

轮作休耕模式对土壤团聚体及有机碳含量的影响

夏梓泰, 程伟威, 李永梅, 赵吉霞, 范茂攀

(云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:为探究轮作休耕模式对红壤坡耕地团聚体稳定性及有机碳含量的影响,通过田间试验设置了休闲地、玉米单作、玉米-豌豆-玉米和玉米-苕子-玉米 4 个处理,分析了不同种植模式下土壤团聚体稳定性及有机碳含量,结果表明:(1)不同种植模式下土壤机械稳定性和水稳定性团聚体组成均以 ≥ 0.25 mm 粒径占比最高,机械稳定性团聚体占比在 80.68% 以上,水稳定性团聚体达到了 77.05% 以上,且 ≥ 0.25 mm 团聚体所占比例大小顺序为:休闲地 $>$ 玉米-豌豆-玉米 $>$ 玉米-苕子-玉米 $>$ 玉米单作。(2)根据不同团聚体稳定指数(MWD, GMD, $R_{0.25}$ 和 PAD)显示,休闲地的团聚体稳定性最好,与玉米单作之间差异显著,且休闲地和玉米轮作两种模式下团聚体稳定性均优于玉米单作。(3)玉米单作土壤团聚体有机碳含量最低,玉米轮作和休闲地能显著提高有机碳含量,并且玉米-苕子-玉米轮作效果最优; ≥ 0.25 mm 粒径范围的团聚体储存的有机碳含量最高。(4)通过对土壤水稳性团聚体稳定指数与有机碳含量的相关性分析表明,4 个不同团聚体稳定指数与有机碳含量都呈极显著正相关关系,与 $R_{0.25}$ 相关程度最高。研究结果可为试验区域坡耕地水土流失防治提供理论依据。

关键词:轮作; 休耕; 土壤团聚体; 有机碳

中图分类号:S157.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0031-07

Effects of Crop Rotation and Fallow Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Content

XIA Zitai, CHENG Weiwei, LI Yongmei, ZHAO Jixia, FAN Maopan

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to explore the effect of crop rotation and fallow patterns on the aggregate stability and organic carbon content of red soil sloping farmland, we set up four treatments of fallow land, maize monocropping, maize-pea-maize and maize-vetch-maize through field experiments. The soil aggregate stability and organic carbon content under different planting patterns were analyzed. The results show that: (1) the soil mechanical stability and water stability under different planting patterns have the highest proportion of soil aggregates with a size of ≥ 0.25 mm; mechanical stability aggregates account for more than 80.68%, water-stable aggregates reach to more than 77.05%, and the proportion of ≥ 0.25 mm aggregates decrease in the order: fallow land $>$ maize-peas-maize $>$ maize-vetch-maize $>$ maize monocropping; (2) according to different aggregate stability indexes (MWD, GMD, $R_{0.25}$ and PAD), the aggregate stability of fallow land is the best, which is significantly different from maize monocropping, in addition, the stability of aggregate in both fallow land and maize rotation is better than that in the maize monocropping; (3) soil aggregates in maize monocropping have the lowest organic carbon content; maize rotation and fallow land can significantly increase organic carbon content, and the effect of maize-vetch-maize rotation is the best; aggregates with size range of ≥ 0.25 mm can store the highest carbon content; (4) the analysis of the correlation between the soil water-stable aggregate stability index and the organic carbon content shows that the four different aggregate stability indexes have a positive significant correlation with the organic carbon content, and have the highest correlation with $R_{0.25}$. These results of this study can provide a theoretical basis for the prevention and

收稿日期: 2021-04-17

修回日期: 2021-05-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41661063); 云南省农业基础研究联合专项(2017FG001-045); 云南农业大学学生科技创新创业行动(2021ZXK106)

第一作者: 夏梓泰(1996—), 男, 云南富源人, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1689283770@qq.com

通信作者: 范茂攀(1977—), 男, 云南宣威人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤培肥与水土保持方面的研究。E-mail: mpfan@126.com

control of soil erosion on sloping farmland in the test area.

