

热带典型有机物料对砖红壤理化性质及微生物群落结构的影响

宋书会^{1,2}, 焦 静¹, 李普旺¹, 王 超¹, 何祖宇¹, 周 闯¹, 刘运浩¹, 张宇晗¹,
李云娜³, 杨子明^{1*}

1. 中国热带农业科学院亚热带作物研究所/海南省热带作物营养重点实验室, 广东湛江 524091; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; 3. 云南省农业科学院茶叶研究所, 云南昆明 650205

摘 要: 为了明确热带典型有机物料对砖红壤理化性质及微生物群落结构的影响, 本研究选取菠萝茎叶、椰糠、香蕉茎叶、有机肥为供试材料, 开展为期 90 d 的混土培养试验, 以砖红壤为对照, 分析有机物料对土壤 pH、有效磷, 团聚体、微生物群落结构变化及酶活性的影响。结果表明, 香蕉茎叶和有机肥能够提高土壤 pH 和有效磷含量, 菠萝茎叶短期内加剧土壤酸化。菠萝茎叶和香蕉茎叶均有助于促进直径>0.25 mm 团聚体的形成。菠萝茎叶、香蕉茎叶和有机肥均能提高土壤木糖苷酶、纤维素酶和亮氨酸氨基肽酶活性, 以及土壤 G⁺菌、G⁻菌、真核生物和真菌的数量, 其中香蕉茎叶和菠萝茎叶培养的土壤中 G⁺菌平均占比为 27.8%, 高于 CK 中 G⁺菌 (21.4%)。与 CK 相比, 香蕉茎叶、菠萝茎叶、椰糠、有机肥中的真菌比例分别提高 300.2%、232.1%、165.0%和 51.9%。施用有机肥明显提高 AM 真菌的比例, 菠萝茎叶和香蕉茎叶均有助于增加土壤中的真核生物数量。投入有机物料中的半纤维素含量和土壤 pH 分别解释了 70.8%和 8.5%的微生物群落结构变异。

关键词: 热带; 有机物料; 砖红壤; 理化性质; 微生物群落

中图分类号: S154.36 文献标识码: A

Effects of Tropical Typical Organic Materials on Physicochemical Properties and Microbial Community Structure of Laterite Soils

SONG Shuhui^{1,2}, JIAO Jing¹, LI Puwang¹, WANG Chao¹, HE Zuyu¹, ZHOU Chuang¹, LIU Yunhao¹,
ZHANG Yuhan¹, LI Yunna³, YANG Ziming^{1*}

1. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Tropical Crops Nutrition of Hainan Province, Zhanjiang, Guangdong, 524091, China; 2. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong, 510642, China; 3. Tea Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yunnan, Kunming, 650205, China

Abstract: In order to clarify the effects of tropical organic materials on the physicochemical properties and microbial community structure of latosol, pineapple leaves, banana stems, coconut husk and organic fertilizer were selected as the test materials in this study and carried out organic materials-soil mixture incubation experiment with 90-day. After that, the effects of organic materials on soil pH, available phosphorus, aggregate, microbial community structure change and enzyme activity were compared with those of CK. The results showed that banana stems and organic fertilizer could increase soil pH value and available phosphorus content, and pineapple leaf aggravated soil acidification in the short term. Pineapple leaves and banana stems were helpful to promoting the formation of diameter > 0.25 mm aggregates. Pineapple leaves, banana stems and organic fertilizer increased the activities of soil xylanase, cellulase and leucine aminopeptidase, as well as the G⁺ strains, G⁻ strains, eukaryotes and fungi in soil. The average proportion of G⁺ strains in banana stems and pineapple leaves was 27.8% higher than that in CK (21.4%). Compared with CK, the proportion of

收稿日期 2022-04-24; 修回日期 2022-06-23

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 320QN324, No. 320MS090, No. 421MS078)。

作者简介 宋书会 (1989—), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 土壤改良修复新材料。*通信作者 (Corresponding author): 杨子明 (YANG Ziming), E-mail: yangziming2004@163.com。

fungi in banana stalk, pineapple leaf, coconut bran and organic fertilizer increased by 300.2%, 232.1%, 165.0% and 51.9%, respectively. The application of organic fertilizer significantly increased the proportion of AM fungi, while pineapple leaves and banana stems helped to increase the number of eukaryotic organisms in soil.

Keywords: tropical; organic materials; laterite soil; physicochemical properties; microbial community structure

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.04.021

砖红壤广泛分布于我国南方热带、亚热带地区, 由于风化和淋溶强烈导致其铁铝氧化物含量高, 土壤粘重, pH 低。虽然近年来肥料施用量不断提高, 但砖红壤的肥力低、结构性差仍是限制热区作物产量的主要因素。不同的土地利用方式和管理措施影响土壤物理结构及化学性质, 特别是有机物料的投入, 能够显著提高土壤有机质和孔隙度, 改善土壤团聚体结构和数量, 提高土壤保水保肥性能, 使投入有机物料成为改良土壤最主要和最常见的措施^[1-5]。

我国有机物料种类较多, 主要包括作物秸秆、动物粪便、厩肥以及经过高温堆沤或者普通堆沤制得的有机肥等^[6-7]。有机物料投入土壤后不断矿化, 向土壤中释放多种营养元素, 提高土壤养分的有效性, 可实现化肥的部分替代。不同的作物秸秆组成成分不同, 还田替代化肥以及对土壤理化性质改良的潜力也不同^[8]。而不同的有机物料其碱度和减缓土壤酸化的能力也有差异, 其大小顺序为: 高温堆肥以及厩肥的作用效果最好, 其次为普通堆肥、新鲜粪便、绿肥、豆科秸秆, 而谷物秸秆组成成分相对简单, 限制了其对土壤酸化的减缓效果^[8]。前期关于有机物料对土壤改良效果的研究主要集中于小麦、玉米、水稻等常规作物秸秆及动物腐熟粪肥等^[6, 8-11]。如, 李腾等^[6]研究发现, 豆秆能够有效增加土壤碱解氮质量分数, 其作用效果优于鸡粪、猪粪, 玉米秸秆能够显著提高土壤有效磷质量分数, 其次为粪肥单施、秸秆与粪肥混施。王超等^[12]研究发现, 单施鸡粪对增加团聚体机械稳定性效果最好, 鸡粪与稻秆生物炭混施对团聚体水稳定性提升效果最好。施用不同的有机物料分别产生了不同的真菌群落组成和相关酶活性, 进而改变土壤不同活性有机碳的含量^[9]。可见, 施用有机物料能够提高土壤速效养分含量、改善土壤团聚体结构和微生物群落组成, 混施不同种类的有机物料对土壤产生不同的改良效果^[6, 12]。

