

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.034

蒋莉沙,甘凤玲,谭晓红,等. 岩层倾向对喀斯特槽谷区不同土地利用类型土壤分离能力的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):130-139.

JIANG Lisha, GAN Fengling, TAN Xiaohong, et al. Effect of rock strata dip on soil detachment capacity of different land use types in karst trough valley area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):130-139.

岩层倾向对喀斯特槽谷区不同土地利用类型土壤分离能力的影响

蒋莉沙^{1,2}, 甘凤玲^{1,2}, 谭晓红^{1,2}, 石海龙^{1,2}, 赵 烜^{1,2}, 蒲俊兵^{1,2}

(1. 重庆师范大学三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆, 401331;

2. 重庆师范大学地理与旅游学院山区生态系统碳循环与碳调控重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘 要: [目的] 探索岩层倾向对喀斯特槽谷区土壤分离能力的影响机制, 为喀斯特槽谷区预防和治理水土流失提供参考意见。[方法] 以重庆市青木关岩溶槽谷区顺/逆层坡为研究对象, 通过水槽冲刷试验, 分析不同土地利用类型在顺/逆层坡的土壤分离能力差异, 并探讨土壤理化性质对土壤分离能力的影响。[结果] (1) 顺/逆层坡土壤分离能力均与土壤有机质含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和全氮含量呈显著负相关 ($p < 0.05$), 其中, 逆层坡有机质含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和全氮含量大于顺层坡。(2) 4 种土地利用方式下的土壤分离能力均为顺层坡高于逆层坡。此外, 草地土壤分离能力综合得分在顺/逆层坡均低于辣椒地、玉米地和裸地。(3) 根据多元逐步回归分析结果, 基于有机质含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量建立的顺/逆层坡土壤分离能力预测模型的决定系数 R^2 分别为 0.77、0.85, 能有效预测土壤分离能力。[结论] 草地土壤分离能力在顺/逆层坡均为最小。因此, 为预防喀斯特槽谷区水土流失及促进生态恢复, 应合理进行耕种, 并且适当增加草地的覆盖面积, 提高土壤抗侵蚀能力。

关键词: 土壤分离; 土壤理化性质; 岩层倾向; 土地利用类型; 喀斯特槽谷区

中图分类号: X825; S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0130-10

Effect of Rock Strata Dip on Soil Detachment Capacity of Different Land Use Types in Karst Trough Valley Area

JIANG Lisha^{1,2}, GAN Fengling^{1,2}, TAN Xiaohong^{1,2}, SHI Hailong^{1,2}, ZHAO Xuan^{1,2}, PU Junbing^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Restoration Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2. Chongqing Key Laboratory of Carbon Cycle and Carbon Regulation of Mountain Ecosystem, College of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to explore the influence mechanism of rock strata dip on soil erodibility and provide references for preventing and controlling water and soil erosion in karst trough valley area. [Methods] The study focused on the dip/anti-dip slope of Qingmuguan karst trough valley area in Chongqing city. Through flume erosion experiments, we analyzed the differences in soil erodibility between different land use types on the dip/anti-dip slopes and investigated the impact of soil physicochemical properties on soil erodibility. [Results] (1) Both dip/anti-dip slopes showed a significant negative correlation with organic matter content, >0.25 mm water-stable aggregates content, and total nitrogen content ($p < 0.05$). In particular, the anti-dip slope had higher organic matter content, >0.25 mm water-stable aggregate content, and total nitrogen compared to the dip slope. (2) Soil erodibility was higher on the dip slope than on the anti-dip slope for all four land use types studied. Additionally, grassland had lower comprehensive scores of soil erodibility than pepper fields, cornfields, and bare land on both the dip/anti-dip slopes. (3) Based on stepwise multiple regression analysis results, prediction models for soil erodibility on the dip/anti-dip slopes

收稿日期: 2023-12-08

修回日期: 2024-01-16

录用日期: 2024-02-09

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42107355); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项 (2021YFE0107100); 中国博士后基金项目 (2023MD744195); 重庆市科委科学研究项目 (CSTB2022NSCQ-MSX1053); 重庆市教委科技项目 (KJQN202100518, KJQN202100542); 重庆市自然科学基金联合基金项目 (CSTB2022NSCQ-LZX00223)

第一作者: 蒋莉沙 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2976626967@qq.com

通信作者: 甘凤玲 (1989—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 359140315@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

were established using organic matter content and >0.25 mm water-stable aggregate content as predictors with determination coefficients R^2 of 0.77 and 0.85 respectively. [Conclusion] In summary, grassland had the lowest soil erodibility among all land use types studied regardless of the dip/anti-dip slopes in karst trough valley. Therefore, in order to prevent soil erosion and promote ecological restoration in karst trough valley, it is necessary to cultivate the land reasonably and increase grassland coverage appropriately, thus enhancing the soil's resistance against erosion.

Keywords: soil detachment; soil physicochemical properties; rock strata dip; land use type; karst trough valley area

Received: 2023-12-08

Revised: 2024-01-16

Accepted: 2024-02-09

Online(www.cnki.net): 2024-04-25

土壤侵蚀包括土壤分离、输移和沉积三大过程^[1]。土壤分离是土壤颗粒从土壤基质中被剥离并由径流带离原地的物理过程,是土壤侵蚀的初始阶段,由此可知,土壤分离能力越大,水流冲刷运移的土壤越多,土壤侵蚀和水土流失问题也越严重,因此,土壤分离能力的大小能有效影响水土流失量^[2-3]。研究土壤分离能力的驱动因素,对改善水土流失具有重要意义。ZI等^[4]研究土壤理化性质对土壤分离的影响表明,土壤性质是影响土壤分离能力的内部因素,其中,土壤容重、水稳性团聚体和有机质增加能有效抑制土壤分离。此外,土地利用类型是影响土壤分离能力的另一重要因素,土地利用类型影响土壤理化性质,进而影响土壤分离能力;MA等^[5]通过对比农田、果园、草地和林地认为,土地利用类型影响植被覆盖和土壤性质,其研究结论与ZHANG等^[6]研究结果一致,均认为受人为影响的耕地其土壤分离能力显著大于其他土地利用类型。综上所述,土壤分离受多因素综合影响,是极为复杂的过程。中国西南地区是世界上面积最大的喀斯特地貌分布区,在自然和人为作用的共同影响下,发生严重的水土流失问题一直是社会关注的重点。但从现有研究来看,有关喀斯特地区土壤分离能力的研究较少,亟需开展相关研究。

