

文章编号:1000-8551(2019)12-2430-09

冬季不同种植模式对稻田土壤团聚体及其有机碳的影响

张鹏 周泉 黄国勤*

(江西农业大学生态科学研究中心,江西 南昌 330045)

摘要:为探究冬季不同种植模式对稻田土壤结构和质量的影响,设置5种冬季种植模式:冬季休闲(冬闲)、冬种紫云英、冬种油菜、冬种大蒜和冬季轮作(马铃薯、紫云英、油菜),通过测定稻田不同土层土壤团聚体组成和团聚体有机碳含量,分析稻田土壤团聚体的水稳性和团聚体有机碳分布。结果表明,在0~30 cm 土层深度:>2 mm 粒级的土壤团聚体含量最高,其次是<0.053 mm 粒级的土壤团聚体,1~2、0.5~1、0.25~0.05、0.053~0.25 mm 粒级的土壤团聚体含量相近;各冬季种植处理模式均提高了稻田水稳性团聚体的平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD),其中冬种油菜、冬季轮作以及冬种紫云英处理的MWD较冬闲处理分别显著提高21.50%、21.16%、16.32%($P<0.05$),冬种油菜和冬季轮作处理的GMD较冬闲处理分别显著提高83.31%、62.50%($P<0.05$);冬季不同种植模式显著降低了土壤水稳性团聚体的分形维数($P<0.05$),有利于维持土壤结构的稳定性;相对于冬闲处理,其余不同冬季种植模式处理的各粒径下土壤团聚体有机碳含量有增加的趋势。综上可知,冬季不同种植模式均有利于稻田土壤团聚体稳定性的提高和各粒级下团聚体有机碳的积累,其中冬季轮作模式的效果最佳。本研究结果为南方冬闲田优化种植模式提供了理论依据。

关键词:稻田;冬种模式;水稳性团聚体;团聚体稳定性;团聚体有机碳

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.12.2430

我国南方地区,尤其是长江中下游地区是水稻(*Oryza sativa*)生产的重要场所^[1],南方稻区气候大多有利于冬季作物种植。目前,南方稻区约有 9.3×10^6 hm²冬闲田可以利用,其中72%的冬闲田较容易开发^[2]。

水稻土是经过人为栽培管理等农艺措施长期形成的特殊土壤质地,其水、气、热状况,以及土粒的胶结物质,在淹水期间与旱作土壤差异较大;水稻土的干湿交替作用更为强烈,通过改变土壤团聚体周围的水环境及孔隙度,可影响其形成、粒径分布、结构稳定性,而水稳性团聚体相比非水稳性团聚体对于保持土壤稳定状态具有更重要的作用,其数量、分布状况反映了土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力,是评价土壤质量的重要指标^[3-4]。研究表明,农作物种植制度是影响土壤质量

演化及其可持续利用的农业措施之一^[5],耕作方式、种植制度、秸秆还田等相关农业措施或土地利用变化均会影响土壤团聚体结构组成及其有机碳变化^[6],且成土母质、土壤类型等也对土壤有机碳分布有极显著影响^[7]。稻田轮作可改善土壤的理化性状,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,有效阻止土壤次生潜育化和酸化^[8]。针对半干旱地区,张鹏等^[9]研究表明秸秆还田有利于提高土壤机械稳定性和水稳性团聚体结构水平,改善土壤结构状况;在秸秆全量和半量还田的农艺措施中,孙隆祥等^[10]发现秸秆全量还田显著提升了水稳性团聚体几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)和大团聚体(>0.25 mm)含量,使得土壤结构和稳定性得到明显改善;稻田进行绿肥作物覆盖还田后,可增加土壤有机碳含量^[11],且连续种植绿肥有利于土

收稿日期:2019-05-13 接受日期:2019-07-19

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0300208),江西省重点研发计划项目(20161BBF60058)

作者简介:张鹏,男,主要从事农业生态学研究。E-mail:952100612@qq.com

* 通讯作者:黄国勤,男,教授,主要从事耕作制度、农业生态、农业可持续发展等研究。E-mail:hgqjxes@sina.com

壤水稳性大团聚体的形成^[12]。此外,土壤有机质(soil organic matter, SOM)与土壤结构相互关联,SOM与原生矿物颗粒结合形成的稳定的土壤团聚体可为其他可矿化的SOM提供物理保护^[13]。因此,明确不同冬季种植模式下土壤团聚体特征,能加强对稻田土壤结构特性的认识,为改善稻田土壤结构和土壤质量提供理论依据,使农业生产力得以持续发展。

本研究在长期定位试验的基础上,通过对比分析冬季不同种植模式下土壤水稳性团聚体的结构特性,旨在揭示各冬种模式下土壤团聚体的结构组成、分布状况及其各粒级下土壤有机碳含量,为明确稻田土壤结构、合理调整及配置双季稻的不同冬季种植模式提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验在赣东北典型双季稻区的江西省万年县农科所陈营镇试验田(28°41'N,116°55'E)进行。该地区属亚热带季风气候,气候湿润,光热资源丰富,气温季节性变化显著;年平均气温 18.6℃,极端最高气温 38.3℃,极端最低气温-5℃;年平均降雨量 1 906 mm;年平均日照时长 1 662.65 h;年平均风速 1.3 m·s⁻¹;年无霜期 260 d。试验地土壤为第四纪亚红粘土母质发育的潜育土,0~15 cm 土壤肥力状况:全氮 1.97 g·kg⁻¹、有效磷 16.38 mg·kg⁻¹、速效钾 130.00 mg·kg⁻¹、有机碳 24.25 g·kg⁻¹,C/N 比为 12.31,土壤 pH 值 6.08。

