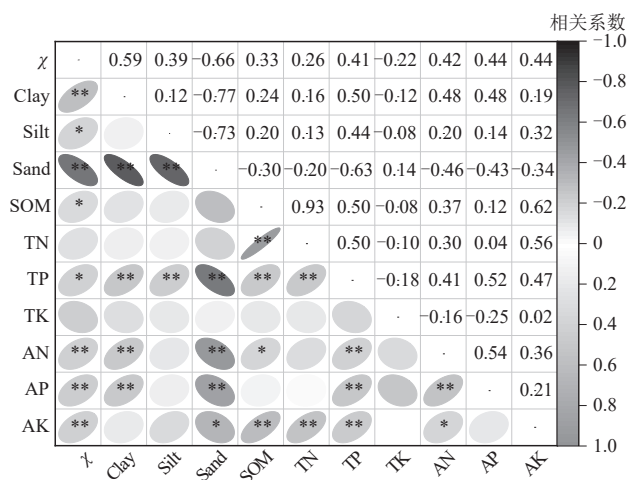
图 1 不同侵蚀程度/管理下磁化率剖面分布

Fig.1 Profile distribution of magnetic susceptibility under different erosion levels/management measures

2.2 侵蚀土壤磁化率与土壤性质相关性分析

通过对侵蚀土壤磁化率与土壤理化性质进行 Pearson 相关分析(图 2)可知,  $\chi$  与黏粒占比(0.59)、AN(0.42)、AP(0.44)、AK(0.44)均呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),与粉粒占比(0.39)、SOM(0.33)、TP(0.41)也呈显著正相关( $p < 0.05$ ),表明土壤细颗粒

(<0.005 mm)更易富集磁性矿物。相反,磁化率与砂粒占比(-0.66)呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),表明砂粒质量分数较高的土壤富集磁性矿物的能力较弱,因此磁化率较低。此外,磁化率与 TN 和 TK 之间无显著相关性,说明这些因子对侵蚀土壤磁化率的影响较弱。



注:\*\*表示  $p < 0.01$ ; \*表示  $p < 0.05$ 。下同。

图2 磁化率与土壤理化性质的相关分析

Fig.2 Correlation analysis between magnetic susceptibility and soil physicochemical properties

根据主成分分析结果(表2),前3个主成分的特征值  $> 1$ , 贡献率顺序为 PC1 (48.063%)  $>$  PC2 (15.911%)  $>$  PC3 (13.547%), 累积贡献率达

77.52%, 可以解释磁化率总变化的大部分信息。第1主成分与黏粒、粉粒和砂粒的相关性较高(载荷绝对值  $> 0.7$ ), 主要反映土壤粒径特征; 第2主成分主要受速效氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)的影响, 主要反映速效养分特征; 第3主成分与有机质(SOM)相关性较高, 主要反映有机质特征。第1组主成分中, 粉粒的 Norm 值最高(1.85), 且粉粒与黏粒的相关系数  $< 0.5$ , 与砂粒的相关系数  $> 0.5$ , 所以粉粒与黏粒入选最小数据集(MDS); 第2组主成分中选择 Norm 值最高的速效钾(1.00)入选 MDS, 其与速效氮相关性均较高, 与速效磷相关性不高, 因此速效钾与速效氮入选; 第3组主成分中仅有机质载荷显著, 直接入选。最终确定粉粒、黏粒、速效钾、速效氮、有机质共5个指标构成最小数据集。提取评价指标的公因子方差, 得 MDS 指标权重依次为粉粒 0.236、有机质 0.209、速效钾 0.200、黏粒 0.189、速效氮 0.166。由此可得, 各主成分对侵蚀土壤磁化率影响土壤粒径(0.424)  $>$  土壤速效养分(0.367)  $>$  有机质(0.209)。

表2 坡耕地磁化率载荷矩阵、Norm 值和权重

Table 2 Load matrix, Norm values, and weights of magnetic susceptibility in slope farmland

