

## 长期菌渣化肥配施对稻田土壤活性有机碳组分 和有效养分的影响

龚 臣, 王旭东, 倪 幸, 乐天天, 曾诗媛, 叶正钱

(浙江农林大学 环境与资源学院 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 设置 3 个菌渣(F)施用量(0, 50%, 100%)和 3 个化肥(C)施用量(0, 50%, 100%)共 9 个处理, 采用长期定位试验方法(2010–2016 年), 研究长期菌渣化肥配施对稻田土壤活性有机碳组分和土壤基本肥力要素变化的影响以及两者的相关性。结果表明: 相比单施化肥, 菌渣化肥配施显著提高土壤碳库管理指数(CPMI), 3 种土壤活性有机碳(LOC<sub>1</sub>, LOC<sub>2</sub>, LOC<sub>3</sub>, 指分别以 33, 167, 333 mmol·L<sup>-1</sup> 高锰酸钾氧化有机碳)及其有效度, 增幅分别为 45.09%, 41.77%~53.55%和 11.69%~33.55% ( $P<0.05$ ), 其中 C<sub>100</sub>F<sub>100</sub> 的提高效果最好, CPMI 值为 204.95, 3 种土壤活性有机碳质量分数分别为 1.73, 3.41 和 4.37 g·kg<sup>-1</sup>, 相应的有效度分别为 14.53%, 28.56%和 43.03%; 相比单施化肥, 菌渣化肥配施处理还显著提高了土壤全氮、碱解氮和有效磷, 增幅分别达 21.11%, 19.39%和 31.83%。3 种土壤活性有机碳都比土壤有机碳与土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾的相关性强, LOC<sub>1</sub> 和 LOC<sub>2</sub> 比 LOC<sub>3</sub> 在反映土壤肥力变化上更敏感( $P<0.01$ )。LOC<sub>1</sub> 的变化最为敏感, 可以用于反映土壤肥力的微小变化; 土壤活性有机碳组分主要决定于菌渣的施用, 而化肥则是主要养分提供者, 菌渣与化肥交互作用的结果影响土壤肥力的变化状况, 适宜的菌渣-化配合施用量有利于土壤培肥和保障水稻 *Oryza sativa* 产量, 以 C<sub>50</sub>F<sub>50</sub> 处理为最佳。图 3 表 5 参 25

**关键词:** 土壤肥科学; 菌渣还田; 活性有机碳组分; 土壤有效养分; 水稻产量

**中图分类号:** S158.3; S714.8      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2018)02-0252-09

## Effects of long-term application of edible fungus residue and chemical fertilizers on fractions of labile organic carbon and available nutrients in rice field soils

GONG Chen, WANG Xudong, NI Xing, LE Tiantian, ZENG Shiyuan, YE Zhengqian

(Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To understand how long-term application of edible fungus residue (F) and chemical fertilizers (C) affected soil fertility, nine treatments were established with combinations of three rates of F (0, 50%, and 100%) and three rates of C (0, 50%, and 100%). Each treatment received 3 replicates. The treatment plots were arranged as randomized blocks design, with plot size of 4 m × 5 m. Fractions of soil labile organic carbon (LOC<sub>1</sub>, LOC<sub>2</sub>, LOC<sub>3</sub>) and changes of basic soil fertility parameters were examined through a rice field experiment (2010–2016). Results showed that compared to a single C application, a combined application of F and C had significant ( $P<0.05$ ) effect on increasing of the soil carbon pool management index (CPMI), and content of three types of soil LOCs along with their availability (ALCs), rates increase for CPMI by 45.09%, LOCs by 41.77%–53.55%, and ALCs by 11.69%–33.55%. Of the nine treatments, C<sub>100</sub>F<sub>100</sub> was the most effective with a CPMI of 204.95; content of LOC<sub>1</sub> (oxidized by 33 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub>) of 1.73, LOC<sub>2</sub> (by 167 mmol·

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-04-25

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY16D010010); 国家自然科学基金资助项目(31601271)

作者简介: 龚臣, 从事植物营养与环境生态研究。E-mail: pingjingdixin12354@163.com。通信作者: 叶正钱, 教授, 博士, 从事土壤与植物营养环境生态等研究。E-mail: yezhq@zafu.edu.cn

$L^{-1} KMnO_4$ ) of 3.41, and  $LOC_3$  (by  $333 \text{ mmol} \cdot L^{-1} KMnO_4$ ) of  $4.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; and content of  $ALC_1$  of 14.53%,  $ALC_2$  of 28.56%, and  $ALC_3$  of 43.03%. All three LOCs had significant positive correlations with soil total nitrogen ( $r_1 = 0.758^{**}$ ,  $r_2 = 0.711^{**}$  and  $r_3 = 0.722^{**}$  for  $LOC_1$ ,  $LOC_2$  and  $LOC_3$  respectively), available nitrogen ( $r_1 = 0.940^{**}$ ,  $r_2 = 0.930^{**}$  and  $r_3 = 0.726^{**}$  for  $LOC_1$ ,  $LOC_2$  and  $LOC_3$  respectively), available phosphorus ( $r_1 = 0.781$ ,  $r_2 = 0.802$  and  $r_3 = 0.784$  for  $LOC_1$ ,  $LOC_2$  and  $LOC_3$  respectively), available potassium ( $r_1 = 0.674$ ,  $r_2 = 0.707$  and  $r_3 = 0.440$  for  $LOC_1$ ,  $LOC_2$  and  $LOC_3$  respectively), and soil organic carbon ( $r_1 = 0.827$ ,  $r_2 = 0.774$  and  $r_3 = 0.637$  for  $LOC_1$ ,  $LOC_2$  and  $LOC_3$  respectively). Therefore,  $LOC_1$  had most close correlations with SOC and soil fertility changes. Soil LOC was mainly determined by F application; whereas, C was the main nutrient supplier. Consequently, a proper combined application of F and C was favorable to improve soil fertility and rice yield with  $C_{50}F_{50}$  the best treatment in this study. [Ch, 3 fig. 5 tab. 25 ref.]

