

# 木本泥炭对红黄壤性水田土壤有机质提升和细菌群落组成的影响<sup>①</sup>

陈美淇<sup>1,2</sup>, 马 垒<sup>1,2</sup>, 赵炳梓<sup>1</sup>, 范树印<sup>3</sup>, 谭 钧<sup>4\*</sup>, 鞠振山<sup>3</sup>, 朱锦尉<sup>5</sup>, 徐国华<sup>6</sup>,  
王淑媛<sup>1</sup>, 徐基胜<sup>1</sup>, 张佳宝<sup>1\*</sup>

(1 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; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 国土资源部土地整治中心, 北京 100035; 4 北京中向利丰科技有限公司, 北京 100004; 5 浙江省土地整理中心, 杭州 310007; 6 杭州市桐庐县国土资源局, 杭州 311500)

**摘要:** 通过工程措施开发新垦耕地是增加耕地面积的重要方法, 这些新垦耕地的主要问题为土壤有机质(SOM)低下, 而农田 SOM 培育是一个漫长的过程。本研究以新垦红黄壤性水田为研究对象, 通过施用腐熟秸秆及与土壤腐殖质结构类似的木本泥炭, 明确其快速提升 SOM 效应。此外, 为了促进秸秆养分的快速转化, 本研究进一步比较分析了 3 种商用激发剂的激发秸秆分解潜力, 并采用 16s 高通量测序技术阐明其微生物机制。试验包含 6 个处理: 对照(CK)、施用腐熟秸秆(S)、施用腐熟秸秆+木本泥炭(SP)、以及在 SP 基础上添加激发剂 I、II、III(SPJ1、SPJ2、SPJ3)。结果表明, SP、SPJ1、SPJ2、SPJ3 中的土壤有机质(SOM)、易氧化碳(EOC)、可溶性有机碳(DOC)分别比 S 或 CK 处理高 12.1%~20.6%、29.9%~48.9%、50.8%~75.5%, 微生物生物量碳(MBC)则为它们的 10.5 倍~16.1 倍, 导致 MBC/MBN 增加了 5.1 倍~12.4 倍; 土壤有效磷(Avap)和团聚度在 SPJ1、SPJ2、SPJ3 间类似, 并比 SP、S、CK 处理显著提高 44.7%~63.6%、26.4%~43.6%, 表明木本泥炭以及本试验所选择的 3 种激发剂均能显著改善土壤理化性状。细菌多样性和系统发育多样性指数在激发剂施用土壤中均处于较高水平, 并分别与 DOC 和 EOC 显著正相关。PcoA 与 Anosim 分析发现 3 种激发剂施用土壤的细菌群落结构类似并与其他处理差异显著, 该差异主要与 Avap、DOC、EOC、MBN 有关。上述结果表明, 通过在新垦水田土壤上施用腐熟秸秆和木本泥炭, 可快速提升 SOM 含量, 而在此基础上添加商用激发剂具有激发养分转化功能的微生物的潜力, 从而改善土壤理化性质和提升作物产量, 并且本研究选择的 3 种激发剂均有类似效应。

**关键词:** 秸秆还田; 木本泥炭; 激发剂; 有机质; 细菌群落

中图分类号: S154.36 文献标志码: A

## Effects of Woody Peat on Quick Improvement of Soil Organic Matter and Bacterial Community Composition in Newly Reclaimed Red-yellow Paddy Soils

CHEN Meiqi<sup>1,2</sup>, MA Lei<sup>1,2</sup>, ZHAO Bingzhi<sup>1</sup>, FAN Shuyin<sup>3</sup>, TAN Jun<sup>4\*</sup>, JU Zhenshan<sup>3</sup>, ZHU Jinwei<sup>5</sup>, XU Guohua<sup>6</sup>, WANG Shuyuan<sup>1</sup>, XU Jisheng<sup>1</sup>, ZHANG Jiabao<sup>1\*</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 China Land Consolidation and Rehabilitation Center, Beijing 100035, China; 4 View Sino International Limited Company, Beijing 100004, China; 5 Zhejiang Land Consolidation and Rehabilitation Center, Hangzhou 310007, China; 6 Land and Resources Bureau of Tonglu County, Hangzhou 311500, China)

**Abstract:** Reclaiming new arable land through engineering measures is an important way to increase cultivated land area in China. However, the main problem of these new arable lands is the low content of soil organic matter, and the cultivation of farmland SOM is a time-consuming process. In this study, The effects of applying decomposed straw and woody peat which has the similar structure in soil humic substances on improving SOM contents of newly-reclaimed arable red-yellow paddy soils was investigated. In addition, three commercial activators were used to promote the rapid transformation of straw nutrient, and field

①基金项目: 国土资源部土地整治中心项目、中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-108)和北京中向科技有限公司资助。

\* 通讯作者(tanjun1968@126.com; jbzheng@issas.ac.cn)

