

DOI: 10.11766/trxb202407080276

CSTR: 32215.14.trxb202407080276

冯滔, 陈晓燕, 朱平宗, 潘振桦, 杨澜, 王定斌. 三峡库区紫色土不同植被类型土壤抗蚀性能差异研究[J]. 土壤学报, 2025, 62 (5): 1259–1270.

FENG Tao, CHEN Xiaoyan, ZHU Pingzong, PAN Zhenhua, YANG Lan, WANG Dingbin. Differences in Soil Erosion Resistance Between Different Vegetation Types of Purple Soil in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (5): 1259–1270.

三峡库区紫色土不同植被类型土壤抗蚀性能差异研究*

冯滔, 陈晓燕, 朱平宗[†], 潘振桦, 杨澜, 王定斌

(水土保持生态修复重庆市重点实验室/西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘 要: 土壤抗蚀性能反映了土壤对侵蚀的易损性或敏感性, 是众多土壤侵蚀预测模型的重要参数。因此, 量化不同植被类型下的土壤抗蚀性能对于区域土壤侵蚀的预测及土地利用格局的调整具有重要意义。基于此, 本研究在三峡库区腹地忠县的秦岭小流域内选择库区 7 种典型植被类型, 探究不同植被类型土壤抗蚀性能的差异及其主控因素。结果表明: 不同植被类型的土壤抗蚀性能综合指数 (Comprehensive Soil Erosion Resistance Index, CSRI) 为 0.05~0.72, 其中玉米地最小, 然后依次为柑橘地、草地、桉树林、马尾松林、灌木林和柏树林; 且玉米地和柑橘地的 CSRI 显著小于其他植被类型 ($P<0.05$), 且与玉米地相比, 柑橘地、草地、桉树林、马尾松林、灌木林和柏树林的 CSRI 分别增大 210%、407%、779%、816%、1095%、1217%。不同植被类型土壤抗蚀性能的差异与近地表土壤性质和植被特性密切相关, CSRI 与土壤黏粒含量、总孔隙度、半分解枯落物蓄积量和根质量密度呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与有机质和水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 而与土壤容重呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。冗余分析结果表明土壤水稳性团聚体、黏粒和有机质含量是导致不同植被类型土壤抗蚀性能存在差异的主控因素, 可以解释其 64% 的差异。路径分析表明, 紫色土区不同植被类型土壤风化速率不同导致土壤黏粒含量存在差异, 使得土壤水稳性团聚体含量及稳定性发生变化, 进而影响土壤抗蚀性能。这与前人在其他土壤类型下认为的土壤抗蚀性能受控于植被特性间接影响土壤结构存在一定差异。

关键词: 土壤抗蚀性能; 植被类型; 紫色土; 三峡库区

中图分类号: S157.1[†] 文献标志码: A

Differences in Soil Erosion Resistance Between Different Vegetation Types of Purple Soil in the Three Gorges Reservoir Area

FENG Tao, CHEN Xiaoyan, ZHU Pingzong[†], PAN Zhenhua, YANG Lan, WANG Dingbin

(Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration/College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: 【Objective】 Soil erosion resistance reflects the vulnerability or sensitivity of soil to erosion, which is a critical

* 国家自然科学基金项目 (42307422)、中央高校基本业务费项目 (SWU-KQ22039) 和西南大学研究生科研创新项目 (SWUS23090) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42307422); Central University Basic Operating Expenses (No. SWU-KQ22039) and Postgraduate Research Innovation Project of Southwest University (No. SWUS23090)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zpz2411615087@163.com

作者简介: 冯滔, 男, 贵州思南人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。Email: ft2000124@163.com

收稿日期: 2024-07-08; 收到修改稿日期: 2024-12-05; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-01-09

parameter utilized for soil erosion prediction and is of significant importance for predicting regional soil erosion and adjusting land use patterns. Nevertheless, the potential effect as well as their driving mechanism of vegetation types on soil erosion resistance is still scarce in the purple soil of the Three Gorges Reservoir Area. Therefore, this study aimed to explore the potential effect of vegetation types on soil erosion resistance and decipher the influencing mechanisms of purple soil in the Three Gorges Reservoir area. 【Method】Based on a full field investigation in the Qinling watershed of Zhongxian County in the Three Gorges Reservoir area, seven typical vegetation types of the coniferous forest of *Cupressus funebris* Endl. (CF) and *Pinus massoniana* Lamb. (PM), broadleaf forest of *Eucalyptus spp.* (E), *Citrus reticulata* Blanco. (CR), shrub (S), grassland (G) and maize (M) were selected. Combined with the field sampling and indoor analysis, difference analysis, correlation analysis, redundancy analysis and path analysis, the differences as well as the main influencing factors of soil erosion resistance between different vegetation types were comprehensively analyzed. 【Result】The comprehensive soil erosion resistance index (CSRI) varied from 0.05 to 0.72 between different vegetation types, among which maize had the minimum CSRI, then followed by CR, G, E, PM, S and CF. Moreover, CSRI varied significantly between different vegetation types with the CSRI of SL and CR being significantly lower than that of other vegetation types. Compared to M, CSRI of CR, G, E, PM, S, and CF increased by 210%, 407%, 779%, 816%, 1095% and 1217%, respectively. Differences in CSRI between different vegetation types were closely related to near-surface soil properties and vegetation characteristics. Correlation analysis indicated that CSRI was significantly positively correlated with organic matter content, water-stable aggregates content, total porosity, clay content, litter weight of the semi-decomposed layer, and root mass density, whereas significantly negatively correlated with bulk density ($P < 0.05$). The results of redundancy analysis showed that water-stable aggregates, clay, and organic matter contents were the main factors controlling the differences in CSRI between different vegetation types, which could explain 64% of the total differences. However, the influencing mechanism of vegetation types on CSRI in purple soil was different from most previous studies carried out in other regions. Influenced by the formation process of purple soil, variation in CSRI between different vegetation types was dominantly controlled by clay content via its direct effect and indirect effect through increasing organic matter and water-stable aggregates contents. 【Conclusion】Sloping land and orchard land are still the potential areas of soil erosion in the Three Georges Reservoir area since it has the minimum CSRI. *Cupressus funebris* Endl land can be promoted as soil and water conservation species in the reservoir area. The relevant research results can provide a scientific basis for the adjustment of land use structure and the selection of tree species for soil and water conservation, to realize the green and sustainable development of the Three Georges Reservoir area.

