

DOI: 10.5846/stxb201905161007

岑龙沛^{1,2}, 严友进¹, 戴全厚^{1,2,*}, 焦 权³, 胡 刚¹, 高儒学¹, 伏文兵⁴
7567-7575.

Cen L P, Yan Y J, Dai Q H, Jiao Q, Hu G, Gao R X, Fu W B. Occurrence characteristics of organic carbon and phosphorus in fissured soil under different land use types in Karst area. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7567-7575.

喀斯特不同土地利用类型裂隙土壤有机碳及磷素赋存特征

岑龙沛^{1,2}, 严友进¹, 戴全厚^{1,2,*}, 焦 权³, 胡 刚¹, 高儒学¹, 伏文兵⁴

1 贵州大学林学院, 贵阳 550025

2 贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025

3 遵义市红花岗区水务局, 遵义 563000

4 贵州华保环境技术咨询有限公司, 贵阳 550002

摘要:以喀斯特石漠化区不同土地利用类型裂隙土壤为研究对象,运用野外调查和实验室内分析相结合方法,探索其有机碳和磷素含量变化及其赋存特征,以期对喀斯特地区开展石漠化治理和植被恢复提供理论依据。结果表明:4种土地利用类型裂隙土层土壤有机碳赋存含量变化范围为16.067—39.436 g/kg,总体呈现出随土层深度增加而降低的变化趋势;土壤全磷、有效磷赋存含量变化范围分别为0.093—0.274 g/kg、3.836—8.025 mg/kg,整体上在裂隙表层显著高于其他土层,具有上层高下层低的特点;同时,土壤有机碳和磷素总体上属于中度变异。乔木林地和灌丛地的C/P总体上表现出随土层的加深而减小的趋势,而草地和撂荒地先减小后增加,土壤C/P在各土地利用类型裂隙土层变化范围为86.499—268.343,磷的有效性较低;随土层深度的增加,各土地利用类型裂隙土壤有机碳、全磷和有效磷含量逐渐在减少,有机碳对土壤碳磷比、有效磷含量变化有一定影响。

关键词:裂隙土壤;有机碳;磷素;喀斯特石漠化;不同土地利用类型

Occurrence characteristics of organic carbon and phosphorus in fissured soil under different land use types in Karst area

CEN Longpei^{1,2}, YAN Youjin¹, DAI Quanhong^{1,2,*}, JIAO Quan³, HU Gang¹, GAO Ruxue¹, FU Wenbing⁴

1 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 Research Center for Soil Erosion & Ecological Restoration, Guizhou University, Guiyang 550025, China

3 Water Conservancy Bureau of Honghuagang County, Zunyi 563000, China

4 Guizhou Huabao Environmental Technology Consultation, Guiyang 550002, China

Abstract: The goal of this study was to determine the changes in soil organic carbon (SOC) and phosphorus (P) content and their occurrence characteristics, to provide the theoretical basis for rocky desertification control and vegetation restoration in the karst area. Adopting field investigation and indoor analysis methods, different land use types of fissured soil in karst rocky desertification area were taken as the research object. The results indicated that the variation range of soil organic carbon (SOC) content in four types of land use was 16.067—39.436 g/kg, showing a trend of decreasing with the increase of soil layer depth. The total phosphorus (TP) and available phosphorus (AP) contents in the soil varied from 0.093—0.274 g/kg and 3.836—8.025 mg/kg, respectively, which were significantly higher in the fissure surface layer than in other soil layers in the whole, with the characteristics of higher in the upper layer and lower in the lower layer. Besides,

基金项目:国家自然科学基金项目(41671275);贵州省高层次创新型“百层次”人才项目(黔科合平台人才[2018]5641)

收稿日期:2019-05-16; **网络出版日期:**2020-09-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qhdairiver@163.com

soil organic carbon (SOC), total phosphorus (TP), and available phosphorus (AP) were generally moderately variable. Soil C/P ranged from 86.499 to 268.343 in the fissured soil of the four land-use types, which indicated that the availability of P was low, and C/P of arboreal land and shrubland decreased with the deepening of the soil layer, while that of grassland and abandoned land decreased first and then increased. With the increase of soil depth, the content of organic carbon (SOC), total phosphorus (TP), and available phosphorus (AP) in fissured soil decreased gradually and soil organic carbon (SOC) had affected the changes of C/P and available phosphorus (AP) content.

Key Words: fissured soil; organic carbon; phosphorus; karst rocky desertification; different land use types

