

喀斯特区土地利用方式对石灰土团聚体 稳定性及其有机碳的影响

邓志豪, 杨 静, 戴全厚, 李青林, 董天富

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要: 通过野外采样与室内分析试验, 探究桂西北喀斯特区土地利用方式对石灰土土壤结构与肥力的影响。基于长期定位观测小区, 分析比较刈割草地(CD)、乡土树种(XT)、落叶果园(GY)、种植牧草(MC)、种植玉米(YM)5 种常见土地利用方式在石灰土表层(0—10 cm)和亚表层(10—20 cm)土壤的团聚体稳定性及其有机碳赋存特征。结果表明: 5 种土地利用方式下土壤机械稳定性团聚体含量均随粒级减小而减小, 水稳性团聚体含量随粒级减小表现为先减小后增大, 并且干湿筛团聚体粒级配比均以 >1 mm 粒径为主, 其范围分别为 67.04%~90.11%, 66.83%~84.65%。干筛下的团聚体稳定性指标平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)在表层和亚表层均为 $XT>MC\approx GY\approx YM>CD$, 湿筛下的 MWD 与 GMD 在表层差异明显($P<0.05$), 表现为 XT 和 MC 较高, CD 与 YM 相对较低。就全土有机碳含量而言, 表层均高于亚表层, 在表层土壤 MC、CD、XT 显著高于 GY 和 YM($P<0.05$), 在亚表层土壤仅 CD 较高。5 种土地利用方式下各级土壤团聚体有机碳含量与其全土有机碳含量相近。此外, 各土地利用方式团聚体有机碳贡献率总体上随团聚体粒级减小而减小, XT 和 MC 土壤团聚体稳定性与有机碳含量均较高, 研究结果以期为该区域土地利用结构调整提供理论支撑。

关键词: 喀斯特; 石灰土; 土地利用方式; 团聚体稳定性; 有机碳

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0114-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.017

Effects of Land Use Patterns on Aggregate Stability and Organic Carbon of Calcareous Soil in Karst Area

DENG Zhihao, YANG Jing, DAI Quanhao, LI Qinglin, DONG Tianfu

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Through field sampling and laboratory analysis, the effects of land use patterns on soil structure and fertility of calcareous soil in karst area of Northwest Guangxi were investigated. Based on the long-term observation plots, we selected five common land use patterns, including mowing grassland (CD), native tree species (XT), deciduous orchard (GY), planted pasture (MC) and planted maize (YM). The stability of soil aggregates and the characteristics of organic carbon in the surface (0—10 cm) and sub-surface (10—20 cm) soil of the five land use patterns were analyzed and compared. The results showed that the content of soil mechanical stable aggregates of the five land use patterns all decreased with the decreasing of particle size, and the content of water-stable aggregates decreased first and then increased with the decreasing of particle size. In addition, the soil aggregates measured by both dry and wet sieve methods were dominated by the aggregates that bigger than 1 mm, and their ratio ranged from 67.04% to 90.11% and from 66.83% to 84.65%, respectively. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) were employed to evaluate the stability of soil aggregates. Under the dry sieve method, MWD and GMD of both surface and subsurface soil followed the order of $XT>MC\approx GY\approx YM>CD$. Under the wet sieve method, MWD and GMD were significantly ($P<0.05$) different in surface soil, which were relatively higher in XT and MC, and relatively lower in CD and YM. The total soil organic carbon content was higher in surface soil than that in sub-surface soil, and it was significantly ($P<0.05$) higher in MC, CD and XT than those in GY

收稿日期: 2021-04-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41807175); 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础-ZK[2021]—一般 223); 贵州大学引进人才科研项目(2016(22))

第一作者: 邓志豪(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文与土壤侵蚀研究。E-mail: 857135523@qq.com

通信作者: 杨静(1987—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持与生态水文研究。E-mail: jyang13@gzu.edu.cn

and YM in surface soil, but only relatively higher in sub-surface soil in CD. The organic carbon content of soil aggregates at all levels was similar to the total soil organic carbon content under each land use patterns. In addition, the contribution rate of organic carbon of aggregates generally decreased with the decreasing of aggregated size under different land use patterns. The stability of soil aggregates and the organic carbon content were relatively higher in XT and MC. The results of this study could provide theoretical support for the adjustment of land use structure in this area.

Keywords: Karst; calcareous soil; land use pattern; aggregate stability; organic carbon

西南喀斯特地区是我国生态环境最为脆弱的地区之一,土壤浅薄、石多土少、基岩裸露率高,导致植被覆盖率低,水土流失严重,石漠化加剧^[1]。土地利用方式的变化显著影响喀斯特区的土壤质量与土壤肥力,同时改变了土壤的固碳能力,进而影响土壤生态系统碳循环^[2]。土壤团聚体作为土壤的基本物质和功能单位,对于保持土壤肥力、改善土壤结构、调节土壤生态环境具有重要作用^[3]。团聚体稳定性是评价土壤质量的重要指标,对内与团聚体的大小、分布和有机碳含量密切相关,对外则受土地利用方式、植被类型、耕作模式等诸多因素的影响^[4-5]。此外,团聚体也是土壤有机碳赋存的主要场所,对土壤有机碳的保持起到物理保护作用,而有机碳对于团聚体的形成和分布也有重要影响^[6]。因此,进行土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究,对于改良土壤物理性状,增加土壤固碳能力,提高土壤肥力具有重要的理论和实践意义。