1.2 试验材料与试验设计

试验开始于 2012 年 4 月,采取单因素随机区组设计,共设置 5 个处理:T0(CK)、T1、T2、T3、T4(详见表 1),紫云英由邓家埠水稻原种场提供,油菜和大蒜购自当地农贸市场。每个处理 3 次重复,小区面积 66.0 m²,小区周围设置宽 1.5 m 的保护带进行保护行隔离。早、晚稻施肥一致:尿素(N,46%) 153.33 kg·hm⁻²、过磷酸钙(P₂O₅,12%) 50.91 kg·hm⁻²、氯化钾(K₂O,60%) 122.73 kg·hm⁻²,其中磷肥全部作基肥在水稻移栽前一次性施入,钾、氮肥分基肥、蘖肥、穗肥 3 次撒施,施用比例为基肥:分蘖肥:穗肥=2:2:1,分蘖肥在移栽后 5~7 d 施用,穗肥在主茎幼穗长 1~2 cm 时施用。

冬季作物品种、播种量及施肥量见表 2,冬作物施用复合肥(其中 N:P₂O₅:K₂O=15%:15%:15%)。紫

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatments	种植模式 Cropping patterns
T0(CK)	冬闲—双季稻
T1	紫云英(<i>Astragalus sinicus</i> L.)—双季稻
T2	油菜(<i>Brassica campestris</i> L.)—双季稻
T3	大蒜(<i>Allium sativum</i> L.)—双季稻
T4	马铃薯(<i>Solarium tuberosum</i> L.)、紫云英、油菜—双季稻

注:T4 的冬季种植作物自 2012 年冬季开始在马铃薯、紫云英和油菜之间循环轮作,2017 年该处理冬季种植作物为油菜。

Note: The winter crop under T4 treatment began to rotate among potatoes, Chinese milk vetch and rapeseed since winter of 2012, and the winter crop under T4 treatment was rapeseed in 2017.

云英、油菜、大蒜的播种时间分别为 2017 年 9 月 30 日、2017 年 10 月 29 日、2017 年 11 月 2 日,种植前开沟、作畦、耙碎,株行距 18 cm×5 cm,冬季种植后覆盖部分晚稻秸秆,保证其正常生长。所有冬作物均在 4 月 15 日收获并将秸秆翻压还田。早稻收获后秸秆切碎翻压全部还田,晚稻收获后秸秆覆盖半量还田,其他田间管理措施同一般大田栽培。早稻于 2018 年 5 月 3 日移栽,7 月 10 日成熟;晚稻于 7 月 13 日移栽,10 月 15 日成熟。

1.3 测定项目与方法

试验于 2018 年 10 月 25 日晚稻收获后,在每个小区进行随机“五点”取样,采集 0~10、10~20、20~30 cm 土层的土样,并在运输过程中尽量保证土壤的原状,将其带回实验室后挑去动植物残体、根系及石粒,然后置于阴凉通风处自然风干,再进行后续测定。其中,土壤水稳性团聚体含量的测定采用湿筛法^[14],每个处理 3 次重复,具体步骤:称取约 50 g 风干土,润湿 5 min 后将其置于套筛上,然后放入桶中浸泡 10 min,采用 TPF-100 型土壤团聚体/团粒分析仪(浙江托普仪器有限公司)上下振动 5 min(振幅 4 cm,频率 40 次·min⁻¹)分筛(上下筛动时套筛不能露出水面),最后收集各级筛子上的团聚体并分别转移至铝盒中,60℃烘干,称重。将>0.25 mm 粒级的团聚体称为水稳性大团聚体(macroaggregates),而<0.25 mm 粒级的团聚体称为水稳性微团聚体(microaggregates);土壤团聚体有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[15],每个处理 3 次重复,将>2、1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.53~0.25 mm 粒级的烘干土样过称取约 0.1 g(精确至 0.000 1 g)土样用于团聚体有机碳的测定。

表 2 不同试验处理的作物、品种及施肥、还田情况(2017年冬季)

Table 2 The crops, varieties, fertilization and field return under different experimental treatments(In the winter of 2017)

处理 Treatments	冬季作物 Winter crops			还田植株养分状况 Nutrient status of returned plants			
	供试品种 Tested varieties	播种量 Seeding rate /(kg·hm ⁻²)	施肥量 Fertilization dosage /(kg·hm ⁻²)	冬种秸秆还田量 Amount of winter crop/(kg·hm ⁻²)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g·kg ⁻¹)
T0(CK)	冬闲	0	0	0	0	0	0
T1	余江大叶子紫云英	30	0	3 309.29	27.7	2.7	25.3
T2	绵丰油 18 油菜	22.5	375	4 460.81	14.5	3.8	17.0
T3	金乡大蒜	2 475	450	0	0	0	0
T4	绵丰油 18 油菜	22.5	375	4 359.42	15.7	4.0	15.9

