

## 香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响

王超, 邱竞驰, 李建华, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清, 胡家帅

### 引用本文:

王超, 邱竞驰, 李建华, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清, 胡家帅. 香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 537–546.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0766>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响

李虎, 吴景贵, 李建明

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1944–1953 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0023>

#### 不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征

乌达木, 范茂攀, 赵吉霞, 李孝梅, 李永梅

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1519–1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1446>

#### 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1774–1782 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>

#### 再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响

胡廷飞, 王辉, 谭帅

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 143–151 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0955>

#### 晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征

刘鸿涛, 郑纪勇, 李高亮, 马章怀, 杨凯齐

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 137–143 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0567>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王超, 邱竞驰, 李建华, 等. 香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 537–546.

WANG C, QIU J C, LI J H, et al. Effects of banana stem and its biochar on soil aggregates and carbon pool management in paddy soil cultivated for double cropping[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 537–546.



开放科学 OSID

# 香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响

王超<sup>1</sup>, 邱竞驰<sup>1</sup>, 李建华<sup>2\*</sup>, 卢瑛<sup>1\*</sup>, 李博<sup>1</sup>, 唐贤<sup>1</sup>, 董玉清<sup>1</sup>, 胡家帅<sup>1</sup>

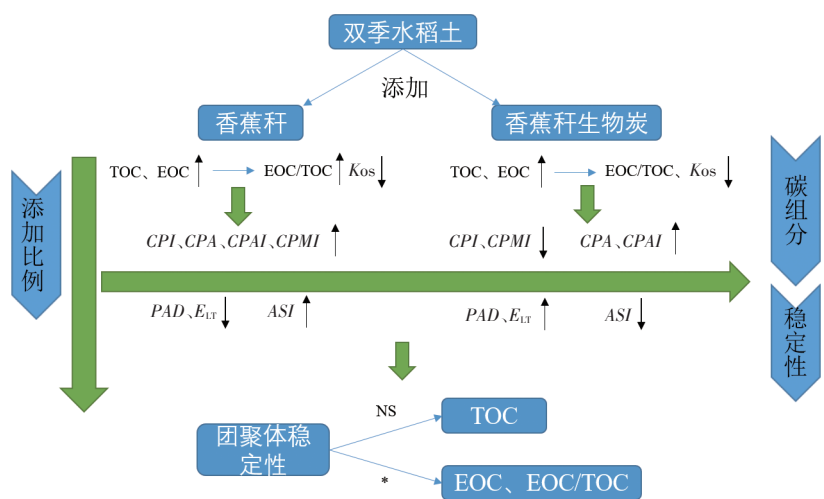
(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 广东省土地开发整治中心, 广州 510635)

**摘要:**为探明香蕉秆废弃物资源化利用及其在改善土壤质量方面的可行性,以珠江三角洲区域种植面积广泛的双季水稻土为研究对象,采用室内培养试验,通过测定添加0.5%、1.0%和2.0%香蕉秆及其生物炭后土壤团聚体稳定性和有机碳的变化特征,阐明添加不同比例的香蕉秆及其生物炭对土壤团聚体稳定性、碳库组成和碳库管理的综合影响。结果表明:添加香蕉秆能提高土壤>0.25 mm水稳性团聚体含量和团聚体稳定性系数(ASI),降低土壤团聚体破坏率(PAD)和不稳定团粒指数( $E_{LT}$ );而香蕉秆生物炭处理降低了土壤>0.25 mm水稳性团聚体含量和ASI,增加了PAD和 $E_{LT}$ 。添加香蕉秆及其生物炭均能

不同程度提高土壤总有机碳(TOC)和活性有机碳(EOC)含量,降低土壤氧化稳定系数( $K_{OS}$ ),其中香蕉秆处理对EOC的提高更显著,而香蕉秆生物炭处理对TOC的提高更显著。香蕉秆及其生物炭处理分别通过提高碳库活度指数(CPAI)和碳库指数(CPI)来提高土壤碳库管理指数(CPMI)。相关性分析表明,土壤团聚体稳定性主要取决于土壤EOC占比,而非TOC含量。研究表明,添加香蕉秆更有利于土壤结构改善和土壤EOC的积累,2.0%香蕉秆添加比例具有最佳的土壤培肥效果。

**关键词:**香蕉秆;生物炭;土壤团聚体稳定性;碳库管理;双季水稻土;珠江三角洲

中图分类号:S511.42;S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)03-0537-10 doi:10.11654/jaes.2021-0766



## Effects of banana stem and its biochar on soil aggregates and carbon pool management in paddy soil cultivated for double cropping

WANG Chao<sup>1</sup>, QIU Jingchi<sup>1</sup>, LI Jianhua<sup>2\*</sup>, LU Ying<sup>1\*</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, TANG Xian<sup>1</sup>, DONG Yuqing<sup>1</sup>, HU Jiashuai<sup>1</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Land Development and Reclamation Center of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China)

收稿日期: 2021-07-03 录用日期: 2021-09-24

作者简介: 王超(1994—),男,安徽滁州人,硕士研究生,从事耕地土壤质量提升和土壤侵蚀退化研究。E-mail: 1774467928@qq.com

\*通信作者: 李建华 E-mail: pomao@tom.com; 卢瑛 E-mail: luying@scau.edu.cn

基金项目: NSFC-广东省联合基金集成项目(U1901601); 国家科技基础性工作专项重点项目(2014FY110200)

**Project supported:** Joint Fund of National Natural Science Foundation of China and Guangdong Provincial People's Government(U1901601); The Key Work of National Basic and Technology Project(2014FY110200)

**Abstract:** To investigate the feasibility of utilizing banana stem as a resource to improve quality of double-season rice soil, we selected a wide cultivation area in the Pearl River Delta region as research object. Laboratory culture experiments were conducted to identify changes in soil aggregate stability and organic carbon content after adding 0.5%, 1.0%, and 2.0% banana stem and/or its biochar, and to elucidate the comprehensive effects of adding different proportions of banana straw and its biochar on soil aggregate stability, carbon pool composition, and carbon pool management. Addition of banana stem increased the soil's  $>0.25$  mm water-stable aggregate content, and aggregate stability index (*ASI*), and decreased the percentage of aggregate destruction (*PAD*) and unstable aggregate index ( $E_{IT}$ ). Banana stem biochar addition decreased  $>0.25$  mm water-stable aggregates and *ASI*, and increased *PAD* and  $E_{IT}$ . Addition of banana stem and its biochar increased soil total organic carbon (TOC) and active organic carbon (EOC) content, and decreased the soil carbon oxidation coefficient (*K<sub>os</sub>*). Banana stem most potently increased EOC, and banana stem biochar most potently increased TOC. Soil treatment with banana stem and its biochar improved the soil carbon pool management index (*CPMI*) by increasing the carbon pool activity index (*CPAI*) and carbon pool index (*CPI*), respectively. Correlation analysis showed that soil aggregate stability was more dependent on the proportion in soil of EOC than TOC. Overall, banana stem addition was more beneficial to soil structure and accumulation of soil EOC, and 2.0% banana stem addition exerted the best effect on soil fertility.