近年来,人类活动与生态环境之间的相互作用越来越紧密,土地利用活动对土壤质量和肥力产生了重要影响^[3]。目前,国内外已开展较多有关土壤质量与土地利用格局变化的研究。已有研究^[7]表明,土地利用方式能够通过植被凋落物的分解从而影响土壤有机碳的积累,进而影响大团聚体与微团聚体的转化和分布。Dorji 等^[8]通过研究不丹西部山地生态系统的不同土地利用方式发现,团聚体稳定性主要受团聚体粒径分布与土壤有机碳的影响。Kabir 等^[9]研究发现,退耕还草有利于土壤团聚体的稳定。而在我国的喀斯特区,王进等^[10]研究发现,原生灌木林地在各层土壤中各粒级团聚体有机碳含量均较高,但魏亚伟等^[11]研究表明,原生林地土壤结构较好,可以有效维持土壤养分和有机碳含量。说明土地利用方式和植被覆盖类型在土壤团聚体的形成与稳定中发挥了重要作用,且影响了土壤有机碳的贮存特征。而关于桂西北喀斯特生态修复区,土地利用方式对土壤团聚体及其有机碳影响的研究依然较少。

鉴于此,本文基于中国科学院环江喀斯特生态系统研究站长期控制试验小区,以喀斯特石灰土为研究对象,比较了该地区 5 种常见土地利用方式在表层(0—10 cm)和亚表层(10—20 cm)土壤团聚体分布与稳定性的

差异,以及全土和团聚体中的有机碳赋存特征,旨在为该区土壤质量恢复和土地利用结构改进提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站(24°43′—24°44′N,108°18′—108°19′E)。该区域是典型的喀斯特地貌类型,流域总面积 146.1 hm²,海拔 272.0~647.2 m,属于中亚热带季风气候,年均气温 19.9 ℃,历年最高气温 38.7 ℃,最低气温 -5.2 ℃,年均日照时间 1 451 h,日照时间在 2 月最低,7 月最高。年均降水量 1 389.1 mm,降水充沛但季节分配不均,有明显的旱、雨季之分,4—9 月为雨季,平均持续 130~140 天,各月平均降水量 140 mm 以上,占全年降雨量的 70% 以上,其中 6—7 月降雨量最多,可达到 400 mm,10 月至翌年 3 月则为旱季,各月平均降水量在 90 mm 以下。坡地土壤是由白云岩发育而成的石灰土,石砾含量高,平均基岩裸露率为 30%,土层深度为 10—50 cm。土壤 pH 呈中性至微碱性,土壤质地见表 1。

表 1 不同土地利用方式土壤机械组成

土层	土地	砂粒	粉粒	黏粒
深度/cm	类型	(2~0.05 mm)/%	(0.05~0.002 mm)/%	(<0.002 mm)/%
0—10	MC	12.76±2.57	37.79±2.03	49.45±3.37
	CD	23.10±2.39	40.27±2.21	36.63±2.50
	XT	11.11±0.65	33.65±2.50	55.24±2.97
	GY	16.07±3.31	34.89±2.73	49.03±5.98
	YM	16.90±4.21	37.37±2.50	45.73±1.78
10—20	MC	14.83±0.77	35.72±1.40	49.45±1.80
	CD	20.21±1.24	38.61±1.60	41.18±1.40
	XT	14.01±1.92	34.89±1.01	51.10±2.74
	GY	14.83±4.10	36.55±2.70	48.62±5.75
	YM	19.79±3.48	36.55±1.73	43.66±2.88

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2 试验设计与样品采集

2006 年底在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站选取相对均一的东南向山坡(>25°)下部建立刈割草地(CD)、落叶果园(GY)、乡土树种(XT)、种植玉米(YM)、种植牧草(MC)5 种喀斯特峰丛洼地

常见的土地利用方式动态监测样地,投影面积约为 1 400 m² (20 m×70 m),动态监测样地修建前植被为灌草丛,优势种为圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium*)、黄荆(*Vitex negundo*)、臭蒿(*Artemisia hedinii*)等。刈割草地处理方式:每年 1 月砍伐,搬移,去除植物根系,土壤扰动大;落叶果园:以种植核桃、板栗果树为主;乡土树种:主要为皂角、盐肤木等本土乔木;种植玉米:种植春玉米,每年在 3 月中旬播种,7 月下旬收获;供试牧草品种为“桂牧 1 号”杂交象草,其生物量高、适应性强、耐刈割,是桂西北地区最重要的人工牧草。

分析样品于 2020 年 8 月采集,每种土地利用类型自上而下选取 10 m×10 m 样方 3 个,共 15 个样方。在每个样方内按“S”形随机采集 5 个样点合为 1 个样品,每个样方采集 3 个土样。通过挖土壤剖面的方式按 0—10,10—20 cm 分层采集原状土样,逐个装入硬质塑料饭盒内,并确保运输过程中不受挤压,以保持土样原有结构。土样带回实验室后,沿自然裂隙小心掰成直径约 1 cm 的小土块,去除植物残体和碎石块。土样摊平在透气通风处,使其自然风干后,将同一样方内相同土层深度的土样混合成 1 个混合样品,用于土壤团聚体等指标的测定。

1.3 测定方法

机械稳定性团聚体测定:称取 100.0 g 混合土样,置于孔径为 5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛上,利用电动筛分仪振荡 5 min,计算各粒级团聚体的质量百分比,每份土样 3 个重复。