1.4 数据计算与分析

土壤水稳性团聚体计算^[16]:计算各粒级水稳性团聚体的质量分数 W_i , $i=1, 2, 3, 4, 5$ 和 6, 分别对应 $>2, 1 \sim 2, 0.5 \sim 1, 0.25 \sim 0.5, 0.053 \sim 0.250, <0.053$ mm 6 个粒级的团聚体:

$$W_i = \frac{M_i}{M_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M_i 为筛后对应第 i 级团聚体的质量, M_t 为测定团聚体的总质量。

利用各粒级团聚体百分数含量, 计算 >0.25 mm 水稳性大团聚体的含量 ($WR_{0.25}$)、水稳性团聚体平均质量直径 (mean weight diameter, MWD)、水稳性团聚体平均几何直径 (geometric mean diameter, GMD):

$$WR_{0.25} = 1 - \frac{M_{(i<0.25)}}{M_t} \quad (2)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n (W_i)} \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n (M_i)} \right] \quad (4)$$

式中, \bar{X}_i 为对应粒级团聚体的平均直径。

分形维数(D)的计算采用杨培岭^[17]推导的公式:

$$\frac{M(r < \bar{X}_i)}{M_t} = \left(\frac{\bar{X}_i}{X_{max}} \right)^{3-D} \quad (5)$$

对上述公式两边取对数, 可得公式:

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{X}_i)}{M_t} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{X}_i}{X_{max}} \right) \quad (6)$$

式中, $M(r < \bar{X}_i)$ 为粒径小于 \bar{X}_i 的团聚体的质量, X_{max} 为团聚体的最大粒径, 最后利用公式(5)或公式(6), 通过最小二乘法进行直线回归数据拟合, 求得 D 值。

土壤有机碳的计算公式如下^[15]:

$$\text{土壤有机碳} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{C(V_0 - V) \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1.1}{M} \times 1000 \quad (7)$$

式中, C 为硫酸亚铁标准溶液浓度, mol·L⁻¹; V_0 为空白滴定用去体积, mL; V 为样品滴定用去体积, mL; 3.0 表示 1/4 碳原子的摩尔质量, g·mol⁻¹; 1.1 表示氧化校正系数; M 为所称土壤质量, g。

试验数据采用 Microsoft Office Excel 2010 整理; 不同处理间各指标分别采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析 (Duncan 法对各项测定数据进行多重比较); 采用 Origin 9.0 制图。

