

# 定位施用菌渣对稻田土壤团聚体中碳氮含量的影响<sup>①</sup>

栗方亮<sup>1,2</sup>, 张青<sup>1</sup>, 王煌平<sup>1</sup>, 王利民<sup>1</sup>, 王秋营<sup>1,3</sup>, 罗涛<sup>1\*</sup>

(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

**摘要:** 研究定位施用菌渣对稻田土壤团聚体中碳、氮含量的影响, 对菌渣的合理利用和农业的可持续发展具有一定的意义, 同时可为揭示施用菌渣对稻田土壤肥力形成及演变的影响提供理论依据。本研究通过采集不同菌渣用量处理土壤, 分析了稻田施用菌渣下土壤总有机碳和全氮及各粒级团聚体中碳、氮含量的变化, 得出了各级团聚体对土壤有机碳和全氮的贡献率。结果表明: 施用菌渣各处理土壤总有机碳含量较对照提高 4.07% ~ 15.71% ( $P > 0.05$ ), 其中, 中量和高量菌渣处理土壤总有机碳含量分别为 13.27 g/kg 和 12.81 g/kg。施用菌渣各处理土壤全氮含量较对照提高 1.75% ~ 8.61% ( $P > 0.05$ ), 其中, 中量和高量菌渣处理土壤全氮含量分别为 1.47 g/kg 和 1.43 g/kg。总体而言, 各处理中  $> 1.0$  mm 的各级土壤团聚体中碳、氮含量显著高于其他粒径团聚体, 碳、氮主要分布在较大粒级团聚体上。不同处理各粒级团聚体分离的碳、氮回收率分别为 77.05% ~ 87.36%、77.66% ~ 89.68%, 说明获得的各粒级团聚体有机碳和全氮含量分布的结果是相对可靠的。由此, 菌渣的施用提高了稻田土壤水稳性大团聚体中碳、氮的含量, 其是改善土壤团粒结构, 提高稻田土壤生产力的有效措施。

**关键词:** 菌渣; 土壤团聚体; 稻田; 有机碳; 全氮

**中图分类号:** S158.2 **文献标识码:** A

我国是食用菌的主产国<sup>[1-2]</sup>, 福建省食用菌产量居全国前列<sup>[3-4]</sup>, 但每年产生的菌渣数量巨大。菌渣又被称作菌糠、食用菌废料等, 是栽培食用菌后的下脚料。菌渣常被当作垃圾处理, 不仅严重影响生态环境, 还浪费大量资源。资料表明, 菌渣含有丰富的纤维素、木质素、维生素、抗生素、矿质元素和其他生物活性物质<sup>[5-7]</sup>。因此菌渣还田等利用模式即为较好的农业生产循环措施。

土壤团聚体被认为是指示土壤结构稳定性的指标<sup>[8-9]</sup>, 是土壤结构的基本单元, 对土壤结构改善、植物生长以及土壤有机碳储备有着深远的影响<sup>[10-13]</sup>。土壤有机碳的固持和土壤团聚作用密切相关、不可分割<sup>[14-15]</sup>。土壤团聚作用对有机碳有物理保护<sup>[16-18]</sup>, 同时有机碳也能促进团聚体的形成与稳定<sup>[19-20]</sup>。团聚体形成和有机碳固持的相互作用对于促进土壤固碳具有重要意义<sup>[18, 21]</sup>。

目前, 国内外对土壤团聚体的形成、稳定性以及

与土壤有机碳和土壤肥力关系已经取得了一定的研究成果<sup>[15, 20, 22-23]</sup>。对土壤团聚体有机碳分布的研究主要集中在施肥处理后的土壤<sup>[9, 24-25]</sup>及不同土地利用方式土壤<sup>[26]</sup>等方面。一般研究发现, 长期定位施肥处理土壤有机碳氮主要分配在大团聚体上<sup>[9, 24-25]</sup>。而何淑勤和郑子成<sup>[26]</sup>指出, 林地和撂荒地土壤有机碳含量随粒径的减小而递增; 耕地在 0.25 ~ 0.5 mm 和  $< 0.25$  mm 团聚体中有机碳含量较高, 园地则以 0.25 ~ 0.5 mm 粒径团聚体中有机碳含量最高, 表明了土地利用方式的差异性。

