

# 施肥方式对稻麦轮作土壤团聚体分布的影响

白娜玲<sup>1,2,3,4</sup>, 吕卫光<sup>1,2,3,4</sup>, 李双喜<sup>1,2,4</sup>, 郑宪清<sup>1,2,3</sup>,  
张娟琴<sup>1,3,4</sup>, 张海韵<sup>1,2,3</sup>, 周胜<sup>1,5</sup>, 孙会峰<sup>1,5</sup>, 张翰林<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403;

2. 农业部上海农业环境与耕地保育科学观测试验站, 上海 201403; 3. 上海市农业环境保护监测站, 上海 201403; 4. 上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201403; 5. 上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415)

**摘要:** 土壤是人类赖以生存的重要资源, 团聚体作为土壤结构的基础单元, 不仅提高土壤肥力、调节养分的生物有效性, 而且增强土壤抗侵蚀能力。通过 6 年试验, 研究了不施肥(CK)、常规施肥(CF)、秸秆+缓释肥(SRF)和有机无机混施(OCF) 4 种施肥方式对土壤养分含量及各粒级团聚体分布的影响, 为揭示施肥措施对土壤地力形成演变的影响机制提供理论基础。结果表明: SRF 和 OCF 处理 0—20, 20—40 cm 土层土壤的 SOC 含量较 CF 显著增加 10.06%, 19.23% 和 9.84%, 16.79%; 3 种施肥处理 0—20, 20—40 cm 土层的 TN 差异不显著, 但均高于 CK 处理; OCF 处理中 0—20 cm 土层的 C/N 比较 CF 增加 16.44% ( $p < 0.05$ )。SRF 处理较 CK 显著提高了 0—20 cm 土层  $R_{0.25}$  (10.93%); 20—40 cm 土层, OCF 处理中  $R_{0.25}$  显著高于其他 3 个处理, 分别高出 32.62%(CK), 19.75%(CF), 19.44%(SRF) ( $p < 0.05$ )。相比 CF 处理, SRF 和 OCF 提高了 0—20, 20—40 cm 土层的平均质量直径 MWD (1.54%~16.92%, 2.17%~28.26%) 和平均几何直径 GMD (5.88%~14.71%, 13.04%~39.13%), 降低了分形维数  $D$  (1.11%~2.09%, 4.99%~5.44%), 且 OCF 处理更为显著 ( $p < 0.05$ )。可见, 秸秆+缓释肥和有机无机混施处理均有利于土壤肥力提升, 且后者效果更为显著。MWD 和 GMD 与土壤 SOC 和 TN 的相关性较高, 均适合用于揭示团聚体与土壤总有机碳、总氮含量之间的关系; 但分形维数  $D$  与之无显著相关性关系。

**关键词:** 施肥措施; 稻麦轮作; 土壤团聚体; 土壤总有机碳; 土壤全氮

中图分类号: S152; S153.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)03-0088-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.014

## Effects of Fertilization Patterns on Soil Aggregates Distribution in Rice-wheat Rotation Systems

BAI Naling<sup>1,2,3,4</sup>, LÜ Weiguang<sup>1,2,3,4</sup>, LI Shuangxi<sup>1,2,4</sup>, ZHENG Xianqing<sup>1,2,3</sup>,

ZHANG Juanqin<sup>1,3,4</sup>, ZHANG Haiyun<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Sheng<sup>1,5</sup>, SUN Huifeng<sup>1,5</sup>, ZHANG Hanlin<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Eco-environmental Protection Research Institute of SAAS, Shanghai 201403; 2. Agricultural Environment and Farmland Conservation Experiment Station, Ministry of Agriculture, Shanghai 201403; 3. Environmental Protection Monitoring Station of SAAS, Shanghai 201403; 4. Shanghai Key Laboratory of Horticultural

Technology, Shanghai 201403; 5. Shanghai Engineering Research Center of Low-carbon Agriculture, Shanghai 201415)

**Abstract:** Soil is an important resource for human survival. Soil aggregate, as the basic unit of soil structure, can not only improve soil fertility, regulate the bioavailability of nutrients, but also, but nutrients also enhance soil anti-erosion ability. In this research, four fertilization patterns were applied in a rice-wheat rotation system at Shanghai Zhuanghang long-term positioning test station for six years, which were non-fertilization (CK), conventional inorganic fertilization (CF), straw returning to field with slow release fertilizer (SRF), and mixed organic fertilizer with chemical fertilizer treatment (OCF). It provides a theoretical basis for revealing the influence mechanism of fertilization methods on the formation and evolution of soil fertility. SRF and OCF increased the SOC contents in 0—20 cm and 20—40 cm soil by 10.06%, 19.23% and 9.84%, 16.79%, respectively. OCF also increased the level of C/N in 0—20 cm (16.44%). There was no