热带地区水热资源充足, 动、植物资源丰富, 是我国农业种植和畜禽养殖的重要区域。动、植

物类农业废弃物种类丰富, 量大难以消纳, 而不合理使用也会对周边环境带来潜在的污染风险, “取之于田, 用之于田”是农业废弃物循环利用的重要途径之一^[12]。菠萝茎叶、椰糠、香蕉茎叶等有机物料属于热带亚热带地区典型的农业废弃物。菠萝茎叶中含有大量的叶绿素、蛋白质、淀粉、葡萄糖以及多达 20 种的酚类化合物^[13]; 香蕉茎秆营养物质丰富, 干物质中蛋白质含量可达 10%以上, 并含有粗纤维、脂肪, 富含胡萝卜素、尼克酸等多种维生素等^[14]。在我国菠萝主要种植区域, 大部分的菠萝茎叶还田利用, 而香蕉茎叶因为其含水量高、体积大、收集利用劳动强度高, 主要采用直接还田或者堆沤还田的利用方式^[14]。但是, 目前这些热带特有的有机物料投入土壤后, 对土壤理化性质及微生物群落结构的影响尚不清楚。本研究选取 3 种热带典型有机物料, 采用田间埋袋试验培养 90 d, 研究热带典型有机物料腐解后对土壤 pH、有效磷、团聚体结构、微生物群落结构及酶活性的影响, 为红壤培肥、改良及热带地区农业废弃物的高效资源化利用提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验区概况 试验地点设在中国热带农业科学院南亚热带作物研究所试验基地, 位于广东省湛江市, 该区域年平均气温为 22.7~23.5 °C, 属于热带北缘季风气候。年平均降雨量为 1395.5~1723.1 mm, 年平均日照时数为 1714.8~2038.2 h。试验期间试验田土壤最低温度为 17.6 °C, 最高温度为 25.7 °C, 平均温度为 20.7 °C。前茬种植玉米, 试验当年除试验区域外, 周边均种植玉米。

1.1.2 供试材料 供试土壤为砖红壤, 前茬玉米收获后, 取 0~20 cm 耕层土壤, 风干, 磨碎, 过 2 mm 筛, 备用。供试土壤基本理化性质为: pH 为 5.74, 电导率 40.30 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 速效磷 14.32 mg/kg, 速效钾 73.63 mg/kg, 碱解氮 88.54 mg/kg, 交换性钙 443.08 mg/kg, 交换性镁 75.09 mg/kg, 有效态猛

33.92 mg/kg, 有效态铁 15.00 mg/kg, 有效铜 1.50 mg/kg, 有效锌 0.87 mg/kg, 碳含量 1.41%, 氮含量 0.12%, $\delta^{13}\text{C}$ 值 -20.79, $\delta^{15}\text{N}$ 值 6.98。

3 种热带典型的有机物料: 菠萝茎叶、香蕉茎叶、椰糠为供试材料, 常规有机肥为对照。菠萝茎叶(卡因品种地上部)和香蕉茎叶(花期的粉蕉植株地上部)分别取自中国热带农业科学院南亚热带作物研究所试验基地, 自来水冲洗, 铡刀切碎, 晒干, 粉碎机二次粉碎, 过 2 mm 筛, 备用; 椰糠为海南免泡散装纯椰糠; 有机肥为中国热带农业科学院南亚热带作物研究所研制的通用型产品(热农丰)。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 采用田间埋袋方法开展相关研

究。将菠萝茎叶、香蕉茎叶、椰糠、有机肥 4 种材料, 与土壤 2% 的量(物料碳与土壤质量)混合后装入 200 目尼龙网袋, 每袋装土 250 g, 以不投入有机物料的纯土为空白对照。用硫酸铵调节 C/N 比为 23:1 以满足微生物的最适生长需求, 有机物料性质、用量及硫酸铵用量见表 1。试验共设 5 个处理, 每处理设置 4 次重复, 共 20 袋。埋袋试验小区面积 4 m², 长×宽=2.0 m×2.0 m。埋袋时挖出 0~20 cm 土壤, 修平小区四周与底部, 扎紧尼龙网袋口以 10 cm 间距平铺于底部, 然后将挖出的土回填, 压实。菠萝茎叶以 PAL 表示, 香蕉茎叶以 BAS 表示, 椰糠以 CCH 表示, 有机肥以 OF 表示。

表 1 有机物料的碳、氮含量
Tab. 1 C, N content of organic materials

有机物料 Organic material	C 含量 C content/%	N 含量 N content/%	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	有机物料用量 Amount of organic material/g	硫酸铵用量 Amount of (NH ₄) ₂ SO ₄ /g
菠萝茎叶	41.79	0.57	-14.63	0.22	11.96	0.62
香蕉茎叶	37.78	0.34	-24.05	5.05	13.23	0.73
椰糠	27.93	0.19	-27.42	4.18	17.90	0.78
有机肥	27.47	2.35	-21.09	6.12	18.20	0.00

1.2.2 样品采集与分析 培养 90 d 后破坏性取样, 将整个小区挖开, 小心取出全部尼龙网袋, 用刷子刷去尼龙网袋表面附着的泥土。取 150 g 尼龙网袋中培养的土壤, 风干磨碎, 分别过 2 mm 和 100 目筛, 供土壤理化分析测试用。另取 100 g 尼龙网袋中培养的土壤, 置于 -20 °C 冰箱保存, 用于分析土壤微生物群落和酶活性。

1.2.3 指标评价 (1) 有机物料组成测定。中性洗涤纤维: 称取生物质样品 2.00 g, 加入 100 mL 中性洗涤剂, 数滴乙二醇乙醚和 0.5 g 无水亚硫酸钠。加热至微沸, 保持 1 h。砂芯漏斗抽滤, 沸水冲洗, 再用 20 mL 丙酮冲洗。所得固体残渣于 105 °C 烘干至恒重, 记录重量 W₁, 此时的固体残渣主要为纤维素、半纤维素、木质素、硅酸盐。

酸性洗涤纤维: 向固体残渣中加入 100 mL 酸性洗涤剂, 数滴乙二醇乙醚和 0.5 g 无水亚硫酸钠。加热至微沸, 保持 1 h。砂芯漏斗抽滤, 沸水冲洗, 再用 20 mL 丙酮冲洗。所得固体残渣于 105 °C 烘干至恒重, 记录重量 W₂, 此时的固体残渣主要为纤维素、木质素、硅酸盐。

酸性洗涤木质素: 向固体残渣中加入 72% 硫酸, 20 °C 消化 3 h, 抽滤上述溶液, 热水洗涤至

流出液体为中性。然后将固体置于 105 °C 烘干至恒重, 记录重量 W₃, 此时的残渣主要为木质素、硅酸盐。

灰分: 固体残渣移入坩埚中(坩埚重 W₀), 放入马弗炉中于 550 °C 焙烧 3 h, 称重记录重量 W₄。此时的残渣主要为硅酸盐。试剂配制、测试过程及含量计算均参照范式法^[15]。

(2) 土壤 pH 和有效磷测定。按照土水比(m/V) 1:2.5 摇匀, 采用酸度计测定 pH; 采用氟化铵-盐酸浸提法^[16]测定有效磷。

(3) 土壤团聚体分级。采用湿筛法测定, 称取 50.0 g 风干土壤置于土筛中, 25 °C 水中浸泡 5 min, 开启团聚体筛分仪, 在 2 min 内上下摆动 50 次, 摆幅 3 cm。使土壤依次通过 0.250、0.053 mm 筛, 分别获得粒径 >0.25 mm 的水稳定性大团聚体, 粒径为 0.250~0.053 mm 的水稳定性微团聚体和粒径 <0.053 mm 的粉-黏团聚体。各粒级团聚体于 60 °C 烘干, 称重^[17]。

(4) 土壤微生物群落结构组成。采用磷脂脂肪酸法测定。①总脂提取: 取 3 g 土壤样品置于离心管中, 加入 20.00 mL 单相提取试剂(氯仿: 甲醇: 柠檬酸=1:2:0.8), 混匀, 离心, 取上清

