

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.022

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. 土壤, 2021, 53(1): 161–167.

## 长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响<sup>①</sup>

白怡婧<sup>1,2</sup>, 刘彦伶<sup>1,2\*</sup>, 李渝<sup>1,2</sup>, 黄兴成<sup>1,2</sup>, 张雅蓉<sup>1,2</sup>, 蒋太明<sup>2,3</sup>, 秦松<sup>1</sup>

(1 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 2 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006; 3 贵州省农业科学院茶叶研究所, 贵阳 550006)

**摘要:** 依托 23 年的黄壤长期定位田间试验, 对比研究玉米单作(MM)、小麦||绿肥-玉米轮作(WMR)和油菜-玉米轮作(RMR)对土壤团聚体组成及有机碳的影响。结果表明: 各处理机械稳定性团聚体和水稳性团聚体均以大团聚体(>0.25 mm 的团聚体)为优势团聚体, 占比高达 93.04% 和 74.59% 以上; WMR 和 RMR 处理较 MM 处理显著提高了 5~2 mm 和 2~1 mm 机械稳定性团聚体含量及 >5 mm 和 5~2 mm 水稳性团聚体含量; WMR 处理的水稳性团聚体 MWD(平均重量直径)较 MM 处理显著增加了 50%; WMR、RMR 处理的 PAD(团聚体破坏率)和  $E_{LT}$ (土壤团聚体不稳定团粒指数)较 MM 处理分别显著降低了 31.32%、25.97% 和 35.90%、30.65%; 不同粒级水稳性团聚体中均以 WMR 处理的有机碳含量最高, >5、1~0.5、0.5~0.25 mm 粒级团聚体的有机碳含量比 MM 处理显著增加了 17.60%、34.41%、45.67%; 土壤团聚体有机碳主要集中在 >0.25 mm 的大团聚体中, 而在微团聚体中含量较少, 轮作主要提高了 >5 mm 水稳性团聚体中有机碳的贡献率, WMR、RMR 处理较 MM 处理分别提高了 23.18 和 9.16 个百分点。小麦||绿肥-玉米轮作能有效改善土壤团聚体组成, 提高团聚体稳定性和有机碳含量, 可作为贵州黄壤旱地较佳的轮作模式。

**关键词:** 轮作模式; 土壤团聚体; 稳定性; 土壤有机碳

中图分类号: S152.4; S156.6 文献标志码: A

## Effects of Different Long-term Rotation Patterns on Aggregate Composition and Organic Carbon in Yellow Soil

BAI Yijing<sup>1,2</sup>, LIU Yanling<sup>1,2\*</sup>, LI Yu<sup>1,2</sup>, HUANG Xingcheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yarong<sup>1,2</sup>, JIANG Taiming<sup>2,3</sup>, QIN Song<sup>1</sup>

(1 Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agriculture Sciences, Guiyang 550006, China; 2 Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agricultural Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China; 3 Institute of Tea, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** The effects of rotation patterns on soil aggregate composition and soil organic carbon were studied in this paper in order to setup rational rotation pattern in yellow soil based on a successive 23-year field experiment, in which three treatments were chosen: maize monoculture system (MM), wheat (intercropping green manure)-maize rotation (WMR) and rape-maize rotation (RMR). The results showed that >0.25 mm aggregates were the dominant component of the mechanically stable and water stable aggregates with the proportion beyond 93.04% and 74.59% respectively. Compared with MM treatment, WMR and RMR treatments significantly improved the contents of 5–2 mm, 2–1 mm mechanical stability aggregates and the contents of >5 mm, 5–2 mm water stable aggregates; WMR treatment significantly increased MWD (mean weight diameter) of water stable aggregates by 50%; WMR and RMR treatments significantly decreased PAD (percentage of aggregate destruction) and  $E_{LT}$  (soil aggregates unstable mass index) by 31.32%, 25.97% and 35.90%, 30.65% respectively. WMR treatment had the highest organic carbon content in different size levels of water stable aggregates, and organic carbon contents in >5, 1–0.5, 0.5–0.25 mm aggregates increased by 17.60%, 34.41% and 45.67% respectively compared with MM treatment. The contents of soil aggregate organic carbon was mainly in >0.25 mm aggregates, higher than that in microaggregate (<0.25 mm). Rotation measures mainly increased the contribution rate of organic carbon in >5 mm water stable aggregates, WMR and RMR treatments increased 23.18

