DOI: 10. 11686/cyxb2025530
http://cyxb. magtech. com. cn
潘明巧, 陈晓燕, 韦盼, 等. 三峡库区紫色土典型土地利用方式土壤崩解速率差异研究. 草业学报, 2026, 35(12): 30－40.
PAN Ming-qiao, CHEN Xiao-yan, WEI Pan, *et al*. Differences in the soil disintegration rate among typical land-use types of purple soil in the Three Gorges Reservoir area. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(12): 30－40.

三峡库区紫色土典型土地利用方式土壤崩解速率差异研究

潘明巧[1], 陈晓燕[1,2], 韦盼[1], 冯滔[1], 杨澜[1], 朱平宗[1,2*]
(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 土壤崩解速率量化了土壤在静水中发生土粒分散和土块崩塌的快慢, 是表征土壤抗侵蚀能力的关键指标, 可为探究土壤侵蚀内在机理, 制定有效的水土保持措施提供重要科学依据。在三峡库区库尾江津区黄墩溪小流域内选取了坡耕地、常绿阔叶林、常绿针叶林、灌木林、园地和草地 6 种典型土地利用方式, 通过野外采样与室内分析相结合的方法, 系统分析了不同土地利用方式土壤崩解速率的差异, 并明确了导致差异的主控因素及影响途径。结果表明: 1)不同土地利用方式土壤崩解速率为 2. 17～5. 08 g·min^{-1}, 其中坡耕地的土壤崩解速率显著大于其他土地利用方式, 常绿针叶林、常绿阔叶林和园地的土壤崩解速率则显著小于其他土地利用方式; 2)不同土地利用方式土壤崩解速率与植被特性和土壤理化性质显著相关, 其中土壤崩解速率与枯落物蓄积量、根质量密度、砂粒含量、黏粒含量、毛管孔隙度、>0. 25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著负相关(P<0. 01), 与有机质含量呈显著负相关(P<0. 05), 而与粉粒含量呈极显著正相关(P<0. 01); 冗余分析结果表明, 枯落物蓄积量、根质量密度、黏粒含量和土壤容重是导致不同土地利用方式土壤崩解速率存在差异的主要因素; 3)通径分析结果表明, 不同土地利用方式植被根系的直接和间接作用均有利于减小土壤崩解速率, 且其直接效应(通径系数－0. 433)大于其通过改善土壤结构的间接效应(通径系数－0. 204)。研究结果深化了紫色土区植被生长对土壤崩解特性影响机理的认识, 也为三峡库区优化土地利用结构、实施以植被管理为核心的水土保持措施提供了理论依据与实践指导。

关键词: 崩解特性; 植被根系; 土壤结构; 紫色土; 三峡库区

Differences in the soil disintegration rate among typical land-use types of purple soil in the Three Gorges Reservoir area

PAN Ming-qiao[1], CHEN Xiao-yan[1,2], WEI Pan[1], FENG Tao[1], YANG Lan[1], ZHU Ping-zong[1,2*]
1. *School of Resources and Environment*, *Southwest University*, *Chongqing* 400716, *China*; 2. *Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation Ecological Restoration*, *Southwest University*, *Chongqing* 400716, *China*

Abstract: The soil disintegration rate describes the speed of soil particle dispersion and clod collapse in still water, and is a key parameter for assessing soil erosion resistance. This metric provides a scientific basis for exploring the internal mechanisms of soil erosion and formulating effective soil and water conservation measures. The aim of this study was to explore differences in the soil disintegration rate of purple soil under different land-use types in the Three Gorges Reservoir area, and identify the main controlling factors and mechanisms contributing to these differences. A

收稿日期: 2025-12-25; 改回日期: 2026-03-09
基金项目: 重庆市自然科学基金创新发展联合基金重点项目(CSTB2024NSCQ-LZX0075), 国家自然科学基金(42307422)和重庆市大学生创新创业训练计划项目(S202510635329)资助。
作者简介: 潘明巧(2000－), 女, 贵州赫章人, 在读硕士。E-mail: m15121507748@163. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: zpz2411615087@163. com

field study was conducted in the Huangdunxi watershed in Jiangjin District, Chongqing, focusing on six typical land-use types: Slope farmland, evergreen broad-leaved forestland, evergreen coniferous forestland, shrubland, orchard land, and grassland. Field sampling and laboratory analyses were conducted to evaluate the soil disintegration rate and the associated influencing factors, e. g. , vegetation characteristics and soil properties. The results show that the soil disintegration rate ranged from 2. 17 to 5. 08 $g \cdot min^{-1}$ among different land-use types, with the highest values in the slope farmland, followed by shrubland and grassland, and the lowest values in evergreen coniferous forestland, evergreen broad-leaved forestland, and orchard land. The soil disintegration rate differed among the various land-use types, and was affected by vegetation characteristics and soil physicochemical properties. The soil disintegration rate showed highly significant negative correlations with litter weight, root mass density, sand content, clay content, capillary porosity, and >0. 25 mm water-stable aggregate content ($P<0.01$), a significant negative correlation with soil organic matter content ($P<0.05$), and a highly significant positive correlation with silt content ($P<0.01$). A redundancy analysis indicated that litter weight, root mass density, clay content, and bulk density were the main factors contributing to differences in the soil disintegration rate among different land-use types. A path analysis revealed that, under different land-use types, vegetation roots had both direct and indirect effects to reduce the soil disintegration rate. However, the direct effect of roots to decrease the soil disintegration rate was slightly greater than their indirect effect to improve soil structure, with path coefficients of −0. 433 and −0. 204, respectively. These findings deepen our understanding of how vegetation growth affects the soil disintegration characteristics of purple soil, and provide practical guidance for optimizing land-use and implementing vegetation management-focused soil conservation measures in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: disintegration characteristics; vegetation roots; soil structure; purple soil; Three Gorges Reservoir area