Keywords: crop rotation; fallow; soil aggregate; organic carbon

土壤团聚体是土壤结构和功能的基本单位,是农田土壤的重要组成部分^[1-2]。作为衡量土壤质量的指标之一,团聚体不仅仅决定土壤结构的稳定性,还与土壤物理性质和抗侵蚀能力等有着直接联系^[3-4]。土壤有机碳是陆地生态系统中最大的碳库,其含量约占陆地生物圈碳库的 2/3^[5],土壤中的有机碳轻微的变化也会对全球的碳平衡产生很大影响^[6]。土壤团聚体与有机碳关系紧密。土壤表层中的有机碳约 90% 储存在团聚体中^[7],团聚体对有机碳提供物理保护的作用,前者能够通过调节其内外氧气和水分的流通情况来降低微生物对有机碳的矿化分解^[8]。而有机碳是团聚体形成的物质基础,在土壤团聚过程中起胶结的作用^[9]。

2016 年 6 月 24 日,我国颁发《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》,轮作休耕制度能增加土壤有机质,提升土壤肥力,改善耕地质量,促进耕地永续利用^[10]。在我国云南省滇中地区土壤类型主要以红壤为主,由于长期的不合理耕种和土壤管理,导致该地区土壤质量下降,水土流失严重,进而影响作物产量和土壤资源的可持续利用^[11],对当地粮食安全造成一定的隐患,云南省坡耕地所产生的土壤侵蚀量达到全省总量的 40%^[12],鉴于此,本研究通过在云南省滇中红壤地区坡耕地进行田间试验,分析玉米轮作休耕体系下土壤团聚体稳定性及有机碳含量特征,旨在为当地坡耕地水土保持和农业可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于云南省昆明市盘龙区松华坝水源区大摆社区(25°2′28.8″N,102°58′39.7″E),坡度为 10°,属亚热带季风气候,海拔为 2 234 m,年降水量 900~1 000 mm,年平均气温 16℃。该试验地土壤基本理化性质为:pH 6.29,有机质 30.15 g/kg,全氮 1.14 g/kg,碱解氮 115.3 mg/kg,速效磷 6.41 mg/kg,速效钾 92.36 mg/kg。

1.2 试验材料

供试作物:玉米品种为云瑞“88”;苕子和豌豆品种为当地普遍采用的白花矮茎豌豆和毛叶紫花苕。

1.3 试验设计

本试验小区面积为 4 m×5 m,坡度为 10°,试验设 4 个处理,玉米-苕子-玉米轮作(Z-L-Z)、玉米-豌豆-玉米轮作(Z-S-Z)、玉米单作(ZZ)、休闲地(AW),每个处理三次重复,共 12 个小区,区组内小区随机排

列。其中,玉米-苕子-玉米轮作从 2018 年夏季种植玉米,冬季种植苕子,2019 年夏季种植玉米;玉米-豌豆-玉米轮作从 2018 年夏季种植玉米,冬季种植豌豆,2019 年夏季种植玉米;玉米单作从 2018 年夏季种植玉米,冬季休闲,2019 年夏季种植玉米;休闲地则为撂荒处理,休闲地中生长的植被主要有:三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、大狗尾草(*Setaria faberii*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、野燕麦(*Avena fatua*)、异形莎草(*Cyperus difformis*)、风轮(*Clinopodium chinense*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、薇甘菊(*Mikania micrantha*)、紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)。

玉米采用宽窄行种植,宽行 80 cm,窄行 40 cm,株距 25 cm。播种模式为穴播,种植时每穴两粒,待出苗后两株取其一,单个小区植株共计 9 行,每行 16 株。苕子和豌豆采用撒播种植方式,将种子均匀撒于种完玉米的小区里,然后结合中耕、除草稍微翻动表土,播种深度(覆土厚度)为 2—3 cm。玉米施肥采取单株精准施肥模式,玉米施 N 315 kg/hm²,P₂O₅ 120 kg/hm²,K₂O 120 kg/hm²,其中氮肥分两次(50%做基肥,50%做追肥),追肥在喇叭口期进行,磷肥和钾肥全部做基肥施用;苕子和豌豆作为绿肥作物,不做施肥处理。玉米在播种、施肥、灌水后采用塑料透明薄膜覆盖。在作物各个生长期,根据作物的长势情况,适时进行灌水作业,为避免扰动土壤,原则上不做除草工作。在轮作完豌豆及苕子后对其翻压处理。休闲地小区不进行耕作等田间管理。

1.4 样品采集与处理

1.4.1 样品采集 于 2019 年玉米完熟期采用“S”型五点取样方法进行土壤样品采集,在每个小区分别采集 0—20 cm 和 20—40 cm 两个土层的土样,在采样和运输过程中避免挤压和扰动,保持土壤的原状结构,以免破坏团聚体。采样后将土样按其自然结构掰成直径约 5 cm 的土块,剔除石块和植物根系等杂物,在实验室进行风干以用于团聚体和有机碳的测定。

1.4.2 样品处理 团聚体测定^[13]:将风干后的土壤样品,置于不同孔径的套筛顶部,然后安装好底盒和筛盖,再进行振荡,左右振幅为 10 cm,频率为 150 次/min,振荡时间为 2 min。随后对各粒级机械稳定性团聚体称重后计算其质量百分含量,并按各粒级质量比收集 100 g 混合土样。将 100 g 混合土样放置于团聚体分析仪中,保证水没过筛底部,且振动时不没

