

## 长期施肥红壤性稻田和旱地土壤有机碳积累差异

李文军<sup>1,2,3</sup>, 黄庆海<sup>1\*</sup>, 李大明<sup>1</sup>, 柳开楼<sup>1</sup>, 叶会财<sup>1</sup>, 肖国滨<sup>1</sup>, 张文菊<sup>2</sup>, 徐明岗<sup>2\*</sup>

(1 江西省红壤研究所/江西省红壤耕地保育重点实验室, 江西南昌 330046; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 3 湖南文理学院洞庭湖生态经济区建设与  
发展湖南省协同创新中心, 湖南常德 415000)

**摘要:**【目的】提高土壤有机碳水平对提升农田生产力有重要意义。基于长期定位施肥试验, 比较施肥影响下相同成土母质发育的红壤性稻田和旱地土壤的总有机碳 (TOC) 及其组分的积累差异, 以深入理解红壤有机碳的固持及稳定机制。【方法】稻田和旱地长期施肥试验分别始于 1981 和 1986 年, 包含 CK (不施肥对照)、NPK (施氮磷钾化肥) 和 NPKM (有机无机肥配施) 3 个处理, 在 2017 年晚稻和晚玉米收获后, 采集两个试验上述处理的耕层 (0—20 cm) 土样, 通过硫酸水解法分离土壤活性与惰性有机碳, 测定并计算土壤中 TOC 及其组分的含量及储量, 并利用 Jenny 模型拟合试验期间耕层土壤 TOC 含量的变化动态, 估算土壤固碳潜力。【结果】与 CK 相比, 长期施肥可提高稻田和旱地土壤各有机碳组分的含量, 且 NPKM 处理的效果优于 NPK 处理。相比于稻田土壤, 施肥对旱地土壤各有机碳组分含量的提升更加明显。NPK 和 NPKM 处理下, 旱地土壤活性有机碳组分 I、活性有机碳组分 II、惰性有机碳含量的增幅分别是稻田土壤的 2.7、2.7、5.8 倍和 2.0、1.4 和 2.5 倍。不论施肥与否, 稻田土壤 TOC 的固存量和固存潜力均显著高于旱地土壤。施肥促进土壤固碳, 在稻田和旱地土壤上, NPKM 处理的 TOC 固存量分别是 NPK 处理的 1.7 和 25.5 倍, TOC 固存潜力则分别是 NPK 处理的 1.4 和 5.8 倍。长期不同施肥均显著提高稻田和旱地土壤年均碳投入量, 线性拟合方程表明, 随碳投入量增加, 土壤活性有机碳储量的累积对稻田、旱地土壤 TOC 储量累积的贡献率分别达 64.7%、44.6%。不同处理间稻田与旱地土壤活性有机碳 (包括活性有机碳组分 I 与活性有机碳组分 II) 含量的差异可解释其 TOC 含量差异的 52.9%~60.0%。【结论】与施氮磷钾化肥相比, 有机无机肥配施可更好的促进土壤固碳, 且在旱地土壤上的促进作用比在稻田土壤上更为明显。与稻田土壤相比, 旱地土壤各有机碳组分含量的变化对长期施肥的响应更敏感, 且在施氮磷钾化肥条件下表现更为明显。红壤性稻田和旱地土壤 TOC 积累的主要贡献组分分别为活性有机碳和惰性有机碳。红壤植稻虽有利于有机碳固持, 但红壤性稻田土壤的活性碳占比较高, 可能因不当管理而发生损失。

**关键词:** 长期施肥; 红壤; 土地利用方式; 土壤有机碳组分; 土壤固碳

## Differences in organic carbon accumulation between reddish paddy and upland soils under long-term fertilization

LI Wen-jun<sup>1,2,3</sup>, HUANG Qing-hai<sup>1\*</sup>, LI Da-ming<sup>1</sup>, LIU Kai-lou<sup>1</sup>, YE Hui-cai<sup>1</sup>,  
XIAO Guo-bin<sup>1</sup>, ZHANG Wen-ju<sup>2</sup>, XU Ming-gang<sup>2\*</sup>

(1 Jiangxi Institute of Red Soil/Jiangxi Key Laboratory of Arable Land Conservation of Red soil, Nanchang 330046, China;  
2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science/National Engineering  
Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 3 Hunan Province Cooperative Innovation  
Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economy Zone,  
Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

收稿日期: 2020-07-06 接受日期: 2020-11-29

基金项目: 中国博士后科学基金 (2018M642595); 湖南省自然科学基金 (2017JJ3220); 江西省博士后科学基金 (2018KY22); 江西省自然科学基金 (20192BAB203022); 湖南省教育厅优秀青年科研项目 (18B404); 江西省红壤耕地保育重点实验室开放基金课题 (2019-01)。

联系方式: 李文军 E-mail: wenjunli0736@163.com

\* 通信作者 黄庆海 E-mail: hqh0791@vip.sina.com; 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