土壤崩解指土壤在静水中发生碎裂解体塌落或强度减弱的现象[1],主要是由于增湿过程中矿物的差异膨胀导致土中夹带的空气被压缩产生张应力,亲水性矿物与氢离子反应形成易溶盐导致膨胀土的堆积能力降低,以及黏粒的崩解和膨胀作用导致团聚体的崩解[2]。土壤崩解过程与土壤侵蚀的发生过程密切相关,在降水和地表径流作用下发生土壤侵蚀的过程中,土壤崩解是侵蚀物质的重要来源,是侵蚀发生的一个前提条件[3]。土壤崩解强度通常以崩解速率作为量化指标,即单位时间内土体崩解的体积或质量。土壤崩解速率越大,表明土壤在静水环境中分散、破碎及塌落的过程越快,其抗冲性能相应越弱,因而,发生土壤侵蚀的风险也越高[4]。因此,作为评价土壤抗侵蚀能力与侵蚀程度的关键物理指标,研究土壤崩解速率对于深入理解土壤侵蚀机理、评估区域水土流失风险具有重要意义。

土壤崩解受多种内外过程的综合影响,如干湿交替、冻融循环、植被生长和土壤理化性质等[5-6]。土地利用方式变化会驱动植被特性及土壤内在属性发生响应,进而影响土壤崩解特性[6]。通常,植被生长过程中,地表枯落物覆盖能有效减小降水动能,减弱击溅侵蚀,其分解还持续向土壤输入有机碳,并通过改善微环境与养分条件调控微生物群落,促进团聚体形成并增强其稳定性[7]。同时,地下根系网络通过直接捆绑作用显著提升土壤稳定性,根系分泌物与有机质和矿物形成胶结体,进一步提升了土壤内聚力,增强了土壤结构稳定性[8],从而显著提升土壤抗崩解能力,降低土壤崩解速率。因此,大量的研究结果表明,相较于耕地,植被恢复后土壤崩解速率显著减小[9-11]。但不同区域关于不同土地利用方式土壤崩解速率差异的影响因素存在一定的差异。如张思靖等[5]在黄土区的研究发现,不同土地利用土壤的崩解性能呈草地<坡耕地<梯田<果园<坝地,其中植物根系和土壤机械组成是导致不同土地利用方式土壤崩解速率存在差异的主控因素。王丽鑫等[12]在黑土区的研究结果表明,土壤崩解速率表现为农地最高,草地次之,林地最低,且土壤有机碳和粉粒含量驱动的土壤结构变化是导致不同土地利用方式土壤崩解速率存在差异的主控因素。

三峡库区作为长江上游重要的生态屏障区和国家级水土流失重点治理区,在人类活动与自然营力的共同作用下,土壤侵蚀问题日益突出,对区域生态安全构成严重威胁[13]。紫色土是三峡库区的主要土壤类型,占比超过70%,具有土层薄、易风化、质地疏松、孔隙度大和团聚结构少等特点[14],极易发生土壤侵蚀,被认为是库区水土流失的主要策源地。随着三峡水库的建成,移民搬迁和城市建设等人为活动显著改变了库区的土地利用格局[15]。土地利用方式变化驱动植被特性和土壤性质产生响应,必然会影响土壤崩解速率。然而,以往该地区的研究多聚焦于单一的植物根系、含水率、容重、干湿交替等因素对土壤崩解的影响[16-17],关于土地利用方式对土壤崩解速率的影响研究相对较少,相关影响机制也不清楚。尽管张卫等[18]的研究揭示了林地与园地两种利用方式下土壤崩解速率的差异,并明确了水稳性团聚体的关键作用,但其研究所涉及的土地利用方式仍较为有限,未能系统阐明不同人为干扰强度下土壤崩解的内在机制。因此,鉴于紫色土极易侵蚀的特性以及土地利用格局的改变,本研究在三峡库区的江津区黄墩溪小流域选取了坡耕地、常绿阔叶林、常绿针叶林、灌木林、园地和草地6种典型土地利用方式,系统分析了库区紫色土不同土地利用方式土壤崩解速率的差异,并揭示了导致这种差异的作用机制,相关研究结果对控制区域水土流失与保障生态安全具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区库尾江津区慈云镇的黄墩溪小流域(106°09′45″－106°14′19″ E,29°00′11″－29°05′20″ N),小流域面积为61.1 km^2,海拔为157～661 m,属长江一级支流。小流域地貌以丘陵为主(>90%),为典型山地丘陵峡谷区。气候类型为亚热带季风湿润气候,多年平均气温17.9 ℃,多年平均降水量1000 mm,降水主要集中在4－9月。土壤类型主要为地带性的紫色土,成土母质为紫色砂岩和页岩等,具有抗风化能力弱的特点,在长期的风化作用以及外界环境影响下,易快速分解破碎,因此,土壤抗蚀性能差,在降水作用下极易发生土壤侵蚀[19]。小流域现有土地利用类型主要为坡耕地、草地、灌木地、林地和园地,各土地利用占比约为坡耕地(62.17%)>林地(15.68%)>园地(7.17%)>草地(0.51%)[20]。

1.2 样品采集与测定方法

2024年1月通过对小流域的全面踏查,在小流域内选取了三峡库区6种典型土地利用方式,包括常绿阔叶林、常绿针叶林、园地(花椒*Zanthoxylum bungeanum*)、灌木林、草地和坡耕地。其中,常绿阔叶林为无人为干扰的次生林;常绿针叶林为人工种植但无后期抚育,常绿阔叶林和针叶林除了乔木外,林下仍存在一定数量的灌木和草本,林下盖度约为40%,形成了较好的乔灌草结构;灌木林为自然演替形成,无人为干预;草地由园地(花椒)撂荒5年后形成,其间无播种、施肥或锄草等人为活动;园地(花椒)采用清耕管理模式,每年3月进行松土、除草和施肥,7月待花椒采收完后再次除草,此外受良好水热条件的影响,花椒林下苔藓结皮也显著发育,盖度约为50%;坡耕地实行玉米(*Zea mays*)－红薯(*Ipomoea batatas*)轮作,翻耕2次,分别在4月(玉米播种前)、7月(红薯种植前)进行,秸秆不还田。由于影响土壤崩解速率的植被生长特性和土壤理化性质等因素与坡度、坡位和坡向等地形地貌密切相关,因此,为减小地形地貌等因素对研究结果的影响,样地选取过程中尽可能保证各样地的坡度、坡向和海拔等其他立地条件相对一致,但受土地利用方式空间客观分布规律的影响,林地坡度略大于其他土地利用方式,各样地基本信息见表1。此外,野外调查过程中发现小流域内无法满足6个土地利用方式均有3块坡度、坡向以及海拔等立地条件相似的重复样地。因此,为避免不同土地利用方式重复样地海拔、坡度、坡向以及水热条件等的差异引起的植被生长特性和土壤性质差异对结果的影响,各土地利用方式仅选择了1块立地条件基本相似且面积足够大(面积超过1 km^2)的样地,在坡面尺度上采用“S”形5点采样法进行样品的采集,综合反映坡面尺度不同坡位植被生长和侵蚀差异导致的土壤理化性质差异对结果的影响,满足代表性的要求。