过其顶部,进行以上下振幅 3 cm,频率 30 次/min,20 min 后将各粒级水稳性团聚体冲入铝盒中,105℃烘干 12 h 后计算各粒级水稳性团聚体质量。

有机碳测定^[14]:首先进行土壤酸化,每次称取 0.1 g(±5%)倒入取样舟,用 0.1 mol/l 的盐酸滴定样品;再放进烘箱将样品风干(调温 105~110℃),4 h 后打开箱门,将取样舟静置 24 h;随后,将静置的样品进行编号,采用 multi N/C 3100 TOC 总有机碳/总氮分析仪进行测定。

1.5 数据分析

平均质量直径(MWD,mm)^[2]:

$$MWD=\sum_{i=1}^n \overline{d_i} w_i \tag{1}$$

式中: $\overline{d_i}$ 为各粒级水稳性团聚体平均直径(mm); w_i 为各粒级水稳性团聚体质量百分数(%)。

几何平均直径(GMD,mm)^[2]:

$$GMD=\exp\left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \overline{d_i}\right)}{\left(\sum_{i=1}^n w_i\right)}\right] \tag{2}$$

式中: $\overline{d_i}$ 为各粒级水稳性团聚体平均直径(mm); w_i 为各粒级水稳性团聚体质量百分数(%)。

>0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{>0.25}$)^[2]:

$$R_{>0.25}=\frac{M_{r>0.25}}{M_T} \tag{3}$$

式中: $R_{>0.25}$ 为粒径>0.25 mm 水稳性团聚体含量(%); $M_{r>0.25}$ 为粒径>0.25 mm 水稳性团聚体质量(g); M_T 为水稳性团聚体总质量(g)。

结构体破坏率(PAD,%)^[15]:

$$PAD=\frac{w_{x0.25}-w_{w0.25}}{w_{x0.25}}\times 100\% \tag{4}$$

式中: $w_{x0.25}$ 为>0.25 mm 机械稳定性团聚体质量(g); $w_{w0.25}$ 为>0.25 mm 水稳性团聚体质量(g)

使用 Microsoft Excel 2010 软件进行试验数据处理和图表制作,用 SPSS 22.0 软件进行单因素 ANOVA 分析以及 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 轮作休耕模式下土壤团聚体组成特征

2.1.1 土壤机械稳定性团聚体组成特征 土壤机械稳定性团聚体能抵抗机械破坏,是评价土壤结构好坏的指标之一^[16]。轮作休耕模式下土壤机械稳定性团聚体组成特征见表 1,从不同粒径来看,在≥0.25 mm 粒径范围,随粒径的减小含量呈现先增大后减小的趋势;而在<0.25 mm 粒径范围,随粒径的减小含量也随之减小。从不同土层来看,20—40 cm 土层的≥0.25 mm 大团聚体高于 0—20 cm,说明大团聚体随土层深度增加呈增加的趋势;在 0—20 cm 土层,不同种植模式下粒径为≥0.25 mm 大团聚体所占比例大小顺序为 AW>Z-L-Z>Z-S-Z>ZZ,AW 与 ZZ 差异显著($p<0.05$);在 20—40 cm 土层,不同种植模式下粒径为≥0.25 mm 大团聚体所占比例大小顺序为 AW>Z-S-Z>ZZ>Z-L-Z,各处理间差异不显著。

从整体来看,4 种植模式下的土壤≥0.25 mm 大团聚体含量占比都在 80.68%以上,其中,AW 高于其他处理至少 4.1%,并且 AW 处理下,>5 mm 粒径的大团聚体显著高于其他处理 64.5%~77.9%($p<0.05$),另外,除了 AW 外,其余 3 种植植模式下团聚体组成中皆为 2~5 mm 占比最高,由此可知,不同处理下土壤中≥0.25 mm 大团聚体占主要比例,且 AW 处理高于其他处理。