收稿日期: 2018-11-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501259); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(18YF1420900); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200804); 上海市农业科学院卓越团队建设计划项目

第一作者: 白娜玲(1989—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事微生物生态研究。E-mail: bainaling@saas.sh.cn

通信作者: 张翰林(1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农田生态研究。E-mail: zhanghanlinchick@163.com

significant difference in TN contents in both 0—20 cm and 20—40 cm soil layers under CF, SRF, and OCF. But they were all higher than that of CK. Compared with CK, SRF significantly improved  $R_{0.25}$  in 0—20 cm soil layer by 10.93%. OCF increased the  $R_{0.25}$  in 20—40 cm, compared with the other three treatments (32.62% CK, 19.75% CF, 19.44% SRF) ( $p < 0.05$ ). Compared with CF, SRF and OCF increased MWD (1.54% ~ 16.92%, 2.17% ~ 28.26%) and GMD (5.88% ~ 14.71%, 13.04% ~ 39.13%), decreased  $D$  (1.11% ~ 2.09%, 4.99% ~ 5.44%) in the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers, with the more prominent effect for OCF ( $p < 0.05$ ). In conclusion, both SRF and OCF were beneficial to soil fertility improvement, and effect of OCF was more significant. The correlations between MWD and GMD and soil SOC and TN were significant, which, therefore, were suitable for revealing the relationships between aggregation and the soil nutrient contents. However, there was no significant correlation between soil nutrients and  $D$ .

**Keywords:** fertilization methods; rice-wheat rotation system; soil aggregation; soil organic carbon; soil total nitrogen

土壤团聚体作为土壤结构的基本单位,其稳定性直接影响土壤表层的水、土界面行为,影响土壤的水肥气热状况<sup>[1]</sup>。土壤团聚体按照颗粒大小分为大团聚体(粒径 $>0.25$  mm)和微团聚体(粒径 $<0.25$  mm),大团聚体丰富是土壤良好结构特征的表现,其与土壤肥力之间存在一定的正比例关系<sup>[2]</sup>。土壤结构评价的指标很多,其计算方法和表达特征不尽相同。平均重量直径(MWD)以及几何平均直径(GMD)很早就作为土壤分布状况及稳定性的指标,并且MWD与GMD值越大,土壤团聚体的分布状况与稳定性越好,被广泛应用于评价农业管理措施对水稳性团聚体分布的影响<sup>[3-4]</sup>。土壤分形维数 $D$ 与土壤中黏粒、粉粒等内部组成显著相关,能够反映土壤结构、退化程度、土壤质地的均一程度等<sup>[5-6]</sup>。

化肥的施用对于中国乃至全球的粮食增产具有举足轻重的作用;施肥是影响土壤质量演化及其可持续利用最为深刻的农业措施之一。有研究<sup>[7]</sup>显示,平衡施肥和化肥减量的氮磷钾均衡施用,有助于土壤团聚体的形成及增强其稳定性;日常施肥易偏施氮肥、低磷肥,不施用钾肥,不利于土壤结构及团聚体的稳定性。通过化肥包膜制作缓释肥是一种有效的延长肥力释放的方法,可将氮素吸收利用率提高到80%左右<sup>[8]</sup>。秸秆还田可提升土壤总有机碳SOC含量、活性有机碳含量及团聚体稳定性指数,且还田年限越长趋势越明显<sup>[9]</sup>。孙会峰等<sup>[10]</sup>发现,秸秆与缓释肥配施处理可以明显提高氮素吸收利用率,减轻面源污染负荷,但未涉及其对土壤理化性质及团聚体分布的影响。有机无机混施可以提高土壤养分利用率、微生物生物量、酶活性和氮素循环,进而促进作物产量<sup>[11]</sup>。但刘哲等<sup>[12]</sup>指出,单施有机肥相较于有机无机混施处理,补充土壤有效养分含量的同时显著增加土壤中大团聚体的含量及其水稳性。因此,施肥、耕作等管理措施均可不同程度地影响土壤团聚体的分