**Abstract:** **【 Objectives 】** Increasing soil organic carbon level is of great significance for improving farmland productivity. The accumulation characteristics of organic carbon were studied under long-term different fertilization modes in a reddish paddy soil and an upland red soil that both developed from the same parent material, which would provide scientific basis for further understanding the underlying mechanism of organic carbon sequestration and stabilization in fertilized red soils. **【 Methods 】** The study included two long-term fertilization experiments, one was in paddy field and started in 1981, and the other was in adjacent upland field and started in 1986. Surface soil samples (0–20 cm) were collected after harvest of late rice and maize in November 2017 in the three treatments of CK (no fertilizer), NPK (chemical N, P, K fertilizers) and NPKM (chemical NPK fertilizers plus organic manure) of both the experiments. The contents and storages of TOC and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-hydrolyzed labile and recalcitrant organic carbon in soils were measured. In addition, soil TOC sequestration potential was computed by fitting the dynamics of TOC content using Jenny model. **【 Results 】** Fertilization increased the contents of all organic carbon fractions in soils, and NPKM treatment increased more than NPK did. The content increase range of all the organic carbon fractions in the upland soil was significantly higher than that in the paddy soil. Under NPK treatment, the increase ranges of labile organic carbon fraction I (LOCF- I), labile organic carbon fraction II (LOCF- II) and recalcitrant organic carbon (ROC) in upland soil were 2.7 times, 2.7 times and 5.8 times of those in paddy soil, respectively, while under NPKM treatment, the increase ranges of LOCF- I, LOCF- II and ROC in upland soil were 2.0 times, 1.4 times and 2.5 times of those in paddy soil, respectively. No matter fertilization or not, the TOC sequestration amount and potential in paddy soils were significantly higher than those in upland soils. NPKM treatment presented better effect for promoting TOC sequestration as compared with NPK treatment. The soil TOC sequestration amount and potential under NPKM treatment were 1.7 times and 1.4 times of those under NPK treatment in paddy field, and were 25.5 times and 5.8 times in upland field. Long-term fertilization significantly increased exogenous carbon input in both paddy and upland fields, and the increase of labile organic carbon storage contributed 64.7% of TOC storage in paddy soil and 44.6% in upland soil, respectively. The contents of LOCF- I, LOCF- II and ROC in the paddy soil were all significantly higher than those in the upland soil, regardless of fertilization regimes. The difference in total labile organic carbon (summing LOCF- I and LOCF- II) content between the paddy and the upland soil could explain 52.9%–60.0% of the difference in TOC content. **【 Conclusions 】** Manure amendments combined with chemical NPK fertilizers significantly promote organic carbon sequestration in red soils as compared with chemical NPK fertilizers application alone, which is more pronounced in upland system. Compared with paddy soil, the change of content of each organic carbon fraction in upland soil was more sensitive to fertilizations, which is more obvious under the condition of chemical NPK fertilizers application. The main contributors of TOC accumulation in paddy and upland red soil are soil labile and recalcitrant organic carbon, respectively. Though reddish paddy soil is beneficial for TOC sequestration as compared with upland red soil, the proportions of labile fractions in its TOC is relatively higher, and thus is vulnerable to loss due to improper agricultural management.

**Key words:** long-term fertilization; red soil; land use mode; soil organic carbon fraction; soil organic carbon sequestration

农田土壤碳库是陆地生态系统最为活跃的碳库, 提升农田土壤总有机碳 (total organic carbon, TOC) 固存是温室气体减排的重要途径<sup>[1]</sup>。施肥对农田土壤 TOC 的固存与稳定有深刻影响, 基于长期试验的研究表明, 施有机肥可促进土壤 TOC 的积累, 但其影响程度与供试土壤的饱和固碳容量密切相

关<sup>[2-3]</sup>; 施化肥对土壤 TOC 的积累可能无明显影响<sup>[4]</sup>, 或产生明显的促进<sup>[3]</sup>、抑制<sup>[5]</sup>效应, 施化肥后土壤 TOC 积累动态的这种不确定性变化应与试验土壤类型及其利用方式等的差异密切相关。土壤 TOC 由一系列活性和功能各异的有机碳库组成, 因此, 协同分析土壤 TOC 及其组分的积累特征是深入认知

土壤有机碳固持与稳定机制的基础<sup>[1]</sup>。根据周转或稳定性质的差异,土壤 TOC 常可酸解分离为活性和惰性有机碳,土壤活性有机碳周转时间短,可灵敏地指示土壤 TOC 质量的变化;相反,土壤惰性有机碳分解缓慢,决定着土壤有机碳的储备和长期稳定<sup>[6-7]</sup>。施肥等措施引起土壤 TOC 量上的变化实质上是相应条件下土壤不同功能碳库量变化的综合反映,谢钧宇等<sup>[7]</sup>研究表明,施有机肥后复垦褐土 TOC 固存量的增加源自各有机碳库固存量的增加,且以惰性有机碳固存量增加的贡献较大; Dou 等<sup>[4]</sup>的研究则显示,长期施化肥对黑土 TOC 的积累几乎无影响,这是因为施化肥虽增加了黑土惰性有机碳的储量,但却使黑土活性有机碳储量发生近乎对等程度的亏损。由于受气候、土壤母质和耕作等诸多因素的影响,相同施肥措施对土壤 TOC 及其组分积累的影响在不同区域、不同土壤类型上存在明显差异,因此探究不同条件下施肥对土壤有机碳积累的影响仍是土壤固碳研究的重要内容。

红壤是我国南方重要的土壤资源,自然红壤具酸、黏、贫等不良特性,施肥是提升红壤肥力及固碳能力的重要措施<sup>[8]</sup>。植稻和旱作是红壤的主要利用方式,稻田和旱地在农艺管理及土壤特性上的差异深刻影响土壤有机碳的积累与稳定<sup>[9]</sup>。一般认为,植稻比旱作更有利于土壤 TOC 的累积<sup>[10]</sup>,但对该差异在不同碳组分中的表现特征关注较少<sup>[11]</sup>,这关乎施肥条件下稻田土壤固存碳可否稳定存在的科学问题。当前,多数研究聚焦于探究长期施肥下单一利用方式红壤的固碳效应<sup>[12-13]</sup>,在探究施肥或不同利用方式影响下红壤有机碳积累动态时,更多的是聚焦于易氧化有机碳、溶解性有机碳等某几个具体的土壤活性碳组分<sup>[9,14]</sup>,这不利于协同分析土壤不同功能碳库的变化特征及量化其与土壤 TOC 积累间的关系<sup>[15]</sup>,且鉴于不同试验间供试土壤的成土特性等存在较大差异,相关研究结果不利于精准指导成土母质相同的红壤性稻田和旱地土壤的培肥固碳实践。基于此,本研究依托长期定位试验平台,结合土壤碳分组,量化分析长期施肥下成土母质相同的红壤性稻

田和旱地土壤 TOC 及其组分积累特性与差异,以期提升红壤碳汇及优化红壤培肥提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

