

## 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响

张志毅, 熊桂云, 吴茂前, 范先鹏, 冯婷婷, 巴瑞先, 段申荣

引用本文:

张志毅, 熊桂云, 吴茂前, 等. 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 405–412.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190617>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 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

Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province

中国生态农业学报. 2015(3): 276–284 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140863>

#### 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响

Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 728–736 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180076>

#### 长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变

Evolution of soil organic carbon and crop yield under long-term fertilization in grey desert soils

中国生态农业学报. 2016(2): 154–162 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151082>

#### 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响

Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield

中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1228–1235 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150546>

#### 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响

Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 96–103 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190614>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190617

张志毅, 熊桂云, 吴茂前, 范先鹏, 冯婷婷, 巴瑞先, 段申荣. 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 405-412

ZHANG Z Y, XIONG G Y, WU M Q, FAN X P, FENG T T, BA R X, DUAN S R. Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat-rice system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 405-412

# 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响\*

张志毅<sup>1</sup>, 熊桂云<sup>1\*\*</sup>, 吴茂前<sup>1</sup>, 范先鹏<sup>1</sup>, 冯婷婷<sup>1</sup>, 巴瑞先<sup>1</sup>, 段申荣<sup>2</sup>

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所/湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心/农业农村部潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站/农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室/农业环境治理湖北省工程研究中心 武汉 430064; 2. 湖北省宜昌市兴山县古夫镇农业技术服务中心 宜昌 443799)

**摘要:** 为了明确不同外源有机物和耕作方式对土壤地力培育的影响, 以水稻-小麦轮作系统为对象, 通过 2 个年度(2016—2018 年)大田试验研究了外源有机物(秸秆和有机肥)和耕作方式及其交互作用[稻麦秸秆还田配合旋耕(SR), 稻麦秸秆还田配合翻耕(SP), 秸秆不还田、增施有机肥配合旋耕(MR), 秸秆不还田、增施有机肥配合翻耕(MP), 秸秆不还田、不施用有机肥、旋耕深度 15 cm(CKR)]对土壤团聚体和有机碳组成的短期影响。结果表明: SR 处理能够降低水稻季土壤容重并增加总孔隙度。相比 CKR, 小麦季 SR 处理显著增加 >0.05 mm 水稳性团聚体含量, 增加量为 7.2%。此外, 外源有机物和耕作对土壤有机碳活性组分具有显著影响。其中, 易氧化有机碳(EOC)主要受耕作与有机物交互作用影响, 酸水解有机碳(LPI<sub>c</sub> 和 LPII<sub>c</sub>)主要受耕作措施的影响, SR 处理的土壤 EOC 和 LPI<sub>c</sub> 含量比 CKR 提高 0.3~2.6 g·kg<sup>-1</sup>。颗粒有机碳(POC)主要受外源有机物的影响, 并且秸秆还田处理 POC 平均含量高于增施有机肥处理, 增加量为 0.75 g·kg<sup>-1</sup>。短期内, 外源有机物和耕作及其交互作用对稳定性有机碳(黑碳和矿物结合态有机碳)的影响较小。综上, 秸秆还田配合旋耕有助于提高土壤水稳性团聚体和活性有机碳的含量(EOC、LPI<sub>c</sub> 和 POC)。

**关键词:** 水稻-小麦轮作; 秸秆还田; 耕作措施; 土壤团聚体; 活性有机碳; 稳定性有机碳

中图分类号: S154.1

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat-rice system

ZHANG Zhiyi<sup>1</sup>, XIONG Guiyun<sup>1\*\*</sup>, WU Maoqian<sup>1</sup>, FAN Xianpeng<sup>1</sup>,  
FENG Tingting<sup>1</sup>, BA Ruixian<sup>1</sup>, DUAN Shenrong<sup>2</sup>

(1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences / Hubei Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control / Qianjiang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China / Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China / Hubei Engineering Research Center for Agricultural Environmental Control, Wuhan 430064, China; 2. Agricultural Technology Service Center of Gufu Town, Xingshan

\* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300902)和湖北省农业科学院重大专项项目(2017CGPY03)资助

\*\* 通信作者: 熊桂云, 研究方向为农业面源污染防治及作物平衡施肥技术与推广。E-mail: xionggy@sina.com

张志毅, 研究方向为土壤培肥及重金属修复。E-mail: zzyouxin@163.com

收稿日期: 2019-08-21 接受日期: 2019-11-28

\* This work was funded by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300902) and the Major Special Projects of Hubei Academy of Agricultural Sciences (2017CGPY03).

\*\* Corresponding author, E-mail: xionggy@sina.com

Received Aug. 21, 2019; accepted Nov. 28, 2019

County, Yichang City, Hubei Province, Yichang 443799, China)

**Abstract:** In order to clarify the effect of different exogenous organic materials and tillage methods on soil fertility, with the rice and wheat rotation system as the study object, a two-year field experiment was conducted to study the short-term effects of different exogenous organic materials, tillage methods, and their interactions on soil aggregate and organic carbon composition. The results revealed that straw returning with rotary tillage method could decrease soil bulk density and increase total porosity. Compared with non-straw-returning treatment (CKR), the >0.05-mm water-stable aggregate content with straw-returning treatment under rotary tillage (SR) significantly increased (7.2%) in the wheat growing season. In addition, exogenous organic matter and tillage methods had significant effects on soil active organic carbon. Among them, easily oxidized organic carbon (EOC) was significantly affected by the interaction of exogenous organic materials and tillage method, and the acid-hydrolyzed organic carbon (LPI<sub>c</sub> and LPII<sub>c</sub>) was significantly affected by the tillage method. Compared with CKR treatment, the concentration of EOC and LPI<sub>c</sub> with straw-returning treatment under rotary tillage increased by 0.3–2.6 g·kg<sup>-1</sup>. The content of particulate organic carbon (POC) was significantly affected by exogenous organic materials, and the average POC content with straw-returning treatments was higher than that with organic fertilizer application treatments (increased by 0.75 g·kg<sup>-1</sup>). In the short term, exogenous organic materials, tillage methods, and their interactions had negligible effect on the stability of organic carbon (black carbon and mineral-bonded organic carbon). In conclusion, straw returning combined with rotary tillage could improve the content of soil water-stable aggregates and active organic carbon (EOC, LPI<sub>c</sub>, and POC).