**Key words:** soil fertilizer science; fungus residue return; fractions of soil labile organic carbon; soil available nutrients; rice yield

2014 年, 中国国内食用菌产量为 2 134 万 t, 总产值达 800 多亿元。食用菌生产之后的副产物——菌渣的处理已经成为农业生产中的大问题, 菌渣还田是解决此问题的最佳办法之一<sup>[1]</sup>。土壤有机碳 (SOC) 是土壤的重要组成部分, 影响着土壤物理、化学和生物学性质。单纯用 SOC 总量不能评价土壤有机碳库的稳定性和很好地反映其当季土壤肥力的状况。活性有机碳 (labile organic carbon, LOC) 组分在土壤中易于转化, 不仅不能被微生物利用作为能源, 也是植物的养分库。LOC 与土壤物理结构和有效养分有着密切相关性, 可以敏感地指示土壤肥力的微小变化<sup>[2]</sup>, 所以运用 LOC 和 SOC 来共同评价有机碳库质量是较为科学的方法<sup>[3-4]</sup>。在对土壤活性有机碳研究中, LOGINOW 等<sup>[5]</sup>提出了用 3 种不同浓度的高锰酸钾 (33, 167, 333  $\text{mmol} \cdot L^{-1}$ ) 测定土壤 LOC 的方法, 获得了土壤有机碳的 4 个级别。BLAIR 等<sup>[6]</sup>提出用土壤碳库管理指数 (carbon pool management index, CPMI) 来评价土壤有机碳库的质量。CPMI 作为评价土壤有机碳总量和土壤有机碳活性的综合指标, 可以系统和敏感地监测土地管理对土壤有机碳质量的影响<sup>[7]</sup>。SOC 受植被类型、气候条件、土壤性质等自然因素以及耕作方式和施肥措施等人为活动因素影响<sup>[8]</sup>。过度依赖化肥来提高粮食产量会降低土壤 LOC 或者其占 SOC 的比例<sup>[9-10]</sup>, 也有研究证明均衡施用化肥可以显著提高 SOC 和 LOC<sup>[11]</sup>。在施用有机肥条件下, 不论单施有机肥还是有机无机化肥配合施用均可以增加 LOC<sup>[12-13]</sup>。菌渣作为一种优良的有机物料, 施入土壤中后会引起 LOC 怎样的变化及其与土壤肥力的关系值得关注。目前, 关于菌渣还田对土壤活性有机碳库影响的研究很少见, 对完整的一个耕作周期内土壤 LOC 动态变化的研究更是鲜见。为此, 作者利用 6 a 的菌渣还田定位试验地为研究对象, 测定了不同菌渣施用量下稻田土壤中的 3 种 LOC (能被 33, 167, 333  $\text{mmol} \cdot L^{-1}$  这 3 个不同浓度高锰酸钾氧化的有机碳) 和有效养分的变化, 旨在了解长期菌渣还田对稻田土壤 LOC 的组分和土壤有效养分的影响, 探讨 LOC 在一个完整的耕作周期内的变化规律以及与土壤有效养分的相关关系, 为合理利用菌渣和促进农业可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

于 2010 年 7 月, 在浙江省嘉兴市王店镇五浪园 ( $30^{\circ}37'00'' \sim 30^{\circ}40'00''N$ ,  $120^{\circ}39'00'' \sim 120^{\circ}44'00''E$ ) 大田进行研究。该地区平均海拔为 3.7 m, 属北亚热带季风气候, 年均气温为  $16.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年均日照时数为 2 000.0 h, 年均降水量为 1 170.0 mm, 全年无霜期为 225.0 d。试验地为单季稻 *Oryza sativa* 种植模式。

供试土壤基本理化性质: 有机碳 (SOC) 为  $11.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $134 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $209 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试菌渣为历年黑木耳 *Auricularia auricula-judae* 栽培结束后的废菌棒, 经堆置发酵后还田。菌渣平均干质量为  $470 \text{ g} \cdot \text{棒}^{-1}$ 。菌渣主要成分: 有机碳为  $451.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮为  $11.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碳氮比为 39.6, 全磷为  $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾为  $6.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

设 3 个菌渣还田水平, 3 个化肥施用水平, 双因素随机区组试验设计, 共 9 个处理。菌棒还田量分

别为 0, 22 500, 45 000 棒·hm<sup>-2</sup>(0, 10 575, 21 150 kg·hm<sup>-2</sup>), 相对用量记为 0%, 50%, 100%; 化肥常规施肥量为 0%, 50%, 100%。化肥常规施肥量 100%下的施肥方案如下: 基肥, 过磷酸钙(含五氧化二磷 12%)375 kg·hm<sup>-2</sup>, 碳酸氢铵 450 kg·hm<sup>-2</sup>; 追肥, ①分蘖初期(移栽后 3 周)施尿素 150 kg·hm<sup>-2</sup>, ②分蘖盛期施扬丰牌复合肥[m(N):m(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):m(K<sub>2</sub>O)=15:6:15]225 kg·hm<sup>-2</sup>, ③孕穗期(穗肥)施扬丰牌复合肥 300 kg·hm<sup>-2</sup>。各处理具体见表 1。试验设 3 次重复, 随机区组排列, 共 27 个小区, 面积为 20 m<sup>2</sup>·小区<sup>-1</sup>, 其他田间管理按照常规栽培技术要求进行。