样品于2024年9月采集,在选定的样地内沿坡面按“S”形布设5个采样点作为重复观测,以覆盖样地内的自然变异,两个样点沿坡面方向的水平距离超过50 m。其中常绿阔叶林、常绿针叶林和园地采样点均位于乔木和经果林滴水线范围内,以确保样品的独立性与代表性。先在采样点附近选择0.5 m×0.5 m样方框,用塑料袋收

集样方框内所有枯落物，带回实验室后用水洗烘干法测定枯落物蓄积量；然后用直径 10 cm，高 5 cm 的环刀在样方框内采集 0～5 cm 土层的根土复合体，带回实验室后用水洗烘干法测定根质量密度[21]。然后在每个采样点所选样方框附近（样方框外）采集 0～5 cm 土层的散土样，每个采样点约采集 2 kg，带回实验室自然风干后去除砾石、根系和枯落物等杂质，分别过 2.00 和 0.25 mm 土壤筛用于测定土壤机械组成（Mastersizer 3000，英国）[22]和有机碳含量（硫酸－重铬酸钾氧化外加热法）[23]。每个采样点采集的土壤样品在实验室测定时进行 3 次平行重复测定，取平均值作为该采样点的测定值，以减小土样测定过程中的随机误差。用 100 cm^3 标准环刀在每个样点所选样方框附近（样方框外）未扰动地表采集 0～5 cm 土层原状土样，采用环刀法测定土壤容重和毛管孔隙度[24－25]。用长 19.0 cm、宽 10.6 cm 和高 4.5 cm 的铝盒采集原状土样，带回实验室后去除石块和粗根，沿土壤自然结构面轻掰为直径小于 10 mm 的土块，自然风干后过 10 mm 筛，采用湿筛法测定＞0.25 mm 水稳性团聚体含量[24]。由于土壤侵蚀发生在表层土壤，因此，本研究用于测定土壤崩解特性及其影响因素的土壤和根－土复合体样品均采集于表层 0～5 cm。此外，根系对土壤崩解特性的影响主要体现在须根和细根的直接捆绑作用以及改善土壤结构的间接作用。因此，针对本研究中的常绿阔叶林和针叶林的根质量密度，主要测定根－土复合体的须根和细根质量密度，不包括直径较大的粗根的质量密度。

表 1　研究样地基本信息

Table 1　Basic information of the sample site

土地利用方式 Land-use type	海拔 Altitude（m）	坡度 Slope gradient（°）	坡向 Slope aspect（°）	林龄 Stand age（a）	种植密度 Planting density（plants·100 m^{-2}）	植被盖度 Vegetation coverage（%）	主要植被群落 Dominant plant community
坡耕地 Slope farmland	432	5	60	—	—	46.7	玉米 *Z. mays*
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	408	17	119	30	18	95.0	楠木 *Phoebe zhennan*、樟树 *Cinnamomum camphora*
常绿针叶林 Evergreen coniferous forests	402	16	168	25	20	83.3	马尾松 *Pinus massoniana*
园地 Garden plot	430	5	60	20	15	10.0	花椒 *Z. bungeanum*
灌木林 Shrubs	422	6	60	—	88	66.7	漆树 *Toxicodendron vernicifluum*
草地 Grassland	431	5	60	—	—	75.0	马唐 *Digitaria sanguinalis*

注："－"表示在此指标上无相应数据，下同。

Note：The "－" indicates no corresponding data under the specified indicator，the same below.

植被特性和土壤理化性质采样完成后，用直径 6.18 cm、高 2 cm 的定制环刀采集原状土样，带回实验室后采用静水崩解法[26]测定土壤崩解速率，每个采样点采集 3 个原状土样（3 个土样的平均值作为该样点的土壤崩解速率）。为消除初始含水量对结果的影响，试验前将采集的原状土样进行风干处理。将风干土样轻轻推出，小心放置于铁丝网板架上，随后将网板架悬挂于拉力计的固定挂钩上；缓慢将网板架浸入盛有清水的崩解水缸中，待其稳定后记录拉力计初始读数并开始计时；前 1 min 内每隔 10 s 记录一次读数，之后每隔 30 s 记录一次，直至连续 5 次读数保持不变，即认为崩解试验结束。土壤崩解速率（soil disintegration rate，SR）按稳定阶段土壤崩解量与崩解时间的比值计算，公式如下：

$$SR=\frac{\rho s(1+\beta)}{\rho s(1+\beta)-1}\times\frac{f_{t1}-f_{t2}}{\Delta t}$$

式中：SR 为土壤崩解速率（g·min^{-1}）；β 为土壤饱和含水量（%）；ρs 为国际通用土壤密度，为 2.65 g·cm^{-3}；f_{t1}、f_{t2} 分别为崩解前后土重（g）；Δt 为崩解时间（min）。

1.3　数据处理

采用单因素方差分析（one-way ANOVA）中的最小显著差异分析（least significant difference，LSD）法分析不同土地利用方式植被特性、土壤理化性质和土壤崩解速率的差异。采用 Pearson 相关分析法分析土壤崩解速率与