水稳性团聚体测定:依据干筛的质量百分比,配成 3 份 50.0 g 土样,将土样均匀置于 5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛上,调整套筛水面高度,使土样充分湿润 5 min 后启动土壤团粒分析仪(XDB0601 型),以 30 次/min 的频率、3 cm 振幅上下振动 30 min。用清水将各粒级筛子上的团聚体洗入铝盒中,在 65 ℃ 下烘干至恒重,计算得到各粒级水稳性团聚体含量。

采用比重计法测定土壤机械组成,全土及各粒级团聚体中的有机碳用重铬酸钾外加热法^[12]测定。

为准确反映各土地利用方式对土壤团聚体稳定性特征的影响,本研究所选取的指标有平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体结构破坏率(PAD)和团聚体有机碳贡献率(CR_{soci})各评价指标计算公式为:

$$MWD = \sum_n \bar{X}_i \times M_i$$

$$GMD = \exp(\sum_n M_i \ln \bar{X}_i)$$

$$PAD = \frac{W_d - W_w}{W_d} \times 100\%$$

$$CR_{soci} = \frac{T_{soci} \times R_i}{Q_{soc}} \times 100\%$$

式中: n 为粒级分组的组数; $\bar{X}_i$ 为第 i 粒级团聚体的平均直径(mm); M_i 为第 i 粒级团聚体的质量分数(%); W_d 为 >0.25 mm 粒级机械稳定性团聚体含量(%); W_w 为 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量(%); T_{soci} 为第 i 粒级团聚体有机碳含量(g/kg); R_i 为第 i 粒级团聚体占团聚体总量的比率(%); Q_{soc} 为各层土壤有机碳含量(g/kg)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件和 SPSS 20 软件对数据进行整理和统计分析,应用单因素(One-Way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较($P < 0.05$),利用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤机械稳定性团聚体分布特征

由表 2 可知,喀斯特区石灰土土壤的机械稳定性团聚体主要为大团聚体,>1 mm 团聚体含量为 67.04%~90.11%,>0.25 mm 团聚体含量则在 94.84%以上。XT 土地利用方式>5 mm 团聚体含量在表层和亚表层土壤中分别为 56.42%和 50.70%,显著高于其他土地利用方式($P < 0.05$);而 CD 土地利用方式>5 mm 团聚体含量在表层和亚表层土壤中分别为 29.47%和 33.01%,显著低于其他土地利用方式($P < 0.05$)。不同土地利用方式下 5~2 mm 团聚体含量在表层土壤存在显著差异($P < 0.05$)表现为 MC 和 CD 显著高于 XT,而在亚表层土壤 5 种土地利用方式无明显差别。在 2~0.25 mm 各粒级团聚体分配比例中,CD 均高于其他 4 种土地利用方式。对于<0.25 mm 微团聚体分布而言,CD 和 YM 在表层土壤显著高于其余 3 种土地利用方式($P < 0.05$),而 5 种土地利用方式在亚表层土壤中无显著差异($P > 0.05$)。

在表层土壤中,除 CD 外其余土地利用方式在各粒级间的机械稳定性团聚体含量均表现为>5 mm 显著高于 5~2 mm,5~2 mm 显著高于 2~1,1~0.5 mm,2~1,1~0.5 mm 显著高于 0.5~0.25,<0.25 mm ($P < 0.05$);在亚表层土壤中,MC、XT 与 YM 在各粒级间的机械稳定性团聚体含量与表层一致,CD 和 GY 则表现为>5,5~2 mm 显著高于 2~1,1~0.5 mm,2~1,1~0.5 mm 显著高于 0.5~0.25,<0.25 mm ($P < 0.05$)。总体上,不同土地利用方式下土壤机械稳定性团聚体含量随团聚体粒径减小而减小。

2.2 不同土地利用方式土壤水稳性团聚体分布特征

>0.25 mm 粒径的水稳性大团聚体是衡量土壤团聚体稳定性的主要指标^[13]。由表 3 可知,喀斯特

区石灰土土壤水稳性团聚体主要分布在>0.25 mm 粒径的大团聚体上,5 种土地利用方式下>0.25 mm 大团聚体含量范围为 85.63%~90.77%,其中,>2 mm 的团聚体含量范围为 47.25%~75.74%,表明石灰土土壤稳定性较高。在表层土壤,不同土地利用方

式在>0.25 mm 粒径大团聚体含量间存在显著差异($P<0.05$),其含量为 XT(90.77%)>GY(88.88%)>MC(87.69%)>CD(86.69%)>YM(85.63%);在亚表层土壤,不同土地利用方式在>0.25 mm 粒径大团聚体含量间无显著差异($P>0.05$)。