Key words: Soil erosion resistance; Vegetation type; Purple soil; Three Gorges Reservoir area

土壤侵蚀是现阶段全球性的生态环境问题,不仅会导致土壤养分流失、微生物多样性下降、土壤退化和土地生产力下降,而且会造成水体污染、河道和湖库淤积并加剧洪涝灾害的发生,直接威胁人类社会可持续发展^[1]。土壤侵蚀除了受降雨、地形、植被等影响因素外,还取决于土壤抗蚀性能。作为众多土壤侵蚀预测模型(USLE、RUSLE、WEPP等)的重要参数,土壤抗蚀性能反映了土壤对侵蚀的敏感性,区别于传统的抗冲性、抗蚀性或可蚀性,其是对土壤抵抗侵蚀综合性能的表现^[2-3]。因此,土壤抗蚀性能的准确量化对于土壤侵蚀强度的预测和区域水土保持措施的实施具有重要意义。

国际上通用的土壤可蚀性因子 K 是使用最广泛的抗蚀性能指标,其反映了土壤对侵蚀外营力分离

和输移作用的敏感性,是影响土壤侵蚀的内在因素^[4]。通常土壤可蚀性因子 K 值越大,其抗蚀性能越差。但土壤可蚀性因子 K 值仅能反映土壤固有性质对侵蚀的影响,而不能反映植被等因素通过影响土壤结构等对侵蚀产生的影响。因此,随着研究的不断深入,越来越多的土壤性质如土壤黏结力、贯入阻力、饱和导水率和团聚体稳定性等用来表征土壤抗蚀性能,且这些抗蚀性能指标均与近地表土壤理化性质和植被特性密切相关^[5]。相关研究结果表明,土壤可蚀性因子 K 值和贯入阻力随土壤有机质含量的增加而减小,与此相反,土壤黏结力和饱和导水率随土壤有机质含量的增大而增大^[6-7]。此外,植被的生长和枯落物的分解也会通过物理缠绕、化学吸附和生物固结等作用提升土壤抗蚀性能。研究

19 ℃，降雨主要集中在雨季 4—10 月，约占全年降水总量的 70%。研究区土壤类型为紫色砂岩和紫色泥岩发育而成的紫色土，土层较薄，具有入渗性能好，抗蚀性能差的特点。三峡水库修建后，受剧烈人类活动的影响，区域内土地利用类型发生了显著变化，集中体现在园地大面积显著增加及坡耕地

和林地的减少。目前流域内主要以林地、园地、灌木地、草地以及坡耕地为主。

2023 年 7 月在对小流域进行野外详细勘察的基础上，在小流域内选择了库区典型针叶林（柏树和马尾松）、阔叶林（桉树）、柑橘地、灌木林、草地和玉米地共 7 个样地，基本情况如表 1 所示。

表 1 不同植被类型基本情况

Table 1 Basic information on different vegetation types

植被类型	样地面积	海拔	坡度	坡向	盖度	林龄	种植密度	主要植被群落
Vegetation type	Area/ m ²	Altitude/ m	Slope gradient/ °	Slope aspect / °	Canopy coverage/ %	Stand age/ a	Planting density/ (棵·100 m ⁻²)	Dominant plant community
柏树 ^①	>1 000	305.7	25	60	57.5	25	30	山麦冬
马尾松 ^②	>1 000	293.3	19	90	64.5	25	27	藓结皮
桉树 ^③	>1 000	184.7	25	80	37.5	16	22	丝栗栲
柑橘 ^④	>1 000	318.7	20	94	52	22	8	藓结皮
灌木 ^⑤	>1 000	299	25	69	57.5	—	—	黄荆
草地 ^⑥	约 500	350.3	20	85	42.5	—	—	狗尾草
玉米 ^⑦	约 200	316.5	2	110	45	—	525	玉米

①*Cupressus funebris* Endl., ②*Pinus massoniana* Lamb., ③Broadleaf forest of *Eucalyptus* spp., ④*Citrus reticulata* Blanco, ⑤Shrub, ⑥Grassland, ⑦Maize

1.2 近地表植被特性和土壤性质的测定

在选定样地内，从上坡至下坡采用“S”型采样法设置 3 个采样点，在每个样点设置 0.5 m×0.5 m 的样方框，然后用游标卡尺测定未分解和半分解层枯落物厚度。测定过程中未分解层位于枯落物的表层，枯落物颜色未发生明显变化、保持原有形态、无分解痕迹，半分解层枯落物无完整叶轮廓、颜色已发生明显变化、叶片已分解破碎^[16]。待枯落物厚度测量完成后，采用全收集法将样方框内未分解和半分解枯落物分别用塑料袋收集带回实验室后采用水洗烘干法（65℃，48 h）分别测定未分解和半分解枯落物蓄积量^[17]。枯落物收集完成后，在每个样点采用大环刀（直径 10 cm，高 5 cm）采集表层根土复合体，用自封袋收集后带回实验室采用水洗烘干法（65℃，48 h）测定根质量密度^[18]。

土壤样品采集过程中，林地和柑橘地样点选择冠层滴水线以内，灌木样点选择在冠层覆盖范围内。在每个样点未扰动地表使用标准环刀（直径 5 cm，高 5 cm）采集表层原状土测定土壤容重和总孔隙

度^[19]。并在每个样点用小铲子采集表层（0~5 cm）散土样，三个样点约采集 2 kg 并充分混合带回实验室，自然风干后去除石子、根系和枯落物等杂质后，分别过 2 mm 和 0.25 mm 的土壤筛用于测定土壤机械组成和有机质含量，其中土壤机械组成（采用美国制土壤分类标准进行分级，砂粒为 2~0.05 mm，粉粒为 0.05~0.002 mm，黏粒为<0.002 mm）采用马尔文激光粒度仪进行测定^[20]，土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法进行测定，然后换算成有机质含量^[21]。

1.3 土壤抗蚀性能指标测定

根据前人的研究结果结合本研究的区域特点，本研究选定土壤黏结力、贯入阻力、饱和导水率、团聚体平均水滴数、团聚体平均质量直径、土壤结构稳定性指数、土壤可蚀性因子 *K* 作为抗蚀性能指标^[3, 9-10]。其中土壤黏结力采用 Eijkelkamp 型微黏结力仪测定，土壤贯入阻力采用 TYD-1 贯入仪测定，每个样点重复 10 次；用大环刀（直径 10 cm，高 5 cm）采集原状土带回实验室后，用定水头法测定土壤饱