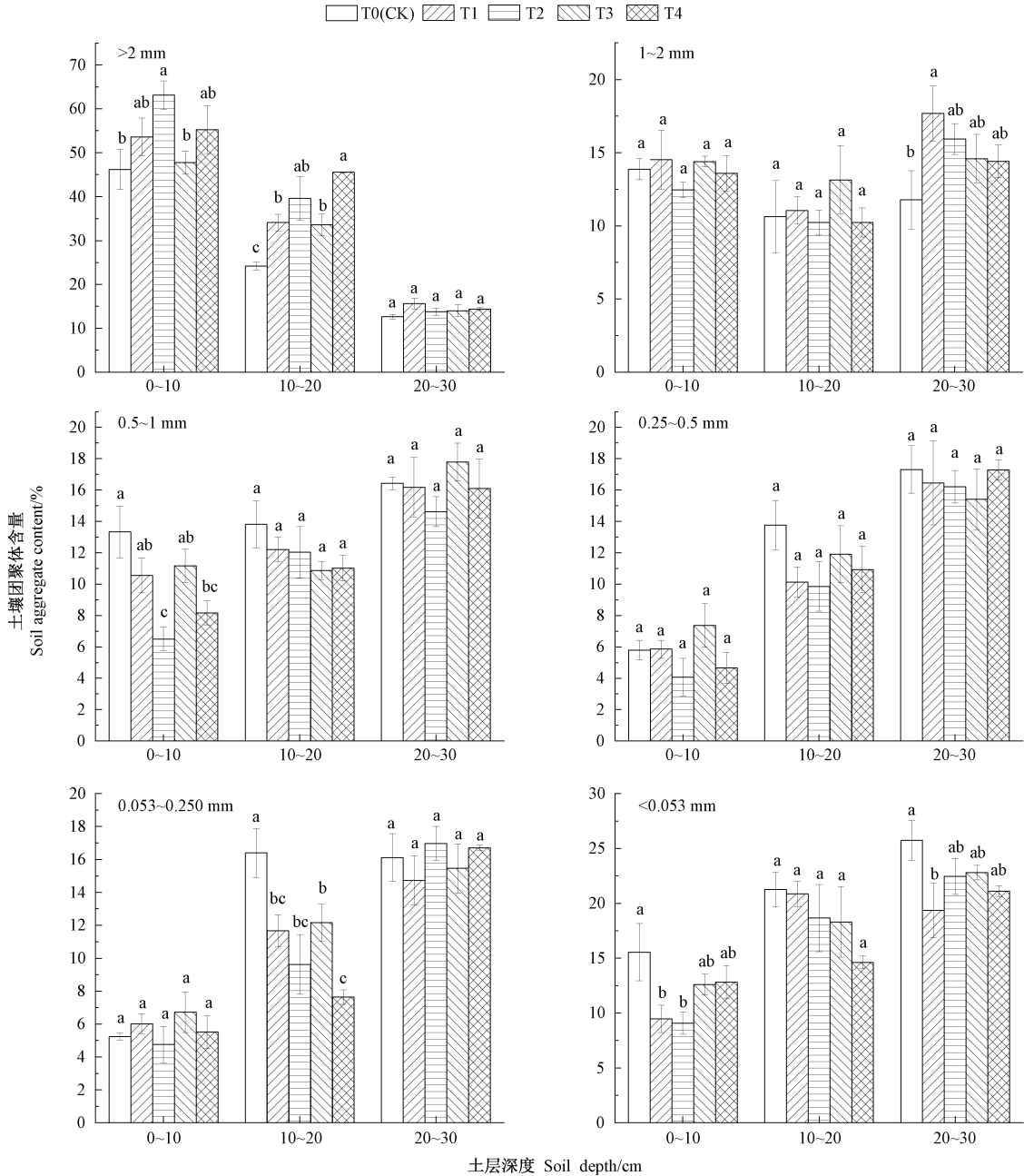
2 结果与分析

2.1 冬季不同种植模式对土壤水稳性团聚体质量的影响

总体来看, 在 0~30 cm 土层深度 (表 3), 各处理表现趋势为 >2 mm 粒级土壤团聚体含量最高, 其次是 <0.053 mm 粒级土壤团聚体含量, 而 $1 \sim 2, 0.5 \sim 1, 0.25 \sim 0.05, 0.053 \sim 0.250$ mm 粒级土壤团聚体含量相近。在进行冬季作物种植后, 0~30 cm 土层中 >2 mm 粒级土壤的水稳性团聚体含量除 T3 外, 其余处理均与

CK 差异显著 ($P < 0.05$), 而对于 < 0.053 mm 粒级土壤团聚体来说, CK 与其他各处理间均差异显著 ($P < 0.05$)。由图 1 可知, 不同土层土壤水稳性团聚体含量表现不一, 在 10~20 cm 土层深度, 各处理 > 2 mm 粒级的土壤团聚体含量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。除

> 2 mm 粒级的土壤团聚体, 其余各粒级的土壤团聚体含量随着土层深度的加深, 大体呈增加趋势。在 0~30 cm 土层深度, 不同冬季种植模式显著增加了稻田土壤水稳性大团聚体 (> 0.25 mm) 含量, 降低了土壤水稳性微团聚体 (< 0.25 mm) 含量 ($P < 0.05$)。



注: 不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the same soil layer ($P < 0.05$).

图 1 稻田土壤水稳性团聚体含量分布

Fig.1 Content distribution of soil water-stable aggregates in paddy fields

表 3 稻田土壤水稳性团聚体含量分布(0~30 cm)

Table 3 Content distribution of soil water-stable aggregates in paddy fields(0~30 cm)

/%

处理 Treatments	团聚体粒径 Aggregate size/mm					
	>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.053~0.25	<0.053
T0(CK)	27.67±1.38c	12.09±0.89a	14.51±0.21a	12.29±1.23a	12.58±0.16a	20.85±0.51a
T1	34.43±1.21ab	14.41±1.26a	12.98±0.42abc	10.8±1.01a	10.81±0.78ab	16.57±0.70b
T2	38.86±2.45a	12.87±0.77a	11.05±0.66c	10.04±0.80a	10.44±1.29ab	16.74±0.91b
T3	31.78±1.11bc	14.04±0.96a	13.28±0.67ab	11.56±0.60a	11.45±0.43ab	17.91±0.63b
T4	38.41±1.78a	12.74±0.39a	11.76±0.95bc	10.96±0.57a	9.96±0.39b	16.18±0.30b

注:数据为3个重复的平均值±标准误;同列不同小写字母表示不同冬季种植模式处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The data are means ± standard deviation. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments of different winter planting modes at 0.05 level. The same as following.

2.2 冬季不同种植模式对土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 的影响

由表4可知,总体来看,相比于CK,其他4种冬季不同种植模式均有利于提高土壤水稳性团聚体的MWD与GMD。随着土层深度的增加,MWD与GMD呈下降趋势;从所有土层的平均值来看,各处理水稳性团聚体的MWD大小顺序为T2>T4>T1>T3>CK,且T2、T4、T1分别较CK显著提高21.50%、21.16%、16.32%($P<0.05$),T3较CK提高10.59%,但差异不

显著;同样在0~30 cm土层,T2和T4水稳性团聚体的GMD分别较CK显著提高83.3%、62.50%($P<0.05$)。在0~10 cm土层中,与CK相比,其余各处理均提高了稻田土壤水稳性团聚体的MWD和GMD,且T2与CK差异显著($P<0.05$);在10~20 cm土层中,T2、T4土壤水稳性团聚体MWD和GMD均与CK差异显著($P<0.05$);在20~30 cm土层中,T1土壤水稳性团聚体MWD和GMD均与CK差异显著($P<0.05$)。