影响因子	主成分1	主成分2	主成分3	Norm 值	MDS	
					公因子方差	权重
黏粒	0.811	0.268	0.035	1.62	0.731	0.188
粉粒	0.940	-0.005	0.170	1.85	0.913	0.236
砂粒	-0.789	-0.558	-0.133	1.67		
有机质	0.077	0.138	0.886	0.94	0.810	0.209
全磷	0.446	0.518	0.463	1.16		
速效氮	0.034	0.718	0.358	0.89	0.645	0.166
有效磷	0.047	0.828	0.066	0.94		
速效钾	0.113	0.852	0.195	1.00	0.777	0.200
特征值	3.840	1.270	1.080			
贡献率/%	48.060	15.910	13.550			
累计贡献率/%	48.060	63.970	77.520			

根据主成分分析结果, 土壤粒径是影响磁化率的关键指标。对侵蚀土壤磁化率与黏粒、粉粒及砂粒占比分别进行线性拟合分析(图3)表明, 磁化率与三者均显著, 且与黏粒、砂粒的拟合效果较好。磁化率与黏粒占比呈极显著正相关( $p < 0.01$ ), 随黏粒占比的增加而增大; 与粉粒占比呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 随粉粒占比的增加而增大; 与砂粒含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ ), 随砂粒占比增大而减小。表明当土壤中细颗粒占比较大时, 磁化率值相对较大; 砂粒占比较大时, 磁化率值相对较低。因此, 随着侵蚀加剧, 土壤中细颗粒逐渐流失, 导致磁化率降低。

2.3 侵蚀土壤磁化率对侵蚀程度及管理措施响应

由图4可知, 总体而言, 土壤侵蚀程度的增加显

著降低 F 和 BF 措施下的磁化率( $p < 0.05$ ); 3种管理措施下, 随侵蚀程度加剧, 磁化率均呈现相似的“波动式”下降趋势。在 BF 措施下, 磁化率在  $S_0$  与  $S_{15}$ 、 $S_{20}$  间表现出显著差异( $p < 0.05$ ), 侵蚀 5~20 cm 下的磁化率分别较侵蚀 0 cm 下降 12.50%、13.14%、24.52% 和 35.69%; 在 F 措施下, 磁化率在  $S_0$  和  $S_{20}$  间差异显著( $p < 0.05$ ), 侵蚀 5~20 cm 下的磁化率分别较侵蚀 0 cm 下降 0.79%、10.85%、13.24% 和 26.49%; 而在 CK 措施下, 磁化率随侵蚀程度加剧而下降但不显著( $p > 0.05$ ), 侵蚀 5~20 cm 下的磁化率分别较侵蚀 0 cm 下降 7.19%、5.22%、18.12% 和 19.03%。表明磁化率与侵蚀程度呈负相关关系, 即随侵蚀程度加剧, 磁化率降低。

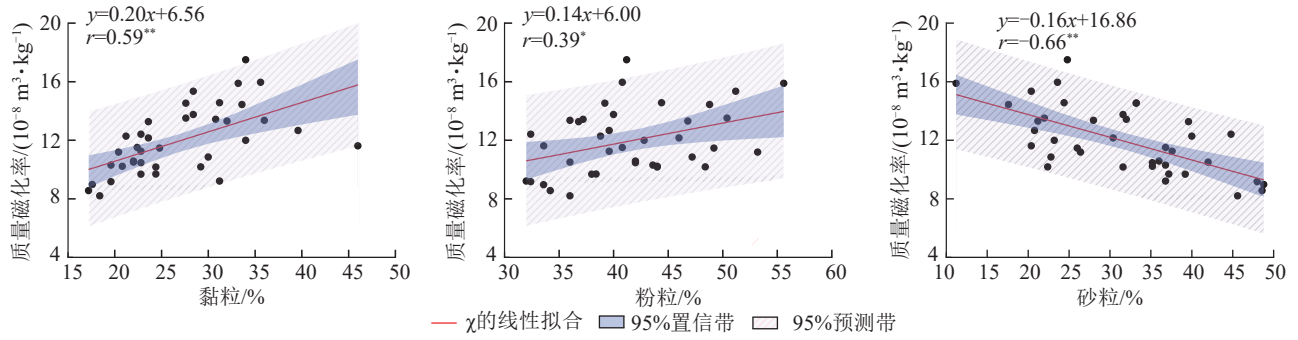
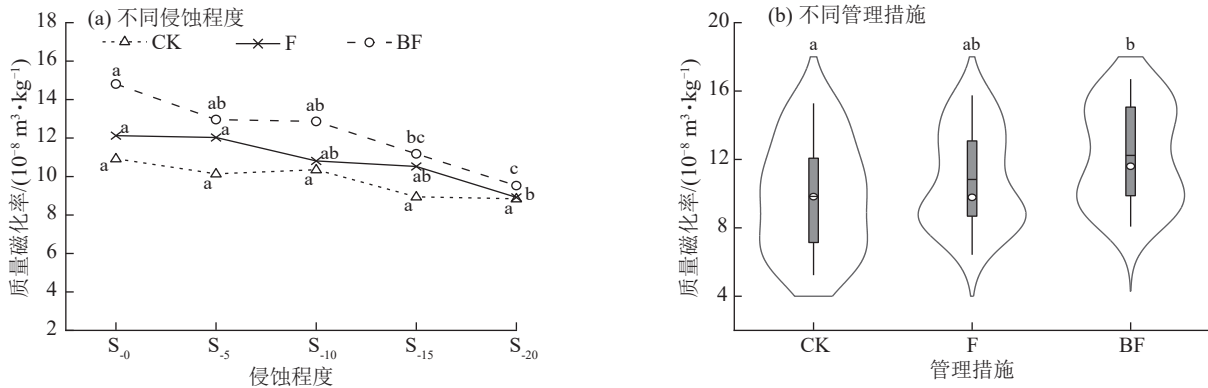