表 1 轮作休耕模式下不同土层机械稳定性团聚体粒级分布

土层/cm	处理	土壤团聚体组成/%								
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.106~0.25 mm	<0.106 mm	<0.25 mm	≥0.25 mm
0—20	Z-L-Z	10.60±1.56ab	29.89±3.19a	19.24±1.11a	16.43±0.56a	8.03±0.69a	10.72±2.46a	5.08±2.03a	15.81±3.61ab	84.19±7.84ab
	Z-S-Z	11.29±1.95ab	27.80±1.99ab	18.78±0.28ab	16.97±0.60a	8.80±0.53a	11.78±1.49a	4.58±1.52ab	16.36±3.91ab	83.64±6.75ab
	ZZ	9.63±1.63b	26.39±1.42ab	18.68±1.05ab	16.98±0.94a	9.01±0.92a	12.84±1.21a	6.48±0.86a	19.32±3.35a	80.68±6.52b
	AW	36.16±0.75a	20.88±2.55b	14.23±0.55b	11.33±0.87b	5.21±0.52b	7.36±0.91b	4.83±0.63ab	12.19±1.49b	87.81±10.66a
20—40	Z-L-Z	11.75±0.42c	29.23±2.79a	19.99±0.61a	16.07±0.51a	7.67±0.75a	10.39±1.25a	4.89±0.78a	15.28±2.94a	84.72±7.52ab
	Z-S-Z	18.88±1.19b	30.84±1.16a	18.37±0.28a	14.40±0.72a	6.18±0.69ab	7.47±0.97ab	3.85±0.72ab	11.32±2.01ab	88.68±8.02ab
	ZZ	15.90±5.15b	29.63±1.34a	19.04±1.25a	15.87±2.10ab	7.35±1.29a	8.74±1.50ab	3.47±0.54ab	12.21±2.86ab	87.79±7.66ab
	AW	53.14±4.07a	20.22±0.31b	10.24±1.03b	6.57±1.03b	2.80±0.51b	4.16±0.81b	2.88±0.59b	7.04±0.95b	92.96±18.32a

注:表中数据为平均值±标准差;同列字母表示不同者差异显著($p<0.05$),下同。

2.1.2 土壤水稳定性团聚体组成特征 相对于机械稳定性团聚体,土壤水稳定性团聚体更能在降雨条件下表征土壤质量状况^[17]。轮作休耕模式下土壤水稳定性团聚体组成特征见表 2,从不同土层来看,在 0—

20 mm 土层,粒径为≥0.25 mm 的大团聚体以 AW 种植方式最高,与 ZZ 差异显著($p<0.05$),但与 Z-L-Z 和 Z-S-Z 差异不显著,>2 mm 的团聚体则以 Z-L-Z 种植方式最高,与 AW 差异显著($p<0.05$),但与

Z-S-Z 和 ZZ 差异不显著;而在 20—40 cm 土层,粒径为 ≥ 0.25 mm 的大团聚体以 AW 种植方式最高,与 ZZ 和 Z-L-Z 差异显著($p<0.05$),但与 Z-S-Z 差异不显著, >2 mm 的团聚体以 Z-S-Z 种植方式最高,和 AW 差异显著($p<0.05$),但与 Z-S-Z 和 ZZ 差异不显著。

从整体来看,4 种植植模式下土壤各粒径团聚体

占总团聚体的比例均以 ≥ 0.25 mm 的含量最大,比例达到了 77.05%~88.32%,且 ≥ 0.25 mm 团聚体所占比例大小顺序为 AW>Z-S-Z>Z-L-Z>ZZ,另外,Z-L-Z,Z-S-Z 和 ZZ3 种植模式的团聚体含量随粒径的减小呈现先减少后增多的规律,而 AW 则是先增大后减小。

表 2 轮作休耕模式下不同土层水稳性团聚体粒级分布

土层/cm	处理	土壤团聚体组成/%					
		>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.106~0.25 mm	≥ 0.25 mm
0—20	Z-L-Z	29.27±0.83a	16.26±0.94b	17.74±0.80b	16.39±0.49a	20.33±2.25ab	79.67±5.49ab
	Z-S-Z	23.27±5.28ab	24.13±10.05ab	18.94±18.67b	14.08±17.06b	19.58±4.52ab	80.42±7.36ab
	ZZ	21.42±5.38ab	19.91±3.54b	18.67±2.69b	17.06±2.83a	22.95±4.52a	77.05±4.09b
	AW	19.39±1.29b	29.01±3.09a	24.45±4.66a	14.78±4.56b	12.38±1.21b	87.62±6.48a
20—40	Z-L-Z	22.40±3.94ab	20.80±2.59ab	22.27±4.07ab	15.89±0.88ab	18.64±1.93a	81.36±4.11b
	Z-S-Z	32.61±2.52a	15.37±3.15b	18.68±0.46b	17.57±2.50a	15.77±1.37ab	84.23±7.18ab
	ZZ	23.78±8.04ab	21.16±6.10ab	20.17±2.35ab	16.27±2.52ab	18.62±2.45a	81.38±5.98b
	AW	13.54±3.01b	35.76±15.08a	26.58±5.93a	12.45±8.58b	11.68±5.98b	88.32±13.40a