①基金项目: 国家自然科学基金项目(32060302)、贵州省科技创新人才团队建设项目(黔科合平台人才[2018]5604)和中央引导地方科技发展专项(黔科中引地[2019]4003)资助。

\* 通讯作者(lyl890615@163.com)

作者简介: 白怡婧(1994—), 女, 贵州江口人, 硕士研究生, 研究方向为耕地保育。E-mail: baiyijing7@163.com

and 9.16 percentage points respectively compared with MM treatment. In summary, wheat (intercropping green manure)-maize rotation can effectively improve the composition of soil aggregates, improve the stability of soil aggregates and organic carbon content, thus, is a reasonable rotation pattern in the yellow soil of Guizhou.

**Key words:** Rotation pattern; Soil aggregate; Stability; Soil organic carbon

近年来,随着农业集约化程度不断提高,长期高强度利用和不合理的土壤耕作方式导致土壤结构破坏、肥力下降等耕地土壤质量问题凸显。为恢复和提高土壤地力,实现“藏粮于地”战略目标,2016年农业部出台了《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》<sup>[1]</sup>。轮作是一定地块在一定耕作周期内以种类多样性和转换性种植农作物的耕作方式,也是促使土地利用自身的“内源技术”来增加土壤肥力的生态方式<sup>[2]</sup>。轮作通过不同作物之间的时序和空间配置,更好地利用不同作物对环境、水分和养分等生态因素需求的差异性,以改善土壤结构、均衡利用土壤养分、提高土壤肥力,从而提高生态效益和经济效益<sup>[3]</sup>。土壤团聚体是土壤结构的基本单元<sup>[4]</sup>,其形成是土壤微生物、植物根系及复杂的物理化学过程共同作用的结果,它的数量和分布反映了土壤结构的稳定性和抗蚀性<sup>[5]</sup>,主要受到土壤有机碳含量、种植制度和轮作模式等的影响<sup>[6]</sup>。土壤有机碳是土壤养分转化的重要参与者,也是土壤环境质量演变的核心。研究表明,疏松熟化层表土中近 90% 的土壤有机碳存在于团聚体内<sup>[7]</sup>。土壤团聚体和有机碳相互作用<sup>[8]</sup>,土壤团聚体为有机碳提供物理保护<sup>[9]</sup>,有机碳促进团聚体的形成和稳定<sup>[10]</sup>。

贵州是全国唯一没有平原支撑的典型喀斯特省份,人均耕地面积少且土壤质量低<sup>[11]</sup>,合理的轮作技术在保持土壤养分的前提下提高有限耕地的生产力对贵州粮食安全和农业可持续发展意义重大。研究表明,不同轮作模式会对不同粒级团聚体之间的转化和再分布造成不同程度的影响<sup>[12]</sup>,进而影响有机碳分布、土壤结构稳定性和抗侵蚀能力,且不同作物轮作下水稳性大团聚体含量、平均重量直径、各粒级团聚体有机碳含量高于单一作物种植。关于土壤有机碳在团聚体中的分布研究结果不尽一致,一部分研究认为土壤有机碳主要分布在  $>0.25$  mm 的大团聚体中<sup>[13-14]</sup>,另一部分研究则认为土壤有机碳主要分布在  $<0.25$  mm 的微团聚体中<sup>[15-16]</sup>。黄壤是贵州分布最广且面积最大的耕地土壤,玉米是贵州旱地种植面积最大的农作物,玉米单作或者与油菜、小麦轮作是农业生产中最主要的种植模式。目前,关于施肥对黄壤养分影响的研究较多<sup>[17-20]</sup>,而关于不同轮作模式对黄壤养分,尤其是对黄壤团聚体影响的研究鲜见报道。因此,本研