其影响因素之间的相关关系，数据的正态分布和方差齐性分析均在差异分析和相关分析前进行。采用冗余分析法(redundancy analysis, RDA)确定不同土地利用方式土壤崩解速率差异的主要影响因素，各主要影响因素对土壤崩解速率的影响途径采用通径分析法(path analysis)进行分析。采用Canoco 5软件完成RDA分析，采用SPSS 17.0软件完成数据统计分析，采用Origin 2024软件完成图的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式植被特性和土壤理化性质差异

不同土地利用方式植被特性和土壤理化性质差异显著(表2)。不同土地利用方式枯落物蓄积量和根质量密度分别为0.34～1.24 t·hm^{-2}和0.40～2.45 kg·m^{-3}，其中，常绿阔叶林的枯落物蓄积量和根质量密度均为最大，灌木林均为最小。不同土地利用方式土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为10.23%～20.16%、74.96%～85.44%和4.32%～5.14%，其中常绿阔叶林砂粒含量最大而粉粒含量最小；坡耕地砂粒含量最小而粉粒含量最大，且黏粒含量显著小于其他土地利用方式($P<0.05$)。不同土地利用方式土壤容重和毛管孔隙度分别为1.22～1.52 g·cm^{-3}和25.10%～41.93%，其中常绿阔叶林土壤容重最小而毛管孔隙度最大，且灌木林的毛管孔隙度显著小于其他土地利用方式($P<0.05$)。此外，不同土地利用方式土壤有机质含量为17.63～34.24 g·kg^{-1}，>0.25 mm水稳性团聚体含量为53.81%～82.57%，其中，常绿针叶林有机质含量显著大于其他土地利用方式，常绿针叶林和常绿阔叶林>0.25 mm水稳性团聚体含量显著大于其他土地利用方式，而坡耕地>0.25 mm水稳性团聚体含量显著小于其他土地利用方式($P<0.05$)。

2.2 不同土地利用方式土壤崩解速率差异

不同土地利用方式土壤崩解速率为2.17～5.08 g·min^{-1}。单因素方差分析结果表明，不同土地利用方式的土壤崩解速率存在一定差异。其中，坡耕地的土壤崩解速率(5.08 g·min^{-1})显著大于其他土地利用方式($P<0.05$)，而常绿针叶林、常绿阔叶林和园地的土壤崩解速率则显著小于其他土地利用方式($P<0.05$)。与坡耕地相比，灌木林、草地、常绿针叶林、常绿阔叶林和园地的土壤崩解速率分别减小了16.28%、36.44%、55.42%、57.26%和57.32%(图1)。

表2 不同土地利用方式植被特性和土壤理化性质差异

Table 2 Differences in vegetation characteristics and soil physicochemical properties of different land use types

影响因素 Influence factor	坡耕地 Slope farmland	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests	常绿针叶林 Evergreen coniferous forests	灌木林 Shrubland	园地 Garden plot	草地 Grassland
枯落物蓄积量 Litter weight (t·hm^{-2})	—	1.24±0.56a	0.71±0.03bc	0.34±0.07cd	0.95±0.14ab	1.24±0.32a
根质量密度 Root mass density (kg·m^{-3})	0.57±0.27c	2.45±0.13a	1.91±0.30b	0.40±0.03c	1.84±0.18b	0.61±0.10c
砂粒含量 Sand content (%)	10.23±0.23b	20.16±0.88a	19.78±0.22a	10.32±0.11b	10.76±0.10b	10.46±0.16b
粉粒含量 Silt content (%)	85.44±0.23a	74.96±0.83c	75.08±0.21c	85.07±0.12a	84.43±0.09b	84.96±0.29ab
黏粒含量 Clay content (%)	4.32±0.02d	4.88±0.07b	5.14±0.01a	4.61±0.03c	4.81±0.01b	4.58±0.13c
容重 Bulk density (g·cm^{-3})	1.26±0.02cd	1.22±0.05d	1.23±0.02d	1.37±0.14bc	1.52±0.11a	1.43±0.05ab
毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	31.06±1.57c	41.93±1.17a	41.26±1.87a	25.10±0.83e	34.07±2.57b	28.49±0.57d
水稳性团聚体含量 Water-stable aggregates content (>0.25 mm, %)	53.81±3.47d	81.42±3.71a	82.57±2.73a	64.02±3.53c	70.25±2.37b	61.45±2.86c
土壤有机质含量 Soil organic matter content (g·kg^{-1})	18.69±0.32cd	24.98±1.40b	34.24±4.70a	17.63±0.45d	18.07±0.83d	21.55±1.20bc

数据均为平均值±标准误差，同行不同小写字母表示不同土地利用方式之间存在显著差异($P<0.05$)。The data are all averages±standard errors, and different lowercase letters in the same line indicate that there are significant differences among different land use types ($P<0.05$).

2.3　不同土地利用方式土壤崩解速率影响因素

不同土地利用方式土壤崩解速率与植被特性及其驱动的土壤性质的变化密切相关。Pearson 相关分析结果表明，土壤崩解速率与枯落物蓄积量、根质量密度、砂粒含量、黏粒含量、毛管孔隙度和＞0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著负相关（$P<0.01$），与有机质含量呈显著负相关（$P<0.05$）；而与粉粒含量呈极显著正相关（$P<0.01$，图 2）。各影响因素之间也存在显著的相关关系，表明各影响因素对土壤崩解速率的影响可能存在交互作用。

因此采用冗余分析法进一步明确了导致不同土地利用方式土壤崩解速率差异的主要影响因素。结果表明，所有测定的土壤崩解速率影响因素中，黏粒含量、枯落物蓄积量、根质量密度和土壤容重均显著影响土壤崩解速率（$P<0.05$），贡献度分别为 73.90%、15.20%、4.70% 和 4.20%（表 3）。