图 3 磁化率与粒径组分的线性拟合关系

Fig.3 Linear fitting relationship between magnetic susceptibility and particle size fractions



注:图中不同小写字母相同表示不同处理间显著差异( $p < 0.05$ ); $S_0$ 为无侵蚀, $S_5$ 为侵蚀 5 cm,其余以此类推;CK 为不施肥,F 为单施化肥,BF 为生物炭+化肥配施;○为平均值;—为中线;□为 25%~75%;└ 为 1.5 IQR 内的范围。

图 4 侵蚀程度和管理措施对磁化率的影响

Fig.4 Effects of erosion levels and management measures on magnetic susceptibility

不同管理措施对侵蚀土壤磁化率的影响差异显著,其中在 BF 措施条件下,磁化率对侵蚀程度的变化表现出更高的敏感性,显著提升紫色土坡耕地剖面磁化率( $p < 0.05$ )。3 种管理措施下的磁化率平均值依次为 CK  $[(9.87 \pm 3.35) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}, \text{CV}=0.34]$ 、F  $[(10.90 \pm 3.23) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}, \text{CV}=0.30]$ 、BF  $[(12.29 \pm 3.43) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}, \text{CV}=0.28]$ ,表现为  $\text{CK} < \text{F} < \text{BF}$ ,其中 BF 措施平均较 CK 和 F 分别增加 24.52% 和 12.75%,BF 措施的磁化率较 F 提升 11.31%。与 CK 相比,BF 措施显著( $p < 0.05$ )提高磁化率;F 对磁化率有一定的提升作用,但效果未达到显著水平( $p > 0.05$ )。

侵蚀程度和管理措施对磁化率的影响均存在极显著差异( $p < 0.01$ ),但侵蚀程度与管理措施之间的交互作用不显著(表 3)。即侵蚀程度对磁化率的影响不会因管理措施不同而发生显著的变化,进一步验证侵蚀土壤磁化率的变化趋势在不同管理措施下的稳定性。值得注意的是,BF 措施下侵蚀 20 cm 与其他侵蚀程度的磁化率相比具有显著差异( $p < 0.05$ )说明尽管生物炭显著提升侵蚀土壤磁化率,但在剧烈侵蚀条件下(侵蚀 20 cm),其提升效应减弱,反映当侵蚀程度剧烈时,其对磁化率的影响占据主导地位,成为决定磁化率变化的关键控制因子。

表 3 侵蚀程度和管理措施对磁化率的双因素方差分析  
Table 3 Two-way ANOVA of erosion levels and management measures on magnetic susceptibility