究依托国家黄壤肥力与肥效长期定位试验平台,分析比较不同轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响,旨在探寻有效改善土壤结构、维持土壤质量的轮作模式,为贵州黄壤旱地的可持续利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于贵州省贵阳市花溪区贵州省农业科学院内( $106^{\circ}39'52''$  E、 $26^{\circ}29'49''$  N),地处黔中黄壤丘陵区,海拔 1 071 m,年均气温  $15.3^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量 1 100~1 200 mm,年均日照时数 1 354 h,相对湿度 75.5%,全年无霜期 270 d 左右。试验地土壤为黄壤土类黄泥土土种,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩残积物,耕层(0~20 cm)基础土样有机质 36.2 g/kg、全氮 1.96 g/kg、全磷 0.96 g/kg、全钾 10.5 g/kg、pH 6.87。

### 1.2 试验设计

黄壤肥力与肥效长期定位试验始于 1995 年,共设 12 个处理,本研究选取其中 3 个处理作为研究对象,分别是:玉米单作(maize monoculture system, MM);小麦||绿肥-玉米轮作(wheat (intercropping green manure)-maize rotation, WMR);油菜-玉米轮作(rape-maize rotation, RMR)。采用大区对比试验,每处理小区面积 340  $\text{m}^2$ ,未设重复,无灌溉设施。试验用氮肥为尿素(含 N 460 g/kg),磷肥为过磷酸钙(含  $\text{P}_2\text{O}_5$  160 g/kg),钾肥为氯化钾(含  $\text{K}_2\text{O}$  600 g/kg)。玉米季每年施 N 165  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  82.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O}_5$  82.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,小麦季作物每年施 N 82.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  41.3  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O}_5$  41.3  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。小麦和油菜每年 10 月播种,4 月初收获。绿肥品种为光叶苕子,盛花期干物质量为 1 200  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,每年 10 月播种,小麦收获后翻压还田。玉米每年 4 月播种,9 月底收获。玉米、小麦、油菜秸秆地上部分均移除,根茬还田。

### 1.3 样品采集和分析

由于历史原因,长期定位试验小区面积较大未设置重复,本研究将试验地延长边三等分,设置 3 个调查取样重复小区,于 2017 年玉米收获后采用梅花形 5 点取样法采集 0~20 cm 土层土样,带回实验室去

除肉眼可见的植物残体和石块,再将大土块沿其自然结构掰开至 1 cm 左右,自然风干备用。

机械稳定性团聚体测定:干筛法<sup>[12-15]</sup>。取 400 g 混合土样置于套筛(孔径依次为 5、2、1、0.5、0.25 mm)顶部,用振动筛分仪(GRINDER SS200)进行振荡筛分,振幅 2.0 mm,筛分时长为 10 min,测定各孔径筛分后的土壤质量。

水稳性团聚体测定:湿筛法<sup>[12-15]</sup>。按照干筛后土壤各粒级质量比称取 50 g 混合土样,将其置于套筛(孔径依次为 5、2、1、0.5、0.25 mm)顶部,放于恒温土壤团粒分析仪(Daiki DIK-2012)的配套桶内,沿边缘缓慢加入去离子水至刻度线,确保最顶层筛的上边缘低于水面,静置 10 min 后开启振荡开关,以 30 次/min 的频率振荡 10 min。收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒中,烘干称重。

有机碳测定:重铬酸钾容量法(外加热法)<sup>[12-15]</sup>。

#### 1.4 计算公式

利用各粒级团聚体数据,计算平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)、>0.25 mm 团聚体质量分数( $R_{0.25}$ )<sup>[5,14]</sup>。

$$MWD = \sum \left( X_i \times \frac{m_i}{m_t} \right) \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum (m_i \times \ln X_i)}{\sum m_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{m_{0.25}}{m_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  级团聚体平均直径(mm);  $m_i$  为第  $i$  级团聚体质量(g),  $m_t$  为供试土壤总质量(g),  $m_{0.25}$  为 >0.25 mm 团聚体质量。