**Keywords:** banana stem; biochar; soil aggregate stability; carbon pool management; double cropping paddy soil; Pearl River Delta

香蕉作为热带-亚热带地区销售量最大的水果,同时也是该区域重要的粮食作物<sup>[1]</sup>和经济作物。我国香蕉种植面积约有36万 $\text{hm}^2$ ,年产量达1 200万t,其在我国农业经济发展中占据重要位置<sup>[2]</sup>。香蕉具有生长周期短、生物产量高和茎叶等副产物多的特点,每年约有4 200万t的香蕉废弃物弃置于野外,造成巨大的环境压力 and 资源浪费<sup>[3]</sup>。香蕉秆和茎叶含有丰富的磷、钾、钙、铁、锌等多种元素<sup>[4]</sup>和胡萝卜素、尼克酸、硫胺素等碳水化合物<sup>[5]</sup>,可作为一种养分丰富的农业资源。秸秆还田是政府和科研机构大力倡导的土壤培肥措施。目前,香蕉废弃物的应用更多的是在食品添加剂、牲畜饲料和废水处理吸附剂方面<sup>[6-7]</sup>,也有研究表明<sup>[8-9]</sup>,香蕉茎叶能够改良土壤性状、丰富土壤微生物群落结构,然而香蕉秆的资源化利用,特别是在土壤结构改良和土壤培肥方面的研究较少。

团聚体作为土壤结构的基本单元,良好的团聚体组成分布能够协调土壤水、肥、气、热。此外,团聚体可作为有机碳的固存中心,通过物理保护减少有机碳被土壤微生物分解<sup>[10]</sup>;而有机物料作为有机胶结剂直接作用于土壤,影响土壤团聚体的形成,间接改变团聚体对有机碳的固存<sup>[11]</sup>。可知,有机碳与团聚体相互依存、相互影响,改变着土壤质量。有机物料还田是驱动耕地土壤碳库变化的关键性因素<sup>[12-13]</sup>,然而有机碳总量对外界条件的变化具有滞后性,不能完全表征土壤碳库质量。土壤活性有机碳作为土壤最敏感的有机碳库<sup>[14]</sup>,对外界环境的变化(如土地利用转变、施肥管理、农田耕作等农业田间管理)具有更强的响应能力。而且土壤活性有机碳作为高效的养分可直接供给植物吸收利用,易被土壤生物分解利用,因此,活

性有机碳是土壤碳库动态变化和碳库质量评价的重要指标<sup>[15]</sup>。李虎等<sup>[13]</sup>的研究表明,玉米秸秆和畜禽粪的田间堆腐显著增加土壤活性有机碳含量,改善黑土碳库质量。张影等<sup>[16]</sup>的研究表明,水稻秸秆还田能增加土壤腐质化系数,提高土壤碳库管理指数。

珠江三角洲是我国重要的水稻生产基地,得益于良好的水热条件,该区域水稻种植制度多为双季水稻,随着城市化进程的推进,原本的耕地面积大面积缩减,复种指数增加。针对双季水稻土连年耕作造成的土壤肥力下降和稻田施肥存在的问题,兼顾减少农业废弃物污染和农业资金投入,为寻求最佳的农业废弃物施用比例以促进土壤养分积累和改善土壤质量,本研究以珠江三角洲双季水稻土为研究对象,分别添加0.5%、1.0%和2.0%的香蕉秆及其生物炭,通过土壤团聚体稳定性和有机碳的变化特征,综合分析香蕉秆废弃物还田对土壤团聚体稳定性、碳库组成和碳库管理的影响,为香蕉秆的农业资源化利用和珠江三角洲双季水稻土质量改善提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

广东省中山市三乡镇水稻种植区( $22^{\circ}21'N$ ,  $113^{\circ}26'E$ )属南亚热带季风气候,年平均气温 $22.0^{\circ}\text{C}$ ,年平均降雨量1 800 mm,年平均日照时间1 840 h,光热条件充足,雨量充沛,土壤类型为三角洲沉积物发育的潜育型水稻土,得益于良好的环境条件,水稻种植制度为双季稻。采集水稻土耕层(0~20 cm)土壤,去除肉眼可见的植物残体后,过5 mm筛备用。试验前土壤基本理化性质为pH 4.87,有机碳 $12.65\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全

氮  $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $125.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $32.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $55.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $0.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $40.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 颗粒组成为  $528.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  砂粒、 $268.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  粉粒、 $203.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  黏粒。

供试有机物料取自华南农业大学教学科研基地的香蕉秆(Banana stem, BS), 对其进行清洗、杀青处理, 再将其剪碎过  $2 \text{ mm}$  筛。取部分剪碎的香蕉秆置于马弗炉中,  $450^\circ\text{C}$  厌氧裂解  $2 \text{ h}$ , 然后过  $2 \text{ mm}$  筛, 制得香蕉秆生物炭(Banana stem biochar, BSB)。各有机物料的基本性质见表 1。

## 1.2 试验设计

培养试验共设 7 个处理, 分别为添加风干土壤质量  $0.5\%$ 、 $1.0\%$  和  $2.0\%$  的香蕉秆和香蕉秆生物炭处理和对照(CK)处理, 每个处理 3 个重复。将各香蕉秆及其生物炭处理分别和  $2 \text{ kg}$  风干土样混合均匀, 装入规格为高  $12 \text{ cm}$ 、直径  $11 \text{ cm}$  的塑料盆, 共计 21 盆。培养试验在华南农业大学资源环境学院网室中进行, 保持土壤水分在田间持水量的  $60\%$  左右, 土壤培养  $180 \text{ d}$ 。培养结束后, 用小型土钻取样, 用于测定土壤理化性质和有机碳组分。

## 1.3 测定方法

土壤基本理化性质和有机碳组分测定方法参考《土壤调查实验室分析方法》<sup>[17]</sup>。土壤 pH 采用电位法(水土比  $2.5:1$ )测定; 颗粒组成采用吸管法测定; 全氮采用凯氏定氮法测定; 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; 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定; 总有机碳采用重铬酸钾氧化法测定; 活性有机碳采用高锰酸钾氧化法测定; 土壤团聚体采用萨维诺夫法测定。

## 1.4 计算公式

团聚体结构破坏率(PAD, %)和不稳定团粒指数( $E_{\text{LT}}$ )的计算公式为:

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\%$$

$$E_{\text{LT}} = \frac{\sum W_i - WR_{0.25}}{\sum W_i}$$

式中:  $W_i$  为不同粒级土壤团聚体的质量分数, %;  $DR_{0.25}$

为干筛团聚体中  $>0.25 \text{ mm}$  粒级所占百分比, %;  $WR_{0.25}$  为湿筛团聚体中  $>0.25 \text{ mm}$  粒级所占百分比, %。

土壤团聚体稳定性评价采用转移矩阵法<sup>[18]</sup>, 将各个粒级的风干团聚体构成矩阵  $X_i$ , 各个粒级的湿筛团聚体构成  $Y_i$ , 在筛分过程中, 每个粒级团聚体能保留在对应粒径范围内的几率为  $P_i$ , 可得  $X_i P_i = Y_i$ , 采用各粒级团聚体的保存几率作为团聚体稳定性指数(ASI), 计算公式为:

$$ASI = \sum P_i$$

土壤有机碳氧化稳定性系数<sup>[19]</sup>计算公式为:

$$\text{氧化稳定性系数}(Kos) = [\text{土壤总有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) - \text{活性有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})] / \text{活性有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$$