布。但是,目前针对长期不同施肥方式下(不施肥,常规施肥,秸秆/缓释肥配施、有机无机混施等)稻麦轮作不同深度土壤团聚体分布特征的研究还较少。

本研究以上海市农业科学院庄行试验站稻麦轮作试验田为研究对象,通过田间长期施肥管理与轮作定位试验,研究化肥、秸秆/缓释肥和有机无机混施肥等施肥方式对稻田不同土层深度养分及团聚体稳定性的影响,分析其与土壤碳氮养分之间的相关性,期为稻麦田合理施肥提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于上海市农业科学院庄行综合试验站(30°53' N, 121°23' E),隶属于上海低碳农业工程技术研究中心。站内年平均气温为15.8℃,年平均降水量为1178 mm。土壤类型为沟干泥(潴育型水稻土),土质为黏壤土。作物种植模式为水稻—小麦轮作,已种植6年。试验地区的土壤部分初始理化指标为:总有机碳(SOC)含量7.69 g/kg,总氮(TN)含量0.89 g/kg, pH(土水比1:2.5)8.28,土壤容重1.4 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验设置4个处理:空白处理(CK)、常规无机肥处理(CF)、缓释肥处理(与常规处理同样施氮量,其中秸秆还田量3 t/hm<sup>2</sup>,其余氮量由缓释肥补充提供,SRF)、有机无机混施肥处理(与常规处理同样施氮量,无机肥和有机肥纯氮量1:1,OCF)。试验小区采用完全随机区组设计,每个小区面积60 m<sup>2</sup>,每个处理设置3个重复。试验小区间以水泥田埂配合防渗膜的形式相互隔开,以防侧渗。

稻季的氮、磷、钾肥的施用量分别为225, 112.5, 255 kg/hm<sup>2</sup>。麦季的施用量分别为180, 90, 204 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥按基肥、蘖肥和穗肥5:3:2的比例施入,磷肥作基肥一次性施入。钾肥施用量的44%作基肥施入,剩下的作穗肥。常规无机肥为尿素;缓释

肥为树脂和硫磺双包膜尿素,含氮量 42%。其他田间管理措施各处理间均相同。

### 1.3 样品采集

于 2016 年 5 月中旬(即麦季收获后)采集样品。各处理区域选取若干分布均匀且具代表性的采样点,采样时首先除去 0.5 cm 左右的表层,用直径 2 cm 的不锈钢采土器于土壤 0—20, 20—40 cm 土层进行“S”形多点采集土壤样品,将同一样品混合后装入聚乙烯封口袋中,做好采样点的标记,置于低温保鲜盒中带回实验室。采集和运输过程中尽量减少对土壤的扰动,以免破坏团聚体。沿其固有的裂缝将大块土壤轻轻剥成直径 10~20 mm 的小土块,剔除其中石块、根系后自然风干,用于土壤水稳性团聚体及土壤碳氮含量的测定。

### 1.4 样品分析

土壤总有机碳(SOC)测定采用重铬酸钾氧化一分光光度法,土壤总氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定。土壤水稳性团聚体采用湿筛法<sup>[13]</sup>进行测定。湿筛分析使用团聚体分析仪,套筛孔径分别为 2, 1, 0.5, 0.25, 0.053 mm。先将土样倒入套筛,用水缓慢湿润约 5 min,调整套筛高度,使得仪器开动时套筛上沿始终保持在水面以下。开启团聚体分析仪,设置上下振荡 20 次/min,定时 5 min。筛分结束后,将各级筛子上的团聚体分别洗入烧杯,<0.053 mm 的团聚体则在筛分桶内沉降 48 h 后,弃去上清液转移至烧杯中。将烧杯中的团聚体在烘箱内 55 °C 烘干后称重。

### 1.5 计算方法

水稳性大团聚体数量  $R_{0.25}$  计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_0}$$

式中: $M_{r>0.25}$  为粒径 > 0.25 mm 的团聚体重量(g); $M_0$  为各粒级团聚体的总重量(g)。

平均重量直径 MWD 计算公式<sup>[15]</sup>为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n d_i W_i$$

几何平均直径 GMD 计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln d_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right)$$

式中: $d_i$  为  $i$  粒级团聚体的平均直径(mm); $W_i$  为  $d_i$  相对应的粒级团聚体占总重的百分含量。

分形维数  $D$  计算公式<sup>[15]</sup>为:

$$(3-D) \lg\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right) = \lg\left[\frac{M_{(< d_i)}}{M_0}\right]$$

式中: $d_i$  为  $i$  粒级团聚体的平均直径(mm); $d_{\max}$  为团聚体的最大粒径(mm); $M_{(< d_i)}$  为粒径小于  $d_i$  的团聚体重量(g); $M_0$  为各粒级团聚体的总重量(g)。分

形维数  $D$  可通过回归分析方法得到。

### 1.6 数据统计

试验数据使用 SPSS 软件进行单因素方差分析和回归分析,采用最小显著极差法(LSD 法)进行多重比较。采用 Origin 软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤碳氮含量分析