土壤团聚体破坏率(PAD)<sup>[21]</sup>:

$$PAD = \frac{(DR_{0.25} - WR_{0.25})}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $DR_{0.25}$  为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数(%);  $WR_{0.25}$  为 >0.25 mm 水稳性团聚体质量分数(%)。

土壤团聚体不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )<sup>[22]</sup>:

$$E_{LT} = \frac{m_t - m_{0.25}}{m_t} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $m_{0.25}$ 、 $m_t$  意义同前。

团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率( $W$ )<sup>[22]</sup>:

$$W = \frac{OC_i \times m_i}{SOC \times m_t} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $W$  为团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率(%);  $OC_i$  为第  $i$  级团聚体中有机碳含量(g/kg);  $SOC$  为土壤有机碳含量(g/kg);  $m_i$ 、 $m_t$  意义同前。

#### 1.5 统计分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 进行数据处理和作图,采用一般线性模型进行方差分析,最小显著差法(Duncan 法)进行多重比较,显著性水平  $P < 0.05$ ,文中数据为平均值±标准差( $n=3$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同轮作模式下土壤机械稳定性团聚体组成

各轮作模式机械稳定性团聚体均以 >5 mm 的团聚体为主,且表现出随粒级减小含量(以质量分数计,下同)减少的趋势(表 1)。与 MM 处理相比,WMR 和 RMR 处理 >5 mm 的团聚体含量显著降低了 20.7% 和 29.0%,而 5~2 mm 的团聚体含量显著增加了 62.67% 和 64.18%,2~1 mm 的团聚体含量显著增加了 35.74% 和 41.28%。此外,WMR 和 RMR 处理 <0.25 mm 的团聚体含量均比 MM 处理降低了 54.17%。

表 1 不同轮作模式下土壤机械稳定性团聚体组成

Table 1 Composition of soil mechanical stable aggregates under different rotation patterns

处理	不同粒级(mm)机械稳定性团聚体质量分数(%)					
	>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
MM	51.97 ± 1.50 a	17.95 ± 1.81 b	13.01 ± 0.37 b	5.13 ± 0.60 a	4.99 ± 1.24 a	6.96 ± 2.77 a
WMR	41.21 ± 3.31 b	29.20 ± 2.87 a	17.66 ± 2.31 a	4.78 ± 0.12 a	3.96 ± 0.60 a	3.19 ± 1.40 a
RMR	36.89 ± 2.95 b	29.47 ± 1.11 a	18.38 ± 2.49 a	7.69 ± 3.77 a	4.38 ± 1.01 a	3.19 ± 1.37 a

注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ); 下同。

### 2.2 不同轮作模式下土壤水稳性团聚体组成

不同处理各粒级水稳性团聚体分布特征不尽相同(表 2),MM 处理以 <0.25 mm 及 1~0.5 mm 的团聚体为主,>5 mm 的团聚体含量最少;WMR 处理以 >5 mm 的

团聚体为主,其他各粒级团聚体含量相当;RMR 处理各粒级团聚体含量相当。与 MM 处理相比,除 WMR 处理 >5 mm 的团聚体含量显著增加 468.98%,1~0.5 mm 的团聚体含量显著降低 40.5% 外,不同轮作模式间其他各粒级

表 2 不同轮作模式下土壤水稳性团聚体组成  
Table 2 Composition of soil water stable aggregates under different rotation patterns