液于玻璃试管，然后依次加入 4.19 mL 柠檬酸溶液、5.13 mL 氯仿，静置过夜；用吸管吸取下层氯仿相于新玻璃试管中，氮气吹干，4 °C 保存。

②磷脂分离：用 5 mL 氯仿活化硅胶小柱；取 200 μ L 氯仿加入含有样品总脂的玻璃试管中，充分溶解后，用长嘴玻璃吸管移至已活化的硅胶小柱上；依次用 10 mL 氯仿和 10 mL 丙酮分别洗去中性脂和糖脂；用 10 mL 甲醇淋洗并用玻璃试管收集磷脂，氮气吹干。

③磷脂甲酯化：在含有磷脂的试管中加入 1.00 mL 甲苯甲醇混合液（甲苯：甲醇=1：1）和 1 mL 的 0.2 mol/L KOH 甲醇溶液（用甲醇配制），37 °C 水浴 15 min；加入 2 mL ddH₂O, 0.3 mL 冰醋酸，混匀；然后加入 2 mL 正己烷漩涡混匀 30 s，静置，取上层正己烷相于 2 mL 色谱进样瓶；吹氮浓缩干燥，4 °C 下保存。

④采用美国 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统平台进行 PLFA 分析鉴定，所有测试均采用标准品进行校正^[18]。

(5) 土壤酶活性测定^[19-20]。纤维素酶和木糖苷酶活性采用 PNP 法测定，亮氨酸氨基肽酶和多酚氧化酶活性采用分光光度法测定。

纤维素酶和木糖苷酶活性：用乙酸盐缓冲液（pH 为 5.5）分别配制纤维素酶和木糖苷酶底物。称取 0.2 g 冻干土置于 2 mL 离心管中，加入 0.8 mL 乙酸盐缓冲液（pH 为 5.5）和 0.2 mL 底物，对照组不加底物，混匀；37 °C 恒温培养 3 h；反应完成后加 0.2 mL 0.5 mol/L CaCl₂ 和 0.8 mL 0.5 mol/L NaOH 溶液，离心，测定 410 nm 波长吸光度，计算土壤酶活性。

亮氨酸氨基肽酶活性：配制 50 mmol/L pH 为 7.8 的磷酸缓冲液和 10 mmol/L L-亮氨酸-硝基苯胺溶液。取 0.2 g 冻干土置于 2 mL 试管中，加入 5 μ L 甲苯，混匀，静置 15 min。每个样品 3 个重复，1 个对照；各加入 1800 μ L 缓冲液，在实验组加入 60 μ L 的 L-亮氨酸-硝基苯胺溶液，混匀，30 °C 水浴培养 1 h，培养结束后煮沸 5 min，冷却，离心，测定 405 nm 波长吸光度，计算土壤酶活性。

土壤多酚氧化酶活性：用乙酸盐缓冲液（pH 为 5.5）配制 5 mmol/L 左旋多巴（L-DOPA）作为酶反应底物。称取 0.1 g 冻干土置于离心管中，加入 0.6 mL 乙酸盐缓冲液（pH 为 5.5）、0.6 mL 0.3% H₂O₂ 和 0.6 mL 的 5 mmol/L 左旋多巴溶液。对照组不加左旋多巴溶液。混匀，置于 37 °C 恒温培养 1 h，离心。测定反应体系上清液在 460 nm 波长

的吸光度，计算土壤酶活性。

试验所用无机试剂均为分析纯级，有机试剂均为色谱纯级。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件对试验数据进行处理和作图，采用 SPSS 24.0 软件进行数据分析，运用单因素方差分析（One-way ANOVA）比较差异，利用邓肯（Duncan's）法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 有机物料组成成分

由表 2 可知，不同材料的组成成分差异较大，有机肥是秸秆、粪肥等农业废弃物经过腐熟发酵、微生物分解等的产物，糖脂类组分占 60.00% 以上；菠萝茎叶、香蕉茎叶、椰糠 3 种有机物料间的糖脂类物质含量无显著性差异，平均含量为 41.10%。香蕉茎叶和菠萝茎叶中的半纤维素含量占 30.00% 以上，均显著高于椰糠和有机肥。椰糠中木质素含量达 25.00% 以上，香蕉茎叶和有机肥中的木质素含量较低，平均含量仅为 1.75%。菠萝茎叶、香蕉茎叶、椰糠中的糖脂类组分与半纤维素+纤维素+木质素三者总和的比例分别为 1：1.1、1：1.4、1：1.4，平均为 1：1.3，而有机肥中的比例为 1：0.4，有机肥组分显著区别于菠萝茎叶、香蕉茎叶和椰糠。菠萝茎叶、香蕉茎叶、椰糠 3 种材料中半纤维素与纤维素+木质素二者总和的比例分别为 1.4：1、1.6：1 和 0.2：1，可见，椰糠在该组分上与菠萝茎叶和香蕉茎叶显著不同。椰糠和有机肥中的灰分含量较高，是菠萝茎叶、香蕉茎叶中灰分的 2.6~3.6 倍（表 2）。

2.2 热带典型有机物料对土壤养分含量的影响

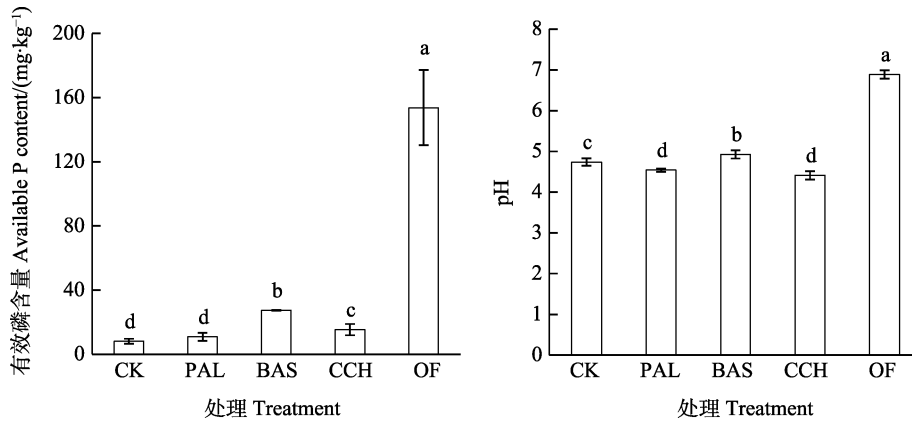
土壤养分是衡量土壤肥力的重要指标，对农业生产起到重要作用，特别是南方广泛分布的红壤、砖红壤，土壤铁铝氧化物含量较高，大多呈酸性，且有效磷含量较低。研究表明，各有机物料腐解对土壤有效磷和 pH 的影响存在较大差异（图 1）。有机肥对提高土壤有效磷和 pH 的作用效果最显著。与不投入有机物料的对照土壤相比，有机肥、香蕉茎叶和椰糠处理的土壤有效磷含量分别提高了 18.9 倍、3.4 倍、1.9 倍，菠萝茎叶对土壤有效磷含量无明显影响。椰糠和菠萝茎叶处理明显降低了土壤 pH，有机肥和香蕉茎叶处理的土壤 pH 分别提高了 45.3% 和 4.0%。

表 2 有机物料组成成分
Tab. 2 Composition of organic materials

有机物料 Organic material	糖脂类 Glycolipid	半纤维素 Semi-cellulose	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin	灰分 Ash
菠萝茎叶	45.33±9.00 ^b	30.00±6.61 ^a	11.90±3.00 ^b	9.30±0.26 ^b	3.47±1.27 ^b
香蕉茎叶	40.33±0.58 ^b	34.83±2.84 ^a	19.57±3.33 ^a	1.83±0.25 ^c	3.40±2.87 ^b
椰糠	37.50±1.32 ^b	9.50±0.50 ^b	18.27±0.25 ^a	25.77±0.75 ^a	8.97±0.25 ^a
有机肥	62.50±6.50 ^a	11.17±2.75 ^b	12.43±1.45 ^b	1.67±0.45 ^c	12.23±4.04 ^a

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。糖脂类主要包括：糖、脂肪、淀粉和蛋白等成分。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$). Glycolipid mainly include: glucose, fatty, starch and protein.