和导水率^[21], 每个样地重复 5 次; 土壤团聚体平均水滴数和平均质量直径采用常水头滴定法和湿筛法进行测定^[22]; 基于前面测定的土壤机械组成和有机碳含量, 采用 EPIC 模型中的计算公式计算土壤可

蚀性因子 K , 然后基于 Zhang 等^[23]提出的修正方式对计算的 K 值进行修正; 采用 Pieri^[24]提出的公式计算土壤结构稳定性指数 (Soil structural stability index, SSI)。公式如下所示:

$$K_{EPIC} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN} / (1 - \text{SIL} / 100) \right] \right\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{2.5C}{C + \exp(3.72 - 29.5C)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})} \right) \quad (1)$$

式中, SAN、SIL、CLA 和 C 分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\text{SN1} = 1 - \text{SAN} / 100$ 。

$$K = -0.01383 + 0.5158 K_{EPIC} \quad (2)$$

式中, K_{EPIC} 为 EPIC 模型计算的土壤可蚀性因子, K 为修正后的土壤可蚀性因子。

$$\text{SSI} = \frac{\text{SOM}}{\text{Clay} + \text{Silt}} \times 1000 \quad (3)$$

式中, SSI 为土壤结构稳定性指数 (%), SOM、Clay、Silt 分别为有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、黏粒 (%), 粉粒 (%) 含量。

基于上述测定的各土壤抗蚀性能指标, 采用加权平均法进一步计算得到土壤抗蚀性能综合指数, 公式如下所示:

$$\text{CSRI} = \sum_{i=1}^n W_i C_i \quad (4)$$

式中, CSRI 为土壤抗蚀性能综合指数, W_i 为指标权重系数, C_i 为指标隶属度。其中各抗蚀性能指标的权重系数通过因子分析法确定, 而各抗蚀性能指标的隶属度采用隶属度函数进行计算。隶属度函数一般分为“S”型和反“S”型, 主要根据各抗蚀性能指标与土壤抗蚀性能综合指数的正负效应来确定隶属度函数。当土壤抗蚀性指标与土壤抗蚀性能综合指数为正效应, 则该类抗蚀性能指标的隶属度采用“S”型隶属度函数计算, 如本研究中的黏结力、饱和导水率、平均水滴数、平均质量直径和土壤结构稳定性指数。相反, 当土壤抗蚀性指标与土壤抗蚀性能综合指数为负效应, 则该类抗蚀性能指标的隶属度采用反“S”型隶属度函数来计算, 如本研究中的

的土壤贯入阻力和土壤可蚀性因子 K ^[22]。

1.4 数据处理

不同植被类型土壤性质、植被特性和土壤抗蚀性能指标呈现正态分布且方差齐性前提下, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 中的最小显著差异分析 (LSD) 方法对其差异性进行分析。土壤抗蚀性能与其影响因素之间的相关关系采用 Pearson 相关分析法进行分析。不同植被类型土壤抗蚀性能差异的主要影响因素及其相对贡献大小采用冗余分析法 (RDA) 进行分析。各主要影响因素影响土壤抗蚀性能综合指数的方式采用路径分析。RDA 分析采用 Canoco 5 软件完成, 路径分析及其他数据统计分析采用 SPSS 24.0 软件完成, 图的制作采用 Origin 2022 软件完成。

2 结 果

2.1 不同植被类型土壤性质及植被特性差异

不同植被类型土壤性质及植被特性存在显著差异。由表 2 可知, 不同植被类型的土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 10.41%~37.70%、59.34%~86.46% 和 2.27%~5.03%, 其中玉米地砂粒含量最小而粉粒含量最大, 马尾松的砂粒含量最大而粉粒含量最小, 且与其他植被类型均存在显著差异 ($P < 0.05$), 灌木地的黏粒含量最大, 且显著大于其他植被类型。不同植被类型的土壤容重和总孔隙度分别为 1.14~1.44 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 45.65%~56.87%, 其中马尾松林的容重最小, 且显著小于其他植被类型 (柏树林和灌木地除外), 此外, 柑橘地的总孔隙度最小而马尾松最大, 且柏树、马尾松和灌木地的总孔隙度显著大于其他植被类型 ($P < 0.05$)。不同植被类型的土壤水稳性团聚体和有机质含量分别为 27.12%~

表 2 不同植被类型土壤性质差异

Table 2 Differences in soil properties between different vegetation types

植被类型	砂粒	粉粒	黏粒	容重	总孔隙度	水稳性团聚体	有机质
Vegetation type	Sand/%	Silt/%	Clay/%	Bulk density / (g·cm ⁻³)	Total porosity/ %	Water stable aggregate/ %	Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)
柏树 <i>Cupressus funebris Endl</i>	20.35±0.55d	76.63±0.59d	2.95±0.03d	1.25±0.03ab	51.22±1.11ab	86.00±0.59a	48.43±1.52a
马尾松 <i>Pinus massoniana Lamb</i>	37.70±0.13a	59.34±0.13g	2.96±0.13d	1.14±0.13b	56.87±3.82a	66.43±6.57b	26.53±0.79c
桉树 <i>Broadleaf forest of Eucalyptus spp.</i>	21.65±0.15c	75.23±0.14e	3.12±0.01c	1.38±0.05a	47.71±2.03b	80.46±2.25a	17.45±2.09d
柑橘 <i>Citrus reticulata Blanco</i>	23.92±0.27b	73.81±0.26f	2.27±0.02e	1.44±0.02a	45.65±0.73b	53.41±1.09b	16.38±1.00d
灌木 Shrub	12.98±0.46e	81.45±0.93c	5.03±0.06a	1.27±0.08ab	52.06±3.16ab	91.79±1.12a	40.78±1.07b
草地 Grassland	12.92±0.21e	83.82±0.20b	3.25±0.01b	1.35±0.03a	49.17±1.12b	61.40±2.09b	13.95±0.31de
玉米 Maize	10.41±0.13f	86.46±0.11a	3.10±0.01c	1.38±0.03a	47.88±0.97b	27.12±9.05c	11.80±0.31e

注：表中数据为平均值±标准误；水稳性团聚体为>0.25 mm 团聚体含量；同列不同小写字母表示不同植被类型间差异显著 ($P<0.05$)；下同。Note: The data in the table are average ± standard error; The water-stable aggregate content is > 0.25 mm aggregate content; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different land use types ($P<0.05$); The same below.