长期试验位于江西省红壤研究所内(116°20'24"E、28°15'30"N),该地处于中亚热带季风性气候区,年均降水量 1 537 mm,多年平均气温 18.1℃。供试土壤为红壤,成土母质为第四纪红黏土。稻田、旱地长期定位施肥试验分别开始于 1981、1986 年,种植制度分别为早稻—晚稻—冬闲、春玉米—秋玉米—冬闲。试验开始时耕层(0—20 cm)土壤基本理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

稻田、旱地长期施肥试验均设不施肥(CK)、施氮磷钾化肥(NPK)、有机无机肥配施(NPKM)3个处理。每个处理设3次重复,稻田、旱地小区面积分别为46.7、22.2 m<sup>2</sup>,随机区组排列。

氮肥、磷肥、钾肥分别用尿素、钙镁磷肥、氯化钾。水稻每季施化肥 N 90 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 75 kg/hm<sup>2</sup>;玉米每季施化肥 N 60 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 30 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 60 kg/hm<sup>2</sup>。磷肥作基肥一次性施用。稻田氮肥用量的 60% 为基肥,其余 40% 与全部的钾肥作追肥施用。旱地氮肥用量的 50% 为基肥,其余 50% 作追肥施用,钾肥全部作基肥施用。NPKM 处理稻田、旱地每季有机肥施用量分别为鲜基重 22500、15000 kg/hm<sup>2</sup>,每季氮、磷、钾化肥施用量则同对应的 NPK 处理一致。稻田早、晚稻季所用有机肥源分别为紫云英、猪粪,旱地春、秋玉米季所用有机肥源均为猪粪。烘干基紫云英和猪粪的有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为 467 和 340 g/kg、4.0 和 6.0 g/kg、1.1 和 4.5 g/kg、3.5 和 5.0 g/kg。有机肥全部作基肥施用。

### 1.3 样品采集与分析

参照历年采样方法,2017 年晚稻和秋玉米收获后按“S”形采集各小区耕层(0—20 cm)土壤样品,

表 1 试验开始时耕层土壤的基本理化性质

Table 1 Soil physical-chemical properties in plough layer at the beginning of the experiments

土地利用方式 Land use mode	总孔隙度 (%) Total porosity	粘粒含量 (%) Clay content	容重 (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	pH (soil/water=1/2.5)	总有机碳 (g/kg) Total organic C	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全钾 (g/kg) Total K
稻田 Paddy field	60.3	24.1	1.17	6.90	16.3	1.49	0.48	10.39
旱地 Upland field	54.6	31.8	1.20	6.00	9.4	0.98	1.42	18.53

每个小区采集 10 个样点, 并组成一个混合土样。新鲜土样去除动、植物残体及石砾后风干过筛备用。同时, 用环刀按“S”形采集耕层原状土壤样品, 并测定其容重。

采用改进的  $H_2SO_4$  水解法分离土壤有机碳组分<sup>[6]</sup>: 第一步, 称取 1.0000 g 左右过 0.15 mm 筛的土壤样品于 50 mL 离心管内, 加入 20 mL 2.5 mol/L  $H_2SO_4$ , 于 100℃ 水浴锅中消煮 30 min, 冷却后在 4500 r/min 转速下离心 20 min, 收集上清液。离心管内土样加 20 mL 蒸馏水继续按照前述方法离心, 将两次离心收集的上清液合并且过 0.45  $\mu m$  滤膜, 之后定容至 50 mL 以备活性有机碳组分 I 含量的测定。第二步, 将第一步离心管内的残留土样加水离心清洗 3 次, 在 60℃ 下烘干后, 加入 2 mL 13 mol/L  $H_2SO_4$ , 在室温下持续振荡 10 h, 然后加水稀释酸液浓度至 1 mol/L, 稀释后的土液混合物继续在 100℃ 水浴锅中消煮 3 h, 其间每隔 30 min 手动摇晃离心管一次, 以充分混匀土壤与酸解液。土液混合物冷却后参照第一步水解所述方法离心、过滤, 定容上清液至 50 mL 以备活性有机碳组分 II 含量的测定。残留在离心管内的土样经充分离心清洗后, 在 60℃ 下烘至恒重, 土样残留物结合碳为土壤惰性有机碳。

采用重铬酸钾容量法, 测定土壤 TOC 及活性有机碳组分 I、活性有机碳组分 II 含量。土壤惰性有机碳含量通过土壤 TOC 含量减去活性有机碳含量计算得到。

#### 1.4 计算与统计分析

土壤 TOC、土壤各有机碳组分的储量分别采用式 (1)、(2) 计算:

$$TOC_{stock} = TOC_{content} \times B \times H \times 100 \quad (1)$$

$$OC(iF)_{stock} = OC(iF)_{content} \times B \times H \times 100 \quad (2)$$

式中,  $TOC_{stock}$ 、 $TOC_{content}$  分别为土壤 TOC 储量 ( $kg/hm^2$ )、含量 ( $g/kg$ ),  $B$  为土壤容重 ( $g/cm^3$ ),  $H$  为土层深度 ( $cm$ ),  $OC(iF)_{stock}$ 、 $OC(iF)_{content}$  分别为土壤  $i$  有机碳组分储量 ( $kg/hm^2$ )、含量 ( $g/kg$ )。

土壤 TOC 固存量采用式 (3) 计算:

$$\Delta TOC_{stock} = TOC_{stock-T} - TOC_{stock-0} \quad (3)$$

式中,  $\Delta TOC_{stock}$  为土壤 TOC 固存量 ( $kg/hm^2$ ),  $TOC_{stock-T}$  和  $TOC_{s-0}$  分别为当前 (2017 年) 和试验开始时的土壤 TOC 储量。

土壤 TOC 固存潜力计算: 稻田、旱地的试验条件 (种植及施肥制度等) 长期保持稳定, 因此, 利用 Jenny 模型 [式 (4)] 对长期试验期间土壤 TOC 含量的

变化动态进行非线性回归拟合。

$$TOC_{content-t} = TOC_{content-e} + (TOC_{content-0} - TOC_{content-e}) \times \exp(-dt) \quad (4)$$