喀斯特槽谷作为喀斯特地貌类型之一,具有独特的“一山二岭一槽”地貌特征^[7],而土地利用类型与土壤理化性质具有高度的空间异质性,所以,尽管前人^[6-7]已对喀斯特地区的土壤分离进行研究,但喀斯特地貌分布广,类型多,喀斯特槽谷区独特的地貌特征使得该区域具体的土壤分离机制尚不明晰。由于喀斯特槽谷两翼岩层倾向与坡向平行或垂直,从而形成典型的顺层坡(岩层倾向与坡向一致)和逆层坡(岩层倾向与坡向相反)。有关岩层倾向的研究^[8-9]表明,由于顺/逆层坡的地质结构差异,顺层坡岩层倾向与坡向一致,使得顺层坡稳定性更低,极易出现滑坡和地震等地质灾害,而逆层坡由于岩层倾向与坡向相

反,稳定性更强。此外,岩层倾向影响水土流/漏失^[10],导致顺/逆层坡土壤理化性质存在显著差异,而土壤理化性质作为土壤分离能力的影响因子,必然使得顺/逆层坡土壤分离能力也存在显著差异。目前,对喀斯特槽谷区的研究^[11-14]多集中于探索水土流/漏失、土壤含水量及碳氮磷流/漏失对地上/地下双层地质结构的响应机制,以期为生态系统恢复提供参考意见^[15],并未探讨不同岩层倾向和土地利用类型的土壤理化性质对土壤分离能力的影响。

不同岩层倾向导致喀斯特槽谷区侵蚀坡面的水流运动方向存在差异,进而影响土壤理化性质。顺层坡岩层倾向与坡向一致,对水流产生的阻力较小,水流冲刷作用较强,水流顺坡而下,土壤有机质和养分被冲刷运移,土壤胶结物质减少,抗侵蚀能力较低;逆层坡的岩层倾向与坡向相反,水流受岩层阻碍,沿岩石孔裂隙向下运动,冲刷力降低,土壤有机质和土壤养分得以较好地保留,因此,相比顺层坡,逆层坡土壤结构更稳定。由此可知,在喀斯特槽谷区,岩层倾向能通过改变水流运动方向影响土壤理化性质,使喀斯特槽谷区下垫面性质发生改变,进而影响土壤分离能力。此外,不同土地利用类型不仅影响地表覆盖,植物种类、生长特性及人为干扰还导致土壤性质发生变化,进而影响土壤紧实度,使不同土地利用类型的土壤分离能力存在明显差异。岩层倾向与土地利用类型间也存在一定联系,岩层倾向所引起的土壤理化性质变化,势必对地表植被产生影响,从而影响土地利用类型,进一步改变土壤理化性质。综上所述,岩层倾向与土地利用类型均能通过改变喀斯特槽谷区下垫面,进而改变土壤分离能力。

就已有研究^[5-7]来看,有关岩层倾向和土地利用类型与土壤分离能力的关系缺乏系统性地梳理,彼此的影响机制也有待深入探讨,然而,喀斯特槽谷区当前正面临生态环境恶化及石漠化等问题。因此,掌握喀斯特槽谷区土壤分离发生发展的具体机制和特征,因地制宜地制定预防和治理水土流失的应对策略,对

促进该区域生态环境恢复和协调人地耦合具有深远影响。因此,基于喀斯特槽谷区特殊的地质构造,探索喀斯特槽谷区顺/逆层坡不同土地利用类型的土壤理化性质对土壤分离能力的影响,对不同土地利用类型的土壤分离能力进行综合评价,筛选分离能力最低的土地利用类型,同时,通过多元逐步回归分析,确定对土壤分离能力影响最显著的因子,并对土壤分离能力建立预测模型。研究结果可为喀斯特槽谷区生态治理以及缓解石漠化和土壤退化问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青木关岩溶槽谷区($29^{\circ}40'—29^{\circ}47' N$, $106^{\circ}16'—106^{\circ}20' E$)地处重庆市沙坪坝区的西北部,研究区属亚热带湿润季风气候,年平均降水量 1 100 mm,降雨主要集中在夏秋 2 季。年平均气温为 $18^{\circ}C$,具有冬暖夏热、春秋多变的特点。青木关岩溶槽谷区位于川东平行岭谷缙云山温塘峡背斜南段,地势总体呈东北高西南低,槽谷区北部为岩层倾向与坡向一致的顺层坡,南部为岩层倾向与坡向相反的逆层坡。该区土壤以黄壤为主,土层普遍较薄,多在 2 m 以下。目前,区内的主要土地利用类型为草地、林地和耕地,分别占槽谷区总面积的 19.62%, 61.52%, 9.42%^[7]。根据实地考察,该区域主要农作物为玉米、辣椒、油菜和水稻等(图 1)。

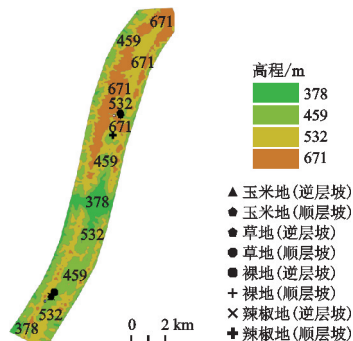


图 1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 样品采集与数据测定

1.2.1 样品采集 在 2022 年 7—12 月选取占该区域面积 13.16% 草地,以及当地农户普遍种植的玉米地和辣椒地(多年平均种植面积超过 50%),并另外选取裸地作为对照。在青木关岩溶槽谷区的顺/逆层坡分别选取 4 种土地利用方式为采样地,共计 8 个采样地,采样地面积均 $\geq 10 m \times 10 m$,采样地具体信息见表 1。样地植株密度具体为玉米地和辣椒地每平方米 6 株,草地选取每平方米植物地表覆盖超过 90% 的区域,裸地为 3 年及以上未耕作的撂荒地。玉米生

长阶段分为苗期阶段、穗期阶段和花粒期阶段,其中,花粒期阶段为成熟阶段;辣椒生长阶段分别为发芽期、幼苗期、花期和果期,果期为辣椒的成熟阶段。为保证数据科学性,玉米地和辣椒地的采样时间均为作物成熟期,玉米地的具体采样时间为 7 月底,草地、辣椒地和裸地为 8 月初。采样前,先去除采样点植物地上部分,露出新鲜土壤面。每个采样地随机设置 3 个采样点,采样点的面积为 $1.0 m \times 1.0 m$,每个采样点采集土壤 1 kg 左右,用于测定土壤机械组成、团聚体和有机质等理化性质。再用 $392.5 cm^3$ (直径 100 mm、高 50 mm) 的定制环刀采集含有植物根系的原状土,每个采样地采集 9 个原状土样(共计 72 个),用密封袋密封后带回实验室用于测定土壤分离能力。此外,用体积为 $100 cm^3$ 的环刀,在土壤分离样品采集点附近取 3 个原状土样,用于测定土壤容重和孔隙度。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sampling sites