土壤作为植物的主要载体,为其提供了生长所需的立地空间和养分、水分等,是植被生长和恢复的必要条件^[1]。喀斯特石漠化区严重的水土流失导致地表土层浅薄不连续、土壤严重退化,严重制约了石漠化区的植被恢复。喀斯特坡地特殊的二元结构导致该地区存在地表和地下两个方向的水土流失。土壤在径流驱动下通过裂隙系统向下流失过程中,部分土壤暂时赋存于浅层岩溶裂隙中,形成了裂隙土壤系统。研究表明,裂隙土壤系统已成为喀斯特石漠化坡地重要的植物生境之一。众所周知,土壤养分是植物主要的养分来源之一,因此,土壤养分条件直接影响着植物的生长和恢复程度。土壤碳和磷元素是喀斯特植被恢复生长不可或缺的营养成分,且是陆地生态系统生物圈土壤养分循环的核心和主要成分,驱动着其他养分元素的循环与转化,进而影响土壤养分的供应能力和理化性质^[2-3]。磷含量的盈缺会直接影响植物的生长及发育^[4],土壤有机碳作为土壤质量评价的重要指标,在影响土壤理化性质、调节土壤结构、反映土地生产力和环境健康功能等方面具有重要的作用和意义^[5]。目前关于喀斯特有机碳和磷素的研究报道,主要集中于喀斯特不同地貌类型、土地利用方式、植被覆盖/类型下的分布特征等方面^[6-11],如许联芳等^[6]、潘复静等^[8]研究了典型喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式有机碳及植被群落凋落物碳磷比特征;胡忠良^[7]对不同植被覆盖条件下浅层土壤有效磷和总磷的分布特征做了探索,指出在植被类型变化后土壤有效态养分含量下降较全量养分显著;黄先飞等^[10]分析了喀斯特地区不同植被覆盖及土地利用方式下土壤有机碳的分布规律,提出该区土壤有机碳具有含量高、密度低的显著特征等。刘鸿雁等^[12]分析了石灰岩和白云岩地下裂隙对喀斯特关键带植被组成和生产力的影响。

综上所述,当前关于喀斯特坡地土壤碳、磷的研究已有了一定的成果。然而,当前的研究多集中于对 0—20 cm 处的土壤碳、磷特征。相较于被植物直接作用的地表土壤,浅层岩溶裂隙土壤条件异于地表。因此,植被与裂隙土壤碳、磷间的相互作用关系势必会发生改变。鉴于此,本文在典型喀斯特小流域内,探索不同土地利用类型下裂隙土壤的土壤有机碳和磷素含量变化及其赋存特征,以期对喀斯特石漠化地区石漠化治理和植被恢复提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区设在贵州省安顺市镇宁县大山镇双龙山街道办事处新发社区的典型喀斯特石漠化新发小流域(105°49′30″—105°49′51″E, 26°06′53″—26°07′23″N),总面积约 0.33 km²。研究区内岩石裸露,生境破碎,浅层岩溶裂隙发育,无落水洞、地下暗河、天窗等分布。地层岩性为三叠系中统关岭组第三段(T₂g³)的白云质灰岩。海拔 1281—1393 m,属亚热带湿润季风气候,平均气温 14.03 ℃,积温(10 ℃)高达 4116 ℃,日照时数 960—1300 h,平均无霜期 294 d,年均降水量 1193 mm,多年平均蒸发量为 550 mm。土壤类型以石灰土为主,亚热带常绿阔叶林是主要地带性植被类型。土地利用类型包含草地、撂荒地、灌木林地和乔木林地,具体信息见表 1。

1.2 土样采集

本研究采用样地调查法,外业调查取样于 2017 年 7—8 月进行。在研究区布设 50 m×50 m 的网格,再在

网格点处布设 60 个 10 m×10 m 样点,在每个样点内选取 3 条典型裂隙,进行样点、裂隙信息及土壤样品的采集。按 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm 四个层次、同一层次土壤样品均匀混合采样,依次标记为 U_1, U_2, U_3, U_4 。裂隙数目分别为草地 9 条、撂荒地 8 条、灌木林地 29 条和乔木林地 14 条。最后采样方法具体见 Yan 等^[13]。

1.3 样品测定

土壤样品去除土壤侵入体和新生体后,过 2 mm 筛孔土壤以测定土壤有效磷及 pH,过 0.25 mm 筛孔土壤以测定有机碳和全磷。测定方法参照《土壤农业化学分析法》^[14],土壤有机碳测定采用浓硫酸—重铬酸钾外加热法,土壤全磷含量测定采用硫酸高氯酸消煮钼蓝比色法,土壤有效磷含量测定采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,pH 测定采用电位法。

1.4 数据处理

使用 Excel 2016、SPSS 19.0 软件进行数据统计与分析,使用 Origin 9.1 画图。

表 1 样地基本情况
Table 1 The basic information of study sites

土地利用类型 Type of land use	撂荒地 Abandoned land	草地 Grassland	灌丛地 Shrub land	乔木林地 Arboreal land
地理坐标 Geographic coordinate	26°07′03″N 105°49′49″E	26°06′30″N 105°49′30″E	26°07′30″N 105°49′30″E	26°07′15″N 105°49′30″E
海拔 Altitude/m	1297—1317	1284—1330	1290—1397	1296—1334
坡度 Slope/(°)	10—18	5—50	10—60	20—30
植被覆盖度 Vegetation coverage/%	50—95	30—96	10—95	25—80
岩石裸露率 Exposure rate of bedrock/%	5—50	4—70	5—90	20—75
土壤类型 Soil type	石灰土	石灰土	石灰土	石灰土
基岩类型 Bedrock type	白云岩	白云岩	白云岩	白云岩
植被 Vegetation	鬼 针 草 (<i>Bidens pilosa</i> L.)、 狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	白茅 (<i>Imperata cylindrica</i>)、 狗牙根 (<i>Cynodon dactylon</i>)	火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)、 马桑 (<i>Coriaria nepalensis</i> Wall.)	香椿 (<i>Toona sinensis</i> (A.Juss.) Roem)、 构树 (<i>Broussonetia papyrifera</i>)