处理	不同粒级(mm)水稳性团聚体质量分数(%)					
	>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
MM	4.61 ± 0.07 b	9.88 ± 1.14 a	18.34 ± 1.72 a	23.89 ± 0.70 a	17.86 ± 1.71 a	25.41 ± 2.17 a
WMR	26.23 ± 2.55 a	16.93 ± 1.77 a	14.82 ± 2.24 a	14.22 ± 0.56 b	11.50 ± 1.30 a	16.29 ± 0.10 a
RMR	14.60 ± 2.45 ab	14.45 ± 2.75 a	18.04 ± 3.21 a	19.98 ± 1.74 a	15.47 ± 1.01 a	17.47 ± 4.97 a

团聚体含量无显著差异。WMR 和 RMR 处理 <0.25 mm 的团聚体含量均比 MM 处理降低了 35.89% 和 31.25%。

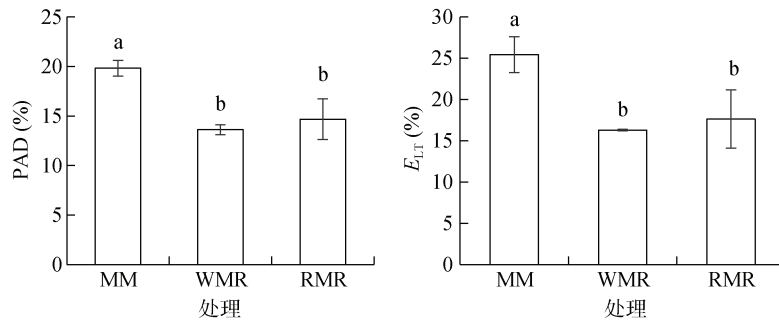
### 2.3 不同轮作模式下土壤团聚体稳定性

MWD 和 GMD 可表征土壤团聚体稳定性, 其值越大表示平均粒径团聚度越高, 稳定性越强。不同轮作模式下土壤机械稳定性显示, WMR 处理 GMD 和  $R_{0.25}$  含量均较 MM 处理大(表 3)。水稳性团聚体 MWD 值以

WMR 处理最高, 比 MM 处理显著提高了 50%, 各处理之间 GMD 和  $R_{0.25}$  值差异不显著。不同轮作模式下 PAD 和  $E_{LT}$  规律基本一致(图 1), 与 MM 处理相比, WMR 和 RMR 处理的团聚体 PAD 分别显著降低了 31.32% 和 25.97%,  $E_{LT}$  分别显著降低了 35.90% 和 30.65%。可见, 轮作尤其是小麦||绿肥-玉米轮作能有效提高土壤团聚体稳定性, 降低土壤团聚体破坏率和不稳定团粒指数。

表 3 不同轮作模式对土壤机械稳定性/水稳性团聚体稳定指数的影响  
Table 3 Effect of different rotation patterns on the stability index of soil mechanical stable/water stable aggregate

处理	机械稳定性指标			水稳性指标		
	MWD(mm)	GMD(mm)	$R_{0.25}$ (%)	MWD(mm)	GMD(mm)	$R_{0.25}$ (%)
MM	3.50 ± 0.13 a	2.97 ± 0.23 a	93.04 ± 2.77 a	1.16 ± 0.09 b	3.08 ± 0.64 a	75.59 ± 2.17 a
WMR	3.41 ± 0.04 ab	3.03 ± 0.03 a	96.81 ± 1.40 a	2.32 ± 0.49 a	2.53 ± 0.24 a	83.71 ± 0.10 a
RMR	3.23 ± 0.14 b	2.97 ± 0.11 a	96.81 ± 1.37 a	1.76 ± 0.50 ab	3.06 ± 0.26 a	82.53 ± 4.87 a



(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同)