表 1 大田试验处理

Table 1 Field experiment treatments

序号	处理	化肥(C)/%	菌渣(F)/%	序号	处理	化肥(C)/%	菌渣(F)/%
1	C <sub>0</sub> F <sub>0</sub>	0	0	6	C <sub>50</sub> F <sub>100</sub>	50	100
2	C <sub>0</sub> F <sub>50</sub>	0	50	7	C <sub>100</sub> F <sub>0</sub>	100	0
3	C <sub>0</sub> F <sub>100</sub>	0	100	8	C <sub>100</sub> F <sub>50</sub>	100	50
4	C <sub>50</sub> F <sub>0</sub>	50	0	9	C <sub>100</sub> F <sub>100</sub>	100	100
5	C <sub>50</sub> F <sub>50</sub>	50	50				

说明: 菌渣(F)施用量 0%为 0, 50%为 10 575 kg·hm<sup>-2</sup>, 100%为 21 150 kg·hm<sup>-2</sup>

### 1.3 研究方法

1.3.1 采样方法 分别于 2015 年 6 月的水稻移栽前、2015 年 12 月的收获期、2016 年 6 月的移栽前, 取 0~20 cm 表层土样。剔除石块和动植物残体等杂物, 风干, 磨细, 分别过 10 目和 100 目筛备用。

1.3.2 测定方法 土壤和菌渣的基本理化性质测定: 土壤 pH 值按 V(土):V(水)=1.0:2.5 酸度计法测定; 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用醋酸铵浸提-火焰分光光度计法测定。不同活性有机碳(LOC)按 LEFROY 等<sup>[12]</sup>提出的 LOC 测定方法, 得到的 3 种不同活性有机碳分别为 33 mmol·L<sup>-1</sup> 高锰酸钾氧化有机碳(表示为 LOC<sub>1</sub>), 167 mmol·L<sup>-1</sup> 高锰酸钾氧化有机碳(表示为 LOC<sub>2</sub>), 333 mmol·L<sup>-1</sup> 高锰酸钾氧化有机碳(表示为 LOC<sub>3</sub>)。

1.3.3 计算方法 土壤活性有机碳有效度(ALC)<sup>[15]</sup>=活性有机碳(LOC)/有机碳总量(TOC)×100%。碳库管理指数(CPMI)是表征土壤碳库变化的指标, 计算公式<sup>[7]</sup>: 碳库管理指数(CPMI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100。其中: 碳库指数(CPI)=样品总碳(g·kg<sup>-1</sup>)/参考土壤总碳(g·kg<sup>-1</sup>); 碳库活度指数(AI)=样品碳库活度(A)/参考土壤碳库活度; 碳库活度(A)=土壤活性有机碳(g·kg<sup>-1</sup>)/土壤非活性有机碳(g·kg<sup>-1</sup>)。总有机碳碳与活性有机碳的差值为非活性有机碳。文中设定原始农田为参考土壤, 碳库管理指数为 100。若采取施肥措施后碳库管理指数高于 100, 说明土壤碳库有所改善, 反之则说明土壤碳库变差。

1.3.4 分析方法 试验数据采用 WPS 表格和 SPSS 18.0 进行统计分析

## 2 结果与分析

### 2.1 长期菌渣还田对土壤活性有机碳库组分的影响

2.1.1 菌渣还田对土壤活性有机碳(LOC)年变化的影响 由图 1~3 可以看出: 不同处理的 3 种土壤 LOC 在 12 个月的耕作周期中(2015-06~2016-06)的变化趋势基本相同。一般来说, 收获后的土壤 LOC 高于移栽前的。在收获后至下一茬水稻移栽前, 大体上各处理土壤 LOC 有不同程度的下降。3 种土壤 LOC 差异大小为 LOC<sub>1</sub><LOC<sub>2</sub><LOC<sub>3</sub>, 各处理 LOC<sub>1</sub> 为 0.87~1.98 g·kg<sup>-1</sup>, LOC<sub>2</sub> 为 1.61~4.01 g·kg<sup>-1</sup>, 而 LOC<sub>3</sub> 为 1.74~5.54 g·kg<sup>-1</sup>。结果显示: 2015-06~2016-06 的水稻移栽前、收获期及下一茬水稻移栽前这 3 个时期中, 随着菌渣还田量增加土壤 LOC<sub>1</sub> 极显著提高(P<0.01)。化肥的施用对土壤 LOC 影响不显著(P>0.05), 不施用化肥处理(C<sub>0</sub>F<sub>0</sub>, C<sub>0</sub>F<sub>50</sub>, C<sub>0</sub>F<sub>100</sub>)和施用 100%化肥处理(C<sub>100</sub>F<sub>0</sub>, C<sub>100</sub>F<sub>50</sub>, C<sub>100</sub>F<sub>100</sub>)相差不大, 但均明显高于施用 50%化肥处理(C<sub>50</sub>F<sub>0</sub>, C<sub>50</sub>F<sub>50</sub>, C<sub>50</sub>F<sub>100</sub>), 平均是其 1.14 倍。同样, LOC<sub>2</sub>, LOC<sub>3</sub> 中不施肥和施用 100%化肥处理平均是施用 50%化肥处理的 1.12~1.22 倍。与对照(C<sub>0</sub>F<sub>0</sub>)相比, 含菌渣的所有处理(包括单施菌渣处理和菌渣化肥配施处理)均显著提高各 LOC 的质量分数, 其中 C<sub>0</sub>F<sub>100</sub> 对 LOC 的提高效果