土地利用类型	岩层倾向	海拔/m	土层深度/cm
草地	顺层坡	462.5	50—80
	逆层坡	442.3	60—80
玉米地	顺层坡	452.6	50—60
	逆层坡	431.5	50—60
辣椒地	顺层坡	405.2	30—40
	逆层坡	433.1	40—50
裸地	顺层坡	462.7	20—50
	逆层坡	427.6	30—60

1.2.2 数据测定 容重和土壤孔隙度用环刀法与烘干法^[16]测定,土壤团聚体采用湿筛法,土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。土壤机械组成通过向过筛 2 mm 的 0.5 g 风干土中加入过氧化氢溶液、盐酸溶液,去除有机质及次生碳酸盐类物质后,采用马尔文 MS 2 000 激光粒度分析仪测定。全氮采用全自动开氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定。

在进行土壤分离试验前,将采集的原状土环刀的底盖取下,在底盖上放置 1 张同等大小的滤纸后盖上底盖。将环刀置于洁净的塑料桶内,并向桶内加水至距离环刀顶部 1 mm 处,置于阴凉处浸泡约 24 h,待环刀土样完全饱和后,取出环刀。测定土壤分离能力的冲刷水槽长 4.00 m,宽 0.15 m,深 0.10 m(图 2)。水槽整体由稳流槽、冲刷水槽、土壤分离室和集流槽组成,此外,另附有供水池、水泵、抽水管、流量控制阀和集流桶。采用定床法测定土壤分离能力,水槽坡度设定为 15° ,将原状土样放于距水槽集流口 0.5 m 的土壤分离室内,并盖上环刀上盖。待水流稳定后,揭开环刀上盖开始分离试验并计时。待环刀土样被水

流分离约 2 cm 深时停止计时,将集流桶中收集的土壤置于 105 °C 烘箱中烘干称重,记录冲刷时长和烘干土重量,结束本次试验。试验设计顺/逆层坡下 4 种土地利用方式(草地、辣椒地、玉米地、裸地)与 3 个冲刷流量(60,70,80 L/min)完全组合,每个组合重复 3 次,共计 72 场分离试验。

在冲刷试验中,设置 2 个断面,即在距下端集流口 1.2 m 位置。使用精度 0.01 mm 的游标卡尺测定水深,分别测定 2 个断面距水槽两侧边 1 cm 处及断面中点处的水深测定 2 次(12 个水深数据),取其平均值作为该次试验的水深。水流流速采用高锰酸钾染色法测定,记录高锰酸钾溶液通过 2 个断面的时间用于计算水流流速,重复测定 10 次,取其平均值作为水流流速。同时,在冲刷过程中测量水温并记录。根据被分离的环刀土样重量、冲刷时间计算土壤分离能力,其计算公式为:

$$D_c = \frac{W}{AT} \quad (1)$$

式中: D_c 为土壤分离能力 [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]; W 为集流桶中收集的土壤烘干重 (kg); A 为分离环刀横截面积 (m^2); T 为分离时间 (s)。

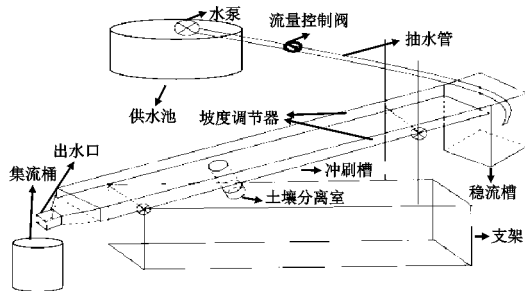


图2 水槽冲刷示意

Fig. 2 Schematic diagram of sink flushing

采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 27.0 软件进行数据分析与制图。利用 Microsoft Excel 2019 软件绘制综合得分雷达图,利用 SPSS 27.0 软件进行相关性分析和主成分分析,利用 origin 2021 软件进行线性回归分析,以及箱线图和相关性热图的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同岩层倾向的土壤理化性质

根据单因素方差分析结果(表 2)可知,顺、逆层坡不同土地利用类型的土壤理化性质存在显著差异 ($p < 0.05$)。在土壤有机质含量方面,草地的有机质含量在顺/逆层坡均大于辣椒地、玉米地和裸地,其中,顺层坡草地的有机质含量最大,分别是顺层坡辣椒地、玉米地、裸地的 2.01,1.54,1.45 倍。顺/逆层坡土壤机械组成显示,各土地利用类型的黏粒含量为

13.45%~16.87%,不同土地利用类型间变化较小。除辣椒地外,其他 3 种土地利用类型的粉粒含量均为逆层坡>顺层坡,逆层坡裸地的粉粒含量最大,显著高于草地、辣椒地和玉米地。顺层坡辣椒地砂粒含量显著低于其他土地利用类型 ($p < 0.05$),比草地、玉米地和裸地分别低 1.87%,12.2%,1.94%,而逆层坡则相反,辣椒地砂粒含量最高,但与草地和玉米地的差异不显著。在>0.25 mm 水稳性团聚体含量方面,草地在顺/逆层坡均为最大,顺层坡>0.25 mm 水稳性团聚体含量具体表现为草地>裸地>玉米地>辣椒地,逆层坡则是草地最大,其次为裸地、辣椒地,逆层坡玉米地>0.25 mm 水稳性团聚体含量最低,比逆层坡草地低 50.61%。在土壤容重方面,顺层坡玉米地的土壤容重最大,显著大于其他土地利用类型 ($p < 0.05$),分别是草地、辣椒地、裸地的 1.56,1.24,1.23 倍。顺层坡不同土地利用类型的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、全氮和全磷均无明显差异。逆层坡不同土地利用类型的总孔隙度也无显著差异,但在非毛管孔隙度方面,草地最小,比辣椒地、玉米地、裸地分别低 36.58%,35.78%,50.38%,但草地的毛管孔隙度、全氮和全磷均大于辣椒地、玉米地和裸地。