**Keywords:** Wheat-rice system; Straw returning; Tillage method; Soil aggregates; Active organic carbon; Stable organic carbon

良好的土壤结构和肥力状况是实现农作物稳产、高产的重要前提,保持并提高土壤肥力,实现“藏粮于田、藏粮于技”是确保我国粮食安全和农业可持续发展的策略<sup>[1-2]</sup>。土壤团聚体和有机碳是影响土壤肥力水平的重要因素。土壤团聚体数量分布反映土壤持水性、养分供储、通透性等能力高低<sup>[3]</sup>。土壤有机碳活性组分(易氧化有机碳、水溶性有机碳、酸水解有机碳等)与土壤有效养分密切相关<sup>[4-5]</sup>,而有机碳稳定性组分(矿物有机碳、黑碳等)与土壤抗干扰和固碳能力相关<sup>[6]</sup>。

目前,有机培肥(秸秆还田和增施有机肥)是提高土壤肥力的重要措施。秸秆还田能够显著提升土壤大团聚体数量(>0.25 mm)、平均重量直径和几何平均直径<sup>[7]</sup>。秸秆覆盖还田配合免耕显著降低旱作农田 0~5 cm、5~10 cm、10~30 cm 土层的团聚体崩解指数和机械破坏指数<sup>[8]</sup>。秸秆还田配合旋耕能够显著增加土壤总有机碳和活性有机碳含量<sup>[9]</sup>。增施有机肥同样具有增加土壤水稳性团聚体含量和有机碳活性的作用<sup>[10]</sup>。翻耕基础上增施有机肥较单施化肥土壤大团聚体比例提高 2.8%~8.4%<sup>[11]</sup>。此外,黄壤性水稻土长期施用有机肥能够在促进土壤有机碳积累的同时降低其累积矿化率,增强土壤固碳能力<sup>[12]</sup>。深松和免耕配合施用牛粪显著增加土壤总有机碳含量,并提高作物产量<sup>[13]</sup>。因此,不同有机培肥措施需要合适的耕作措施与之匹配才能更好地发挥培肥效果。

秸秆还田或增施有机肥下,不同耕作措施对农田土壤团聚体和有机碳影响的研究多集中于旱地土壤,以水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)

轮作农田为对象的研究较少。虽然已有研究表明稻麦轮作下有机物(秸秆和有机肥)能够增加土壤肥力,但不同有机物和耕作措施对土壤团聚体和有机碳组成的作用及其交互作用关系还不清楚。本文通过两年大田定位试验,研究稻麦轮作下不同有机物和耕作措施及其交互作用对土壤水稳性团聚体、有机碳活性组分和有机碳稳定性组分的影响,为构建稻麦轮作土壤有机培肥相匹配的耕作制度提供理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于江汉平原腹地的农业农村部门潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站内(湖北省潜江市浩口镇柳洲村,112°37'E,30°22'N)进行。试验点所在区域属亚热带季风气候区,年平均气温 16.1℃,年均降水量 1 100~1 300 mm。土壤为潜育型水稻土,质地是砂质黏壤土。土壤耕层基本理化性质:容重 1.20 g·cm<sup>-3</sup>,有机质 20.32 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 1.5 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷 12.18 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 84.77 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 6.70。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共 5 个处理,每个处理 3 次重复,共 15 个小区,小区面积为 50 m<sup>2</sup>,试验地种植制度为水稻、小麦两熟制,大田试验始于 2016 年,开始前茬作物为水稻。试验设置:1)稻麦秸秆还田配合旋耕(SR),每季作物成熟后,采用半喂入联合收割机进行作物收获及秸秆粉碎,留茬约 20 cm,秸秆粉碎长度约 10 cm,粉碎后的秸秆旋耕还田,旋

耕深度 15 cm; 周年秸秆还田总量约为 11 000 kg·hm<sup>-2</sup>, 水稻和小麦秸秆有机碳含量按 46% 计算, 秸秆还田带入土壤的有机碳约 5 060 kg·hm<sup>-2</sup>。2) 稻麦秸秆还田配合翻耕(SP), 粉碎后的秸秆翻耕还田, 翻耕深度 30 cm, 其余同 SR。3) 秸秆不还田, 增施有机肥配合旋耕(MR), 采用半喂入联合收割机进行作物收获后, 人工齐地割除根茬, 秸秆和根茬全部移出田面, 有机肥替代 50% 化学氮肥, 旋耕深度 15 cm; 周年有机肥施用量为 5 289 kg·hm<sup>-2</sup>, 其有机碳含量 17.2%, 有机肥带入的有机碳含量约为 910 kg·hm<sup>-2</sup>。4) 秸秆不还田, 增施有机肥配合翻耕(MP), 翻耕深度 30 cm, 其他同 MR。5) 秸秆不还田, 不施用有机肥, 旋耕深度 15 cm(CKR)。供试水稻品种为‘广两优香 5’, 按 16.7 cm×26.4 cm 人工栽秧, 每兜 2 株。小麦供试品种为‘郑麦 9023’, 人工条播, 播种量为 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>。