91.79%和 11.80~48.43 g·kg⁻¹，其中玉米地的有机质和水稳性团聚体含量均最小，且显著小于其他植被类型 ($P<0.05$)。

由表3可知，不同植被类型的枯落物未分解层、半分解层和总厚度分别为 1.60~19.13 mm、2.94~18.00 mm 和 6.45~37.13 mm，其中，桉树的未分解层、半分解层和总厚度均为最大，且显著大于其他植被类型，但是未分解层厚度为柏树最小，半分解层和总厚度为草地最小。不同植被类型的枯落物未分解层、半分解层和总蓄积量分别为 0.21~1.85 t·hm⁻²、0.22~3.91 t·hm⁻² 和 0.43~5.76 t·hm⁻²，其中，桉树的未分解层、半分解层和总蓄积量均为最大，且显著大于其他植被类型 ($P<0.05$)，而草地未分解层、半分解层和总蓄积量均为最小。不同植被类型的根质量密度为 0.04~1.66 kg·m⁻³，其中玉米地最小，灌木林最大，且桉树林、草地、玉米地显著小于其他植被类型 ($P<0.05$)。

2.2 不同植被类型土壤抗蚀性能差异

不同植被类型的土壤抗蚀性能指标存在显著差异。结果表明 (图 2)，不同植被类型的土壤黏结力和贯入阻力分别为 2.69~3.10 kg·cm⁻²和 3.68~

8.18 kg·cm⁻²，其中马尾松的黏结力最小，且显著小于其他植被类型 (柑橘地除外)，柑橘地的贯入阻力最大而柏树最小，且柏树、马尾松和玉米地显著小于其他植被类型。不同植被类型的饱和导水率为 0.35~6.19 mm·min⁻¹，其中柑橘地最小，且显著小于其他植被类型 (草地和玉米地除外)。不同植被类型的土壤平均质量直径和平均水滴数分别为 0.71~5.10 mm 和 5~29，其中灌木地的土壤平均质量直径最大，且显著高于其他植被类型 (柏树林除外)，玉米地的平均水滴数最小而桉树林最大，且桉树林显著高于其他植被类型。不同植被类型的土壤可蚀性因子 K 值和土壤结构稳定性指数分别为 0.08~0.11 (t·hm²·h) · (hm⁻²·MJ⁻¹·mm⁻¹) 和 1.32~6.08，其中玉米地的土壤可蚀性因子 K 值最大，且显著大于其他植被类型，但玉米地的土壤结构稳定性指数最小而柏树林最大，且玉米地和草地显著小于其他植被类型。

由于不同的抗蚀性能指标从不同的角度来反映土壤抵抗侵蚀的能力，且得到抗蚀能力的大小也各不相同。因此，为了综合评估不同植被类型的土壤抗蚀性能，基于上述 7 个土壤抗蚀性能指标，计算了一个土壤抗蚀性能综合指数 (CSRI) 来综合评估

表 3 不同植被类型植被特性差异

植被类型 Vegetation type	枯落物厚度 Litter thickness /mm			枯落物蓄积量 Litter weight / (t·hm ⁻²)			根质量 密度 Root mass density / (kg·m ⁻³)
	未分解	半分解	合计	未分解	半分解	合计	
	Un-decomposed	Semi-decomposed	Total	Un-decomposed	Semi-decomposed	Total	
柏树 <i>Cupressus funebris</i> Endl	1.60±0.21d	8.92±2.10b	10.51±2.22cd	0.54±0.07c	1.60±0.02b	2.13±0.08b	1.08±0.12a
马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb	10.97±1.55b	6.46±0.74bc	17.43±2.13b	0.90±0.11b	1.74±0.53b	2.64±0.48b	1.54±0.21a
桉树® <i>Broadleaf forest of Eucalyptus</i> spp.	19.13±1.54a	18.00±2.19a	37.13±1.32a	1.85±0.21a	3.91±1.19a	5.76±0.98a	0.36±0.09b
柑橘 <i>Citrus reticulata</i> Blanco	9.67±1.08b	9.03±0.53b	18.70±0.61b	0.51±0.05c	1.35±0.28b	1.86±0.32b	1.32±0.40a
灌木 Shrub	5.89±0.50c	8.45±1.70b	14.34±0.24bc	0.44±0.09c	0.95±0.24b	1.39±0.29bc	1.66±0.39a
草地 Grassland	3.51±0.51cd	2.94±0.31c	6.45±0.48d	0.21±0.04c	0.22±0.06b	0.43±0.07c	0.09±0.14b
玉米 Maize	—	—	—	—	—	—	0.04±0.02b