有关菌渣方面也有部分研究。菌渣还田梨园后土壤孔隙度增加 4.2% ~ 11.5%, 土壤总有机碳含量提高 32.7% ~ 56.0%<sup>[2]</sup>。施用菌渣能显著增加香蕉的果穗重量、果指总重, 有效增加土壤有机质和碱解氮含量<sup>[27]</sup>。施用菌渣可有效增加水稻的分蘖数和有效穗数, 提高稻谷产量, 有效增加稻田土壤的碱解氮、速效钾、有机质含量和土壤脲酶、转化酶和脱氢酶活性<sup>[5, 28]</sup>。

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B15)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所)开放基金项目(Y412201437)和福建省属公益类基本科研专项(2015R1022-8)资助。

\* 通讯作者(luotaofjz@188.com)

作者简介: 栗方亮(1980—), 男, 山东高密人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业环境与土壤生态研究。E-mail: lifl007@qq.com

但对于不同用量菌渣连续多年还田处理下土壤团聚体有机碳、氮含量分布等,目前仍然研究得较少<sup>[29]</sup>。

笔者已报道了稻田施用菌渣处理土壤团聚体的组成<sup>[30]</sup>。本研究利用水稻田施用菌渣开展定位试验,进行水稻-稻草-食用菌(蘑菇)-菌渣-稻田的循环利用,并探索稻田连续施用菌渣对土壤和土壤团聚体内有机碳、氮含量的影响,以期科学施用菌渣提供理论依据,对土壤与农业的可持续发展具有一定的意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

菌渣连续施用定位观测站建立在福建省龙海市角美台商投资区龙江村(117°53'46"E, 24°34'16"N)。试验区于 2007 年开始每年种植双季稻,水稻品种为杂交水稻‘丰两优 1 号’。试验田设 6 个处理,3 个重复,共 18 个试验小区,每个小区面积为 22.8 m<sup>2</sup>,各小区用水泥埂隔开,灌排水功能良好,四周设计保护行。供试菌渣来自当地双胞胎蘑菇栽培户,其有机碳、全氮、全磷和全钾含量为 398.45、18.8、4.61 和 6.37 g/kg,碳氮比为 33.2。

### 1.2 试验设计与样品采集

试验田共设计 6 个处理。处理 :无肥组(CK);处理 :化肥组(CF),纯 N 施用量 180 kg/hm<sup>2</sup>,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 质量比为 12:4:9;处理 :低量菌渣(MR1),菌渣施用量为 4 788 kg/hm<sup>2</sup>,折合纯 N 90 kg/hm<sup>2</sup>(根据菌渣含氮量计算);处理 :中低量菌渣(MR2),菌渣施用量为 7 180.5 kg/hm<sup>2</sup>,折合纯 N 135 kg/hm<sup>2</sup>;处理 :中量菌渣(MR3),菌渣施用量为 9 574.5 kg/hm<sup>2</sup>,折合纯 N 180 kg/hm<sup>2</sup>;处理 :高量菌渣(MR4),菌渣施用量为 11 968.5 kg/hm<sup>2</sup>,折合纯 N 225 kg/hm<sup>2</sup>。处理的基肥、分蘖肥和穗肥的施用比例分别为 50%、30%和 20%;处理 ~ 的菌渣全部作基肥施用,追肥用化肥,比例同处理。

土壤采样时间为 2013 年晚稻收获后,采样深度 0~20 cm,每个小区依据“之”字形采集 5 个点混合成 1 个土样。采样时使土块不受挤压以保持原状结构,剥去土块外直接与土铲接触而变形的土壤后放入盒中,带回实验室,在硬纸板上摊开成均匀的薄层,将土壤沿自然断裂面掰成直径 1 cm 左右的小土块,在风干过程中去掉石砾和残根等。

### 1.3 测定项目与方法

用德码 zy200 型土壤水稳性团粒分析仪(上海德码信息技术有限公司生产)分离团聚体,具体操作为:

称取 100 g 风干土,将土样摊平放在最大孔径筛上(套筛孔径自上而下依次为 2.0、1.0、0.5、0.25 和 0.106 mm),沿桶壁缓慢加入去离子水没过土样,浸泡、润湿 5 min,竖直上下振荡 5 min,振幅 3.0 cm,40 次/min。分离出>2.0、1.0~2.0、0.5~1.0、0.25~0.5、0.106~0.25 和<0.106 mm 的土壤团聚体。收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒中,在 50 °C 下烘干称质量。

有机碳和全氮的测定:土壤原土及各级团聚体烘干称重后磨细过 100 目筛,进行土壤碳、氮含量的测定。有机碳用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub> 外加热法测定,全氮用凯氏法测定<sup>[31]</sup>。