有机肥、氮肥、磷肥、钾肥分别为腐熟猪粪(含有机质 29.72%、N 3.1%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4.1%、K<sub>2</sub>O 1.9%)、尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)。各处理施用肥料的总养分保持一致, 水稻和小麦施肥量分别为 N 180 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 120 kg·hm<sup>-2</sup> 和 N 150 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 75 kg·hm<sup>-2</sup>。有机肥、磷肥和钾肥全部做基肥一次施入, 秸秆还田处理的尿素分基肥(70%)和追肥(30%)施用, 增施有机肥处理的尿素分基肥(50%)和追肥(50%)施用。水稻季追肥于水稻移栽后 7 d 撒施, 小麦季追肥于拔节期撒施。

### 1.3 样品采集和测定

2018 年 5 月 21 日和 10 月 9 日分别在小麦和水稻收获后选择各小区收割机未走过的区域, 按“S”采样法采集 0~20 cm 土层供试土样 500 g 左右, 装于硬质塑料盒带回实验室风干。

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度采用环刀法测定<sup>[14]</sup>; 水稳性团聚体采用干筛法和湿筛法进行测定, 所用仪器为土壤团粒分析仪(日本, Daiki, DIK-2012), 套筛孔径分别为 2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm<sup>[3]</sup>。

有机碳活性组分的测定: 水溶性有机碳(DOC)采用超纯水提取<sup>[15]</sup>, 易氧化有机碳(EOC)采用 333 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> 氧化法测定<sup>[16]</sup>, 酸水解有机碳采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水解法[包括活性组分 (LP<sub>o</sub>) 和活性组分 (LP<sub>c</sub>) 和 HCl 水解法(HCl<sub>c</sub>)测定<sup>[4,17]</sup>, 颗粒有机碳(POC)采用 5 g·L<sup>-1</sup> 六偏磷酸钠分散法进行提取<sup>[18]</sup>。

有机碳稳定性组分的测定: 矿物结合态有机碳(MOC)的化学分离基于 Eusterhues 等<sup>[19]</sup>的方法, 黑碳(BC)的分离基于尹云峰等<sup>[20]</sup>的方法。

### 1.4 数据处理

采用 DPS7.5 软件进行数据统计分析, 将试验总变异分为区组间、耕作因素、有机物因素、两因素交互效应、误差 5 部分, 各部分所引起的变异大小由其所产生的平方和表示, 因此耕作因素、有机物因素及其交互效应作用力用下式计算<sup>[21]</sup>:

$$\text{耕作作用力} = \frac{\text{耕作变量(平方和)}}{\text{总变量(总平方和)}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{有机物作用力} = \frac{\text{有机物变量(平方和)}}{\text{总变量(总平方和)}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{交互作用力} = \frac{\text{交互变量(平方和)}}{\text{总变量(总平方和)}} \times 100\% \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 有机物和耕作措施对土壤结构的影响

短期内(2 年), 小麦季添加外源有机物后土壤容重均略低于对照(CKR), 各处理土壤容重降低量介于 0.04~0.08 g·cm<sup>-3</sup>, 但变化不显著( $P>0.05$ ); 总孔隙度均略高于对照, 各处理总孔隙度增加量介于 1.2%~2.8%, 变化不显著( $P>0.05$ )。水稻季, 不同耕作措施下土壤容重和总孔隙度的变化较大, 容重介于 1.14~1.30 g·cm<sup>-3</sup>, 总孔隙度介于 50.95%~57.13%。其中, 秸秆还田配合旋耕(SR)土壤容重显著低于 CKR( $P<0.05$ ), 总孔隙度显著高于 CKR( $P<0.05$ )。可见, 外源有机物有助于降低土壤容重并提高总孔隙度, 改善土壤物理结构(表 1)。

表 1 外源有机物和耕作方式对稻麦轮作系统作物收获后土壤容重和孔隙度的影响

Table 1 Effects of exogenous organic materials and tillage methods on soil bulk density and porosity after crop harvest of rice-wheat rotation system

作物季 Crop season	处理 Treatment	容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)
小麦季 Wheat season	CKR	1.15±0.02a	56.73±0.91a	53.77±1.08ab
	SR	1.11±0.02a	57.93±0.68a	59.50±2.48a
	SP	1.07±0.04a	59.53±1.50a	54.85±0.07ab
	MR	1.10±0.10a	58.40±3.63a	54.46±2.42ab
	MP	1.10±0.10a	58.56±3.81a	51.98±0.46b
水稻季 Rice season	CKR	1.23±0.01a	53.67±0.39b	46.66±1.18a
	SR	1.14±0.03b	57.13±1.24a	49.31±0.06a
	SP	1.24±0.01a	53.04±0.34b	46.84±2.35a
	MR	1.23±0.01a	53.48±0.54b	47.74±0.51a
	MP	1.30±0.02a	50.95±0.70b	45.79±0.91a

CKR: 秸秆不还田、不施有机肥, 旋耕; SR: 秸秆旋耕还田; SP: 秸秆翻耕还田; MR: 增施有机肥, 旋耕; MP: 增施有机肥, 翻耕。同列同作物季不同小写字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ )。CKR: rotary tillage without straw returning and organic fertilizer application; SR: rotary tillage with straw returning; SP: ploughing with straw returning; MR: rotary tillage with organic fertilizer application; MP: ploughing with organic fertilizer application. Different lowercase letters in the same column for the same crop season mean significant differences among treatments at 0.05 level.