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型下裂隙土壤有机碳赋存特征

有机碳作为土壤中较活跃的重要物质组成,提供植物生长所需的营养元素,满足生命活动的条件,且对土壤的理化性质、肥力和土地可持续利用等方面有着十分重要的作用与意义^[15-16]。分析不同土地利用类型对裂隙土壤有机碳赋存特征可见表 2,4 种土地利用类型下的裂隙土层 U_1 至 U_4 的土壤有机碳含量总体表现为随土层深度增加呈现降低的变化趋势,土壤有机碳含量整体上在土层 U_1 高于其他土层;土壤有机碳含量在土层 U_1 、 U_2 和 U_3 中表现为灌丛地显著高于乔木林地、草地和撂荒地,在土层 U_4 中乔木林地高于其他土地利用类型。草地的有机碳含量在 U_4 显著低于其他 3 个土层;撂荒地、灌丛地和乔木林地的有机碳含量在各自的 4 个土层间均无显著性差异。

撂荒地、草地和灌丛地中,土壤有机碳含量整体上表现为随土层增加而减少,各有机碳含量变化范围分别为:22.346—26.892 g/kg、16.067—38.330 g/kg 和 23.539—39.436 g/kg,有机碳含量在撂荒地的 4 个土层间均无显著性差异;在草地土层 U_1 的土壤有机碳含量与 3 个土层差异显著,尤其是土层 U_1 显著高于 U_4 ;在灌丛地裂隙土层 U_1 和 U_2 的土壤有机碳含量均值为最高,分别为 39.436 g/kg 和 38.205 g/kg,土壤有机碳含量在 U_1 土层显著高于其他土层。乔木林地中,4 个裂隙土层土壤有机碳含量变化表现为土壤有机碳从土层 U_1 至 U_3 整

体在减少而后在土层 U_4 增加,即: $U_2 < U_3 < U_1 < U_4$,均在 24.328 g/kg 以上,且 4 个土层的土壤有机碳含量变幅较小。图 1 为不同土地利用类型裂隙土壤有机碳含量在不同土层中的变异系数变化情况,有机碳含量变异系数变化范围为 0.026—0.630,总体上属于中度变异;具体表现为,乔木林地有机碳含量变异在 0.157—0.205 之间,草地在 0.026—0.554 之间,灌丛地在 0.108—0.630,撂荒地则为 0.247—0.400 范围内。

表 2 不同土地利用类型下裂隙土壤有机碳赋存特征

Table 2 Characteristics of organic carbon occurrence in fissured soils under different land use types					
指标 Index	土层深度 Soil depth	撂荒地 Abandoned land	草地 Grass land	灌丛地 Shrub land	乔木林地 Arboreal land
有机碳 SOC/(g/kg)	U_1	26.892±6.372Ca	38.330±10.460ABa	39.436±16.935Aa	26.336±9.165Ba
	U_2	22.846±4.388Ca	28.430±11.805ABab	38.205±17.164Aa	24.328±10.213Ba
	U_3	22.346±4.291Ca	30.164±18.050ABab	33.419±21.792Aa	25.133±8.924Ba
	U_4	24.061±5.012Ca	16.067±0.514ABb	23.539±2.833Aa	31.820±9.086Ba

SOC:土壤有机质 Soil organic matter; U_1 :0—20cm; U_2 :20—40cm; U_3 :40—60cm; U_4 :60—80cm;不同大写字母代表不同土地利用类型间差异显著;不同小写字母代表同一列中不同土层间差异显著($P < 0.05$)

2.2 不同土地利用类型裂隙土壤磷素赋存特征

2.2.1 全磷赋存特征

全磷可反映土壤磷库潜在的供磷能力,有效磷可被植物直接吸收利用,且可作为评价土壤磷供应植物生长能力的重要指标^[17]。由表 3 可看出,除乔木林地外,草地、灌丛地和撂荒地裂隙土壤全磷含量主要集中在土层 U_1 和 U_2 ,乔木林地表现出的分布特点是上层低下层高,其他 3 种土地利用类型俱呈现出上层高下层低的分布特征;土壤全磷含量在土层 U_1 和 U_2 中整体表现为乔木林地、灌丛地低于草地和撂荒地,在土层 U_3 中草地高于其他土地利用类型,在土层 U_4 中乔木林地高于其他土地利用类型。撂荒地和草地的全磷含量各在土层 U_1 和 U_2 显著于 U_3 、 U_4 ,灌丛地中的 U_4 则显著低于其他 3 个土层;乔木林地 U_4 则显著高于其他 3 个土层。

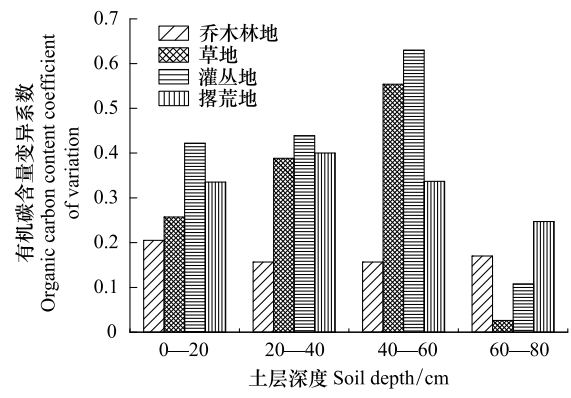


图 1 不同土地利用类型裂隙土壤有机碳含量赋存变异特征

Fig.1 Variation of organic carbon content in fissured soils of different land use types