式中,  $TOC_{content-t}$ 、 $TOC_{content-e}$ 、 $TOC_{content-0}$  分别为  $t$  时间后、达到周转平衡时、试验起始时的土壤 TOC 含量 ( $g/kg$ ),  $d$  为土壤 TOC 年分解速率 [ $g/(kg \cdot a)$ ],  $t$  为试验时长 ( $a$ )。

假定土壤 TOC 达周转平衡时的容重与当前测定结果相同<sup>[16]</sup>, 土壤 TOC 固存潜力采用式 (5) 计算:

$$TOC_{stock-p} = TOC_{stock-e} - TOC_{stock-0} \quad (5)$$

式中,  $TOC_{stock-p}$ 、 $TOC_{stock-e}$  分别为土壤 TOC 固存潜力 ( $kg/hm^2$ )、土壤 TOC 达周转平衡时的储量。

相同处理下, 稻田土壤中各有机碳组分的含量相较旱地土壤的增量对土壤 TOC 含量增量的贡献率采用式 (6) 计算:

$$P_{iF} = [OC(iF)_{content-paddy} - OC(iF)_{content-upland}] / [TOC_{content-paddy} - TOC_{content-upland}] \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $P_{iF}$  为土壤  $i$  有机碳组分的贡献率 (%),  $OC(iF)_{content-paddy}$ 、 $OC(iF)_{content-upland}$  分别为稻田、旱地土壤  $i$  有机碳组分含量 ( $g/kg$ ),  $TOC_{content-paddy}$ 、 $TOC_{content-upland}$  分别为当前稻田、旱地土壤 TOC 含量 ( $g/kg$ )。

碳投入估算: 本试验中每季作物收获后秸秆全部移除, 故土壤的有机碳总投入包括作物根茬碳和有机肥碳, 年均作物根茬碳、有机肥碳投入量分别采用式 (7)、(8) 计算。

$$OC_{input-crop} = [(Y_g + Y_s) \times R_r \times D_r + Y_s \times R_s] \times (1 - W) \times OC_{content-crop} \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$OC_{input-manure} = A_m \times (1 - W_o) \times OC_{content-manure} \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中,  $OC_{input-crop}$  为年均作物根茬碳投入量 [ $kg/(hm^2 \cdot a)$ ],  $Y_g$  和  $Y_s$  分别为作物籽粒和秸秆风干生物量 [ $kg/(hm^2 \cdot a)$ ],  $R_r$  为光合碳进入地下部分的比例 (%),  $D_r$  为作物根系生物量平均分布在 0—20 cm 土层的比例 (%),  $R_s$  为作物收割留茬占秸秆的比例 (%),  $W$  和  $OC_{content-crop}$  分别为地上部分植株风干样的含水量 (%) 和植株有机碳含量 ( $g/kg$ );  $OC_{input-manure}$  为年均有机肥碳投入量 [ $kg/(hm^2 \cdot a)$ ],  $A_m$  为每年施用有机肥的鲜基重 [ $kg/(hm^2 \cdot a)$ ],  $W_o$  为有机肥含水量 (%),  $OC_{content-manure}$  为有机肥的有机碳含量 ( $g/kg$ )。式中相关参数取值通过实测或参考文献 [15] 相关资料获得。

用 SPSS 16.0 软件对试验数据进行统计分析, 采用单因素方差分析和 Duncan 法比较稻田、旱地不同处理间测定结果的差异 ( $\alpha = 0.05$ )。用 Origin 2016 作图。图表中数值为平均值  $\pm$  标准差 ( $n = 3$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施肥下稻田和旱地土壤有机碳组分含量及其差异

不论施肥与否, 稻田和旱地土壤均以惰性有机碳的含量最高; 活性有机碳组分 I 的含量次之; 活性有机碳组分 II 的含量最低 (表 2)。与 CK 处理相比, 施肥后土壤活性有机碳组分 I、活性有机碳组分 II、惰性有机碳的含量分别提高 4.8%~49.8%、9.8%~71.3%、1.9%~42.7%。长期施肥后, 旱地土壤各有机碳组分含量的增幅均明显高于稻田土壤, 计算得知, 施氮磷钾化肥后, 旱地土壤活性有机碳组分 I、活性有机碳组分 II、惰性有机碳的含量增幅分别是稻田土壤对应有机碳组分含量增幅的 2.7、2.7、5.8 倍; 有机无机肥配施后, 旱地土壤活性有机碳组分 I、活性有机碳组分 II、惰性有机碳的含量增幅分别是稻田土壤对应有机碳组分含量增幅的 2.0、1.4、2.5 倍。表 2 显示, 与 CK 和 NPK 处理相比, NPKM 处理下稻田和旱地土壤各有机碳组分的含量均有显著提高 ( $P < 0.05$ ); 与 CK 处理相比, NPK 处理下旱地土壤各有机碳组分的含量亦有显著提高 ( $P < 0.05$ )。

不论施肥与否, 稻田土壤各有机碳组分的含量均显著高于旱地土壤 ( $P < 0.05$ , 表 2), 计算各处理下稻田土壤各有机碳组分的含量相较于旱地土壤的增量对土壤 TOC 含量增量的贡献率, 结果见图 1。与 CK 相比, 长期不同施肥均提高了土壤活性有机碳组分 I、活性有机碳组分 II 的贡献率, 相应地降低了惰性有机碳的贡献率, 其中 NPKM 处理下土壤活性有机碳组分 II 的贡献率显著提高 ( $P < 0.05$ )。CK、NPK、NPKM 处理下土壤活性有机碳组分 I 与活性

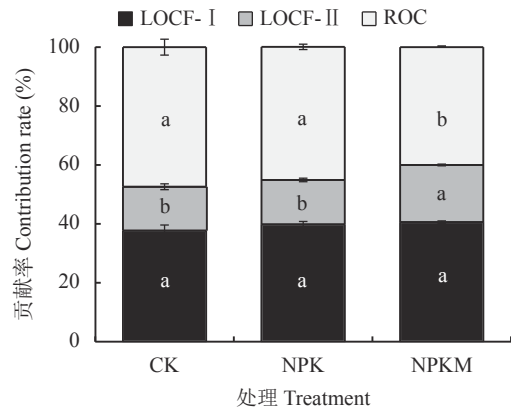


图 1 长期施肥下稻田土壤各有机碳组分含量增量 (相对于旱地土壤) 对土壤总有机碳含量增量的贡献率

Fig. 1 Contribution of organic carbon fraction increment (relative to upland field) to total organic carbon content increment in paddy field under long-term fertilization

[注 (Note): LOCF-I—活性有机碳组分 I Labile organic carbon fraction I; LOCF-II—活性有机碳组分 II Labile organic carbon fraction II; ROC—惰性有机碳 Recalcitrant organic carbon. 方柱内不同小写字母表示同一组份不同处理间在 0.05 水平差异显著 Different lowercase letters in the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level for the same organic C fraction, respectively.]