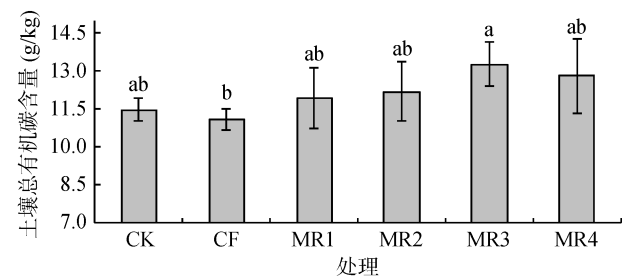
### 1.4 数据处理

采用 Excel 软件进行数据整理,采用 SPSS16.0 和 DPS(v3.01 专业版)软件相结合进行数据的统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌渣处理对稻田土壤有机碳含量的影响

2.1.1 土壤总有机碳 经过连续 7 年的菌渣施用下的双季稻栽培模式,不同菌渣用量处理下土壤总有机碳含量表现出一定的差异(图 1)。施用菌渣各处理(MR1~MR4)土壤总有机碳含量高于对照处理(CK)和化肥处理(CF),其中较 CK 高 4.07%~15.71%。中量(MR3)和高量菌渣处理(MR4)土壤总有机碳含量最高,分别为 13.27 g/kg 和 12.81 g/kg,其次为中低量(MR2)和低量菌渣(MR1)处理;对照和化肥处理土壤总有机碳含量最低,为 11.47 g/kg 和 11.09 g/kg。除 CF 处理和 MR3 处理土壤总有机碳含量差异显著( $P<0.05$ )外,其余处理之间差异均不显著( $P>0.05$ )



(柱图上方不同小写字母表示处理之间差异显著( $P<0.05$ ),下同)

图 1 菌渣处理对稻田土壤总有机碳含量的影响

Fig. 1 Effects of mushroom residues on soil organic carbon contents of paddy soil

2.1.2 各级团聚体中的有机碳 有机碳在不同粒级水稳性团聚体中的含量与分布情况见图 2。结果表明,本试验中>2、1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.106~0.25 及<0.106 mm 各级团聚体中有机碳的含量分别为 10.53~13.33、9.65~13.21、7.50~9.82、8.48~

10.41、8.83~10.63 和 8.58~10.53 g/kg。同一处理不同粒级水稳性团聚体中, >0.5 mm 的团聚体中有机碳含量的变化趋势为 >2 mm 以上>1~2 mm>0.5~1 mm; 而<0.5 mm 的土壤团聚体中有机碳含量的变化趋势为: 0.106 mm 以下>0.106~0.25 mm>0.25~0.5 mm。总体而言, >1.0 mm 的各级团聚体有机碳含量显著高于其他粒径团聚体, 表明有机碳主要分布在较大粒级团聚体中。

施用菌渣对不同粒级团聚体中有机碳含量的影响表现出一定差异, 1~2 mm 和>2 mm 粒径的土壤团聚体比不施用菌渣的团聚体有机碳含量高。所有处理中, 中量菌渣处理(MR3)各粒级团聚体的总量有机碳含量最高, 按粒级从大到小, 各级团聚体中有机碳含量比对照分别高 26.6%、25.9%、4.27%、11.9%、2.9% 和 21.1%。而高量菌渣各粒级团聚体的总量有机碳含量次之, 这与土壤有机碳总含量趋势一致。

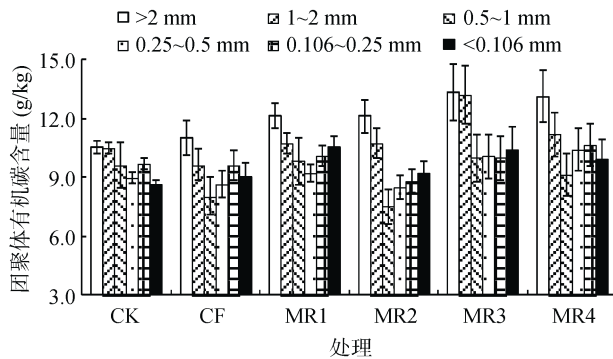


图 2 菌渣处理对稻田土壤各级团聚体有机碳含量的影响  
Fig. 2 Effects of mushroom residues on organic carbon contents of soil aggregates in paddy soil

## 2.2 菌渣处理对稻田土壤氮含量的影响

2.2.1 土壤全氮 不同菌渣用量处理下耕层土壤全氮含量同样表现出一定的差异, 但是趋势与土壤总有机碳稍有不同(图 3)。施用菌渣各处理(MR1~MR4)土壤全氮含量高于对照处理(CK)和化肥处理(CF), 施肥菌渣各处理全氮含量平均 1.29~1.47 g/kg, 较 CK