土壤碳库管理指数<sup>[16]</sup>计算公式为:

$$\text{碳库指数}(CPI) = \text{各处理土壤有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{对照土壤有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$\text{碳库活度}(CPA) = \text{活性有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{非活性有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$\text{碳库活度指数}(CPAI) = \text{各处理土壤碳库活度} / \text{对照土壤碳库活度}$$

$$\text{碳库管理指数}(CPMI) = \text{碳库指数}(CPI) \times \text{碳库活度指数}(CPAI) \times 100$$

参考土壤有机碳含量为本研究中对照处理。

## 1.5 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行整理和分析。采用 Two-way ANOVA 分析香蕉秆和生物炭、添加比例及其交互效应对土壤团聚体特征、有机碳库组分和碳库管理指数的影响, 香蕉秆与其生物炭的显著水平通过 T 检验的两两比较进行分析, 不同添加比例的显著性水平通过 LSD 法进行检验。分别用 SPSS 24.0 和 Canoco 5.0 对土壤团聚体特征、有机碳库组分和碳库管理指数进行主成分分析和 nMDS 分析。采用 Origin 2020b 做图。图表中数据为均值  $\pm$  标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 香蕉秆及其生物炭对土壤碳库组成和碳库管理的影响

由表 2 可知, 有机物料种类的主体效应对总有机

表 1 供试有机物料的基本性质

Table 1 Basic properties of organic materials in the experiment

| 有机物料种类<br>Organic material type | pH               | 有机碳<br>Organic C/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全氮<br>Total N/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全磷<br>Total P/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全钾<br>Total K/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
|---------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 香蕉秆 BS                          | $4.26 \pm 0.01$  | $479.88 \pm 3.36$                                    | $15.28 \pm 0.66$                                  | $2.77 \pm 0.07$                                   | $62.72 \pm 3.12$                                  |
| 香蕉秆生物炭 BSB                      | $10.37 \pm 0.01$ | $573.79 \pm 11.37$                                   | $10.80 \pm 0.31$                                  | $3.01 \pm 0.04$                                   | $57.64 \pm 2.11$                                  |

碳(TOC)、活性有机碳(EOC)、活性有机碳占总有机碳比例(EOC/TOC)、有机碳氧化稳定系数( $K_{os}$ )、碳库指数( $CPI$ )、碳库活度( $CPA$ )、碳库活度指数( $CPAI$ )和碳库管理指数( $CPMI$ )影响显著,添加比例的主体效应对TOC、EOC、 $CPI$ 、 $CPMI$ 影响显著,有机物料种类和添加比例的交互效应对除EOC外的其他土壤碳库组成、碳库管理指标有显著影响。

2.1.1 对土壤碳库组成的影响

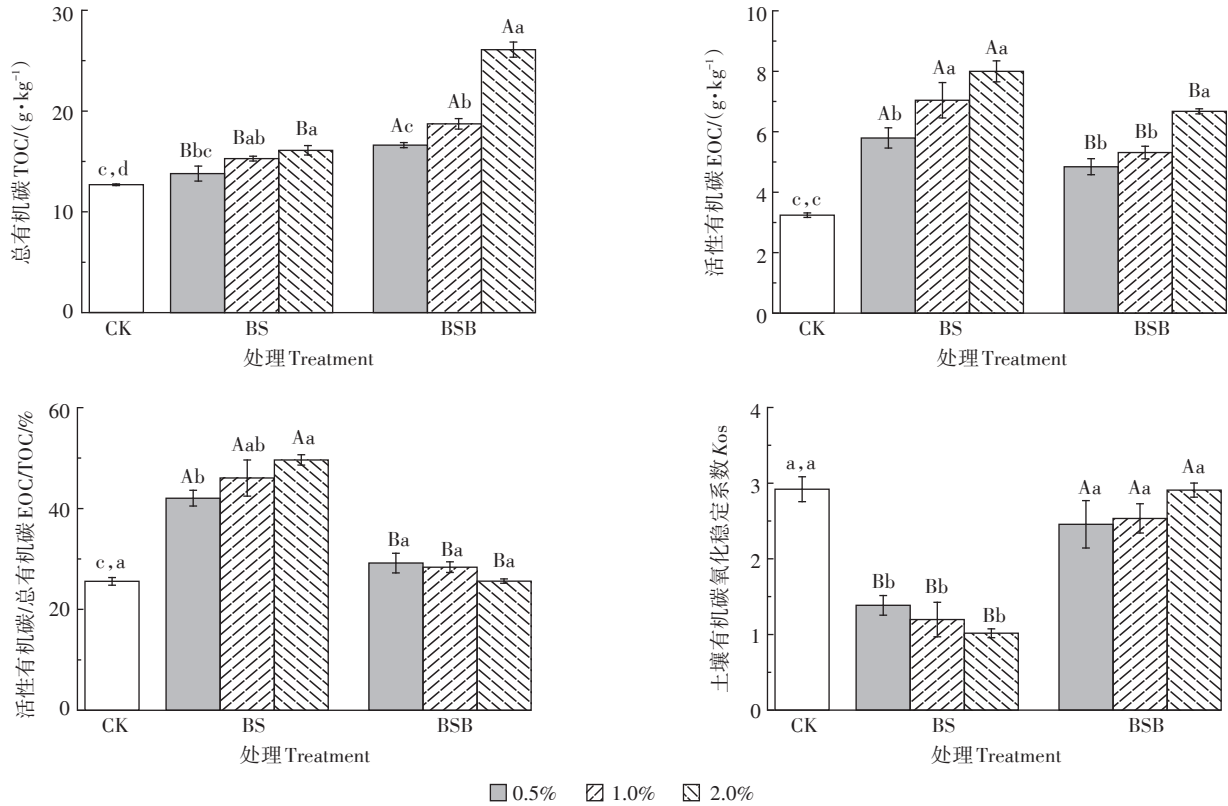
添加BS和BSB后,土壤TOC和EOC含量均发生显著变化(图1)。与CK相比,添加BS和BSB处理土壤TOC含量显著增加,且随着添加比例增加,TOC呈增加趋势,其中以BSB处理的增加趋势更为显著,增加了31.03%~105.69%。与CK相比,土壤EOC含量也表现为显著增加,随着各有机物料添加比例增加,

表2 香蕉秆及其生物炭对土壤碳库组成及碳库管理的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA on the effects of banana stem and its biochar on organic carbon fractions and carbon pool management

| 因素<br>Factor | 总有机碳<br>TOC | 活性有机碳<br>EOC | EOC/TOC   | 有机碳氧化稳定性<br>系数 $K_{os}$ | 碳库指数<br>$CPI$ | 碳库活度<br>$CPA$ | 碳库活度指<br>数 $CPAI$ | 碳库管理指<br>数 $CPMI$ |
|--------------|-------------|--------------|-----------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| $T$          | 153.820**   | 22.973**     | 138.624** | 170.644**               | 159.014**     | 167.684**     | 168.564**         | 430.153**         |
| $R$          | 63.552**    | 17.651**     | 0.624     | 0.260                   | 64.858**      | 2.726         | 2.774             | 71.906**          |
| $T \times R$ | 27.509**    | 0.645        | 4.384*    | 4.870*                  | 27.821**      | 6.070*        | 6.223*            | 20.358**          |

注: $T$ ,有机物料种类; $R$ ,添加比例。\* $P<0.05$ ;\*\* $P<0.01$ 。下同。  
Note:  $T$ , organic material type;  $R$ , application ratio. \* $P<0.05$ ; \*\* $P<0.01$ . The same below.