指标	平方和	df	均方	F	p
侵蚀程度	305.12	2	152.56	15.58	0**
管理措施	453.03	4	113.26	11.57	0**
侵蚀程度*管理措施	74.96	8	9.37	0.96	0.47
误差	2 887.71	295	9.79		

注:\*\*表示因子间存在显著性差异( $p < 0.01$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤理化性质对侵蚀土壤磁化率的影响

磁化率受多种因素的综合影响,包括粒径分布、有机质含量及 AN、AP、AK 的浓度等。研究结果显示,粒径分布是引起研究区磁化率变化的关键因素,其中,黏粒与粉粒对磁化率的影响最为显著。土壤磁性矿物的主要来源包括母岩中的原生矿物(通常为砂粒或粗粉粒)和成土过程中形成的次生矿物(一般以稳定单畴或更小的粒径存在)<sup>[27]</sup>,而细颗粒土壤更容易富集亚铁磁性矿物,因此,细颗粒土壤通常具有更高的磁化率<sup>[28]</sup>,且粒径越小越容易富集亚铁磁性矿物,与磁性参数对粒径依赖性的理论一致。由于紫色丘陵区降雨充足、风化作用强烈等特点,土壤中的磁性矿物主要源于成土过程中形成的次生矿

物,这些次生矿物通过增加铁铝氧化物的含量显著提高土壤的磁化率,影响其剖面特征<sup>[11]</sup>。表明研究区内土壤磁性矿物以次生矿物为主,在不同粒径组分中的富集具有明显规律性,且土壤中的磁性矿物大部分以黏粒的形态存在,与俞劲炎等<sup>[29]</sup>研究结论一致。也有研究<sup>[30-31]</sup>认为,磁化率与砂粒占比呈正相关,此差异可能反映不同区域主导磁性矿物来源的差异。浙江红壤磁化率随粒径减小而降低,表明浙江红壤以原生矿物对磁化率的贡献为主,次生磁矿物为辅<sup>[32]</sup>;而青藏高原磁化率则随粒径减小而增加,表明次生矿物在其磁化率变化中起主要作用<sup>[33]</sup>。

紫色土坡耕地磁化率与土壤可蚀性因子呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),具体而言, $K$ 越大,磁化率值越低;而 $K$ 值越小,磁化率值越高(图5)。可蚀性大的土壤其土壤黏粒与粉粒占比相对较高,在侵蚀过程中更容易被剥离和搬运,而这些细颗粒通常富集更多的次生磁性矿物,是土壤磁性的主要来源。当侵蚀发生时,这些富含磁性矿物的细颗粒被大量搬运,导致土壤中次生磁性矿物含量减少,从而使得土壤的磁化率降低。而可蚀性小的土壤相对较为稳定,由于其抗侵蚀能力较强,不易受水力、重力等外力作用侵蚀,次生磁性矿物的损失相对较少,因此磁化率的降低幅度较小。

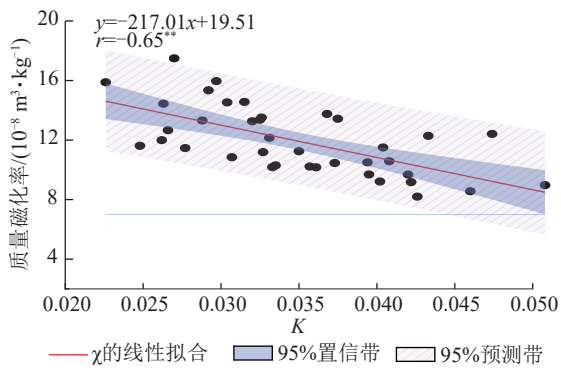


图5 磁化率和 $K$ 值的线性拟合关系

Fig.5 Linear fitting relationship between magnetic susceptibility and  $K$  value