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 1 有机物料对土壤有效磷和 pH 的影响

Fig. 1 Effect of organic materials on available P and pH of soil

2.3 热带典型有机物料对土壤团聚体组成及稳定性的影响

粒径 >0.250 mm 的团聚体 (大团聚体) 是维持土壤结构稳定的基础, 其含量的高低通常是衡量土壤结构的重要指标, 其含量越高, 土壤结构越稳定。由表 3 可知, 菠萝茎叶和香蕉茎叶均能显著提高粒径 >0.250 mm 的团聚体数量, 其中菠萝茎叶的作用效果优于香蕉茎叶, 椰糠和有机肥对粒径 >0.250 mm 的团聚体数量无显著影响。而不同有机物料对粒径为 $0.250\sim 0.053$ mm 的团聚体的作用效果, 与对粒径 >0.250 mm 团聚体作用效果相反, 而投入菠萝茎叶后土壤粒径 <0.053 mm 的团聚体数量最低, 说明投入有机物料特别是菠萝茎叶和香蕉茎叶能明显促进微团聚体向大团聚体转化。

2.4 热带典型有机物料对土壤酶活性的影响

有机物料能够显著增加土壤木糖苷酶和纤维素酶的活性 ($P<0.05$), 其中, 菠萝茎叶、香蕉茎秆、有机肥的作用效果显著高于椰糠, 且三者对纤维素酶活性提高的强度表现为: 菠萝茎叶 $>$ 香蕉茎叶 $>$ 有机肥, 各处理间差异均达显著水平, 椰糠

表 3 不同粒径土壤团聚体占比

Tab. 3 Proportion of soil aggregate with different particle sizes

处理 Treatment	>0.250 mm	$0.250\sim 0.053$ mm	<0.053 mm
菠萝茎叶	70.30±2.52 ^a	27.35±1.63 ^c	2.35±0.97 ^c
香蕉茎叶	56.61±3.07 ^b	36.40±2.72 ^b	6.99±0.60 ^b
椰糠	50.63±1.84 ^c	42.19±1.56 ^a	7.19±0.79 ^b
有机肥	49.30±3.10 ^c	44.29±2.70 ^a	6.41±1.05 ^b
CK	46.86±0.65 ^c	43.18±1.59 ^a	9.96±1.61 ^a

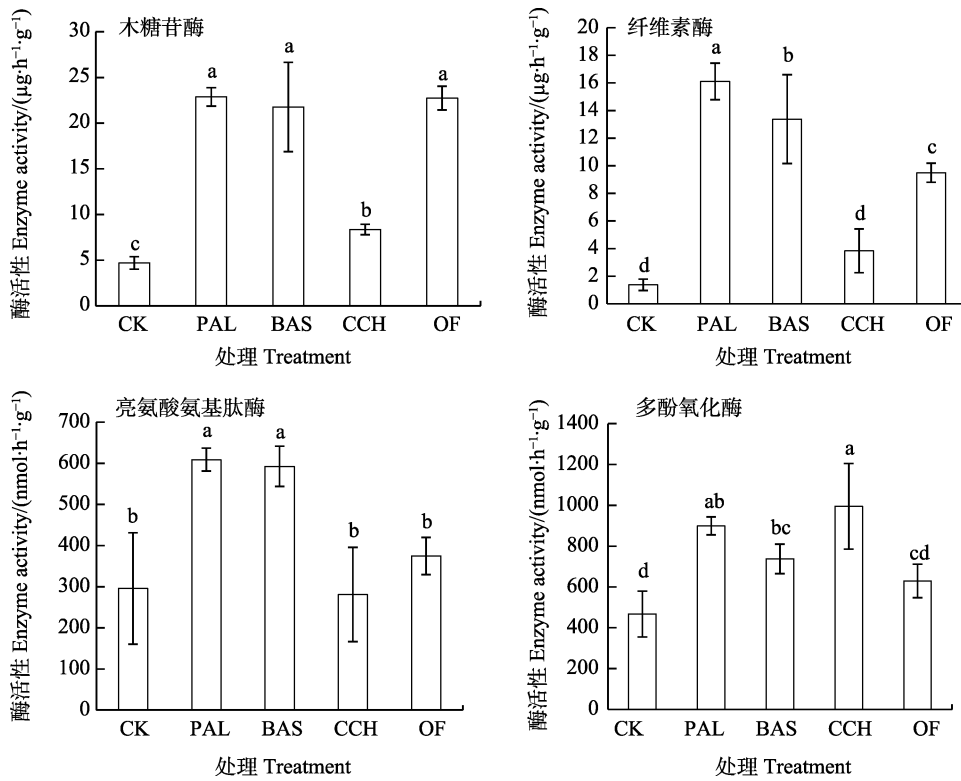
注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

对土壤纤维素酶的活性无显著影响; 此外, 菠萝茎叶、香蕉茎叶显著提高土壤亮氨酸氨基肽酶的活性, 椰糠和有机肥对亮氨酸氨基肽酶的作用效果不显著; 菠萝茎叶、香蕉茎叶和椰糠能显著提高土壤多酚氧化酶的活性, 但有机肥对多酚氧化酶活性的增加效果不显著 (图 2)。

2.5 热带典型有机物料对土壤微生物群落的影响

细菌群落受土壤利用方式、土壤理化性质等



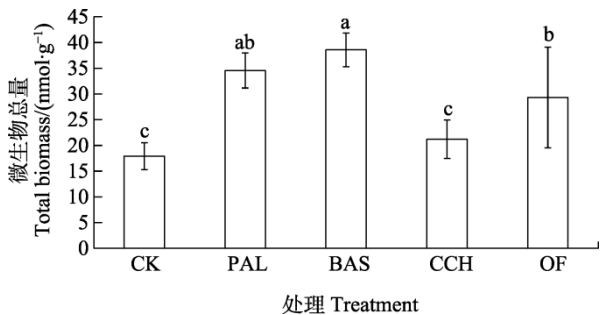
不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 2 有机物料对土壤酶活性的影响

Fig. 2 Effect of organic materials on soil enzyme activities

因素的影响，能够在土壤环境改变时快速作出反应。由图 3 可知，与不施用有机物料的 CK 相比，香蕉茎叶、菠萝茎叶、有机肥均能明显增加土壤微生物总量，其中香蕉茎叶、菠萝茎叶和有机肥处理的微生物量增加量分别为 115.4%、92.9% 和 69.7%，但香蕉茎叶培养的土壤微生物总量显著高于有机肥培养的土壤。椰糠培养条件下土壤微生物总量无明显变化。说明香蕉茎叶对激活土壤微生物具有较好的作用效果。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 有机物料对土壤微生物总量的影响