有机碳组分 II 的贡献率之和分别达 52.9%、54.9%、60.0%, 说明不论施肥与否, 与旱地土壤相比, 稻田土壤增加的有机碳主要是以活性有机碳的形式存在。

### 2.2 长期施肥下稻田和旱地土壤总有机碳固存量及固存潜力

不论施肥与否, 稻田土壤的 TOC 固存量均显著高于旱地土壤 (表 3)。连续 30 多年不施肥后, 旱地土壤有机碳呈亏损状态, 其固存量为负值; 相反, 稻田土壤则表现出明显的固碳效应。与不施肥相比, 长期施肥不同程度地提高了土壤 TOC 的固存

表 2 长期施肥下稻田和旱地土壤各有机碳组分含量 (g/kg)

Table 2 Contents of organic carbon fractions in paddy and upland soils under long-term fertilization

土地利用方式 Land use mode	处理 Treatment	活性有机碳组分 I Labile organic carbon fraction I	活性有机碳组分 II Labile organic carbon fraction II	惰性有机碳 Recalcitrant organic carbon
稻田 Paddy field	CK	6.04 ± 0.25 b	2.45 ± 0.10 b	9.86 ± 0.18 b
	NPK	6.33 ± 0.19 b	2.69 ± 0.06 b	10.05 ± 0.42 b
	NPKM	7.58 ± 0.32 a	3.67 ± 0.06 b	11.53 ± 1.00 a
旱地 Upland field	CK	2.35 ± 0.09 c	1.01 ± 0.06 c	5.29 ± 0.11 c
	NPK	2.65 ± 0.10 b	1.28 ± 0.05 b	5.87 ± 0.09 b
	NPKM	3.52 ± 0.15 a	1.73 ± 0.07 a	7.55 ± 0.20 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母分别表示相同土地利用方式下不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters in each column indicate significant difference among treatments under the same land use mode at the 0.05 level.

表 3 长期施肥下稻田和旱地土壤总有机碳固存量及固存潜力

Table 3 Sequestration amount and potential of TOC in paddy and upland fields under long-term fertilization

土地利用方式 Land use mode	处理 Treatment	TOC固存量 (kg/hm <sup>2</sup> ) TOC sequestration amount	TOC固存潜力 (kg/hm <sup>2</sup> ) TOC sequestration potential	R <sup>2</sup>
稻田 Paddy field	CK	9977.0 ± 843.3 b	13872.1 ± 632.1 b	0.60**
	NPK	10719.2 ± 1286.8 b	15182.1 ± 1205.3 b	0.84***
	NPKM	18394.4 ± 1400.0 a	20791.1 ± 1451.6 a	0.95***
旱地 Upland field	CK	-2712.9 ± 782.1 c	-3620.3 ± 753.4 c	0.48*
	NPK	349.6 ± 93.2 b	1436.0 ± 96.6 b	0.75***
	NPKM	8915.1 ± 914.8 a	8308.5 ± 907.9 a	0.75***

注 (Note): 同列数据后不同小写字母分别表示相同土地利用方式下不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters in each column indicate significant difference among treatments under the same land use mode at the 0.05 level. \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ ; \*\*\*— $P < 0.001$ .

量, 其中, 施氮磷钾化肥仅显著提高旱地土壤的 TOC 固存量, 有机无机肥配施对稻田和旱地土壤的 TOC 固存量均有显著提高作用 ( $P < 0.05$ )。表 3 显示, NPKM 处理的土壤有机碳固存量亦显著高于 NPK 处理, 计算得知, 稻田 NPKM 处理的土壤 TOC 固存量是稻田 NPK 处理的 1.7 倍, 旱地 NPKM 处理的土壤 TOC 固存量则是旱地 NPK 处理的 25.5 倍。

土壤固碳潜力表征稳定试验条件下的土壤 TOC 达到周转平衡时, 土壤所能固存的有机碳量, 其与土壤 TOC 饱和容量有本质区别<sup>[7]</sup>。表 3 显示, Jenny 模型可较好的拟合试验期间稻田和旱地土壤 TOC 含量的变化动态 ( $R^2$  为 0.48~0.95,  $P < 0.05$ )。不论是稻田还是旱地, 施肥对土壤 TOC 固存潜力的影响与对 TOC 固存量的影响趋势一致, 即: 与 CK 相比, 长期不同施肥均可提高稻田和旱地土壤 TOC 固存潜力, 但施氮磷钾化肥的提升效应仅在旱地土壤上达显著水平。有机无机肥配施条件下的土壤 TOC 固存潜力最高, 计算得知, 在稻田和旱地土壤上, NPKM 处理的 TOC 固存潜力分别是 NPK 处理的 1.4 和 5.8 倍。

### 2.3 长期施肥下稻田和旱地土壤总有机碳与各有机碳组分积累间的关系

增加外源碳的输入是土壤有机碳积累的源动力, 计算不同处理下红壤性稻田和旱地土壤年均碳投入量 (图 2)。不论是稻田还是旱地土壤, 不同处理间年均碳投入量均差异显著 ( $P < 0.05$ ), 长期不同施肥显著提高了年均作物根茬碳投入量, 进而增加了土壤的总碳投入量。计算得知, 稻田 NPK 和 NPKM 处理的土壤年均总碳投入量分别是 CK 处理的 1.5 和