BS:香蕉秆;BSB:香蕉秆生物炭;不同大写字母表示不同有机物料相同添加比例之间差异显著( $P<0.05$ );不同小写字母表示相同有机物料不同添加比例之间差异显著( $P<0.05$ ),CK柱上第一个小写字母表示BS处理与CK处理的差异性比较,第二个小写字母表示BSB处理与CK处理的差异性比较。下同

BS:Banana stem;BSB:Banana stem biochar;Different capital letters indicate significant difference at the 0.05 level among same application ratio of different organic materials,different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level among different application ratios of same organic material;the first lowercase letter on the CK column indicates the difference between BS and CK treatment,and the second lowercase letter indicates the difference between BSB and CK treatments. The same below

图1 香蕉秆及其生物炭处理土壤碳库组成变化

Figure 1 Change of organic carbon fractions under banana stem and its biochar application treatments

EOC亦呈增加趋势,其中以BS处理的增加趋势更为显著,增加了78.81%~146.77%。

添加BS和BSB后,EOC/TOC和 $K_{os}$ 变化如图1所示,与CK相比,BS处理的EOC占比显著增加,且随添加比例增加,呈上升趋势,范围为42.05%~49.64%,而BSB处理对EOC占比影响不显著,随添加比例增加,呈不同程度的降低趋势,但差异不显著。BS处理土壤 $K_{os}$ 显著低于CK,且随添加比例增加,呈降低趋势,范围为52.56%~65.19%;而BSB处理未能显著改变土壤 $K_{os}$ 。

### 2.1.2 对土壤碳库管理的影响

土壤碳库管理指标如表3所示,BS和BSB处理均能不同程度提高各碳库管理指标,其中土壤CPI表现为BSB>BS>CK,土壤CPA、CPAI和CPMI表现为BS>BSB>CK。随着添加比例的增加,BS处理土壤CPI、CPA、CPAI和CPMI均呈上升趋势;BSB处理土壤CPI和CPMI呈显著上升趋势,而CPA和CPAI呈下降趋势。BSB处理能明显提高土壤TOC含量,增加土壤碳库容量,而BS处理可以提高土壤EOC含量,增加土壤CPA、CPAI和CPMI。

## 2.2 香蕉秆及其生物炭对土壤团聚体特征的影响

由表4可知,有机物料种类的主体效应对水稳性大团聚体( $WR_{0.25}$ )、结构破坏率(PAD)、不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )、团聚体稳定性指数(ASI)影响显著,添加比例的主体效应对大团聚体含量及团聚体稳定性指标均无影响显著,有机物料种类和添加比例的交互效应对

大团聚体的含量和团聚体稳定性指标均有显著影响。

### 2.2.1 对土壤大团聚体的影响

添加BS和BSB后土壤 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 变化如图2。BS和BSB处理均显著提高了团聚体 $DR_{0.25}$ 含量,分别以2.0%和0.5%的添加比例最高,2.0%添加比例的BS处理显著高于BSB处理。与CK相比,BS处理能提高团聚体 $WR_{0.25}$ 含量,其中1.0%和2.0%添加比例效果显著;而BSB处理的土壤 $WR_{0.25}$ 含量下降,其中1.0%添加比例降低趋势显著。BS及BSB处理对土壤团聚体PAD和 $E_{LT}$ 的影响结果不一致,与CK相比,BS处理能够降低团聚体PAD和 $E_{LT}$ ,其中1.0%和2.0%添加比例效果显著;而BSB处理土壤团聚体PAD和 $E_{LT}$ 表现出增加趋势,其中1.0%添加比例显著增加了32.26%和23.02%。

### 2.2.2 对土壤团聚体稳定性的影响

添加BS和BSB后,土壤团聚体ASI变化如图3。与CK相比,不同添加比例的BS处理均能提高团聚体ASI,增幅为9.50%~18.98%,其中以2%的添加比例效果最显著;而不同添加比例的BSB处理对土壤团聚体ASI表现为降低效果,降幅为1.02%~16.29%,其中1.0%添加比例降低趋势显著。

## 2.3 土壤团聚体稳定性与土壤碳库管理指标的相关性

将团聚体ASI与土壤碳库组成和碳库管理指标进行线性拟合(图4),结果发现ASI与TOC、CPI无显著相关性,与EOC呈显著正相关,与EOC/TOC、CPA、

表3 香蕉秆及其生物炭处理的土壤碳库管理指数

Table 3 Soil carbon pool management index under banana stem and its biochar application treatments

| 处理 Treatment | 添加比例 Ratio/% | CPI         | CPA            | CPAI        | CPMI           |
|--------------|--------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| CK           |              | 1.00±0(b,d) | 0.34±0.01(c,b) | 1.00±0(c,b) | 100.00±0(d,d)  |
| BS           | 0.5          | 1.09±0.06Bb | 0.73±0.05Ab    | 2.12±0.13Ab | 230.79±12.39Ac |
|              | 1.0          | 1.20±0.02Ba | 0.94±0.10Aa    | 2.74±0.29Aa | 329.85±5.09Ab  |
|              | 2.0          | 1.27±0.04Ba | 0.99±0.03Aa    | 2.87±0.09Aa | 364.78±10.67Aa |
| BSB          | 0.5          | 1.31±0.02Ac | 0.41±0.03Ba    | 1.20±0.07Ba | 157.05±2.37Bc  |
|              | 1.0          | 1.48±0.04Ab | 0.40±0.01Bab   | 1.15±0.04Ba | 170.42±4.69Bb  |
|              | 2.0          | 2.06±0.06Aa | 0.34±0.01Bb    | 1.00±0.02Bb | 206.37±5.96Ba  |

注:CK处理括号中第一个小写字母表示BS处理与CK处理的差异性比较,第二个字母表示BSB处理与CK处理的差异性比较。

Note: The first lowercase letter in parentheses indicates the difference between BS and CK treatment, the second lowercase letter indicates the difference between BSB and CK treatment.