表 3 不同土地利用类型下裂隙土壤全磷赋存特征

Table 3 Characteristics of total phosphorus in fissured soils under different land use types					
指标 Index	土层深度 Soil depth	撂荒地 Abandoned land	草地 Grass land	灌丛地 Shrub land	乔木林地 Arboreal land
全磷 TP/(g/kg)	U_1	0.244±0.015Aa	0.259±0.062ABa	0.195±0.049ABa	0.145±0.046Ab
	U_2	0.274±0.035Aa	0.207±0.077ABa	0.174±0.050ABab	0.130±0.046Ab
	U_3	0.166±0.003Ab	0.180±0.088ABab	0.152±0.040ABab	0.175±0.062Ab
	U_4	0.131±0.010Ab	0.093±0.033ABb	0.150±0.063ABb	0.239±0.060Aa

TP:全磷 Total phosphorus

对于撂荒地、灌丛地和草地而言,土壤全磷含量总体上表现为随着土壤深度的增加不断下降,撂荒地、草地的裂隙土层 U_1 、 U_2 显著高于 U_3 、 U_4 的土壤全磷含量;灌丛地土层 U_1 与 U_4 关系明显,即全磷含量在土层 U_1 中显著高于 U_4 。对于乔木林地而言,土壤全磷含量在裂隙土层的变化具体表现为在 U_1 先降低后上升最后在 U_4 达到最高的趋势,这与乔木林地的有机碳含量变化趋势整体一致,且土壤全磷含量在土层 U_4 显著高于其他 3 个土层。由图 2 看出,全磷含量变异系数变化范围为 0.018—0.489,其中草地、乔木林地和灌丛地全磷含量变

异在 0.241—0.489 之间,总体变异程度为中度;撂荒地
在 4 种土地利用类型裂隙土壤中整体变异系数为最小,
在 0.0176—0.127 之间,总体上属于弱变异。

2.2.2 有效磷赋存特征

由表 4 可看出,总体来说,土壤有效磷含量在裂隙
表层显著高于其他土层,乔木林地、灌丛地和撂荒地裂
隙土壤有效磷含量整体在土层 U_1 和 U_2 高于其他土层,
且变化幅度较小,其分布特点为上层高下层低;而草地
呈现上下层高,中间低的分布格局。土壤有效磷含量在
土层 U_1 表现为撂荒地高于其他土地利用类型,在土层
 U_2 和 U_3 趋势表现为灌丛地高于其他土地利用类型,在
土层 U_4 则是草地高于其他土地利用类型。除灌丛地不
同土层间存在显著差异,其余 3 种土地利用类型的 4 个
土层间均无显著性差异。

在撂荒地中,随着土层的增加,土壤有效磷含量总体上在降低;在草地中,各土层变化趋势表现是先降低
后增加,即: $U_3 < U_2 < U_1 < U_4$,与草地土壤全磷含量整体变化具有一致性,而与草地土壤有机碳含量变化相反;在
灌丛地中,有效磷含量随着土层深度的加深呈现持续降低的趋势,其中 U_1 和 U_2 的土壤有效磷含量均值为最
高,分别为 7.559 mg/kg 和 7.379 mg/kg,土层 U_1 、 U_2 土壤有效磷含量显著高于 U_3 和 U_4 ;在乔木林地中,土壤有
效磷含量变化范围在 3.916—5.323 mg/kg,有效磷含量在土层趋势变化表现为先降低后上升。总的来说,除
灌丛地不同土层间存在显著差异,其余 3 种土地利用类型的不同土层间均无显著性差异,说明乔木林地、草地
和撂荒地的土壤有效磷含量在不同土层变幅较小。有效磷含量变异系数变化范围为 0.045—0.555,各土地利
用类型中,除土层 U_4 外,土壤有效磷含量变异系数约在 0.300—0.500,总体上属于中度程度的变异(见图 3)。

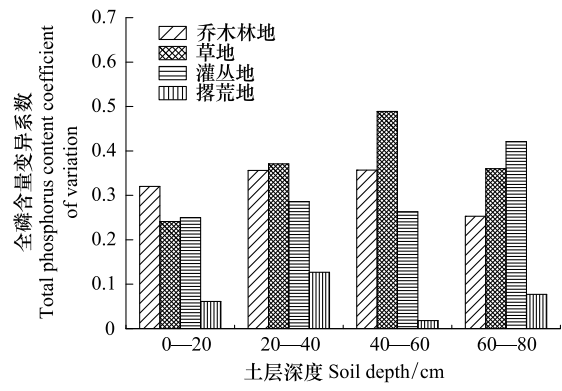


图 2 不同土地利用类型裂隙土壤全磷含量赋存变异特征

Fig.2 Characteristics of occurrence and variation of total phosphorus content in fissured soils of different land use types