除秸秆还田配合翻耕(SP)处理外,添加外源有机物后土壤大团聚体(0.25~2 mm和>2 mm)含量略高于 CKR 处理(图 1)。小麦季和水稻季土壤大团聚体含量最高的处理分别为 SR 和 MR, 分别比 CKR 处理提高 2.6%和 4.0%, 但差异不显著( $P>0.05$ )。0.05~0.25 mm 团聚体, 小麦季 SR 处理>0.05 mm 团聚体显著高于 CKR 处理, 比 CKR 增加 7.2%。不同耕作措施对土壤大团聚体含量无明显促进作用, 翻耕措施大团聚体含量略低于旋耕措施, 其中 SP 处理土壤大团聚体含量最低。可见, 外源有机物有助于促进表层土壤水稳性团聚体形成, 并且有机物配合旋耕对水稳性团聚体提升效果优于配合翻耕。

## 2.2 有机物和耕作措施对土壤有机碳组分的影响

增加外源有机物后土壤有机碳活性组分整体上高于 CKR 处理(表 2)。相比 CKR, 供试土壤 DOC 增加量依次为 MP 处理( $23.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )>SR 处理( $18.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )>MR 处理( $8.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )>SP 处理( $4.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )(表 2)。供试土壤 EOC 和 LP<sub>c</sub> 含量均为 SR 处理最高, 显著高于 CKR 处理( $P<0.05$ ), 分别提高  $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $2.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同外源有机物处理的 LP<sub>c</sub> 含量为  $2.9\sim 3.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 显著高于 CKR 处理(SP 处理增加量为  $1.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )( $P<0.05$ )。此外, 不同外源有机物对土壤 HCl<sub>c</sub> 和 POC 无显著影响, 但相同耕作措施下, 秸秆还田处理 POC 平均含量高于增施有机肥处理和 CKR, 以秸秆还田配合旋耕措施土壤 POC 含量最高(达  $5.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); HCl<sub>c</sub> 的变化趋势与 POC 相反, 以增施有机肥配合翻耕措施最高(达  $6.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。可以看出, 增加外源有机物能够提高土壤水溶性有机碳、易氧化有机碳、酸水解有机碳和颗粒有机碳的含量, 秸秆还田配合旋耕显著提升土壤 EOC、LP<sub>c</sub> 和 LP<sub>c</sub> 含量。

表 2 外源有机物和耕作方式对稻麦轮作系统土壤有机碳活性组分的影响

Table 2 Effects of exogenous organic materials and tillage methods on active components of soil organic carbon of rice-wheat rotation system

处理 Treatment	DOC ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	EOC ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	LP <sub>c</sub> ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	LP <sub>c</sub> ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	HCl <sub>c</sub> ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	POC ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
CKR	89.1±4.3b	1.4±0.1b	7.9±0.4b	1.7±0.0b	5.1±0.9a	4.4±0.4b
SR	107.7±7.3ab	1.7±0.1a	10.5±1.8a	2.9±0.0a	5.6±0.0a	5.4±0.5a
SP	93.9±8.8ab	1.5±0.1a	8.0±0.2b	3.4±0.2a	5.5±0.3a	4.9±0.1ab
MR	97.4±1.6ab	1.3±0.0b	8.7±0.6ab	3.0±0.1a	5.5±0.5a	4.3±0.2b
MP	112.1±8.6a	1.6±0.0a	8.5±0.3b	3.1±0.0a	6.2±0.4a	4.5±1.7b

CKR: 秸秆不还田、不施有机肥, 旋耕; SR: 秸秆旋耕还田; SP: 秸秆翻耕还田; MR: 增施有机肥, 旋耕; MP: 增施有机肥, 翻耕。DOC: 水溶性有机碳; EOC:  $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{KMnO}_4$  提取的有机碳; LP<sub>c</sub>:  $2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$  提取的有机碳; LP<sub>c</sub>:  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$  提取的有机碳; HCl<sub>c</sub>:  $6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{HCl}$  提取的有机碳; POC: 颗粒有机碳。同列不同小写字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ )。CKR: rotary tillage without straw returning and organic fertilizer application; SR: rotary tillage with straw returning; SP: ploughing with straw returning; MR: rotary tillage with organic fertilizer application; MP: ploughing with organic fertilizer application. DOC: dissolve organic carbon; EOC: organic carbon extracted by  $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{KMnO}_4$ ; LP<sub>c</sub>: organic carbon extracted by  $2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; LP<sub>c</sub>: organic carbon extracted by  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; HCl<sub>c</sub>: organic carbon extracted by  $6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{HCl}$ ; POC: particulate organic carbon. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among treatments at 0.05 level.