土壤速效养分含量对磁化率也具有一定积极影响,可能与生物炭对改善土壤微结构和提高土壤团聚体的作用有关<sup>[34]</sup>。除粒径分布和养分含量以外,有机质的积累也对磁化率起一定作用,与前人<sup>[35]</sup>的研究结果一致。一方面,有机质通过螯合作用促进铁的溶解和沉淀,从而促进磁性矿物的生成;另一方面,土壤有机质为铁还原菌将 $Fe^{3+}$ 还原为 $Fe^{2+}$ 提供能量,生成的过量 $Fe^{2+}$ 与铁氢氧化物反应,生成SP或SD磁铁矿<sup>[36]</sup>,导致磁化率增加。此外,有机质还可通过改善土壤孔隙大小与分布,增强土壤团聚体的稳定性,进而提高土壤结构的稳定性<sup>[37]</sup>。

### 3.2 侵蚀土壤磁化率与土壤侵蚀及管理措施的关系

在不同侵蚀程度下,磁化率总体上随侵蚀程度加剧而降低,同时,表层增强性也随侵蚀程度加剧而减弱。其原因在于土壤侵蚀导致剖面物质的再分布,从而显著影响剖面土壤磁性特征<sup>[18]</sup>。随着侵蚀程度增大,富含磁性矿物的土壤颗粒受侵蚀作用剥离,磁性物质的累积量减少,直接影响磁性矿物的总量,导致磁化率与侵蚀程度呈负相关<sup>[17]</sup>。在深层土壤中,磁铁矿和磁赤铁矿等磁性矿物主要由 $Fe^{2+}$ 在适宜的气候条件下形成,但土壤侵蚀破坏这些形成过程的稳定性,不利于这些磁性矿物的形成和稳定<sup>[38]</sup>。此外,耕作加速土壤机械组成和磁性矿物的均一化,进一步加剧表层磁性矿物的再分布和流失<sup>[4]</sup>。因此,通过监测磁化率变化及变化幅度,可以及时对侵蚀强度进行初步的比较和评估,通过连续监测磁化率的变化,了解侵蚀的发展趋势和阶段性变化<sup>[10]</sup>。

除侵蚀程度外,管理措施差异也会导致磁化率存在一定的异质性<sup>[39]</sup>,但磁化率在不同管理措施间的差异相对小于其在侵蚀程度间的差异。在BF处理下,磁化率显著高于其他处理。可能是因为生物炭改善土壤团聚体和结构的稳定性,增加土壤的持水能力,有助于减少富含磁性矿物的细颗粒流失<sup>[40]</sup>,从而在一定程度上减轻侵蚀对磁化率的影响<sup>[41]</sup>。与F或CK处理相比,BF措施有效增强土壤抗侵蚀能力,从而在一定程度上减缓侵蚀对磁化率的负面影响,但在剧烈侵蚀条件下,侵蚀作用对磁化率的影响仍占据主导地位,成为控制磁化率变化的关键因子。本研究系统测定不同侵蚀程度与不同管理措施下的磁化率,并探讨不同处理条件的磁化剖面垂直特征及其影响因素。研究结果揭示磁化率在侵蚀过程中的变化规律能有效地指示土壤侵蚀过程,进一步验证其作为土壤侵蚀示踪指标的可行性,为利用磁性示踪法定量评估土壤侵蚀提供科学依据。然而,该方法的准确性还受土壤类型和气候因素等多重因素的制约。因此,在实际应用过程中,需要结合当地气候及土壤情况进行验证,以确保磁性示踪技术定量评估土壤侵蚀的可靠性。

## 4 结论

1)紫色土坡耕地侵蚀土壤磁化率特征呈现明显的垂直分布规律。0~10 cm表层土壤中,磁化率达到最大值,而后随着土壤剖面下降,磁化率迅速降低,具有明显的表层增强现象,且至母质层磁化率逐渐趋于稳定,符合弱磁性母质的发育特征。

2)主成分分析、最小数据集和线性拟合分析结果表明,土壤粒径是影响磁化率的主导因素,最小数据集指标权重为0.424,其次是土壤速效养分(0.367)和有机质(0.209)。土壤粒径主成分中,磁化率与黏粒、砂粒的拟合效果较好,与黏粒占比呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),与粉粒占比呈显著正相关( $p < 0.05$ ),与砂粒占比呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。

