

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

陈进豪, 范弢, 户红红

(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, 云南昆明 650500)

摘要: [目的] 探讨滇东海峰自然保护区岩溶盆地内小生境裂隙土壤异质性特征, 为该区水土流失的治理提供科学支持。[方法] 通过野外取样结合比重计法、团聚体湿筛法等方法, 分析海峰石漠化坡地不同小生境裂隙土壤机械组成、水稳性团聚体和有机碳随深度的变化特征。[结果] ①地表小生境和地下裂隙在空间上具有一定的关联, 结合小生境类型和裂隙形态初步将采样裂隙分类命名为土面漏斗、石沟裂隙和石坑小生境。②土面漏斗、石沟裂隙和石坑小生境由于裂隙形态、小生境类型以及有无根系等因素导致土壤性质存在异质性。石坑小生境砂粒含量显著高于土面漏斗和石沟裂隙($p < 0.05$), 粉砂粒含量显著低于石沟裂隙, 表层有机碳含量显著低于石沟裂隙($p < 0.05$); 土面漏斗砂粒含量显著高于石沟裂隙, 粉砂粒含量显著低于石沟裂隙, 表层有机碳含量显著低于石沟裂隙。③土面漏斗、石沟裂隙和石坑小生境的土壤稳定性随土层深度的增加逐渐变差, 为土壤的漏失提供便利。深根系植被介入裂隙—土壤系统, 改善土壤性质, 增强土壤抗侵蚀能力。[结论] 海峰岩溶盆地小生境裂隙土壤性质存在异质性, 应加强对小生境的保护和利用, 种植深根系植被, 改善土壤理化性质, 增强土壤抗侵蚀能力。

关键词: 喀斯特坡地; 土壤漏失; 裂隙; 机械组成; 团聚体; 有机碳

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0033-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.006; Chen Jinhao, Fan Tao, Hu Honghong. 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.

Change Characteristics of Soil Mechanical Composition and Organic Carbon in Rocky Desertification Sloping Land in Haifeng Karst Basin in Eastern Yunnan Province

Chen Jinhao, Fan Tao, Hu Honghong

(Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and

Environment Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study was to explore the heterogeneity characteristics of the niche fissure soil in the Haifeng karst basin. The purpose was to provide scientific support for the control of Haifeng natural reserve soil erosion at the study area. [Methods] Through field sampling combined with a hydrometer method and aggregate wet sieve method, the soil mechanical composition, water-stable aggregates, and organic carbon of different niche fissures in the rocky desertification sloping land were analyzed. [Results] ① The surface niche and the underground fissure had a certain spatial correlation. Based on the niche type and fissure shape, the sampling fissures were initially classified as soil funnel, stone ditch fissure, and stone pit niche. ② Soil surface funnel, stone ditch fissure, and stone pit niche were heterogeneous because of such factors as fissure shape, niche type, and presence or absence of a root system. The content of sand particles in the stone pit niche was significantly higher than that of the soil surface funnel and stone ditch fissure ($p < 0.05$),

收稿日期: 2020-04-02

修回日期: 2020-06-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“滇东岩溶高原云南松水源林产水功能恢复机理研究”(41661004)

第一作者: 陈进豪(1994—), 男(汉族), 河南省唐河县人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特环境与水资源。Email: cjh131518@163.com。

通讯作者: 范弢(1969—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事喀斯特生态水文研究。Email: fantaojx@163.com。

and the content of silt grains was significantly lower than that in the stone ditch fissure. The surface organic carbon content was significantly lower than that of the stone ditch fissure ($p < 0.05$). The sand content of the funnel was significantly higher than that of the stone ditch fissure, the silt content was significantly lower than that of the stone ditch fissure, and the surface organic carbon content was significantly lower than that of the stone ditch fissure. ③ The soil stability of the soil surface funnel, stone ditch fissure, and stone pit niche gradually deteriorated with the increase of the soil layer depth, which was convenient for soil loss. Deep root vegetation intervened in the fissure soil system to improve the soil properties and enhance the resistance to soil erosion. [Conclusion] The nature of the niche fissure soil in the Haifeng karst basin is heterogeneous. The protection and utilization of the niche should be strengthened, and deep root vegetation should be planted to improve the physical and chemical properties of the soil and enhance soil erosion resistance.