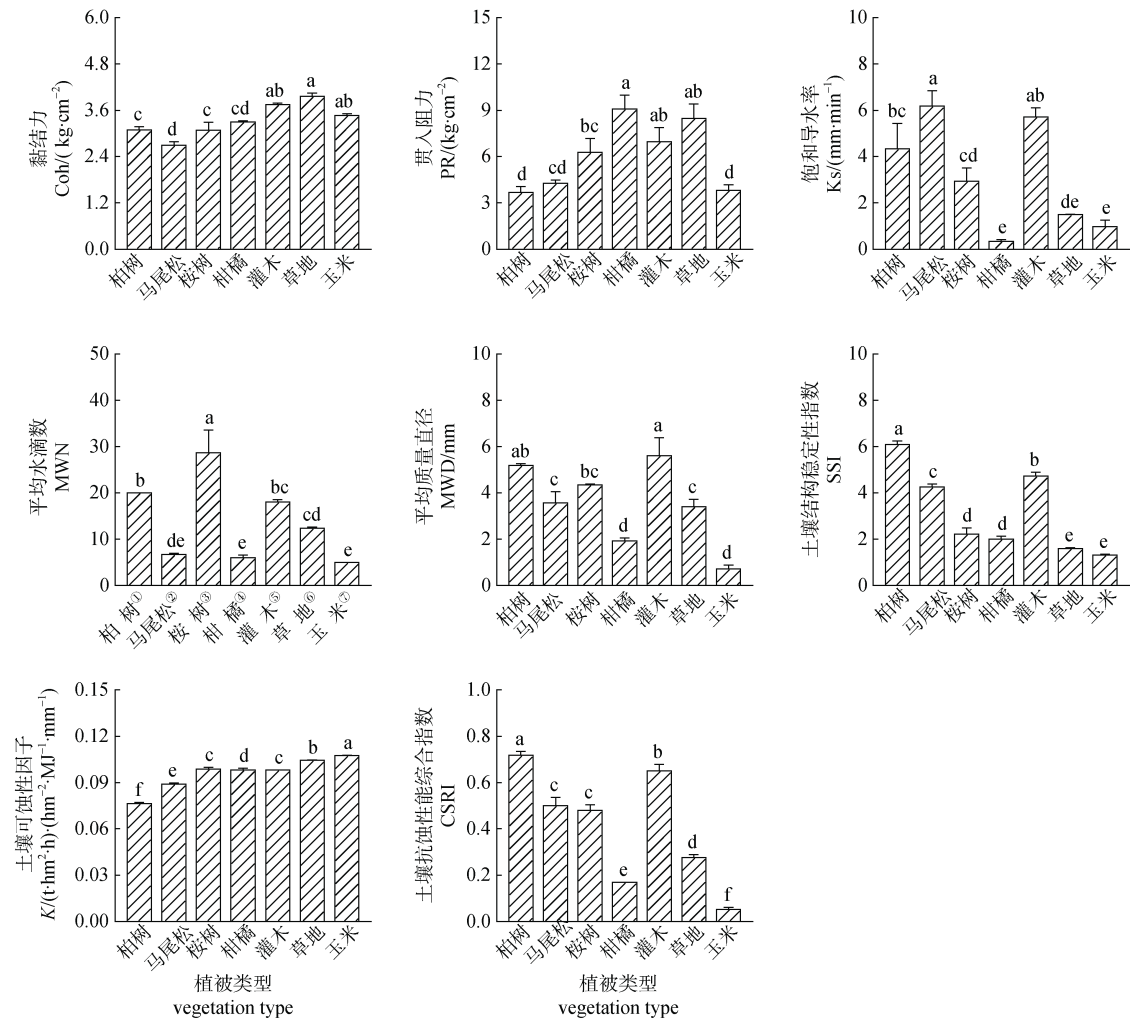


图 2 不同植被类型抗蚀性能差异

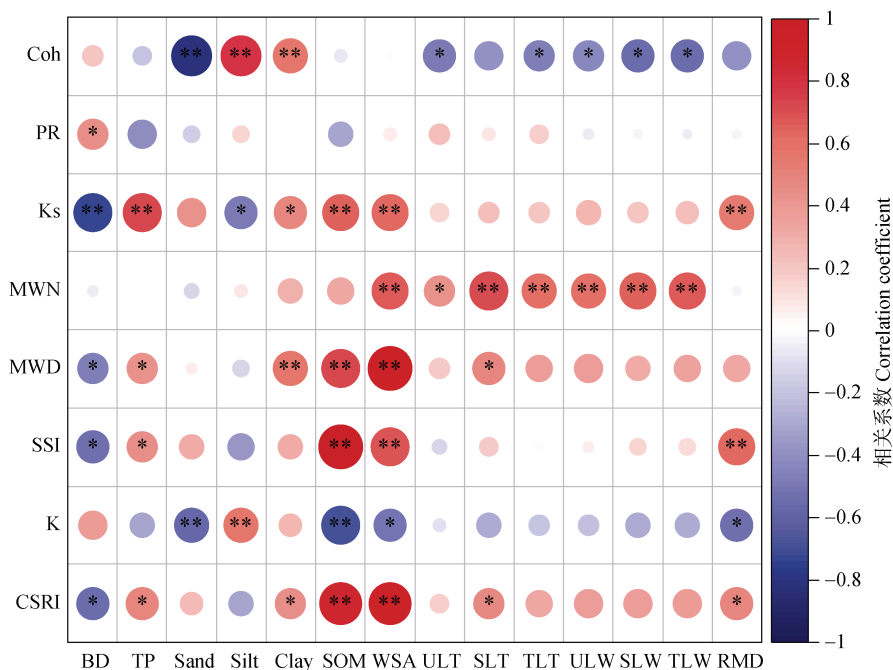
Fig. 2 Differences in soil erosion resistance between different vegetation types

不同植被类型的土壤抗蚀性能。结果表明(图2),不同植被类型的 CSRI 存在显著差异,且 CSRI 为 0.05~0.72。玉米地的 CSRI 最小,然后为柑橘地,且显著小于其他植被类型,表明玉米地和柑橘地是现阶段库区土壤侵蚀的重要策源地。以玉米地为对照,柏树林、马尾松林、桉树林、柑橘地、灌木林和草地的 CSRI 分别增大 1 217%、816%、779%、210%、1 096%和 407%。

2.3 不同植被类型土壤抗蚀性能影响因素

不同植被类型的土壤抗蚀性能的差异主要受土壤性质和植被特性差异的影响。相关分析结果表明,土壤抗蚀性能指标与大多数抗蚀性能影响因素均表现为显著的相关关系。其中土壤黏结力与枯落物未分解厚度、枯落物总厚度、枯落物未分解蓄积量、枯落物半分解蓄积量、枯落物总蓄积量均呈显著负相关关系($P<0.05$),与砂粒、黏粒含量呈极显著正

相关关系($P<0.01$);贯入阻力与容重呈显著正相关关系($P<0.05$);平均水滴数与水稳性团聚体含量、枯落物半分解厚度、枯落物总厚度、枯落物未分解蓄积量、枯落物半分解蓄积量、枯落物总蓄积量均表现为极显著正相关关系($P<0.01$),与枯落物未分解厚度表现为显著正相关关系($P<0.05$);平均质量直径与黏粒、有机质、水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系($P<0.01$);饱和导水率和土壤结构稳定性与有机质、水稳性团聚体含量、根质量密度呈极显著正相关关系($P<0.01$);而土壤可蚀性因子 K 与有机质、水稳性团聚体含量、根质量密度呈显著负相关关系($P<0.05$);综合来看,土壤抗蚀性能综合指数与黏粒含量、总孔隙度、半分解枯落物蓄积量和根质量密度呈现显著正相关关系($P<0.05$),与有机质和水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),而与土壤容重呈显著负相关关系($P<0.05$)(图3)。



注: Coh 为黏结力, PR 为贯入阻力, Ks 为饱和导水率, MWN 为平均水滴数, MWD 为平均质量直径, SSI 为土壤结构稳定性指数, K 为土壤可蚀性因子, CSRI 为土壤抗蚀性能综合指数; BD 为容重, TP 为总孔隙度, Sand 为砂粒, Silt 为粉粒, Clay 为黏粒, SOM 为有机质, WSA 为水稳性团聚体含量, ULT 为未分解枯落物厚度, SLT 为半分解枯落物厚度, TLT 为枯落物总厚度, ULW 为未分解枯落物蓄积量, SLW 为半分解枯落物蓄积量, TLW 为枯落物总蓄积量, RMD 为根质量密度。下同。* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。
Note: Coh is soil cohesion, PR is soil penetration resistance, Ks is an saturated conductivity, MWN is mean water number, MWD is mean weight diameter, SSI is soil structural stability index, K is erodibility factor, CSRI is comprehensive soil erosion resistance index; BD is bulk density, TP is total porosity, Sand is sand content, Silt is silt content, Clay is clay content, SOM is soil organic matter content, WSA is water stable aggregate content, ULT is litter thickness of the un-decomposed layer, SLT is litter thickness of semi-decomposed layer, TLT is total litter thickness, ULW is litter weight of the un-decomposed layer, SLW is litter weight of semi-decomposed layer, TLW is total litter weight, RMD is root mass density; The same below. * $P<0.05$, ** $P<0.01$.