最好,  $C_{100}F_{100}$  次之。相比原始土  $LOC_1$  ( $1.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 对照处理 ( $C_0F_0$ ) 和单施 50% 化肥处理 ( $C_{50}F_0$ ) 的质量分数分别降低了 0.18,  $0.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 单施 100% 化肥处理 ( $C_{100}F_0$ ) 与其基本持平。相比原始土  $LOC_2$  ( $1.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 对照处理 ( $C_0F_0$ ) 和单施 50% 化肥处理 ( $C_{50}F_0$ ) 基本没有差异, 而单施 100% 化肥处理 ( $C_{100}F_0$ ) 则明显升高, 增幅达  $0.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相比原始土的  $LOC_3$  ( $2.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 对照处理 ( $C_0F_0$ ) 和单施 50% 化肥处理 ( $C_{50}F_0$ ) 分别下降了 0.21 和  $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 单施 100% 化肥处理 ( $C_{100}F_0$ ) 基本持平。总之, 与原始土壤相比, 长期不施肥 ( $C_0F_0$ ) 或单施 50% 化肥 ( $C_{50}F_0$ ) 对土壤 3 种 LOC 均为降低趋势, 说明这 2 种施肥方式对土壤活性有机碳库的影响是不利的, 但常规施用化肥处理则影响不大, 菌渣和化肥配施处理则均可显著提高 3 种土壤不同 LOC 的质量分数, 对 LOC 提高的效果均为处理  $C_0F_{100}$  最好,  $C_{100}F_{100}$  次之。另外,  $LOC_1$  在收获期到下一个移栽前表现为明显下降,  $LOC_2$  和  $LOC_3$  则因处理不同变化不同, 但变化均不明显。

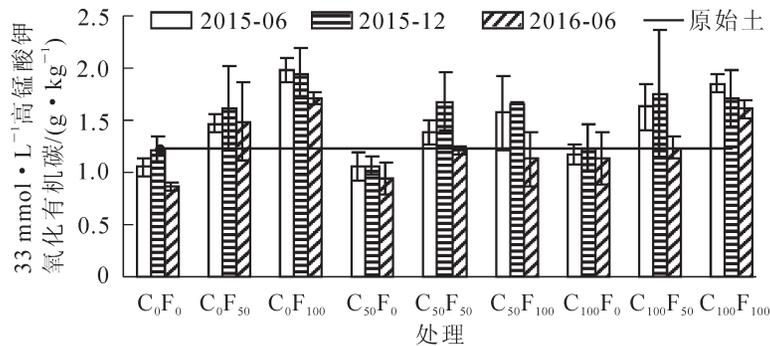


图 1 长期菌渣还田对土壤  $LOC_1$  的影响(2015-06-2016-06)

Figure 1 Effects of long-term fungus residue return on content of  $LOC_1$ (2015-06-2016-06)

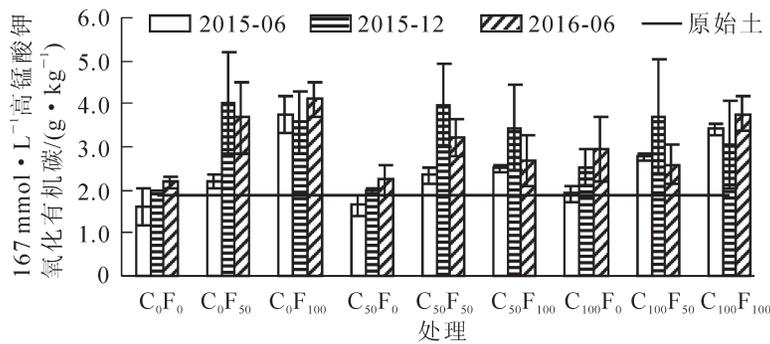


图 2 长期菌渣还田对土壤  $LOC_2$  的影响(2015-06-2016-06)

Figure 2 Effects of long-term fungus residue return on content of  $LOC_2$ (2015-06-2016-06)

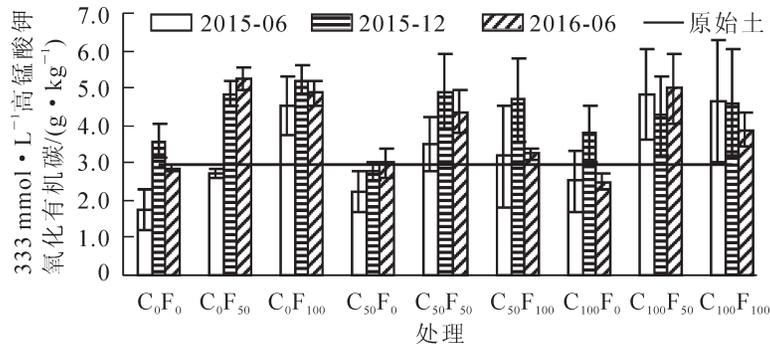


图 3 长期菌渣还田对  $LOC_3$  影响的变化(2015-06-2016-06)

Figure 3 Effects of long-term fungus residue return on content of  $LOC_3$ (2015-06-2016-06)

2.1.2 长期菌渣还田对 3 种 LOC 的有效度 (ALC) 及碳库管理指数 (CPMI) 的影响 由表 2 可知: 3 种 LOC 的有效度 (ALC) 和碳库管理指数 (CPMI) 仅受菌渣处理因子的显著影响; 化肥施用的影响较小, 没有达到