Keywords: karst sloping land; leakage of underground soil; fissure; mechanical composition; aggregates; organic carbon

喀斯特地区由于强烈的岩溶作用,地表破碎,大面积基岩出露,地表形态起伏多变,发育有多样的石沟、石坑、土面等小生境类型,这些小生境由于其形状、面积不一、土壤厚度不同,受纳水分、热量等环境因子的差异,导致其土壤的颗粒组成、团聚体、有机碳等存在明显的空间异质性^[1-3];廖洪凯等^[2]在研究喀斯特地区不同小生境有机碳的空间异质性时发现石沟小生境、石坑小生境有机碳保持在较高的含量,在研究不同小生境对喀斯特地区有机碳的影响时发现有机碳促进大颗粒团聚体的形成^[4]。

喀斯特岩层由于具有特殊的裂隙、管道和地下洞穴系统,导致地表地下形成相互联系统一的整体。诸多小生境往往底部与裂隙连通,裂隙上覆土壤由于蠕滑、错落等重力侵蚀方式发生垂直迁移^[5],造成小生境内土壤的沉陷与漏失。小生境裂隙内土壤质量的好坏影响土壤漏失的发生^[6];由于漏失的发生存在于地下,具有隐蔽性,无法直接观测,因此大部分采用一些指标的变化来进行相关研究;魏兴萍等^[7]利用¹³⁷Cs的垂直变化特征说明了岩溶槽谷区存在土壤漏失,并且发现有机质在剖面的垂直变化特征可以反映土壤漏失运动的规律;雷俐等^[8]研究粤北山地土壤垂直渗漏时发现,漏失通道的形状、大小、发育成度,植被类型,降雨等因素都会影响土壤的渗漏,但土壤总体下渗趋势无法改变;杨宇琼等^[9]在研究浅层裂隙土壤机械组成对降雨的响应时发现降雨过程中浅层裂隙土壤颗粒发生迁移;唐益群等^[10]发现土壤团聚体的稳定性影响土壤的渗漏,当土壤团聚体稳定性较差时,土壤易崩解成细小颗粒,为土壤的漏失提供的有利条件。

滇东岩溶盆地属西南喀斯特片区典型的生态脆弱区,石漠化问题严重,盆地内缺水严重,周边山地与坡地喀斯特发育程度高,地下裂隙纵横,地表高程起伏侵蚀溶蚀作用强烈,发育多种类型小生境,水源漏失,地下水深埋,山地与坡地是石漠化发生的主要地点,特殊的盆—山—一体构造限制了当地的植被恢复与生

态经济发展^[11-12]。为此本文通过研究滇东海峰岩溶盆地小生境裂隙内土壤机械组成、有机碳、水稳性团聚体的变化特征,探讨滇东海峰岩溶盆地内小生境异质性特征以及与土壤漏失的关联,以期海峰水土流失的治理提供一些科学支持。

1 研究区概况与研究方法

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(103°29′—103°39′E, 25°35′—25°57′N),属断陷盆地构造。该地区主要岩石地层为二叠纪中期的茅口组和栖霞组灰岩,在地壳抬升和地下水溶蚀或侵蚀的作用下,该地区地表形成了石芽、溶沟、溶丘、溶斗、溶蚀洼地、峰丛、峰林、孤峰等独特地貌,地下形成落水洞、竖井、地下河、地下溶洞等地貌形态。该保护区主要植被类型为湿润常绿阔叶林、半湿润常绿阔叶林、硬叶常绿阔叶林、落叶阔叶林、暖温性针叶林、灌丛、沼泽和水生植被。区内主要土壤类型为红壤。该区属于亚热带高原季风气候类型,干湿季分明,全年平均气温 13.8~14 °C,年降水量 1 073~1 089.7 mm 左右,雨季降雨量占年降水量的 87.3%。

采样点位于岩竹小海子大研公路旁的一处因修路而挖开的剖面(103°47′E, 25°36′N)和兰石坡海子犀牛塘落水洞底部的地下暗河(103°36′E, 25°45′N),挖开剖面所处坡地发育有土面小生境、石沟小生境、石坑小生境,植被是以小铁仔(*Myrsine africana*)、清香木(*Pistacia weinmanni folia*)为主的灌丛,土壤为红壤,表层疏松,下层紧实;采样剖面上存在 3 种裂隙,且处于同一坡位,相距较近,填充土壤一般都是地表土壤流失沉积,形成具有同期性;小生境底部与裂隙相连,使地表地下形成统一有序的多层生态空间结构。3 种裂隙中,1 号裂隙,剖面上形状为漏斗形,地表属于土面小生境,结合小生境类型和裂隙形态,将其命名为土面漏斗,土面漏斗上部宽 190 cm,中部宽