表 4 稻田土壤水稳性团聚体平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)

Table 4 Mean mass diameter (MWD) and mean geometric diameter (GMD) of soil water stability aggregates in paddy fields

指标 Index	处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm			平均 Average/cm
		0~10	10~20	20~30	
MWD	T0(CK)	1.265 9±0.082 6Ab	0.828 3±0.030 2Bb	0.648 7±0.024 1Cb	0.914 3±0.028 3Bb
	T1	1.402 2±0.054 5Aab	1.000 3±0.026 3Bab	0.787 9±0.046 0Ca	1.063 5±0.022 0Ba
	T2	1.523 3±0.057 1Aa	1.092 3±0.103 1Ba	0.717 2±0.005 1Cab	1.110 9±0.051 08Ba
	T3	1.295 9±0.052 6Ab	1.018 6±0.079 6Bab	0.718 8±0.029 4Cab	1.011 1±0.029 5Bab
	T4	1.399 4±0.078 9Aab	1.203 7±0.008 9Ba	0.720 5±0.012 7Cab	1.107 8±0.025 2Ba
GMD	T0(CK)	1.578 4±0.374 6Ab	0.533 5±0.035 3Bc	0.333 0±0.023 8Bb	0.814 9±0.123 8Bc
	T1	2.272 2±0.352 6Aab	0.784 4±0.066 4BCbc	0.481 9±0.051 5Ca	1.179 5±0.112 2Babc
	T2	3.015 3±0.381 7Aa	1.075 3±0.275 8BCab	0.390 7±0.014 4Cab	1.493 8±0.213 3Ba
	T3	1.699 7±0.205 3Ab	0.865 5±0.158 0Bbc	0.396 5±0.018 4Cab	0.987 2±0.054 2Bbc
	T4	2.186 0±0.403 0Aab	1.377 2±0.007 3Ba	0.409 3±0.009 1Cab	1.324 2±0.132 0Bab

注:同行不同大写字母表示不同土层深度间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters in the same row indicate significant difference among depths of different soil layers at 0.05 level.

2.3 冬季不同种植模式对土壤团聚体分维特征的影响

冬季不同种植模式下各土层水稳性团聚体分形维数D如图2所示。通过多年冬季不同种植模式下秸秆还田处理后,随着土层的加深分形维数大体呈递增的趋势。在0~10 cm与20~30 cm土层深度,T1与

CK差异显著($P<0.05$),与CK相比,其余处理虽未达到显著水平($P>0.05$),但各处理下分形维数D都低于CK;10~20 cm土层,各处理下分形维数D表现为T4<T3<T2<T1<CK,分别较CK低2.39%、1.10%、1.01%、0.12%,但各处理间差异不显著($P>0.05$)。综合考量,与CK相比,T1、T2、T4显著降低了0~30

cm 土壤水稳性团聚体的分形维数 ($P < 0.05$), 这一变化与 0~30 cm 土壤水稳性团聚体数量变化一致, 而与水稳性大团聚体数量变化相反。

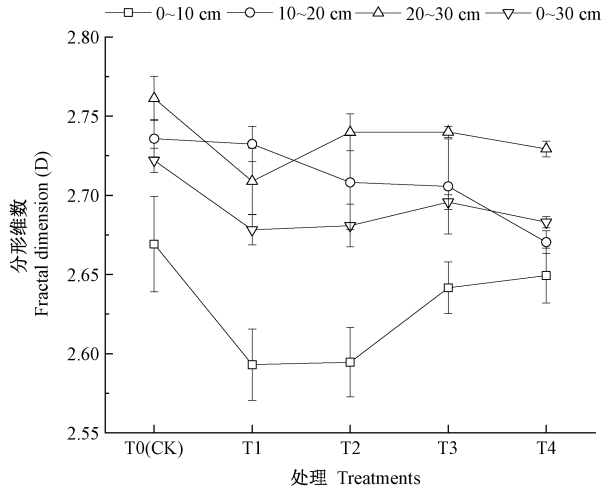


图2 冬季不同种植模式下土壤团聚体分形维数
Fig.2 Fractal dimension of soil aggregates under different winter planting patterns

2.4 冬季不同种植模式对土壤团聚体有机碳含量的影响

由表 5 可知, 各粒级下土壤有机碳变化不一, 综合 0~30 cm 土层深度: 团聚体粒径在 0.053~2 mm 范围内总体呈现出随着粒径的减小, 土壤团聚体有机碳含量也相应下降的趋势, 且与 CK 相比, 除 T1 在 1~2 mm 粒径外, 其余处理不同粒级下有机碳的含量均有所增加; 随着土层深度的增加, 各粒级下土壤有机碳含量呈下降趋势。在 0~10 cm 土层深度, T4 与 CK 在 >2 mm 粒径的土壤团聚体有机碳含量差异显著; 10~20 cm 土层深度, T4 除在 0.5~1 mm 粒径有机碳含量低于 CK 外, 其余各处理均在一定程度提高了相应粒级下的有机碳含量; 在 20~30 cm 土层深度, T4 中 0.053~0.250 mm 粒级团聚体有机碳含量较 CK 显著增加 72.71% ($P < 0.05$)。总体来看, 在 0~30 cm 土层深度, 各处理在 1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 粒级下的有机碳含量变化不显著, 但 T4 在 >2 mm 与 0.053~0.250 mm 粒级下有机碳含量均显著高于 CK, 分别增加了 19.46%、22.11% ($P < 0.05$)。