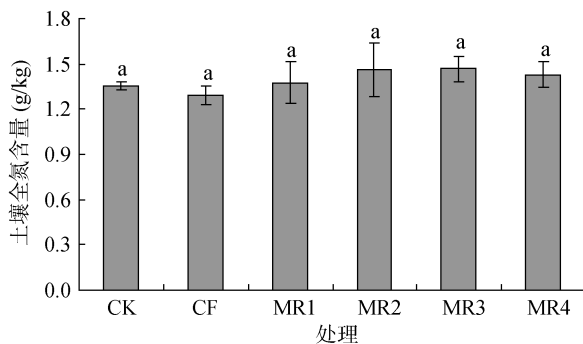


图 3 菌渣处理对稻田土壤全氮含量的影响  
Fig. 3 Effects of mushroom residues on soil total nitrogen contents of paddy soil

提高 1.75%~8.61%, 其中, MR3 和 MR4 处理土壤全氮含量分别为 1.47 g/kg 和 1.43 g/kg(图 3)。但总体上, 施用不同用量的菌渣并没有对土壤全氮造成显著的影响( $P>0.05$ )。

2.2.2 各级团聚体中的氮 土壤氮在不同粒级团聚体中的含量与分布情况见图 4。本试验中>2、1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.106~0.25 及<0.106 mm 各级团聚体中氮的含量分别为 1.28~1.58、0.76~1.21、1.04~1.19、0.92~1.23、1.05~1.35、1.10~1.22 g/kg。同一处理不同粒级水稳性团聚体中, >0.5 mm 的团聚体中氮含量的基本变化趋势为 >2 mm 以上>1~2 mm>0.5~1 mm; 而<0.5 mm 土壤团聚体中氮含量的变化趋势为 0.106 mm 以下>0.106~0.25 mm>0.25~0.5 mm。团聚体中氮含量的变化趋势基本和团聚体有机碳的变化趋势相同。总体而言, >1.0 mm 的各级团聚体中氮含量显著高于其他粒径团聚体, 表明氮主要分布在较大粒级团聚体上, 和有机碳趋势类似。

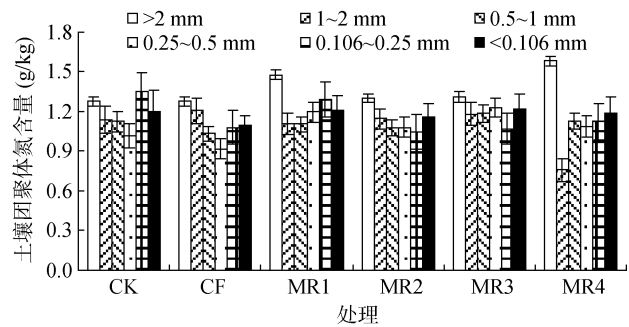


图 4 菌渣处理对稻田土壤团聚体中氮含量的影响  
Fig. 4 Effects of mushroom residues on nitrogen contents of soil aggregates in paddy soil

施用菌渣对不同粒级团聚体中氮含量的影响表现出一定差异, 各处理中, 中量菌渣处理(MR3)在 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的粒级团聚体中总量氮含量最高, 高量菌渣处理(MR4)在>2 mm 的粒级团聚体中的总量氮含量最高。施用菌渣处理>2 mm 粒级的土壤团聚体中氮含量均比不施用菌渣处理高。

## 2.3 各级团聚体对土壤总有机碳和全氮的贡献率

从试验结果看(表 1 和表 2), 不同处理各粒级团聚体分离的碳、氮回收率(指不同粒级土壤碳和氮量的总和相对于土壤总有机碳和全氮的百分数)分别为 77.05%~87.36%、77.66%~89.68%, 表明土壤有机碳和全氮在团聚体分离过程中未造成明显损失, 获得的各粒级团聚体有机碳和全氮含量分布的结果是相对可靠的<sup>[25]</sup>。

不同菌渣用量处理的土壤中>2、1~2、0.50~1.0、0.25~0.50、0.106~0.25 mm 及<0.106 mm 粒级团聚体中有机碳占土壤总有机碳的比例分别为

表 1 不同粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率(%)  
Table 1 Contribution rates of different size aggregates to soil organic carbon