由表 1 可知,与 CK 对照相比,不同施肥处理均能显著增加 0—20, 20—40 cm 土层土壤总有机碳 SOC 含量,顺序为 OCF>SRF>CF>CK( $p<0.05$ ),提升幅度为 16.42%~38.81%和 21.43%~41.82%。0—20 cm 土层,SRF 和 OCF 的 SOC 含量较 CF 分别提高了 10.06%和 19.23%,且均差异显著;20—40 cm 土层中 SOC 亦有相同趋势,SRF 和 OCF 较 CF 显著提高了 9.84%和 16.79%( $p<0.05$ )。0—20 cm 土层中 TN 含量,混施肥、秸秆+缓释肥和常规处理之间无显著差异,但均明显高于空白对照( $p<0.05$ );施肥处理后 TN 含量较 CK 增加了 14.29%~17.35%。20—40 cm 土层中趋势相同,增加幅度为 22.54%~33.80%;其中 SRF 和 OCF 中 TN 含量比 CF 分别高出 9.20%和 6.13%。土壤 C/N 可反映碳氮元素有效性,是评价土壤质量水平的重要指标之一。一般来讲,土壤 C/N 与其分解速度呈反比关系<sup>[16]</sup>;此外已有研究<sup>[17]</sup>表明,SOC 和 TN 的积累并非同步,且 SOC 的积累速率快于 TN 的积累速率。OCF 显著增加了 0—20 cm 土层中 C/N( $p<0.05$ ),有利于土壤中碳的积累。但深层的 20—40 cm 差异不显著。

表 1 不同处理不同深度土壤总有机碳和总氮含量

土层深度/cm	处理	总有机碳 SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总氮 TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )	C/N
0—20	CK	7.78±0.29d	0.98±0.04b	7.94±0.31b
	CF	9.05±0.31c	1.12±0.07a	8.10±0.25b
	SRF	9.97±0.25b	1.13±0.04a	8.88±0.41b
	OCF	10.80±0.39a	1.15±0.10a	9.93±0.76a
20—40	CK	5.69±0.26d	0.71±0.04b	8.03±0.54a
	CF	6.91±0.13c	0.87±0.06a	7.96±0.49a
	SRF	7.59±0.14b	0.92±0.05a	8.23±0.35a
	OCF	8.07±0.17a	0.95±0.06a	8.52±0.72a

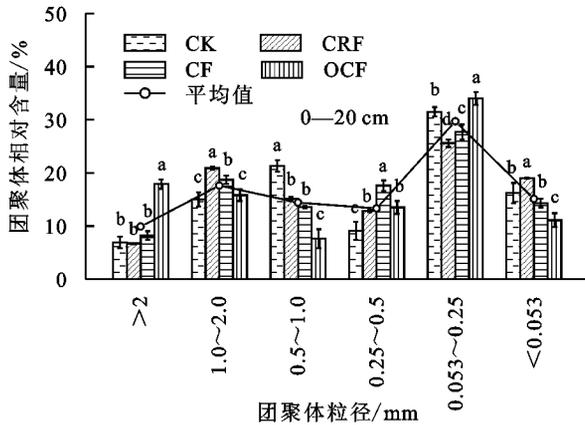
注:表中数据为平均值±标准误差;相同土层同列不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ )。下同。

### 2.2 土壤水稳性团聚体的分布情况

不同施肥方式均显示微团聚体(0.053~0.25 mm)含量最高,在 0—20, 20—40 cm 土层含量分别为 29.70%和 32.00%。0—20 cm, OCF 处理中 > 2 mm 大粒径团聚体含量达到了 17.89%,显著高于其他施肥方式;而另 3 种处理之间差异不显著(图 1)。此外,较之 CF, SRF 和 OCF 处理均显著降低了 0—20 cm 土层

的1.0~2.0,0.5~1.0 mm、粉黏粒(<0.053 mm)粒级的团聚体,提高了0.053~0.25 mm 粒级微团聚体含量,且OCF效果较SRF更显著( $p<0.05$ )。

20—40 cm,SRF和OCF处理的>2 mm大粒径团聚体含量显著高于CF处理112.57%和388.84%,OCF处理效果最为明显( $p<0.05$ )(图1)。且此2种施肥处理对于微团聚体和粉黏粒含量的影响比表层更为显著,微团聚体含量提高30.70%~51.13%,粉黏粒含量降低46.82%~56.58%。SRF和OCF处理中粉黏粒的