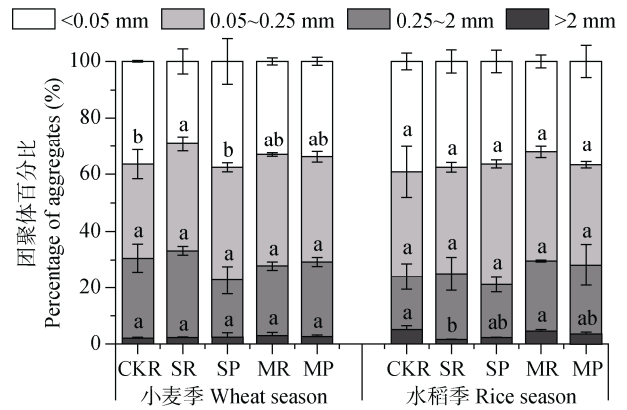


图 1 外源有机物和耕作方式对稻麦轮作系统作物收获后土壤团聚体分布特征的影响

Fig. 1 Effects of exogenous organic materials and tillage methods on distribution characteristic of soil aggregates after crop harvest of rice-wheat rotation system

CKR: 秸秆不还田、不施有机肥, 旋耕; SR: 秸秆旋耕还田; SP: 秸秆翻耕还田; MR: 增施有机肥, 旋耕; MP: 增施有机肥, 翻耕。不同小写字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ )。CKR: rotary tillage without straw returning and organic fertilizer application; SR: rotary tillage with straw returning; SP: ploughing with straw returning; MR: rotary tillage with organic fertilizer application; MP: ploughing with organic fertilizer application. Different lowercase letters mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

黑碳(BC)和矿物结合态有机碳(MOC)一定程度上能够反映土壤中有机碳稳定性组分<sup>[22]</sup>。不同外源有机物处理 SOC、BC 和 MOC 含量均高于 CKR 处理。秸秆还田处理土壤 BC 和 MOC 含量分别约为  $5.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $4.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 增施有机肥处理 BC 和 MOC 含量约为  $5.5\sim 5.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $5.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 3)。这说明秸秆还田处理稳定性有机碳含量略低于增施有机肥处理。除 SR 处理外, 各处理 BC/SOC 和 MOC/SOC 值分别为 0.41 和 0.37 左右, 相比 CKR 处理约分别增加 0.03 和 0.06。可见, 外源有机物对土壤有机碳稳定性有一定促进作用, 但影响不显著。

表 3 外源有机物和耕作方式对稻麦轮作系统土壤有机碳组分及其稳定性的影响

Table 3 Effects of exogenous organic materials and tillage methods on components and stability of soil organic carbon of rice-wheat rotation system

处理 Treatment	SOC (g·kg <sup>-1</sup> )	BC (g·kg <sup>-1</sup> )	MOC (g·kg <sup>-1</sup> )	BC/SOC	MOC/SOC
CKR	12.6±1.0b	5.0±0.0b	4.4±0.2b	0.38	0.31
SR	14.2±0.1ab	5.4±0.1ab	4.6±0.0ab	0.38	0.32
SP	13.4±1.5ab	5.4±0.1ab	4.8±0.1ab	0.40	0.36
MR	13.3±1.1ab	5.5±0.1ab	5.1±0.1a	0.41	0.38
MP	13.5±1.1ab	5.8±0.1a	5.0±0.1ab	0.43	0.37

CKR: 秸秆不还田、不施有机肥, 旋耕; SR: 秸秆旋耕还田; SP: 秸秆翻耕还田; MR: 增施有机肥, 旋耕; MP: 增施有机肥, 翻耕。SOC: 总有机碳; BC: 黑碳; MOC: 矿物结合态有机碳。同列不同小写字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ )。CKR: rotary tillage without straw returning and organic fertilizer application; SR: rotary tillage with straw returning; SP: ploughing with straw returning; MR: rotary tillage with organic fertilizer application; MP: ploughing with organic fertilizer application. SOC: total organic carbon; BC: black carbon; MOC: mineral-bonded organic carbon. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among treatments at 0.05 level.

2.3 有机物、耕作及其交互效应对土壤团聚体和有机碳组分的影响

大于 2 mm 团聚体主要作用力为有机物, 其作用力大小为 36.4%, 但是未达显著水平。0.25~2 mm 和 0.05~0.25 mm 团聚体主要作用力来自耕作和有机的交互作用, 其作用大小分别为 33.1%和 64.5%, 达显著水平( $P<0.05$ ) (表 4)。这说明供试土壤团聚体组成主要受耕作和有机的双因素的影响。

整体上, 耕作措施对有机碳活性组分具有较强的作用力, 而各处理对稳定性有机碳作用效果不明显。其中, DOC 和 EOC 主要作用力来自耕作和有机的交互作用, 分别为 36.4%和 54.0%。LP<sub>c</sub> 主要作用力来自耕作, 作用力大小为 26.6%, 达显著水平

( $P<0.05$ ) (表 5)。有机物对 POC 具有显著作用力, 作用力大小为 40.5%。这说明酸水解有机碳更易受耕作过程中土壤扰动的影响, 而 POC 更易受秸秆、有机肥等外源有机物输入的影响。

2.4 有机物和耕作措施对作物产量的影响

短期内(两年)不同耕作与外源有机物对稻麦周年总产量的影响有限, 秸秆还田处理稻麦周年总产量仅比 CKR 处理提高(或减少)66.1~475.0 kg·hm<sup>-2</sup>, 增产(或减产)幅度介于 0.5%~6.5%, 均未达显著水平(图 2)。其中, 秸秆还田配合旋耕措施周年总产量略高于秸秆还田配合翻耕措施和 CKR。已有研究表明, 秸秆还田或耕作方式在短期内稻麦周年总产量存在减产现象, 减产幅度可达 7.68%, 但不会产生显著

表 4 耕作因素、有机物及其交互效应对稻麦轮作系统土壤团聚体的作用力

Table 4 Affecting forces of tillage methods, organic materials and their interaction on soil aggregates of rice-wheat rotation system %

差异来源 Difference source	土壤团聚体粒径 Soil aggregates size (mm)			
	>2	0.25~2	0.05~0.25	<0.05
区组 Block	6.3	19.8	8.0	7.4
耕作 Tillage	0.2	9.3	2.1	16.3
有机物 Organic materials	36.4	5.0	9.6	4.1
耕作×有机物 Tillage × organic materials	1.4	33.1*	64.5*	0.2
误差 Error	55.6	33.0	15.8	72.0

\*表示影响显著( $P<0.05$ )。\* means significant effect at  $P < 0.05$  level.

