

滇东岩溶断陷盆地地表/地下不同侵蚀场土壤的可蚀性

綦 璨, 范 弢, 陈进豪

(云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650500)

摘要: 以滇东海峰岩溶盆地土壤复合侵蚀过程为研究对象, 分析综合土壤可蚀性指数(CSEI)的分布特征, 探讨地表、地下土壤可蚀性的关联性、变化趋势及其影响因素, 以期深入认识岩溶地区土壤侵蚀机理, 治理石漠化现象。通过野外调查取样结合土壤比重计法、团聚体湿筛等方法, 分析了滇东岩溶断陷盆地地表、地下不同侵蚀场土壤的理化性质及可蚀性变化特征。结果表明: (1) 土壤理化性质随侵蚀过程发生变化。土壤中黏粒、SOC、大团聚体($>0.25\text{ mm}$)呈递减趋势, 粉砂、小团聚体($<0.25\text{ mm}$)呈递增趋势。不同侵蚀过程土壤特征存在显著差异, 地表侵蚀过程土壤黏粒(20.91%~45.62%)、砂粒(44.96%~64.59%)、SOC(4.93~88.72 g/kg)、大团聚体(17.82%~99.86%)含量 $>$ 地下漏失过程(15.30%~30.86%, 43.63%~64.59%, 3.57~19.05 g/kg, 16.81%~85.94%); 粉砂(4.85%~30.84%)、小团聚体(0.14%~82.18%)含量 $<$ 地下漏失过程(16.03%~25.86%, 14.06%~83.19%)。 (2) CSEI 与土壤理化性质密切相关, CSEI 与黏粒、砂粒、大团聚体、SOC、MWD、GMD 呈极显著负相关($p<0.01$), 与粉砂、小团聚体呈极显著正相关($p<0.01$), CSEI 的主要影响因素为 SOC 和土壤团聚体的稳定性。黏粒、砂粒、SOC、水稳性团聚体含量对地表侵蚀过程 CSEI 影响更大, 其他因素对地下漏失过程 CSEI 影响更大。 (3) CSEI 对岩溶盆地地表、地下侵蚀过程土壤可蚀性的评价具有适用性, $\text{CSEI}_{\text{地下}}>\text{CSEI}_{\text{地表}}$, 二者随侵蚀过程和土层深度的变化而上升, 地下漏失过程存在二次侵蚀影响。其土壤侵蚀过程是地表、地下复合、持续进行的过程, 植被—土壤的协同恢复能增强土壤抗侵蚀能力。

关键词: 岩溶断陷盆地; 土壤侵蚀; CSEI; 地表侵蚀; 地下漏失

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0066-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.010

Soil Erodibility of Different Surface and Underground Erosion Fields in Karst Rift Basin of Eastern Yunnan

QI Can, FAN Tao, CHEN Jinhao

(Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500)

Abstract: Taking the soil composite erosion process of Haifeng karst basin in eastern Yunnan province as the research object, the distribution characteristics of comprehensive soil erodibility index (CSEI) were analyzed, and the correlation, variation trend and influencing factors of soil erodibility between surface and underground soil were discussed, so as to deeply understand the soil erosion mechanism in karst area and control rock desertification. Through field investigation and sampling, soil hydrometer, wet screening of aggregates and other methods, the physical and chemical properties and erodibility change characteristics of soils in different erosion fields on the surface and underground of karst fault basin in eastern Yunnan were analyzed. The results showed that: (1) Soil physical and chemical properties changed with the erosion process. Clay, SOC and large aggregate ($>0.25\text{ mm}$) in the soil showed a decreasing trend, while silt and small aggregate ($<0.25\text{ mm}$) showed an increasing trend. There were significant differences in soil characteristics among different erosion processes. The content of soil clay (20.91%~45.62%), sand (44.96%~64.59%), SOC (4.93~88.72 g/kg) and large aggregate (17.82%~99.86%) in surface erosion process was higher than that in underground leakage process (15.30%~30.86%, 43.63%~64.59%, 3.57~19.05 g/kg and 16.81%~85.94%). The content of silt (4.85%~30.84%) and small aggregates (0.14%~82.18%) was less than that of underground leakage process (16.03%~25.86% and 14.06%~83.19%). (2) CSEI was

closely related to soil physical and chemical properties. CSEI was negatively correlated with clay, sand, large aggregates, SOC, MWD and GMD ($p < 0.01$), and positively correlated with silt and small aggregates ($p < 0.01$). The main influencing factors of CSEI were SOC and soil aggregates stability. Clay, sand, SOC and water-stable aggregate contents had greater influence on CSEI of surface erosion process, while other factors had greater influence on CSEI of underground loss process. (3) CSEI had applicability to evaluate soil erodibility in the process of surface and underground erosion in karst basin, the CSEI of underground leakage was higher than that of surface erosion, both of which rose with the change of erosion process and soil depth. And the underground leakage process had secondary erosion effect. The soil erosion process was a compound and continuous process of surface erosion and underground leakage. The synergistic restoration of vegetation-soil could enhance soil erosion resistance.

Keywords: karst faulted basin; soil erosion; CSEI; surface erosion; underground leakage

岩溶地区地表—地下二元三维立体空间结构的存在^[1],导致其土壤侵蚀形成地表、地下复合侵蚀的模式^[2-3],地表、地下侵蚀能相互转换^[1,4]。目前对岩溶区地表侵蚀机理的认识较为明确,岩溶土壤地表侵蚀是化学溶蚀、重力侵蚀和流失侵蚀综合作用的结果^[2]。而对地下漏失过程的研究还需深入,学者们^[5-7]对坡地土壤的主要侵蚀方式、地表土壤进入地下的主要通道存在争议。但随着土层深度的加深,浅层裂隙土壤砂粒、有机碳、大团聚体含量不断减少,裂隙土壤结构稳定性逐渐下降^[8]。若其拥有较好通达度,连接地下岩溶管道系统,会造成土壤漏失^[7,9],使裂隙成为土壤漏失的重要通道^[6]。

土壤可蚀性是评价土壤是否易受侵蚀营力破坏性能的标准^[10],是估算土壤侵蚀量、揭示土壤侵蚀机制、评价水土保持效益不可或缺的参数^[11]。西南岩溶地区对土壤可蚀性的研究,在空间上,涵盖样地^[12]、坡面^[13]、流域^[14-15]、行政区^[16]等各种尺度范围。应用领域上,土壤可蚀性的计算结果被直接或间接地应用于岩溶土壤侵蚀评价^[17]、生态安全评价^[18]、生态承载力评价^[19]、石漠化评价^[20]等众多领域。可以说,土壤可蚀性已成为岩溶地区土壤侵蚀评估的重要手段。