图 1 不同轮作模式下土壤团聚体 PAD 及  $E_{LT}$

Fig. 1 Soil aggregate PAD and  $E_{LT}$  under different rotation patterns

### 2.4 不同轮作模式下水稳性团聚体中有机碳分布

本研究各处理耕层有机碳含量为 WMR(26.21 g/kg) > RMR(21.29 g/kg) > MM(19.26 g/kg), 且水稳性团聚体有机碳回收率均在 95% 以上。不同耕作模式下土壤有机碳在不同团聚体粒径中分布存在差异(图 2), 不同轮作能不同程度地提高团聚体中有机碳含量。不同粒级团聚体中均以 WMR 处理的有机碳含量最高。与 MM 处理相比, WMR 处理 >5、1~0.5、0.5~0.25 mm 团聚体有机碳含量分别显著提高了 17.60%、34.41%、45.67%; RMR 处理 0.5~0.25 mm 团聚体有机碳含量显著增加了 41.32%, 其他各粒级团聚体中有机碳含

量无显著变化。可见, 两种轮作模式均能增加各粒级团聚体尤其是大团聚体中有机碳含量, 尤以小麦||绿肥-玉米轮作增幅最大。

### 2.5 不同轮作模式下各粒级水稳性团聚体中有机碳贡献率

不同轮作模式下不同粒级团聚体的有机碳贡献率差异较大(图 3), 其中 >0.25 mm 大团聚体中有机碳对土壤有机碳贡献率均较高, 高达 78% 以上, 这与团聚体含量分布特征相似。>0.25 mm 大团聚体中, MM 处理 2~1 mm 和 1~0.5 mm 团聚体中有机碳贡献率较高, 为 23.35% 和 21.70%, 而 >5 mm 团聚体

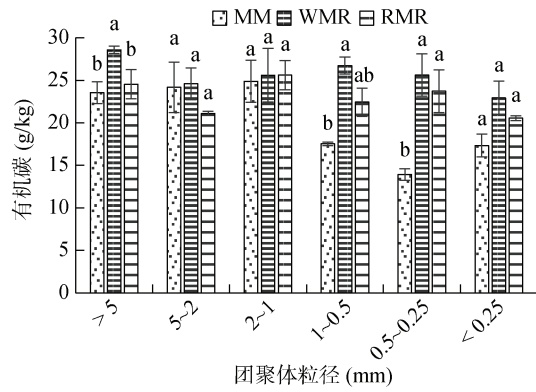


图 2 不同轮作模式下不同粒径团聚体土壤有机碳含量分布  
Fig. 2 Distribution of soil organic carbon content in different aggregate sizes under different rotation patterns

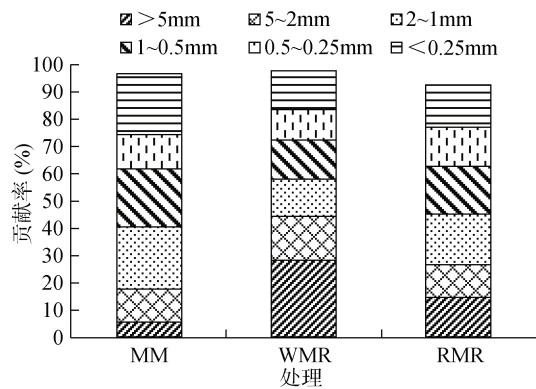


图 3 不同轮作模式下不同粒径土壤有机碳的贡献率  
Fig. 3 Contribution rate of soil organic carbon in different aggregate sizes under different rotation patterns

中有机碳贡献率仅为 5.55%；WMR 处理 >5 mm 团聚体中有机碳贡献率高达 28.73%，其他各粒级团聚体中有机碳贡献率为 11.45% ~ 16.38%；RMR 处理各粒级团聚体中有机碳贡献率相当，为 12.29% ~ 18.93%。<0.25 mm 微团聚体中，WWR 和 RMR 处理有机碳贡献率比 MM 处理降低了 8.29 和 6.98 个百分点。可见，轮作有利于提高大团聚体中尤其是 >5 mm 团聚体中有机碳贡献率，其中小麦||绿肥-玉米轮作增幅最大。