处理	>2.0 mm	1.0 ~ 2.0mm	0.5 ~ 1.0 mm	0.25 ~ 0.50 mm	0.106 ~ 0.25 mm	<0.106 mm	总和
CK	15.30 ± 0.46 c	15.24 ± 0.66 b	13.94 ± 0.42 a	13.06 ± 0.39 ab	14.10 ± 0.82 a	12.46 ± 1.37 c	84.10 ± 2.52
CF	16.51 ± 1.50 ab	14.51 ± 2.44 c	12.07 ± 0.36 bc	13.03 ± 0.39 ab	14.49 ± 0.83 a	13.53 ± 0.61 b	84.15 ± 4.53
MR1	16.94 ± 0.31 a	15.00 ± 0.45 b	13.71 ± 0.91 a	12.89 ± 2.39 b	14.13 ± 3.42 a	14.70 ± 1.44 a	87.36 ± 2.62
MR2	16.39 ± 2.49 b	14.57 ± 0.44 c	10.17 ± 0.30 c	11.49 ± 1.34 c	11.97 ± 0.36 b	12.47 ± 1.37 c	77.05 ± 7.31
MR3	16.74 ± 0.50 ab	16.59 ± 0.40 a	12.57 ± 0.38 b	12.63 ± 0.98 b	12.55 ± 0.77 b	13.05 ± 0.39 bc	84.12 ± 5.52
MR4	17.04 ± 0.51 a	14.56 ± 0.74 c	11.90 ± 0.86 bc	13.54 ± 0.41 a	13.83 ± 0.91 ab	12.92 ± 0.39 bc	83.80 ± 7.51

注：同列小写字母不同表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )，下同。

表 2 不同粒级团聚体对土壤全氮的贡献率(%)  
Table 2 Contribution rates of different size aggregates to soil total nitrogen

处理	>2.0 mm	1.0 ~ 2.0mm	0.5 ~ 1.0 mm	0.25 ~ 0.50 mm	0.106 ~ 0.25 mm	<0.106 mm	总和
CK	15.70 ± 0.47 bc	14.06 ± 0.42 b	13.84 ± 0.42 a	12.56 ± 0.38 b	16.64 ± 0.50 a	14.82 ± 0.44 a	87.61 ± 2.63
CF	16.45 ± 0.49 b	15.54 ± 0.47 a	13.35 ± 0.40 a	11.84 ± 0.36 c	13.92 ± 0.42 b	14.15 ± 0.42 ab	85.25 ± 2.56
MR1	17.93 ± 0.54 a	13.47 ± 0.40 b	13.39 ± 0.40 a	14.54 ± 0.44 a	15.64 ± 0.47 ab	14.71 ± 0.44 a	89.68 ± 2.69
MR2	14.85 ± 0.45 c	13.06 ± 0.39 c	12.31 ± 0.37 b	12.31 ± 0.37 b	11.93 ± 0.36 c	13.18 ± 0.40 b	77.66 ± 2.32
MR3	14.86 ± 0.45 c	13.44 ± 0.40 b	13.49 ± 0.40 a	13.99 ± 0.42 ab	12.18 ± 0.37c	13.86 ± 0.42 ab	81.82 ± 2.45
MR4	18.47 ± 0.55 a	8.84 ± 0.26 d	13.20 ± 0.40 ab	12.65 ± 0.38 b	13.12 ± 0.39 bc	13.92 ± 0.42 ab	80.21 ± 2.41

15.30%~17.04%、14.51%~16.59%、10.17%~13.94%、11.49%~13.54%、11.97%~14.49%和12.46%~14.70%(表 1)，各粒级团聚体中氮占土壤全氮的比例分别为 14.85%~18.47%、8.84%~15.54%、12.31%~13.84%、11.84%~14.54%、11.93%~16.64%和13.18%~14.82%(表 2)。

施用菌渣在一定程度上影响了部分粒级团聚体对土壤有机碳和全氮的贡献率。施用菌渣各处理>2 mm 团聚体对土壤有机碳和全氮的贡献率最高。本研究中，土壤碳、氮大部分赋存于>0.25 mm 水稳性大团聚体中，大团聚体对土壤有机碳的贡献率为 52.62%~58.57%，对全氮的贡献率为 52.54%~59.33%。<0.25 mm 水稳性微团聚体对土壤有机碳的贡献率为 24.44%~28.83%，对全氮的贡献率为 25.11%~31.46%。

### 3 讨论

土壤有机碳能促进土壤团聚体的形成。一般长期试验研究证明<sup>[9,24-25]</sup>，长期施有机肥能显著提高土壤有机碳含量，且增加各团聚体有机碳的含量。刘恩科等<sup>[32]</sup>在褐潮土、黑垆土上研究得出，长期施用有机肥、秸秆还田可显著提高水稳性大团聚体的含量，并增加大团聚体中有机碳的含量和储量。本研究也显示，施肥菌渣各处理土壤有机碳含量比对照处理提高 4.07%~15.71%，说明施用菌渣在一定程度上增加了土壤有机碳含量。土壤有机碳的增加部分是由于菌渣的加入增加了有机残茬的输入量。有研究认