作者简介: 陈美淇(1992—), 女, 四川达州人, 博士研究生, 主要从事农田土壤肥力提升研究。E-mail: mqchen@issas.ac.cn

experiments were conducted to compare the effects of straw, woody peat and activators application on the yields and soil properties of yellow paddy soils, and meanwhile Pyrosequencing-based analysis of the V4-V5 16S rRNA was used to elucidate its microbial mechanism. The field experiments included six treatments: soil without straw or peat (CK), soil + straw (S), soil + straw + peat (SP), soil + straw + peat + activator I (SPJ1), soil + straw + peat + activator II (SPJ2), soil + straw + peat + activator III (SPJ3). The results showed that SP, SPJ1, SPJ2 and SPJ3 treatments had the highest SOM, EOC, DOC, MBC and MBC/MBN. The contents of SOM, EOC and DOC of SP, SPJ1, SPJ2 and SPJ3 treatments were 12.1%–20.6%, 29.9%–48.9%, and 50.8%–75.5% higher than those of S or CK treatment, respectively, while those of MBC and MBC/MBN were 10.5–13.5 and 5.1–12.4 times of those of S or CK treatment, respectively. The content of AvaP and aggregation degree were similar between SPJ1, SPJ2 and SPJ3, and were significantly higher than those of other treatments, increased by 44.7%–63.6% and 26.4%–43.6% respectively compared with S treatment. It showed that peat and all three activators in this research could significantly improve soil physical and chemical properties. The dominant bacteria in paddy soil were Proteobacteria, Acidobacteria and Chloroflexi. Bacterial diversity and phylogenetic diversity index were higher in all stimulator-applied soils and were significantly positively correlated with DOC and EOC, respectively. The bacteria community composition in the soils treated with all three activators were similar and had markedly differences with other treatments. And the differences were mainly related to AvaP, DOC, EOC and MBN. The results above indicated that the addition of activators to paddy soils with straw returning has the potential to stimulate soil microorganisms with nutrient conversion functions, thereby, can improve soil fertility and increasing crop yields, and all three activators selected in this study have similar effects.

**Key words:** Straw returning; Woody peat; Activator; Soil organic matter; Soil bacterial community

土壤有机质(SOM)是土壤肥力的重要指标,也是土壤质量组成成分<sup>[1]</sup>。田间长期试验结果表明, SOM 含量与作物产量显著正相关, 也与土壤生化性质显著正相关<sup>[2]</sup>。SOM 主要指土壤腐殖质, 包括非腐殖物质和腐殖物质。非腐殖物质是与有机残体组分类似的普通有机化合物, 占 SOM 的 20% ~ 30%, 腐殖物质主要指经微生物作用合成的高分子化合物, 占 SOM 的 70% 左右<sup>[3]</sup>。腐殖物质是土壤中不易为微生物利用、最为稳定的有机质部分。因此在土壤中人为添加与腐殖质类似物质, 可能短期能快速提高 SOM 含量。木本泥炭是木本植物残体在沼泽环境中转换、积累形成的有机资源, 含碳量高, 纤维素含量低, 是一种重要的腐殖酸资源<sup>[4]</sup>, 但其施入土壤后对作物产量和理化性质的影响尚不清楚。

秸秆还田是提高 SOM、改善土壤肥力的重要措施之一<sup>[5]</sup>, 然而秸秆还田也可能引起当季作物减产以及土壤养分提升缓慢等负激发效应<sup>[6]</sup>, 主要由于秸秆分解缓慢, 养分不能为当季作物利用, 分解过程中土壤微生物与作物争夺养分所致<sup>[7-8]</sup>; 此外, 秸秆还田引发病虫害的几率也可能增高<sup>[9]</sup>。因此, 如何通过各种方法加速秸秆分解成为热点问题。室内研究表明, 添加菌剂能有效促进秸秆分解, 提高土壤速效养分含量以及酶活性<sup>[10-11]</sup>; 也有田间试验发现, 秸秆还田后接种菌剂能降低秸秆残渣中 C/N, 有效加快秸

秆分解<sup>[12]</sup>, 赵伟等<sup>[13]</sup>在东北黑土区田间试验表明添加菌剂能显著增加土壤有机质、微生物生物量碳氮含量。但也有研究与上述结论相反, 吴琴燕等<sup>[14]</sup>发现添加 3 种菌剂并不能促进秸秆分解, 秸秆分解主要依赖自身含有的微生物。同时, 现有菌剂制品在田间实际应用效果并不稳定, 刘海静等<sup>[15]</sup>发现, 菌剂对木质素降解能力有限, 并且在不同栽培模式下, 菌剂作用也有显著差异。这就需要从另一个角度寻求秸秆快速分解技术。外源有机碳有刺激微生物繁殖、提高微生物活性的潜力<sup>[16]</sup>, 从而可能激发秸秆的分解<sup>[17]</sup>, 但激发效应如何(正或负), 与添加的碳类型相关。已有研究发现, 碳类型是影响微生物群落结构改变的主要因素<sup>[18]</sup>, 这可能与土壤微生物与不同类型外源碳之间耦合关系不同有关<sup>[19]</sup>。

浙北地区为典型红黄壤性土壤, 当地主要种植系统为每年单季水稻。丘陵山区具有大量的未开发土地, 如何快速提升基于丘陵山区土壤的新垦耕地的 SOM 含量是评估其是否具有开发潜力的必要条件之一。本研究拟以新垦红黄壤性水田土壤为研究对象, 选择 3 种不同碳源的商用激发剂, 通过田间试验比较研究不同激发剂对腐熟秸秆和木本泥炭联合施用的水稻土上的产量和土壤性质的影响, 同时基于高通量测序技术明确不同激发剂对土壤细菌群落结构的影响, 并评估其潜在的秸秆激发能力, 为激发剂推广应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 田间试验

田间试验开始于2016年,位于浙江省桐庐县钟山乡陇西村( $119^{\circ}21'56.7''E$ ,  $29^{\circ}49'19.5''N$ )。该地区属亚热带季风气候区,年均温 $16.5^{\circ}C$ ,年降雨量1443.1 mm,无霜期252 d<sup>[20]</sup>。当地典型种植模式为单季水稻,6月上旬插秧至9月底收获。水稻土发育于红黄壤,试验前土壤pH为6.15,有机质含量10.4 g/kg,全氮28.4 mg/kg,全钾50.4 mg/kg,全磷358.1 mg/kg,土壤砂粒含量680.5 g/kg,粉粒248.9 g/kg,黏粒70.6 g/kg。