显著作用；菌渣与化肥配施的交互作用不明显。与对照处理( $C_0F_0$ )相比，单施 50%化肥处理( $C_{50}F_0$ )使 LOC 的 ALC 和 CPMI 略有降低，而单施 100%化肥处理( $C_{100}F_0$ )只对  $LOC_1$  的 ALC 略有下降外，其他各指标都略有提高。菌渣还田对 LOC 的 ALC 和 CPMI 的提高作用显著，但在相同化肥下，50%与 100%菌渣还田处理之间没有差异。在不同活性 LOC 中，高活性的 LOC( $LOC_1$ )的 ALC 受不同处理的影响变化大，表明高活性的  $LOC_1$  的 ALC 敏感性相比其他 2 个 LOC 更高，说明  $LOC_1$  是最容易变化的 LOC。相比用 LOC 的 ALC 来评价菌渣还田对土壤 LOC 的影响，CPMI 变化更明显，说明 CPMI 可以更敏感地评价土壤碳库的变化。总体来看，单施 100%菌渣处理( $C_0F_{100}$ )在  $LOC_1$  的 ALC 和 CPMI 上最高， $C_{100}F_{100}$  表现次之。

表 2 长期菌渣还田对 LOC 有效度和 CPMI 的影响(2015-12)

Table 2 Effects of long-term fungus residue return on availability of LOC and CPMI (2015-12)

处理	$LOC_1$ 有效度/%	$LOC_2$ 有效度/%	$LOC_3$ 碳有效度/%	碳库管理指数
$C_0F_0$	12.58 bcd	20.45 ab	36.80 ab	143.14 bc
$C_0F_{50}$	14.11 abc	30.05 a	42.95 a	212.90 ab
$C_0F_{100}$	14.87 a	28.40 a	41.68 a	231.03 a
$C_{50}F_0$	11.98 d	21.69 ab	31.19 bc	100.24 c
$C_{50}F_{50}$	13.04 abcd	29.70 a	38.08 ab	200.41 ab
$C_{50}F_{100}$	13.06 abcd	30.74 a	41.70 a	195.89 ab
$C_{100}F_0$	12.21 cd	24.93 ab	37.18 ab	150.43 abc
$C_{100}F_{50}$	14.13 abc	30.43 a	37.37 ab	160.60 abc
$C_{100}F_{100}$	14.53 ab	28.56 a	43.03 a	204.95 ab
原始土	11.10 d	17.02 b	26.42 c	100.00 c
F	**	*	*	**
C	ns	ns	ns	ns
F×C	ns	ns	ns	ns

说明：数字后不同字母代表差异显著( $P<0.05$ )；\* 表示差异显著( $P<0.05$ )，\*\* 表示差异极显著( $P<0.01$ )，ns 表示差异不显著

## 2.2 长期菌渣化肥配施对土壤肥力和水稻产量的影响

双因素方差分析结果显示：随着菌渣施用量增加，土壤有机碳、全氮、有效磷、碱解氮显著增加；随着化肥施用量的增加，土壤速效钾显著降低，有效磷显著增加，水稻产量(稻谷产量、秸秆产量和地上部生物量)极显著提高。可见，菌渣化肥对有效磷有显著的交互作用( $P<0.05$ ) (表 3)。

不同施肥处理对土壤肥力的影响差异显著，与对照处理( $C_0F_0$ )相比，单施化肥处理( $C_{50}F_0$ )在土壤有机碳、全氮和有效养分上均有不同程度的下降，但单施 100%化肥处理( $C_{100}F_0$ )略有增加，其中有效磷显著提高，单施化肥处理( $C_{50}F_0$  和  $C_{100}F_0$ )均显著降低了速效钾( $P<0.05$ )。单施菌渣处理有利于有机碳和全氮的积累，其中单施 100%菌渣( $C_0F_{100}$ )显著提高有效磷和碱解氮，但单施 50%菌渣处理( $C_0F_{50}$ )并没有提高。菌渣和化肥配施处理( $C_{50}F_{50}$ ,  $C_{50}F_{100}$ ,  $C_{100}F_{50}$ ,  $C_{100}F_{100}$ )除了速效钾呈下降趋势，其他土壤肥力指标均呈增加趋势，但其中  $C_{100}F_{50}$  和  $C_{100}F_{100}$  对有机碳提升的作用不大。相比单施 50%化肥( $C_{50}F_0$ )，菌渣与 50%化肥配施处理( $C_{50}F_{50}$  和  $C_{50}F_{100}$ )有助于 SOC 和全氮的积累以及有效磷和碱解氮的释放。但在施用 100%化肥的基础上，配施菌渣在土壤有机碳、全氮没有显著影响，但可以提高土壤有效养分(表 3)。

不同施肥处理之间的水稻产量差异显著( $P<0.05$ )。相比  $C_0F_0$ ，单施 100%菌渣处理( $C_0F_{100}$ )可以显著提高水稻产量(稻谷产量、秸秆产量和地上部生物量)，单施 50%菌渣处理( $C_0F_{50}$ )只显著提高了稻谷产量。虽然菌渣的施用可以显著提高水稻产量，但在与化肥的配施下，菌渣并没有起到明显作用，例如表 3 的  $C_{50}F_0$ ,  $C_{50}F_{50}$  和  $C_{50}F_{100}$  等 3 个处理之间的水稻产量几乎没有差异，施用 100%化肥的 3 个处理也是如此。相比菌渣对水稻产量的提高作用，化肥的影响更重要。

总体上，相比单施 100%化肥处理( $C_{100}F_0$ )，菌渣与化肥配施可以显著提高土壤碱解氮、有效磷质量分数，但却降低速效钾质量分数。 $C_{50}F_{100}$  和  $C_{50}F_{50}$  更有利于 SOC 的积累， $C_{100}F_{100}$  更有利于有效磷和碱解氮的提高。相比菌渣对水稻产量的影响，化肥的作用更加明显。

表 3 长期菌渣化肥配施对土壤肥力和水稻产量指标的影响(2015-12)

Table 3 Soil fertility and rice yield affected by long-term application of fungus residue and chemical fertilizers(2015-12)