为了进一步探究各影响因素驱动土壤崩解速率产生响应的作用途径，采用通径分析进一步明确各主要影响因素对土壤崩解速率的直接和间接效应（表 4）。结果表明，枯落物蓄积量、根质量密度、土壤黏粒含量、土壤容重的直接通径系数分别为 −0.301、−0.433、−0.415、−0.216，表明枯落物蓄积量、根质量密度、土壤黏粒含量和土壤容重的直接作用均有利于减少土壤崩解速率。其中，根质量密度的直接通径系数（−0.433）和总通径系数（−0.637）绝对值在所筛选的 4 个主要影响因素中均为最大，表明其是影响土壤崩解速率的主导因子。此外，根质量密度除直接负效应外，还通过提高黏粒含量（间接通径系数为 −0.298）改善土壤结构，从而间接降低土壤崩解速率。但根质量密度直接通径系数明显大于其间接通径系数，表明紫色土区不同土地利用方式土壤崩解速率的差异主要受控于根系的直接捆绑作用。

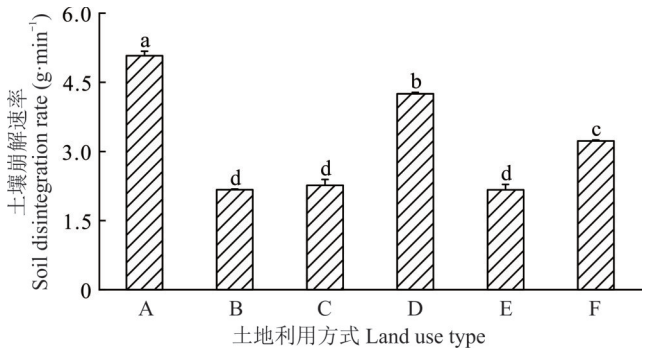


图 1　不同土地利用方式土壤崩解速率差异

Fig. 1　Differences in soil disintegration rate among different land use types

A：坡耕地 Slope farmland；B：常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests；C：常绿针叶林 Evergreen coniferous forests；D：灌木林 Shrubland；E：园地 Garden plot；F：草地 Grassland. 不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著（$P<0.05$）Different lowercase letters indicate significant differences among different land use types（$P<0.05$）.

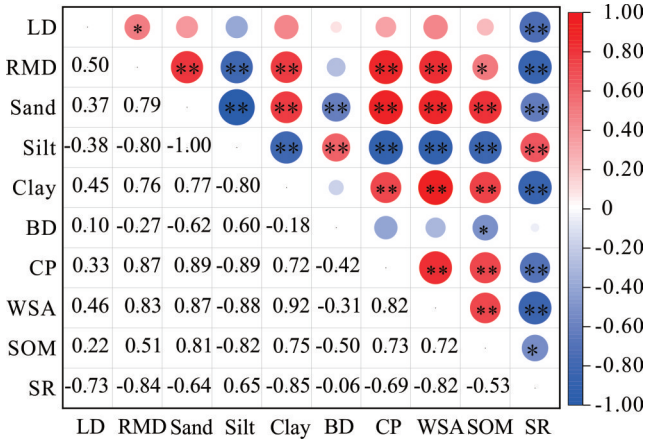


图 2　土壤崩解速率与其影响因素的相关性

Fig. 2　Correlation between soil disintegration rate and its influencing factors

LD：枯落物蓄积量 Litter weight；RMD：根质量密度 Root mass density；Sand：砂粒；Silt：粉粒；Clay：黏粒；BD：土壤容重 Soil bulk density；CP：毛管孔隙度 Capillary porosity；WSA：＞0.25 mm 水稳性团聚体含量 Water-stable aggregates content ＞0.25 mm；SOM：土壤有机质含量 Soil organic matter content；SR：土壤崩解速率 Soil disintegration rate；*：$P<0.05$；**：$P<0.01$；下同 The same below.

表 3　土壤崩解速率各影响因素的相对贡献

Table 3　Relative contribution of various influencing factors to soil disintegration rate

项目 Item	黏粒 Clay	枯落物蓄积量 Litter weight	根质量密度 Root mass density	容重 Bulk density	有机质 Soil organic matter	毛管孔隙度 Capillary porosity	粉粒 Silt	水稳性团聚体 Water-stable aggregates（＞0.25 mm）
贡献度 Contribution（%）	73.90	15.20	4.70	4.20	0.80	0.60	0.30	0.30
P	＜0.010	＜0.010	＜0.050	＜0.050	0.204	0.170	0.362	0.406

表4 土壤崩解速率主要影响因素的通径分析

Table 4 Path analysis of main factors affecting soil disintegration rate

自变量 Variable	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					总通径系数 Total path coefficient
		枯落物蓄积量 Litter weight	根质量密度 Root mass density	黏粒 Clay	容重 Bulk density	合计 Total	
枯落物蓄积量 Litter weight	−0.301**	—	—	−0.039	−0.066	−0.105	−0.406
根质量密度 Root mass density	−0.433**	—	—	−0.298	0.094	−0.204	−0.637
黏粒 Clay	−0.415**	—	—	—	−0.005	−0.005	−0.420
容重 Bulk density	−0.216**	—	—	—	—	0.000	−0.216

注："—"表示该路径在模型中不存在或效应不适用，所有系数均为标准化系数。

Note: The "—" symbol indicates the path is absent in the model or the effect is not applicable. All coefficients are standardized.

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤崩解速率的影响

土壤崩解性能受植被特性和土壤理化性质等因素共同影响，因此不同土地利用方式植被生长特性的差异及其驱动的土壤理化性质的变化必然会影响土壤崩解特性。本研究结果表明，坡耕地的土壤崩解速率最大，且显著大于林地和草地(图1)，这与刘旦旦等[9]和张卫[10]的研究结果一致。林地和草地依靠枯落物覆盖和发达根系有效维持土壤团聚体稳定性，同时有机质和微生物活动促进大团聚体形成[27]，显著降低了崩解速率。而坡耕地在频繁耕作、除草和收获等人为干扰下，土壤团聚体遭到破坏，加之频繁人为践踏和机械压实导致土壤容重增加、孔隙度降低，土壤结构进一步退化[8,28]，提高了土壤崩解速率。