试验共设6个处理,3次重复,共18个小区:  
①不添加任何材料对照(CK);②施用腐熟秸秆(S);  
③施用腐熟秸秆+木本泥炭(SP);④施用腐熟秸秆+木本泥炭+商用激发剂-I(SPJ1);⑤施用腐熟秸秆+木本泥炭+商用激发剂-II(SPJ2);⑥施用腐熟秸秆+木本泥炭+商用激发剂-III(SPJ3)。腐熟秸秆、木本泥炭、激发剂仅2016年插秧前施用一次,2017年开始仅常规秸秆还田。小区面积为0.062 hm<sup>2</sup>,长41.5 m,宽15 m,所有处理随机排列。腐熟秸秆还田量为2998.5 kg/hm<sup>2</sup>,购自江阴市联业生物科技有限公司;木本泥炭与激发剂均购自北京利丰高科科技有限公司,木本泥炭施用量为30.0 t/hm<sup>2</sup>,激发剂施用量1499.3 kg/hm<sup>2</sup>。

供试作物为水稻,品种为Y两优900。水稻种植前,施用碳铵449.8 kg/hm<sup>2</sup>,之后将土壤打糊,静止过夜后进行插秧,以30 cm(行距)×20 cm(株距)插秧,保证小区种植密度一致。在水稻种植7 d后,将尿素(224.9 kg/hm<sup>2</sup>)和除草剂拌匀后一并施进稻田,之后不再追肥。基肥施用纯氮总量为168.7 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.2 样品采集与测定

本试验所用样品采自2017年水稻收获季,即考察木本泥炭和激发剂施用2 a后水稻产量与土壤性质变化。每个试验小区内5点取样法测产,得到产量因子值后,计算求得各小区平均产量。土样采集为每个试验小区内取表层土壤(0~20 cm),多点采集混合而成一样品,重复3次,然后用四分法取出足够的样品,一部分保存于4℃冰箱中用于土壤基本性质测定,一部分存于-20℃用于土壤DNA提取及细菌群落测定。

土壤基本性质测定参照文献[21],土壤pH采用电位法测定;硝态氮( $NO_3^-$ -N)采用紫外分光光度法测定;铵态氮( $NH_4^+$ -N)采用靛酚蓝比色法测定;有机质(SOM)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;有效磷

(AvaP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)采用氯仿熏蒸浸提法测定,易氧化碳(EOC)采用333 mmol/L高锰酸钾氧化法测定,可溶性有机碳(DOC)测定采用水提取、过滤方法。团聚体采用湿筛法测定,土壤颗粒组成采用吸管法测定。土壤团聚度计算采用公式:  
 $y = [(x_1 - x_2) / x_1] \times 100\%$ ,式中,y为土壤团聚度, $x_1$ 为 $>0.05$  mm微团聚体测量值; $x_2$ 为 $>0.05$  mm土壤颗粒组成测量值。

土壤总DNA采用Fast DNA Spin Kit for Soil(MP Biomedicals, Santa Ana, CA, USA)试剂盒提取。每个样品称取0.5 g鲜土,按照说明书操作提取DNA。选取特征引物515F(5'-GTGCCAGCMGCCGCGTA A-3')和907R(5'-CCGTCAATTCTTTAGTTT-3')16S rRNA基因V4~V5区进行PCR扩增。反应体系:Q5聚合酶0.25 μl,5 μl 5×Q5反应缓冲剂,5 μl 5×Q5 GC强化剂,2.5 mmol/L dNTP 2 μl,10 μmol正向反向引物各1 μl,超纯无菌水8.75 μl,DNA模板2 μl。反应条件:98℃预变性2 min,98℃变性60 s,55℃退火60 s,72℃延伸30 s,26个循环之后,72℃延伸5 min。反应产物采用QIA quick PCR Purification kit (Qiagen)进行纯化。将不同样品的PCR扩增产物等摩尔混合后,采用Illumina公司MiSeq测序仪完成序列分析。

### 1.3 数据处理及统计方法

利用QIIME(quantitative insight into microbial ecology)软件进行微生物数据处理,相似度为97%的序列合并为同一可操作分类单元(OTU),结果采用RDP(ribosomal database project)方法与Green-Genes数据库进行物种比对(置信度80%),鉴定微生物群落组成并计算 $\alpha$ -多样性指数(observed species, Chao1和PD whole tree)。土壤基本性质数据统计分析采用SPSS 17.0软件,LSD多重比较,微生物数据分析采用R软件,绘图采用Origin 2016。

## 2 结果

### 2.1 水稻产量

各处理水稻产量如图1。S处理产量与CK相似,而SP、SPJ1、SPJ2、SPJ3处理分别比CK增产9.3%、15.9%、11.5%、18.8%,与单施秸秆或不施用任何有机物料CK相比,施用木本泥炭有提高水稻产量趋势,其中SPJ1、SPJ3处理增产达到统计学上显著差异。表明,在SP处理基础上添加激发剂I、III能显著提高作物产量,增产效果优于激发剂II。

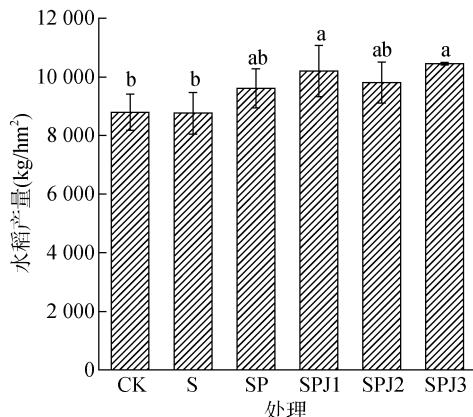
(图中小写字母不同表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), 下图同)