2.2 轮作休耕模式下土壤团聚体稳定指数分析

由图 1 可知,轮作休耕模式下土壤团聚体稳定指数呈现一定的规律,从不同指数来看,各处理土壤团聚体的 MWD 的大小顺序为 AW>Z-S-Z>Z-L-Z>ZZ,与玉米单作 ZZ 相比,AW,Z-S-Z 和 Z-L-Z 分别显著提高了 46.3%,40.1%,29.8% ($p<0.05$);GMD 的大小顺序为 AW>Z-L-Z>Z-S-Z>ZZ,与玉米单作 ZZ 相比,AW,Z-L-Z 和 Z-S-Z 分别显著提高了 26.9%,17.1%,15.9% ($p<0.05$); $R_{0.25}$ 的大小顺序为 AW>Z-S-Z>Z-L-Z>

ZZ,与玉米单作 ZZ 相比,AW,Z-S-Z 和 Z-L-Z 分别显著提高了 29.7%,14.7%,13.8% ($p<0.05$);PAD 的大小顺序为 ZZ>Z-S-Z>Z-L-Z>AW,与玉米单作 ZZ 相比,AW,Z-L-Z 和 Z-S-Z 分别显著降低了 53.1%,21.2%,17.1% ($p<0.05$)。从总体来看,不同处理稳定性参数变化基本一致,休闲地团聚体稳定性最高,Z-S-Z 与 Z-L-Z 两种轮作模式团聚体稳定性差异不显著,与玉米单作相比,休闲和轮作能显著提高团聚体稳定性,且差异性显著($p<0.05$)。