4.7 倍, 旱地 NPK 和 NPKM 处理的土壤年均总碳投入量则分别是 CK 处理的 2.8 和 10.3 倍。图 2 显示, 不论施肥与否, 稻田土壤的年均总碳投入量均明显高于旱地土壤, 提高幅度达 34.7%~193.8%。

图 3 显示, 稻田、旱地土壤 TOC 及各有机碳组分的储量与年均总碳投入量间均具有显著的线性正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 说明施肥后土壤 TOC 储量的增加源于各有机碳组分储量的增加。线性回归方程的斜率可表征土壤 TOC 及各有机碳组分储量的累积速率。土壤 TOC 储量的累积速率等于土壤各有机碳组分储量的累积速率之和, 据此计算得出, 稻田土壤上, 随年均总碳投入量增加, 土壤活性有机碳组分 I 和活性有机碳组分 II 储量的累积对土壤 TOC 储量累积的贡献率累计达 64.7%, 远高于惰性有机碳的贡献率 (35.3%); 相反, 旱地土壤上, 随年均总碳投入量增加, 土壤活性有机碳组分 I 和活性有机碳组分 II 储量的累积对土壤 TOC 储量累积的贡献率累计达 44.6%, 但比惰性有机碳的贡献率低 10.8 个百分点。

## 3 讨论

### 3.1 长期施肥下土壤活性、惰性有机碳积累及总有机碳固存效应

土壤活性有机碳的成分主要是多糖和纤维素类物质, 土壤惰性有机碳的成分则主要是木质素等难分解物质<sup>[6-7]</sup>。施肥是调控土壤活性与惰性有机碳积累的重要措施, 本试验土壤中, 活性有机碳组分的含量变化对长期施肥的响应敏感性均高于惰性有机碳组分, 这与 Ding 等<sup>[18]</sup>在黑土上的研究结果正好相反。究其原因, 可能是黑土 2:1 型膨胀型黏土矿物更易与外源碳结合形成较为复杂和稳定的有机化合

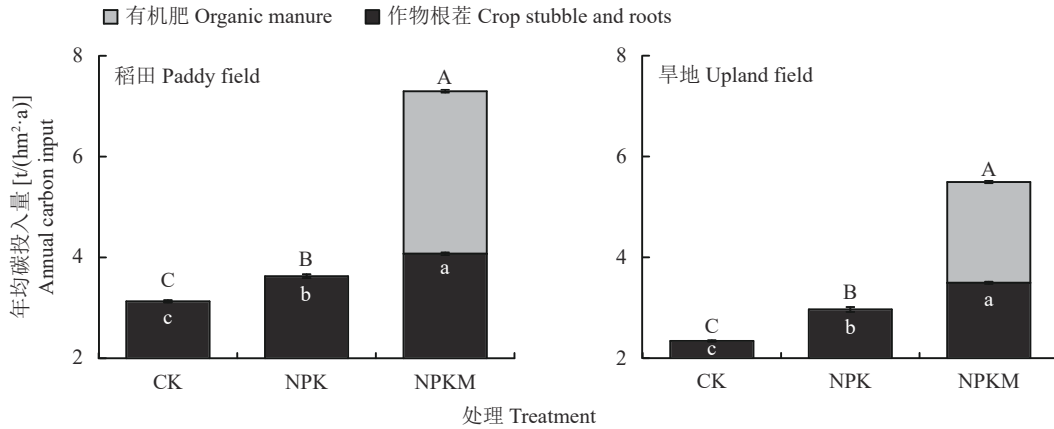


图 2 长期施肥下稻田和旱地土壤年均碳投入量

Fig. 2 Annual exogenous carbon input in paddy and upland fields under long-term fertilization

[注 (Note): 柱内不同小写字母表示处理间年均作物根茬碳投入量差异显著, 不同大写字母表示处理间年均总碳投入量差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the bars mean significant difference in the annual carbon input from crop stubble and underground roots, and different capital letters above the bars mean significant difference in annual total carbon input among different treatments ( $P < 0.05$ ).]

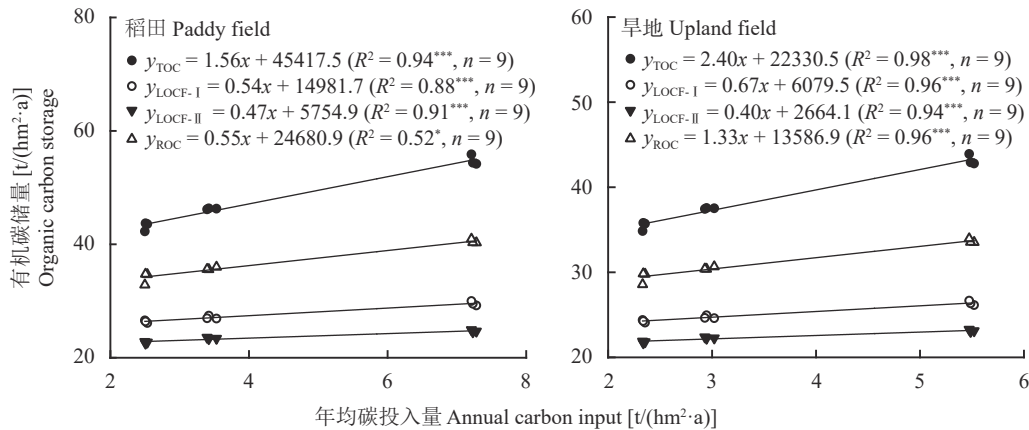


图 3 长期施肥下稻田和旱地土壤的年均碳投入量与土壤总有机碳及其组分储量间的关系

Fig. 3 Relationships between annual carbon input and storages of soil TOC and its fractions in paddy and upland fields under long-term fertilization

[注 (Note): TOC—土壤总有机碳 Total soil organic carbon; LOCF-I—活性有机碳组分 I Labile organic carbon fraction I; LOCF-II—活性有机碳组分 II Labile organic carbon fraction II; ROC—惰性有机碳 Recalcitrant organic carbon. \*— $P < 0.05$ ; \*\*\*— $P < 0.001$ .]