表 2 不同土地利用方式下土壤机械稳定性团聚体组成

土层 深度/cm	土地 类型	土壤机械稳定性团聚体含量 %					
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0—10	MC	49.33±4.58Ab	20.29±2.02Bc	15.29±1.67Cab	10.41±1.31Cb	3.23±0.49Db	1.46±0.26Dbc
	CD	29.47±3.19Ac	22.20±1.73Bbc	16.47±2.02Ba	17.88±0.94Ba	8.81±0.88Ca	5.16±1.01Ca
	XT	56.42±2.67Aa	24.88±1.12Bb	8.81±1.11Cc	6.91±0.74Cc	2.05±0.20Db	0.93±0.05Dc
	GY	44.94±3.68Ab	28.52±1.41Ba	12.38±1.51Cabc	9.52±1.18Cbc	2.81±0.42Db	1.83±0.42Dbc
	YM	42.37±3.89Ab	29.06±1.73Ba	11.51±0.95Cbc	9.52±0.93CDbc	3.00±0.55Eb	4.54±2.29DEab
10—20	MC	46.44±4.51Aab	30.75±1.11Ba	9.50±1.71Cb	8.83±1.22Cb	2.68±0.48Db	1.79±0.72Da
	CD	33.01±3.51Ac	30.51±1.21Aa	14.66±2.05Ba	13.45±1.40Ba	5.50±0.81Ca	2.87±0.57Ca
	XT	50.70±2.78Aa	27.56±1.71Ba	8.35±0.86Cb	9.01±0.69Cb	2.98±0.27Db	1.39±0.11Da
	GY	37.38±3.49Abc	32.55±1.62Aa	14.13±1.69Ba	11.18±1.15Bab	3.03±0.37Cb	1.72±0.30Ca
	YM	45.00±4.64Aab	28.15±2.35Ba	11.49±1.02Cab	8.86±0.99CDb	2.93±0.48Db	3.57±1.48Da

注:表中数据为平均值±标准误;同行不同大写字母表示同一土地利用方式在不同粒径团聚体间的差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示同一粒径团聚体在不同土地利用方式间的差异显著($P<0.05$)。下同。

表 3 不同土地利用方式下土壤水稳性团聚体组成

土层 深度/cm	土地 类型	土壤水稳性团聚体含量 %					
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0—10	MC	46.24±3.34Ab	19.74±0.74Ba	12.79±1.33Cb	7.23±0.81Dc	1.70±0.25Ed	12.31±0.99Cb
	CD	25.22±1.85Ad	22.03±1.13Ba	19.58±0.59Ba	14.90±1.01Ca	4.96±0.43Da	13.31±0.83Cab
	XT	53.95±2.63Aa	21.79±0.81Ba	8.91±0.86Cc	4.78±0.44Dd	1.34±0.14Dd	9.23±0.70Cc
	GY	37.38±2.10Ac	22.39±0.68Ba	17.68±1.14Ca	8.90±0.34Dbc	2.54±0.10Ec	11.12±0.81Dbc
	YM	33.02±1.60Ac	20.78±0.90Ba	18.63±1.15Ba	9.63±0.23Db	3.57±0.36Eb	14.37±1.67Ca
10—20	MC	45.65±2.66Aa	19.47±0.62Bab	13.31±1.36Cb	7.48±0.77Db	2.12±0.24Ea	11.97±0.43Ca
	CD	32.73±1.52Ab	28.62±1.45Ba	15.08±0.78Cc	9.68±0.87Ca	2.43±0.38Da	11.45±0.56Ca
	XT	40.80±4.07Aab	18.47±0.90Bb	17.84±2.02Bab	8.35±0.97Cab	2.57±0.35Da	11.97±0.54Ca
	GY	34.38±1.25Ab	23.02±1.87Ba	18.37±1.10Ca	9.19±0.21Eab	2.48±0.12Fa	12.56±0.52Da
	YM	41.44±2.88Aab	19.35±1.48Bab	15.80±1.75BCab	7.30±0.44Db	2.53±0.25Ea	13.59±1.13Ca

在表层土壤中,XT、MC 和 GY 在各粒级间的水稳性团聚体含量表现为>5 mm 显著高于 5~2 mm,5~2 mm 显著高于 2~1,<0.25 mm,1~0.5,0.5~0.25 mm 则显著低于其他粒级($P<0.05$),YM 和 CD 在各粒级间的水稳性团聚体含量表现为>5 mm 显著高于 5~2,2~1 mm,5~2,2~1 mm 显著高于 1~0.5,<0.25 mm,1~0.5,<0.25 mm 显著高于 0.5~0.25 mm ($P<0.05$);在亚表层土壤中,5 种土地利用方式在各粒级间的水稳性团聚体含量亦表现为>5 mm 显著高于 5~2 mm,0.5~0.25 mm 显著低于其他粒级($P<0.05$)。总体上,土壤水稳性团聚体含量随粒径减小表现为先减小后增大。

(表 4)。由图 1 可知,干筛情况下,不同土地利用方式在不同土壤层次上机械稳定性团聚体的 MWD 和 GMD 值均表现为 XT>MC≈GY≈YM>CD,说明 XT 土壤团聚体稳定性最强,而 CD 相对较弱。MC、XT、YM 的 MWD 与 GMD 值在亚表层上差异不显著,但在表层差异显著($P<0.05$),说明不同土地方式对喀斯特石灰土土壤表层团聚体的分布状况影响较大,而对下层土壤团聚体影响较小。不同土地类型机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 在不同土层上的变化趋势相同。

2.3 不同土地利用方式土壤团聚体稳定性分析

5 种土地利用方式的 PAD 值在土壤表层和亚表层均较低,其范围为 8.38%~11.02%,且无明显差异

湿筛情况下,不同土地类型土壤水稳性团聚体 MWD 介于 2.49~3.66 mm,均值为 3.08 mm。表层土壤水稳性团聚体 MWD 值在不同土地类型下差异显著($P<0.05$),表现为 XT 显著高于 MC,MC 显著高于 GY 和 YM,GY 和 YM 显著高于 CD;CD、XT