注:图柱上方不同小写字母表示相同粒径团聚体不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。

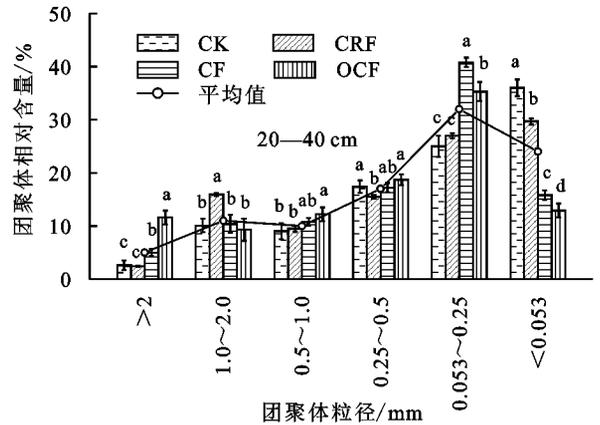
图1 不同处理对不同深度水稳性土壤团聚体分布的影响

### 2.3 土壤水稳性团聚体稳定指数分析

不同处理下水稳性团聚体分布差异显著(表2)。0—20 cm,SRF处理中 $R_{0.25}$ 显著高于CK处理10.93%( $p<0.05$ ),而CF、SRF、OCF 3种施肥处理之间无显著差异;20—40 cm,OCF处理土壤 $R_{0.25}$ 显著高于其他3个处理,分别高出32.62%(CK),19.75%(CF),19.44%(SRF)( $p<0.05$ )。OCF处理中的 $R_{0.25}$ 在不同土层之间无显著差异,但其他3个处理0—20 cm土壤 $R_{0.25}$ 则均显著高于20—40 cm( $p<0.05$ )。

不同处理水稳性团聚体稳定指数差异显著(表2)。OCF处理下,0—20,20—40 cm土层土壤的平均重量直径MWD均显著高其他3个处理,分别为

含量分别降低至14.28%和11.09%(0—20 cm),15.81%和12.91%(20—40 cm)。因此,SRF和OCF可以增加不同土层深度中大粒径团聚体(>2 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)的含量,减少粉黏粒(<0.053 mm)含量。CF显著增加了0—20,20—40 cm土层中1.0~2.0 mm粒级团聚体含量39.21%和57.99%,未增加其他>0.25 mm粒级的团聚体;且增加了0—20 cm土层粉黏粒的含量( $p<0.05$ ),由此可见化肥施用不利于大团聚体的形成<sup>[18]</sup>。



15.15%~24.59%和25.53%~55.26%,且CK、CF和SRF处理之间无显著差异。OCF处理相较于CF显著提高了0—20,20—40 cm土层的几何平均直径GMD(14.71%和39.13%),分别为(0.39±0.02),(0.32±0.02) mm;SRF处理在20—40 cm土层较CK和CF显著提高了GMD(13.04%~36.84%),但仍低于OCF处理( $p<0.05$ )。0—20 cm土层中CF方式下水稳性团聚体的分形维数 $D$ 值最高(2.961),且与其他处理相比差异显著( $p<0.05$ );随着深度增加至20—40 cm,其 $D$ 值略有降低,但是仍为所有处理中最高(2.923)。20—40 cm土层,SRF和OCF相较于CF降低了水稳性团聚体 $D$ 值4.99%~5.44%( $p<0.05$ )。

表2 不同处理对土壤团聚体稳定指数的影响

土层深度/cm	处理	$R_{0.25}/\%$	平均重量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm	分形维数 $D$
0—20	CK	52.31±2.51b	0.61±0.03b	0.33±0.02b	2.909±0.054b
	CF	55.43±2.33ab	0.65±0.04b	0.34±0.02b	2.961±0.032a
	SRF	58.03±2.36a	0.66±0.03b	0.36±0.02ab	2.928±0.072b
	OCF	54.90±1.97ab	0.76±0.03a	0.39±0.02a	2.899±0.048b
20—40	CK	39.05±1.84b	0.38±0.02b	0.19±0.01d	2.887±0.036a
	CF	43.25±1.16b	0.46±0.02b	0.23±0.01c	2.923±0.059a
	SRF	43.36±2.08b	0.47±0.01b	0.26±0.01b	2.764±0.074b
	OCF	51.79±2.07a	0.59±0.03a	0.32±0.02a	2.777±0.035b

### 2.4 土壤碳氮含量与团聚体稳定性的线性回归分析

由表3可知,土壤总有机碳SOC含量和总氮TN含量与2个团聚体稳定性指数(团聚体平均重量

直径MWD、几何平均直径GWD)均有较高的相关性。SOC与MWD和GWD的拟合曲线 $R^2$ 分别达到0.84和0.86,TN与之拟合曲线的相关系数分别为0.78和0.77;