处理	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	稻谷产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	秸秆产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	地上部生物量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
C <sub>0</sub> F <sub>0</sub>	9.71 ab	96.60 a	24.78 d	73.39 abc	0.96 cd	6 750.00 b	13 517.00 d	20 267.00 d
C <sub>0</sub> F <sub>50</sub>	11.47 ab	91.20 ab	23.27 d	70.94 bc	1.01 bcd	8 125.00 ab	15 744.00 cd	23 869.00 cd
C <sub>0</sub> F <sub>100</sub>	12.86 ab	90.63 abc	43.88 a	84.99 ab	1.18 abc	8 437.00 ab	17 664.00 bc	26 101.00 bc
C <sub>50</sub> F <sub>0</sub>	8.81 b	80.63 bc	23.07 d	63.58 c	0.89 d	9 125.00 a	19 408.00 ab	28 533.00 abc
C <sub>50</sub> F <sub>50</sub>	12.95 a	83.30 abc	31.97 bc	89.01 ab	1.09 abcd	9 333.00 a	19 788.00 ab	29 121.00 ab
C <sub>50</sub> F <sub>100</sub>	12.81 a	82.23 abc	37.58 b	80.08 abc	1.19 ab	8 875.00 a	18 578.00 abc	26 953.00 abc
C <sub>100</sub> F <sub>0</sub>	10.30 ab	75.67 c	31.97 bc	79.64 abc	1.11 abc	9 833.00 a	21 045.00 ab	30 878.00 ab
C <sub>100</sub> F <sub>50</sub>	10.09 ab	95.65 ab	30.27 c	89.00 ab	1.21 ab	9 500.00 a	21 308.00 ab	30 808.00 ab
C <sub>100</sub> F <sub>100</sub>	10.52 ab	82.53 abc	43.51 a	90.68 ab	1.29 a	9 625.00 a	21 817.00 a	31 442.00 a
F	*	ns	**	*	**	ns	ns	ns
C	ns	*	*	ns	*	**	**	**
F×C	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns

说明：数字后不同字母代表差异显著( $P<0.05$ )；\*表示差异显著( $P<0.05$ )，\*\*表示差异极显著( $P<0.01$ )，ns表示差异不显著

### 3 讨论

#### 3.1 长期菌渣还田对活性有机碳库组分的影响

许多研究表明：有机肥料施用到土壤中可以增加 LOC 质量分数、LOC 的有效度和 CPMI<sup>[13-15]</sup>。本研究中，菌渣还田同样可以起到提高 LOC 的作用，33 mmol·L<sup>-1</sup> 高锰酸钾氧化有机碳(LOC<sub>1</sub>)的有效度和 CPMI 随菌渣还田量的增加达极显著水平。这与吴建富等<sup>[13]</sup>利用稻草还田的研究结果一致，同时也验证了 CPMI 适合作为评价碳库变化指标的灵敏性<sup>[15]</sup>。

土壤 LOC 质量分数主要受土地利用方式和施肥措施的影响，不同的土地利用方式下的土壤 LOC 质量分数差别很大。张俊华等<sup>[16]</sup>对 7 种典型土地利用方式进行了研究，发现 LOC 为 1.00~7.00 g·kg<sup>-1</sup>，但这主要与土壤总有机碳有关<sup>[17]</sup>。本研究不同时期不同处理下的 LOC 为 1.74~5.54 g·kg<sup>-1</sup>，其中收获后的土壤 LOC 质量分数普遍高于移栽前的。这是由于在水稻种植期间，菌渣的施入为土壤微生物提供充足的碳源从而增加微生物的种类和数量<sup>[18]</sup>，另外，植物在生长过程中根系也在分泌一些可溶的低分子有机物质(氨基酸、糖类等)<sup>[19]</sup>，这也会增加土壤中活性有机碳的量。

本研究发现：相比原始土，不施肥处理(C<sub>0</sub>F<sub>0</sub>)和单施 50%化肥处理(C<sub>50</sub>F<sub>0</sub>)这 2 种施肥方式不利于 3 种不同 LOC 的提高，但单施 100%化肥处理(C<sub>100</sub>F<sub>0</sub>)则没有降低趋势。徐明岗等<sup>[10]</sup>的研究也表明，连续 10 a 化肥配施对潮土和灰漠土的这 3 个组分 LOC 的影响不明显。菌渣化肥配施可以显著提高 3 种 LOC 质量分数、有效度以及 CPMI，这与张璐等<sup>[9]</sup>的研究结果相似。

#### 3.2 长期菌渣化肥配施对土壤肥力和水稻产量的影响及其作用机制探讨

本研究表明：相比单施 100%化肥处理(C<sub>100</sub>F<sub>0</sub>)，菌渣化肥配施不仅可以显著提高土壤碱解氮和有效磷质量分数，还可以提高土壤 SOC 和总氮，这与其他有机无机化肥配施的研究结果相似<sup>[20-21]</sup>。化肥比菌渣对水稻产量(稻谷产量、秸秆产量和地上部生物量)的提高效果要高，这一点在其他研究上也已经得到证明<sup>[20,22]</sup>。高菊生等<sup>[20]</sup>研究表明：连续 29 a 单施化肥处理的水稻产量显著低于有机无机化学配施处理。但在本研究中菌渣和化肥配施没有显著高于单施化肥处理，这可能和背景土壤的肥力以及试验年限有关。随着化肥施用量增加速效钾显著降低，其原因可能是由于水稻生长量大、吸收带走的钾多，此时非交换性钾成为植物的主要钾源<sup>[23]</sup>。C<sub>50</sub>F<sub>50</sub> 和 C<sub>50</sub>F<sub>100</sub> 均有利 SOC 的积累，C<sub>100</sub>F<sub>100</sub> 则更有利于养分的释放，能够最大程度地提高土壤有效磷和碱解氮，这一结果与前人的研究成果<sup>[24-25]</sup>有异同之处。胡杨勇等<sup>[24]</sup>研究发现：C<sub>50</sub>F<sub>100</sub> 有利于 SOC 的积累，C<sub>100</sub>F<sub>50</sub> 最有利于养分的释放，前一结果在本研究结果也得到进一步验证，但后一结果却不尽相同，在随着试验时间年限的增加，菌渣作用年限的增加，C<sub>100</sub>F<sub>100</sub> 成为最有