和 YM 的 MWD 值在亚表层无明显差异,而 MC 显著高于 GY($P<0.05$)。在同一土地利用类型下,不同土层深度土壤水稳性团聚体 MWD 值表现出不同的趋势,XT 土壤团聚体 MWD 在表层比亚表层高 0.60 mm,而 CD 的 MWD 表层比亚表层低 0.47 mm,其余土地利用方式表层和亚表层 MWD 差值的绝对值为 0.03~0.31 mm。不同土地利用类型土壤团聚体 GMD 与 MWD 在不同土层深度间表现出相似的变化趋势。5 种土地类型土壤团聚体 GMD 介于 1.62~2.78 mm,均值为 2.20 mm。表层土壤团聚体 GMD 值在不同土地类型下表现为 $XT>MC\approx GY>YM>CD$,在亚表层除 GY 外其余土地利用方式土壤团聚体 GMD 则无显著差异($P>0.05$)。

2.4 不同土地利用方式土壤全土与团聚体有机碳分布特征

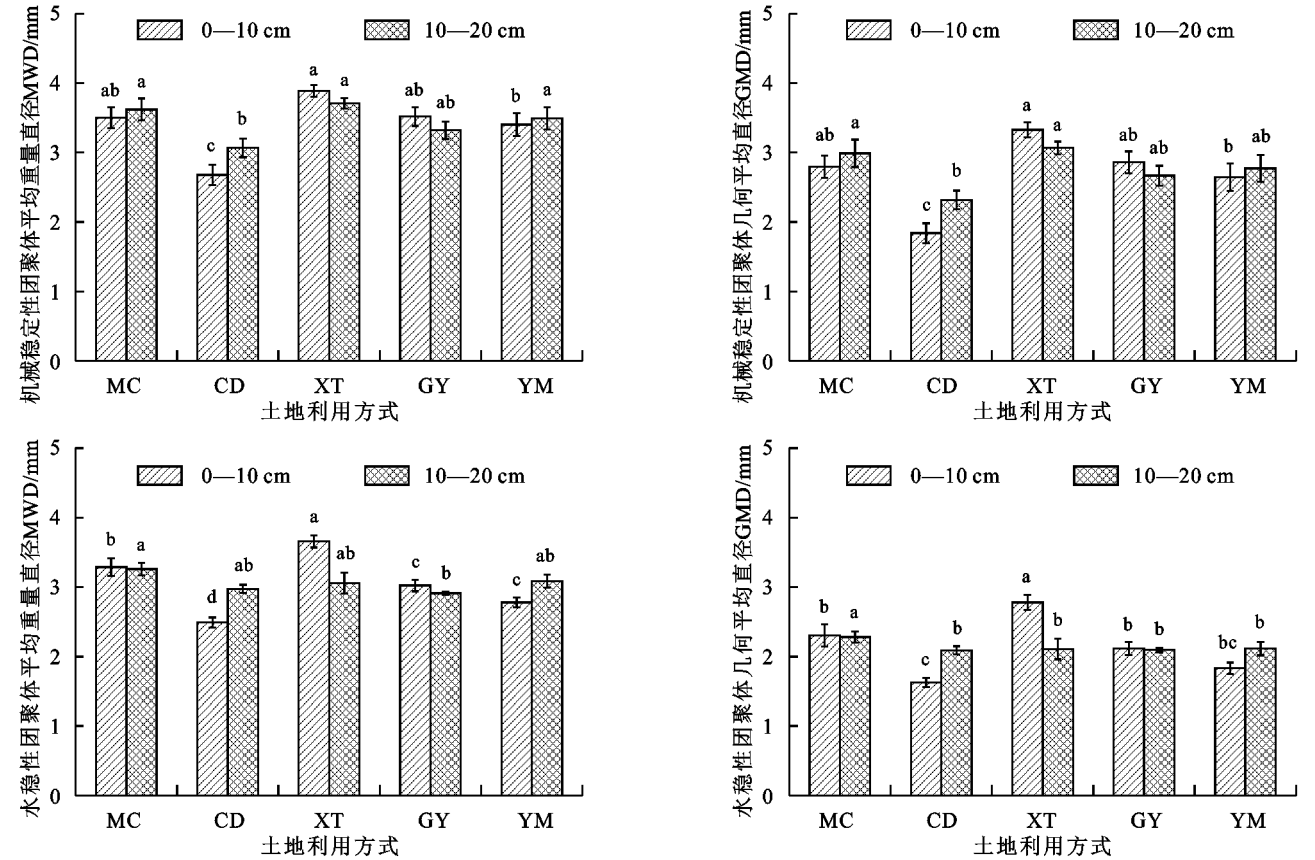
由表 5 可知,5 种土地利用方式下全土有机碳含量均为表层高于亚表层,其中,MC、XT 在表层土壤的有机碳含量分别为 56.39,53.50 g/kg,分别是亚表层的 1.54,

1.72 倍,MC 与 XT 全土有机碳含量在不同土层上差别较大。不同土地利用方式下全土有机碳含量在表层土壤上表现为 $MC\approx CD\approx XT>GY\approx YM$;而在亚表土层,除 CD(50.91 g/kg)有机碳含量较高外,其余土地利用方式间无显著差异($P>0.05$)。

表 4 不同土地利用方式下土壤团聚体破坏率变化特征

土地类型	土层深度/cm	PAD/%
MC	0—10	11.01±0.88a
	10—20	10.36±0.68a
CD	0—10	8.59±1.17a
	10—20	8.83±0.63a
XT	0—10	8.38±0.71a
	10—20	10.73±0.58a
GY	0—10	9.46±0.74a
	10—20	11.02±0.55a
YM	0—10	10.29±1.80a
	10—20	10.39±1.09a