图3 土壤抗蚀性能与其影响因素的相关性

Fig. 3 Correlation analysis between soil erosion resistance and its influencing factors

由于土壤抗蚀性能指标与大多数土壤性质和植被特性均呈显著相关性（图 3），因此采用冗余分析法进一步明确不同植被类型土壤抗蚀性能差异的主要影响因素。结果表明，所有测量的土壤性质和植被特性可以解释不同植被类型土壤抗蚀性能总变异的 69.73%，其中第一轴和第二轴的解释百分比分别为 49.40%和 20.33%（图 4）。在所有影响因素中，土壤水稳性团聚体、黏粒和有机质含量均表现为显著影响，分别解释了不同植被类型土壤抗蚀性能 29.63%、19.27%、14.86%的差异（表 4）。

但不同影响因素存在相互作用，因此，采用路径分析进一步明确了各主要影响因素对土壤抗蚀性能综合指数的影响路径（图 5）。结果表明，土壤黏粒、有机质、水稳性团聚体含量的直接路径系数分别为 0.66、0.76 和 0.87，表明其直接作用均有利于增强土壤抗蚀性能。此外，黏粒除了存在直接正效应外，也会通过增加土壤有机质含量促进水稳性团聚体的形成，进而改善土壤结构并间接影响土

壤抗蚀性能。但总体来看，土壤黏粒的直接和间接路径系数分别为 0.66 和 1.54，表明不同植被类型土壤抗蚀性能的差异主要受控于土壤黏粒含量的间接作用。

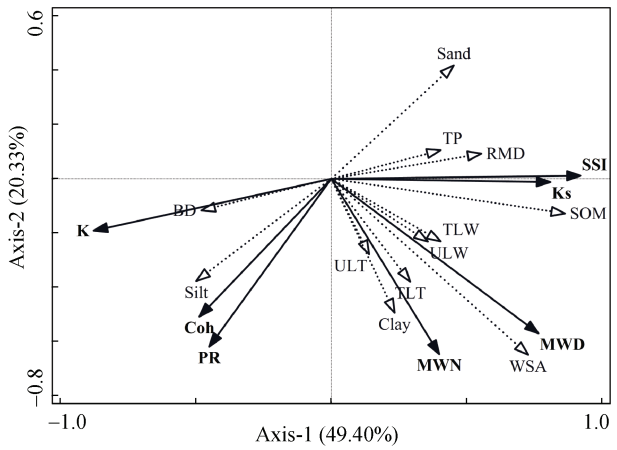


图 4 抗蚀性能与其影响因素的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) between soil erosion resistance and its influencing factors

表 4 各影响因素对不同植被类型土壤抗蚀性能综合指数差异的相对贡献

贡献度 Contribution/%	Table 4 Relative contribution of each influencing factor to the variation in CSRI between different vegetation types								
	水稳性团聚体 Water stable aggregate	黏粒 Clay	有机质 Organic matter	枯落物总量 Total litter weight	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	粉粒 Silt	砂粒 Sand	根质量 密度 Root mass density
	29.63	19.27	14.86	9.82	7.18	7.18	5.36	4.85	1.88
P	<0.05	<0.05	<0.05	0.132	0.178	0.176	0.178	0.202	0.253

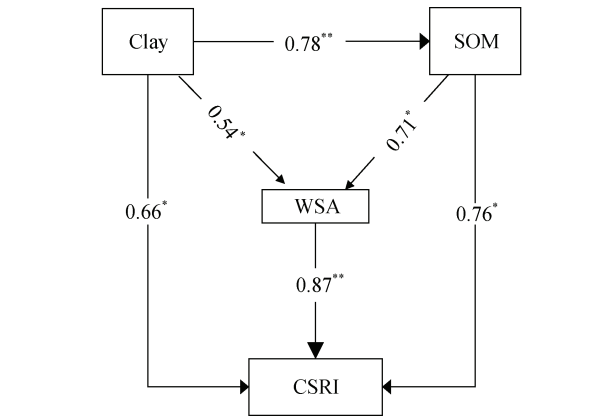


图 5 土壤抗蚀性能综合指数（CSRI）主要影响因素的路径分析

Fig. 5 The path analysis of main influencing factors of Comprehensive Soil Erosion Resistance Index (CSRI)

3 讨 论

3.1 不同植被类型土壤抗蚀性能的差异

不同植被类型土壤抗蚀性能指标均存在显著差异，但其差异在不同植被类型间没有相对一致的变化规律（图 2）。其主要是因为各抗蚀性能指标与近地表土壤性质和植被特性密切相关（图 3），但不同抗蚀指标的主要影响因素仍存在一定差异。土壤黏结力的变化主要受土壤机械组成和植被枯落物蓄积量等的综合影响，一般情况下，土壤中细颗粒含量越高，枯落物蓄积量越少，受击溅侵蚀影响，土壤越容易板结，导致其黏结力越大^[10]。本研究中的草地、灌木和玉米地的细颗粒含量相对较高而枯落物蓄积

量相对减少(表2,表3),导致土壤黏结力相对较高(图2)。土壤饱和导水率、平均水滴数和平均质量直径主要受土壤孔隙特征、水稳性团聚体和有机质含量的影响^[25],本研究中柑橘地和玉米地的总孔隙度、水稳性团聚体含量和有机质含量均较小(表2),使得柑橘地和玉米地的土壤饱和导水率、平均水滴数和平均质量直径显著小于其他植被类型(图2)。土壤结构稳定性指数和土壤可蚀性因子主要受土壤机械组成和有机质含量的影响,且SSI随有机质含量的增大而增大,而K随有机质含量的增大而减小^[26]。本研究中玉米地的有机质含量最小而柏树地最大,导致柏树地的SSI最大而K最小,玉米地的SSI最小而K最大(图2)。综上可知,由于不同抗蚀性能指标主要影响因素不同,当采用不同的土壤抗蚀性能指标评估土壤抗蚀性能的时候可能会得到完全不同的结果。因此本研究通过选取前人常用的抗蚀性能指标,计算一个综合抗蚀性能指数,以期全面反映植被类型变化驱动下的土壤性质和植被特性变化对土壤抗蚀性能的影响。