表4 香蕉秆及其生物炭对土壤大团聚体及团聚体稳定性的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA on the effects of banana stem and its biochar on soil macroaggregate and soil aggregate stability

| 因素 Factor | 力稳性大团聚体 $DR_{0.25}$ | 水稳性大团聚体 $WR_{0.25}$ | 结构破坏率 PAD | 不稳定团粒指数 $E_{LT}$ | 团聚体稳定性指数 ASI |
|-----------|---------------------|---------------------|-----------|------------------|--------------|
| T         | 2.649               | 83.994**            | 77.519**  | 84.7466**        | 23.751**     |
| R         | 2.691               | 2.122               | 2.011     | 2.297            | 1.245        |
| T×R       | 27.812**            | 6.676*              | 6.067*    | 6.161*           | 6.587*       |

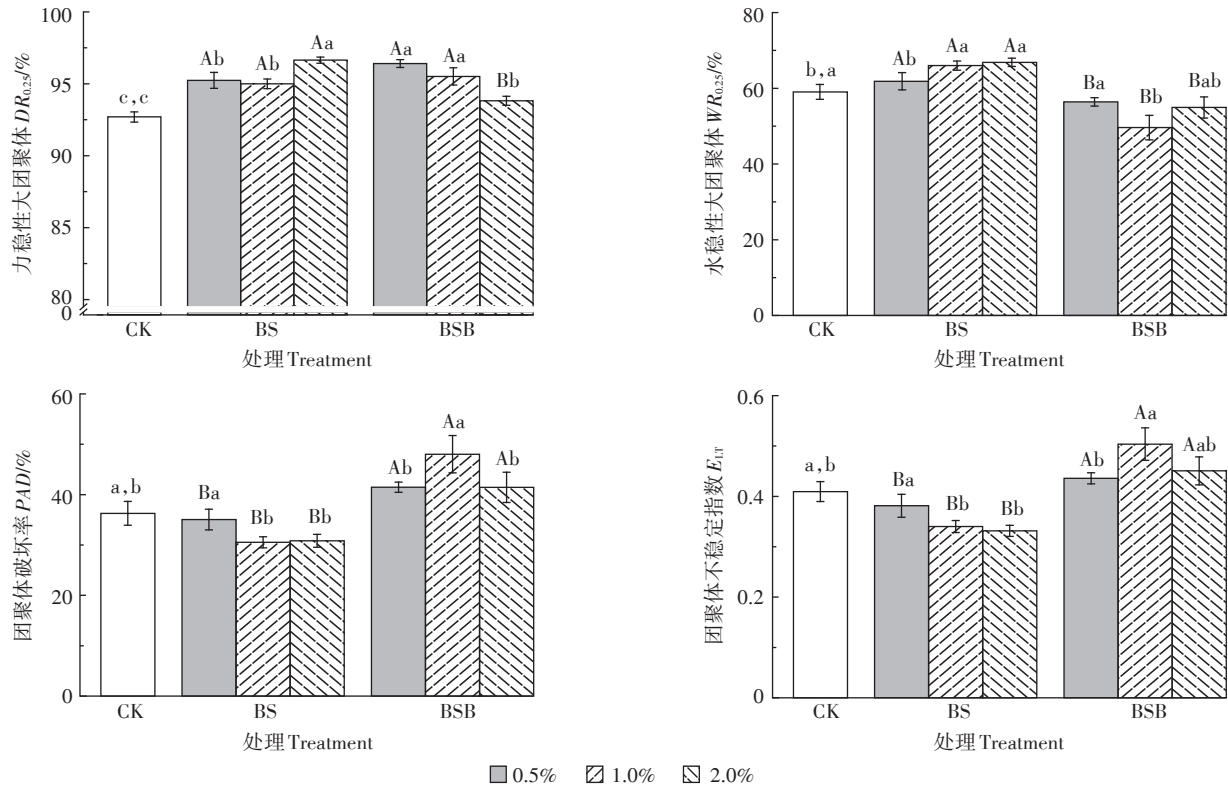


图2 香蕉秆及其生物炭处理土壤>0.25 mm大团聚体的变化

Figure 2 Change of >0.25 mm macroaggregate under banana stem and its biochar application treatments

CPAI 和 CPMI 呈极显著正相关,与 Kos 呈极显著负相关,说明土壤中活性有机碳的分配、土壤碳库活度和碳库管理是提高土壤团聚体稳定性的重要因素。

2.4 土壤团聚体稳定性、土壤碳库组成和土壤碳库管理指标的综合分析

利用 SPSS 软件对土壤团聚体稳定性、碳库组成和土壤碳库管理指标进行主成分分析,以特征值大于 1 为基准提取 3 个主成分(表 5)。第 1 主成分占总方差贡献率的 66.65%,特征值为 8.664;第 2 主成分占总

方差贡献率的 19.38%,特征值为 2.520;第 3 主成分占总方差贡献率的 9.26%,特征值为 1.204。这 3 个主成分能代表不同有机物料处理下土壤团聚体稳定性、碳库组成和碳库管理指标变化的 95.29% 的信息。

根据各主成分所占比重得到综合得分函数  $PC = 0.70 \times PC1 + 0.20 \times PC2 + 0.10 \times PC3$ ,计算出不同有机物料处理的综合得分,并对其进行排序,结果见表 6。2%BS (1.157) > 1.0%BS (0.768) > 0.5%BS (0.319) > 0.5%BSB (-0.308) > 2.0%BSB (-0.504) > 1.0%BSB (-0.509) > CK (-0.924)。主成分分析表明,有机物料的施用均能不同程度地改善土壤团聚体、碳库组成和碳库管理指标总体水平,其中以 2%BS 处理效果最佳。

土壤团聚体特征及土壤碳库组成、碳库管理的非

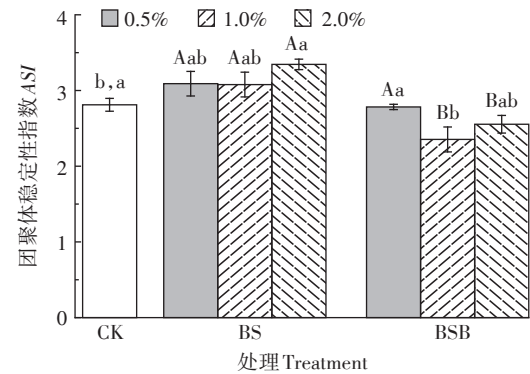


图3 香蕉秆及其生物炭处理土壤团聚体稳定性

Figure 3 Soil aggregate stability under banana stem and its biochar application treatments

表5 主成分分析的特征值和方差贡献率

| Table 5 Eigenvalues and contribution rate of variance of principal component analysis |                   |                            |                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------------|
| 主成分<br>Principal component                                                            | 特征值<br>Eigenvalue | 贡献率<br>Contribution rate/% | 累计贡献率<br>Cumulative contribution rate/% |
| PC1                                                                                   | 8.664             | 66.65                      | 66.65                                   |
| PC2                                                                                   | 2.520             | 19.38                      | 86.03                                   |
| PC3                                                                                   | 1.204             | 9.26                       | 95.29                                   |