物<sup>[19]</sup>,也可能是本供试土壤中复杂的有机物在湿热气候影响下周转更快、稳定性更低。本研究显示,长期不同施肥特别是施氮磷钾化肥后旱地土壤各有机碳组分含量的增幅均明显高于稻田土壤,这主要是因为与稻田土壤相比,旱地土壤的碳投入量在施肥后提升更为明显(图2)。此外,供试稻田土壤具有较高的初始有机碳含量,即使在长期不施肥条件下其含量总体上仍呈增加趋势<sup>[8]</sup>,这也会限制施肥后供试稻田土壤 TOC 及其组分含量的明显提升<sup>[20]</sup>。

农田土壤有机碳的固存主要取决于有机碳的输入和矿化、淋溶等输出之间的动态平衡。本研究显示,不论是稻田还是旱地,施肥对土壤 TOC 固存量

和固存潜力的影响与对各有有机碳组分含量的影响趋势一致。与 CK 处理相比, NPK 处理下稻田土壤的 TOC 固存量和固存潜力均没有显著增加,多年连续监测结果也显示供试稻田 NPK 处理的土壤 TOC 含量相较 CK 处理总体上无明显增加<sup>[8]</sup>,其原因可能是稻田 CK 处理的固碳效率高于 NPK 处理<sup>[21]</sup>以及二者间年均碳投入量差异相对较小。有机培肥常被认为是提升土壤肥力、促进土壤固碳的重要措施<sup>[2,5]</sup>。本研究显示,与施氮磷钾化肥相比,有机无机肥配施可更好地促进土壤固碳,且该效应在旱地土壤上表现更为明显。这是因为在旱作条件下,长期单施化肥加速红壤酸化<sup>[8]</sup>,进而对外源碳(主要为作物根茬

源碳)的持续稳定输入及其固定产生不利影响<sup>[22]</sup>。因此,在红壤旱地培肥固碳实践中应更加重视有机无机肥的配施。本试验结果还显示,各处理下稻田土壤的 TOC 固存量均显著高于旱地土壤。其主要原因是稻田土壤的年均碳投入量及其固定效率均明显高于旱地土壤<sup>[21]</sup>。不论施肥与否,旱地土壤 TOC 固存潜力亦明显低于稻田土壤(表 3),这充分反映出红壤性旱地土壤比红壤性稻田土壤具有更低的固碳容量<sup>[23]</sup>。

### 3.2 土壤总有机碳与活性、惰性有机碳积累间的关系及固存碳的环境意义

量化土壤活性、惰性有机碳与土壤 TOC 积累间的关系对深入理解土壤有机碳固持与稳定特性有重要意义<sup>[4]</sup>。Dou 等<sup>[4]</sup>、Zhang 等<sup>[24]</sup>研究显示,有机培肥后黑土和灰漠土中惰性有机碳储量的增加值占其 TOC 储量增加值的比例均达 75% 以上。本试验结果则显示,长期施肥后,红壤性稻田、旱地土壤 TOC 储量累积的主要贡献碳库分别为活性、惰性有机碳。在供试稻田和旱地土壤上,土壤 TOC 与活性、惰性有机碳积累关系的这种差异性,究其原因除了与稻作和旱作红壤外源投入碳的数量、质量有较大差异密切相关外,也与土壤特性变化及农艺管理等的管理有关:一方面,相较于玉米根茬,水稻根茬含有更低比例的木质素、丹宁等难分解物质和更高比例的半纤维、纤维素等易分解物质<sup>[25]</sup>,因而具有更高的碳源质量。另外,不论施肥与否,稻田土壤年均碳投入量均明显高于旱地土壤(图 2)。因此,相比于供试旱地土壤,供试稻田土壤有更多且质量更高的外源碳输入,因而更易积累活性有机碳<sup>[5, 26]</sup>。另一方面,供试旱地土壤因其酸度更低,利于真菌的快速生长及繁殖,造成供试旱地土壤的真菌/细菌比高于供试稻田土壤<sup>[8]</sup>,旱作好氧条件下,伴随着活性有机碳的不断分解消耗,真菌对外源难分解有机碳的利用与固持逐渐起主要作用<sup>[27]</sup>。再者,水稻土淹水条件下的搅浆活动使得大颗粒土壤物质破碎形成大量细土粒,这些细土粒通过化学吸附等过程更好地包裹土壤颗粒有机碳,在一定程度上减缓土壤活性有机碳的分解<sup>[28]</sup>,搅浆活动驱使土壤黏化,进而提高淹水条件下土壤活性碳的平均滞留时间<sup>[28]</sup>。

本研究显示,种植水稻虽有利于土壤有机碳固持,但与旱地土壤相比,稻田土壤增加的有机碳主要以活性有机碳的形式存在(图 1),这说明供试稻田土壤含有更高比例的不稳定或活性碳组分,这些活性碳可能容易因操作管理不当而发生明显损失且产生环境危害。生产实践中,淹水环境可使稻田土壤

维持比旱地土壤更低的有机碳分解速率及其激发效应<sup>[29]</sup>,但研究表明红壤性水稻土有机碳的生物稳定性要明显比旱作红壤低<sup>[20]</sup>,因而,良好的水管理是稻田土壤活性碳有效固存的重要保障。稻田和旱地系统在生态条件、土壤特性、农艺管理等方面存在明显差异,这使得稻田和旱地土壤有机碳的积累与周转特性有明显不同<sup>[9]</sup>。相较于短期试验,长期试验可更准确地揭示稻田和旱地土壤有机碳的积累特性及差异。因此,今后需协同运用碳同位素标记及核磁共振等技术<sup>[30]</sup>,结合历史样品分析及多重分组方法,进一步深入研究长期施肥下红壤稻田和旱地土壤碳的固定、周转与稳定性差异。