60 cm,下部宽 40 cm,土面漏斗剖面出露总体长为 295 cm。2 号裂隙,剖面上形状为狭长形,地表属于石沟小生境,将其命名为石沟裂隙,石沟裂隙上部宽 40 cm,中部较窄处为 15 cm,中下部弯曲部分宽 21 cm,下部宽为 11 cm,石沟裂隙剖面出露总体长为 345 cm。3 号剖面深度较浅,地表属石坑小生境,将其直接命名为石坑,石坑深度约 124 cm 左右,宽 180 cm 左右,底部为基岩。兰石坡海子犀牛塘落水洞为几个落水洞群组成,最大的落水洞底部,存在一条地下暗河。

1.2 样品采集

土壤样品为 2019 年 5 月采集,每隔 20 cm 为一层,用小铲刀采集。共采集土面漏斗样品 15 个,石沟裂隙样品 15 个,土面石坑样品 6 个,另外采集地下暗河土壤样品一个。将土样装入自封袋中带回实验室,自然风干后,将土样中的植物落叶、残根、砾石、动物残体等挑出,一部分研磨成 2 mm 与 1 mm 土壤,用于裂隙土壤的机械组成试验与有机碳检测。一部分将土样中土块较大的按其自然破碎面轻轻掰开成直径 1 cm 左右的小土块,用于进行裂隙土样的团聚体检测。

1.3 样品测试

土壤的机械组成试验步骤按照 GB7845-87 中比重计法的要求进行试验,并将土壤颗粒分为黏粒(<0.002 mm)、粉砂粒(0.05~0.002 mm)、砂粒(2~0.05 mm)。土壤团聚体采用湿筛的方法进行,并将其分为 >5 mm,5~2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm 以及 <0.25 mm,共 6 个粒级。有机碳采用《土壤农化分析》^[13] 中重铬酸钾容量法进行检测。

1.4 数据处理

(1) 土壤团聚体几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)计算公式^[14]

$$\text{GMD} = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right] \quad (1)$$

式中: \bar{x}_i 为第 i 级团聚体的平均直径; ω_i 为第 i 级团聚体质量百分含量。

(2) 土壤团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)计算公式^[15]。

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2)$$

式中: \bar{x}_i 为第 i 级团聚体的平均直径; ω_i 为第 i 级团聚体质量百分含量。

数据的分析采用 Excel 2013, SPSS 21.0 进行数据统计、差异性分析以及图表的制作。

2 结果与分析

2.1 不同小生境裂隙的机械组成变化

土面漏斗、石沟裂隙与石坑各小生境的土壤机械组成见图 1。土面漏斗土壤机械组成砂粒(2~0.05 mm)含量在 53.63%~61.26%之间,粉砂粒(0.05~0.002 mm)含量在 7.12%~19.34%之间,黏粒(<0.002)含量在 24.41%~39.08%。根据土壤性质的变异系数对变异程度进行分类^[16]:变异系数<15% 时为小变异,在 16%~35%之间的为中等变异,>35%的为高等变异。而土面漏斗黏粒总体变异系数为 12.77%,属小变异,砂粒变异系数为 4.15%,属于小变异,粉砂粒变异系数为 24.25%,属中等变异。总体来看,砂粒变异程度最小,粉砂粒变异程度最大。不同层次来看,在 0—40 cm,黏粒、粉砂粒、砂粒均出现较大波动,在 40~300 cm,黏粒呈减少趋势,变化较为稳定,变异系数为 7.13%,属于小变异。而在 0—200 cm 范围内,砂粒含量随深度的增加,时增时降,表现出无规律性,其变异系数为 4.64%,尽管仍属于小变异,但大于总体变异系数(4.64%>4.15%)。粉砂粒含量也表现出随深度的增加忽增忽减,规律性不明显。

石沟裂隙土壤机械组成表现为砂粒含量在 51.72%~58.22%之间,粉砂粒含量在 14.40%~21.66%之间,黏粒含量在 23.92%~32.19%之间。砂粒的总体变异系数为 3.8%,属于小变异,黏粒的变异系数为 7.24%,属于小变异,粉砂粒的变异系数为 12.7%,属于小变异。整体来看,石沟裂隙的颗粒组成随深度的变化,变异程度均较小,较为稳定。不同层次来看,在 0—80 cm 处,砂粒呈减少趋势,变异系数为 2.03%,粉砂粒呈减少趋势,变异系数为 2.84%,黏粒呈增加趋势,变异系数为 4.82%。从变异系数来看,3 种粒级均属于小变异,变异程度不大。从 3 种粒级随深度的变化情况来看,地表颗粒粗化,与土面漏斗一致。在 80—160 cm 范围内,砂粒呈先增加后持续减少的趋势,黏粒呈减少趋势,粉砂粒呈增加趋势。且黏粒变异系数为 8.9%,砂粒变异系数为 3.29%,粉砂粒变异系数为 14.72%,尽管仍属于小变异,但粉砂粒和黏粒变异幅度增大,砂粒变异幅度与整体相比仍较小,但与 0—80 cm 相比,变异幅度增大。在 160—300 cm 范围内,黏粒含量呈先增加后减小趋势,砂粒含量波动较大,整体呈增加趋势,粉砂粒呈先减小再增加趋势。