图 1 不同处理水稻产量  
Fig. 1 Crop yields under different treatments

## 2.2 土壤性质

**2.2.1 土壤有机质及其易利用部分** 由表 1 知, SP、SPJ1、SPJ2、SPJ3 处理间 SOM、EOC、DOC 结果相似, 并在所有处理中属最高水平, 其中 SOM

值比 S 和 CK 处理分别增加 20.6%、12.1%、18.8%、20.6% 和 39.3%、29.5%、37.3%、39.3%, EOC 较 S 和 CK 处理分别增加 124.6%、95.5%、104.1%、123.1% 和 48.9%、29.9%、35.3%、47.9%, 而 DOC 仅比 S 处理显著增加 67.2%、52.7%、50.8%、75.5%。尽管 SP 处理的 MBC 含量显著高于添加激发剂的 3 个处理(SPJ1、SPJ2、SPJ3), 但添加木本泥炭处理均显著高于其余处理, SP、SPJ1、SPJ2、SPJ3 处理分别比 S 和 CK 处理高 13.5 倍、10.9 倍、10.5 倍、11.3 倍和 16.1 倍、13.0 倍、12.5 倍、13.4 倍。SPJ3 处理的 MBN 值显著高于其他处理, 而其余处理间无显著性差异。上述结果导致 S 处理的 MBC/MBN 值与 CK 类似, 而 SP、SPJ1、SPJ2、SPJ3 处理 MBC/MBN 值分别是 S 和 CK 处理的 12.4 倍、10.6 倍、8.3 倍、5.1 倍。相关分析表示, EOC 和 MBC 呈显著正相关(图 2), 表明施用木本泥炭有刺激微生物生长趋势, 而微生物的迅速繁殖反过来又可促进活性有机质的累积。

表 1 不同处理下稻田土壤有机质及易利用部分  
Table 1 Organic matter and its easy-to-use fractions in paddy soils under different treatments

项目	CK	S	SP	SPJ1	SPJ2	SPJ3
SOM (g/kg)	19.3 ± 0.06 c	22.3 ± 0.14 b	26.9 ± 0.15 a	25.0 ± 0.06 a	26.5 ± 0.11 a	26.9 ± 0.15 a
EOC (g/kg)	4.84 ± 0.46 bc	3.21 ± 0.79 c	7.27 ± 1.00 a	6.29 ± 0.10 ab	6.55 ± 1.43 a	7.16 ± 1.63 a
DOC (mg/kg)	14.97 ± 3.33 a	9.21 ± 0.52 b	15.4 ± 2.49 a	14.06 ± 2.92 a	13.89 ± 1.67 a	16.16 ± 0.87 a
MBC (mg/kg)	39.23 ± 14.69 c	46.60 ± 8.94 c	631.42 ± 32.25 a	510.37 ± 55.81 b	489.03 ± 29.61 b	527.07 ± 121.17 b
MBN (mg/kg)	8.32 ± 2.10 b	10.00 ± 1.12 b	12.89 ± 6.53 b	10.24 ± 0.59 b	12.5 ± 0.38 b	22.8 ± 9.32 a
MBC/MBN	4.69 ± 1.00 c	4.73 ± 1.20 c	57.91 ± 26.80 a	50.14 ± 8.31 a	39.09 ± 1.23 ab	24.19 ± 4.09 bc

注: 同行数据小写字母不同表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), 下表同。

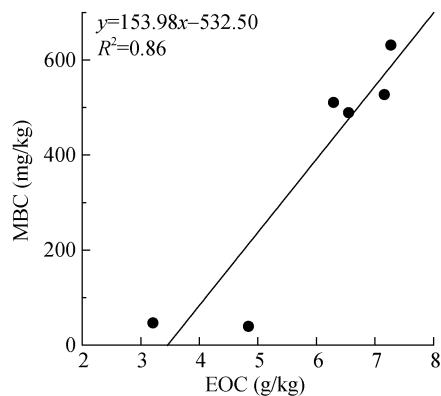


图 2 土壤 EOC 与 MBC 相关性  
Fig. 2 Correlation between EOC and MBC

**2.2.2 土壤 pH 及速效养分** 表 2 表示, S 与 SPJ1 处理的 pH 类似, 但显著低于其他处理。除 SPJ1 处理显著提高了土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量, SP、SPJ3 处理显著降低土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量外, 其余处理速效氮含量未有明显变化。本试验选择的 3 种激发剂施用均显著增加了土壤 AvaP 含量, 而不同激发剂之间没有显著差异, CK、S、SP 处理间也没有显著差异, 施用激发剂处理(SPJ1、SPJ2、SPJ3)的 AvaP 含量比 SP、S、CK 处理提高了 63.9%~91.7%、46.2%~70.9%、44.7%~69.3%。

**2.2.3 土壤团聚度** 由表 3 可知, 与 CK 相比, S、SPJ1 处理  $>0.25$  mm 团聚体含量分别提高了

表 2 不同处理下稻田土壤 pH 及速效养分  
Table 2 Soil pH and available nutrients in paddy soils under different treatments

项目	CK	S	SP	SPJ1	SPJ2	SPJ3
pH	6.37 ± 0.13 a	5.95 ± 0.15 b	6.22 ± 0.03 a	5.92 ± 0.10 b	6.21 ± 0.14 a	6.25 ± 0.08 a
$\text{NO}_3^-$ -N (mg/kg)	10.96 ± 0.93 b	8.43 ± 2.37 b	9.05 ± 2.76 b	17.85 ± 1.36 a	8.79 ± 1.93 b	8.07 ± 4.58 b
$\text{NH}_4^+$ -N (mg/kg)	25.17 ± 1.24 ab	26.67 ± 8.98 a	15.54 ± 8.70 b	17.63 ± 4.45 ab	20.98 ± 2.53 ab	15.87 ± 3.48 b
AvaP (mg/kg)	7.48 ± 2.73 c	10.09 ± 3.58 bc	8.75 ± 1.32 c	14.34 ± 0.99 a	12.79 ± 0.39 ab	12.66 ± 0.33 ab