本研究发现，研究区内的园地(花椒林)土壤崩解速率最低，而灌木林的崩解速率相对较大。该结果与传统认知中园地一般具有较高而灌木地具有较低土壤崩解速率的观点存在差异，其原因可能与植被类型与管理模式等对土壤结构稳定性的影响有关。园地内的花椒在7月采收后会形成大量的枯枝落叶，除此之外，花椒林下生物结皮也高度发育(盖度超过50%)，枯落物的分解和生物结皮的发育增加了有机质含量，加快了紫色土的分解，促进了团聚体的形成，导致园地的枯落物蓄积量、土壤水稳性团聚体含量、黏粒含量和毛管孔隙显著优于灌木林地。此外，园地发达的花椒根系以及生物结皮的发育形成的密集根系网络也有利于提升根－土复合体的稳定性，显著增强土壤的机械稳定性[29−31]；根系在生长过程中形成的大孔隙促进水分入渗，有效降低了孔隙内封闭空气的压力，进而显著降低了土壤崩解速率[32]。较高的团聚体含量和适宜的孔隙结构有效减缓了水分的快速入渗，抑制了黏土矿物的差异膨胀和双电层斥力效应[6]。此外，园地人工施肥利于促进植被生长，较高的枯落物蓄积量与根质量密度为土壤微生物提供了充足的碳源，从而促进微生物活动及其分泌的胞外多糖等生物胶结剂，增强土壤结构稳定性[8]。相比之下，灌木林地表覆盖度较高，但其根系分布较浅，枯落物分解缓慢，在高温高湿的气候条件下土壤更易迅速湿润并发生崩解[33]。综上所述，土地利用方式对土壤崩解速率的影响不能简单以植被类型判断，而应综合考虑实际管理措施、植物功能特性及区域环境特征等因素的交互作用。

3.2 不同土地利用方式土壤崩解速率影响因素分析

不同土地利用方式土壤崩解速率的变化主要受近地表土壤和植被特性的共同调控。基于冗余分析和通径分析的结果，本研究发现枯落物蓄积量、根质量密度、黏粒含量和土壤容重是影响土壤崩解速率的关键因子，且均与土壤崩解速率呈显著负相关。植物根系在土体中穿插、缠绕，形成机械固持网络，这一"生物加筋"效应直接增强土壤结构稳定性。枯落物在分解过程中显著增加土壤有机质，其半分解产物还可与矿物颗粒胶结形成有机－无机复合体，增强颗粒间的黏结力，从而减少土壤分离能力[5,34]。较高的枯落物蓄积量与发达的根系还通过增加地表粗糙度[35]，有效调控土壤水分运移路径与速率，促进孔隙气体排出，延缓土体饱和界面的形成，从外部侵蚀能量消减和内部孔隙压力调控两个维度共同抑制土壤崩解过程[36−37]。土壤崩解速率随着黏粒含量的增加而降低，这与Grosse等[38]的研究结果一致。紫色土胶结物质匮乏，黏粒为核心胶结体，其微小含量差异可显著改变土壤结

构与崩解速率，因此冗余分析中贡献度较高。黏粒含量对土壤抗崩解性能的提升不仅源于其自身的胶结能力，也与植被营造的微环境密切相关。根系分泌物和枯落物分解为微生物提供了充足的养分，显著增强了土壤微生物活性[39]。在紫色土中，这种微生物活性的提高加速了原生矿物的风化，加速了半风化紫色土的风化成土，促进次生黏粒矿物的形成和砂粒的释放[40]，导致林地土壤中砂粒和黏粒含量的增加，粉粒含量的减少[41]。黏粒通过其高比表面积和表面电荷吸附砂粒和粉粒，增强团聚体的稳定性，形成更为致密的结构单元[13,42]。另外，土壤容重与孔隙度共同表征土壤结构的紧实程度。在质地相近条件下，容重增加反映土壤细颗粒占比提升，导致总孔隙度与大孔隙数量减少。这种结构变化在降低孔隙连通性的同时增强了颗粒间黏结力，从而抑制土壤崩解过程[3]。容重作为根系孔隙构建与黏粒胶结作用共同调控的关键指标，其与崩解速率的负相关关系揭示了二者共同作用改善土壤结构的内在机制。根系发育形成的生物孔隙降低容重[43]，而黏粒胶结促进的结构重组则增加容重[44]，二者的动态平衡决定了土壤结构稳定性。

此外，尽管土壤崩解速率与土壤理化性质及植被特性密切相关，但本研究在三峡库区紫色土区域所揭示的不同土地利用方式土壤崩解速率的影响机制，与前人在黄绵土区和典型黑土区的相关研究存在区别。以往的研究[5,12]表明，不同土地利用方式崩解速率的差异主要源于有机质含量和根质量密度差异所驱动的土壤结构变化。而本研究发现，在紫色土区，该差异则主要受植被根系对土壤颗粒的直接捆绑作用，这与 Zhu 等[29]得出的三峡库区经果林下生物结皮的发育主要通过其直接的捆绑作用而非干旱半干旱区生物结皮通过改善土壤结构来提升土壤抗蚀性能的研究结果一致。这一差异可能与紫色土的成土过程特性密切相关，其母质（紫色砂、页岩）风化强烈，但成土时间通常相对较短，以物理风化为主，导致土壤发育程度较低，表现为土层浅薄、结构松散、抗蚀性弱及有机质含量偏低的特征[31]。因此，植被（尤其是根系）的物理固土和机械捆绑作用成为增强土壤结构稳定性的关键途径，其效应相较于依赖有机质累积和缓慢结构发育的过程更为直接和显著，导致植被的直接机械作用成为主导因子。

4　结论

1）不同土地利用方式显著影响紫色土土壤崩解速率，坡耕地崩解速率最高（5.08 g·min^{-1}），园地崩解速率最低（2.17 g·min^{-1}）。

2）枯落物蓄积量、根质量密度、黏粒含量和土壤容重是调控土壤崩解速率的关键因子，其中黏粒含量虽绝对差异较小，但其胶结作用对紫色土抗崩解性能的提升具有重要贡献。

3）植被根系通过直接捆绑作用（通径系数－0.433）和间接改善土壤结构（通径系数－0.204）两条路径降低土壤崩解速率，且直接效应占主导地位。以上结果表明，紫色土区植被恢复主要通过根系的直接机械作用提升土壤抗崩解能力，这一发现深化了对植被与土壤相互作用机制的认识，为三峡库区优化土地利用结构、实施以植被管理为核心的水土保持措施提供了理论依据。

参考文献 References：

[1] Xiao H, Peng D D, Shao Y Y, *et al*. Mechanism of soil disintegration by *Cynodon dactylon* root in the purple soil from water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1116－1122.
肖海，彭逗逗，邵艳艳，等. 狗牙根根系对三峡库区消落带紫色土崩解性能的作用机理分析. 土壤通报，2019，50(5)：1116－1122.