注:同列不同小写字母表示同一土层深度不同土地利用方式间的差异显著性($P<0.05$)。下同。



注:图柱上方不同小写字母表示同一土层不同土地利用方式间的差异显著性($P<0.05$)。

图 1 不同土地利用方式下土壤团聚体 MWD 与 GMD 变化特征

从图 2 可以看出,对于不同土地利用方式下各粒级团聚体有机碳含量而言,表层团聚体有机碳均高于亚表层,这与全土有机碳含量在不同土层的结果相对应。在表层土壤,MC 与 CD 在各粒级的土壤有机碳含量均显著高于 XT、GY 和 YM($P<0.05$),而 XT、GY、YM 3 种

土地利用方式之间的团聚体有机碳含量无明显差别。此外,各土地利用方式下土壤团聚体有机碳含量在各粒级均无显著差异($P>0.05$)。在亚表层土壤,CD 各粒级团聚体的有机碳含量均显著高于其余 4 种土地利用方式($P<0.05$),MC、XT、GY 和 YM 有机碳含量在各

粒级间无显著差异($P>0.05$)。

由表 6 可知,除 CD 外, $>5, 5\sim 2\text{ mm}$ 粒级团聚体对有机碳贡献率较大,二者对全土有机碳的贡献率显著高于其他粒级团聚体($P<0.05$),而 $0.5\sim 0.25, <0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体对有机碳贡献率最小,合计对全土有机碳贡献率低于 10%,这与干筛团聚体含量分布特征相似。团聚体有机碳对全土有机碳的贡献率总体上随团聚体粒径的减小而减小。

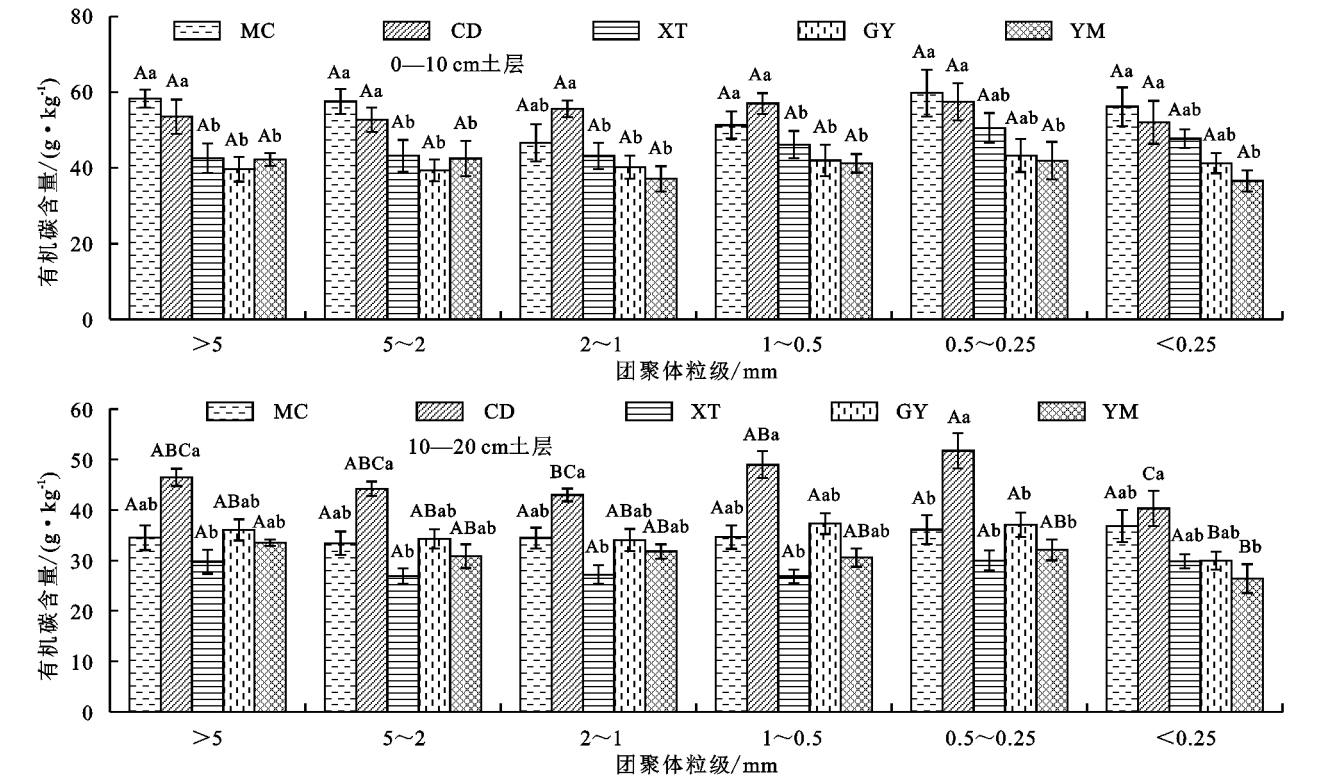
表 5 不同土地利用方式在表层与亚表层的全土有机碳含量

土地类型	土层	有机碳含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	深度/cm	
MC	0—10	$56.39\pm 3.00\text{a}$
	10—20	$36.58\pm 1.25\text{b}$
CD	0—10	$56.50\pm 1.20\text{a}$
	10—20	$50.91\pm 1.69\text{a}$
XT	0—10	$53.50\pm 3.61\text{a}$
	10—20	$31.03\pm 1.82\text{b}$
GY	0—10	$40.71\pm 3.28\text{b}$
	10—20	$35.48\pm 1.73\text{b}$
YM	0—10	$40.57\pm 1.68\text{b}$
	10—20	$31.29\pm 2.09\text{b}$