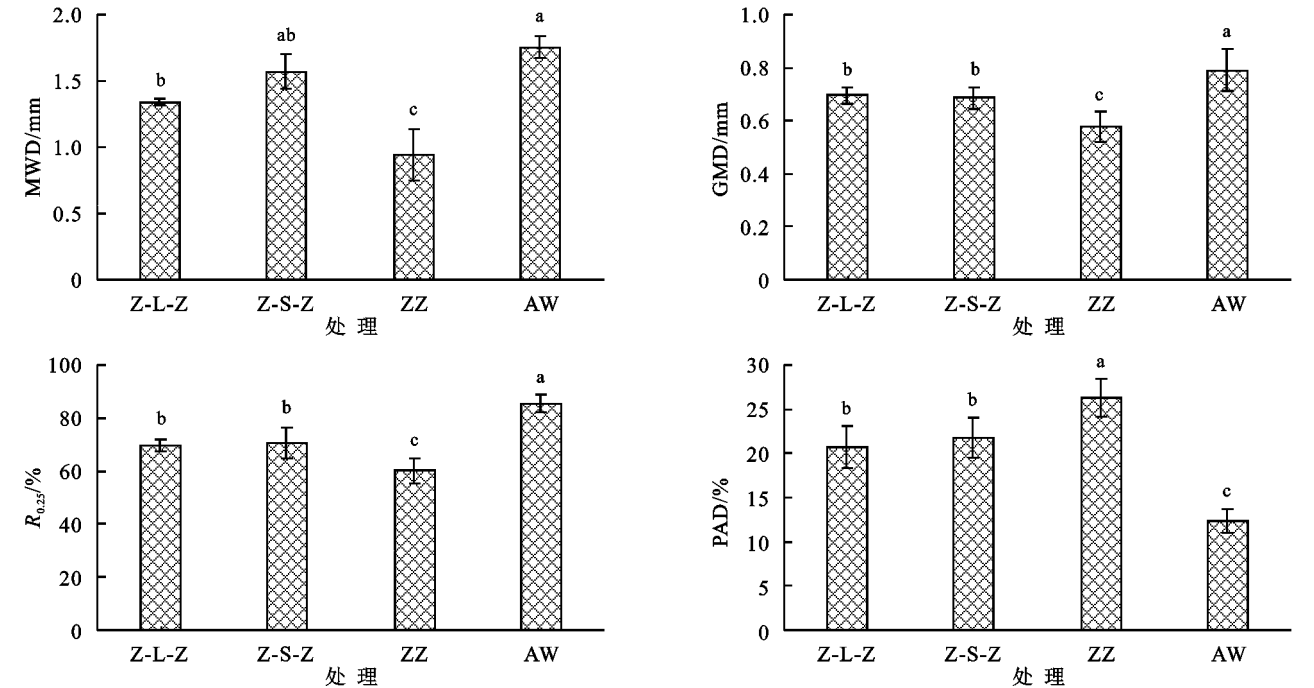


图 1 轮作休耕模式下土壤团聚体稳定指数变化情况

2.3 轮作休耕模式下土壤各粒径团聚体有机碳含量

由图 2 可知,轮作休耕模式下团聚体有机碳含量

大小顺序为 Z-L-Z>Z-S-Z>AW>ZZ,其中,Z-L-Z 和 AW 两种种植模式下有机碳含量最高分布于

0.5~1 mm 粒径中,而 Z-S-Z 和 ZZ 的种植模式下最高含量分布于 0.25~0.5 mm 粒径中,这说明相比其他两种处理,轮作能提高团聚体有机碳含量,且 Z-L-Z 轮作模式效果最佳。有机碳在各粒径团聚体中分布呈(0.5~1 mm)>(0.25~0.5 mm)>(0.106~0.25 mm)>(>1 mm)>(<0.106 mm),总体来说,>0.25 mm 大团聚体的有机碳含量高于<0.25 mm 的微团聚体 39.9%,其中,4 种不同处理 Z-L-Z,Z-S-Z,ZZ 和 AW 大团聚体中有机碳含量分别比微团聚体中高 41.5%,40.4%,42.6%,34.9%,这说明>0.25 mm 大团聚体更有利于有机碳的储存。

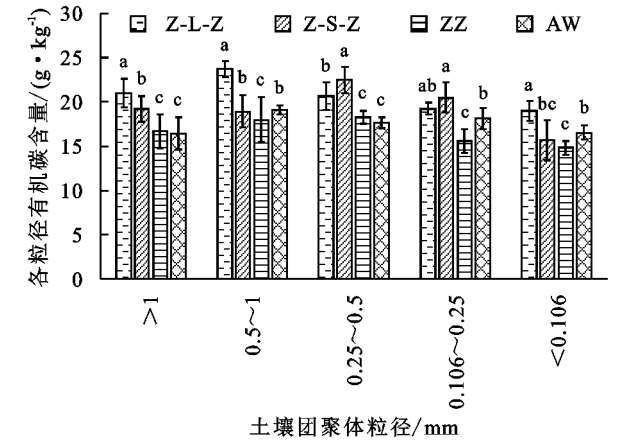


图 2 轮作休耕模式下土壤各粒径团聚体有机碳含量

2.4 土壤水稳性团聚体稳定指数与土壤有机碳的相关性分析

本文将轮作休耕模式下不同团聚体稳定指数与有机碳含量进行相关性分析(表 3),结果发现, $R_{0.25}$ 与有机碳成极显著正相关($p<0.01$),与 PAD 成极显著负相关($p<0.01$);PAD 与有机碳成极显著负相关($p<0.01$);MWD 与 GMD、有机碳成极显著正相关($p<0.01$);GMD 与有机碳成极显著正相关($p<0.01$)。说明有机碳含量与 $R_{0.25}$,PAD,MWD,GMD 关系密切,相关程度的大小顺序为: $R_{0.25}>PAD>GMD>MWD$ 。

表 3 土壤水稳性团聚体各参数与土壤有机碳之间的相关性

参数	$R_{0.25}$	PAD	MWD	GMD	有机碳
$R_{0.25}$	1	-0.857**	0.506	0.553	0.675**
PAD		1	-0.514	-0.534	-0.671**
MWD			1	0.893**	0.582**
GMD				1	0.585**
有机碳					1

注:df=11;*,**分别表示在 0.05,0.01 水平上显著相关。

3 讨论

本研究采用干筛法和湿筛法对轮作休耕模式下土壤机械稳定性和水稳性团聚体的组成特征进行分析,发现在两种方法下,4 种处理下的土壤都以大团聚体为

主,相比玉米单作,轮作休耕能增加土壤中 ≥ 0.25 mm 粒径团聚体含量,说明短期休闲和轮作有利于提高大团聚体含量,改善土壤结构。土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD), >0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)和结构体破坏率(PAD)都是评价团聚体分布情况和稳定性的重要参数。一般来说,MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值越大,PAD 值越小,说明土壤团聚体稳定性更好^[18]。本研究通过对 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 和 PAD 指数进行团聚体稳定性分析发现,与玉米单作相比,轮作和休闲地能提高了土壤团聚体稳定性,这是由于轮作比单作物种多样性丰富,使根系分泌物种类增加,从而形成了不一样的土壤微环境,特别是微生物产生的胶结物质和菌丝体对大团聚体的形成有积极作用^[19],而休闲地相比其他种植方式没有进行频繁的农艺措施,所以减少了团聚体的机械破坏。从而增加了大团聚体的数量^[20],而微团聚体比大团聚体更稳定不易受到耕作及其他扰动的影响^[21],本研究结果与前人一致^[22-24]。连续种植绿肥能够促进大团聚体的形成^[25],本次研究还进一步对两种绿肥-玉米轮作模式(玉米-苕子-玉米和玉米-豌豆-玉米)对于团聚体稳定性的影响进行探索,发现两种绿肥作物对于团聚体稳定性的影响差异不明显。原因可能是两种绿肥翻耕进去土壤的生物量对于土壤的改善作用没有形成大的差异,未来还需增加试验年限以进一步观测其变化特征。