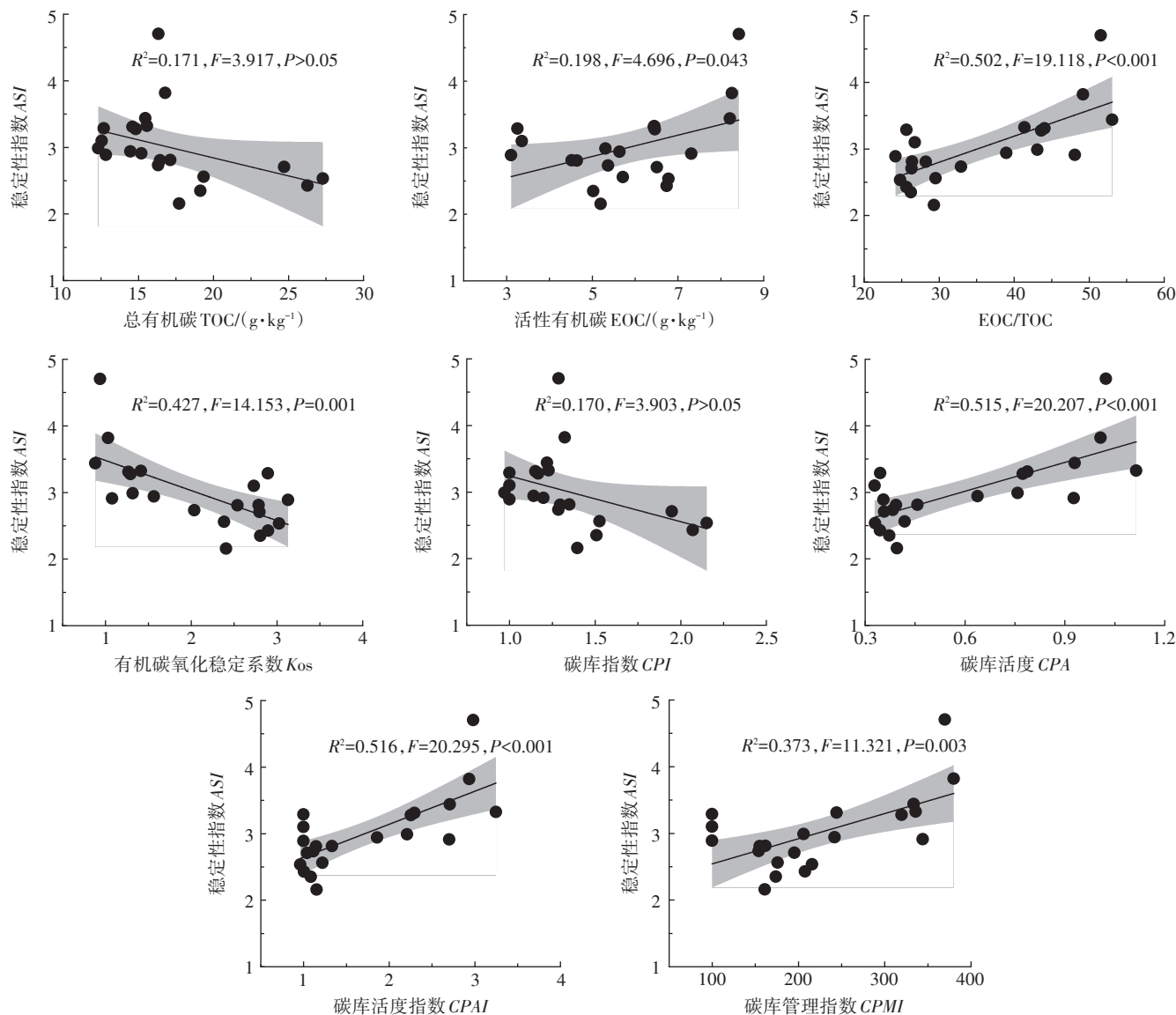


图4 土壤碳库组成、碳库管理指标与团聚体ASI的相关性

Figure 4 Correlation between organic carbon fractions and carbon pool management index with aggregate stability index

度量多维尺度分析(nMDS)见图5。本研究中 stress=0.026 8, 分析结果可靠,BS 处理分布在第一、四象限,BSB 处理分布在第二、三象限,且均与CK 有较大差异,说明土壤团聚体特征、碳库组成和碳库管理受到添加的有机物料种类的影响。2% 添加比例的BSB 处理较0.5%、1.0% 的添加比例远,说明土壤团聚体特征、碳库组成和碳库管理受BSB 添加比例的影响,而不同添加比例的BSB 处理之间距离较近,说明添加比例对土壤团聚体特征、碳库组成和碳库管理的影响较小。通过相似性检验分析发现,香蕉秆与其生物炭的差异对土壤团聚体特征、碳库组成和碳库管理的影响显著,且种类影响程度高于添加比例。

### 3 讨论

#### 3.1 香蕉秆及其生物炭对土壤碳库组成的影响

添加外源碳是农田综合管理的重要手段,其中作物秸秆等有机废弃物的资源化利用是改善土壤结构、培肥土壤的重要措施。土壤碳含量是各种环境因素综合影响下的外源碳输入和矿化分解之间的动态平衡结果<sup>[20]</sup>。本研究中,以外源碳的形式添加香蕉秆及其生物炭增加了土壤TOC 和EOC 含量,而且增幅与添加比例存在明显正相关关系。而孙元宏等<sup>[21]</sup>的研究表明外源碳的添加比例与土壤有机碳含量不是简单的线性关系,土壤碳库容量具有一定的阈值,超过

饱和值后外源碳的输入将不能显著改变土壤有机碳含量。本研究土壤为珠江三角洲地区双季水稻土,由于长期的连作,加之农民对有机肥施用缺乏客观的认识,导致土壤有机碳逐年下降,2%的最大添加量不足以满足土壤碳库容量,因此随着添加比例增加,土壤TOC和EOC呈显著增加趋势。在本研究中,BSB处理提升土壤TOC的效果高于BS,主要是高温裂解的香蕉秆,自身含碳比例大幅度提高,而且有机分子结构高度芳香化,因此具有很强的微生物稳定性<sup>[22]</sup>和长时间维持土壤碳稳定的潜力。EOC作为土壤有机碳周转最迅速的组分,是土壤生物可直接利用的碳组分,影响着外源碳在土壤中的矿化、迁移与降解<sup>[23-24]</sup>,其对香蕉秆处理更加敏感。这是因为香蕉秆含有许多易分解的氨基酸、多糖等可溶性碳组分<sup>[25]</sup>,而且较低的C:N有利于土壤微生物的利用,有助于土壤EOC的积累,这与XU等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。而香蕉秆生

物炭由于自身的生物稳定性,易矿化的有机碳比例较低,分解产生的EOC较少,因此随添加比例增加对土壤EOC提升效果不明显,EOC/TOC也随之呈下降趋势,这说明外源碳对EOC的影响不仅取决于自身含碳量的高低,可能更受外源矿化分解难易程度的影响<sup>[16]</sup>。本研究中Kos也证明了这一点,CK处理土壤Kos显著高于BS处理,说明添加BS更能增加土壤有机碳活性,提高土壤肥力。

3.2 香蕉秆及其生物炭对土壤碳库管理的影响

CPMI综合了CPI和CPAI,不仅可以通通过土壤有机碳含量和组分的变化来评价田间管理措施的好坏,而且可以表征土壤质量的高低。已有研究表明<sup>[27-28]</sup>,CPMI和土壤碳组分的变化与还田的有机物料种类、不同种植模式等农业措施密切相关。张影等<sup>[16]</sup>的研究表明,与添加水稻秸秆生物炭相比,水稻秸秆处理增加土壤CPA和CPMI效果更显著。魏夏新等<sup>[29]</sup>的研究表明,秸秆生物炭还田有利于稻田土壤TOC含量的提高,从而保持土壤较高的CPMI。在本研究中,与CK相比,BS和BSB处理的CPMI均得到不同程度的提高,其中BS处理的CPMI最高,说明相比于BSB,BS处理更有利于土壤碳库质量的提高。从添加比例看,土壤CPMI均随着香蕉秆及其生物炭添加比例的增加而显著增加,但两者之间也存在差异,BS处理是通过提高EOC/TOC来提高土壤CPMI,而BSB处理是通过提高土壤TOC来提高土壤CPMI。由此说明,香蕉秆及其生物炭对土壤碳库管理的影响机制之间存在差异。总体而言,各处理的CPMI差异显著,且随着香蕉秆及其生物炭添加比例增加,CPMI呈显著增加趋势,其中2%BS处理更有利于改善土壤碳库组成和土壤质量。