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对团聚体分布与稳定性的影响

土壤团聚体的分布特征受多种因素影响,其中土地利用方式和土壤理化性质能够直接影响土壤团聚体分布^[13]。本研究中,喀斯特石灰土区 5 种土地利用方式下土壤团粒结构主要以大团聚体($>0.25\text{ mm}$)为主,其中 $>2\text{ mm}$ 粒径的团聚体含量干湿筛分别为 50.67%~81.30%和 47.25%~75.74%,且干湿之间差值较小,说明该区石灰土土壤稳定性较好,有较强的抗侵蚀能力。这与胡乐宁等^[14]、俞月凤等^[15]研究喀斯特石灰土区土壤粒径分布规律的结果基本一致,其原因可能是石灰土中含有大量的钙离子易与有机质结合形成胶结物质形促进了大团聚体的形成^[16]。本研究还发现,XT 和 MC 土壤的机械稳定性与水稳性大团聚体($>1\text{ mm}$)含量均有较高水平,这可能与乡土树种和牧草均有较为发达的根系有关,植物根系在土壤中的穿插作用、根土黏结作用等能够使根际周围的细小颗粒不断形成较大颗粒,导致大团聚体比较小粒径团聚体含量更高^[17]。



注:不同小写字母表示同一土壤粒级下不同土地利用方式间的差异显著性($P<0.05$);不同大写字母表示同一土地利用方式下不同土壤粒径间的差异显著性($P<0.05$)。

图 2 不同土地利用方式下土壤各粒级团聚体有机碳含量

土壤团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 值越大、PAD 值越小,表明土壤稳定性越好,团聚度越强。本研究发现,除 CD 土壤外,YM、GY 机械稳定性团聚体与水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 值均无明显差异,且低于 XT 和 MC。这主要是由于耕作所引起 YM 和 GY 的土

壤扰动会导致土壤有机碳损耗和稳定性团聚体降低^[18]。土壤有机碳是影响团聚体稳定性的重要因素,二者在一定范围内存在正反馈效应^[19]。XT 土壤由于地表凋落物含量高,微生物群落在其分解过程中引发的生物化学反应能够改良土壤结构,加强土壤团

聚体稳定^[20]。MC 由于其自身生物量较高且根系发达,一方面降低了雨水对表层土壤的破坏;另一方面根系的物理保护作用和根系分泌物增加了土壤团聚体的稳定性^[17]。在不同土层上的研究结果表明,与其他 4 种土地利用方式相比,CD 的 MWD 与 GMD

在亚表层明显高于表层。可能的原因在于 CD 经过刈割除根后对表层土壤有较大扰动,破坏了团聚体结构,导致团聚体稳定性降低。此外,5 种土地利用方式在 2 土层的 PAD 值范围为 8.38%~11.02%,团聚体破坏率较低,说明石灰土土壤结构非常稳定。

表 6 不同土地利用方式下土壤各粒级团聚体有机碳对全土有机碳的贡献率 单位: %

土层深度/cm	土地类型	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0—10	MC	53.56±6.84Aa	21.70±3.27Bab	13.39±2.20Cab	9.57±1.39CDb	3.22±0.46Db	1.55±0.40Dab
	CD	27.88±2.65Ab	19.09±2.22Bb	16.32±2.12Ba	18.90±0.95Ba	8.81±0.94Ca	4.42±0.80Ca
	XT	43.95±1.67Aa	16.65±1.69Bb	7.13±0.98Cc	6.04±0.78Cc	1.96±0.23Db	0.84±0.04Db
	GY	43.65±3.79Aa	27.84±1.84Ba	12.26±1.52Cab	9.95±1.42Cb	3.00±0.50Db	1.82±0.39Dab
	YM	44.78±5.08Aa	29.85±2.91Ba	10.51±1.19Cbc	9.82±1.20Cb	3.39±0.89Cb	4.36±2.22Ca
10—20	MC	43.73±4.62Aab	27.81±1.30Ba	8.56±1.33Cbc	8.27±1.18Cb	2.64±0.51CDb	1.67±0.52Da
	CD	30.09±3.05Ab	27.13±2.21Aa	12.51±1.93Bab	13.25±1.92Ba	5.70±1.15Ca	2.24±0.52Ca
	XT	50.18±6.15Aa	24.05±1.59Ba	7.34±0.81Cc	7.99±0.78Cb	2.90±0.29Cb	1.34±0.09Ca
	GY	37.64±3.62Aab	31.82±2.50Ba	13.41±1.66Ca	11.92±1.53Cab	3.18±0.44Db	1.40±0.19Da
	YM	48.34±4.93Aa	29.01±3.93Ba	12.42±1.80Cab	8.89±1.17CDb	3.05±0.51Db	2.55±0.93Da

3.2 不同土地利用方式对全土与团聚体有机碳的影响

土地利用方式是影响土壤有机碳含量变化的主要因素之一^[2]。本研究中表层土壤有机碳含量高于亚表层,且 CD 在表层和亚表层土壤的有机碳含量均相对较高,这可能与我们在实验过程中发现 CD 小区内含有大量半风化碎石有关,有研究^[21]表明,碎石风化物在一定程度上可增加土壤有机质含量,且相比于其他 4 种土地利用方式,CD 经过刈割除根土壤表面残存腐殖质较多,以及由于土壤扰动大且砂粒和粉粒含量较高,土壤通透性较好,也有利于有机碳的积累^[22]。表层较高的原因可能是由于植被枯枝落叶覆盖于土壤表层,形成的腐殖质增加了土壤有机碳含量^[20]。