表3 不同处理下稻田土壤团聚体组成(%)  
Table 3 Composition of soil aggregates in paddy soils under different treatments

粒径	CK	S	SP	SPJ1	SPJ2	SPJ3
>2 mm	8.84 ± 2.87 a	9.98 ± 1.91 a	8.52 ± 0.59 a	11.04 ± 1.25 a	9.43 ± 1.88 a	8.78 ± 3.56 a
2 ~ 0.25 mm	49.73 ± 5.56 a	49.13 ± 1.40 a	47.58 ± 4.10 a	50.83 ± 1.73 a	47.02 ± 1.74 a	46.84 ± 2.55 a
0.25 ~ 0.053 mm	31.62 ± 5.93 ab	34.05 ± 1.43 ab	33.65 ± 6.25 ab	28.38 ± 2.83 b	35.91 ± 0.95 a	34.52 ± 1.06 ab
<0.053 mm	9.80 ± 2.57 a	6.83 ± 2.84 a	10.25 ± 4.73 a	9.74 ± 2.70 a	7.64 ± 1.15 a	9.76 ± 1.39 a

0.9%、5.6%，SP、SPJ2、SPJ3 处理 >0.25 mm 团聚体含量分别降低 4.2%、3.6%、5.0%，但均未达到显著性差异。图 3 表示，本试验条件下土壤团聚度分为显著不同的两组：施用激发剂组和不施用激发剂组，组内结果类似，但施用激发剂组比不施用激发剂组团聚度显著提高，SPJ1、SPJ2、SPJ3 团聚度较 SP 显著提高了 28.8%、43.6%、26.4%。表明施用激发剂显著改善了微团聚体水稳定性，而不同激发剂之间没有显著差异。

### 2.3 土壤细菌多样性与群落组成变化

**2.3.1 细菌多样性** 高通量测序结果经质量控制后每个样品均获得 16 836 条高质量序列，经比对后归并为 1 255 个 OTU，归属于 385 个属，264 个科，197 个目，105 个纲以及 36 个门。 $\alpha$ -多样性指数是表征样品内部多样性以及均匀度指数，以 Shannon 指数表征细菌多样性，PD\_whole\_tree(PD)指数表征细菌系统发育多样性。结果发现(图 4A): 单一秸秆还田降低了土壤细菌多样性以及系统发育程度，而配施木本泥炭后细菌多样性与系统发育程度均不同程度提

高，施用激发剂后细菌多样性处于较高水平。相关性分析发现，细菌多样性指数与 DOC、细菌系统发育多样性指数与 EOC 显著正相关，表明施用木本泥炭以及激发剂后，DOC、EOC 含量的增加是土壤细菌多样性与系统发育程度提高的主要原因。

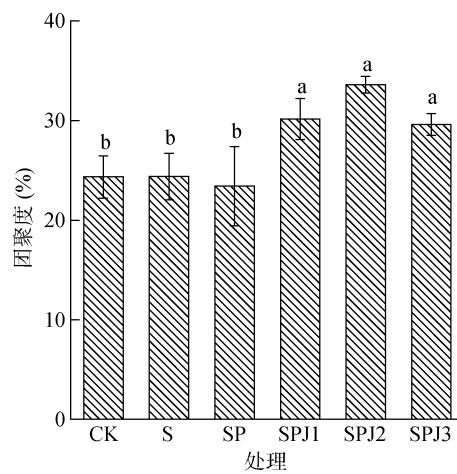


图 3 不同处理下稻田土壤团聚度  
Fig. 3 Aggregation degrees of paddy soils under different treatments

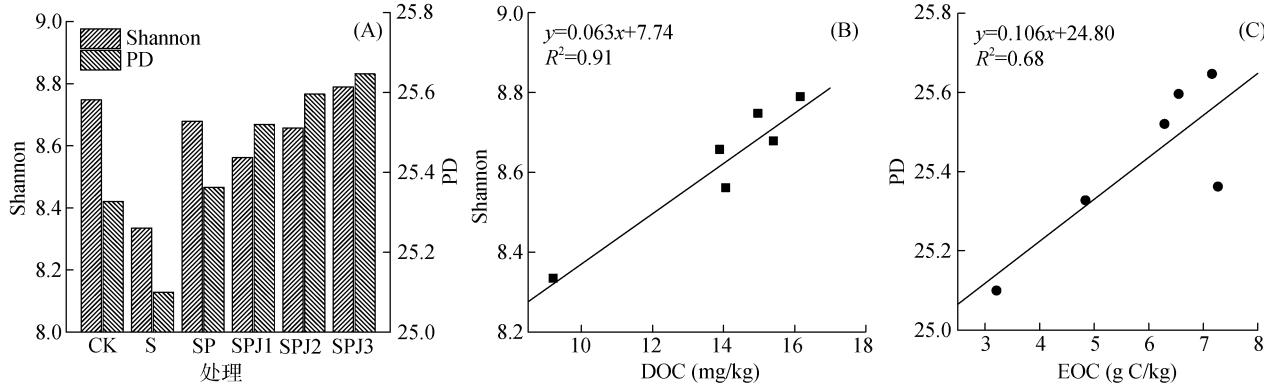


图 4 不同处理下稻田土壤细菌群落  $\alpha$  多样性变化(A)、Shannon 指数与 DOC 之间关系(B)、PD 指数与 EOC 之间关系(C)  
Fig. 4  $\alpha$ -diversity of bacterial community (A), relationship between Shannon index and DOC (B), relationship between PD index and EOC (C) in paddy soils under different treatments