### 3 讨论

土壤学将当量粒径 10 ~ 0.25 mm 的团聚体称为大团聚体，其含量越高，说明土壤团聚性越好；<0.25 mm 的团聚体称为微团聚体，其是机械稳定性较差的团聚体，这一级别团聚体所占比重越高，表明土壤愈分散<sup>[23]</sup>。MWD 和 GMD 常用来反映土壤团聚体大小分布状况，GMD 是对土壤团聚体主要粒级分布的描述，而 MWD 为各级团聚体的综合指标<sup>[24]</sup>。一般认为，大团聚体含量、MWD 和 GMD 值越大表示团聚体的平均

粒径团聚度越高，团聚体稳定性越强<sup>[25]</sup>。本研究结果表明，各轮作模式机械稳定性团聚体和水稳性团聚体均以大团聚体为优势团聚体，占比分别高达 93.04% 及 74.59% 以上；而水稳性微团聚体中 <0.25 mm 的团聚体含量比机械稳定性中 <0.25 mm 的团聚体含量高 13.10 ~ 18.45 个百分点，这与张钦等<sup>[23]</sup>在黄壤上的研究结果一致。油菜-玉米轮作和小麦||绿肥-玉米轮作较玉米单作能显著提高 5 ~ 2 mm 和 2 ~ 1 mm 机械稳定性团聚体含量及 >5 mm 水稳性团聚体含量，并显著降低 PAD 和  $E_{LT}$ ，尤以小麦||绿肥-玉米轮作效果更佳，说明轮作能改善团聚体组成，提高土壤团聚体稳定性，这与其他研究<sup>[23,26-30]</sup>结果一致。可见，黄壤上不同作物与绿肥间套轮作可在常规轮作模式的基础上进一步改善土壤团聚体组成并提高团聚体稳定性。李阳兵等<sup>[31]</sup>研究表明，团聚体稳定性下降和水稳性团聚体减少的主要原因是有机质含量下降，而本研究中土壤的有机碳含量表现为小麦||绿肥-玉米轮作>油菜-玉米轮作>玉米单作，故土壤团聚体的稳定性也呈现出一致的规律。

土壤有机质与团聚体关系密切<sup>[32-33]</sup>，其含量的提高有利于土壤结构形成，增强土壤结构稳定性，而团聚体形成反过来影响土壤有机碳分解<sup>[34-35]</sup>。本研究结果表明，不同处理 >0.25 mm 的水稳性团聚体中有机碳对土壤有机碳贡献率高达 78% 以上，说明土壤有机碳主要集中在 >0.25 mm 的水稳性团聚体中，微团聚体中含量较少，这与张风华等<sup>[36]</sup>研究结果一致。小麦||绿肥-玉米轮作和油菜-玉米轮作中，各粒级团聚体有机碳含量基本都高于玉米单作，尤以小麦||绿肥-玉米轮作增幅较大，说明玉米与其他作物轮作尤其是小麦季作物间套作绿肥有利于土壤团聚体的养分积累。这可能是因为不同轮作系统作物的根系分布、根系分泌物种类和数量、根系周转特征等存在差异，当不同的植物残茬增加时，可促进团聚体中颗粒有机质的形成，在有机质胶结作用下，微团聚体、颗粒有机质等相结合形成大团聚体，从而促进土壤大团聚体数量的增加并提高有机质含量<sup>[37-40]</sup>。本研究中，轮作的冬季作物(小麦和油菜)根茬还田，增加了外源有机物的投入，从而增加了土壤有机质含量。小麦||绿肥-玉米轮作中，由于绿肥翻压还田进一步增加了外源有机物的投入，因而有机碳含量最高。另外，本研究中轮作显著提高了 >5 mm 的水稳性团聚体含量及其对土壤有机碳的贡献率，降低了土壤团聚体破坏率并提高了团聚体稳定性，稳定的团聚体能够对储存于其中的有机碳形成有效保护，且通常大团聚体能够