Fig. 3 Effect of organic materials on total biomass of soil

由表 4 可知，菠萝茎叶和香蕉茎叶处理均明显增加革兰氏阳性 (G^+) 菌的数量，其作用效果显著优于椰糠和有机肥。有机肥对革兰氏阴性 (G^-) 菌的增加量与菠萝茎叶和香蕉茎叶处理之间差异不显著，但三者均显著高于椰糠和对照处理。说明施用菠萝茎叶、香蕉茎叶和有机肥对增加 G^+ 菌和 G^- 菌均具有较好的作用效果，椰糠对 G^+ 菌和 G^- 菌均无显著影响。但与对照相比，施用有机物料均明显提高 G^-/G^+ ，其中菠萝茎叶和香蕉茎叶之间差异不显著，说明不同种类有机物料的施用均打破了原有的微生物群落结构。进一步分析土壤中真菌和丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizae, AM) 的数量，结果显示，施用有机物料均显著增加土壤真菌数量，香蕉茎叶的作用效果最好，其次为菠萝茎叶。有机肥中 AM 真菌的数量显著高于其他各处理，香蕉茎叶和菠萝茎叶之间差异不显著，但显著高于椰糠和对照处理；说明微生物菌群对投入有机物料的种类具有不同的响应。与对照相比，有机肥处理明显增加土壤放线菌数量，菠萝茎叶、香蕉茎叶、椰糠对土壤放线

菌数量无显著性影响, 椰糠处理的土壤放线菌数量较低, 且显著低于有机肥处理。施用香蕉茎叶、菠萝茎叶、有机肥均显著增加土壤真核生物数量,

与对照相比, 分别增加 381.9%、337.2%和 164.9%。椰糠处理的土壤真核生物数量与对照之间无显著差异。

表 4 有机物料对土壤微生物群落的影响

Tab. 4 Effect of organic materials on amount of soil microbial community

处理 Treatment	群落数量 Number of communities/(nmol·g ⁻¹)						G ⁻ /G ⁺
	G ⁺ 菌 G ⁺ bacteria	G ⁻ 菌 G ⁻ bacteria	真菌 Fungi	丛枝菌根 AM	放线菌 Actinomyces	真核生物 Eukaryote	
菠萝茎叶	9.65±1.17 ^a	8.07±0.81 ^a	2.44±0.27 ^b	0.41±0.09 ^{bc}	2.50±0.29 ^{ab}	1.50±0.60 ^{ab}	1.19±0.04 ^a
香蕉茎叶	10.74±1.00 ^a	9.26±0.77 ^a	3.29±0.45 ^a	0.57±0.12 ^b	2.46±0.37 ^{ab}	1.65±0.27 ^a	1.16±0.04 ^a
椰糠	5.35±0.81 ^b	5.48±1.20 ^b	1.21±0.35 ^c	0.21±0.08 ^c	1.88±0.65 ^c	0.49±0.22 ^c	0.99±0.07 ^b
有机肥	6.76±2.11 ^b	8.78±2.25 ^a	0.93±0.24 ^c	0.85±0.22 ^a	2.56±0.83 ^a	0.91±0.38 ^b	0.76±0.05 ^c
CK	3.86±0.84 ^c	5.93±0.78 ^b	0.39±0.13 ^d	0.29±0.03 ^c	2.18±0.18 ^{bc}	0.34±0.24 ^c	0.65±0.08 ^d

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

各处理中未识别的微生物数量占 28.7%, 其次为 G⁻菌和 G⁺菌, 分别为 27.3%和 25.1%。放线菌和真菌分别占 8.7%和 5.3%, 真核生物和 AM 真菌的占比均在 5%以下。施用有机物料处理均明显增加土壤中 G⁺菌的占比, 其中香蕉茎叶和菠萝茎叶培养的土壤中 G⁺菌占比显著高于其他处理, 且菠萝茎叶和香蕉茎叶之间的差异不显著, 二者平均占比为 27.8%, 椰糠培养的土壤中 G⁺菌数量显著高于有机肥处理, 二者分别占 25.4%和 23.2%, 对照中 G⁺菌仅占 21.4% (图 4)。

施用有机物料处理均明显降低 G⁻菌占比, 对照中的 G⁻菌占 33.2%, 显著高于其他有机物料处理, 有机肥中 G⁻菌占 30.5%, 显著高于椰糠、菠萝茎叶和香蕉茎叶处理, 其中菠萝茎叶和香蕉茎叶处理间差异不显著, 平均为 23.7%, 显著低于椰糠处理土壤中 G⁻菌的占比。各处理中放线菌与 G⁻菌的变化趋势相似, 即施用有机物料处理均明显降低放线菌数量, 其中菠萝茎叶和香蕉茎叶的降低趋势更明显, 对照中放线菌占 12.3%, 菠萝茎叶和香蕉茎叶处理的放线菌平均占 6.8%, 与对照相比, 降低约 44.6%, 椰糠和有机肥之间差异不显著, 平均为 8.7%。各处理的真菌占比均呈显著性差异, 其中, 香蕉茎叶、菠萝茎叶、椰糠、有机肥中真菌占比分别增加 300.2%、232.1%, 165.0%和 51.9%。施用有机肥处理明显增加 AM 真菌的比例, 椰糠处理则明显降低土壤 AM 真菌比例, 菠萝茎叶和香蕉茎叶处理土壤中真核生物比例增加 (图 4)。说明土壤中的微生物类群对投入有机物料的种类具有不同的响应。

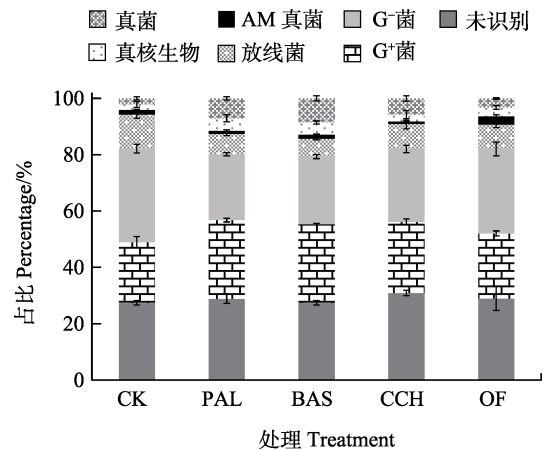


图 4 有机物料对微生物群落结构分布的影响

Fig. 4 Effect of organic materials on microbial community structure and distribution

微生物是驱动土壤有机物质和养分转化的主要动力, 有机物料能提供微生物生长所需的能量, 进而改变微生物群落的结构和数量。主成分分析结果显示, 菠萝茎叶、香蕉茎叶处理的土壤中微生物群落结构聚为一类 (图 5A), 椰糠、对照与菠萝茎叶、香蕉茎秆处理的土壤微生物群落结构在第 1 主成分 (PCA1) 上显著分离, 而菠萝茎叶、香蕉茎秆、椰糠 3 种材料处理的土壤微生物群落结构在第 2 主成分 (PCA2) 上与有机肥和对照处理分离。由此可见, 投入的有机物料种类调控土壤微生物群落结构的变化。进一步冗余分析发现, 微生物群落结构的变化主要与投入有机物料的半纤维素含量和土壤 pH 密切相关, 分别解释了 70.8%和 8.5%的群落结构变异 (图 5B)。