**2.3.2 细菌群落组成及其与环境因子关系** 图 5A 表示，Proteobacteria、Acidobacteria、Chloroflexi 是稻田土壤中优势物种，相对丰度分别为 41.95%、19.17%、14.78%。Actinobacteria(5.34%)、Firmicutes (2.85%)、Gemmatimonadetes(2.54%)、Planctomycetes (2.43%)、

Nitrospirae(1.59%)、Cyanobacteria(2.02%)、Bacteroidetes(1.42%)是其余相对丰度大于 1% 的物种。对不同处理细菌群落进行 PCoA 分析如图 5B。结果发现：主坐标前两轴解释了群落变异的 44.95%，S、SPJ1 处理与其余处理沿第一轴分开，CK、SP 处理与其余处理

在第二轴上分开。Anosim 分析结果也说明, 添加外源有机物料处理(S、SP)与 CK 群落结构差异显著( $R^2 = 0.75, P = 0.005$ ), 同时施用激发剂处理(SPJ1、SPJ2、SPJ3)群落结构与 SP 处理也具有显著差异( $R^2 = 0.44, P = 0.001$ )。上述分析表明有机物料与激发剂的添加能显著影响土壤细菌群落组成, 改变群落结构。

为明确不同处理下土壤环境因子间关系以及其对于土壤细菌群落结构分异的影响, 基于 Bray-Curtis 距离算法, 将土壤环境因子拟合到不同处理的非度量

多维尺度(NMDS)排序图上。胁强系数用以反映降维过程中数据失真水平, 其值越小, 表明图中空间关系越能准确表征数据信息。由 Stress = 0.12 可知, 该排序分析结果能解释不同处理间群落分异与环境变量关系 88% 的信息(图 6)。与图 5B 结果类似, SPJ1、SPJ2、SPJ3 处理位于第一轴下方, 而其他处理均位于第一轴上方, 表示施用激发剂处理的土壤细菌群落组成与其他处理差异显著, 这差异主要与 AvaP、MBN、EOC、DOC 有关(图 6)。

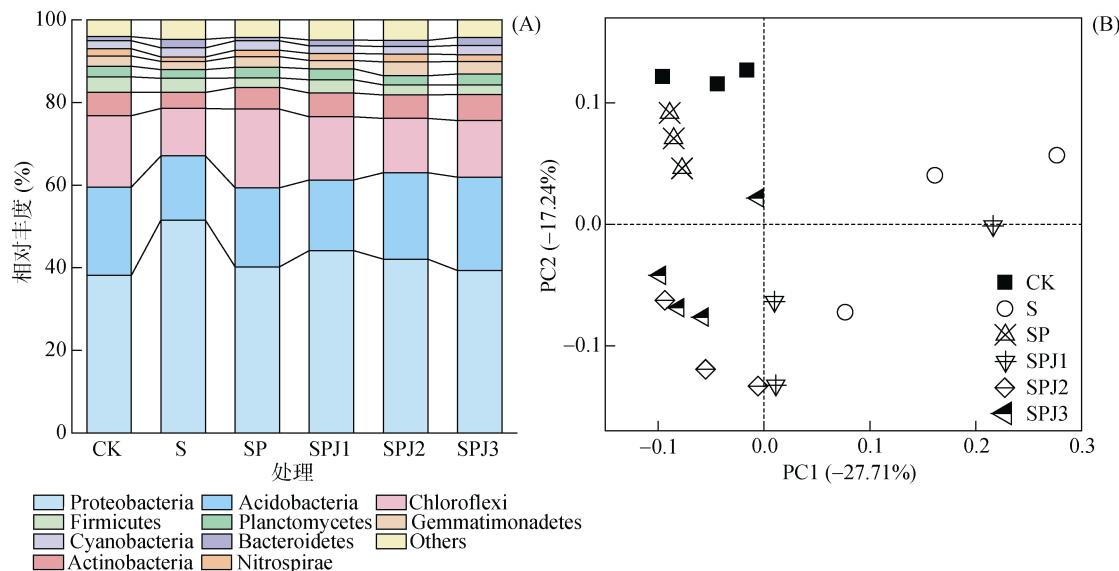


图 5 不同处理下稻田土壤细菌群落组成变化

Fig. 5 Changes of bacterial community composition in paddy soils under different treatments

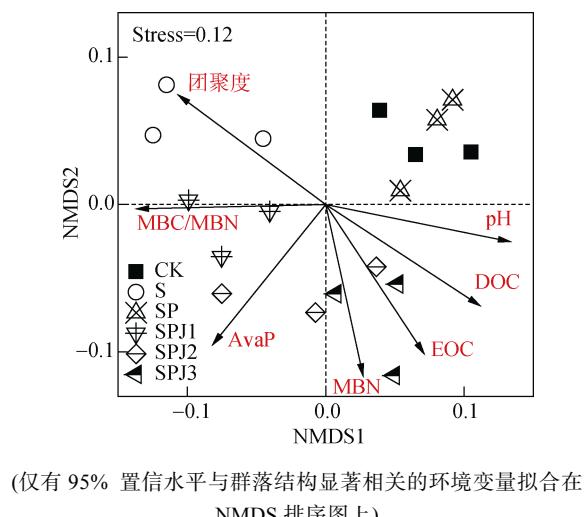


图 6 不同处理下稻田土壤细菌群落结构与土壤性质之间关系

Fig. 6 Relationship between bacterial community structure and soil properties under different treatments