石坑机械组成表现为砂粒含量为 60.04%~62.09%,粉砂粒含量为 6.67%~16.94%,黏粒含量为 22.44%~32.9%。总体来看,砂粒含量呈减少趋势,黏粒呈减少趋势,粉砂粒呈增加趋势。并且砂粒

总体变异系数为 1.07%，粉砂粒变异系数为 6.09%，黏粒变异系数为 14.37%。3 种粒级都属于小变异，

但砂粒变异程度最小，说明砂粒随深度的变化最稳定，黏粒含量波动较大，变异程度高。

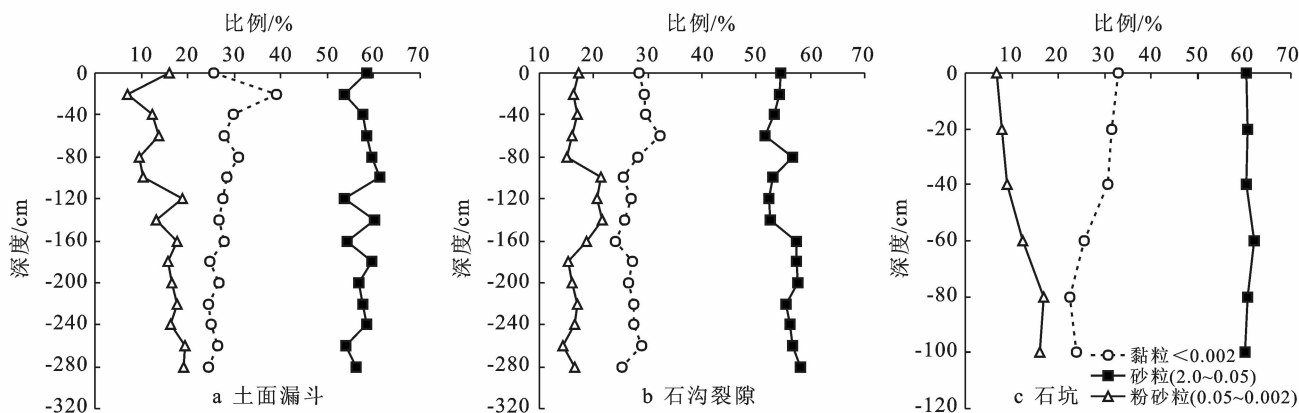
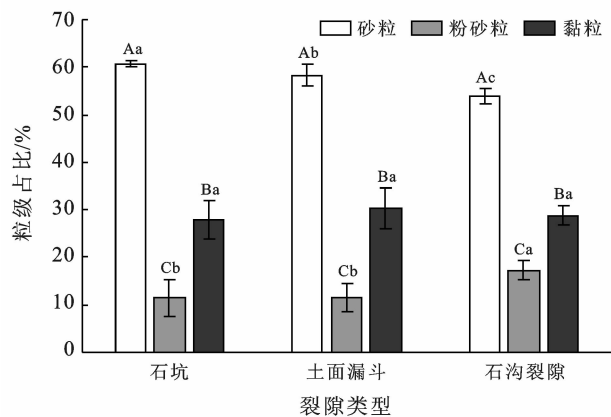


图1 土面漏斗、石沟裂隙、石坑小生境的机械组成

对土面漏斗、石沟裂隙与石坑的土壤粒级进行差异性分析。同一小生境，砂粒，粉砂粒和黏粒之间存在显著差异 ($p < 0.05$)。不同小生境，土面漏斗的砂粒与石坑、石沟裂隙均存在显著差异，黏粒差异不显著 ($p > 0.05$)，并且土面漏斗的粉砂粒与石坑粉砂粒不存在显著差异，与石沟裂隙的粉砂粒存在显著差异 (见图 2)。



注：不同大写字母表示同一样地不同粒级间差异显著 ($p < 0.05$)；不同小写字母表示同一粒级不同样地间差异显著。

图2 土面漏斗、石沟裂隙和石坑粒级占比及差异性

2.2 不同小生境裂隙的有机碳的变化

研究区有机碳含量分布见图 3。土面漏斗有机碳在 3.05~12.58 g/kg 之间，石沟裂隙有机碳在 6.73~30.65 g/kg 之间，石坑有机碳在 6.15~10.21 g/kg 之间。土面漏斗与石沟裂隙均存在地表有机碳汇聚现象。即地表有机碳含量高，地下有机碳含量较低。但石坑土壤有机碳并未遵循该特性。表现为地表表层含量小，底部含量大的特点。差异性分析发现土面漏斗在地表 0—120 cm 范围内与石坑的有机碳差异不显