表 5 耕作因素、有机物及其交互效应对稻麦轮作系统土壤有机碳组分的作用力

Table 5 Affecting forces of tillage methods and organic materials and their interaction on soil organic carbon fractions of rice-wheat rotation system %

差异来源 Difference source	有机碳组分 Fraction of soil organic carbon								
	DOC	EOC	LP <sub>c</sub>	LP <sub>c</sub>	HCl <sub>c</sub>	POC	SOC	BC	MOC
区组 Block	18.4	1.2	4.4	21.5	20.4	25.3	9.1	7.4	21.1
耕作 Tillage	0.0	23.4	27.7	26.6*	6.5	1.8	6.1	5.5	3.5
有机物 Organic materials	2.7	0.1	6.3	3.6	10.2	40.5*	14.5	15.0	32.1
耕作×有机物 Tillage × organic materials	36.4	53.0	20.6	22.8*	12.6	9.6	25.0	4.5	6.4
误差 Error	42.4	24.0	41.0	25.6	50.2	22.9	45.3	67.7	36.9

DOC: 水溶性有机碳; EOC: 333 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> 提取的有机碳; LP<sub>c</sub>: 2.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取的有机碳; LP<sub>c</sub>: 1 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取的有机碳; HCl<sub>c</sub>: 6 mol·L<sup>-1</sup> HCl 提取的有机碳; POC: 颗粒有机碳; SOC: 总有机碳; BC: 黑碳; MOC: 矿物结合态有机碳。\*表示影响显著( $P<0.05$ )。DOC: dissolve organic carbon; EOC: organic carbon extracted by 333 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub>; LP<sub>c</sub>: organic carbon extracted by 2.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; LP<sub>c</sub>: organic carbon extracted by 1 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; HCl<sub>c</sub>: organic carbon extracted by 6 mol·L<sup>-1</sup> HCl; POC: particulate organic carbon; SOC: total organic carbon; BC: black carbon; MOC: mineral-bonded organic carbon. \* means significant effect at  $P < 0.05$  level.

影响<sup>[23-24]</sup>。除 2018 年 MR 处理外, 有机肥处理对稻麦周年总产量无显著降低影响。本文中, 有机肥为猪粪有机肥, 其施用量  $2\ 404\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $2\ 885\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。赵军等<sup>[25]</sup>研究发现, 短期内(两年)猪粪有机肥施用量在  $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $6\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 均会降低水稻和小麦产量构成因素和实际产量, 但未达显著水平, 这与本文研究结果一致。

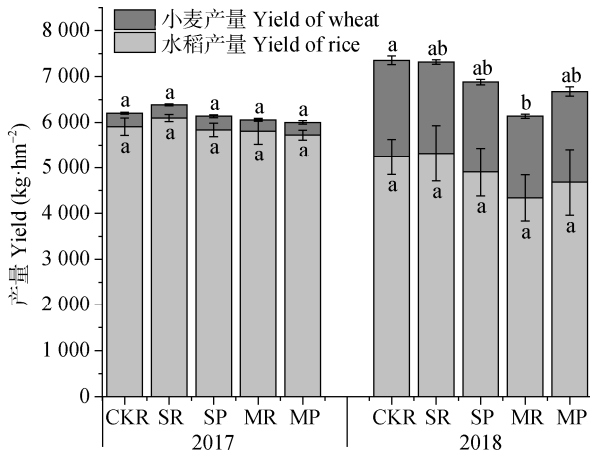


图 2 2017 年和 2018 年外源有机物和耕作方式对稻麦轮作系统作物产量的影响

Fig. 2 Effects of exogenous organic materials and tillage methods on grain yield of rice-wheat rotation system in 2017 and 2018

CKR: 秸秆不还田、不施有机肥, 旋耕; SR: 秸秆旋耕还田; SP: 秸秆翻耕还田; MR: 增施有机肥, 旋耕; MP: 增施有机肥, 翻耕。不同小写字母表示各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CKR: rotary tillage without straw returning and organic fertilizer application; SR: rotary tillage with straw returning; SP: ploughing with straw returning; MR: rotary tillage with organic fertilizer application; MP: ploughing with organic fertilizer application. Different lowercase letters mean significant differences among treatments at 0.05 level.

### 3 讨论与结论

短期内, 耕作和有机的交互作用能够显著影响 0~20 cm 土层的团聚体组成。土壤胶结物质是影响土壤团聚体含量和稳定性的内在因素, 而土壤团聚体的主要胶结剂包括有机质(含有机残体和菌丝等粗有机质)、黏粒和氧化物<sup>[26]</sup>。有机物的输入和耕作措施能够通过影响有机质组成影响团聚体的组成和稳定。本文中, 水稻季秸秆还田配合旋耕措施提高 0~20 cm 水稳性团聚体含量, 而秸秆还田配合翻耕措施降低土壤水稳性团聚体含量。研究表明, 秸秆还田增加土壤水稳性团聚体稳定性, 但是翻耕对土壤结构破坏程度大于旋耕, 降低表层土壤结构稳定性<sup>[27]</sup>。这主要是因为旋耕和翻耕措施对土壤的扰动深度有所差异, 导致秸秆还田深度有所不同。翻耕处理耕深至 30 cm, 秸秆主要分布在表层和深层土壤, 而旋耕措施耕深约 15 cm, 秸秆多分布于表层