土壤可蚀性通常用 K 来表示^[14], K 值是根据径流小区实测的土壤流失量和雨强计算求得,其适用范围有限,主要用于表示地表土壤侵蚀。此外,还可以用 CSEI 来评价土壤可蚀性^[21],CSEI 是通过综合土壤可蚀性的影响因素,分析不同因素对土壤可蚀性作用的权重,结合各影响因素所占分值,对土壤可蚀性进行评价,其适用范围更广,且更具科学性。土壤结构稳定性指数 (SSSI)、团聚体的平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD),也被广泛应用于土壤可蚀性的评价^[21-25]。土壤养分是土壤团聚体形成的胶结剂,土壤的养分含量影响土壤团聚体的含量及分布^[22]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[13],团聚体的稳定性及粒径分布都会对土壤结构产生影

响^[26-27]。土壤结构的破坏意味着土壤侵蚀的发生,土壤侵蚀则伴随土壤养分的流失^[21,23]。土壤结构、养分与土壤可蚀性是相互作用、相互影响的关系。所以本文基于土壤可蚀性的影响因素,运用 CSEI,对海峰岩溶盆地地表、地下土壤可蚀性进行综合评价。

西南岩溶地区土壤侵蚀的治理措施主要为生态措施。立足于土壤结构、养分与土壤可蚀性相互作用的关系,利用植被恢复改变土壤特性,增加土壤养分,提高土壤微生物的活性,促进土壤团聚体的形成,改善土壤结构^[21,24]。同时,为土壤微生物提供能源和养分,促进有机质形成与积累,为植物根系提供大量养分,促进根系发育,增强土壤抗侵蚀能力^[26-27],减少土壤侵蚀。综合来说,就是利用植被—土壤—微生物的协同恢复效应,促进岩溶地区生态环境的恢复。

滇东海峰岩溶断陷盆地是典型岩溶生态脆弱区,地形起伏大,土壤地表侵蚀现象严重^[13];岩溶垂直发育强烈,裂隙、溶洞等地下岩溶地貌众多,且其裂隙小生境土壤结构稳定性较差,抗侵蚀能力较弱^[28-29],为土壤的漏失提供了重要通道,土壤漏失严重;其特殊的盆—山一体的地貌特征限制了断陷盆地水—土—岩—植的空间分异格局^[30],植被退化严重,石漠化面积较大。本文通过分析滇东海峰岩溶断陷盆地土壤地表侵蚀与地下漏失过程综合土壤可蚀性指数的分布特征,探讨其影响因素及其评价方法在地下漏失过程的适用性。进一步认识岩溶断陷盆地土壤的复合侵蚀过程,为滇东海峰岩溶断陷盆地石漠化的治理与生态恢复的优化提供一些参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省曲靖市沾益县西部海峰自然保护区($25^{\circ}35' - 25^{\circ}57'N, 103^{\circ}29' - 103^{\circ}39'E$),属断陷盆地构造,其地形可划分山地岩溶区、平坦岩溶盆地和过渡带(坡面),地势起伏较大,岩溶垂直发育强烈,过渡带发育有石芽、溶沟、裂隙等岩溶地貌,在岩

溶盆地则发育有落水洞、溶洞、暗河等地下岩溶地貌。导致其土壤侵蚀过程表现为坡地—洼地—落水洞—暗河,或是坡地—裂隙—溶洞—暗河。属亚热带高原季风气候,干湿季分明,降水主要集中于雨季,雨季降水量占年降水量的 87.3%。主要植被类型为元江栲栌林(*Castanopsis orthacantha*)、云南松林(*Pinus yunnanensis*)和小铁仔灌丛(*Myrsine africana*)。研究区以石灰岩发育的山地红壤为主,土层较薄,土壤易被侵蚀,岩石裸露,石漠化现象严重。

1.2 样品采集与处理

2019 年 5 月,在海峰自然保护区的核心兰石坡海子岩溶盆地设置样地,地表侵蚀过程,在坡地沿坡顶、中坡位、下坡位、坡脚,设置 8 个采样点;以 5 cm 为 1 层,自上而下分层采样,共 6 层(0—30 cm),采集 24 个样品,沿流水侵蚀方向在坡脚与落水洞之间的洼地以等距的方式设 4 个采样点(W1~W4),以 5 cm 为 1 层,自上而下分层采样,共 6 层(0—30 cm),采集 24 个样品,共采集 48 个样品。

地下漏失过程,在中坡位的云南松次生林(*secondary forest of Pinus yunnanensis*)、小铁仔灌丛(*Myrsine africana*) 2 个典型群落中选择 2 个裂隙进行采样(X1 和 X2),每个裂隙以 40 cm 为 1 层,自下而上分层采集,共 8 层(0—320 cm),采集 16 个样品。再在裂隙联通的溶洞取表层土壤 1 个,在与溶洞联通的落水洞中设 1 个采样点(L3),以 5 cm 为 1 层,自上而下分层采样,共 6 层(0—30 cm),采集 6 个土样。在落水洞下暗河取表层土壤 1 个,共采集 24 个样品。将土样封装带回实验室,用于土壤的机械组成试验、SOC 检测和土壤团聚体的检测。

1.3 样品测定

土壤的机械组成采用比重计法进行检测,并将土壤颗粒按国际制土壤颗粒分级标准分为黏粒(<0.002 mm)、粉砂粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)。土壤团聚体则采用土壤团聚体分析仪进行湿筛,在纯水环境中使用土壤团聚体分析仪进行湿筛上下振荡,通过 5 个不同粒径的筛子(5,2,1,0.5,0.25 mm)^[31],进而得到>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm 粒径的团聚体,烘干并称重。SOC 采用《土壤农化分析》^[32]中重铬酸钾容量法进行检测。

1.4 数据处理

土壤结构稳定性指数(SSSI)、团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)的计算公式为:

SSSI=SOM/(clay+silt)×100% (1)

MWD=∑_{i=1}ⁿ x_iy_i (2)

GMD=exp [∑_{i=1}ⁿ (y_iln x_i)/∑_{i=1}ⁿ y_i] (3)

式中:sand 为砂粒含量(%);silt 为粉砂含量(%);clay 为黏粒含量(%);C 为 SOC 含量(%);SOM 为

有机质含量,SOM=1.724C;x_i为 i 级团聚体平均直径;y_i为 i 级团聚体平均重量。

综合土壤可蚀性指数(CSEI):

CSEI=∑_{i=1}ⁿ w_{ei}s_{ei} (4)