为有机肥中约有半数的碳在季节后保留在土壤中，施有机肥土壤有机质的积累主要来源于有机肥自身的施用，并不来源于植物生物量的变化<sup>[33-35]</sup>。许多研究指出有机肥加入和有机肥与无机肥合理配施是一种能够改善土壤养分、增加土壤有机碳水平的管理措施。

有研究揭示，对于 2:1 型黏土矿物为主的土壤，有机质是团聚体形成的主要黏结剂<sup>[16,18,21]</sup>，团聚体的粒级越大，结合的土壤有机碳浓度越大。氧化土和 1:1 型黏土矿物为主的土壤，其团聚体形成依赖于氧化物和高岭石晶片之间的相互静电作用<sup>[36]</sup>。红壤性水稻土以 1:1 型黏土矿物高岭石为主，在长期投入有机物质后，土壤结构可能已经转为以有机胶结剂为主或者是有机无机兼之的结构<sup>[37]</sup>。红壤的铁、铝氧化物等无机胶结剂也在起一定的作用，可能这些因素综合导致了红壤性水稻土团聚体的黏结。

土壤中稳定性大团聚体(>0.25 mm)的数量和稳定性是土壤结构的关键指标<sup>[21,38]</sup>。大量研究显示，施粪肥和秸秆能增加大团聚体含量，并提高团聚体的稳定性<sup>[39-41]</sup>。笔者已有的研究结果也类似<sup>[29-30]</sup>。大多数研究证明，长期定位施肥处理土壤有机碳氮主要分配在大团聚体上<sup>[9,24-25,42-45]</sup>。如李辉信等<sup>[9]</sup>发现同施肥处理同发生层不同粒径团聚体有机碳储量从高到低的顺序为：>3、1~3、0.25~1、0.05~0.25 和<0.05 mm。长期施肥处理下土壤>0.25 mm 大团聚体比<0.25 mm 微团聚体含有更多的碳和氮<sup>[25]</sup>。不同利用方式旱地红

壤中,有机碳、全氮主要分布在 $> 5$ 、 $5 \sim 2$ 和 $2 \sim 1$  mm的较大粒径水稳性团聚体中<sup>[42]</sup>。在本研究中,不同菌渣用量处理,其 $>1.0$  mm的各级团聚体有机碳含量显著高于其他粒径团聚体,有机碳主要分布在较大粒径团聚体上,与已有的研究结果也类似。所有处理中,中、高量菌渣处理各粒径团聚体的总有机碳含量比其他处理高,这与前面测得的土壤有机碳总含量一致。

土壤中有有机碳的保持主要取决于土壤全氮含量,土壤有机碳及全氮的消长趋势往往是一致的,同样土壤团聚体氮的变化趋势基本和团聚体有机碳的变化趋势相同<sup>[42,46-47]</sup>。本研究中,总体而言,施用菌渣各处理土壤全氮含量高于对照处理,但各处理之间差异不显著。 $>1.0$  mm的各级团聚体中氮含量显著高于其他粒径团聚体,表明氮主要分布在较大粒径团聚体上,和碳趋势类似。同样郭菊花等<sup>[24]</sup>揭示,土壤碳、氮主要分配在 $2 \sim 0.25$  mm的大团聚体上,其次是 $>2$  mm的大团聚体。施用菌渣后, $>2$  mm粒径的土壤比不施用菌渣的团聚体氮含量高。各处理中,中量菌渣处理(MR3)在 $0.5 \sim 1$  mm和 $0.25 \sim 0.5$  mm的粒级团聚体的总量氮含量最高,高量菌渣处理(MR4)在 $>2$  mm的粒级团聚体的总量氮含量最高。