二者均可准确地反映有机碳氮和团聚体之间的关系。相较而言, SOC 与土壤团聚体稳定指数 MWD 和 GMD 的相关性更高。对于分形维数  $D$  而言, 本试验中未观察到其与土壤养分间明显的相关性关系, 与 SOC 和 TN 拟合曲线  $R^2$  仅为 0.03。

表 3 土壤总有机碳 SOC、总氮 TN 与团聚体稳定性指数的线性回归分析

团聚体稳定性指数	总有机碳 SOC	总氮 TN
MWD	$Y_1 = 0.0700X_1 - 0.0034$ ( $R^2 = 0.84$ )	$Y_1 = 0.7094X_2 - 0.1214$ ( $R^2 = 0.78$ )
GMD	$Y_2 = 0.0396X_1 - 0.0239$ ( $R^2 = 0.86$ )	$Y_2 = 0.3954X_2 - 0.0848$ ( $R^2 = 0.77$ )
$D$	$Y_3 = 0.0066X_1 + 2.829$ ( $R^2 = 0.03$ )	$Y_3 = 0.0683X_2 + 2.8168$ ( $R^2 = 0.03$ )

注:  $Y_1$  为 MWD(mm);  $Y_2$  为 GMD(mm);  $Y_3$  为  $D$ ;  $X_1$  为 SOC 含量(g/kg);  $X_2$  为 TN 含量(g/kg);  $R^2$  为相关性系数。

### 3 讨论

Celik 等<sup>[19]</sup>指出在质地、种植制度和环境条件相对一致的前提下, 长期不同施肥方式是影响土壤理化性质的关键因素。本研究结果与前人<sup>[20-21]</sup>研究结果一致, 秸秆、有机肥等本身就具有有机质的输入, 可以最大程度提高土壤有机碳含量, 显著增加土壤碳库含量; 还可以提高微生物代谢, 促进作物根系的生长。缓释肥可以延长肥力释放时间, 降低氮磷流失量, 提高氮素吸收利用率, 并提高土壤中养分含量<sup>[10]</sup>。在本研究中, TN 含量无显著变化, 推测可能与作物生长及其他环境因素有关。秸秆还田和有机无机肥混施等方式可以改变土壤结构, 增加土壤肥力, 使得土壤水稳性团聚体增加, 进而吸附保留更多的碳氮在团聚体中<sup>[22]</sup>, 因此更有利于土层总碳氮的保持。随着土层深度的增加, 各处理中 SOC 和 TN 含量也呈降低趋势, 因为施肥处理对土壤碳氮的作用主要集中于能够直接接触的 0—20 cm 表层<sup>[12, 23]</sup>。

有研究<sup>[23-24]</sup>指出, 施肥可以促进土壤微团聚体向大团聚体形成, 同时减少粒径较小团聚体的含量, 且施用有机肥效果更为显著。根据团聚体形成理论, 土壤颗粒在胶结物质、真菌菌丝、根系等作用下实现黏粒向微团聚体和大团聚体转化<sup>[24]</sup>。本研究结果显示, 有机无机混施更有利于大团聚体尤其是 > 2 mm 大粒径团聚体的形成。此外, 张久明等<sup>[20]</sup>指出, 单施化肥也同样可以较 CK 增加土壤有机碳含量, 且明显增加土壤微团聚体含量。但本试验中, 虽然 CF 处理增加了 0—20, 20—40 cm 土壤 SOC 含量, 分别为 9.05, 6.91 g/kg; 但 0—20 cm 土层中微团聚体含量显著低于 CK, 推测可能是长期无机肥施用促进土壤黏土矿物分散, 破坏大土壤大团聚体结构。随着土层深度的

增加, 各处理中大团聚体呈降低趋势, 小团聚体则呈增加趋势。因为土壤大团聚体的形成主要靠有机体和菌丝胶结形成, 随着土层深度的增加, 土壤中有有机质来源和输入量减少, 这在一定程度上影响了大团聚体的含量, 从而造成大粒径团聚体含量降低, 较小粒径团聚体含量则增加。

一般把 > 0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体, 其数量与土壤的肥力状况呈正相关。  $R_{0.25}$  不仅可以说明土壤团聚体的数量变化, 且可反映不同施肥措施对土壤肥力及稳定性状况的影响程度。本研究中, 有机无机混施显著提高了 0—40 cm 土层中大团聚体含量, 说明土壤中碳氮养分含量越高, 土壤大团聚体含量就越高, 水稳性增强, 土壤结构稳定<sup>[12]</sup>。