式中:n 为指标数;w_{ei}和 s_{ei}分别为土壤可蚀性指标的权重和分值。

通过主成分分析(PCA)计算各指标的权重,并使用公式(5)和公式(6)计算各指标的得分。

u(x)=⎧⎩1x≥bx−a/b−aax<ba0x≤a (5)

u(x)=⎧⎩1x≤ax−b/a−bx>a0x≥b (6)

式中:u(x)为隶属函数;x 为土壤可蚀性指标的值;a 和 b 分别为土壤可蚀性指标的下限和上限。土壤可蚀性指标与土壤可蚀性呈正相关,用公式(5)计算得分。与土壤可蚀性呈负相关,用公式(6)计算得分。

采用 Excel 2013 软件对数据进行基础分析和图表制作,SPSS 26 软件对土壤性质与综合土壤可蚀性指数进行相关性分析,用 Canoco 5 软件做冗余分析,分析土壤可蚀性的影响因子。

2 结果与分析

2.1 不同侵蚀场 CSEI 的空间分布特征

由表 1 和图 1 可知,海峰岩溶断陷盆地 CSEI 为 0.30~0.96,变异系数 CV 值为 19.01%,其数值在 10%~100%,CSEI 空间异质性为中等。地表侵蚀过程的 CSEI 为 0.30~0.96,地下漏失过程 CSEI 为 0.66~0.96,地下漏失过程土壤的 CSEI 更大。

地表侵蚀过程 CSEI 逐渐上升,中坡位的 CSEI 值最低,W3 的 CSEI 值最高;地下漏失过程 CSEI 呈上升趋势,云南松次生林裂隙 CSEI 值最低,暗河的 CSEI 值最高。CSEI 值在地表、地下侵蚀过程中还随土层深度发生变化,地表侵蚀过程在 W2、W3 处呈下降趋势,在其他侵蚀场呈上升趋势;地下漏失过程,裂隙呈递增趋势,落水洞呈递减趋势。

表 1 海峰岩溶盆地 CSEI 的基本统计学特征

样地	样点数	平均值	最大值	最小值	中值	标准差	CV/%
海峰岩溶盆地	72	0.81	0.96	0.30	0.87	0.15	19.01

2.2 不同侵蚀场土壤颗粒粒径的空间分布特征

地表侵蚀过程黏粒含量在 20.91%~45.62%,粉砂含量在 4.85%~30.84%,砂粒含量在 44.96%~64.59%;地下漏失过程黏粒含量在 15.30%~30.86%,粉砂含量在 16.03%~25.86%,砂粒含量在 43.63%~64.59%(图 2)。海峰岩溶断陷盆地土壤砂粒含量最高。地表侵

蚀过程,黏粒、砂粒含量逐渐减少,粉砂含量逐渐增多。机械组成随土层深度发生变化,黏粒在坡顶、中坡位呈上升趋势,在其他侵蚀场呈下降趋势;粉砂在W4处呈上升趋势,在其他侵蚀场呈下降趋势;砂粒

在坡顶、中坡位、W4呈下降趋势,其他侵蚀场呈上升趋势。地下漏失过程,黏粒含量减少,粉砂和砂粒含量增多。黏粒、粉砂含量随土层深度增加而增多,砂粒含量随土层深度增加而减少。