表 4 不同土地利用类型下裂隙土壤有效磷赋存特征

Table 4 Characteristics of available phosphorus in fissured soils under different land use types

指标 Index	土层深度 Soil depth	撂荒地 Abandoned land	草地 Grass land	灌丛地 Shrub land	乔木林地 Arboreal land
有效磷	U_1	$8.025 \pm 3.068 \text{ ABa}$	$6.616 \pm 2.110 \text{ ABa}$	$7.559 \pm 3.882 \text{ Aa}$	$5.323 \pm 1.846 \text{ Ba}$
AP/(mg/kg)	U_2	$4.542 \pm 1.851 \text{ ABa}$	$5.525 \pm 1.895 \text{ ABa}$	$7.379 \pm 3.094 \text{ Aa}$	$3.916 \pm 1.783 \text{ Ba}$
	U_3	$5.443 \pm 1.698 \text{ ABa}$	$4.653 \pm 1.759 \text{ ABa}$	$6.158 \pm 3.420 \text{ Aab}$	$4.673 \pm 1.421 \text{ Ba}$
	U_4	$5.210 \pm 0.561 \text{ ABa}$	$6.989 \pm 0.331 \text{ ABa}$	$3.836 \pm 0.176 \text{ Ab}$	$5.097 \pm 1.848 \text{ Ba}$

AP:速效磷 Available phosphorus

2.3 不同土地利用类型下裂隙土壤碳磷比特征

土壤碳磷比是有机质或其他成分中碳素与磷素总质量的比值,是土壤有机质组成和质量程度的一个重要
指标^[18]。见图 4 和图 5,4 种土地利用类型下裂隙的土壤碳磷比表现为,乔木林地和灌丛地的 C/P 总体上随
土层的加深表现为减小,而草地和撂荒地呈先减小后增加的趋势;土壤碳磷比在 4 个裂隙土层中表现为灌丛
地均高于其他土地利用类型。

乔木林地中,土壤 C/P 逐渐降低随土层深度增加,土层 U_1 和 U_2 的碳磷比近似,而 U_3 和 U_4 在 170.0 以下。
草地中,土壤 C/P 随土层深度增加,先减小后增大;土层 U_2 与 U_1 相比变化不大,土层 U_3 、 U_4 与 U_2 相比土壤 C/
P 继续增大,在 U_4 达到最大。灌丛地中,土壤 C/P 随土层加深先增大后减小,在土层 U_2 与 U_3 变化增大,而在
土层 U_4 减小;4 个土层的土壤碳磷比均在 213.046 以上。撂荒地中,土壤 C/P 随土层加深先减小后增大,土壤
碳磷比在土层 U_2 仅为 86.50,分别为土层 U_1 、 U_3 、 U_4 的 77.19%,64.07%,47.20%。不同裂隙土层下 4 种土地利
用类型的土壤碳磷比在 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 变化范围分别为 112.048—213.046,86.499—254.474,135.004—

268.343, 146.357—213.095, 且变化趋势具体为: 在土层 U_1 和 U_2 乔木林地较次之灌丛地, 在土层 U_3 和 U_4 草地较次之灌丛地。

2.4 裂隙土壤碳磷赋存的影响因素

喀斯特不同土地利用类型裂隙土壤磷素和碳磷比主要受土壤有机碳和土层深度的影响如表 5 所示。其中, 土壤全磷含量与其他指标相关性未达到显著水平, 与 C/P 和土层深度表现为显著负相关, 而与 pH 呈负相关; 土壤有机碳与土壤有效磷、C/P 和土地利用类型表现为显著正相关水平; 土壤有效磷含量与 C/P 和土地利用类型呈极显著正相关, 与土层呈显著极负相关; 除土层深度外, pH 均与各指标呈负相关, 且程度不高; 土壤碳磷比与土壤全磷、有效磷和有机碳均达到极显著水平, 其中与全磷呈负相关; 土层深度均与全磷、有机碳和有效磷呈极显著负相关, 即土层深度越增加, 全磷、有效磷、有机碳含量越低; 土地利用类型与土壤有机碳含量表现为正相关, 与土壤有效磷含量呈极显著正相关, 表明土壤有机碳和有效磷含量亦可能与不同的土地利用类型有关。

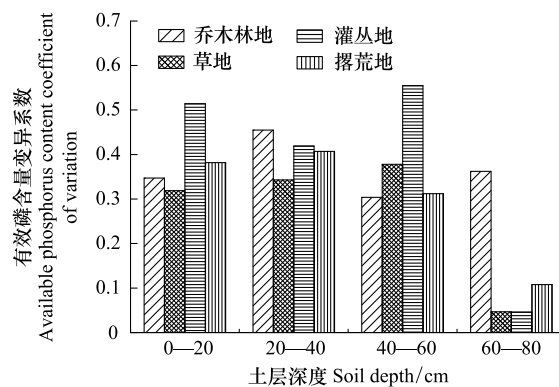


图3 不同土地利用类型裂隙土壤有效磷含量赋存变异特征
Fig.3 Variation characteristics of available phosphorus content in fissured soils of different land use types