[2] Li H R, Zhang Q, Wu J J, *et al*. Response of soil aggregate disintegration to antecedent moisture during splash erosion. Catena, 2024, 234: 107633.

[3] Zhang C H, Xiao B, Li S L, *et al*. Characteristics of biocrusts in croplands and their effects on surface soil disintegration in the black soil region of Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1773－1782.
张晨晖，肖波，李胜龙，等. 东北黑土区农田生物结皮的特征及其对表层土壤崩解的影响. 应用生态学报，2022，33(7)：1773－1782.

[4] Li Q, Zhang Z, Sun H, *et al*. A new modified method for calculation of soil disintegration rate. Research of Soil and Water

Conservation, 2015, 22(6): 344－348.
李强, 张正, 孙会, 等. 土壤崩解速率的一种修正方法. 水土保持研究, 2015, 22(6): 344－348.

[5] Zhang S J, Ma J Y, Li Z B, *et al.* Experimental study on the change and influencing factors of the disintegration performance of silty loam soil in loess hilly and gully region: A case study of Wangmaogou small watershed. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 91－102.
张思靖, 马建业, 李占斌, 等. 黄土丘陵沟壑区粉砂壤土崩解性能变化及其影响因子试验研究－以王茂沟小流域为例. 生态学报, 2025, 45(1): 91－102.

[6] Li Y R, Wang Y Y, Fan W H, *et al.* Hydro-disintegration of loess-paleosol sequences and its implications for microscale landform evolution. Catena, 2025, 259: 1－13.

[7] Jiang W S, Li Z W, Xie H G, *et al.* Land use change impacts on red slate soil aggregates and associated organic carbon in diverse soil layers in subtropical China. Science of the Total Environment, 2023, 856: 159194.

[8] Li W Q, Shen F X, Liu Y J, *et al.* Soil depth determine the ecological stoichiometry of soil aggregates after returning ancient rice terraces to forest. Catena, 2022, 219: 106587.

[9] Liu D D, Zhang P H, Wang J, *et al.* A comparison on soil anti-erodibility over different land use types on loess slope. 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. 林业科学, 2013, 49(9): 102－106.

[10] Zhang W. Soil anti-erodibility under different land use types in Dabie Mountainous Area of western Anhui Province－A case study in Yuexi County of Anhui Province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 38－41.
张卫. 皖西大别山区不同土地利用类型的土壤抗侵蚀性－以安徽省岳西县为例. 水土保持通报, 2016, 36(2): 38－41.

[11] Yang Z Q, Guo J Y, Qin F C, *et al.* Soil aggregate stability and erodibility in different vegetation types of exposed feldspathic sandstone region. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 8－14.
杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 等. 裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能. 水土保持通报, 2021, 41(3): 8－14.

[12] Wang L X, Chen Z X, Guo M M, *et al.* Soil erodibility and its influencing factors of erosion gully banks under different land use types in the typical black soil region of Northeast China. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 18－27.
王丽鑫, 陈卓鑫, 郭明明, 等. 典型黑土区不同土地利用类型侵蚀沟沟岸土壤可蚀性及其影响因素. 水土保持研究, 2025, 32(3): 18－27.

[13] Song M X, Lü X H, Han C, *et al.* Impacts of rainfall characteristics and vegetation cover patterns on slope runoff and sediment yields in the Three Gorges Reservoir area. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 82－90.
宋民欣, 吕希恒, 韩陈, 等. 三峡库区降雨特征和林草覆被格局对坡面水沙产出的影响. 水土保持学报, 2024, 38(3): 82－90.

[14] Xiong Z Y, Wang Z F, Long Y, *et al.* Response of nitrogen loss flux in purple soil sloping field to reduced fertilizer and combining straw. Environmental Science, 2020, 41(4): 1930－1940.
熊子怡, 王子芳, 龙翼, 等. 紫色土旱坡地氮流失通量对减肥配施秸秆的响应. 环境科学, 2020, 41(4): 1930－1940.

[15] Hu X Y, Xiao Z L, Qin C, *et al.* Multi-scenario prediction of land use changes and soil erosion in Three Gorges Reservoir Region based on PLUS-InVEST mode. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 1－13.
胡馨怡, 肖作林, 秦川, 等. 基于PLUS-InVEST模型的三峡库区土地利用变化与土壤侵蚀多情景预测. 水土保持学报, 2025, 39(6): 1－13.

[16] Xiao H, Xia Z Y, Peng D D, *et al.* Influence of plant root on the soil disintegration of purple soil from the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 19(3): 98－103.
肖海, 夏振尧, 彭逗逗, 等. 植物根系对三峡库区消落带紫色土崩解性能的影响. 中国水土保持科学, 2019, 19(3): 98－103.

[17] Shen P W, Tang H M, Wang D J, *et al.* Disintegration characteristics of red-bed mudstone of Badong Formation under wet-dry cycles. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1990－1998.
申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究. 岩土力学, 2017, 38(7): 1990－1998.

[18] Zhang W, Liu Y, Xia X L, *et al.* Characteristics of soil resistance to erosion and scouring, and their influencing factors in Dabie Mountains of western Anhui Province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 10－15.
张卫, 刘亚, 夏小林, 等. 皖西大别山区土壤抗蚀与抗冲特征及其影响因素. 水土保持通报, 2025, 45(3): 10－15.

[19] Xu Y, Ran W J, Shi D M, *et al.* Profile distribution characteristics and main controlling factors of magnetic susceptibility in

purple soil slope farmland. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 36(6): 1－10.
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. 水土保持学报, 2025, 36(6): 1－10.