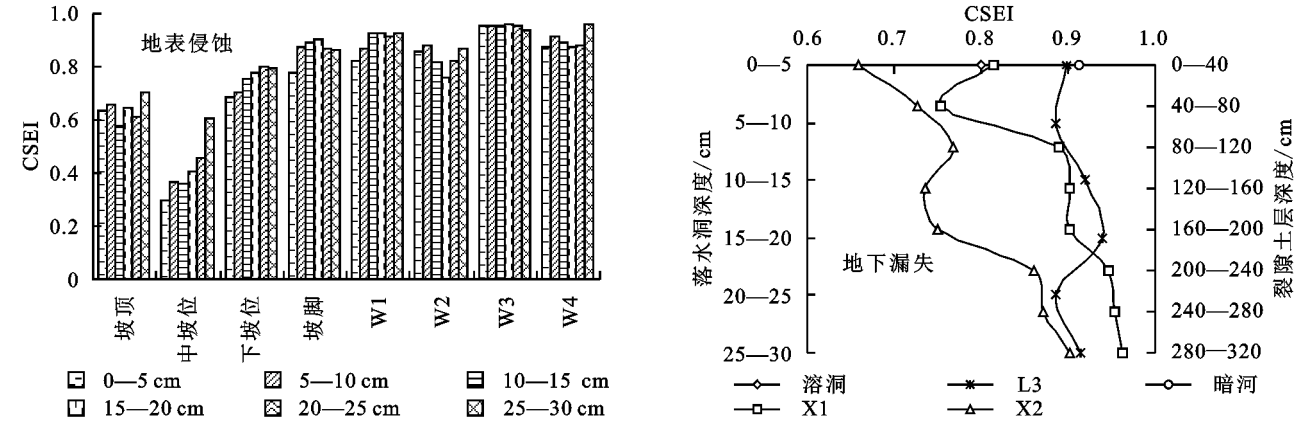


图1 不同侵蚀场CSEI的变化

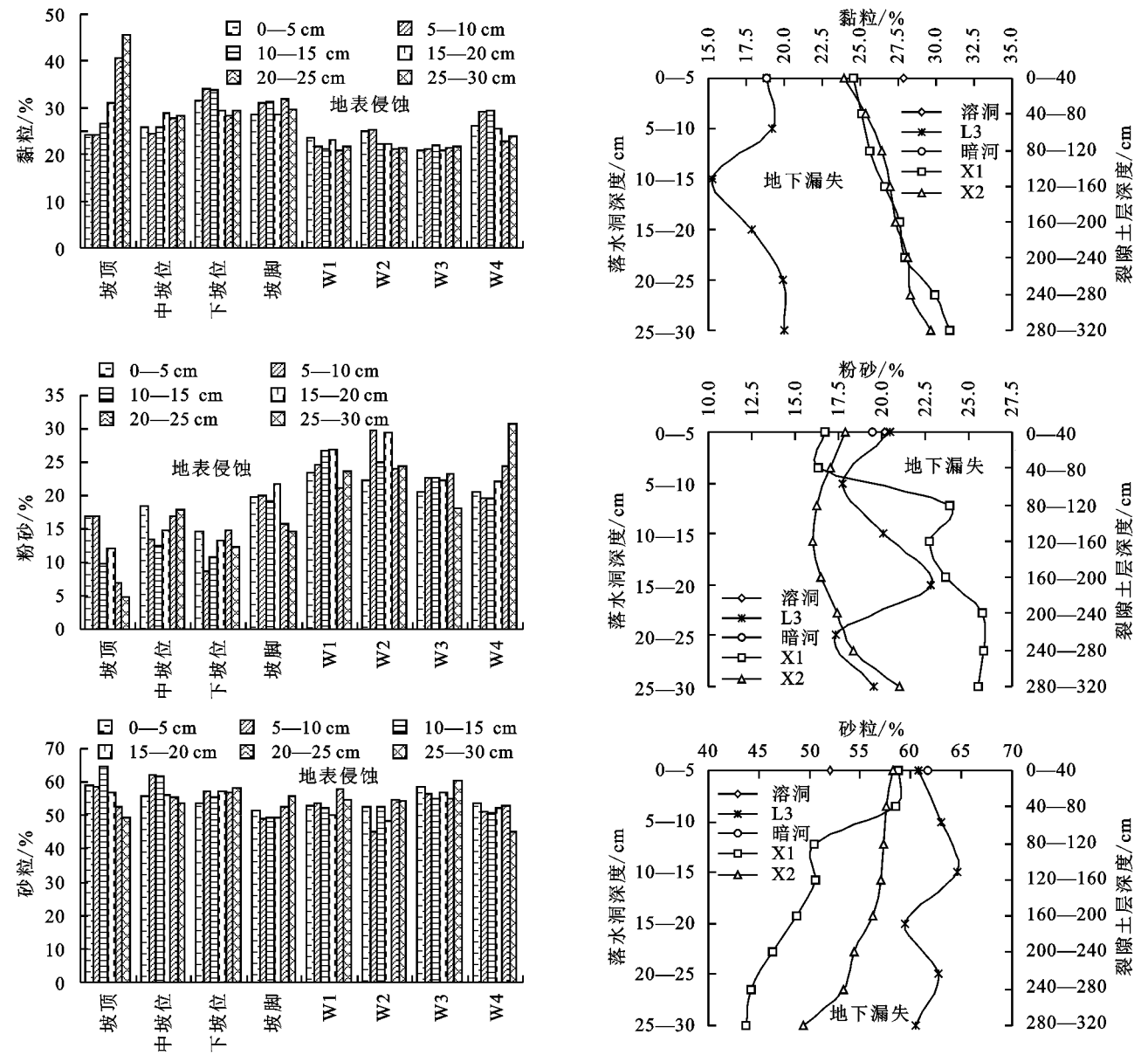
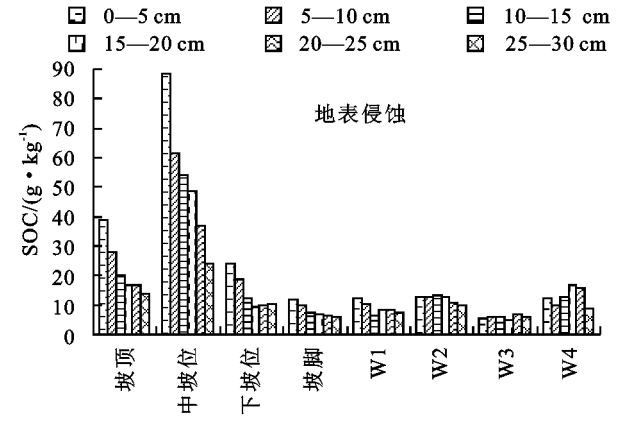


图2 不同侵蚀场土壤颗粒含量变化

2.3 不同侵蚀过程土壤 SOC 含量变化

地表侵蚀过程土壤 SOC 含量为 4.93~88.72 g/kg,地下漏失过程土壤 SOC 为 3.57~19.05 g/kg,地表侵蚀过程土壤 SOC 含量高于地下漏失过程。在地表侵蚀、地下漏失过程中土壤 SOC 呈下降趋势,中坡



位土壤 SOC 含量最高。地表侵蚀过程, W3 土壤 SOC 含量最低,地下漏失过程(图 3),云南松次生林裂隙 SOC 含量最高,落水洞土壤 SOC 含量最低,且研究区内土壤 SOC 含量存在表层汇聚现象,随土层深度的增加其含量降低。

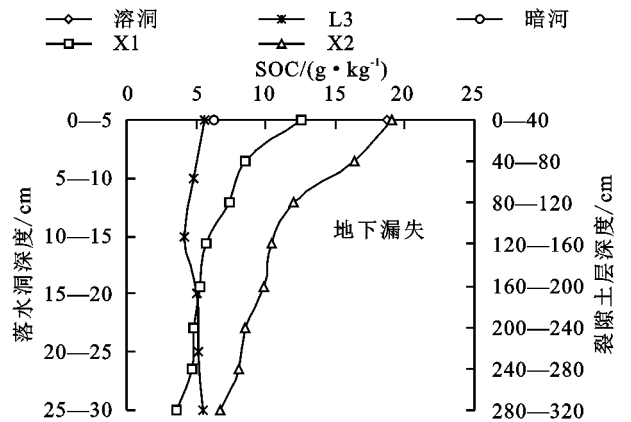
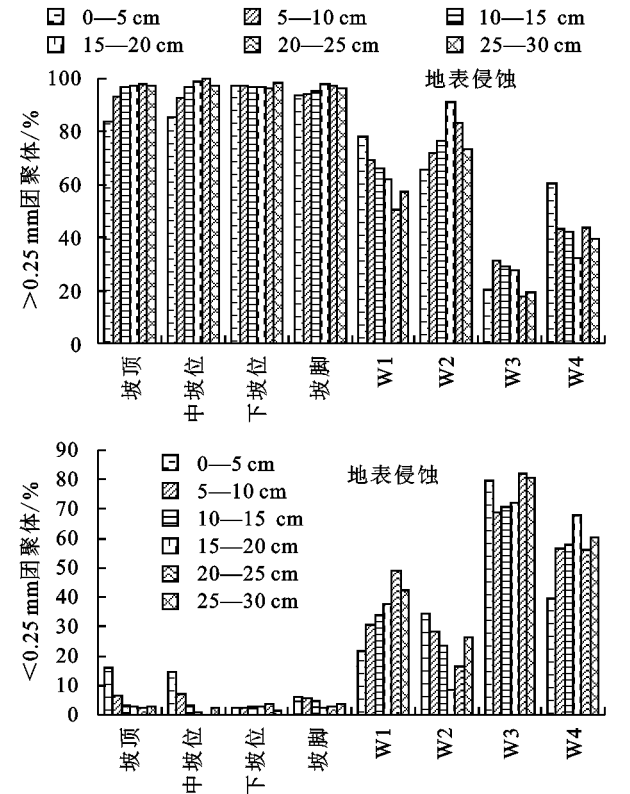