利于养分的释放和供应的处理。温广蝉等<sup>[25]</sup>前期研究发现： $C_{100}F_{100}$  处理对 SOC 的积累作用最强，但随着菌渣还田年限的增加，反而是菌渣与 50% 化肥配施 ( $C_{50}F_{100}$  和  $C_{50}F_{50}$ ) 对 SOC 的提升作用最强，这说明长期菌渣还田减少化肥的施用有利于 SOC 的积累。侯红乾等<sup>[21]</sup>的研究结果也证实这一点。

根据表 4 可知：3 种不同 LOC 和 SOC 均与土壤碱解氮、有效磷和速效钾有显著正相关关系，其中 LOC 与土壤碱解氮、有效磷和速效钾的相关性达极显著水平，这验证了 LOC 和 SOC 是评价土壤肥力高低的指标<sup>[10]</sup>，LOC 可以更好地指示土壤养分的微小变化，其中  $LOC_1$  和  $LOC_2$  比  $LOC_3$  表现更敏感；3 种 LOC 的有效度 (ALC) 均与有效磷显著相关，其中  $LOC_1$  的 ALC 与全氮呈极显著正相关。而 3 种不同 LOC 与其各自的 ALC 都呈极显著正相关 (表 5)，也都与 CPMI 呈极显著正相关，同时 CPMI 与有效养分和全氮均显著相关，说明 CPMI 可以作为评价土壤肥力的一个间接指标。

表 4 土壤 LOC 与土壤肥力指标的相关性 (2015 年移栽前)

Table 4 Correlations between LOC and soil fertility index (preplanting, 2015)

指标	稻谷产量	秸秆产量	地上部生物量	$LOC_1$	$LOC_2$	$LOC_3$	有机碳	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
稻谷产量	1										
秸秆产量	0.851**	1									
地上部生物量	0.922**	0.986**	1								
$LOC_1$	0.223	0.266	0.259	1							
$LOC_2$	0.200	0.233	0.238	0.930**	1						
$LOC_3$	0.413	0.368	0.399	0.756**	0.839**	1					
有机碳	0.102	0.133	0.122	0.827**	0.774**	0.637**	1				
全氮	0.207	0.340	0.314	0.758**	0.711**	0.722**	0.560*	1			
碱解氮	0.204	0.211	0.216	0.940**	0.930**	0.726**	0.705**	0.773**	1		
有效磷	0.485*	0.589**	0.581**	0.781**	0.802**	0.784**	0.489*	0.769**	0.765**	1	
速效钾	-0.058	-0.051	-0.049	0.674**	0.707**	0.440*	0.515*	0.36	0.813**	0.447*	1

说明：\* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ )，\*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )

表 5 评价 LOC 的指标与土壤肥力的相关分析 (2015 年收获期)

Table 5 Correlation analysis on evaluation index of soil LOC and soil fertility (harvest, 2015)

指标	$LOC_1$ 有效度	$LOC_2$ 有效度	$LOC_3$ 有效度	碳库管理指数
$LOC_1$	0.532**	0.546*	0.374	0.679**
$LOC_2$	0.397	0.772**	0.508*	0.772**
$LOC_3$	0.410*	0.582**	0.674**	0.961**
$LOC_1$ 有效度	1			
$LOC_2$ 有效度	0.496*	1		
$LOC_3$ 有效度	0.515*	0.554**	1	
速效钾	0.088	0.127	0.263	0.472*
有效磷	0.449*	0.516*	0.491*	0.722**
碱解氮	0.246	0.465	0.157	0.509*
全氮	0.614**	0.382	0.362	0.533*

说明：\* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ )，\*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )

## 4 结论

相比单施化肥，长期菌渣化肥配施显著提高土壤碳库管理指数 (CMPI) 和 3 种活性有机碳 (LOC) 质量分数及其有效度 (ALC)，水稻收获期的 LOC 一般高于移栽前的， $C_{100}F_{100}$  最有利于提高 3 种 LOC 质量分数、ALC 和 CMPI。相比单施化肥，菌渣与化肥配施处理显著提高土壤全氮、碱解氮和有效磷。100% 化肥与菌渣配施 ( $C_{100}F_{50}$  和  $C_{100}F_{100}$ ) 比 50% 化肥与菌渣配施 ( $C_{50}F_{50}$  和  $C_{50}F_{100}$ ) 更有利于 SOC 的矿化以及养分的释放；在化肥施用条件下 (无论是 50% 还是 100% 化肥)，配施菌渣对水稻产量的作用较小。

3 种 LOC 比 SOC 对碱解氮、有效磷和速效钾的影响更显著，其中  $LOC_1$  和  $LOC_2$  比  $LOC_3$  在反映土壤肥力变化上更敏感；CPMI 与土壤有效养分、全氮有显著的正相关，可以较敏感地反映土壤肥力的变化。