著 ($p > 0.05$)，与石沟裂隙存在显著差异 ($p < 0.05$)。

2.3 不同小生境裂隙的水稳性团聚体的变化

团聚体的水稳性通常采用湿筛所得的 > 5 mm 和 > 0.25 mm 团聚体质量百分数所谓水稳性评价指标。研究表明^[17]， > 0.25 mm 的土壤水稳性团聚体是土壤中最 好的结构体，通常被称作土壤团粒结构体，其数量往往反应土壤的稳定性。

土面漏斗、石沟裂隙和石坑小生境的水稳性团聚体见图 4。土面漏斗土壤湿筛所得 > 5 mm 团聚体质量百分数在 0.14%~26.71%， > 0.25 mm 团聚体质量百分数在 60.02%~83.78%。石沟裂隙土壤湿筛所得 > 5 mm 团聚体质量百分数在 0.02%~9.48%， > 0.25 mm 团聚体质量百分数在 64.37%~85.94%。石坑土壤湿筛所得 > 5 mm 团聚体质量百分数在 7.14%~24% 之间， > 0.25 mm 团聚体质量百分数在 75.23%~83.19%。总体来看，土面漏斗、石沟裂隙和石坑其水稳性随深度的增加都出现逐渐减少趋势。表现为大颗粒团聚体随深度逐渐减少，细颗粒逐渐增多。

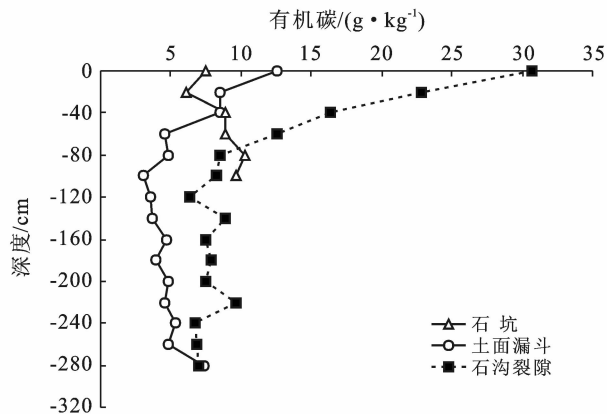


图3 土面漏斗、石沟裂隙、石坑有机碳含量分布

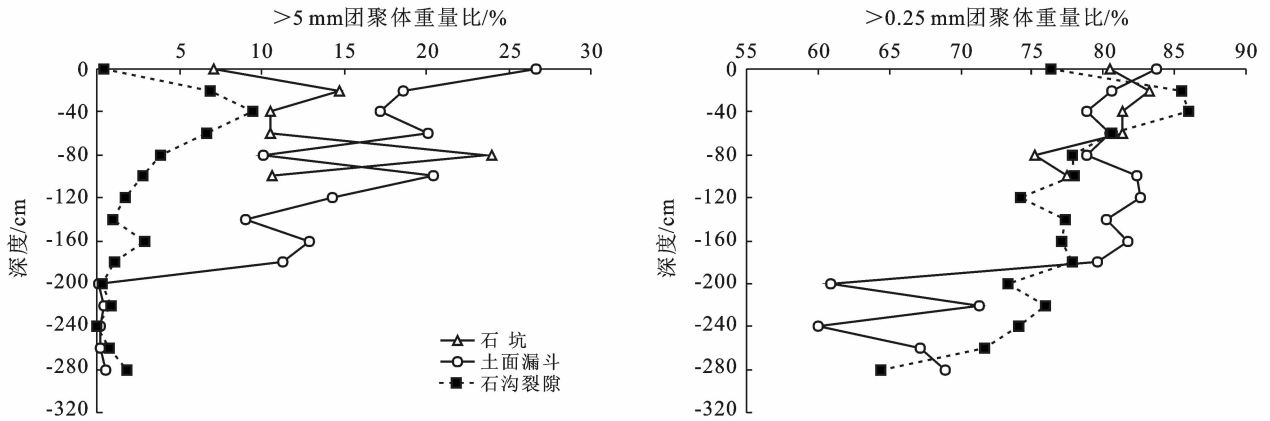


图4 土面漏斗、石沟裂隙、石坑 $>5\text{ mm}$ 和 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体重量比分布