图 3 不同侵蚀场土壤 SOC 含量变化

2.4 不同侵蚀过程土壤水稳性团聚体含量

地表侵蚀过程,>0.25 mm 水稳定性团聚体含量为 17.82%~99.86%,<0.25 mm 水稳定性团聚体含量为 0.14%~82.18%;地下漏失过程,>0.25 mm 水稳定性团聚体含量为 16.81%~85.94%,<0.25 mm 水稳定性团聚体含量为 14.06%~83.19%(图 4)。

地表、地下侵蚀过程,>0.25 mm 水稳定性团聚体逐渐减少,<0.25 mm 水稳定性团聚体逐渐增多。



坡地以>0.25 mm 水稳定性团聚体为主,洼地以<0.25 mm 水稳定性团聚体为主。>0.25 mm 水稳定性团聚体,在坡地随土层深度增加而增加,在洼地随土层深度增加而减少;<0.25 mm 水稳定性团聚体变化趋势与之相反。地下漏失过程中随土层深度的增加,>0.25 mm 水稳定性团聚体呈下降趋势,<0.25 mm 水稳定性团聚体呈上升趋势。

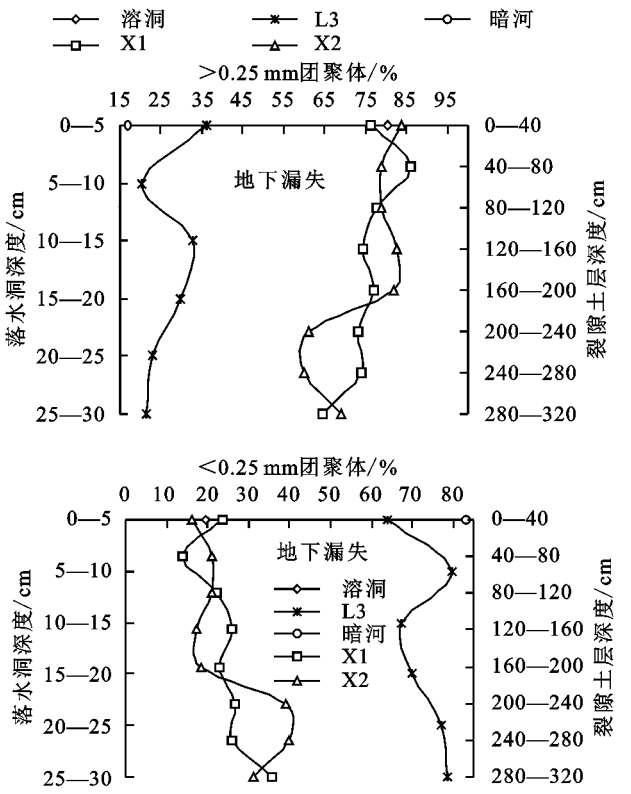


图 4 不同侵蚀场土壤水稳性团聚体含量变化

2.5 土壤理化性质与 CSEI 的关系

地表侵蚀过程中,CSEI、SSSI 与环境因素的总变异

量为 23.71,解释变量为 93.50%,调整后的解释变量为 92.60%。第 1,2 轴的相关系数分别为 0.967 8,0.573 5。

第 1 轴的解釋度为 93.42%，第 2 轴的解釋度为 0.09%，第 1,2 轴累计解釋了其总量信息的 93.51%。CSEI 与黏粒、砂粒、> 0.25 mm 水稳性团聚体、MWD、GMD 呈负相关，与粉砂、< 0.25 mm 水稳性团聚体呈正相关。SSSI 与粉砂、< 0.25 mm 水稳性团聚体呈负相关，与砂粒、SOC、> 0.25 mm 水稳性团聚体、MWD、GMD 呈正相关(图 5)。

地下漏失过程中，CSEI、SSSI 与环境因素的总变异量为 5.62，解釋变量为 98.50%，调整后的解釋变量为 98.00%。第 1,2 轴的相关系数分别为 0.992 6, 0.955 2。第 1 轴的解釋度为 98.34%，第 2 轴的解釋度为 0.16%，第 1,2 轴累计解釋了其总量信息的 98.51%。CSEI 与黏粒、> 0.25 mm 水稳性团聚体、SOC、MWD、GMD 呈负相关，与粉砂、< 0.25 mm 水稳性团聚体呈正相关。SSSI 与

粉砂、< 0.25 mm 水稳性团聚体呈负相关，与砂粒、黏粒、> 0.25 mm 水稳性团聚体、SOC、MWD、GMD 呈正相关。

结合冗余分析与 Person 相关性分析，海峰岩溶盆地土壤 CSEI 与黏粒、砂粒、> 0.25 mm 水稳性团聚体、SOC、MWD、GMD 呈极显著负相关，与粉砂、< 0.25 mm 水稳性团聚体呈极显著正相关，CSEI 的主要影响因素为 SOC 和水稳性团聚体稳定性。黏粒、砂粒、SOC、团聚体含量对地表侵蚀过程 CSEI 影响较大，粉砂、团聚体稳定性对地下漏失过程 CSEI 影响较大。SSSI 与粉砂、< 0.25 mm 水稳性团聚体呈极显著负相关，与 > 0.25 mm 水稳性团聚体、SOC、MWD、GMD 呈极显著正相关，与砂粒呈显著正相关，其主要影响因素是 SOC。砂粒对地表侵蚀过程 SSSI 影响较大，其他因素对地下漏失过程 SSSI 影响较大。