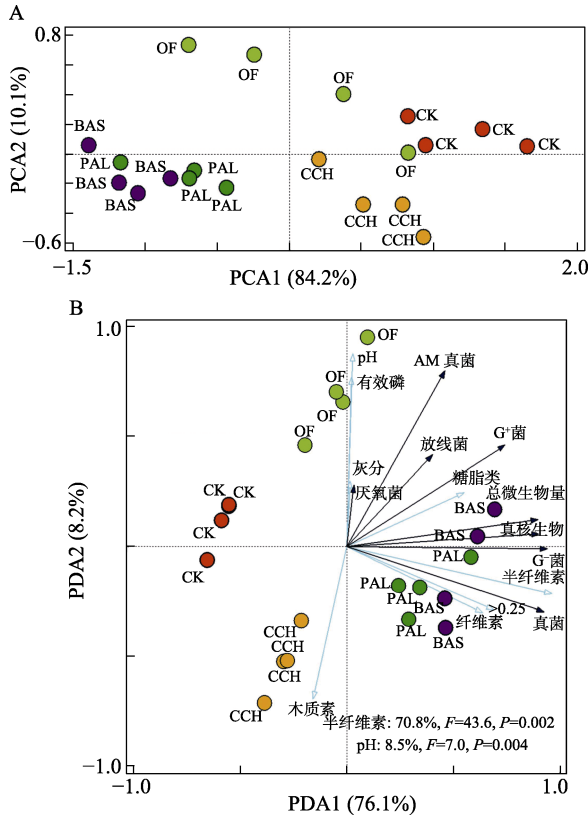


图 5 土壤微生物群落结构 PLFA 的主成分分析 (A) 和冗余分析 (B)

Fig. 5 Principle components analysis (A) and redundancy analyses (B) of PLFAs

3 讨论

3.1 不同成分有机物料对土壤肥力和团聚体结构的影响

有机物料种类繁多,其成分也存在较大差异。胡佳丹^[21]采用生物法分析香蕉茎叶组成成分,发现纤维素、半纤维素含量在 30%左右,木质素含量约为 11%。熊曾恒^[22]首先从菠萝茎叶中提取菠萝茎叶纤维,再参考苧麻化学成分定量分析方法对其纤维素、半纤维素等成分进行分析,发现提取的菠萝茎叶纤维中纤维素含量(约 61%)、半纤维素含量(约 21%)、木质素含量(约 7%)三者之间呈 9 : 3 : 1 的规律,与本研究结果存在一定差异,可能是原材料不同导致的结果差异。椰糠中木质素含量最高,其次为半纤维素,纤维素含量最低^[23]。张艳艳等^[24]研究了 4 种猪粪、4 种牛粪、2 种鸡粪、5 种秸秆类材料的主要化学组成,其组分主要划分为总糖、粗脂肪、有机质、活性有机质等,结果显示不同原料来源和储存方式均影响其组分构成,导致后期依此为原料生产的有机肥具有较强的地域性。受投入有机物料的种类、

投入量及土壤性质的影响,不同有机物料还田对土壤肥力的影响可能不一致。

有机物料分解产生的有机酸可以降低土壤矿物对磷素的吸附作用,提高土壤磷素的有效性,秸秆有机酸的分解量高于腐熟的有机物料,有机物料的投入能够显著提高土壤全磷、速效磷、全氮含量,显著改善土壤理化性质^[25-27]。本研究中有机肥对土壤有效磷的作用效果显著,主要是由于有机肥中本身含有较多的活性磷,有机肥的投入给土壤直接带入一部分有效磷、速效钾^[28]。本研究所选粉蕉蕉秆中磷含量一般为 0.14%~0.25%,而在菠萝生长后期,菠萝茎叶中的磷大量向果实转移,使叶片中磷含量较低,除有机物料含磷量外,有机物料的投入量以及腐解速率均会影响有机物料对土壤有效磷的作用效果^[29-30]。不同的有机物料其碱度和减缓土壤酸化的范围各不相同,施用碱度较高的有机肥能够有效控制农田土壤酸化,而谷物秸秆缓解土壤酸化的能力较弱^[7]。本研究结果也显示,施用有机肥明显提高了土壤有效磷含量和土壤 pH,其次为香蕉茎叶,而菠萝茎叶和椰糠在一定程度上加剧土壤酸化。这可能是菠萝茎叶在腐解过程中释放较多有机酸类物质,也可能是与椰糠、香蕉茎叶相比,菠萝茎叶中总氮含量较高,菠萝茎叶腐解过程伴随有机氮向无机氮(铵态氮、硝态氮)的转化,进而导致土壤酸度降低。

诸多试验显示,有机物料秸秆、猪粪、生物炭显著增加有机质和红壤性水稻土壤团聚体(粒径>0.25 mm),其中,水稻秸秆明显增加粒径为 0.25~2.00 mm 的团聚体,而厩肥显著增加粒径>1 mm 的团聚体含量,小麦秸秆增加粒径>2 mm 的大团聚体和粒径为 0.053~0.25 mm 的中微团聚体含量^[5-6, 31]。大豆秸秆、玉米秸秆、鸡粪等有机物料混施对土壤团聚体结构的改良效果优于各有机物料单施^[1, 6]。木质素可直接作为大团聚体的内核吸附微小颗粒形成大团聚体^[32]。本研究结果显示,3 种热带典型有机物料及有机肥中,菠萝茎叶对红壤团聚体的改良效果最好,香蕉茎叶次之,椰糠和有机肥的作用效果无明显差异,均低于香蕉茎叶,说明腐殖化程度较低的有机物料投入土壤中,分解形成更多的有机质和多糖等胶结物质,更有利于土壤团聚体结构的形成^[33]。而有机肥等经过腐熟发酵的有机物料对土壤养分具有明显的改良效果,但短期内不利于土壤物理结构的改善。

3.2 不同成分有机物料对土壤酶活性和微生物群落结构的影响

土壤酶仅占土壤极微小的一部分,参与物质分解、养分循环、能量流动等生物化学过程,对土壤具有重要的功能和作用。不同的施肥措施和有机物料组成对土壤酶活性产生不同的影响,土壤酶活性总体表现为施用有机物料高于不施有机物料或单施化肥。秸秆和粪肥可以大幅度提高脲酶活性,玉米秸秆可以增加土壤纤维素酶活性,而堆肥处理可提升蔗糖酶和磷酸酶活性^[10]。本研究中,菠萝茎叶、香蕉茎叶和有机肥均显著提高纤维素酶活性。而 3 种有机物料中香蕉茎叶中的纤维素含量最高,说明有机物料的纤维素含量对纤维素酶活性之间无直接的相关性。而菠萝茎叶和香蕉茎叶对土壤木糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶和多酚氧化酶均具有较好的作用效果。土壤酶活性的提高可能与分解有机物料的微生物类群有关。

微生物是驱动土壤有机物质和养分转化的主要动力,有机物料能够提供微生物生长所需要的能量,进而改变微生物群落的结构和数量。土壤中的微生物活性是衡量土壤各项理化性质、酶促反应及能量转化的指标之一,微生物的生存与繁殖均需要适宜的 C/N 比,且不同的微生物类群对投入有机物料的组成具有选择性。邢月华等^[34]研究表明,施用有机肥能够显著提高耕层土壤中放线菌和细菌的数量。菠萝茎叶、香蕉茎叶处理的土壤中微生物群落结构聚为一类,主要是因为二者在材料组成上较接近,对土壤微生物群落结构的贡献相似。本研究中,椰糠、对照与菠萝茎叶、香蕉茎秆处理的土壤微生物群落结构在第 1 主成分(PCA1)上显著分离,这是由于菠萝茎叶和香蕉茎秆在半纤维素和纤维素+木质素总和的比例上存在较大差异,有机物料投入土壤后微生物对其作出不同的反应。菠萝茎叶、香蕉茎叶、椰糠 3 种处理的土壤微生物群落结构在第 2 主成分(PCA2)上与有机肥和对照处理分离,主要是因为这 3 种材料在糖脂类和半纤维素+纤维素+木质素总和的比例上存在显著差异。由此可见,投入有机物料的组分调控土壤微生物群落结构的变化。本研究中微生物群落结构的变化主要与投入有机物料的半纤维素含量和土壤 pH 密切相关,分别解释了 70.8%和 8.5%的群落结构变异。主要是因为半纤维素较容易被微生物分解利用,能够