2.2 不同岩层倾向下土壤分离能力特征及评价

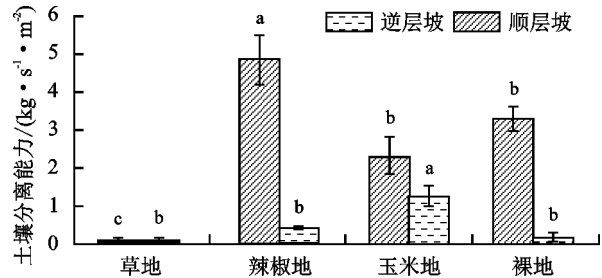
单因素方差分析(图 3)结果表明,顺/逆层坡不同土地利用类型的土壤分离能力存在显著差异 ($p < 0.05$)。从整体来看,顺层坡的土壤分离能力 [$2.63 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$] 显著高于逆层坡 [$0.46 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$] ($p < 0.05$)。顺层坡草地、辣椒地、玉米地和裸地的土壤分离能力均高于逆层坡,分别是逆层坡草地、辣椒地、玉米地和裸地的 2.80,13.73,1.86,16.23 倍。4 种土地利用类型中,辣椒地土壤分离能力在不同岩层倾向向下差异最大,其次为裸地和玉米地,草地的差异最小。草地土壤分离能力在顺/逆层坡均低于其他 3 种土地利用类型,分别是顺层坡辣椒地、玉米地和裸地土壤分离能力的 0.96%,2.00%,1.42%和逆层坡的 4.73%,1.33%,8.21%。顺层坡各土地利用类型的土壤分离能力变化为 0.05~4.85 $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,按土壤分离能力大小依次表现为辣椒地>裸地>玉米地>草地,辣椒地土壤分离能力分别是玉米地、裸地和草地的 2.08,1.47,103.85 倍。但在逆层坡,玉米地土壤分离能力最大 [$1.25 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$],其后依次为辣椒地、裸地和草地,玉米地土壤分离能力显著高于其他 3 种土地利用类型 ($p < 0.05$),分别是草地、辣椒地和裸地土壤分离能力的 75.05,3.55,6.16 倍。

表 2 喀斯特槽谷区顺/逆层坡不同土地利用类型的土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties of different land use types of the dip/anti-dip slopes in karst trough valley area

岩层倾向	土壤理化性质	草地	辣椒地	玉米地	裸地
顺层坡	SOM/(g · kg ⁻¹)	41.75±4.17a	20.74±1.70c	27.11±0.55b	28.76±0.47b
	Clay/%	16.62±0.64a	16.87±0.25a	13.45±0.31c	15.54±0.31b
	Silt/%	79.37±0.23a	80.47±0.34a	72.97±0.85b	79.96±0.07a
	Sand/%	4.36±0.29b	2.49±0.14c	14.69±0.05a	4.43±0.14b
	>0.25 mmWSA/%	80.89±0.58a	45.27±4.71c	49.60±2.45c	58.30±3.01b
	BD/(g · cm ⁻³)	1.01±0.09c	1.27±0.01b	1.58±0.04a	1.28±0.02b
	TP/%	49.38±6.37a	50.55±3.40a	43.07±4.59a	52.60±1.61a
	CP/%	31.61±2.70a	34.86±2.93a	29.37±2.13a	33.53±3.30a
	NCP/%	17.78±4.18a	15.69±5.25a	13.70±5.86a	19.07±4.86a
	TN/(g · kg ⁻¹)	2.66±1.42a	0.82±0.15a	1.34±0.09a	1.51±0.10a
	Tp/(g · kg ⁻¹)	0.56±0.23a	0.32±0.03a	0.54±0.11a	0.49±0.07a
	SOM/(g · kg ⁻¹)	40.07±5.79a	35.56±1.29ab	20.35±0.47c	31.38±2.27b
	Clay/%	15.48±0.14ab	16.25±0.15a	16.15±0.67a	14.36±0.87b
	Silt/%	79.79±0.16c	80.33±0.15b	77.45±0.10d	82.40±0.23a
逆层坡	Sand/%	4.86±0.17a	4.89±0.16a	4.60±0.13a	3.61±0.56b
	>0.25mmWSA/%	83.71±1.29a	63.83±1.10b	33.10±1.28c	77.78±6.47a
	BD/(g · cm ⁻³)	1.45±0.03a	1.47±0.03a	1.37±0.02b	1.19±0.03c
	TP/%	45.84±1.45a	46.17±4.97a	48.89±1.96a	51.10±2.50a
	CP/%	36.58±3.02a	31.57±0.99b	34.47±1.87ab	32.45±0.97ab
	NCP/%	9.26±1.65b	14.60±4.21ab	14.42±1.06ab	18.66±2.09a
	TN/(g · kg ⁻¹)	3.80±0.90a	1.73±0.11ab	1.15±0.09b	2.36±0.79ab
	Tp/(g · kg ⁻¹)	0.44±0.04a	0.38±0.01ab	0.34±0.03b	0.39±0.05ab

注：表中数据均为平均值±标准差；同行不同小写字母表示相同岩层倾向不同土地利用类型间差异显著（ $p<0.05$ ）。SOM、Clay、Silt、Sand、>0.25 mmWSA、BD、TP、CP、NCP、TN、Tp 分别为土壤有机质含量、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量、土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、全氮、全磷。



注：图柱上方不同小写字母表示相同岩层倾向不同土地利用类型间差异显著（ $p<0.05$ ）。

图 3 喀斯特槽谷区顺/逆层坡土壤分离能力特征

Fig. 3 Characteristics of soil detachment capacity of the dip/anti-dip slopes in karst trough valley area

对喀斯特槽谷区顺/逆层坡的土壤分离能力进行主成分分析(PCA)，通过主成分分析，共提取 2 个主成分，累计贡献率达 96.35%，表明提取的 2 个主成分能够解释土壤分离能力变异性的绝大部分信息。计算顺/逆层坡不同土地利用类型土壤分离能力的综合得分(图 4)，在顺层坡，不同土地利用类型的综合得分从高到低依次为裸地(4.79) > 玉米地(2.89) > 辣椒地(1.6) > 草地(-0.90)，但在逆层坡，玉米地的综合

得分最高(0.09)，其后依次为辣椒地(-0.01)、裸地(-0.03)和草地(-0.05)。其中，草地的土壤分离能力综合得分在顺/逆层坡均为最低，证明草地相较于辣椒地、玉米地和裸地，更有利于抑制土壤分离的发生。除逆层坡草地的综合得分大于顺层坡外，顺层坡辣椒地、裸地和玉米地的综合得分均高于逆层坡，分别比逆层坡高 1.60、4.82、2.81。因此，从整体来看，逆层坡土壤抗分离能力优于顺层坡。