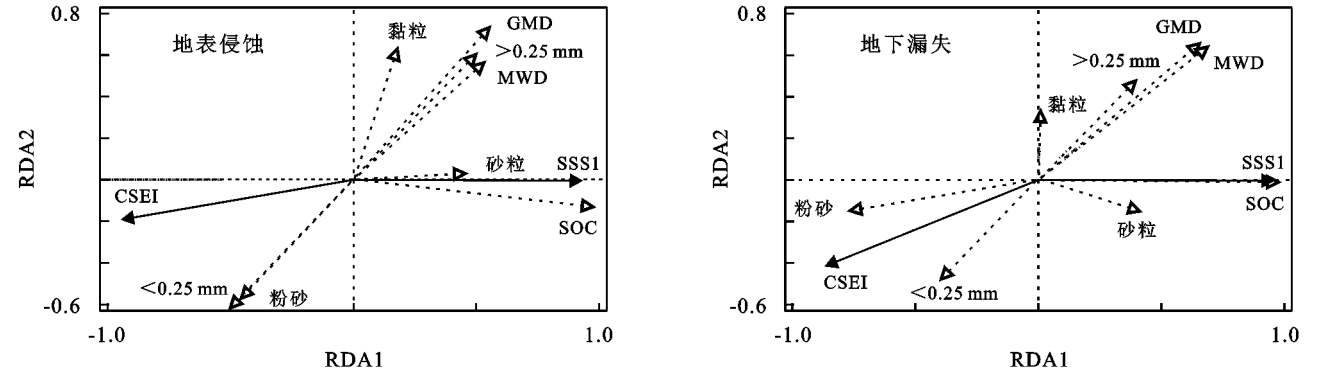


图 5 不同侵蚀场土壤可蚀性指标与环境因子之间的冗余分析

3 讨论

3.1 海峰岩溶盆地 CSEI 的空间异质性

不同侵蚀场土壤的 CSEI 整体呈现中坡位<坡顶<下坡位<云南松次生林裂隙<溶洞<坡脚<小铁仔灌丛裂隙<洼地<落水洞<暗河。坡地 CSEI 最小，由于坡地生态环境好，植被覆盖较大，通过枯落物、根系输入的有机质含量高，能改善土壤性质，降低土壤可蚀性^[12,14]。暗河土壤 CSEI 较大是因为地下径流对其土壤存在侵蚀^[1]。地表侵蚀过程 CSEI 表现为中坡位<坡顶<下坡位<坡脚<洼地；地下漏失过程 CSEI 表现为溶洞<裂隙<落水洞<暗河；与 SSSI 的变化趋势相反，SSSI 表现的是土壤结构的稳定性指数，因此土壤 SSSI 越高，土壤结构越稳定，不易发生侵蚀^[21]。CSEI 在地表、地下侵蚀过程中的变化趋势较好地反映了不同侵蚀场土壤的侵蚀敏感性，表现了土壤可蚀性的变化趋势。因此 CSEI 的评价方法适用于岩溶盆地地表、地下侵蚀过程土壤可蚀性评价。

土壤侵蚀过程中地下漏失过程的 CSEI 值更大，地下的土壤更易发生侵蚀，与唐益群等^[33]研究结论一致，地下土壤存在二次侵蚀的影响。地表径流携带

的土壤进入裂隙、溶洞等地下通道，最终以漏失的形式流失^[4]。地表侵蚀与地下漏失过程土壤 CSEI 呈上升趋势，地表侵蚀过程 W3 的 CSEI 最高；地下漏失过程，落水洞、暗河的 CSEI 最高；与鲍恩侯等^[14]研究结论一致，坡地径流经由洼地、落水洞进入地下暗河，在其过程中对洼地、落水洞、暗河土壤产生二次侵蚀，加之其植被覆盖度较低，因此其土壤侵蚀更强，暗河中还有常年存在的地下径流，对暗河中的土壤冲刷较大，土壤侵蚀较强。岩溶裂隙中存在土-岩界面、根-土界面，其通达度较好，成为岩溶土壤地下漏失重要通道^[34]。小铁仔灌丛裂隙土壤 CSEI 高于云南松次生林裂隙；小铁仔灌丛裂隙中植被群落处于群落演替的初级阶段，有机质含量相对较少，加之其为浅根系植被，对土壤的加固作用有限^[28]，因此其土壤可蚀性较高。

3.2 土壤可蚀性的影响因素

3.2.1 土壤结构对土壤可蚀性的影响 在海峰岩溶盆地中，随侵蚀过程的变化，地表侵蚀过程，黏粒、砂粒含量逐渐减少，粉砂含量逐渐增多，CSEI 逐渐上升；随土层深度增加，地下漏失过程的黏粒、粉砂含量增多，砂粒含量减少，而 CSEI 整体呈递增趋势。与

陈英等^[15]研究结论一致。地表侵蚀过程土壤黏粒、砂粒含量高于地下漏失过程,粉砂含量低于地下漏失过程,地表 CSEI 小于地下 CSEI。CSEI 与黏粒、砂粒呈极显著负相关,与粉砂呈极显著正相关。与王敬贵等^[35]、鲍恩侯等^[14]研究结论一致。土壤机械组成对土壤可蚀性具有重要影响。

土壤团聚体所占比例及其稳定性的变化,直接影响土壤结构^[13]。当流水侵蚀土壤时,破坏土壤结构,使大团聚体破碎,变成小团聚体^[22]。因此,较高比例的大团聚体代表较低的土壤可蚀性。土壤团聚体的稳定性需通过 MWD 和 GMD 来反映。由图 6 可知,在地表侵蚀过程中,MWD、GMD 随侵蚀过程的变化

而降低,地下侵蚀过程中,MWD、GMD 随侵蚀过程变化和土层深度的增加而逐渐降低,CSEI 逐渐上升,与赵毅洋等^[36]研究结论一致。

云南松次生林的 MWD 和 GMD 要高于小铁仔灌丛裂隙,首先,云南松次生林为群落演替的后期,小铁仔灌丛为早期,其生物量多于小铁仔灌丛,枯落物总蓄积量为小铁仔灌丛的 2.15 倍;总根系生物量约是小铁仔灌丛根系生物量的 5 倍^[28],使得其大团聚体含量高于小铁仔灌丛裂隙,且结构更为稳定。其次,云南松为深根系植被,根系粗壮且发达,根系的“网固”作用为土壤提供额外的抗侵蚀能力,有利于减少裂隙土壤漏失。