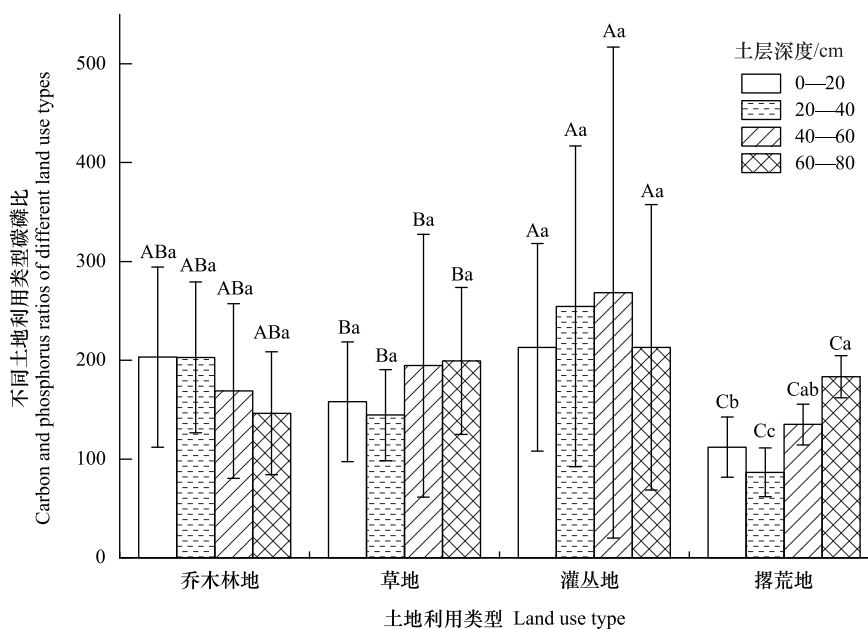


图4 不同土地利用类型裂隙土壤碳磷比

Fig.4 C/P ratio of fissured soils in different land use types

不同大写字母代表不同土地利用类型间差异显著; 不同小写字母代表同一土地利用类型不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

通过对比不同土地利用类型对裂隙土壤有机碳含量赋存特征可知, 4 种土地利用类型裂隙土层土壤有机碳含量总体呈现出随土层深度增加而降低的变化趋势, 但从表层向下的趋势不同, 相关性结果亦显示, 土壤有机碳含量在不断降低随土层深度的增加, 且整体上在 U_1 土层为最高, 这与许多学者在喀斯特区研究相关土地利用类型土壤结果相似^[10,19], 分析其原因可能是裂隙土壤表层有机碳来源于地表植被的植物凋落物, 随着土

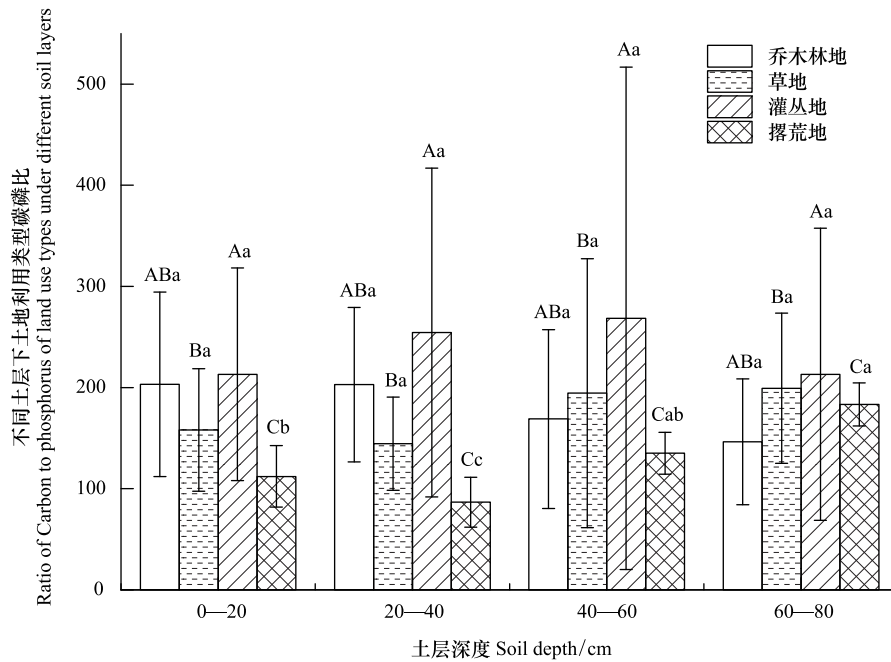


图 5 不同土层下土地利用类型裂隙土壤碳磷比

Fig.5 C/P ratio of fissured soils under different land use types

层的加深,在微生物的分解作用下土壤有机质组分可降解性不同,难降解物质逐渐增加,易降解物质逐渐减少^[20],同时由于凋落物的加入会促进土壤微生物的活动使其呼吸速率加快,使土壤原有有机碳的分解加速和释放^[9];土壤有机碳含量在土层 U₁、U₂和 U₃中表现为灌丛地显著高于乔木林地、草地和撂荒地,原因可能是,灌丛地的植被更替速率快,使凋落物等向下的裂隙土壤迁移形成养分积累,故灌丛地有机碳含量较高;而乔木林地在土层 U₄呈上升的趋势且高于其他土地利用类型,这是由于植物扎根生长于裂隙深层土壤中,植物根系及凋零物补充了有机质或是裂隙土壤含水量较高,温度变幅小,底层有机质分解较缓慢或是地下裂隙土壤复杂的养分过程与土壤中植物根系、微生物和介质和土壤等的综合作用密不可分。