$>5\text{ mm}$ 和 $>0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体含量在一定程度上体现了土壤的水稳性特征,但仍存在一定的问题。通常采用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),来说明土壤团聚体的稳定状况,数值越大,土壤水稳性越好^[17]。土面漏斗、石沟裂隙和石坑的MWD和GMD见图5,土面漏斗MWD在 $0.6\sim 3.3\text{ mm}$ 之间,GMD在 $0.36\sim 1.74\text{ mm}$ 之间,MWD与GMD变化趋势相似,都呈现随深度的增加逐渐减

小趋势。石沟裂隙MWD在 $0.82\sim 2.28\text{ mm}$ 之间,GMD在 $0.44\sim 1.28\text{ mm}$ 之间,MWD与GMD都随深度的增加逐渐减小。石坑MWD在 $1.87\sim 2.89\text{ mm}$ 之间,GMD在 $0.86\sim 1.31\text{ mm}$ 之间。总体来看土面漏斗、石沟裂隙和石坑的MWD与GMD都随深度的增加,呈减小趋势,与 $>5\text{ mm}$ 和 $>0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体含量所得结果一致。说明土壤团聚体稳定性随深度的增加呈逐渐减少趋势。

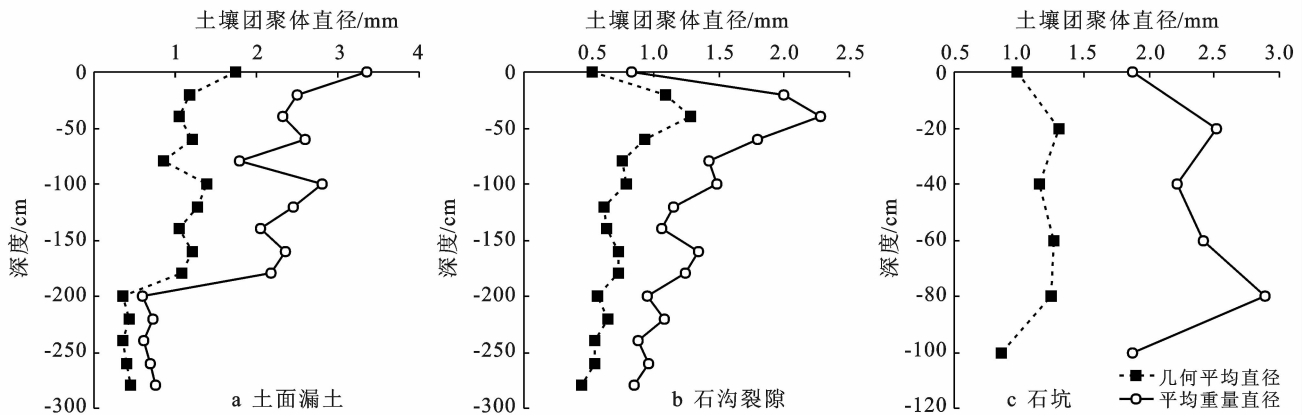


图5 土面漏斗、石沟裂隙与石坑几何平均直径和平均重量直径

3 讨论

3.1 不同小生境土壤的空间异质性

3.1.1 不同小生境土壤机械组成的差异 通过数据分析发现,3种小生境的土壤机械组成变化特征存在差异。土面漏斗在 $0\sim 40\text{ cm}$ 的表层,砂粒含量逐渐减少,粉砂粒含量逐渐减少,黏粒含量逐渐增大,这与雷俐等^[8]人的研究一致,细颗粒物渗漏或流失,导致粗颗粒物滞留,表现出地表粗颗粒化趋势^[10]。在 280 cm 处,土面漏斗与岩层层面有一定的接触,比较岩层层面的土壤(黏粒 27.22% ,砂粒 53.18% ,粉砂粒 19.61%)与土面漏斗 280 cm 处土壤(黏粒 25.56% ,砂粒 54.10% ,

粉砂粒 19.34%)的颗粒组成,发现二者具有相似性,推测岩层面对土面漏斗有一定的补给作用。总体来看土面漏斗土壤粒径变化随深度的增加,时增时减,表现出无规律性,这与杨宇琼等^[9]的研究结果一致。

石沟裂隙呈现出分段式的规律性,即在某段范围内土壤颗粒随深度呈现出规律性。这与石沟裂隙存在一条自上而下贯穿裂隙的粗根有关。王大力等^[18]人在研究植物根孔时发现植物根系(包括植物的地下根状茎)在生长过程中以及根系死亡后土壤中易形成孔道,土壤水分和溶质易沿这些通道优先流失。而土壤的细颗粒也易沿这些通道,随水流流失。而且在土