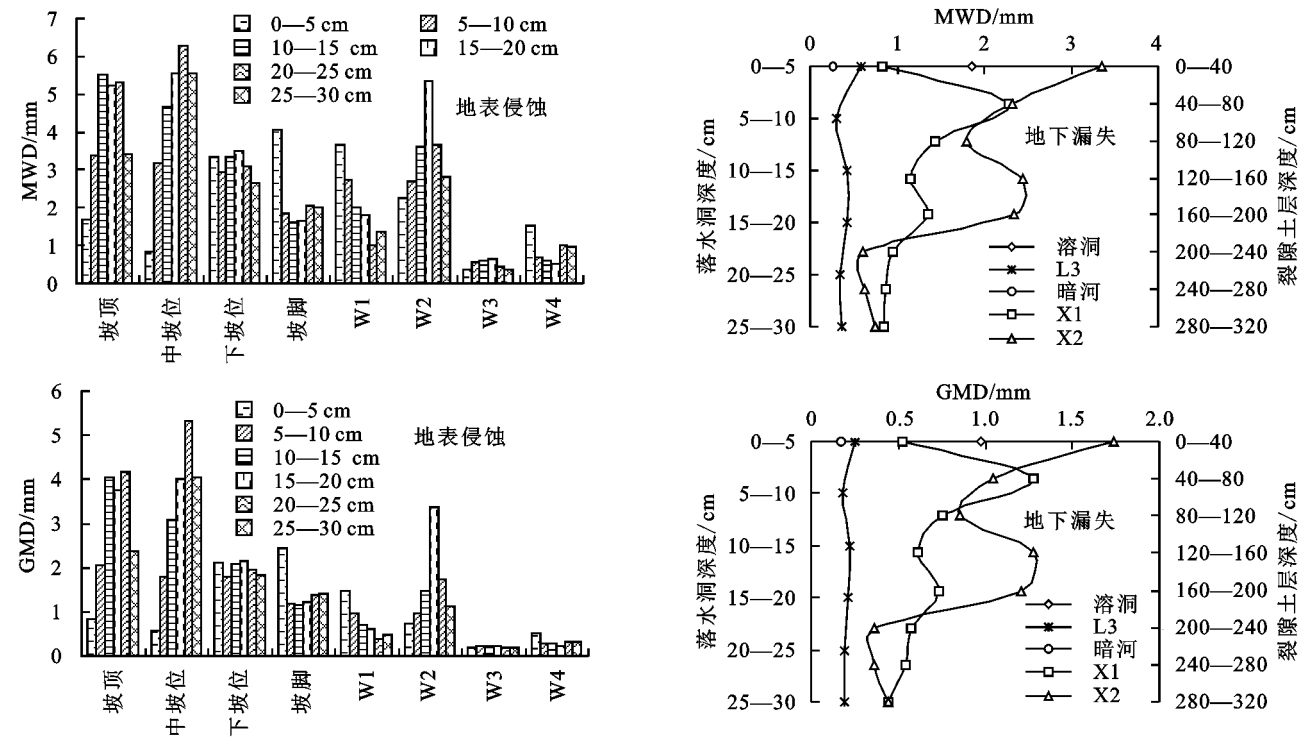


图 6 不同侵蚀场土壤 MWD、GMD 变化

3.2.2 土壤养分对土壤可蚀性的影响 海峰岩溶断陷盆地中,CSEI 随 SOC 增加而减少,与陈英等^[15]的研究结论一致。首先,SOC 是土壤团聚体形成的胶结剂^[22],能促进土壤团聚体的形成,增强土壤结构稳定性^[24]。坡地土壤 SOC 含量高,使其形成大量土壤团聚体,土壤结构稳定,CSEI 较低。其次,SOC 能随土—岩界面、根—土界面下渗,或是随根—土界面的土壤水优先流下移,促进植被根系的发育,加固土壤,降低深层土壤可蚀性^[25]。在裂隙中,SOC 沿着裂隙的土—岩界面和根—土界面向下漏失,增加深层土壤 SOC 含量,为根系的生长提供了必要的养分,有利于裂隙植被根系的发育,减少裂隙土壤的漏失。云南松群落为深根系植被,小铁仔灌丛为浅根系植被^[28]。因此,云南松群落的深根系能伸入更深层土壤,为其提供 SOC,改善

土壤结构;还能利用根系的网固作用,增强其结构的稳定性。云南松次生林对降低裂隙土壤的可蚀性性能要优于小铁仔灌丛,尤其是在中、深层裂隙土壤。

3.3 植被—土壤的协同恢复效应

SSSI 的主要影响因素是 SOC,不仅与土壤结构有关,还与土壤养分有关,综合性地描述了土壤的稳定性。其随侵蚀过程的变化和土层深度的增加而降低,SSSI 逐渐下降(图 7),土壤侵蚀敏感性逐渐增强,与 Dong 等^[21]研究结论一致。坡地有相对较高的 SSSI,表明了该地区较好土壤稳定性。这一特征得益于坡地较好的植被覆盖度,植被通过枯落物、根系输入养分,改善土壤结构,增强土壤稳定性,减少土壤的侵蚀^[37]。因此,植被恢复通过改变植被和土壤特性来改善土壤结构,降低土壤可蚀性。

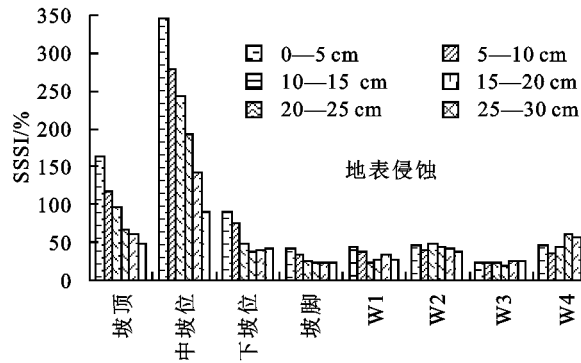
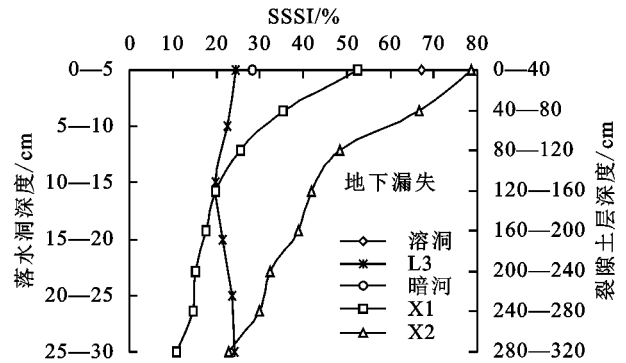


图 7 不同侵蚀场土壤 SSSI 变化



海峰岩溶盆地的土壤侵蚀与土壤和植被密切相关。对洼地—小铁仔灌丛裂隙—云南松次生林裂隙 3 个侵蚀场进行分析,这 3 个侵蚀场是植被群落的演替过程。随着植被的恢复, >0.25 mm 水稳性团聚体含量、SOC、MWD、GMD、SSSI 呈上升趋势,CSEI 逐渐下降,土壤结构稳定性逐渐上升。因此,植被恢复改善了土壤结构,而良好的土壤结构为植被的生长恢复提供了优越的生存条件^[12]。在此过程中首先是土壤结构得到改善,土壤孔隙增大,土壤含水量与空气含量增多,促进土壤与外界环境之间的物质循环,进而增加土壤养分含量,使土壤微生物数量增加,物质分解循环能力增强^[22,27],土壤质地不断提升,促进植被群落的生长变化,植被覆盖度增大。二者之间表现为相互促进效应,而这双向作用,不管是土壤结构的改善,还是植被的恢复,都有利于降低土壤可蚀性,减少土壤侵蚀。因此,在此后的治理中要关注植被—土壤的协同恢复效应,促进岩溶区生态系统的恢复,以减少土壤侵蚀。