平均重量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 是反映土壤团聚体的稳定性的常用指标, 其值越大, 团聚体稳定性越强, 不易分散或破碎<sup>[12]</sup>。OCF 处理比 SRF 效果更显著, 可能是因为有机肥可以直接向土壤中补充大量活性有机物质; 而这其中的部分有机物具有疏水性, 团聚体内疏水基团的增多, 导致团聚体水稳性增强<sup>[24]</sup>。常规化学施肥会导致土壤 pH、电解质浓度等理化性质的改变而对土壤团聚体结构产生不良影响, 导致其稳定性降低<sup>[25]</sup>。一般而言, 施肥对土壤团聚体特征性的影响主要发生在表层土壤中<sup>[12]</sup>; 但在本试验 20—40 cm 土层中团聚体稳定性指数变化也很明显。大团聚体的百分比越高, MWD 的值越大; 团聚体越稳定, GMD 的值越大<sup>[6]</sup>。20—40 cm 土层中 GMD 各处理间差异比 MWD 显著, 且 GMD 与土壤养分之间的相关性比 MWD 更显著, 说明有机无机混施不仅有助于增加 20—40 cm 土层大团聚体的比例, 且显著促进了团聚体稳定性, 效果优于其他 3 种处理。土壤有机物质不仅能增强团聚体之间的黏结力和抗张强度, 而且有机物吸收水分的容量远大于土壤中的矿物质, 可减缓水分湿润速率, 从而减少团聚体在湿润过程中因孔隙中空气受压缩膨胀和破碎的现象, 也可以解释本研究结果中施肥可以显著提高土壤稳定性的现象。

本研究通过对土壤 SOC 和 TN 与土壤团聚体稳定性指数线性回归分析来研究二者之间的相关性。结果表明, SOC 比 TN 与团聚体稳定性指数的拟合度更高, 说明土壤团聚体结构稳定更能促进 SOC 的增加; MWD 和 GMD 均可准确反映土壤养分与团聚体之间的关系;  $D$  与土壤养分间无明显相关关系, 因此用  $D$  作为指标表征不同施肥措施下土壤养分水平的可信性值得商榷。一般而言, 土壤养分组分与分形维数  $D$  呈负相关关系。张翰林等<sup>[9]</sup>研究发现,  $D$  与土壤 SOC 和活性碳 AC 含量显著负相关, 拟合曲线的  $R^2$  为 0.80。Pirmoradian 等<sup>[6]</sup>

也指出, $D$ 比MWD和GMD更适于表征耕作措施对土壤团聚体稳定性的影响。但是,管光玉等<sup>[26]</sup>研究发现,虽然不同利用方式对地表植被生长状况及有机碳含量有一定影响,但是土壤颗粒所表征的分形维数 $D$ 并未显著变化。说明 $D$ 的差异与气候条件、土壤形成过程以及土壤质地的不同有关。

## 4 结论

(1)OCF处理显著提高了0—20,20—40 cm土层土壤的SOC含量,以及0—20 cm土层的C/N,而CF和SRF处理差异不显著。3种施肥处理0—20,20—40 cm土层的TN差异不显著,但均高于CK处理。

(2)相比CF处理,SRF处理在0—20 cm土壤大团聚体数量 $R_{0.25}$ 提升了4.7%,OCF处理在20—40 cm土壤中显著提高了土壤大团聚体数量 $R_{0.25}$ 约32.62%。SRF和OCF处理不同程度提高了0—20,20—40 cm土层的平均质量直径MWD(1.54%~16.92%,2.17%~28.26%)和平均几何直径GMD(5.88%~14.71%,13.04%~39.13%),降低了分形维数 $D$ (1.11%~2.09%,4.99%~5.44%);且OCF处理效果更为显著( $p < 0.05$ )。

(3)土壤团聚体稳定性指数中,平均质量直径MWD、平均几何直径GMD与土壤总有机碳( $R^2$ 均大于0.84)和土壤总氮( $R^2$ 均大于0.77)的相关性较高;而分形维数 $D$ 与土壤养分含量之间无显著相关性关系。因此,MWD和GMD均适合用于揭示团聚体与总有机碳、总氮含量之间的关系。

(4)相比常规化肥,有机无机混施肥对于土壤的团聚结构和养分的提升显著,值得推广应用;施用秸秆加缓释肥也一定程度的改善了土壤团聚结构和养分状况,且还可以减少用工成本,也是一种值得应用的施肥方式。

### 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] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.

[3] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等. 耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J]. 土壤学报,2009,46(1):154-158.