面漏斗与石沟裂隙底部,黏粒含量均出现减少,推测底部仍存在细小的裂隙,细粒径土壤仍向深部继续渗漏^[8]。

石坑土壤堆积属于整体填充,各层土壤起始的粒级差异不大,但由于存在细小裂隙,砂粒由于粒径较大,垂直渗漏不明显,而粉砂粒和黏粒由于粒径较小发生渗漏,但裂隙可能越往下越细小,导致粉砂粒每层沉积一小部分,而黏粒则继续向下渗漏,出现粉砂粒逐渐增大,黏粒逐渐减少的趋势,而由于石坑底部不发生渗漏,在石坑底部 100—120 cm 范围内,黏粒沉积,含量增加,粉砂粒在渗漏过程中,每层沉积,导致最底部沉积时,粉砂粒含量增加并不明显。本次采样还发现海峰湿地的落水洞底部存在一条地下暗河。地下暗河土壤砂粒、粉砂粒含量较高,黏粒含量较低(黏粒 17.03%,砂粒 55.48%,粉砂粒 27.49%)。这与唐益群等^[10]人所得溶洞中土壤颗粒以黏粒为主的结果不一致,与曹建华等^[19]人的研究结果一致。这说明土壤的地下漏失主要以地表土壤随地表径流流入低洼的落水洞、竖井等地下通道,坡地的裂隙主要起存储土壤作用,进入地下通道的量很少。因此要减缓当地的水土流失,落水洞是治理的关键。

3.1.2 小生境裂隙土壤有机碳的差异 有机碳含量在土面漏斗与石沟裂隙中呈现出表聚现象。这与魏兴萍等^[7]研究所得结论一致,即岩溶区土壤有机碳仍遵循土壤的表聚特性。石坑底部有机碳含量高,与罗海波等^[3],刘方等^[1]所研究的一致。因为石坑形成初期与石沟裂隙一样具有汇聚作用,有机碳等养分汇聚于底部,随着石坑内土壤逐渐增多,汇聚作用逐渐减小,当石坑内土壤与周边土壤等高时,由于其面积较小,表层植被少,土壤侵蚀加水土流失,导致地表形成的有机碳被地表径流冲走。因而石坑地表有机碳含量较低,底部含量较大。石沟裂隙表层有机碳含量显著高于土面漏斗和石坑。这与廖洪凯等^[20]人的研究结果一致。这是因为石沟裂隙具有汇聚水分、养分的功能,且地表的枯枝落叶可能会随水流汇聚到石沟裂隙中,大量的枯枝落叶经过生物的分解转化为腐殖质。因而表层有机碳要高于石坑与土面漏斗。

总体来说,小生境裂隙由于地表小生境的差异,导致地表植被覆盖度,枯落物的汇聚、水分的接收、吸纳、蒸发等存在较大的差异^[1],再加上裂隙的形状、裂隙内根系的发育、有无边缘土壤补给以及裂隙是否贯通地下空间等因素,导致小生境裂隙内土壤性质存在异质性。

3.2 小生境裂隙土壤稳定性对土壤漏失的影响

滇东海峰地区属岩溶断陷盆地构造,地下裂隙纵

横,地表石牙出露,小生境类型复杂多样。由于岩溶区成土缓慢,土层浅薄,土体不连续,土壤多集中于小生境内;小生境内土壤的好坏很大程度上影响了滇东岩溶盆地植被的恢复与水土流失的治理。土壤团聚体是土壤结构的基本单位^[21],其构成比例以及稳定性的变化,直接影响土壤结构的好坏。本次研究结果发现土面漏斗、石沟裂隙内填充土壤 $> 5 \text{ mm}$ 和 $> 0.25 \text{ mm}$ 的团聚体以及 MWD 与 GMD 均随深度的增加呈逐渐减少趋势,这说明土壤的稳定性随深度的增加在逐渐减小。小生境裂隙底部土壤稳定性差,经雨水的浸润,土壤易崩解成更细小的颗粒,在底部存在管道联通的状况下,继续向土层深处渗漏,最终漏失堆积于地下空间内(溶洞或暗河)。有机碳的胶结作用有助于土壤大颗粒团聚体的形成与稳定性能的增强,团聚体则吸附、包被有机碳,降低有机碳的分解速率,起到保护有机碳的作用^[22-23],两者具有一定耦合关系。本次发现虽然有机碳和土壤团聚体之间不存在显著相关关系,但二者的整体变化趋势一致,都随土层深度的增加呈逐渐减小趋势,这也是解释水稳性团聚体为什么随土层深度的增加而稳定性降低的原因之一。