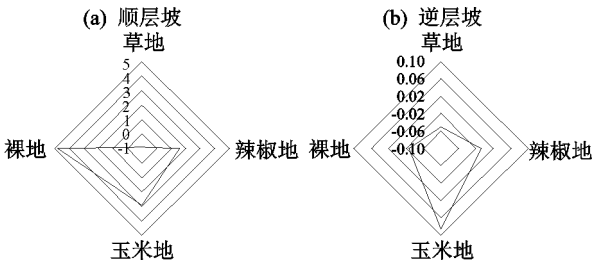


图 4 喀斯特槽谷区顺/逆层坡不同土地利用类型土壤分离能力 PCA 分析

Fig. 4 Principal component analysis (PCA) of soil detachment capacity of different land use types of the dip/anti-dip slopes in karst trough valley area

2.3 喀斯特槽谷区顺/逆层坡土壤理化性质对土壤分离能力的影响

对不同岩层倾向的土壤理化性质与土壤分离能力进行皮尔森相关性分析(图 5)可知,顺/逆层坡的土壤分离能力与有机质含量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量和全氮均呈显著负相关,其中,逆层坡土壤分离能力与粉粒和全磷也呈显著负相关($p<0.05$),但

顺层坡土壤分离能力没有与粉粒和全磷表现出明显的相关性($p>0.05$)。此外,顺层坡的土壤分离能力与黏粒含量、粉粒含量、土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度呈正相关,与砂粒和全磷呈负相关。但在逆层坡,土壤分离能力与黏粒含量、砂粒含量、总孔隙度及毛管孔隙度呈正相关,与土壤容重和毛管孔隙度呈负相关。

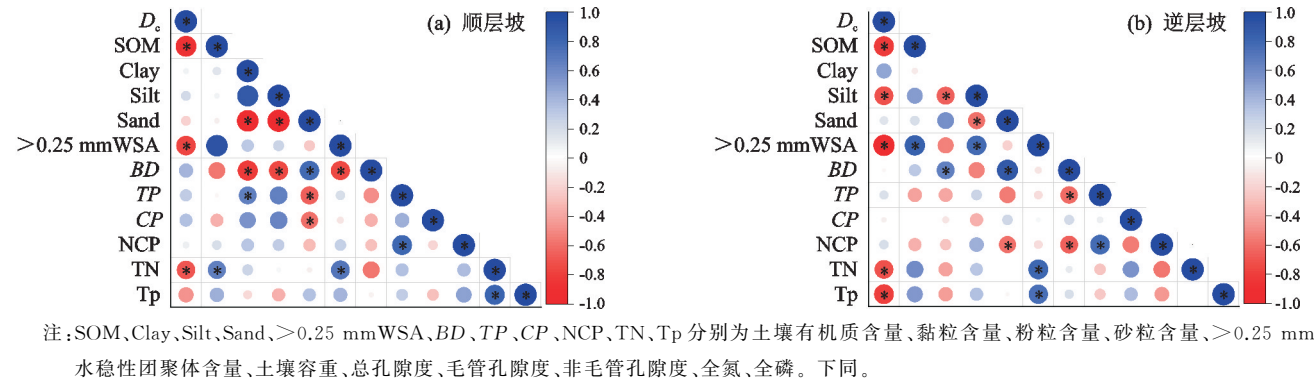


图 5 喀斯特槽谷区顺/逆层坡土壤理化性质与土壤分离能力的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil physicochemical properties and soil separation capacity of up-slope/down-slope in karst troughs and valleys

为了解顺/逆层坡土壤理化性质与土壤分离能力的关系,进行主成分分析(图 6)。顺层坡的土壤理化性质指标解释对土壤分离能力的贡献度为 83.53%,第 1 主成分贡献度为 53.69%,第 2 主成分贡献度为 29.85%,逆层坡的土壤理化性质指标解释对土壤分离能力的贡献度为 90.15%,第 1 主成分贡献度为 68.83%,第 2 主成分贡献度为 21.31%。在土壤理化

性质各参考要素中,顺/逆层坡的土壤分离能力线条与有机质含量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量和全氮线条的夹角均较大,表明主成分分析结果与皮尔森相关性分析结果一致,土壤分离能力与 3 项指标均呈较强的负相关关系。此外,逆层坡土壤分离能力线条与粉粒和全磷线条夹角也较大,表明逆层坡土壤分离能力与粉粒和全磷也具有较强的负相关关系。

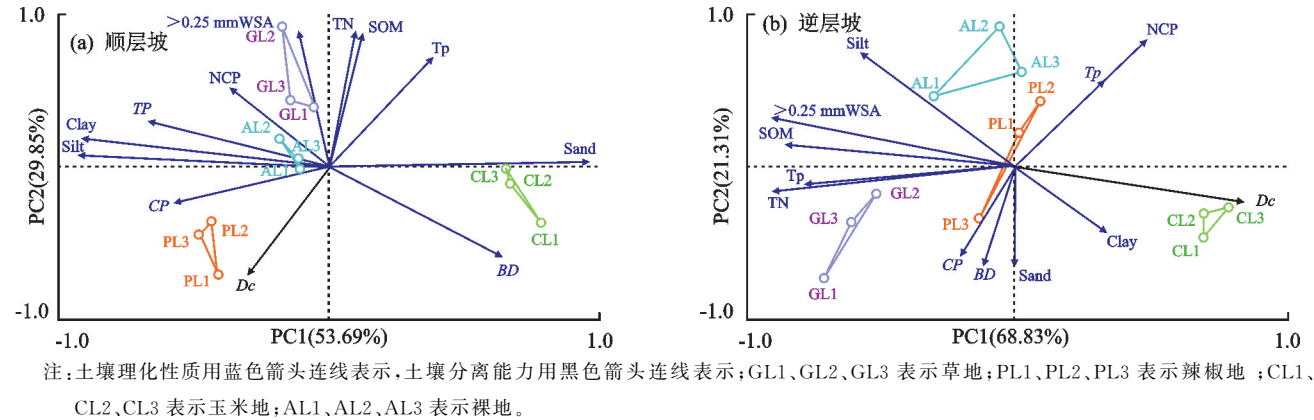


图 6 喀斯特槽谷区顺/逆层坡土壤理化性质与土壤分离能力主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of soil physicochemical properties and soil separation capacity of up-slope/down-slope in karst troughs and valleys

2.4 喀斯特槽谷区土壤分离能力预测模型

土壤分离能力模型是描述土壤侵蚀过程的重要方法,也能很好地描述土壤分离的动态变化规律。因此,对喀斯特槽谷区不同岩层倾向的土壤分离能力与土壤理化性质分别进行多元逐步回归分析表明,影响顺层坡土壤分离能力的主要因素为有机质含量,而逆