3.3 香蕉秆及其生物炭对土壤团聚体的影响

土壤有机碳作为土壤团聚体的重要胶结物质,添加外源碳能够改变土壤碳含量和碳库组成,从而影响

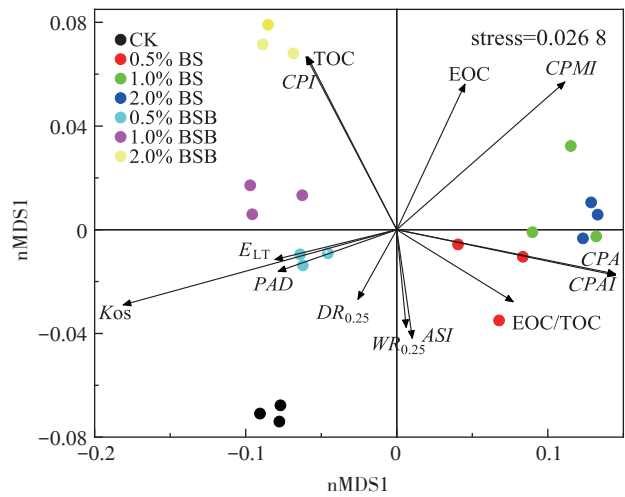


图5 土壤团聚体稳定性、土壤碳库组分和碳库管理指标的非度量多维尺度分析  
Figure 5 NMDS(non-metric multidimensional scaling) analysis of soil aggregate stability, soil fraction and soil carbon pool management index

表6 香蕉秆及其生物炭处理土壤团聚体稳定性、碳库组成和土壤碳库管理指标的综合得分

| Table 6 Comprehensive scores of soil aggregate stability, soil organic carbon fraction and carbon pool management index under banana stem and its biochar application treatments |              |        |        |        |                          |                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------------------------|----------------------------|
| 处理 Treatment                                                                                                                                                                     | 添加比例 Ratio/% | PC1    | PC2    | PC3    | 综合得分 Comprehensive score | 综合排名 Comprehensive ranking |
| CK                                                                                                                                                                               |              | -0.663 | -1.834 | -0.897 | -0.924                   | 7                          |
| BS                                                                                                                                                                               | 0.5          | 0.562  | -0.528 | 0.346  | 0.319                    | 3                          |
|                                                                                                                                                                                  | 1.0          | 1.133  | 0.047  | -0.344 | 0.768                    | 2                          |
|                                                                                                                                                                                  | 2.0          | 1.462  | 0.565  | 0.201  | 1.157                    | 1                          |
| BSB                                                                                                                                                                              | 0.5          | -0.505 | -0.202 | 0.892  | -0.308                   | 4                          |
|                                                                                                                                                                                  | 1.0          | -1.042 | 0.484  | 1.242  | -0.509                   | 6                          |
|                                                                                                                                                                                  | 2.0          | -0.947 | 1.469  | -1.440 | -0.504                   | 5                          |

土壤团聚体的形成与稳定。本研究中,BS处理能提高土壤 $WR_{0.25}$ 含量,而BSB处理的 $WR_{0.25}$ 含量表现为降低趋势,这与SUN等<sup>[30]</sup>的研究结果不一致,但也有研究表明<sup>[31]</sup>,短期内生物炭不能显著改变土壤团聚体成分分布,出现这种差异的原因可能是试验所用生物炭原料种类、供试土壤理化性质以及试验时间长短的不同。 $ASI$ 表征土壤团聚体经湿筛后,相较于干筛团聚体,保存在当前粒径的概率,其数值越大,土壤颗粒团聚效果越好,稳定性越高。与土壤 $WR_{0.25}$ 含量表现规律一致,BS处理能显著增加团聚体 $ASI$ ,而BSB处理则呈降低趋势。有研究表明<sup>[32]</sup>,土壤EOC可作为瞬时性胶结剂,短期内团聚土壤颗粒,促进土壤团聚体形成,而非活性有机碳利用程度低,对土壤团聚体的改善效果不明显。香蕉秆含有的较多易分解的氨基酸、多糖等可溶性碳组分,丰富了土壤活性有机碳库,进而加速分解有机物料产生腐植酸等有机胶结剂<sup>[23]</sup>,团聚土壤颗粒形成大团聚体。而香蕉秆生物炭芳香化,表现出高度的生物和化学惰性,难以被微生物分解利用<sup>[22]</sup>,然而生物炭丰富的比表面积又能为微生物种群的生长繁殖提供生存空间,一定程度促进了微生物活动,加之外源碳的共同作用,诱导了土壤有机碳的激发效应,减少了连接大团聚体之间的有机胶结物质,从而导致了土壤团聚体稳定性降低。结合相关性分析结果,团聚体 $ASI$ 与TOC无显著相关性,与EOC呈显著正相关,与EOC/TOC呈极显著正相关,与Kos呈极显著负相关,说明外源碳的添加不是通过TOC,而是通过改变土壤EOC含量影响碳库组成,进而影响土壤团聚体稳定性,这与张琦等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。

PCA和nMDS的综合分析表明,香蕉秆及其生物炭均对土壤团聚体特征、碳库组成和碳库管理的综合水平起促进作用,而添加比例影响较小。总体而言,BS处理效果明显优于BSB处理,其中以2%BS处理最佳。

## 4 结论

(1)添加香蕉秆能增加土壤大团聚体含量,提高团聚体稳定性,而添加香蕉秆生物炭短期内则不利于土壤团聚体稳定性的提高。相关性分析表明,添加外源碳是通过提高土壤活性有机碳的含量,进而改变土壤活性有机碳的比例来改善土壤结构。