表 5 裂隙土壤碳磷赋存影响因素相关性分析

Table 5 Correlation analysis of factors affecting carbon and phosphorus accumulation in fissured soils

项目 Items	土层深度 Soil depth	土地利用类型 Type of land use	全磷 TP	有机碳 SOC	有效磷 AP	pH
土地利用类型 Type of land use	-0.015	1				
全磷 TP	-0.212 **	0.139	1			
有机碳 SOC	-0.216 **	0.172 *	0.118	1		
有效磷 AP	-0.223 **	0.256 **	0.066	0.439 **	1	
pH	0.093	-0.138	-0.047	-0.101	-0.129	1
C/P	0.018	0.056	-0.519 **	0.700 **	0.0308 **	-0.055

** P < 0.01, * P < 0.05

本研究发现,除乔木林地外,其他 3 种土地利用类型裂隙土壤有机碳、全磷和有效磷含量在土层 U₁至 U₄分布规律具有相似性,即上层高下层低的分布特点,表明有机碳在很大程度上影响磷素含量变化,见表 5 可知,有机碳与土壤有效磷极显著正相关水平为 0.439。此外,在 4 种土地利用类型中,裂隙土壤全磷和有效磷主要集中在裂隙土壤表层(U₁),随土层的变化幅度较小,体现出其“表层聚集性”特点,这与彭建勤等^[21]的研究结果一致,全磷和有效磷在土壤剖面呈表聚性特征,而 Yan 等^[13]研究也表明浅层岩溶裂隙内土壤有机碳、

全磷总体随土层深度呈线性减小的变化趋势。土壤质地可能是土壤中磷素含量高低的主要性因素,受其影响,黏粒对土壤全磷、有效磷都有极强的吸附作用^[22],但其原因,本研究试验土壤为石灰土,pH 范围为中性至碱性,磷素极易在偏碱性环境下被土壤固定而导致活性降低,而裂隙土壤表层有机质丰富,微生物活动较强,土壤固磷作用较弱,可释放有效磷;而裂隙土壤深层相反,使得有效磷含量较裂隙表土层少;或是有效磷属于矿质营养,易被土壤颗粒吸附或生成难溶性磷酸盐。

另外,本研究发现,喀斯特不同土地利用类型裂隙土壤有机碳和磷素变异均在中等程度,这与俞月凤等^[23]研究石灰土养分的变异结果一致;分析其原因可能是与裂隙形态、土壤质地等有关,如 Yan 等^[13]认为 Y 型裂隙顶部存在 2 处或者更多的开口,导致垂直方向上不同深度土壤的来源不一而导致土壤养分出现较大的差异,大团聚体组分与土壤总磷和有效磷含量呈正相关,其增加可促进磷素的积累^[24],张伟等^[25]通过喀斯特峰丛洼地区土壤养分空间变异特征研究则认为,风化凋落物的输入和地表土壤的迁入能够提高土壤养分含量。同时,植被类型对养分分布有重要作用,生物不断的累积过程是土壤养分形成和维持的基础,而土壤养分的空间变异又影响植物的生长和空间分布^[23]。

磷的有效性可由土壤有机质分解速率来确定,C/P 低,有助于微生物在分解有机质过程中的释放从而促进有效磷在土壤中的增加;而 C/P 高,微生物会出现磷受限情况进而与植物竞争土壤磷,具有较强的固磷潜力,进而抑制植物生长^[18,26]。乔木林地和灌丛地的 C/P 随裂隙土层的加深而逐渐降低,这一研究结果与李占斌等^[27]对黄土丘陵区不同样地的土壤碳磷及其化学计量特征的研究结果一致,C/P 随土层加深呈减小的趋势。而草地和撂荒地呈先降低后上升的趋势,同时在 4 个土层中灌丛地的土壤碳磷比均高于其他土地利用类型,其原因可能是草地与撂荒地裂隙深层土壤有机质含量较高,由表 4 中的相关性分析结果显示,C/P 与土壤有机碳、有效磷之间相关性极显著,说明土壤 C/P 随土壤深度的变化取决于有机碳含量。当土壤碳磷比<200 表示养分净矿化,>300 时表示养分净固定,介于 200—300 表示可溶性磷浓度在土壤中变化较小^[28]。本研究中,土壤碳磷比在各裂隙土层变化范围分别为 112.048—213.046, 86.499—254.474, 135.004—268.343, 146.357—213.095,总体上表现为<200 和介于 200—300,且均高于中国土壤碳磷比平均值 61.00^[29],这表明喀斯特裂隙土壤磷的有效性较低。本文主要探讨了土壤有机碳和磷在地表至浅层岩溶裂隙垂直剖面上的空间赋存特征,研究结果初步指示了浅层岩溶裂隙土壤是喀斯特坡地土壤有机碳和磷的重要赋存空间。在后期的研究中可结合土壤生物地球化学等方面进一步探讨土壤碳、磷转化和循环的驱动机制,以提高裂隙土壤碳、磷对石漠化地区植被恢复的贡献。