三峡库区紫色土区不同植被类型的土壤抗蚀性能综合指数存在显著差异,其中玉米地的CSRI最小,然后依次为柑橘地、草地、桉树林、马尾松林、灌木林和柏树林,且玉米地和柑橘地的CSRI显著小于其他植被类型(图2)。表明玉米地和柑橘地仍是库区土壤侵蚀发生的主要潜在区域,这与前人在其他区域的研究结果一致^[27-30]。本研究结果也证实了三峡库区长江沿岸大量推广柏树作为水保林先锋树种的正确性,但需要注意,由于柑橘地具有较好的经济效益,因此现阶段柑橘地仍作为库区的一种水土保持措施,库区柑橘地面积仍在逐年增加,且呈现出沿河流分布的特征^[31]。但从土壤综合抗蚀性能来看,柑橘地的土壤综合抗蚀性能仅略大于玉米地,因此在库区发展柑橘地时也需要考虑其水土流失和面源污染的风险。大量研究表明柑橘地草本植被的种植能够有效减少面源污染物的流失^[32],但草本植被在增加土壤抗蚀性能方面作用有限(草地土壤抗蚀性能综合指数仅大于玉米地和柑橘地),而灌木在增强土壤抗蚀性能方面的作用仅次于柏树,因此,可以在柑橘地配置一些草灌结合的水土保持和面源污染物防治措施,以减小柑橘地的水土资源和面源污染物流失,实现库区的绿色可持续发展。此外,受近地表土壤理化性质和植被特性季节变化

的影响,土壤抗蚀性能也存在季节变化^[6]。然而,本研究的采样时间为7月份,仅探究了雨季不同植被类型土壤抗蚀性能的差异,对于其季节变化有待进一步研究。

3.2 不同植被类型土壤抗蚀性能差异主控因素

不同植被类型土壤抗蚀性能的差异与近地表土壤和植被的特性密切相关。相关分析结果表明,土壤抗蚀性能综合指数与黏粒含量、总孔隙度、半分解枯落物蓄积量和根质量密度呈显著正相关关系,与有机质和水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系,而与土壤容重呈显著负相关关系(图3),这与前人大多数的研究结果一致^[33-34]。因为土壤有机质和黏粒含量有利于促进水稳性团聚体的形成并提升团聚体稳定性,进而改善土壤结构,增强土壤抗蚀性能^[3, 35]。枯落物覆盖和混入土壤会通过减小雨滴的击溅侵蚀和改善土壤结构来直接提升土壤抗蚀性能^[36]。植被生长过程中,根系会通过缠绕和化学吸附作用来增强土壤颗粒之间的强度从而直接提升土壤抗蚀性能^[37]。此外,植被枯落物和根系的分解也会通过提高有机质和土壤细颗粒含量,促进水稳性团聚体的形成及提升其稳定性,从而增强土壤抗蚀性能^[38]。

此外,虽然土壤抗蚀性能均与近地表土壤和植被特性密切相关,但本研究得到三峡库区紫色土区不同植被类型土壤抗蚀性能差异的影响机制与前人在其他地区关于不同植被类型土壤抗蚀性能差异的影响机制存在一定差异。前人在西北黄土高原地区和东北黑土区的研究结果表明不同植被类型土壤抗蚀性能的差异主要受控于不同植被类型枯落物蓄积量和根质量密度差异驱动的土壤结构的变化^[3, 10]。而本研究发现,三峡库区紫色土区不同植被类型土壤抗蚀性能的差异主要受控于土壤黏粒含量驱动的土壤结构的变化。这可能与紫色土的成土过程有关,因为紫色土的形成主要依赖于其快速的物理风化过程,最初形成颗粒较大的半风化土壤,砂粒含量较高而黏粒含量较少,然后随着物理、化学和生物等风化过程的继续,细颗粒含量逐渐增加^[39]。但土壤抗蚀性能的提升主要取决于土壤细颗粒和有机质含量,因为土壤细颗粒和有机质含量决定了团聚体含量及其稳定性。