3)紫色土坡耕地土壤侵蚀程度和管理措施均显著影响磁化率( $p < 0.05$ )。随土壤侵蚀加剧,磁化率逐渐降低, $S_{-5}$ 、 $S_{-10}$ 、 $S_{-15}$ 、 $S_{-20}$ 较 $S_{-0}$ 分别下降7.21%、10.14%、19.10%和27.89%,其中 $S_{-0}$ 与 $S_{-15}$ 、 $S_{-20}$ 存在显著差异( $p < 0.05$ );管理措施对磁化率也有显著影响,尤其是在BF措施下,磁化率表现出更高的敏感性,平均较CK和F分别增加24.52%和12.75%,但由双因素方差分析可知,磁化率不受管理措施的改变而产生显著变化。

4)紫色土坡耕地土壤中的磁性矿物主要来源于成土过程中形成的次生矿物,且土壤细颗粒中的次生矿物含量更高;磁化率与土壤可蚀性因子呈显著负相关( $p < 0.01$ ),可蚀性大的土壤易受侵蚀外力影响,细颗粒更易被剥离和搬运,因此磁化率较低;此外,侵蚀通过影响土壤剖面的物质再分布,从而影响剖面土壤磁化率分布特征。

#### 参考文献:

- [1] CAO Z H, ZHANG K L, HE J H, et al. Linking rocky desertification to soil erosion by investigating changes in soil magnetic susceptibility profiles on karst slopes [J]. *Geoderma*, 2021, 389: e114949.
- [2] 程倩云,彭韬,张信宝,等.西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的 $^{137}\text{Cs}$ 和磁化率双指纹示踪研究[J].*水土保持学报*, 2019, 33(2): 140-145.  
CHENG Q Y, PENG T, ZHANG X B, et al. Tracing fine sediment sources in the surface and subsurface rivers of a karst watershed using compound fingerprinting with  $^{137}\text{Cs}$  and magnetic susceptibility in southwest China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 140-145.
- [3] 董元杰,史衍玺.坡面侵蚀土壤磁化率及磁性示踪试验研究[J].*水土保持学报*, 2004, 18(6): 21-26.  
DONG Y J, SHI Y X. Magnetic susceptibility of soil eroded in slope and experiment of magnetic tracing on slope soil erosion [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(6): 21-26.
- [4] DAN R. Particle-size and analytical considerations in the mineral-magnetic interpretation of soil loss from cultivated landscapes [J]. *Catena*, 2004, 57(2): 189-207.
- [5] BOUHLASSA S, BOUHSANE N. Assessment of areal water and tillage erosion using magnetic susceptibility: The approach and its application in Moroccan watershed [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(25): 25452-25466.
- [6] LIU L, ZHANG K L, ZHANG Z D, et al. Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in northeast China [J]. *Catena*, 2015, 129: 103-111.
- [7] YU Y, ZHANG K L, LIU L. Evaluation of the influence of cultivation period on soil redistribution in northeastern China using magnetic susceptibility [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 14-23.
- [8] YU Y, ZHANG K L, LIU L, et al. Estimating long-term erosion and sedimentation rate on farmland using magnetic susceptibility in northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 41-49.
- [9] THOMPSON R, OLDFIELD F. Environmental magnetism [M]. Winchester: Allen and Unwin, 1986: 21-38.
- [10] 于悦,张科利,刘亮,等.磁化率技术在土壤侵蚀领域的研究进展[J].*中国水土保持科学*, 2022, 20(3): 135-141.  
YU Y, ZHANG K L, LIU L, et al. Advance in studies on soil erosion using magnetic susceptibility technique [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3): 135-141.
- [11] MULLINS C E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: A review [J]. *Journal of Soil Science*, 1977, 28(2): 223-246.
- [12] DE JONG E. Magnetic susceptibility of gleysolic and chernozemic soils in Saskatchewan [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2002, 82(2): 191-199.
- [13] 卢升高.中国土壤磁性与环境[M].北京:高等教育出版社, 2003: 32.  
LU S G. Chinese soil magnetism and environment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 32.
- [14] 王小刚,韩光中,母娟,等.川中丘陵区紫色土坡面土壤侵蚀过程中基本理化性质与磁化率的演变特征[J].*四川农业大学学报*, 2017, 35(3): 345-352.  
WANG X G, HAN G Z, MU J, et al. Evolutional characteristics of basic soil properties and magnetic susceptibility during the purple soil erosion processes in the central Sichuan hilly region [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(3): 345-352.
- [15] GENNADIEV A N, OLSON K R, CHERNYANSKII S S, et al. Quantitative assessment of soil erosion and accumulation processes with the help of a technogenic magnetic tracer [J]. *Eurasian Soil Science*, 2002, 35(1):