土壤。研究表明, 稻麦秸秆还田深度 14 cm 时腐解速率更快<sup>[28]</sup>。秸秆和有机肥分解过程为表层土壤提供更多胶结物质。田慎重等<sup>[21]</sup>研究表明, 秸秆还田配合旋耕表层土壤的有机碳含量高于秸秆还田配合翻耕措施。因此, 秸秆还田配合旋耕措施能在短期内提高或保持 0~20 cm 土层水稳性团聚体含量。

有机碳活性组分主要受耕作以及耕作与有机物交互作用的影响, 不同措施对有机碳稳定性组分的影响较小。Blair 等<sup>[16]</sup>认为农业系统中, 人为管理措施主要影响土壤有机碳中活性有机碳部分。本研究中, 耕作对 LP<sub>c</sub> 和 LP<sub>e</sub> 具有较高的作用力, 其中对 LP<sub>c</sub> 作用力显著, 达 26.6%; EOC 主要受耕作与有机物交互作用的影响。活性有机碳组分中 EOC 是植物养分的主要来源, LP<sub>c</sub> 主要包括淀粉、半纤维素、可溶性糖等碳水化合物, LP<sub>e</sub> 主要来自纤维素<sup>[29]</sup>。秸秆还田和增施有机肥均可提高土壤 EOC、LP<sub>c</sub> 和 LP<sub>e</sub> 含量, 并且有机物是土壤活性有机碳增加的主要贡献者<sup>[4]</sup>。秸秆和有机肥通过为微生物提供能源物质(碳源), 促进土壤微生物的生长、繁殖, 增加有机碳的活性组分含量<sup>[5]</sup>。而耕作措施会引起土壤扰动, 能够使土壤与有机物充分接触, 加速有机物分解<sup>[30]</sup>。对比两种耕作措施发现, 旋耕措施 EOC 和 LP<sub>c</sub> 含量高于翻耕措施, 而 LP<sub>e</sub> 含量趋势与之相反。旋耕和翻耕扰动下, 外源有机物能够与氧气充分接触, 刺激微生物分泌参与碳循环相关酶的活性, 提高活性有机碳组分。叶雪松<sup>[31]</sup>研究表明, 旋耕对土壤酶活性的影响高于翻耕措施。因此, 秸秆还田配合旋耕对土壤 EOC 和 LP<sub>e</sub> 提升效果优于其他处理。

短期内, POC 主要受外源有机物的作用, 有机物对 POC 作用力显著, 为 40.5%。POC 是介于半分解动植物体和通过腐殖化的有机质之间的过渡态有机碳库, 周转时间短。通常 POC 包括存在于团聚体与团聚体之间的孔隙和团聚体内的动植物残体<sup>[32]</sup>。农田土壤 POC 的含量与总有机碳含量和团聚体组成显著相关<sup>[33]</sup>。本研究中, 秸秆还田处理有机碳含量 ( $13.4\sim 14.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 高于增施有机肥处理 ( $13.3\sim 13.5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。研究表明, 外源有机物(秸秆和有机肥)能够增加土壤有机碳的直接输入量, 并且秸秆还田对有机碳的提升效果优于增施有机肥<sup>[13]</sup>。这主要是因为相比增施有机肥处理, 秸秆还田处理新鲜的有机物投入量大, 在逐渐分解过程中优先形成 POC 组分<sup>[34]</sup>。对于团聚体而言, 秸秆还田处理大团聚体含量却略低于或接近增施有机肥处理, 这与 POC 的变化趋势相反。说明供试土壤 POC 的主要形态可能为游离态,

位于团聚体与团聚体之间孔隙, 因此与团聚体组成表现出相反的趋势。综上所述, 土壤 POC 含量的增加主要归结于秸秆和有机肥等有机物的输入, 这与王朔林等<sup>[33]</sup>和武均等<sup>[35]</sup>的研究结果相吻合。

本研究采用大田试验, 研究了秸秆、有机肥、旋耕和翻耕措施对土壤团聚体组成、有机碳组分的影响。结果发现, 秸秆还田配合旋耕能够降低土壤容重并增加水稳性团聚体含量, 改善土壤物理结构。同时, 秸秆还田配合旋耕有助于提高土壤有机碳活性组分, 包括易氧化有机碳、酸水解有机碳和颗粒有机碳。大团聚体、易氧化有机碳主要作用力来自土壤耕作和有机物的交互作用; 而酸水解有机碳主要作用力来自耕作措施。