## 5 参考文献

- [1] 张亭, 韩建东, 李瑾, 等. 食用菌菌渣综合利用与研究现状[J]. 山东农业科学, 2016, **48**(7): 146 – 150.  
ZHANG Ting, HAN Jiandong, LI Jin, *et al.* Comprehensive utilization and research status of edible fungi residues [J]. *Shandong Agric Sci*, 2016, **48**(7): 146 – 150.
- [2] HAYNES R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview [J]. *Adv Agron*, 2005, **85**(4): 221 – 268.
- [3] 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 Naijuan, HAN Xinzong, YANG Minfang, *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]. *J Plant Nutr Fert*, 2015, **21**(2): 371 – 377.
- [4] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(5): 915 – 921.  
MA Chao, ZHOU Jing, LIU Manqiang, *et al.* Effects of incorporation of pre-treated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in Shajiang black soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2013, **50**(5): 915 – 921.
- [5] LOGINOW W, WISNIEWSKI W, GONET S S, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. *Pol J Soil Sci*, 1987, **20**(1): 47 – 52.
- [6] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Austr J Agric Res*, 1995, **46**(7): 393 – 406.
- [7] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响[J]. 土壤学报, 2000, **37**(2): 166 – 173.  
SHEN Hong, CAO Zhihong, XU Zhihong, *et al.* Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils [J]. *Acta Pedol Sin*, 2000, **37**(2): 166 – 173.
- [8] 李甜甜, 季宏兵, 孙媛媛, 等. 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2007, **28**(1): 93 – 97.  
LI Tiantian, JI Hongbing, SUN Yuanyuan, *et al.* Advances in researches on soil organic carbon storages and affecting factors in China [J]. *J Capit Norm Univ Nat Sci Ed*, 2007, **28**(1): 93 – 97.
- [9] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学, 2009, **42**(5): 1646 – 1655.  
ZHANG Lu, ZHANG Wenju, XU Minggang, *et al.* Effects of long-term fertilization on change of labile organic carbon in three typical upland soils of China [J]. *Sci Agric Sin*, 2009, **42**(5): 1646 – 1655.
- [10] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(4): 459 – 465.  
XU Minggang, YU Rong, SUN Xiaofeng, *et al.* Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2006, **12**(4): 459 – 465.
- [11] 王雪芬, 胡锋, 彭新华, 等. 长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转速度的影响[J]. 土壤学报, 2012, **49**(5): 954 – 961.  
WANG Xuefen, HU Feng, PENG Xinhua, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic carbon pools and their turnovers in a red soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2012, **49**(5): 954 – 961.
- [12] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and  $^{13}\text{C}$  natural isotope abundance [J]. *Plant Soil*, 1993, **155/156**(1): 399 – 402.
- [13] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 等. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(6): 1572 – 1578.  
WU Jianfu, ZENG Yanhua, PAN Xiaohua, *et al.* Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(6): 1572 – 1578.
- [14] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(3): 522 – 528.

- LU Wentao, JIA Zhikuan, ZHANG Peng, *et al.* Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, **30**(3): 522 – 528.
- [15] 宇万太, 赵鑫, 马强, 等. 长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2008, **39**(3): 539 – 544.
- YU Wantai, ZHAO Xin, MA Qiang, *et al.* Effect of long-term fertilization on available carbon pool and carbon pool management index in an aquic brown soil [J]. *Chin J Soil Sci*, 2008, **39**(3): 539 – 544.
- [16] 张俊华, 李国栋, 王岩松, 等. 黑河中游典型土地利用方式下土壤有机碳与活性和非活性组分的关系[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(12): 3273 – 3280.
- ZHANG Junhua, LI Guodong, WANG Yansong, *et al.* Relationships of soil organic carbon with its active and non-active components under different land use types in the middle reaches of Heihe River, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(12): 3273 – 3280.
- [17] 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 Minfang, ZHU Liqun, HAN Xinzhong, *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]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(5): 1387 – 1393.
- [18] 孔维栋, 刘可星, 廖宗文, 等. 不同腐熟程度有机物料对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2005, **25**(9): 2291 – 2296.
- KONG Weidong, LIU Kexing, LIAO Zongwen, *et al.* Effects of organic matters on metabolic functional diversity of soil microbial community under pot incubation conditions [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(9): 2291 – 2296.
- [19] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(12): 3496 – 3504.
- LUO Yongqing, ZHAO Xueyong, LI Meixia. Ecological effect of plant root exudates and related affecting factors: a review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(12): 3496 – 3504.
- [20] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(2): 314 – 324.
- GAO Jusheng, HUANG Jing, DONG Chunhua, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(2): 314 – 324.
- [21] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(3): 516 – 523.
- HOU Hongqian, LIU Xiumei, LIU Guangrong, *et al.* Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China [J]. *Sci Agric Sin*, 2011, **44**(3): 516 – 523.
- [22] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(1): 51 – 56.
- LI Jumei, XU Minggang, QIN Daozhu, *et al.* Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2005, **11**(1): 51 – 56.
- [23] 张水清, 黄绍敏, 聂胜委, 等. 长期定位施肥对夏玉米钾素吸收及土壤钾素动态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(1): 56 – 63.
- ZHANG Shuiqing, HUANG Shaomin, NIE Shengwei, *et al.* Effects of long-term fertilization on potassium uptake of summer maize and potassium dynamics of fluvo-aquic soil [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2014, **20**(1): 56 – 63.
- [24] 胡杨勇, 马嘉伟, 叶正钱, 等. 稻耳轮作制度下连续菌渣还田对土壤肥力性状的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(6): 172 – 176.
- HU Yangyong, MA Jiawei, YE Zhengqian, *et al.* Effects of continuous application of edible fungus residue on soil fertility properties under rice-edible fungus rotation system [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27**(6): 172 – 176.
- [25] 温广蝉, 叶正钱, 王旭东, 等. 菌渣还田对稻田土壤养分动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(3): 82 – 86.
- WEN Guangchan, YE Zhengqian, WANG Xudong, *et al.* Effects of edible fungus residue on dynamic changes of soil nutrients in paddy field [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **26**(3): 82 – 86.