[4] 郑子成,李延轩,张锡州,等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):228-231.

[5] 马征,张柏松,徐长英,等. 改良剂对黏质潮土团聚体特征及分形维数的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(5):

337-341.

- [6] 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.
- [7] 安婷婷,汪景宽,李双异,等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(2):369-373.
- [8] Yang Y, Zhang M, Li Y, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(6): 2307-2317.
- [9] 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.
- [10] 孙会峰,周胜,付子轼,等. 秸秆与缓释肥配施对水稻产量及氮素吸收利用率的影响[J]. 中国稻米,2015,21(4):95-98.
- [11] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 99(18): 1-12.
- [12] 刘哲,孙增慧,吕昭忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(8):1119-1128.
- [13] 陈恩凤,周礼恺,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报,1994,31(1):18-25.
- [14] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO<sub>2</sub> in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 132(3): 243-251.
- [15] 严波,贾志宽,韩清芳,等. 不同耕作方式对宁南旱地土壤团聚体的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):58-63.
- [16] 刘希玉,王忠强,张心昱,等. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. 生态学报,2013,33(16):4949-4955.
- [17] 张彦军,郭胜利,南雅芳,等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素[J]. 自然资源学报,2012,27(7):1214-1223.
- [18] 何瑞清,王百群,张燕,等. 长期施用化肥条件下壤土团聚体中有机碳与养分分布[J]. 水土保持通报,2016,36(6):347-351.
- [19] Celik I, Gunal H, Budak M, et al. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions [J]. Geoderma, 2010, 160(2): 236-243.

- ma, 2011, 162: 319-326.
- [9] Fang H, Zhou H, Norton G J, et al. Interaction between contrasting rice genotypes and soil physical conditions induced by hydraulic stresses typical of alternate wetting and drying irrigation of soil [J]. *Plant and Soil*, 2018, 430(1/2): 233-243.
- [10] Luo L, Lin H, Schmidt J. Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 1929-1937.
- [11] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1/2): 53-64.
- [12] Meng C, Niu J, Li X, et al. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(9): 2357-2370.
- [13] FAO, I I ASA, ISRIC, et al. Harmonized world soil database (version 1.1) [J]. FAO, Rome Italy and IIA-SA, Laxenburg, Austria, 2009.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[J]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Yan H, Li K, Ding H, et al. Root morphological and proteomic responses to growth restriction in maize plants supplied with sufficient N [J]. *Journal of plant physiology*, 2011, 168(10): 1067-1075.
- [16] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53-56.
- [17] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3189-3196.
- [18] 曾强, 徐则民, 官琦, 等. 不同植被条件下斜坡土体大孔隙特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊 1): 3343-3352.
- [19] 张洪江, 杜士才, 程云, 等. 重庆四面山森林植物群落及其土壤保持与生态水文功能[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [20] 荐圣淇, 赵传燕, 彭焕华, 等. 利用染色示踪与图像处理技术研究根系对土壤大孔隙的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(5): 62-66.
- [21] 王彬俨, 程金花, 张洪江, 等. 北京市昌平区农地土壤大孔隙形成的影响因素分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(5): 81-86.
- [22] 官琦, 徐则民, 田林. 植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺寸及其主要影响因素[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2888-2896.
- [23] Zhang Z B, Peng X, Zhou H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 53-65.
- [24] Yang J L, Zhang G L. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(5): 751-761.
- [25] Saravanathiiban D S, Kutay M E, Khire M V. Effect of macropore tortuosity and morphology on preferential flow through saturated soil: A Lattice Boltzmann study [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 59: 44-53.
- (上接第 93 页)
- [20] 张久明, 迟凤琴, 韩锦泽, 等. 长期不同施肥黑土团聚体有机碳分布特征[J]. *土壤与作物*, 2017, 6(1): 49-54.
- [21] Zhao H, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize wheat double cropping system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [22] Huang R, Tian D, Liu J, et al. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw derived biochar addition in a dryland cropping mesocosm system [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 576-586.
- [23] 候晓静, 杨劲松, 王相平, 等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 818-827.
- [24] 张章. 不同施肥方式对红壤团聚体稳定性及层级结构的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [25] Sun D, Li K, Bi Q, et al. Effects of organic amendment on soil aggregation and microbial community composition during drying rewetting alternation [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 735-743.
- [26] 管光玉, 范燕敏, 武红旗, 等. 不同利用方式土壤颗粒分形特征及其与土壤有机碳库稳定性的关系[J]. *草地学报*, 2016, 24(2): 258-262.