4 结论

(1) CSEI 的评价方法适用于岩溶断陷盆地地表、地下侵蚀过程土壤可蚀性的评价,岩溶断陷盆地中,CSEI 整体呈现中坡位 $<$ 坡顶 $<$ 下坡位 $<$ 云南松次生林裂隙 $<$ 溶洞 $<$ 坡脚 $<$ 小铁仔灌丛裂隙 $<$ 洼地 $<$ 落水洞 $<$ 暗河。暗河 CSEI 最大,中坡位 CSEI 最低;落水洞、洼地、暗河是土壤侵蚀治理的关键。地表侵蚀过程 CSEI 表现为中坡位 $<$ 坡顶 $<$ 下坡位 $<$ 坡脚 $<$ 洼地表现为地下漏失过程 CSEI:云南松次生林裂隙 $<$ 溶洞 $<$ 小铁仔灌丛裂隙 $<$ 落水洞 $<$ 暗河;CSEI_{地表} $<$ CSEI_{地下},地表、地下侵蚀过程是持续进行的,地下土壤受二次侵蚀的影响,随侵蚀过程的进行,其 CSEI 越来越大。

(2) 土壤理化性质是影响 CSEI 的关键性因素,CSEI 与黏粒、砂粒、 >0.25 mm 水稳性团聚体、SOC、MWD、GMD 呈极显著负相关,与粉砂、 <0.25 mm 水稳性团聚体呈极显著正相关,CSEI 的主要影响因素是

SOC、水稳性团聚体的稳定性。黏粒、砂粒、SOC、团聚体含量对地表侵蚀过程 CSEI 影响较大,粉砂、团聚体稳定性对地下漏失过程 CSEI 影响较大。

(3) 植被—土壤的协同恢复能增强土壤抗侵蚀能力,减少土壤侵蚀。云南松次生林裂隙土壤生物量、SOC、大团聚体、SSSI 比重高于小铁仔灌丛裂隙,且其为深根系植被。云南松次生林对降低裂隙土壤的可蚀性性能优于小铁仔灌丛,尤其是在中、深层裂隙土壤。

参考文献:

- [1] 周念清,李彩霞,江思珉,等.普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究[J].水土保持通报,2009,29(1):7-11.
- [2] 张信宝,焦菊贺,贺秀斌,等.允许土壤流失量与合理土壤流失量[J].中国水土保持科学,2007,5(2):114-116.
- [3] 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等.中国西南岩溶区土壤允许流失量及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):40-45.
- [4] Wei X P, Yan Y E, Xie D T, et al. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(8):e721.
- [5] 张信宝,王世杰,曹建华,等.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].中国岩溶,2010,29(3):274-279.
- [6] 冯腾,陈洪松,张伟,等.桂西北喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs 的剖面分布特征及其指示意义[J].应用生态学报,2011,22(3):593-599.
- [7] 魏兴萍,谢德体,倪九派,等.重庆岩溶槽谷区山坡土壤的漏失研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(3):462-473.
- [8] Zhou J, Tang Y Q, Yang P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits I. Conceptual model [J]. Natural Hazards, 2012, 62(3): 1191-1215.
- [9] Zhang X B, Bai X Y, He X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China [J]. Carbonates and Evaporites, 2011, 26(2): 149-153.
- [10] 林芳,朱兆龙,曾全超,等.延河流域 3 种土壤可蚀性 K 值估算方法比较[J].土壤学报,2017,54(5):1136-1146.

- [11] Saygin S D, Huang C H, Flanagan D C, et al. Process-based soil erodibility estimation for empirical water erosion models [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2018, 56(2): 181-195.
- [12] 刘宽梅, 周秋文. 典型喀斯特森林土壤的抗蚀性[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 568-577.
- [13] 刘鹏, 蒋忠诚, 李衍青, 等. 岩溶断陷盆地高原面洼地不同坡位土壤抗蚀性研究[J]. *地球学报*, 2021, 42(3): 373-381.
- [14] 鲍恩侯, 熊康宁, 刘子琦, 等. 喀斯特不同侵蚀场地土壤颗粒分布及可蚀性特征[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 156-163.
- [15] 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.
- [16] 孙德亮, 赵卫权, 李威, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究: 以贵州省为例[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 271-276, 283.
- [17] Xu Y Q, Luo D, Peng J. Land use change and soil erosion in the Maotiao River watershed of Guizhou Province [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 1138-1152.
- [18] 赵海兵, 安裕伦, 夏品华, 等. 基于 GIS 的喀斯特流域土壤侵蚀模数估算: 以贵阳麦西河流域为例[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 99-103, 295.
- [19] 刘丽, 梁虹, 焦树林, 等. 基于 GIS 的喀斯特流域土壤侵蚀敏感性研究: 以贵州省三岔河流域为例[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 33(2): 12-17.
- [20] 李冕, 郭菁, 杨世凡, 等. 贵州省不同类型石漠化的 K 值特征初步研究: 以石漠化治理工程典型小流域为例[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(29): 55-60.
- [21] Dong L B, Li J W, Zhang Y, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 302(a): e113985.
- [22] 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.
- [23] Guo M M, Chen Z X, Wang W L, et al. Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: e145540.
- [24] Walia M K, Dick W A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influenced by gypsum, crop residue, and glucose [J]. *Geoderma*, 2018, 320: 67-73.
- [25] Li W B, Jin C J, Guan D X, et al. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: A meta-analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 112-118.
- [26] 张海东, 于东升, 董林林, 等. 侵蚀红壤恢复区植被垂直结构对土壤恢复特征的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(6): 1142-1148.
- [27] Lu M, Zhou X H, Luo Y Q, et al. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1): 234-244.
- [28] 何停, 范弢, 徐宗恒, 等. 滇东石漠化坡地浅层裂隙漏失土壤的抗剪强度及其影响因素[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 31-39, 49.
- [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.
- [30] 曹建华, 邓艳, 杨慧. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7103-7108.
- [31] 孙涛, 刘艺杉, 孙崇玉, 等. 石灰岩山地植被恢复对土壤水稳性团聚体的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(6): 1361-1367.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
- [33] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 等. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究: 以贵州普定县陈旗小流域为例[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(2): 121-127.
- [34] Yang P, Tang Y Q, Zhou N Q, et al. Characteristics of red clay creep in karst caves and loss leakage of soil in the karst rocky desertification area of Puding County, Guizhou, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63: 543-549.
- [35] 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.
- [36] 赵洋毅, 周运超, 段旭, 等. 黔中喀斯特地区不同植被土壤抗蚀性研究[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(5): 633-636.
- [37] Zheng J Y, Zhao J S, Shi Z H, et al. Soil aggregates are key factors that regulate erosion-related carbon loss in citrus orchards of southern China: Bare land vs. grass-covered land [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 309: e107254.