本研究中,不同处理各粒级团聚体分离的碳、氮回收率分别为 $77.05\% \sim 87.36\%$ 、 $77.66\% \sim 89.68\%$ ,这表明土壤有机碳和全氮在团聚体分离过程中未造成明显损失。施用菌渣在一定程度上影响了部分粒级团聚体对土壤有机碳和全氮的贡献率。施用菌渣各处理 $>2$  mm粒级团聚体对土壤有机碳和全氮的贡献率最高,其次为 $1 \sim 2$  mm粒级团聚体,与前人研究结果类似<sup>[9,24-25]</sup>。试验说明土壤有机碳和全氮主要分配在大团聚体上,而其他粒级团聚体的碳、氮量的贡献率大体相当。主要原因可能是植物残体和有机肥的施入,能为微生物维系生命活动提供充足能量,从而促进土壤表层的生物活性,包括真菌生长、根和土壤动物区系,有助于大团聚体内部结合形成微粒有机质<sup>[32,48]</sup>。因此,有机物的施入可增加土壤的团聚化作用,并在一定程度上抵消耕作对土壤团聚化的破坏<sup>[49]</sup>,从而对土壤碳产生物理保护作用,并可能有助于土壤有机碳的固定。而李婕等<sup>[48]</sup>研究却发现壤土 $0 \sim 10$  cm土壤长期施用有机物较单施化肥和不施肥显著提高了有机碳含量以及所有大小团聚体有机碳的含量,特别是显著增加了 $< 2$  mm干筛团聚体有机碳含量,说明对于干筛团聚体,有机碳主要储存在小团聚体中。与本研究结果及其他人采用的湿筛法的研究结果不同,可能是由于所采用的团聚体分级方

法不同,或者也可能因为是土壤进行耕作种植后更易使大干筛团聚体破裂。

关于有机肥施用后土壤团聚体组分中养分富集的研究存在着许多不同<sup>[50]</sup>,可能是由于每项研究中团聚体组分分离的方法、土壤类型、农田措施和有机肥来源之间存在着差异,导致了研究结果的不同。

## 4 结论

经过连续 7 年的菌渣施用下的双季稻栽培模式,不同菌渣用量处理下土壤有机碳和全氮含量表现出一定的差异。施用菌渣各处理土壤有机碳含量较对照提高 $4.07\% \sim 15.71\%$ ( $P>0.05$ ),中量和高量菌渣处理土壤有机碳含量分别为 $13.27$  g/kg和 $12.81$  g/kg。施用菌渣各处理土壤全氮含量较对照提高 $1.75\% \sim 8.61\%$ ( $P>0.05$ ),中量和高量菌渣处理土壤全氮含量分别为 $1.47$  g/kg和 $1.43$  g/kg。总体而言, $>1.0$  mm的各级团聚体中碳、氮含量显著高于其他粒径团聚体,碳、氮主要分布在较大粒径团聚体上。不同处理各粒级团聚体分离的碳、氮回收率分别为 $77.05\% \sim 87.36\%$ 、 $77.66\% \sim 89.68\%$ ,本研究获得的各粒级团聚体有机碳和全氮含量分布的结果是相对可靠的。总之,菌渣的施用提高了稻田土壤水稳性大团聚体中碳、氮的含量,其是改善土壤团粒结构,提高稻田土壤生产力的有效措施。

## 参考文献:

- [1] 黄秀声,翁伯琦,黄勤楼,等. 食用菌菌渣循环利用对农田生态环境的影响与评价指标[J]. 现代农业科技, 2010, 22: 268-271
- [2] 冯德庆,黄勤楼,黄秀声,等. 菌渣对水稻生长性状、产量及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1): 74-77
- [3] 翁伯琦,雷锦桂,江枝和,等. 东南地区农田秸秆菌业循环利用技术体系构建与应用前景[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2): 228-232
- [4] 翁伯琦,廖建华,罗涛,等. 发展农田秸秆菌业的技术集成与资源循环利用管理对策[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 1007-1011
- [5] 李学梅. 食用菌菌渣的开发利用[J]. 河南农业科学, 2003(5): 40-42
- [6] 陈世昌,常介田,吴文祥,等. 菌渣还田对梨园土壤性状及梨果品质的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(5): 821-827
- [7] 马嘉伟,黄其颖,程礼泽,等. 菌渣化肥配施对红壤养分动态变化及水稻生长的影响[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(1): 147-151
- [8] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85
- [9] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422-429