### 3 讨论

本研究采用高通量测序技术, 研究了不同外源

有机物料添加对稻田土壤性质的影响以及细菌群落响应。结果表明, 不同外源有机物料造成土壤理化性质差异, 从而影响作物产量以及细菌群落多样性和结构。

#### 3.1 有机物料还田配施激发剂对土壤理化性质、水稻产量的影响

木本泥炭含碳量高, 作为一种重要的腐殖酸资源, 是制作有机肥料的优质原料。秸秆也常作为重要的有机物料, 用于还田以改善土壤质量。大量研究表明, 添加有机物料能改善土壤理化性质, 从而提升土壤肥力, 促进作物增产<sup>[23-25]</sup>。本研究中, 与 CK 相比, 秸秆还田(S)、秸秆还田+木本泥炭(SP)、秸秆还田+木本泥炭+激发剂(SPJ1 ~ SPJ3)均有效提高土壤有机质含量, 其中 SP、SPJ1 ~ SPJ3 处理能显著提高易氧化碳(EOC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)等土壤活性有机质部分, SPJ1 ~ SPJ3 处理对土壤 AvaP、团聚度有显著提升作用。就作物产量而言, S 处理未能有效提高作物产量, 这可能是由于秸

秆的高 C/N 比,微生物在分解过程中会从土壤中吸收矿质氮固定在体内,与作物争夺有限营养,引起负激发效应<sup>[16]</sup>;也可能是由于秸秆还田未能提高土壤活性有机质含量(表 1),土壤有机碳含量高低仅说明有机质数量并不能直接说明其质量<sup>[26]</sup>,而活性有机质是土壤中易被分解转换、活跃度高的部分,也是微生物活动能源和土壤养分的驱动力<sup>[27]</sup>。本研究发现 EOC 与 MBC 均呈良好的线性关系(图 2),表明施用木本泥炭提高 EOC 含量,能有效刺激微生物生长,进而可能提高作物生长所需的养分循环转化。木本泥炭由于其复杂结构,能有效吸附铵,从而减少氮素挥发提高氮素利用率<sup>[28]</sup>,也能通过同晶置换提高土壤中磷的有效性<sup>[29]</sup>,有明显增产作用。这与王亚彪等<sup>[30]</sup>在甘蔗上应用木本泥炭研究结果一致。秸秆还田配施木本泥炭既补充了土壤中碳源,也增加了土壤氮素的持续供应能力<sup>[31]</sup>;激发剂的添加提高了土壤有效磷(Avap)含量以及团聚度(图 3),为微生物提供良好生存环境,提高农作物对养分利用率,加速土壤中养分物质循环过程<sup>[32]</sup>,促进作物高产,其中激发剂 I、III 效果更优。

### 3.2 有机物料还田配施激发剂对土壤细菌多样性的影响

土壤微生物群落参与有机质分解和腐殖质形成分解过程,是土壤中物质转换和养分循环中重要一环<sup>[33]</sup>,多样性指数是评价土壤的微生物群落多样性非常有效的方法之一。袁红朝等<sup>[34]</sup>利用 T-RELP 和定量 PCR 技术研究了长期不同施肥对红壤性水稻土细菌多样性的影响,结果发现,施肥处理(氮磷钾配施和秸秆还田)土壤细菌多样性均高于不施肥处理。郭梨锦等<sup>[35]</sup>采用 PLFA 方法也发现秸秆还田显著提高表层稻田土壤微生物多样性。本研究结果显示外源有机物料对稻田土壤细菌多样性产生了影响(图 4)。与 CK 相比,秸秆还田(S)细菌多样性有所降低,可能是土壤性质改变增加了某些优势种群数量,而相应减少了其余细菌种类和数量,从而细菌多样性降低。SP、SPJ1~SPJ3 处理提高了土壤细菌多样性指数和系统发育指数。相关性分析表明 DOC 与 Shannon 指数、EOC 与 PD 指数均显著正相关(图 4),表示施用木本泥炭与激发剂后,DOC、EOC 含量的增加可能是土壤细菌多样性与系统发育程度提高的主要原因。

### 3.3 有机物料还田配施激发剂对土壤细菌群落结构的影响

施肥作为影响土壤肥力最主要的农业措施之

一,对于土壤微生物群落组成、结构也具有重要调节作用<sup>[36~37]</sup>。袁红朝等<sup>[22]</sup>研究了长期施肥对土壤细菌组成影响,结果发现 Proteobacteria、Acidobacteria、Chloroflexi 为稻田土壤主要细菌类群。王霞等<sup>[38]</sup>利用克隆文库技术发现不施肥和秸秆还田的稻田土壤中优势菌种均为 Proteobacteria,秸秆还田后 Proteobacteria 相对丰度提高了 5%。本研究与上述研究结论一致,Proteobacteria、Acidobacteria、Chloroflexi 是稻田土壤中优势种群(图 5A)。

PcoA 与 Anosim 分析结果表明有机物料还田和配施激发剂能显著改变土壤细菌群落结构,土壤微生物群落结构与土壤理化性质密切相关。刘琼等<sup>[39]</sup>利用 T-RFLP 技术通过培养试验发现,土壤 pH、SOC 对水稻土中具有碳同化功能的微生物群落结构有显著影响。张敬智等<sup>[40]</sup>研究发现淹水能提高土壤 DOC 含量,加速土壤微生物对碳源的利用,从而影响群落结构。陈晓芬等<sup>[41]</sup>采用 PLFA 技术研究长期不同磷肥处理对红壤水稻土微生物群落影响,结果发现有效磷、有机碳是影响群落结构和功能多样性的关键因素。本研究利用非度量多维尺度排序(NMDS)分析发现, pH 和 Avap 是影响土壤细菌群落的最主要环境因子,施用激发剂处理与其余处理群落差异还受 MBN、EOC、DOC 的影响,与上述研究结论一致。