植物措施是巩固土壤,增强土壤有机碳含量,减少水土流失的有效措施^[24]。对于小生境应该合理保护和利用,选取合适的植被种类,种植深根系落叶植被,促进土壤的有机碳含量的增加,有助于大颗粒团聚体的形成;发挥植被根系的锚固和加筋作用^[25-26],促使土壤和根系形成“根—土复合体”^[24],增强土壤的抗侵蚀能力,减缓了土壤的漏失。

4 结论

(1) 地表小生境与地下裂隙相互联系,形成统一有序的多空间生态结构。根据地表小生境类型和裂隙形态特征,初步将这种统一的空间生态结构以小生境结合裂隙形态加以分类命名。命名为土面漏斗、石沟裂隙;土面漏斗地表属土面小生境,地下裂隙为漏斗形,表层有机碳含量较低;石沟裂隙地表属石沟小生境,地下裂隙为狭长形,表层有机碳含量较高。

(2) 地表小生境类型、地下裂隙形态、裂隙内有无根系以及裂隙是否贯通地下空间等因素的差异导致海峰岩溶盆地小生境裂隙土壤存在异质性。土面漏斗、石沟裂隙和石坑各小生境土壤机械组成主要以砂粒为主;石沟裂隙砂粒含量显著低于土面漏斗和石坑,粉砂粒含量显著高于土面漏斗和石坑;土面漏斗和石沟裂隙土壤发生渗漏,在无根系时,土壤颗粒渗漏存在无规律、随机性;当存在粗根时,土壤颗粒优先

以根土之间的通道渗漏;当裂隙或漏斗底部存在贯通时,土壤以细颗粒继续发生渗漏;土面漏斗和石沟裂隙有机碳含量遵循土壤有机碳表聚特性,石坑有机碳不遵循,石沟裂隙表层有机碳含量高于土面漏斗和石坑。

(3) 小生境裂隙底部土壤团聚体随深度的增加,稳定性逐渐减小,细颗粒团聚体含量逐渐增多,易发生土壤的漏蚀,深根系植被介入裂隙土壤,有助于改善土壤理化性质,增加土壤有机碳含量,增强其抗侵蚀性能,对于地下水土的保持有重要作用。

[参 考 文 献]

- [1] 刘方,王世杰,罗海波,等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055-1062.
- [2] 廖洪凯,龙健,李娟,等. 喀斯特地区不同植被下小生境土壤矿物组成及有机碳含量空间异质性初步研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4): 434-439.
- [3] 罗海波,刘方,刘元生,等. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 24-28.
- [4] 廖洪凯,龙健,李娟. 不同小生境对喀斯特山区花椒林表土团聚体有机碳和活性有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 156-160.
- [5] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.
- [6] 王恒松,熊康宁,刘云. 喀斯特区地下水水土流失机理研究[J]. 中国水土保持, 2009(8): 11-14.
- [7] 魏兴萍,袁道先,谢世友. 运用¹³⁷Cs与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 16-19.
- [8] 雷俐,魏兴琥,徐喜珍,等. 粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J]. 地理研究, 2013, 32(12): 2204-2214.
- [9] 杨宇琼,戴全厚,严友进,等. 黔中喀斯特坡地浅层裂隙土壤机械组成对降雨的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 545-552.
- [10] 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.
- [11] 曹建华,邓艳,杨慧,等. 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.
- [12] 王宇,张华,张贵,等. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 283-295.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
- [14] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution [J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20(2): 151-153.
- [15] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 20-23.
- [16] 李鹏,李占斌,张晓霞,等. 复垦土地土壤有效微量元素分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 126-130.
- [17] 麦积山,郑江坤,赵廷宁,等. 北川震后滑坡体表层土壤颗粒组成及团聚体空间变化特征[J]. 山地学报, 2019, 37(1): 30-40.
- [18] 王大力,尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 869-874.
- [19] 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等. 我国西南岩溶区土壤侵蚀强度分级标准研究[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 1-7, 20.
- [20] 廖洪凯,龙健,李娟,等. 西南地区喀斯特干热河谷地带不同植被类型下小生境土壤碳氮分布特征[J]. 土壤, 2012, 44(3): 421-428.
- [21] 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.
- [22] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11(3/4): 199-238.
- [23] 王浩,姚昕,杨慧,等. 岩溶区不同土地覆被方式对土壤团聚体有机碳的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1506-1513.
- [24] 唐菡,谌芸,刘泉宏,等. 喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根—土复合体力学特性[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6114-6125.
- [25] 余芹芹,乔娜,胡夏嵩,等. 植物根—土复合体固坡力学效应及模型研究现状与进展[J]. 中国水土保持, 2011(7): 51-54.
- [26] Danjon F, Fourcaud T, Bert D. Root architecture and wind-firmness of mature Pinus pinaster [J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 387-400.