4 结论

通过对喀斯特不同土地利用类型裂隙土壤有机碳及磷素赋存特征分析,可以看出:

(1)撂荒地、草地、灌丛地和乔木林地裂隙土层的土壤有机碳赋存含量变化范围为 16.067—39.436 g/kg,总体表现为随土层深度增加呈现减小的变化趋势,整体在土层 U_1 为最高;

(2)全磷、有效磷赋存含量变化范围分别为 0.093—0.274 g/kg、3.836—8.025 mg/kg;4 种土地利用类型的裂隙土壤磷素整体在表层显著高于其他土层,体现出上层高下层低的“表聚性”特点;

(3)乔木林地和灌丛地的碳磷比总体上表现出随土层的加深而减小的趋势,而草地和撂荒地先减小后增加;此外,土壤碳磷比在各土地利用类型裂隙土层变化范围为 86.499—268.343,表明磷的有效性较低;

(4)有机碳、全磷和有效磷含量变异系数变化范围分别为 2.6%—63%、1.8%—48.9%、4.5%—55.5%,整体上变异在中等程度;

(5)由相关性结果分析表明,有机碳对土壤碳磷比、有效磷含量变化有一定影响,随土层深度的增加,各土地利用类型裂隙土壤有机碳、全磷和有效磷含量逐渐在减少。

参考文献 (References):

- [1] 张信宝,王世杰,曹建华,王克林,孟天友,白晓永.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.中国岩溶,2010,29

- (3): 274-279.
- [2] Peri P L, Gargaglione V, Pastur G M. Above-and belowground nutrients storage and biomass accumulation in marginal *Nothofagus antarctica* forests in Southern Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2502-2511.
- [3] 李菲, 李娟, 龙健, 廖洪凯, 刘灵飞, 张文娟. 典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3374-3381.
- [4] Ruttenberg K C. The global phosphorus cycle. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 10: 499-558.
- [5] 徐江兵, 何园球, 李成亮, 刘晓利, 姜灿烂. 不同施肥处理红壤生物活性有机碳变化及与有机碳组分的关系. *土壤*, 2007, 39(4): 627-632.
- [6] 许联芳, 王克林, 朱捍华, 侯娅, 张伟. 桂西北喀斯特移民区土地利用方式对土壤养分的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1013-1018.
- [7] 胡忠良. 贵州中部喀斯特山区不同植被下土壤养分与微生物功能变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [8] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C : N : P 生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31(2): 335-343.
- [9] 廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2253-2258.
- [10] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 215-221.
- [11] Yang H, Zhang P, Zhu T B, Li Q, Cao J H. The characteristics of soil C, N, and P stoichiometric ratios as affected by geological background in a Karst Graben Area, Southwest China. *Forests*, 2019, 10(7): 601, doi: 10.3390/f10070601.
- [12] 刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 吴秀臣, 彭建, 王红亚, Meersmans J, Green S M, Quine T A. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(12): 1974-7981.
- [13] Yan Y J, Dai Q H, Jin L, Wang X D. Geometric morphology and soil properties of shallow Karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China. *CATENA*, 2019, 174: 48-58.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 王果. 土壤学. 北京: 高等教育出版社, 2009: 70-76.
- [16] 杜昕. 长沙市不同土地利用方式对土壤理化性质及生态服务功能的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [17] Sun J N, Xu G, Shao H B, Xu S H. Potential retention and release capacity of phosphorus in the newly formed wetland soils from the Yellow River Delta, China. *Clean-Soil Air Water*, 2012, 40(10): 1131-1136.
- [18] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [19] 王霖娇, 盛茂银, 李瑞. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤有机碳的响应及其影响因素分析. *生态科学*, 2016, 35(1): 47-55.
- [20] 李龙波, 刘海泽, 李晓东, 刘文景, 刘丛强. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 241-247.
- [21] 彭建勤, 林成芳, 洪慧滨, 林伟盛, 熊德成, 杨智榕, 杨玉盛. 中亚热带森林更新方式对土壤磷素的影响. *生态学报*, 2016, 36(24): 8015-8024.
- [22] 袁彦婷, 丁振华, 张玲, 龙江平, 卢豪良, 刘洋, 潘家永. 土地利用方式改变对红树林沉积物中营养元素含量的影响. *地球与环境*, 2012, 40(3): 385-390.
- [23] 俞月凤, 何铁光, 宋同清, 李丽娟, 韦彩会, 蒙炎成, 唐红琴, 李忠义, 李婷婷, 胡芳. 桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征. *生态学报*, 2018, 38(8): 2906-2914.
- [24] 张倩, 韩贵琳, 柳满, 阳昆桦, 刘强. 贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 321-328.
- [25] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 陈洪松, 王克林, 韦国富. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 93-101.
- [26] 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 沈振西, 张宪洲, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征. *草业学报*, 2014, 23(2): 9-19.
- [27] 李占斌, 周波, 马田田, 柯造成, 徐国策, 张祎, 于坤霞, 成玉婷. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 312-318.
- [28] 朱仁欢, 李玮, 郑子成, 李廷轩, 洪月, 何秋佳, 田宗渠. 退耕植茶地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(4): 612-619.
- [29] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.