为微生物提供充足的碳源,半纤维素含量高的材料在土壤中分解较快,内含物释放于土壤进一步改变土壤 pH,共同决定了土壤微生物群落结构的变化。

本研究中,施用有机肥明显提高 AM 真菌的比例,而菠萝茎叶和香蕉秆有助于提高土壤中的真核生物数量;与对照相比,香蕉茎叶、菠萝茎叶、椰糠、有机肥中的真菌比例分别增加 300.2%、232.1%、165.0%、51.9%。前期研究结果显示,微生物能够利用的营养底物活性碳和铵态氮的变化与土壤真菌密切相关^[30-31]。香蕉茎叶和菠萝茎叶的 G⁺菌平均占比为 27.8%,对照和有机肥中的 G⁺菌占比仅为 22.3%;而对照和有机肥中的 G⁻菌占比较高,分别为 33.1%和 29.9%,这主要是由于 G⁺菌更倾向于利用腐殖化程度较低的有机物料,而 G⁻菌更倾向于利用腐殖化程度较高的有机物料^[35]。有机物料的投入引起土壤微生物群落结构的变化大多是由于可利用性碳源的变化引起的,半纤维素等微生物可利用性较高的碳底物能够为微生物提供足够的养分来源,进而促进微生物的生长,改变微生物的组成^[9, 36]。微生物的菌丝又能增加对土壤的缠绕作用,促使微粘粒向大团聚体转化,从而改变土壤团聚体的结构^[33]。

4 结论

香蕉茎叶和有机肥能够提高土壤 pH 和有效磷含量,菠萝茎叶短期内加剧了土壤酸化。菠萝茎叶和香蕉秆均有助于促进粒径 > 0.25 mm 团聚体的形成。菠萝茎叶、香蕉茎秆、有机肥可提高土壤木糖苷酶、纤维素酶和亮氨酸氨基肽酶活性。投入有机物料的组分尤其是半纤维素决定着土壤中的微生物类群;菠萝茎叶、香蕉秆和有机肥可增加土壤 G⁺菌、G⁻菌、真核生物、真菌的数量。施用有机肥能明显提高 AM 真菌的比例,而菠萝茎叶和香蕉秆有助于增加土壤中真核生物的数量。AM 真菌是对土壤 pH 和有效磷反应较为敏感的菌群,较好的团聚体组成有利于 G⁻菌、真核生物和真菌的生长。因此,在等碳量投入的条件下,香蕉茎叶和菠萝茎叶的短期还田效果优于椰糠,但在生产上开展菠萝茎叶还田利用需要配合使用一些碱性材料中和菠萝茎叶的酸化作用。

参考文献

- [1] 王笃超,吴景贵. 不同有机物料对连作大豆土壤养分及团

- 聚体组成的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 825-834.
- WANG D C, WU J G. Effects of organic manure on soil nutrients and aggregate composition in soil under mono-cropping of soybean[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4): 825-834. (in Chinese)
- [2] 王彤, 雍继芳, 林启美, 赵小蓉, 李贵桐. 生物质炭与有机肥料配施可以促进设施菜地土壤水稳性团聚体形成[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 176-182.
- WANG T, YONG J F, LIN Q M, ZHAO X R, LI G T. Improvement of water-stable aggregates by combination of biochar with organic fertilizer in greenhouse soil[J]. *ACTA Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(S1): 176-182. (in Chinese)
- [3] SPACCINI R, PICCOLO A. Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 129(6): 45-51.
- [4] SARKER T C, INCERTI G, SPACCINI R, PICCOLO A, MAZZOLENI S, BONANOMI G. Linking organic matter chemistry with soil aggregate stability: insight from ^{13}C NMR spectroscopy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 175-184.
- [5] MOHAMED I, BASSOUNY M A, ABBAS M H H, ZHAN M, CAO C G, FAHAD S, SAUD S, KHATTAK J Z K, ALI S, SALEM M S H. Rice straw application with different water regimes stimulate enzymes activity and improve aggregates and their organic carbon contents in a paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2021, 274: 129971.
- [6] 李腾, 饶伟, 王代长, 刘世亮, 韩燕来, 夏婷婷. 不同有机物料对潮土微团粒分形特征和速效养分的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 64-71.
- LI T, RAO W, WANG D C, LIU S L, HAN Y L, XIA T T. Effects of different organic materials on fractal features of microaggregate and available nutrients in Chao soil[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(5): 64-71. (in Chinese)
- [7] 毛妍婷, 刘宏斌, 陈安强, 杜彩艳, 郭树芳, 雷宝坤. 长期施用有机肥对减缓菜田耕层土壤酸化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1784-1791.
- MAO Y T, LIU H B, CHEN A Q, DU C Y, GUO S F, LEI B K. Effects of long-term application of organic fertilizers on reducing soil acidification of plough layer in vegetable fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9): 1784-1791. (in Chinese)
- [8] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 马常宝, 王慧颖, 于子坤, 曲潇林, 张璐, 韩天富, 都江雪, 柳开楼, 张会民. 1988—2018年中国水稻秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 151-161.
- LIU S J, LI D C, HUANG J, MA C B, WANG H Y, YU Z K, QU X L, ZHANG L, HAN T F, DU J X, LIU K L, ZHANG H M. Temporal and spatial distribution characteristics of rice stalk resources and its potential of synthetic fertilizers substitution returning to farmland in China from 1988 to 2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11): 151-161. (in Chinese)
- [9] 李慧敏, 田胜营, 李丹丹, 李增强, 谭钧, 赵炳梓. 有机物料施用对潮土活性有机碳及微生物群落组成的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 777-787.
- LI H M, TIAN S Y, LI D D, LI Z Q, TAN J, ZHAO B Z. Effect of application of organic materials on content of labile organic carbon and composition of microbial community in fluvio-aquatic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 777-787. (in Chinese)
- [10] 侯建勋, 张水梅, 袁静超, 程松, 刘剑钊, 刘松涛, 梁尧, 任军, 蔡红光. 玉米秸秆源有机物料对黑土养分有效性及酶活性的提升效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 610-618.
- HOU J X, ZHANG S M, YUAN J C, CHENG S, LIU J Z, LIU S T, LIANG Y, REN J, CAI H G. Effects of maize straw-derived organic materials on improving soil nutrient availability and enzyme activities in a Mollisol[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(4): 610-618. (in Chinese)
- [11] 陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 赵其国, 孙波. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 451-457.
- CHEN L J, JIANG Y J, WANG H T, ZHAO Q G, SUN B. Effects of long-term application of organic materials on phosphorus fractions and availability in red soil[J]. *Soil*, 2020, 52(3): 451-457. (in Chinese)
- [12] 王超, 姜坤, 卢瑛, 唐贤, 阳洋, 欧锦琼, 黄伟濠. 不同有机物料施用对砖红壤团聚体组成和稳定性的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1328-1334.
- WANG C, JIANG K, LU Y, TANG X, YANG Y, OU J Q, HUANG W H. Effects of different organic material application on aggregate composition and stability of latosol[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1328-1334. (in Chinese)
- [13] 汪洋, 崔丽虹, 付调坤, 魏晓奕, 唐冰, 王飞, 冯芹. 菠萝茎叶的化学成分及生物活性研究进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44(11): 258-260.
- WANG Z, CUI L H, FU T K, WEI X Y, TANG B, WANG F, FENG Q. Research progress in chemical component and biological activity of pineapple leaf[J]. *New Chemical Materials*, 2016, 44(11): 258-260. (in Chinese)
- [14] 米慧芝, 韦宇拓, 潘世优, 黎贞崇. 香蕉茎叶资源化利用