4 结 论

三峡库区紫色土区不同植被类型土壤抗蚀性能

存在显著差异, 总体表现为玉米地最小, 然后依次为柑橘地、草地、桉树林、马尾松林、灌木林和柏树林, 且玉米地和柑橘地的土壤抗蚀性能显著小于其他植被类型。因此, 坡耕地和经果林仍是现阶段库区土壤侵蚀发生的潜在区域, 而柏树可以作为库区的水保树种进行推广应用。库区不同植被类型土壤抗蚀性能的差异与近地表土壤性质和植被特性显著相关, 但其影响机制与其他地区存在一定差异。紫色土区不同植被类型土壤风化速率不同导致土壤黏粒含量存在差异, 使得土壤水稳性团聚体含量及稳定性发生变化, 进而影响土壤抗蚀性能。这与前人在其他土壤类型下认为的土壤抗蚀性能受控于植被特性间接影响土壤结构存在一定差异。相关研究结果可为库区土地利用结构的调整及水土保持树种的选择提供科学依据, 以实现库区的绿色可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] Chen S Q, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Impact of slope position on soil erodibility indicators in rolling hill regions of Northeast China[J]. *Catena*, 2022, 217: 106475.
- [2] Xing S K, Zhang G H, Wang C S, et al. Effects of straw incorporation on soil erosion resistance along a land degradation gradient in the black soil region of China[J]. *Catena*, 2023, 231: 107365.
- [3] Chen S Q, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Impact of land use type on soil erodibility in a small watershed of rolling hill Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 227: 105597.
- [4] Wang J G, Kang Q, Kuang G M, et al. Spatial variability of soil erodibility (K-factor) in Jianshan watershed of Yunnan Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23 (4): 555—560. [王敬贵, 亢庆, 邝高明, 等. 尖山河小流域土壤可蚀性 K 值空间变异研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (4): 555—560.]
- [5] Zhang B J, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Temporal variations in soil erodibility indicators of vegetation-restored steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 286: 106661.
- [6] Wang H, Zhang G H. Temporal variation in soil erodibility indices for five typical land use types on the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2021, 381: 114695.
- [7] Yin X P, Zhou Y C, Luo M, et al. Contrast on soil anti-erodibility of main soils in the source area of Ganjiang River[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8 (2): 8—14. [尹先平, 周运超, 罗明, 等. 赣江源区主要土壤抗蚀性能对比[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8 (2): 8—14.]
- [8] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff[J]. *Plant and Soil*, 2007, 294 (1): 169—183.
- [9] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81 (6): 1567—1576.
- [10] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2019, 174: 24—35.
- [11] Cao R X, Liu J, Deng K K, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (12): 5330—5339. [曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. *环境科学*, 2019, 40 (12): 5330—5339.]
- [12] Yu Z, Li M Y, Qian Y Y, et al. Land use change and its ecological effects in Three Gorges Reservoir area based on CA—Markov model with multiple scenarios simulation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31 (3): 363—372. [余洲, 李明玉, 钱雨扬, 等. 基于 CA—Markov 模型多情景模拟的三峡库区土地利用变化及其生态环境效应[J]. *水土保持研究*, 2024, 31 (3): 363—372.]
- [13] Zhang H Y, Wang K Q, Song Y L. Soil erosion resistance under different land use types in Jianshan River watershed in middle Yunnan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (5): 50—57. [张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (5): 50—57.]
- [14] Ren X, Yan N Z, Cheng Y Y, et al. Effects of different land use types on soil anti-erodibility in Chongqing Karst depression and Karst-hill peak areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39 (6): 829—835. [任霞, 严宁珍, 程永毅, 等. 重庆溶洼—丘峰区土地利用类型对土壤抗蚀性的影响[J]. *中国岩溶*, 2020, 39 (6): 829—835.]
- [15] Wang Y Q, Wang Y J, Zhu J Z. Anti-erodibility analysis in forest soil of typical forests in Jinyun mountain in Chongqing city[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14 (6): 103—108. [王云琦, 王玉杰, 朱金兆. 重庆缙云山典型林分林地土壤抗蚀性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14 (6): 103—108.]
- [16] Niu X Y, Sun X M, Chen D S, et al. Characteristics of microbial community in litter relative to stand of *Larix kaempferi* different in development stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (6): 1471—1482. [牛小云, 孙晓梅, 陈东升, 等. 不同发育阶段日本落叶松人工林枯落物层微生物群落特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (6): 1471—1482.]
- [17] Zhang B Q, Wang Z Y, Yang Y F, et al. Accumulation and water-holding capacity of typical shrub woodland litters

- in Loess Hilly Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39 (4): 76—81. [张宝琦, 王忠禹, 杨艳芬, 等. 黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能[J]. *水土保持通报*, 2019, 39 (4): 76—81.]
- [18] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18—27.
- [19] Sun L, Zhang G H, Luan L L, et al. Temporal variation in soil resistance to flowing water erosion for soil incorporated with plant litters in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2016, 145: 239—245.
- [20] Chen L, Wang J, Huo C P, et al. Study on particle distribution characteristics of soil physical crust profile in sloping farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (4): 983—992. [陈琳, 王健, 霍春平, 等. 坡耕地土壤物理结皮分层颗粒组成特征研究[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (4): 983—992.]
- [21] Huang Y T, Chen J X, Gao Y H, et al. Effects of long-term tillage on hydraulic properties of typical black soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 998—1008. [黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淇, 等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61 (4): 998—1008.]
- [22] Zhu P Z, Feng T, Yang L, et al. Biological soil crusts decrease soil erodibility of economic fruit forests land through its consolidation effect in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Catena*, 2024, 243: 108200.
- [23] Zhang K L, Shu A P, Xu X L, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72 (6): 1002—1011.
- [24] Pieri C. Fertility of soils: A future for farming in the west African savannah[M]. Berlin, Germany: Springer, 1992.
- [25] Annabi M, Raclot D, Bahri H, et al. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia[J]. *Catena*, 2017, 153: 157—167.
- [26] Chen L, Li Y T, Zhang Z D. Impact of land use type and slope position on the erodibility of Karst hillslopes in Southwest China[J]. *Catena*, 2023, 233: 107498.
- [27] Liu D D, Zhang P H, Wang J, et al. A comparison on soil anti-erodibility over different land use types on loess slope[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(9): 102—106. [刘旦旦, 张鹏辉, 王健, 等. 黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J]. *林业科学*, 2013, 49 (9): 102—106.]
- [28] Fang H Y, Fan Z M. Assessment of soil erosion at multiple spatial scales following land use changes in 1980-2017 in the black soil region, (NE) China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17 (20): 7378.
- [29] Li G F, Yang R X, Xie F Q, et al. Slope soil erosion characteristic of lateritic red soil under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (2): 101—107, 230. [李桂芳, 杨任翔, 谢福倩, 等. 不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (2): 101—107, 230.]
- [30] Celik I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83 (2): 270—277.
- [31] Wang B, He B H, Lin N, et al. Spatial and temporal evolution of navel orange orchard land and its driving factors in Fengjie County[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52 (6): 204—214. [王斌, 何丙辉, 林娜, 等. 奉节县脐橙果园用地时空演变特征与驱动因子分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52 (6): 204—214.]
- [32] Fu J, Wang Y Q, Ma C, et al. Research progress on the effects of vegetation buffer zone on reducing agricultural non-point pollution[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (2): 1—8. [付婧, 王云琦, 马超, 等. 植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展[J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (2): 1—8.]
- [33] Ma R, Zheng Z C, Wang S, et al. Soil anti-erodibility at different growth stages of maize in hilly yellow soil areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19): 107—114. [马瑞, 郑子成, 王双, 等. 山地黄壤区玉米不同生育期土壤抗蚀性特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 107—114.]
- [34] Lü C, Gong Y B, Che M X, et al. Study on the soil erosion resistance of alpine shrub meadow in western Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (2): 9—17. [吕宸, 宫渊波, 车明轩, 等. 川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (2): 9—17.]
- [35] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79 (1): 7—31.
- [36] Sun L, Zhang G H, Liu F, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147: 238—247.
- [37] De Baets S, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. *Geomorphology*, 2006, 76 (1/2): 54—67.
- [38] Lado M, Paz A, Ben-Hur M. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (1): 234—242.
- [39] Wei C F, Ni J P, Gao M, et al. Anthropogenic pedogenesis of purple rock fragments in Sichuan Basin, China[J]. *Catena*, 2006, 68 (1): 51—58.

(责任编辑: 檀满枝)