- 17-29.
- [16] DING Z H, ZHANG Z D, LI Y C, et al. Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: e104568.
- [17] 董元杰, 史衍玺. 鲁中山区小流域坡面土壤侵蚀强度与磁化率的空间分异特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 6-10.  
DONG Y J, SHI Y X. Spatial characteristics of slope soil erosion intensity and susceptibility in small watershed of Shandong Province middle part [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 6-10.
- [18] 马玉增, 董元杰, 史衍玺, 等. 坡面侵蚀土壤化学性质对磁化率影响机理的研究 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 51-53.  
MA Y Z, DONG Y J, SHI Y X, et al. Affecting mechanism of slope soil eroded chemical characters to susceptibility [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 51-53.
- [19] OYEDELE D J, AINA P O. Response of soil properties and maize yield to simulated erosion by artificial topsoil removal [J]. *Plant and Soil*, 2006, 284(1): 375-384.
- [20] LIU J X, TU S H, GUO Y Z, et al. Effect of soil erosion on productivity of sloping field in micro-plot experiment [J]. *Agricultural Science and Technology*, 2013, 14(1): 127-130.
- [21] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究 [J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2009, 39(10): 1397-1412.  
WANG Z Q, LIU B Y, WANG X Y, et al. Experimental study on the influence of soil erosion on land productivity in black soil area of northeast China [J]. *Science in China (Series D (Earth Sciences))*, 2009, 39(10): 1397-1412.
- [22] 张科利, 刘亮, 于悦, 等. 磁化率与土壤侵蚀研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2024.  
ZHANG K L, LIU L, YU Y. Study on magnetic susceptibility and soil erosion [M]. Beijing: Science Press, 2024.
- [23] GAO L Q, BOWKER M A, XU M X, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 49-58.
- [24] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7-13.  
ZHANG K L, PENG W Y, YANG H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 7-13.
- [25] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Washington D C: United States Department of Agricultural-handbook, 1978.
- [26] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨 [J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241.  
WU K N, ZHAO R. Soil texture classification and its application in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 227-241.
- [27] 卢升高, 张子玉, 俞劲炎, 等. 玄武岩发育土壤的磁化率及其机理解析 [J]. *土壤学报*, 1999, 36(4): 544-550.  
LU S G, ZHANG Z Y, YU J Y, et al. Magnetic susceptibility of soils derived from basalt and its mechanism [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4): 544-550.
- [28] MAHER B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites [J]. *Geophysical Journal*, 1988, 94(1): 83-96.
- [29] 俞劲炎, 童永忠, 唐家演, 等. 土壤磁学 [J]. *土壤*, 1979, 11(2): 78-81.  
YU J Y, TONG Y Z, TANG J Y, et al. Soil magnetism [J]. *Soils*, 1979, 11(2): 78-81.
- [30] JONG E D, PENNOCK D J, NESTOR P A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada [J]. *Catena*, 2000, 40(3): 291-305.
- [31] XIA D S, JIA J, WEI H T, et al. Magnetic properties of surface soils in the Chinese Loess Plateau and the adjacent Gobi areas, and their implication for climatic studies [J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 78: 73-79.
- [32] 曾永耀, 高磊, 赵文青, 等. 中国南方红土磁化率的古气候意义研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(5): 133-139.  
ZENG Y Y, GAO L, ZHAO W Q, et al. Study on the paleoclimate implications of magnetic susceptibility of the red soils in southern China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(5): 133-139.
- [33] 陈雅敏, 宋效东, 刘峰, 等. 青藏高原表土磁化率空间分布特征及影响因素 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(2): 361-371.  
CHEN Y M, SONG X D, LIU F, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of magnetic susceptibility of topsoil on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(2): 361-371.
- [34] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 [J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5481-5490.  
DENG H, GAO M, LONG Y, et al. Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5481-5490.

(下转第 84 页)