储存更多的有机碳,故轮作可提高土壤团聚体中有机碳含量。

#### 4 结论

轮作在改善土壤团聚体组成、提高土壤团聚体稳定性和团聚体中有机碳含量方面具有良好效果,小麦||绿肥-玉米轮作效果尤为显著。贵州冬绿肥资源丰富,在农业生产实践中,应选择合适的绿肥品种进行间套作轮作,充分发挥绿肥的培肥改土作用,提高土壤质量。小麦||绿肥-玉米轮作可作为贵州黄壤旱地较佳的轮作模式。

#### 参考文献:

- [1] 农业部种植业管理司. 关于印发探索实行耕地轮作休耕制度试点方案的通知[EB/OL]. (2016-06-29). [http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201606/t20160629\\_5190955.htm](http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201606/t20160629_5190955.htm).
- [2] 倪学志, 于晓媛. 耕地轮作、农业种植结构与我国持久粮食安全[J]. 经济问题探索, 2018(7): 78-88.
- [3] 杨晓琳. 华北平原不同轮作模式节水减排效果评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [4] 李娟, 韩霁昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 248-253, 259.
- [5] 赵冬. 黄土丘陵区植被恢复过程土壤团聚体结构演变特征及其量化表征[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [6] 刘栋, 崔政军, 高玉红, 等. 不同轮作序列对旱地胡麻土壤有机碳稳定性的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(12): 45-57.
- [7] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447-455.
- [8] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418.
- [9] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481-504.
- [10] Angers D. Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(1/2): 91-96.
- [11] 刘彦伶, 李渝, 秦松, 等. 西南喀斯特生态脆弱区实行轮作休耕问题探讨——以贵州省为例[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1117-1124.
- [12] 张霞, 张育林, 刘丹, 等. 种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 250-261.
- [13] Paul B K, Vanlauwe B, Ayuke F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164:14-22.
- [14] 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.
- [15] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的分布[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 324-332.
- [16] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 276-284.
- [17] 黄兴成, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥下黄壤综合肥力演变及作物产量响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1484-1491.
- [18] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对黄壤有机碳平衡及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1275-1285.
- [19] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3581-3588.
- [20] 李渝, 刘彦伶, 白怡婧, 等. 黄壤稻田土壤微生物生物量碳磷对长期不同施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1327-1334.
- [21] 赵冀, 王维, 张鹏, 等. 轮耕对冬春休闲旱地土壤结构及团聚体稳定性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 52-58, 115.
- [22] 窦莉洋. 秸秆还田对不同类型土壤团聚体稳定性、有机碳含量及其分布的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [23] 张钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥作物耕层的土壤团聚体特征[J]. 西南农业学报, 2019, 32(1): 148-153.
- [24] 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.
- [25] 刘威, 张国英, 张静, 等. 2 种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 117-122.
- [26] 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.
- [27] 陈宁宁, 李军, 吕薇, 等. 不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1102-1111.

- [28] 刘丹. 不同种植制度下耕作措施对黑垆土物理性质和作物产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [29] 陈文超, 朱安宁, 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.
- [30] 金雯晖, 杨劲松, 侯晓静, 等. 轮作模式对滩涂土壤有机碳及团聚体的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1195–1201.
- [31] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 等. 利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 451–455.
- [32] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 929–939.
- [33] 孟祥天, 蒋瑀霁, 王晓玥, 等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 326–332.
- [34] 王蕊. 壤土剖面土壤团聚体有机碳及养分状况研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [35] 周泉, 王龙昌, 邢毅, 等. 秸秆覆盖条件下紫云英间作油菜的土壤团聚体及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1235–1242.
- [36] 张风华, 王建军. 不同轮作模式对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 113–116, 139.
- [37] Du Z L, Ren T S, Hu C S, et al. Transition from intensive tillage to no-till enhances carbon sequestration in microaggregates of surface soil in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146:26–31.
- [38] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3–22.
- [39] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367–1377.
- [40] 张世祺, 王沛裴, 王昌全, 等. 不同植烟年限对土壤团聚体稳定性的影响及其相关因素分析[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1229–1236.