[20] Zhao G Y. Risk assessment and landscape impact of heavy metal pollution in cultivated soil in typical agricultural. Chongqing: Southwest University, 2023.
赵光耀. 典型农业流域耕地重金属污染风险评估与景观影响. 重庆: 西南大学, 2023.

[21] 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. 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. 水土保持通报, 2019, 39(4): 76－81.

[22] Chen L, Wang J, Huo C P, *et al*. Study on particle distribution characteristics of soil physical crust profile in sloping farmland. 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. 土壤学报, 2023, 60(4): 983－992.

[23] Feng T, Chen X Y, Zhu P Z, *et al*. Differences in soil erosion resistance between different vegetation types of purple soil in the Three Gorges Reservoir area. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(1): 1259－1270.
冯滔, 陈晓燕, 朱平宗, 等. 三峡库区紫色土不同植被类型土壤抗蚀性能差异研究. 土壤学报, 2025, 62(1): 1259－1270.

[24] 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. Catena, 2016, 145: 239－245.

[25] Zhu P Z, Zhang G H, Zhang B J. Soil saturated hydraulic conductivity of typical revegetated plants on steep gully slopes of Chinese Loess Plateau. Geoderma, 2022, 412: 115717.

[26] Li J W, Chen L, Shi D M, *et al*. Response characteristics of purple soil disintegrating characteristics to bulk densities and water contents. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 68－72, 78.
李敬王,陈林, 史东梅, 等. 紫色土崩解特性对容重和含水率的响应特征. 水土保持学报, 2019, 33(2): 68－72, 78.

[27] Yin S, Li Y R, Li L, *et al*. Different responses of aggregates-associated organic carbon to tillage and water erosion in the black soil region. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3): 67－73.
殷爽, 李毅然, 李露, 等. 黑土团聚体有机碳对耕作与水蚀的响应差异. 中国水土保持科学, 2020, 18(3): 67－73.

[28] Han C, Song M X, Tang Q, *et al*. Post-farming land restoration schemes exhibit higher soil aggregate stability and organic carbon: Evidence in the Three Gorges Reservoir area, China. Catena, 2023, 227: 107099.

[29] 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. Catena, 2024, 243: 108200.

[30] Guo M M, Wang W L, Wang T C, *et al*. Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(4): 1038－1050.

[31] Wang Z L, Fan C M, Duan J Q, *et al*. Relationship between physicochemical properties and disintegration characteristics of subalpine meadow soils in central Yunnan. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 170－180.
王忠良, 范春梅, 段继琪, 等. 滇中亚高山草甸土理化性质和崩解特性关系. 水土保持学报, 2024, 38(4): 170－180.

[32] He L, Deng Y S, Tang Q Y, *et al*. Effects of the *Dicranopteris linearis* root system and initial moisture content on the soil disintegration characteristics of gully erosion. Journal of Mountain Science, 2022, 19(12): 3548－3567.

[33] Li H R, Gu J, Liu G, *et al*. Effects of raindrop temperature on the contributions of slaking and mechanical striking to aggregate disintegration during splash erosion. Soil & Tillage Research, 2022, 224: 105518.

[34] Lv J R, Bao Y H, Yang L, *et al*. Elevation－related variations of soil disintegration and its driving forces in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. Geomorphology, 2024, 455: 109193.

[35] Li W Q, Liu Y J, Zheng H, *et al*. Complex vegetation patterns improve soil nutrients and maintain stoichiometric balance of terrace wall aggregates over long periods of vegetation recovery. Catena, 2023, 227: 107141.

[36] Wang G Y, Zhou H, Xia Y Q, *et al*. Experiment on effect of grass root system on slope soil strength and disintegration characteristics. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 31(2): 234－241.
王桂尧, 周欢, 夏旖琪, 等. 草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验. 中国公路学报, 2018, 31(2): 234－241.

[37] Wang J, Ma F, Zhang P H, *et al*. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1273－1279.
王健, 马璠, 张鹏辉, 等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响. 土壤学报, 2015, 52(6): 1273－1279.

[38] Grosse A K, Cantre S, Saathoff F. The applicability of disintegration tests for cohesive organic soils. Journal of Environmental

Engineering and Landscape Management, 2015, 23(1): 1－14.

[39] Zhang Y, Liu Y L, Li Y, *et al*. Effects of land use patterns on soil aggregate stability and organic carbon distribution in the Karst rocky desertification area. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(6): 1308－1315.
张艳, 刘彦伶, 李渝, 等. 喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响. 土壤通报, 2021, 52(6): 1308－1315.

[40] Li G L, Zhou C H, Fiore S, *et al*. Interactions between microorganisms and clay minerals: New insights and broader applications. Applied Clay Science, 2019, 177: 91－113.

[41] Zheng F L, Tan J L, Wang X N, *et al*. Progress of study on rainfall interception by water conservation forest in the Loess Plateau. Yellow River, 2020, 42(4): 89－93.
郑飞龙, 谭军利, 王西娜, 等. 黄土高原水源涵养林截蓄降雨研究进展. 人民黄河, 2020, 42(4): 89－93.

[42] Huo B Y, Huang Q B, Kang X S, *et al*. Experimental study on the disintegration characteristics of undisturbed loess under rainfall-induced leaching. Catena, 2023, 233: 107482.

[43] Shang C, Chen Z J, Xu J J, *et al*. Synergistic effects of cover crops on productivity enhancement and carbon sequestration with emission reduction in multiple cropping systems of southern China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2026, 34(2): 284－296.
尚程, 陈泽建, 许嘉杰, 等. 南方多熟制覆盖作物的丰产增效与固碳减排协同效应. 中国生态农业学报, 2026, 34(2): 284－296.

[44] Zhang F Y, Cheng Y, Yang Y Y, *et al*. Particle size composition, fractal characteristics and influencing factors of soils with different urbanization intensities in Nanchang. Soils, 2023, 55(5): 1138－1145.
张佛熠, 承勇, 阳雅荧, 等. 南昌不同城市化强度土壤粒度组成和分形特征及其影响因素. 土壤, 2023, 55(5): 1138－1145.