层坡则为>0.25 mm 水稳性团聚体含量。基于此,分别构建喀斯特槽谷区顺/逆层坡土壤分离能力预测模型,其土壤分离能力计算公式为:

$$D_{c1} = 8.737 - 0.206X_1 (R^2 = 0.77, p < 0.01)$$

$$D_{c2} = 2.016 - 0.024X_2 (R^2 = 0.85, p < 0.01)$$

式中: D_{c1} 为顺层坡土壤分离能力; D_{c2} 为逆层坡土壤分离能力; X_1 为有机质含量; X_2 为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量。

将计算出的顺层坡土壤分离能力预测值与实测值进行比较(图 7a)发现,土壤分离能力预测模型拟合程度较高,预测值与实测值二者差异较小,且土壤分离能力位于 1:1 线附近,说明预测模型具有较高精度,能够有效地预测真实的土壤分离过程。相较于

顺层坡,逆层坡土壤分离能力预测模型的决定系数更高,整体拟合效果也更好,尤其是当土壤分离能力 <0.41 kg/(s · m²) 时(图 7b),土壤分离能力预测值与实测值的比较结果靠近 1:1 线,预测精度相对较高,而当土壤分离能力 >0.41 kg/(s · m²) 时,土壤分离能力距 1:1 线较远,较为分散。但顺/逆层坡整体相比,顺层坡土壤分离能力分布更为分散,因此,逆层坡土壤分离能力预测模型效果更好。

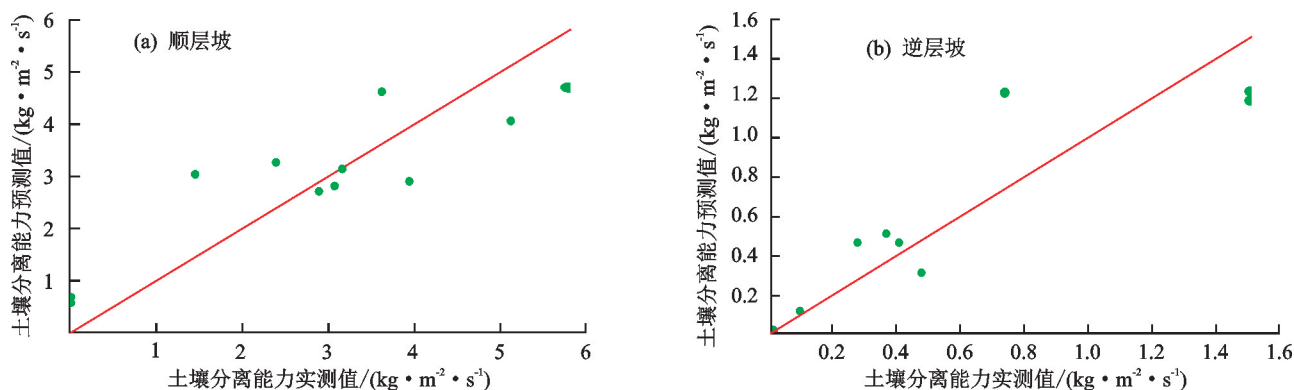


图 7 岩溶槽谷区土壤分离能力实测值与预测值的比较

Fig. 7 Comparison between the measured and predicted values of soil detachment capacity in karst trough valley area

3 讨论

3.1 岩层倾向对土壤分离能力的影响

喀斯特槽谷区岩层倾向改变地表径流的水流方向,进而影响地上/地下的水土流/漏失量,从而改变地表土壤的理化性质和土壤分离能力。在本研究中,土壤分离能力与有机质含量、水稳性团聚体含量、全氮和全磷含量呈较强的负相关关系,顺层坡有机质含量、水稳性团聚体含量和全氮含量低于逆层坡,但顺层坡全磷含量高于逆层坡。可能是因为顺层坡岩层倾向与坡向一致,促进地表径流发展,水流冲刷力较强,所以,顺层坡土壤流/漏失严重,土层较薄,保水保肥能力下降,有机质和水稳性团聚体含量随水土流失明显减少,加上全氮易随水流从土壤中释出^[15],故顺层坡全氮含量也较低。而顺层坡全磷含量较逆层坡更高,可能是因为磷元素主要来源于母岩分解,顺层坡裸岩率高促进全磷的形成,加上全磷对土壤的吸附作用较强^[17-19],不易发生流/漏失。有研究^[20]表明,全氮和全磷与有机质和水稳性团聚体呈正相关,但全氮和全磷作为土壤养分元素,是通过有机质和水稳性团聚体间接作用于土壤分离,因此,有机质和水稳性团聚体含量的高低对土壤分离能力的大小更具有决定作用。本研究中,顺层坡有机质含量和水稳性团聚体含量的流失与漏失量大,不利于土壤颗粒絮凝、胶结和排列,土壤紧实度较低,明显降低土壤稳定性^[21-23],减弱土壤抗侵蚀能力,顺层坡土壤分离能力较强。逆层坡岩层倾向与坡向相反,岩层倾向阻碍地

表水流,导致地表水流滞留于坡面,进而沿岩层孔裂隙下渗,水流渗漏使逆层坡地表径流量减少,流速降低,冲刷作用较弱,致使土壤向下漏失,但是逆层坡孔裂隙较小,土壤漏失量远低于地表土壤流失量,逆层坡土壤厚度更大。此外,相比顺层坡,逆层坡土层厚,土壤保肥保水能力强,有机质和水稳性团聚体的流失与漏失数量明显少于顺层坡,逆层坡土壤稳定性更高,土壤分离能力更低。

3.2 土地利用类型对土壤分离能力的影响

土地利用类型影响土壤的粗糙度,改变土壤理化性质^[24],从而使不同土地利用类型的土壤分离能力存在显著差异。通过比较发现,顺/逆层坡草地的土壤分离能力均显著低于辣椒地、玉米地和裸地。其原因可能是草地受人类活动影响较小,并且草地的近地表植被覆盖率较高,地下根系网络发达,根系分泌物的生物化学作用能进一步提高土壤黏结力,稳固草地的有机质、水稳性团聚体、全氮和全磷,增强土壤的抗蚀性^[25],降低草地土壤分离能力。本研究发现,辣椒地和玉米地的土壤分离能力明显高于其他土地利用类型,原因可能是辣椒地和玉米地的长期耕作干扰土壤的自然过程,对土壤养分状况、水分径流、土壤侵蚀潜力和土壤微生物等产生负面影响^[26]。即由于作物采收及除根除草等活动,使得土壤缺少枯落物及残根,对有机质的供给不足;同时,坡耕地的常年翻耕增加土壤的通透性,加剧土壤活性有机质的矿化和分解^[19],导致土壤表层疏松,造成有机质、全氮和全磷