土壤有机碳对于土壤健康、作物生长和产量具有积极作用,而短期农业管理对有机碳动态变化的影响是复杂多变的^[26],并且会受气候、土壤质地和作物类型的不同而发生变化。本研究分析了团聚体有机碳含量对轮作休耕模式的响应,结果表明粒径范围为 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的团聚体为有机碳储存的主要载体,与张旭辉等^[27]的研究结果相似。另外,玉米轮作模式下有机碳含量显著高于玉米单作,究其原因,一方面是因为轮作过程中种植苕子和豌豆产生的根系分泌物、根茬和枯枝落叶对土壤输入大量有机碳。另一方面,作物种类会影响土壤结构和有机碳含量^[28],这种影响取决于很多因素,其中包括不同的根系生理特征和功能,残留物的生物化学特征不同,玉米残渣含有高浓度的苯酚,促进土壤水稳性团聚体的形成及有机碳浓度的提高^[29],而一些豆科植物的根系密度较高,通过增加微生物的活性,而从促进团聚体的形成,本研究通过轮作休耕增加作物产量,从而提高残渣量,从这方面也有益于提高团聚体有机碳。另外,豆科植物的可水萃取有机碳浓度高于禾本科植物^[30],这也说明了不同作物根系分泌物不同,豆科植

物可能比禾本科分泌更多的可溶性分子。因此,本研究进一步比较了苕子和豌豆与玉米轮作中土壤有机碳含量的差异,结果可以看出,玉米-苕子-玉米轮作比玉米-豌豆-玉米轮作含量更高,这与两种作物的地上生物量大小有关,苕子的生物量高于豌豆,从而使其利用光合作用固定的碳更多,土壤中通过作物输送的碳也会更多^[31]。

根据水稳性团聚体稳定指数与土壤有机碳的相关性分析可知,土壤有机碳含量与 $R_{0.25}$,PAD,MWD,GMD成极显著相关关系,并且与 $R_{0.25}$ 相关程度最高,而这些指数都用于表征团聚体稳定性,说明有机碳含量和团聚体稳定性成正相关关系,该结果与其他区域的规律性基本一致^[2, 13, 32]。轮作休耕模式相比单作有利于提高土壤团聚体稳定性,从而能增加土壤固碳水平,且轮作条件下作物通过光合作用固定大量的碳通过根系输送到土壤,所以轮作比其他种植模式能显著增加土壤有机碳含量。总之,玉米与绿肥作物轮作有利于土壤团聚体稳定性,改善土壤质量,增加土壤肥力,从而提高作物产量^[33]。另外,绿肥作物不仅可以增加土壤有机碳含量,增强土壤微生物活性,还能增加地表覆盖,增加土壤水分入渗,减少径流的产生,有利于山区坡耕地水土保持^[34],因此,玉米与绿肥轮作对于提高农业的生态效益和经济效益有重要意义,是一种值得推广的种植模式。良好的土壤管理措施还有益于防治土壤侵蚀,从而避免有机碳的流失,本研究已经明确轮作休耕模式对于改善土壤团聚体稳定性和提高有机碳含量的积极作用,但未来还需要更多的研究来验证根系对有机碳的周转及盈亏平衡。

4 结论

(1) 不同种植模式下土壤机械稳定性团聚体组成以 ≥ 0.25 mm 粒径占比最高,都在80.68%以上,水稳性团聚体 ≥ 0.25 mm 粒径比例达到了77.05%~88.32%,且 ≥ 0.25 mm 团聚体所占比例大小顺序为:AW>Z-S-Z>Z-L-Z>ZZ。说明,与玉米单作相比,休闲地和轮作处理能提高土壤中大团聚体含量。

(2) 根据不同团聚体稳定指数(MWD,GMD, $R_{0.25}$ 和PAD)显示,休闲地的团聚体稳定性最好,且休闲地和玉米轮作两种模式下团聚体稳定性均优于玉米单作。

(3) 玉米单作土壤团聚体有机碳含量最低,玉米轮作和休闲地能显著提高有机碳含量,并且玉米-苕子-玉米轮作效果最优; ≥ 0.25 mm 粒径范围的团聚体储存的有机碳含量最高。

(4) 通过对土壤水稳性团聚体稳定指数与有机碳

含量的相关性分析表明,4个不同团聚体稳定指数与有机碳含量都成极显著正相关关系,与 $R_{0.25}$ 相关程度最高。

参考文献:

- [1] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [2] 张翰林,郑宪清,何七勇,等.不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):216-220.
- [3] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [4] 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.
- [5] 陆太伟,蔡岸冬,徐明岗,等.施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2183-2193.
- [6] Laganière J, Angers D A, Pare D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2010,16(1):439-453.
- [7] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996,28(4):665-676.
- [8] 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 & Tillage Research, 2004,79(1):7-31.
- [9] 陈媛媛,周运超.灰质白云岩土壤有机碳的团聚体保护[J].水土保持研究,2012,19(6):82-85,89.
- [10] 王志强,黄国勤,赵其国.新常态下我国轮作休耕的内涵、意义及实施要点简析[J].土壤,2017,49(4):651-657.
- [11] 孙治旭.关于云南省实行耕地轮作休耕的思考[J].环境与可持续发展,2016,41(1):148-149.
- [12] 陈小强,范茂攀,王自林,等.不同种植模式对云南省中部坡耕地水土保持的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):48-52,65.
- [13] 宋丽萍,罗珠珠,李玲玲,等.苜蓿-作物轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(1):27-35.
- [14] Zhao Q, Poulson S R, Obrist D, et al. Iron-bound organic carbon in forest soils: quantification and characterization[J]. Biogeosciences, 2016,13(16):4777-4788.
- [15] 陈山,杨峰,林杉,等.土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):211-216.
- [16] 陈文超,朱安宇,张佳宝,等.保护性耕作对潮土团聚体组成及其有机碳含量的影响[J].土壤,2014,46(1):35-40.
- [17] 李爱宗,张仁陟,王晶.耕作方式对黄绵土水稳性团聚体形成的影响[J].土壤通报,2008,39(3):480-484.
- [18] 宫阿都,何毓蓉.金沙江干热河谷典型区(云南)退化土壤的结构性与形成机制[J].山地学报,2001,19(3):213-219.

[19] 王英俊,李同川,张道勇,等.间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J].草地学报,2013,21(3):485-493.

[20] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, et al. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China [J]. Soil and Tillage Research, 2009,106(1):85-94.

[21] Hou X Q, Li R, Jia Z K, et al. Effect of rotational tillage on soil aggregates, organic carbon and nitrogen in the Loess Plateau area of China[J]. Pedosphere, 2013, 23(4):542-548.

[22] 冯欢,张俊岭,张风华.不同复垦模式对土壤团聚体及水溶性阳离子的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):94-99,108.

[23] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010,30(4):1035-1041.

[24] 王兴,钟泽坤,张欣怡,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.

[25] 张钦,于恩江,林海波,等.连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征[J].水土保持研究,2019,26(2):9-16.

[26] Al-Kaisi M M, Yin X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations [J]. Journal of Environmental Quality, 2005,34(2):437-445.

[27] 张旭辉,李恋卿,潘根兴.不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J].生态学杂志,2001,20(2):16-19.

[28] Chan K Y, Heenan D P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage[J]. Soil and Tillage Research, 1996, 37(2):113-125.

[29] Martens D A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(3):361-369.

[30] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils:a review on the influence of land use and management practices [J]. Geoderma, 2003, 113(3):357-380.

[31] 魏艳春,马天娥,魏孝荣,等.黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(2):305-313.

[32] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. Catena, 2017,156:176-183.

[33] 赵彩衣,王媛媛,董青君,等.不同水肥处理对苕子和后茬玉米生长及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):161-166,269.

[34] 朱青,崔宏浩,张钦,等.绿肥阻控贵州山区坡耕地水土流失的应用[J].水土保持研究,2016,23(2):101-105.



(上接第 30 页)

[18] 冯文瀚,李金彪,周聪,等.不同林龄鹅掌楸人工林土壤团聚体及其有机碳状况[J].中南林业科技大学学报,2021,41(2):133-141.

[19] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等.峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报,2014,025(3):671-678.

[20] 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.

[21] 王心怡,周聪,冯文瀚,等.不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J].水土保持学报,2019,33(5):126-131.

[22] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(3):1042-1049.

[23] 赵俊峰,肖礼,黄懿梅,等.黄土丘陵区不同种植类型梯田 2 m 土层有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(5):253-259.

[24] Zhang Y, Tigabu M, Yi Z, et al. Soil parent material and stand development stage effects on labile soil C and N pools in Chinese fir plantations [J]. Geoderma, 2019,338:247-258.

[25] 邹俊亮,郭胜利,李泽,等.小流域土壤有机碳的分布和积累及土壤水分的影响[J].自然资源学报,2012,27(3):430-439.

[26] 赵俊峰,肖礼,黄懿梅,等.黄土丘陵区不同种植类型梯田 2 m 土层有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(5):253-259.

[27] 刘艳,查同刚,王伊琨,等.北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报,2013,24(3):607-613.