- [10] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivation and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377
- [11] Xu Q F, Xu J M. Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest[J]. *Pedosphere*, 2003, 13(3): 271–278
- [12] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregation and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1350–1358
- [13] Rattan L. Physical management of soils of tropics: priorities for the 21st century[J]. *Soil Science*, 2000, 165(3): 191–207
- [14] Carter M R, Angers D A, Gregorich E G, et al. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2003, 83(1): 11–23
- [15] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 447–455
- [16] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter. I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681–689
- [17] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176
- [18] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481–504
- [19] Angers D A. Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(1/2): 91–96
- [20] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31
- [21] 邱佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1129–1138
- [22] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618–623
- [23] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981–1987
- [24] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(5): 787–793
- [25] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 950–960
- [26] 何淑勤, 郑子成. 不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化[J]. *水土保持通报*, 2010, 3(1): 7–10
- [27] 刘志平, 黄勤楼, 冯德庆, 等. 蘑菇渣对香蕉生长和土壤肥力的影响[J]. *江西农业学报*, 2011, 23(7): 102–104
- [28] 申进文, 沈阿林, 张玉亭, 等. 平菇栽培废料等有机肥对土壤活性有机质和土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 631–636
- [29] 栗方亮, 王煌平, 张青, 等. 菌渣对土壤性状和作物的影响及其再利用研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(3): 100–106
- [30] 栗方亮, 王煌平, 张青, 等. 稻田施用菌渣土壤团聚体的组成及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(3): 340–345
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 106–110
- [32] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035–1041
- [33] 冷延慧. 长期施肥对棕壤、黑土团聚体组成及其稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008
- [34] Rochette P, Flanagan L B, Gregorich E G. Separating soil respiration into plant and soil components using analyses of the natural abundance of carbon-13[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1207–1213
- [35] Gregorich E G, Ellert B H, Monreal C M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural  $^{13}\text{C}$  abundance[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(2): 161–167
- [36] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29(6): 815–828
- [37] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124(4): 17–23
- [38] 张磊, 王嘉学, 代云川, 等. 滇东喀斯特地区红裸土表层团聚体稳定性及其影响因素研究[J]. *土壤*, 2015, 47(4): 790–796
- [39] Yang C, Yang L, Ouyang Z. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 133–142
- [40] Aoyama M, Angers D A, N' Dayegamiye A. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79(2): 295–302
- [41] Rasool R, Kukal S S, Hira G S. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 31–36
- [42] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 255–262

- [43] 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
- [44] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 827–838
- [45] 汪超, 李福春, 阚尚, 等. 黑垆土有机碳在团聚体中的分配及其保护机制[J]. 土壤, 2015, 47(1): 49–54
- [46] Sainju U. M, Terrill T H, Gelaye S, et al. Soil aggregation and carbon and nitrogen pools under rhizoma peanut and perennial weeds[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1): 146–155
- [47] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 27–30
- [48] 李婕, 黎青慧, 李平儒, 等. 长期有机肥施用、秸秆还田对壤土团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1456–1460
- [49] 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
- [50] 候晓静, 杨劲松, 赵曼, 等. 耕作方式对滨海盐渍土有机碳含量及团聚体特性的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 781–789

## Effects of Positioning Application of Mushroom Residues on Carbon and Nitrogen Contents in Soil Aggregates of Paddy Field

LI Fangliang<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup>, WANG Huangping<sup>1</sup>, WANG Limin<sup>1</sup>, WANG Qiuying<sup>1,3</sup>, LUO Tao<sup>1\*</sup>

(1 Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 College of Resource and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Studying the effects of the positioning application of mushroom residues on carbon and nitrogen in soil aggregates of paddy field is significant for the reasonable utilization of the mushroom residues and the sustainable development of agriculture, and it can provide theoretical bases for revealing the influence mechanism of the application of mushroom residues on the formation and evolution of soil fertility in paddy field. The soil organic carbon and total nitrogen of soil and soil aggregates at different sizes were studied by collecting soils with different dosage mushroom residues, and the contribution rates of soil aggregates to soil organic carbon and total nitrogen were analyzed. The results showed that the content of soil organic carbon was 4.07%–15.71% higher than that of the control respectively. The contents of soil organic carbon in the treatments with medium and high mushroom residues were 13.27 g/kg and 12.81 g/kg, respectively. The soil total nitrogen content with mushroom residues was 1.75%–8.61% higher than that of the control ( $P>0.05$ ), and the content of soil total nitrogen with medium and high mushroom residues were 1.47 g/kg and 1.43 g/kg, respectively. In general, the carbon and nitrogen contents of >1 mm soil aggregates were significantly higher than those of other size aggregates. It showed that carbon and nitrogen were mainly distributed in the larger size aggregates. The recovery rates of organic carbon and total nitrogen in different size aggregates were 77.05%–87.36% and 77.66%–89.68%, respectively. The results were reliable and could indicate that mushroom residue could increase the contents of organic carbon and nitrogen of water stable aggregates, could improve soil aggregate structure, and thus was an effective measure to improve the productivity of paddy soil.

**Key words:** Mushroom residue; Soil aggregate; Paddy field; Organic carbon; Total nitrogen