的大量流失与漏失,破坏土壤团聚体^[27],导致辣椒地和玉米地的有机质、全氮、全磷和水稳性团聚体含量较低,加剧土壤侵蚀。粉粒含量能明显影响土壤分离能力^[28],土粒越细,比表面积越大,吸附水分的能力越强。而本研究中,玉米地的粉粒含量显著低于其他土地利用类型,除长期耕作灌溉影响外,喀斯特槽谷区地表地下特殊双层结构加剧细土粒的流失与渗漏,导致土壤粗化程度高,土质疏松^[29-30]。因此,粉粒含量低使玉米地抗侵蚀能力弱,土壤分离能力较强。此外,在本研究中,裸地的土壤分离能力明显高于草地,可能是因为喀斯特地区独特的水文地质结构使得土壤易沿发达的岩石孔、裂隙渗漏,因此,喀斯特地区土壤砾石含量较高。裸地缺乏植被覆盖,表层土壤抵抗径流冲刷能力较弱,加速土壤流失与漏失,进一步扩大土壤疏松度,导致裸地总孔隙度和非毛管孔隙度均高于其他土地利用类型。已有研究^[20]表明,土壤分离能力与土壤孔隙度呈正相关关系,土壤孔隙度越大,水分渗透能力越强^[31],因此,孔隙度高会降低土壤紧实度^[11],从而减弱裸地土壤的抗分离能力。此外,裸地的土壤分离能力明显低于玉米地和辣椒地,可能是因为玉米地和辣椒地经长期翻耕,土质疏松,而裸地受人为干扰较小,土体相对稳定,使其土壤分离能力低于玉米地和辣椒地。

综上所述,由于喀斯特槽谷区环境十分复杂,不同岩层倾向和土地利用类型使土壤分离能力存在显著差异。在本研究中,顺层坡土壤分离能力高于逆层坡,草地的土壤分离能力最小。所以,喀斯特槽谷区预防水土流失应减少对天然草地的破坏,同时,因地制宜,合理开垦土地,防止水土流失。本研究仅在室内进行土壤分离模拟,难以完全还原真实状况,具有一定的局限性,因此,今后应加强野外监测,掌握更准确的土壤分离数据。

4 结论

(1)顺/逆层坡土壤理化性质存在显著差异,有机质含量、粉粒含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、土壤容重、毛管孔隙度和全氮均为逆层坡 $>$ 顺层坡,其中,草地的有机质含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和全氮显著优于其他土地利用类型。

(2)各土地利用类型的土壤分离能力均表现为顺层坡高于逆层坡,其中,草地的土壤分离能力在顺/逆层坡均为最低。总体来看,顺层坡土壤分离能力 $[2.63 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)]$ 高于逆层坡 $[0.46 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)]$ 。

(3)土壤分离能力在顺/逆层坡均与土壤有机质含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和全氮呈显著负相关关系($p<0.05$),逆层坡土壤分离能力与粉粒含

量和全磷呈显著负相关($p<0.05$)。

(4)顺/逆层坡土壤分离能力的首要决策因素分别为有机质含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量。分别用有机质含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量对顺/逆层坡土壤分离能力建立预测模型,模型拟合精度均较高。

参考文献:

- [1] 张光辉.对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J].水科学进展,2018,29(2):151-158.
ZHANG G H. Several understandings for sediment transport capacity by overland flow[J].Advances in Water Science,2018,29(2):151-158.
- [2] 耿韧,张光辉,洪大林,等.我国水蚀区坡耕地土壤分离能力的空间分布与影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):156-161.
GENG R, ZHANG G H, HONG D L, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil detachment capacity of sloping farmland in water erosion zone of China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(3):156-161.
- [3] 马建业,马波,余芳涛,等.基于力学参数解析黄土高原典型草地的土壤分离能力研究[J/OL].土壤学报,1-13 [2024-03-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20231128.1231.006.html>.
MA J Y, MA B, SHE F T, et al. Analysis of soil detachment of typical grassland on loess plateau based on mechanical parameters[J].Acta Pedologica Sinica,1-13 [2024-03-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20231128.1231.006.html>.
- [4] ZI R Y, ZHAO L S, FANG Q, et al. Path analysis of the effects of hydraulic conditions, soil properties and plant roots on the soil detachment capacity of karst hillslopes[J].Catena,2023,228:e107177.
- [5] MA J Y, LI Z B, MA B, et al. Response mechanism of the soil detachment capacity of root-soil composites across different land uses[J].Soil and Tillage Research,2022,224:e105501.
- [6] ZHANG G H, TANG M K, ZHANG X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J].Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(9):1302-1309.
- [7] 陈英,魏兴萍,雷珊.青木关岩溶槽谷流域不同土地利用类型土壤可蚀性分析[J].中国岩溶,2020,39(6):836-844.
CHEN Y, WEI X P, LEI S. Analysis on soil erodibility of different land use types in the Qingmuguan karst valley[J].Carsologica Sinica,2020,39(6):836-844.
- [8] 鄢姗姗,丁春燕.顺层岩质边坡稳定性分析及加固设计实践[J].资源信息与工程,2023,38(5):74-77.
YAN S S, DING C Y. Stability analysis and reinforce-