## 参考文献 References

- [1] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1530–1540  
WANG S L, WANG H, LI J, et al. Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1530–1540
- [2] 赵其国, 滕应, 黄国勤. 中国探索实行耕地轮作休耕制度试点问题的战略思考[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 1–5  
ZHAO Q G, TENG Y, HUANG G Q. Consideration about exploring pilot program of farmland rotation and fallow system in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(1): 1–5
- [3] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米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  
WANG L, LI J, LI J, et al. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 759–768
- [4] 陈小云, 郭菊花, 刘满强, 等. 施肥对红壤性水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 125–131  
CHEN X Y, GUO J H, LIU M Q, et al. Effects of fertilization on lability and recalcitrancy of organic carbon of red paddy soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 125–131
- [5] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371–377  
HU N J, HAN X Z, YANG M F, et al. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 371–377
- [6] CAI A D, FENG W T, ZHANG W J, et al. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 172: 2–9
- [7] 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  
ZHANG H L, ZHENG X Q, HE Q Y, et al. Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 216–220
- [8] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱作农田土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 329–337  
WU J, CAI L Q, ZHANG R Z, et al. Effect of tillage practices on soil water-stable aggregate stability in dry farmlands in the Loess Plateau, Central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 329–337
- [9] 杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 等. 不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1387–1393  
YANG M F, ZHU L Q, HAN X Z, et al. Short-term effects of different tillage modes combined with straw-returning on the soil labile organic carbon components in a farmland with rice-wheat double cropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1387–1393
- [10] 关强, 蒲瑶瑶, 张欣, 等. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 115–121  
GUAN Q, PU Y Y, ZHANG X, et al. Effects of long-term fertilization on organic acids in root exudates and SOC components of Red paddy soils[J]. Soils, 2018, 50(1): 115–121
- [11] 吴萍萍, 李录久, 耿言安, 等. 耕作与施肥措施对江淮地区白土理化性质及水稻产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 243–248  
WU P P, LI L J, GENG Y A, et al. Effects of tillage and fertilization on physicochemical properties of Albic soil and rice yields in Jianghuai region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 243–248
- [12] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 225–235  
GUO Z, WANG X L, DUAN J J, et al. Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 225–235
- [13] 孙凯, 刘振, 胡恒宇, 等. 有机培肥与轮耕方式对夏玉米土壤碳氮和产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(3): 401–410  
SUN K, LIU Z, HU H Y, et al. Effect of organic fertilizer and rotational tillage practices on soil carbon and nitrogen and maize yield in wheat-maize cropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(3): 401–410
- [14] 梁博, 聂晓刚, 杨东升, 等. 西藏尼洋河流域下游 5 种典型土地利用方式土壤物理性质差异分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(1): 119–128  
LIANG B, NIE X G, YANG D S, et al. Differences in soil physical properties of 5 typical land use types in downstream of the Niyang River in Tibet[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2018, 46(1): 119–128
- [15] MURPHY D V, MACDONALD A J, STOCKDALE E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(5/6): 374–387
- [16] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australia



- lian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459
- [17] 邵月红, 潘剑君, 孙波, 等. 农田土壤有机碳库大小及周转[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 19–23  
SHAO Y H, PAN J J, SUN B, et al. Pool sizes and turnover rates of farmland soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(1): 19–23
- [18] GARTEN C T Jr, POST W M, HANSON P J, et al. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains[J]. Biogeochemistry, 1999, 45(2): 115–145
- [19] EUSTERHUES K, RUMPEL C, KLEBER M, et al. Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(12): 1591–1600
- [20] 尹云峰, 杨玉盛, 高人, 等. 皆伐火烧对杉木人工林土壤有机碳和黑碳的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 352–355  
YIN Y F, YANG Y S, GAO R, et al. Effects of slash burning on soil organic carbon and black carbon in Chinese fir plantation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 352–355
- [21] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 373–378  
TIAN S Z, NING T Y, WANG Y, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 373–378
- [22] 徐嘉晖, 高雷, 孙颖, 等. 大兴安岭森林土壤矿物结合态有机碳与黑碳的分布及土壤固碳潜力[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 236–246  
XU J H, GAO L, SUN Y, et al. Distribution of mineral-bonded organic carbon and black carbon in forest soils of Great Xing'an Mountains, China and carbon sequestration potential of the soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 236–246
- [23] 顾克军, 张传辉, 顾东祥, 等. 短期不同秸秆还田与耕作方式对土壤养分与稻麦周年产量的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(6): 1408–1413  
GU K J, ZHANG C H, GU D X, et al. Effects of different straw returning and tillage methods on annual yield and soil nutrients under rice-wheat rotation system in short-term[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(6): 1408–1413
- [24] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 81–85  
ZHU L Q, ZHANG D W, BIAN X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 81–85
- [25] 赵军, 李勇, 冉炜, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作系统产量及土壤微生物区系的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(4): 594–602  
ZHAO J, LI Y, RAN W, et al. Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on crop yield and soil microbiome in a rice-wheat cropping system[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(4): 594–602
- [26] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495–1498  
SHI Y, CHEN X, SHEN S M. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(11): 1495–1498
- [27] 苏思慧, 王美佳, 张文可, 等. 耕作方式与玉米秸秆条带还田对土壤水稳性团聚体和有机碳分布的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 841–847  
SU S H, WANG M J, ZHANG W K, et al. Effects of tillage practices and maize straw incorporation on water-stable aggregates and organic carbon in soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 841–847
- [28] 刘世平, 陈文林, 聂新涛, 等. 麦稻两熟地区不同埋深对还田秸秆腐解进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1049–1053  
LIU S P, CHEN W L, NIE X T, et al. Effect of embedding depth on decomposition course of crop residues in rice-wheat system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1049–1053
- [29] 张丽敏, 徐明岗, 姜翼来, 等. 土壤有机碳分组方法概述[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4): 1–6  
ZHANG L M, XU M G, LOU Y L, et al. Soil organic carbon fractionation methods[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(4): 1–6
- [30] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412–1417  
LIU M, YU W T, JIANG Z S, et al. A research review on soil active organic carbon[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(11): 1412–1417
- [31] 叶雪松. 耕作方式对土壤物理性状、酶活性以及燕麦产量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015  
YE X S. Influence of cultivation methods on soil physical characteristics, enzymatic activity and yield of oats[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2015
- [32] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777–783
- [33] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 104–111  
WANG S L, WANG G L, ZHAO X, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 104–111
- [34] LI J, WEN Y C, LI X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 281–290
- [35] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 728–736  
WU J, CAI L Q, ZHANG R Z, et al. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 728–736