表 5 冬季不同种植模式下土壤团聚体有机碳含量

Table 5 The soil organic carbon content of aggregates under different winter planting patterns / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatments	团聚体粒径 Aggregate size/mm				
		>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.053~0.250
0~10	T0(CK)	28.58±0.95b	31.97±1.23a	31.66±0.21a	32.08±1.33a	28.72±1.41a
	T1	31.36±1.11ab	32.71±2.59a	33.44±1.53a	32.99±0.10a	28.37±2.00a
	T2	28.78±2.74b	32.02±2.10a	33.78±2.55a	32.71±1.95a	31.26±2.31a
	T3	31.43±2.02ab	33.43±1.29a	34.28±2.90a	32.70±0.23a	30.53±3.00a
	T4	35.41±0.46a	35.24±1.26a	36.76±0.81a	35.51±1.55a	34.11±0.75a
10~20	T0(CK)	15.10±3.42a	14.09±1.62a	11.88±0.98a	11.19±2.88a	9.62±1.33a
	T1	16.32±1.81a	14.22±1.63a	12.20±0.86a	11.29±1.23a	10.45±0.30a
	T2	16.06±0.99a	15.24±2.64a	13.40±1.63a	12.69±0.68a	11.59±0.68a
	T3	15.89±2.59a	14.61±1.95a	13.03±0.47a	11.34±0.75a	10.94±1.06a
	T4	16.09±1.51a	14.42±0.79a	11.32±1.26a	11.43±0.38a	10.30±0.18a
20~30	T0(CK)	10.28±0.69a	9.79±0.93ab	7.98±0.84a	5.56±1.31a	4.80±0.31b
	T1	12.21±3.66a	8.42±0.21b	8.08±0.79a	8.47±1.40a	5.03±0.51b
	T2	11.37±1.27a	12.15±0.44a	8.39±1.03a	8.98±1.45a	6.39±0.78ab
	T3	12.23±0.98a	9.44±1.29b	8.05±0.87a	8.01±1.54a	5.98±0.73b
	T4	12.99±1.04a	10.32±0.64ab	9.57±1.60a	7.99±1.40a	8.29±0.61a
0~30	T0(CK)	17.99±1.06b	18.62±0.45a	17.17±0.30a	16.27±0.40a	14.38±0.75b
	T1	19.96±0.89ab	18.45±1.33a	17.91±1.04a	17.58±1.03a	14.62±0.85b
	T2	18.74±0.30ab	19.80±0.78a	18.52±0.58a	18.13±0.50a	16.41±0.98ab
	T3	19.85±1.17ab	19.16±1.35a	18.45±1.19a	17.35±0.61a	15.82±0.73ab
	T4	21.49±0.95a	19.99±0.90a	19.22±0.71a	18.31±0.59a	17.56±0.22a

3 讨论

土壤结构是土壤肥力的综合反映,是鉴定土壤肥力的标志之一。王丽等^[18]研究表明土壤团聚体构成比例失调及团聚体稳定性下降是土壤结构退化的主要表现,对农业的可持续生产具有重要影响;刘中良等^[19]研究表明不同粒径的团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用。本试验结果表明,经过多年的冬季不同种植模式,在 0~30 cm 土层深度,T1、T2、T3、T4 较 CK 均增加了 >2 mm 粒级的水稳性团聚体含量,降低了 <0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量($P<0.05$),而 1~2 mm 与 0.25~0.5 mm 粒级的土壤团聚体含量差异不显著,这与 Six 等^[20]的土壤大团聚体周转及 SOM 变化的胚胎发育模型相符合。本研究中,不仅水稻秸秆向稻田土壤输入,且各冬季作物秸秆均相应输入土壤,新的植物残体促进了团聚体中颗粒有机质的形成,颗粒有机质被黏土矿物和微生物分泌的粘液包裹,进而形成新团聚体的核心,在土壤有机质胶结作用的影响下,微团聚体、矿物质和颗粒有机质结合形成大团聚体,促进土壤大团聚体数量的增加。在 0~30 cm 土层深度,>2 mm 土壤团聚体含量以 T2 最佳,其次是 T4,这 2 种冬季种植模式与 CK 差异显著,此外,T1、T2、T3 和 T4 较 CK 显著增加稻田土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量,降低了土壤水稳性微团聚体含量($P<0.05$),说明冬季不同种植模式有利于土壤水稳性团聚体的形成,提高土壤团聚体稳定性,这与 Yang 等^[21]的研究结果一致。