## 4 结论

1)秸秆还田配施木本泥炭和激发剂较不施肥和单一秸秆还田处理显著提高了土壤有机质及其活性部分(EOC、DOC、MBC),作物增产 9.3%~18.8%。外源有机物料配施激发剂进一步显著提高了土壤团聚度和 Avap 含量。

2)秸秆还田基础上配施木本泥炭和激发剂后,土壤 EOC、DOC 含量的增加提高了细菌多样性和系统发育程度。Proteobacteria、Acidobacteria、Chloroflexi 是稻田土壤优势菌种。本试验施用的 3 种激发剂均显著改变了细菌的群落组成,其改变与土壤性质 Avap、MBN、EOC、DOC 显著相关。表明激发剂可以通过改变微生物的群落结构,从而有可能改变其功能,最后导致土壤理化性质的改善。

## 参考文献:

- [1] 李维福,解宏图,郑立臣.土壤有机质分组方法研究进展[J].农业系统科学与综合研究,2008,24(3): 338~343.
- [2] 孟凡乔,吴文良.高产农田土壤有机质、养分的变化规律与作物产量的关系[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4): 370~374.

- [3] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 马海洋, 陈清, 石伟琦, 等. 施用木本泥炭对香蕉产量、品质及蕉园土壤养分的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(1): 49–54.
- [5] 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 103–111.
- [6] 张雅洁, 陈晨, 陈曦, 等. 小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2155–2161.
- [7] Wang J G, Bakken L R. Competition for nitrogen during decomposition of plant residues in soil: Effect of spatial placement of N-rich and N-poor plant residues[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(2): 153–162.
- [8] 刘芳, 张长生, 陈爱武, 等. 秸秆还田技术研究及应用进展[J]. 作物杂志, 2012(2): 18–23.
- [9] 刘凤艳, 龚振平, 马先树, 等. 秸秆还田对水稻病虫害发生的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2010(8): 75–78.
- [10] 青格尔, 于晓芳, 高聚林, 等. 腐解菌剂对玉米秸秆降解效果的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 107–116.
- [11] 张建峰, 侯红燕, 付志金, 等. 速腐菌剂在东北地区秸秆堆肥中的功能验证及微生物菌群动态研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 112–117.
- [12] 李培培, 张冬冬, 王小娟, 等. 促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2847–2854.
- [13] 赵伟, 郝帅, 孙泰朋, 等. 菌剂降解秸秆直接还田对黑土土壤碳素和氮素的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 182–184, 220.
- [14] 吴琴燕, 陈宏州, 杨敬辉, 等. 不同腐解剂对麦秸秆腐解的初步研究[J]. 上海农业学报, 2010, 26(4): 83–86.
- [15] 刘海静, 任萍. 2 种还田模式下小麦秸秆腐解菌剂应用效果研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 166–172.
- [16] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 土壤有机碳激发效应研究进展[J]. 土壤, 2006, 38(4): 359–365.
- [17] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535.
- [18] Li F, Chen L, Zhang J, et al. Bacterial community structure after long-term organic and inorganic fertilization reveals important associations between soil nutrients and specific taxa involved in nutrient transformations[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8(187): 1–12.
- [19] Kathryng E, Christianl L, Rob K, et al. Shifts in bacterial community structure associated with inputs of low molecular weight carbon compounds to soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(6): 896–903.
- [20] 黄进, 张晓勉, 张金池. 桐庐生态公益林主要森林类型土壤抗水蚀功能综合评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 932–937.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 袁红朝, 吴昊, 葛体达, 等. 长期施肥对稻田土壤细菌、古菌多样性和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1807–1813.
- [23] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 5052–5061.
- [24] 李凤博, 牛永志, 高文玲, 等. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 549–552.
- [25] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 304–312.
- [26] 田慎重, 郭洪海, 董晓霞, 等. 耕作方式转变和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增 2): 39–45.
- [27] 郑红. 土壤活性有机碳的研究进展[J]. 中国林副特产, 2011(6): 90–94.
- [28] 张树清, 刘秀梅, 冯兆滨. 腐植酸对氮、磷、钾的吸附和解吸特性研究//全国绿色环保肥料新技术、新产品交流会[C]. 2006: 15–21.
- [29] 周爽, 其力莫格, 谭钧, 等. 腐植酸提高土壤氮磷钾养分利用效率的机制[J]. 腐植酸, 2015(2): 1–8.
- [30] 王亚彪, 陈迪文, 李健鹏, 等. 木本泥炭新型肥料在砖红壤甘蔗上的应用[J]. 甘蔗糖业, 2016(2): 7–11.
- [31] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 160–167.
- [32] 陈绍荣. 我国生物刺激剂的产业现状及发展方向[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(1): 16–18, 32.
- [33] 刘亚军, 蔡润发, 李震寰, 等. 湿地土壤微生物碳源代谢活性及对不同水分条件的动态响应——以鄱阳湖为例[J]. 土壤, 2018, 50(4): 705–711.
- [34] 袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等. 长期施肥对红壤性水稻土细菌群落结构和数量的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4610–4617.
- [35] 郭梨锦, 曹凌贵, 张枝盛, 等. 耕作方式和秸秆还田对稻田表层土壤微生物群落的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1577–1584.
- [36] 王晔青. 长期不同施肥对棕壤微生物量碳的影响[J]. 湖南农业科学, 2010(11): 58–60.
- [37] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144–152.
- [38] 王霞, 陈哲, 袁红朝, 等. 应用 16S rDNA 克隆文库技术研究长期稻草还田对水稻土细菌多样性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3865–3874.
- [39] 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 等. 稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 760–768.
- [40] 张敬智, 马超, 郜红建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1160–1166.
- [41] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 长期施肥处理对红壤水稻土微生物群落结构和功能多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1815–1822.