- 研究进展[J]. 广西科学, 2018, 25(3): 279-289.
- MI H Z, WEI Y T, PAN S Y, LI Z C. Research progress on resource utilization of banana stems and leaves[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(3): 279-289. (in Chinese)
- [15] 冯继华, 曾静芬, 陈茂椿, 侯正高. 应用 VanSoest 法和常规法测定纤维素及木质素的比较[J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 1994(1): 55-56.
- FENG J H, ZENG J F, CHEN C C, HOU Z G. Comparison between VanSoest method and conventional method for determination of cellulose and lignin[J]. *Journal of Southwest Nationalities College (Natural Science Edition)*, 1994(1): 55-56. (in Chinese)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil agrochemical analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [17] 廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 孙钰翔, 邹炎, 戴齐, 尹力初. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 978-988.
- LIAO C L, LI L N, XIE L H, SUN Y X, ZOU Y, DAI Q, YIN L C. Effect of increased or decreased application of organic manure on aggregates stability and soil cement in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 978-988. (in Chinese)
- [18] 宋书会. 磷肥减施及覆膜条件下黑土磷素供应特征与转化机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- SONG S H. Phosphorus supply and transformation in mollisol under reduced phosphate rate and plastic film mulching[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. (in Chinese)
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y. *Soil enzymes and its research methods*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986. (in Chinese)
- [20] VERCHOT L, BORELLI T. Application of para-nitrophenol (pNP) enzyme assays in degraded tropical soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(4): 625-633.
- [21] 胡佳丹. 生物法提取香蕉假茎纤维素及其性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- HU J D. Bio-extraction of banana pseudostem cellulose and analysis on the performance[D]. Haikou: Hainan University, 2018. (in Chinese)
- [22] 熊曾恒. 菠萝茎叶纤维素的水热碳化及石墨烯量子点的制备、表征和应用[D]. 海口: 海南大学, 2017.
- XIONG Z H. Hydrothermal carbonization of pineapple leaf cellulose and preparation, characterization and application of grapheme quantum dots[D]. Haikou: Hainan University, 2017. (in Chinese)
- [23] PRAUCHNER M J, RODRÍGUEZ-REINOSO F. Chemical versus physical activation of coconut shell: a comparative study[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012, 152: 163-171.
- [24] 张艳艳, 苑举民, 石屹, 梁晓芳, 武珂峰, 张本强, 倪超. 烟草常用有机肥主要成分分析及质量评价研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(18): 154-159.
- ZHANG Y Y, YUAN J M, SHI Y, LIANG X F, WU K F, ZHANG B Q, NI C. Research on principal component analysis and quality evaluation of organic fertilizer commonly used in tobacco[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(18): 154-159. (in Chinese)
- [25] 蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 李勇, 吴金水. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 309-317.
- JIANG B S, SHEN J L, WANG J, LI Y, WU J S. Effect of straw incorporation on biologically-based phosphorus fractions and phosphorus uptake by rice in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 309-317. (in Chinese)
- [26] 李冬初, 王伯仁, 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 张淑香, 张会民. 长期不同施肥红壤磷素变化及其对产量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3830-3841.
- LI D C, WANG B R, HUANG J, ZHANG Y Z, XU M G, ZHANG S X, ZHANG H M. Change of phosphorus in red soil and its effect to grain yield under long-term different fertilizations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3830-3841. (in Chinese)
- [27] 郭斗斗, 黄绍敏, 张珂珂, 张水清, 宋晓, 王柏寒, 岳克. 有机无机外源磷素长期协同使用对潮土磷素有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1651-1659.
- GUO D D, HUANG S M, ZHANG K K, ZHANG S Q, SONG X, WANG B H, YUE K. Effects of long-term synergistic use of organic and inorganic exogenous P on phosphorus availability in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1651-1659. (in Chinese)
- [28] 王源, 朱毓蓉, 欧阳铖人, 赵正雄, 杨焕文, 王娜, 王戈, 吕芬, 除照丽. 有机肥施用对植烟农田土壤肥力及烟叶质量的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 1003-1009.
- WANG Y, ZHU Y R, OUYANG C R, ZHAO Z X, YANG H W, WANG N, WANG G, LYU F, XU Z L. A review of effect of organic fertilizer on soil fertility and quality of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4): 1003-1009. (in Chinese)
- [29] 金鑫, 杨宇, 张瑞花, 符春敏, 邓燕, 黄家权, 尹黎燕. 磷素供应对‘宝岛’蕉和‘巴西’蕉苗期养分吸收的影响[J]. 分子植物育种, 2018, 16(21): 7209-7218.
- JIN X, YANG Y, ZHANG R H, FU C M, DENG Y, HUANG J Q, YIN L Y. Effects of phosphorus supply on nutrient absorption of ‘Baodao’ and ‘Baxi’ banana seedling stage[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(21): 7209-7218.

- (in Chinese)
- [30] 陈菁, 孙光明, 臧小平, 陆新华, 刘胜辉. 巴厘菠萝干物质和 NPK 养分累积规律研究[J]. 果树学报, 2010, 27(4): 547-550.
CHEN J, SUN G M, ZANG X P, LU X H, LIU S H. Study on the accumulation of dry matter and NPK in pineapple (*Ananas comosus* cv. Comte de Paris) plantlet[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(4): 547-550. (in Chinese)
- [31] 李鑫, 李永梅, 王自林, 范茂攀, 杨广容. 秸秆生物炭与猪粪配施对山原红壤团聚体结构的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(4): 737-743.
LI X, LI Y M, WANG Z L, FAN M P, YANG G R. Effect of straw biochar and pig manure application on the structure aggregates in mountain red soil[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2018, 33(4): 737-743. (in Chinese)
- [32] 韩明钊, 赵雨森, 翟国庆, 李永江, 王恩姮. 有机物料添加对黑土团聚体稳定性及有机碳影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(5): 109-114.
HAN M Z, ZHAO Y S, ZHAI G Q, LI Y J, WANG E H. Effect of adding exogenous organic materials into black soil on soil aggregates and soil organic carbon[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(5): 109-114. (in Chinese)
- [33] 唐贤, 黄伟濠, 卢瑛, 李博, 王超, 董玉清. 广东省赤红壤区土壤团聚体有机碳和铁氧化物特征及稳定性[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 200-209.
TANG X, HUANG W H, LU Y, LI B, WANG C, DONG Y Q. Characteristics and stability of organic carbon and ferric oxide in soil aggregates and aggregate stability in lateritic red soil region, Guangdong province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 200-209. (in Chinese)
- [34] 邢月华, 包红静, 蔡广兴, 孟杰, 张旭. 连续施用不同量有机肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(4): 66-70.
XING Y H, BAO H J, CAI G X, MENG J, ZHANG X. Effects of consecutive application of different quantities of manure on soil fertility and maize yield[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(4): 66-70. (in Chinese)
- [35] 艾超. 长期施肥下根际碳氮转化与微生物多样性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
AI C. Carbon and nitrogen transformations and microbial diversity in the rhizosphere soil under long-term fertilization practices[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [36] 李 Z Q, ZHAO B Z, HAO X Y, ZHANG J B. Effects of residue incorporation and plant growth on soil labile organic carbon and microbial function and community composition under two soil moisture levels[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(23): 18849-18859.