有机肥促进了作物根系的生长,进而根系分泌物促进微生物的繁衍,微生物旺盛的生命活动将导致微生物群落丰富度和多样性的增加^[22]。本研究中,T1、T2、T3、T4 各处理稻田土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量在 0~30 cm 土层深度均与 CK 差异显著,T1、T2、T3、T4 分别较 CK 增加 9.12%、9.41%、6.14%、10.97%,除了稻田秸秆还田之外,这还可能与长期不同冬季作物根系所形成微生物的数量和种类有关,长期周年连作形成的微生物数量和种类较单一,而长期轮作措施形成的微生物数量和种类较连作措施丰富。随着土层深度的增加,各粒级水稳性团聚体含量变化不明显,这可能与微生物在不同深度土壤的分布有关。

与传统耕作相比,保护性耕作(包括少免耕和秸秆覆盖等)可以有效地减少土壤扰动和土壤团聚体结构破坏,但长期采用单一的耕作措施会导致对作物生长不利的土壤条件的形成^[23]。水稳性土壤团聚体结

构具有抗水力分散的作用,稳定性团聚体的形成有助于改变土壤结构,一般用 MWD 和 GMD 表征土壤团聚体的稳定性,其中 MWD 越大,表示大团聚体的百分比越高,GMD 越大则表示团聚体越稳定^[24];用分形维数 D 反映土壤结构的变化^[25-26],其值越小则表明土壤团粒结构越稳定、通透性越好。本研究结果表明,随着土层深度的增加,MWD 和 GMD 呈下降趋势,且 T1、T2、T3、T4 各处理的 MWD 和 GMD 均高于 CK,其中在 0~30 cm 土层,T1、T4 的 MWD 较 CK 分别显著提高 16.32%、21.16% ($P<0.05$),T2 和 T4 的 GMD 较 CK 分别显著提高 83.31%、62.50% ($P<0.05$),与张钦等^[27]的研究结果一致。此外,与 CK 相比,T1、T2、T3、T4 均降低了土壤的分形维数,且显著降低了 0~30 cm 土壤水稳性团聚体的分形维数($P<0.05$),其中 T1 最低。综上所述,冬种油菜(T2)和冬季轮作(T4)种植模式显著提高土壤团聚体稳定性的效果优于其他种植模式。

冬种绿肥可以增加早稻产量^[28],提高土壤有机质含量^[29],改善土壤理化性状^[30],是一种优质的生物肥料^[31],秸秆还田对有机碳的增加以及土壤质量的改善等方面具有重要影响^[32-34]。本试验结果表明,随着土层深度的增加,各粒级下土壤团聚体有机碳含量呈下降趋势。在 0~30 cm 土层深度,不同冬季种植模式在 1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 粒级下的有机碳含量变化不显著,但 T4 在 >2 mm 与 0.053~0.250 mm 粒级下有机碳含量显著高于 CK,且分别增加了 19.46%、22.11% ($P<0.05$),这种显著差异可能与长期多年轮作所造成的碳氮代谢和土壤微生物有关,其余各粒级下团聚体有机碳变化不显著,但 T1、T2、T3、T4 对各粒级下土壤团聚体有机碳的含量较 CK 均有增加的趋势。

4 结论

冬季不同种植模式可以提高稻田土壤团聚体有机碳含量,显著增加稻田土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量,显著降低土壤水稳性微团聚体含量($P<0.05$),有利于提高土壤质量,其中冬种油菜和冬季轮作种植模式显著提高土壤团聚体稳定性,效果优于其他种植模式。在 0~30 cm 土层深度,与 CK 相比,马铃薯、紫云英、油菜三者冬季轮作种植模式显著提高了 >2 mm 和 0.053~0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量。

参考文献:

[1] 刘书通. 长江中下游地区水稻生产能力分析[D]. 北京: 中国农

- 业科学院, 2014: 10-12
- [2] 谭淑豪. 南方冬闲田季节性规模经营模式分析[J]. 农业经济问题, 2010, 31(5): 62-65
- [3] Verchot L V, Dutaur L, Shepherd K D, Albrecht A. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3): 182-193
- [4] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 冉义国, 王小晓, 黄平. 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
- [5] 张丽莉, 武志杰, 陈利军, 张玉兰. 不同种植制度土壤氧化还原酶活性和动力学特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 343-347
- [6] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5358-5371
- [7] 贾豪, 严宁珍, 程永毅, 刘洪斌. 渝东南农田土壤有机碳空间分布特征及影响因素[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1256-1263
- [8] 黄国勤, 熊云明, 钱海燕, 王淑彬, 刘隆旺, 赵其国. 稻田轮作系统的生态学分析[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 1159-1164
- [9] 张鹏, 贾志宽, 王维, 路文涛, 高飞, 聂俊峰. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513-1520
- [10] 孙隆祥, 陈梦妮, 薛建福, 郝建平, 郭秀卿, 杜天庆, 崔江辉, 张信宁. 秸秆还田对麦粟两熟农田土壤团聚体特征的短期效应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 40-48
- [11] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 陈洪俊, 王淑彬. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2907-2913
- [12] 张钦, 于恩江, 林海波, 张爱华, 陈正刚, 朱青, 曹卫东, 姚单君. 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
- [13] Beare M H, Cabrera M L, Hendrix P F, Coleman D C. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3): 787-795
- [14] 王志强, 刘英, 杨文亭, 周泉, Muhammad A, 王海, 黄国勤, 赵其国. 稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1143-1155
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-33
- [16] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 刘江, 梨嘉成. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 355-362
- [17] 杨培岭. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1896
- [18] 王丽, 李军, 李娟, 柏炜霞. 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
- [19] 刘中良, 宇万太, 周桦, 徐永刚, 黄宝同. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(5): 720-728
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377
- [21] Yang Z P, Xu M G, Zheng S X, Nie J, Gao J S, Liao Y L, Xie J. Effects of long-term winter planted green manure on physical properties of reddish paddy soil under a double-rice cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(4): 655-664
- [22] Yuan H Z, Ge T, Zhou P, Liu S L, Roberts P, Zhu H H, Zou Z Y, Tong C L, Wu J S. Soil microbial biomass and bacterial and fungal community structures responses to long-term fertilization in paddy soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(5): 877-886
- [23] Campbell C A, Selles F, Lafond G P, Biederbeck V O, Zentner R P. Tillage - fertilizer changes: Effect on some soil quality attributes under long-term crop rotations in a thin Black Chernozem [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, 81(2): 157-165
- [24] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments.[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227-234
- [25] 蔺芳, 邢晶鑫, 任思敏, 张家洋. 鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 186-192, 199
- [26] 高飞, 贾志宽, 韩清芳, 杨宝平, 聂俊峰. 有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 100-106
- [27] 张钦, 于恩江, 林海波, 张爱华, 陈正刚, 朱青, 曹卫东, 朱大雁. 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
- [28] 钟川, 杨滨娟, 张鹏, 李萍, 黄国勤. 基于冬种不同作物的水旱轮作模式对水稻产量及稻田 CH₄、N₂O 排放的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(2): 379-388
- [29] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 汤文光, 汪柯, 李超, 张帆, 孙玉桃. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 465-473
- [30] 杨滨娟, 黄国勤, 陈洪俊, 兰延. 利于水稻氮素吸收的绿肥翻压量和施氮水平研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1187-1195
- [31] 张颖睿, 杨滨娟, 黄国勤. 紫云英翻压量与不同施氮量对水稻生长和氮素吸收利用的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 430-437
- [32] 孙汉印, 姬强, 王勇, 王旭东. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 369-376
- [33] 王保君, 王伟, 胡乃娟, 顾泽海, 陈兵林, 张政文, 徐蒋来, 朱利群. 麦秸还田下水氮管理对稻田土壤养分、酶活性及碳库的短期影响[J]. 核农学报, 2016, 30(5): 957-964
- [34] 张水清, 黄绍敏, 李慧, 娄翼来, 钱小平, 三岛慎一郎, 聂胜委, 郭斗斗. 华北潮土区长期有机培肥下土壤有机碳和养分状况的动态变化[J]. 核农学报, 2014, 28(12): 2247-2253

Effects of Winter Different Planting Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon in Paddy Fields

ZHANG Peng ZHOU Quan HUANG Guoqin *

(Ecological Science Research Center of Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045)

Abstract: In order to explore effect of different winter planting patterns on soil structure and quality of paddy fields, five winter planting modes were set in the experiment, including winter fallow, winter Chinese vetch, and winter rape, winter garlic and winter rotation (potato, Chinese vetch and rape). The water stability and distribution of aggregates in paddy fields were analyzed by measuring the composition of soil aggregates and the organic carbon content of aggregates in different layers of paddy fields. The results showed that the soil aggregate content ($> 2\text{mm}$) was dominant (the highest), followed by $< 0.053\text{mm}$, while the soil aggregate content of $1\sim 2\text{mm}$, $0.5\sim 1\text{mm}$, $0.25\sim 0.05\text{mm}$, $0.053\sim 0.25\text{mm}$ was similar; the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of water-stable aggregates in paddy fields were increased by all winter cultivation treatments. The MWD of winter rape treatment, winter potato, Chinese milk vetch and rape rotation treatment and winter Chinese milk vetch treatment were increased by 21.50%, 21.16% and 16.32% respectively ($P < 0.05$). GMD of potato, Chinese milk vetch and rape in winter rotation treatment increased by 44.74% and 62.50%, respectively, compared with that in winter fallow treatment ($P < 0.05$); in addition, the fractal dimension values of soil water-stable aggregates were significantly reduced by different winter planting patterns ($P < 0.05$), which was beneficial to the stability of soil structure; the organic carbon content of soil aggregates increased with different winter planting patterns. Therefore, different winter planting patterns are beneficial to enhance the paddy soil aggregate stability and the accumulation of organic carbon with different particle fraction of soil water-stable aggregates. The winter crop rotation with potato milk vetch and rape showed the best result. The findings provide a theoretical basis for the selection of the optimal pattern of winter fallow fields in southern China.

Keywords: paddy field, winter cropping pattern, water-stable aggregates, aggregate stability, aggregate organic carbon