(2)添加香蕉秆及其生物炭处理均增加了土壤总有机碳、活性有机碳含量和碳库管理指数,降低了土壤氧化稳定系数,能改善珠江三角洲双季水稻土碳库质量。

(3)添加香蕉秆更有利于土壤结构改善和土壤活性有机碳的积累,综合分析结果表明,2%香蕉秆添加量具有最佳的土壤培肥效果。

## 参考文献:

- [1] HESLOP-HARRISON J S. Domestication, genomics and the future for banana[J]. *Annals of Botany*, 2007, 100(5): 1073-1084.
- [2] 张锐, 梁雨峰, 邢洁洁, 等. 不同耕层结构对海南香蕉地砖红壤物理特性的影响[J]. 农机化研究, 2022, 44(2): 214-218. ZHANG R, LIANG Y F, XING J J, et al. Effect of different plough layer structure on physical properties of banana latosol in Hainan Province[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(2): 214-218.
- [3] 杨永智, 王树明, 杨琴. 香蕉茎叶资源的开发利用研究[J]. 现代农业科技, 2012, 8(4): 294-295. YANG Y Z, WANG S M, YANG Q. Development and utilization of banana stalk-leaves resources[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012, 8(4): 294-295.
- [4] GOWDA N K S, RAMANA J V, PRASAD C S, et al. Micronutrient content of certain tropical conventional and unconventional feed resources of southern India[J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2004, 36(1): 77-94.
- [5] 韩丽娜, 李建国. 香蕉茎叶残体综合利用研究进展[J]. 东南园艺, 2006, 136(1): 18-20. HAN L N, LI J G. Research progress on comprehensive utilization of banana stalk-leaves residues[J]. *Southeast Horticulture*, 2006, 136(1): 18-20.
- [6] BIRDIE S P, HOE S T, FOOK Y C, et al. Banana by-products: An under-utilized renewable food biomass with great potential[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2014, 51(12): 3527-3545.
- [7] TANWEER A, MOHAMMED D. Prospects of banana waste utilization in wastewater treatment: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 330-348.
- [8] 徐广平, 滕秋梅, 沈育伊, 等. 香蕉茎叶生物炭对香蕉枯萎病防控效果及土壤性状的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2373-2384. XU G P, TENG Q M, SHEN Y Y, et al. Effects of banana stem-leaves biochar on soil properties and control of banana fusarium wilt[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(12): 2373-2384.
- [9] 吕娜娜, 沈宗专, 陶成圆, 等. 蕉园土壤及香蕉植株不同组织可培养细菌的群落特征[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(6): 1088-1097. LÜ N N, SHEN Z Z, TAO C Y, et al. The characteristics of culturable bacterial community in soils and tissue parts of banana[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(6): 1088-1097.
- [10] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农学报, 2011, 19(2): 447-455. LIU Z L, YU W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 447-455.
- [11] AANAN M, XU H, SVED A A S, et al. Long-term fertilization alters chemical composition and stability of aggregate-associated organic carbon in a Chinese red soil: Evidence from aggregate fractionation, C mineralization, and  $^{13}\text{C}$  NMR analyses[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21: 2483-2496.
- [12] 于维水, 王碧胜, 王士超, 等. 长期不同施肥下我国4种典型土壤

- 活性有机碳及碳库管理指数的变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2018(2):29-34. YU W S, WANG B S, WANG S C, et al. Characteristics of soil labile organic carbon and carbon management index under different long-term fertilization systems in four typical soils of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(2):29-34.
- [13] 李虎, 吴景贵, 李建明. 玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9):1944-1953. LI H, WU J G, LI J M, et al. Effects of strip composting for corn straw combined with livestock manure on soil active organic carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9):1944-1953.
- [14] WANG Q Y, WANG Y, WANG Q C, et al. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143(12):1-6.
- [15] 陈晓旋, 安婉丽, 陈优阳, 等. 模拟酸雨对福州平原水稻田土壤碳库及碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5):294-302. CHEN X X, AN W L, CHEN Y Y, et al. Effect of simulated acid rain on soil carbon pool and soil carbon pool management index of paddy field in Fuzhou Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):294-302.
- [16] 张影, 刘星, 任秀娟, 等. 秸秆及其生物炭对土壤碳库管理指数及有机碳矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):153-159, 165. ZHANG Y, LIU X, REN X J, et al. Effect of straw and biochar on soil carbon pool management index and organic carbon mineralization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3):153-159, 165.
- [17] 张甘霖. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京:科学出版社, 2012. ZHANG G L. Methods for laboratory analysis of soil surveys[M]. Beijing:Science Press, 2012.
- [18] 石辉. 转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3):91-95. SHI H. Using transition matrix to evaluate stability of soil aggregates[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(3):91-95.
- [19] 张琦, 王淑兰, 王浩, 等. 深松与免耕频次对黄土旱塬春玉米田土壤团聚体与土壤碳库的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(14):2840-2851. ZHANG Q, WANG S L, WANG H, et al. Effect of subsoiling and no-tillage frequencies on soil aggregate and carbon pools in the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(14):2840-2851.
- [20] 秦海龙. 有机物料施加对农田土壤有机碳组分和肥力特征的影响[D]. 广州:华南农业大学, 2018. QIN H L. Effects of organic material application on soil organic carbon fraction and fertility characteristic of farmland[D]. Guangzhou:South China Agriculture University, 2018.
- [21] 孙元宏, 高雪莹, 赵兴敏, 等. 添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4):1009-1017. SUN Y H, GAO X Y, ZHAO X M, et al. Effect of corn stalk incorporation on organic of heavy fraction composition of soil aggregates in albic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4):1009-1017.
- [22] LIAO F, YANG L, LI Q, et al. Characteristics and inorganic N holding ability of biochar derived from the pyrolysis of agricultural and forestal residues in the southern China[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 134:544-551.
- [23] 石丽红, 李超, 唐海明, 等. 长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3):921-930. SHI L H, LI C, TANG H M, et al. Effect of long-term fertilizer management on soil labile organic carbon fractions and hydrolytic enzyme activity under a double-cropping rice system of southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3):921-930.
- [24] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 岷江流域不同土地利用方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(9):1617-1624. HU Y, LI Y, HOU Y L. The variation of soil organic carbon fractions and soil enzyme activity of different land use types in Minjiang River valley[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(9):1617-1624.
- [25] PADAM B S, TIN H S, CHYE F Y, et al. Banana by-products: An under-utilized renewable food biomass with great potential[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2014, 51(12):3527-3545.
- [26] XU L Y, WANG M Y, TIAN Y T, et al. Relationship between macropores and soil organic carbon fractions under long-term organic manure application[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(11):1344-1354.
- [27] 苑广源, MUNYAMPIRWA T, 毛丽萍, 等. 16年保护性耕作措施对粮草轮作系统土壤碳库及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):252-258, 267. YUAN G Y, MUNYAMPIRWA T, MAO L P, et al. Effect of conservational tillage measures on soil carbon pool and stability in a winter forage-crop rotation system on the loess plateau of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3):252-258, 267.
- [28] 杨苏, 刘耀斌, 王静, 等. 不同有机物料投入下黄河故道土壤有机碳积累特征的研究[J]. 土壤, 2021, 53(2):361-367. YANG S, LIU Y B, WANG J, et al. Soil organic carbon accumulation in old riverway of Yellow River under different organic materials inputs[J]. *Soils*, 2021, 53(2):361-367.
- [29] 魏夏新, 熊俊芬, 李涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7):2373-2380. WEI X X, XIONG J F, LI T, et al. Effect of different organic amendments on soil organic carbon and its labile fractions in the paddy soil of a double rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7):2373-2380.
- [30] SUN Q, MENG J, LAN Y, et al. Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth[J]. *Catena*, 2021, 205:105460.
- [31] 黄伟豪, 秦海龙, 卢瑛, 等. 香蕉茎秆及其生物炭对珠江三角洲土壤团聚体特征的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3):413-420. HUANG W H, QIN H L, LU Y, et al. Effect of banana stem and its biochar application on soil aggregate characteristics in the Pearl River Delta[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3):413-420.
- [32] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002(1):81-85. LU J W, LI Z B. Advance in soil aggregate study[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002(1):81-85.