- ment design practice of bedding rock slope[J].Resource Information and Engineering,2023,38(5):74-77.
- [9] 王来贵,孙颖聪,赵娜,等.地震作用下含弱层顺向坡响应规律分析[J/OL].中国地质灾害与防治学报,1-10 [2024-03-05]. <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202210029>.
- WANG L G, SUN C Y, ZHAO N, et al. Analysis on the response of the dip slope with weak layer to earthquake[J/OL].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1-10 [2024-03-05]. <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202210029>.
- [10] 覃自阳,甘凤玲,何丙辉.岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):68-75,80.
- QIN Z Y, GAN F L, HE B H. Influence of strata tendency on the surface/underground runoff production process in typical karst valley[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(5):68-75,80.
- [11] YAN Y J, DAI Q H, YANG Y Q, et al. Effects of vegetation restoration types on soil erosion reduction of a shallow karst fissure soil system in the degraded karst areas of southwestern China[J].Land Degradation and Development,2023,34(8):2241-2255.
- [12] CAO M, WU C, LIU J C, et al. Increasing leaf $\delta^{13}\text{C}$ values of woody plants in response to water stress induced by tunnel excavation in a karst trough valley: Implication for improving water-use efficiency[J].Journal of Hydrology,2020, 586,e586.
- [13] LIU J C, SHEN L C, WANG Z X, et al. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley[J].Journal of Hydrology,2019,571:485-493.
- [14] GAN F L, HE B H, QIN Z Y, et al. Contribution of bedrock dip angle impact to nitrogen and phosphorus leakage loss under artificial rainfall simulations on slopes parallel to and perpendicular to the bedrock dip in a karst trough valley[J].Catena,2021,196:e104884.
- [15] XIAO Q, JIANG Y J, QIAO Y N, et al. Dynamic assessment of restored ecosystem health based on pressure-state-response subsystem-system model in a karst trough valley[J].Ecohydrology,2023,16:e2595.
- [16] 国家林业局.LY/T 1215—1999 森林土壤水分:物理性质的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
- State Forestry Administration.LY/T 1215—1999 Forest soil moisture: Determination of physical properties [S]. Beijing: Standards Press of China,1999.
- [17] 张海香,李天阳,何丙辉,等.不同施肥与耕作方式下土壤-径流氮磷变化特征[J].水土保持学报,2023,37(3):281-287.
- ZHANG H X, LI T Y, HE B H, et al. Change characteristics of nitrogen and phosphorus in soil-runoff under different conditions of fertilization and tillage[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(3):281-287.
- [18] 余春娅,张恒彬,赵鑫,等.贵州喀斯特石漠化地区苔藓结皮对土壤酶活性及碳氮磷含量的影响[J].土壤通报,2023,54(5):1137-1147.
- YU C Y, ZHANG H B, ZHAO X, et al. Effects of moss crusts on soil enzyme activities and contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus in a karst rocky desertification area of Guizhou[J].Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(5):1137-1147.
- [19] 贾洪杰,甘凤玲,李振轮,等.岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响[J].生态学报,2019,39(16):6107-6113.
- JIA H J, GAN F L, LI Z L, et al. Effects of rock strata dip on soil physicochemical properties of sloping farmland in a southern karst area[J].Acta Ecologica Sinica, 2019,39(16):6107-6113.
- [20] 阿合江·赛力克,孙琳,王绒,等.黄土丘陵区恢复草地土壤团聚体组成及全氮分布特征[J].生态学报,2023,43(24):10065-10080.
- SAILIKE A H J, SUN L, WANG R, et al. Restoration of grassland soil aggregate composition and total nitrogen distribution characteristics in Loess Hilly Area[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(24):10065-10080.
- [21] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China[J].Catena, 2014,116:51-59.
- [22] 吴昊阳,牛健植,王迪,等.辽东山区冰缘地貌大孔隙结构特征及其对团聚体稳定性和土壤可蚀性的影响[J].北京林业大学学报,2023,45(6):69-81.
- WU H Y, NIU J Z, WANG D, et al. Characteristics of the macropore structure of ice-marginal landforms in the Liaodong mountain area of northeastern China and its influence on soil aggregate stability and soil erodibility [J].Journal of Beijing Forestry University,2023,45(6):69-81.
- [23] 李静,周正朝,张强,等.黄土区不同退耕年限草地土壤分离速率及其理化性质[J].干旱区研究,2017,34(3):504-510.
- LI J, ZHOU Z C, ZHANG Q, et al. Soil physiochemical properties and soil detachment rate in grasslands with different years of grain for green in the Loess Plateau[J].Arid Zone Research,2017,34(3):504-510.
- [24] 平原,澹腾辉,李雨晨,等.丹江口库区典型小流域生物结皮驱动土壤性质变化及分离响应[J].水土保持学报,2023,37(3):87-94.
- PING Y, TAN T H, LI Y C, et al. Soil properties change and soil detachment response driven by biocrusts

- in typical small watershed of DanJiangkou Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 87-94.
- [25] 蒋芳市,何恺文,李慧,等.2种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤分离的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 112-117.
JIANG F S, HE K W, LI H, et al. Effects of two herb plants roots on soil detachment in alluvial fan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 112-117.
- [26] AN S S, DARBOUX F, CHENG M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China) [J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 75-85.
- [27] 张晓艳,李琴书.不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 12-17.
ZHANG X Y, LI Q S. Effects of land use types on soil erosion and soil nutrient losses in purple soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 12-17.
- [28] 曲丽莉,郭红丽,李盟,等.江苏省平原沙土区河沟边坡土壤分离速率及其影响因素[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(3): 27-34.
QU L L, GUO H L, LI M, et al. Soil detachment rate and its influencing factors of gully slope in the plain sandy area of Jiangsu Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3): 27-34.
- [29] 陈进豪,范弢,户红红.滇东海峰岩溶盆地石漠化坡地土壤机械组成和有机碳的变化特征[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 33-39.
CHEN J H, FAN T, HU H H. Change characteristics of soil mechanical composition and organic carbon in rocky desertification sloping land in Haifeng karst Basin in eastern Yunnan province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 33-39.
- [30] 张磊,王家文,王嘉学,等.滇东喀斯特山原红壤退化过程中剖面颗粒分形特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4): 18-23.
ZHANG L, WANG J W, WANG J X, et al. Fractal characteristics of particles in soil profile during the process of mountain red earth degradation in the karst area of east Yunnan[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(4): 18-23.
- [31] GAN F L, SHI H L, GOU J F, et al. Effects of bed-rock strata dip on soil infiltration capacity under different land use types in a karst trough valley of Southwest China[J]. *Catena*, 2023, 230: e107253.
- (上接第129页)
- [24] 张钦弟,刘剑荣,杨磊,等.半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9057-9068.
ZHANG Q D, LIU J R, YANG L, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9057-9068.
- [25] 孙文泰,马明,牛军强,等.陇东雨养苹果覆膜对土壤团聚体结构稳定性与细根分布的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(4): 1582-1593.
SUN W T, MA M, NIU J Q, et al. Effects of film mulching on soil aggregate structure stability and fine root distribution of rain-fed apple in eastern Gansu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4): 1582-1593.
- [26] REINHART K O, SANI WOROGO H S, RINELLA M J, et al. Livestock increase soil organic carbon in the Northern Great Plains[J]. *Rangeland Ecology and Management*, 2021, 79: 22-27.
- [27] WU H H, WIESMEIER M, YU Q, et al. Labile organic C and N mineralization of soil aggregate size classes in semiarid grasslands as affected by grazing management[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(3): 305-313.
- [28] WANG J W, ZHAO C Z, ZHAO L C, et al. Effects of grazing on the allocation of mass of soil aggregates and aggregate-associated organic carbon in an alpine meadow[J]. *PLoS One*, 2020, 15(6): e0234477.
- [29] 陆琪,马红彬,俞鸿千,等.轮牧方式对荒漠草原土壤团聚体及有机碳特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3028-3038.
LU Q, MA H B, YU H Q, et al. Effects of rotational grazing methods on soil aggregates and organic carbon characteristics in desert steppe[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3028-3038.