## 4 结论

不论施肥与否,稻田土壤总有机碳的固存量和固存潜力均显著高于旱地土壤,这显示红壤植稻更有利于土壤固碳。与不施肥相比,长期施肥显著提升外源碳投入量,进而促进红壤性稻田和旱地土壤总有机碳及其组分的积累,且以有机无机肥配施的效果最佳。与红壤性水稻土相比,红壤性旱地土壤各有机碳组分的含量变化对长期不同施肥的响应更敏感,且该效应在施氮磷钾化肥条件下表现更为明显。红壤性稻田和旱地土壤总有机碳积累的主要贡献组分分别为活性有机碳和惰性有机碳。不论施肥与否,红壤性稻田土壤相较红壤性旱地土壤增加的有机碳主要是以活性有机碳的形式固持,因此红壤性稻田土壤的活性有机碳可能易因管理不当而发生明显损失。

### 参 考 文 献:

- [1] Xu X R, Zhang W J, Xu M G, *et al.* Characteristics of differently stabilized soil organic carbon fractions in relation to long-term fertilization in Brown Earth of Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 1101–1110.
- [2] Ghosh A, Bhattacharyya R, Meena M C, *et al.* Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an Inceptisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 177: 134–144.
- [3] Muhammad Q, Huang J, Waqas A, *et al.* Yield sustainability, soil organic sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 198: 104569.
- [4] Dou X L, He P, Cheng X L, *et al.* Long-term fertilization alters chemically-separated soil organic carbon pools: Based on stable C isotope analyses[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19061.
- [5] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44: 93–101.
- [6] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and



- nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach[J]. *Geoderma*, 2002, 107: 109–141.
- [7] 谢钧宇, 孟会生, 焦欢, 等. 施肥对复垦土壤中活性和难降解碳氮组分的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(5): 1113–1121.  
Xie J Y, Meng H S, Jiao H, *et al.* Effects of fertilization regimes on organic carbon and total nitrogen in labile and recalcitrant fractions of reclaimed soils[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2019, 25(5): 1113–1121.
- [8] 黄庆海. 长期施肥红壤农田地力演变特征[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014.  
Huang Q H, Evolution characteristics of soil fertility in red soil farmland under long-term fertilization[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2014.
- [9] 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 等. 红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征[J]. *环境科学*, 2019, 41(3): 1466–1473.  
Zhang X F, Zheng S M, Xia Y H, *et al.* Responses of soil organic carbon fractions to land use types in hilly red soil regions, China[J]. *Environmental Science*, 2019, 41(3): 1466–1473.
- [10] Qing Z, Huang Y, Zhuang Q. Soil organic carbon sequestration potential of cropland in China[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2013, 27: 711–712.
- [11] Huang S, Pan X H, Guo J, *et al.* Differences in soil organic carbon stocks and fraction distributions between rice paddies and upland cropping systems in China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14: 89–98.
- [12] 孙玉桃, 廖育林, 郑圣先, 等. 长期施肥对双季稻种植下土壤有机碳库和固碳量的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 732–740.  
Sun Y T, Liao Y L, Zheng S X, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic pool and carbon sequestration under double rice cropping[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 732–740.
- [13] 黄晶, 李冬初, 刘淑军, 等. 长期施肥下红壤旱地土壤CO<sub>2</sub>排放及碳平衡特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 602–610.  
Huang J, Li D C, Liu S J, *et al.* Characteristics of soil CO<sub>2</sub> emission and carbon balance under long-term fertilization in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(2): 602–610.
- [14] 李玲, 朱捍华, 苏以荣, 等. 稻草还田和易地还土对红壤丘陵区农田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 926–933.  
Li L, Zhu H H, Su Y R, *et al.* Effects of rice straw incorporation in situ and ex situ on soil organic C and active organic C in agricultural soils in red soil hilly region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 926–933.
- [15] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3817–3825.  
Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, *et al.* Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19): 3817–3825.
- [16] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 745–749.  
Yin Y F, Cai Z C. Effect of fertilization on equilibrium levels of organic carbon and capacities of soil stabilizing organic carbon for fluvo-aquic soil[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 745–749.
- [17] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. *Climate Change*, 2007, 80: 25–41.
- [18] Ding X L, Han X Z, Liang Y, *et al.* Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 122: 36–41.
- [19] He Y T, Zhang W J, Xu M G, *et al.* Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 635–644.
- [20] Sun Y N, Huang S, Yu X C, *et al.* Differences in fertilization impacts on organic carbon content and stability in a paddy and an upland soil in subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2015, 397: 189–200.
- [21] Yan X, Zhou H, Zhu Q H, *et al.* Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130: 42–51.
- [22] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, *et al.* Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15: 260–270.
- [23] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, *et al.* Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 1741–1750.
- [24] Zhang J, Wang X J, Wang J P. Impact of land use change on profile distributions of soil organic carbon fractions in the Yanqi Basin[J]. *Catena*, 2014, 115: 79–84.
- [25] Zhou P, Pan G X, Spaccini R, *et al.* Molecular change in particulate organic matter (POM) in a typical Chinese paddy soil under different long-term fertilizer treatments[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61: 231–242.
- [26] Mandal B, Majumber B, Adhya T K, *et al.* Potential of double-cropped rice ecology to conserve organic carbon under subtropical climate[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 2139–2151.
- [27] Holtkamp R, Kardol P, van der Wal A, *et al.* Soil food web structure during ecosystem development after land abandonment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39: 23–34.
- [28] 廖丹, 于东升, 赵永存, 等. 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 517–527.  
Liao D, Yu D S, Zhao Y C, *et al.* Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 517–527.
- [29] Qiu H S, Ge T D, Liu J Y, *et al.* Effects of biotic and abiotic factors on soil organic matter mineralization: Experiments and structural modeling analysis[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 84: 27–34.
- [30] Zhang Y L, Yao S H, Cao X Y, *et al.* Structural evidence for soil organic matter turnover following glucose addition and microbial controls over soil carbon change at different horizons of a Mollisol [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 119: 63–73.