土壤有机碳含量与各粒级土壤团聚体分布特征紧密相关^[5]。表层中同一土地利用方式下土壤团聚体有机碳含量在各粒级间无明显差异。亚表层中除 CD 土壤团聚体有机碳含量在各粒级间无明显差异外,其余土地利用方式在各粒级间均存在差异。这说明土层深度是影响不同土地利用方式下团聚体有机碳含量的重要因素。相同粒径下 CD 在表层与亚表层的团聚体有机碳含量显著高于其他土地利用方式,这与全土有机碳的变化趋势一致。团聚体有机碳对全土有机碳的贡献取决于团聚体的分布及其有机碳含量^[23]。白怡婧等^[24]在对贵州黄壤地区土壤有机碳的研究中表明,>0.25 mm 大团聚体中有机碳对土壤有机碳贡献率达到 78%以上。王兴等^[25]通过对黄土丘陵区撂荒草地有机碳的研究认为,大团聚体的数量和有机碳显著促进了土壤有机碳的累积。本研究中,总体来看同一土地利用方式团聚体有机碳贡献率

与粒级大小呈正相关,大团聚(>0.25 mm)体有机碳贡献率高达 95%,其与干筛团聚体分布一致。说明大团聚体是保持土壤有机碳的主要成分,其主要是因为较大粒径的团聚体含量占了绝对优势且各粒级团聚体有机碳含量差别不大。

4 结 论

本研究 5 种土地利用方式下土壤机械稳定性与水稳性大团聚体(>1 mm)含量在 XT 和 MC 中表现最高,XT 和 MC 的 MWD 与 GMD 也相对较高,稳定性强。表层全土和团聚体有机碳含量均高于亚表层,而表层中 XT、MC 和 CD 的全土有机碳含量较高。土地利用方式对亚表层各团聚体有机碳含量影响高于表层,MC 和 CD 的各粒级团聚体有机碳含量在表层相对较高,亚表层中各粒级团聚体有机碳含量以 CD 最高,团聚体有机碳贡献率随粒径减小而下降。因此,在桂西北喀斯特石灰土地区,种植乡土树种与牧草的土壤结构相对较好,种植牧草土壤有机碳含量相对较高,其对于改良土壤质量有积极作用。

参考文献:

[1] 陈洪松,冯腾,李成志,等.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J].水土保持学报,2018,32(1):10-16.
[2] 陈高起,傅瓦利,沈艳,等.岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):123-129.
[3] An S S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub

vegetation on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2010, 81(3): 226-233.

[4] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759-768.

[5] Tang Y Q, Li J, Zhang X H, et al. Fractal characteristics and stability of soil aggregates in karst rocky desertification areas[J]. Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, 2013, 65(1): 563-579.

[6] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6326-6336.

[7] 张新荣, 刘林萍, 方石, 等. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 2013-2021.

[8] Dorji T, Field D J, Odeh I O A. Soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon under different land use or land cover types[J]. Soil Use and Management, 2020, 36(2): 308-319.

[9] Kabir E B, Bashari H, Mosaddeghi M R, et al. Soil aggregate stability and organic matter as affected by land-use change in central Iran[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(13): 1823-1837.

[10] 王进, 刘子琦, 鲍恩保, 等. 喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 249-256.

[11] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 971-978.

[12] 鲍仕旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 42-50.

[13] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. 土壤, 2018, 50(5): 853-865.

[14] 胡乐宁, 苏以荣, 何寻阳, 桂西北喀斯特地区典型土壤在不同筛分强度下团聚体的稳定性[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 236-241.

[15] 俞月凤, 卢凌霄, 杜虎, 等. 不同类型森林石灰土的团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 西北植物学报, 2013, 33(5): 1011-1019.

[16] 任娇娇, 周运超, 刘兵, 等. 石灰岩发育土壤团聚体形成机制研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 722-728.

[17] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-273, 298.

[18] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 等. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6991-6999.

[19] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1523-1529.

[20] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(9): 1363-1371.

[21] 董起广, 曲少东, 黎雅楠, 等. 碎石风化物对土壤理化性质及稳定性的影响[J]. 南方农业, 2020, 14(16): 20-23.

[22] 王秀丽, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 北京山区土壤有机碳分布及其影响因素研究[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1152-1158.

[23] Wei X R, Li X Z, Jia X X, et al. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(6): 637-646.

[24] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 土壤, 2021, 53(1): 161-167.

[25] 王兴, 钟泽坤, 韩新辉, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2416-2424.

(上接第 113 页)

[18] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 128-134.

[19] 郑庆福, 王永和, 孙月光, 等. 不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 962-966.

[20] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.

[21] 李文娟, 颜永毫, 郑纪勇, 等. 生物炭对黄土高原不同质地土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运移特征的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 60-63, 68.

[22] 林婉嫔, 夏建国, 肖欣娟, 等. 不同热解温度茶渣生物炭对茶园土壤吸附解吸 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 326-331.

[23] 宋彬, 孙茹茹, 梁宏旭, 等. 添加木质素和生物炭对土壤氮、磷养分及水分损失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 227-232, 241.

[24] 刘国子, 杨凤根, 许斌. 生物炭对土壤氮素淋失影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 139-149.