

王薇薇, 沈峰, 梅燚, 等. 炭基肥对辣椒生长及根际土壤细菌群落结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 692-701.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.008

## 炭基肥对辣椒生长及根际土壤细菌群落结构的影响

王薇薇, 沈峰, 梅燚, 吴永成, 郑佳秋, 张丽娜, 冯汝超, 祖艳侠, 刘哲  
(江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏盐城 224002)

**摘要:** 为明确炭基肥对辣椒生长发育、养分吸收、土壤理化性质及微生物群落结构的影响, 本研究采用盆栽试验, 设置不施肥对照(CK)和施用等量氮素的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 15%、15%、15% 的复合肥(HF), N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 15%、15%、15% 的炭基肥 1(TF1), N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 15%、10%、10% 的炭基肥 2(TF2), N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 10%、10%、10% 的炭基肥 3(TF3) 等处理, 分析生物炭与化肥按不同配比制备的炭基肥替代化肥对辣椒生长和根际土壤质量的影响。结果表明, 与 HF 处理相比, TF1~TF3 处理辣椒茎粗、单株根系干重、单株干果重和果实干物质分配比例均有所增加。TF1~TF3 处理土壤全氮含量显著高于 HF 处理和 CK。与 HF 处理相比, TF1~TF3 处理果实对氮、磷、钾等营养元素的吸收量及分配比例均呈增加趋势。TF1~TF3 处理下辣椒根际土壤细菌的 Richness 指数、Chao1 指数、Ace 指数、Shannon 指数总体显著高于 HF 处理。不同施肥处理土壤细菌群落的优势菌门为酸杆菌门、变形菌门及芽单胞菌门, 累计相对丰度为 74.69%~82.46%。TF1、TF3 和 HF 处理酸杆菌门细菌的相对丰度显著低于 CK; TF1~TF3 和 HF 处理的黏菌门细菌的相对丰度显著低于 CK; HF 处理 Methylomirabilota 门细菌的相对丰度高于 CK 和 TF1~TF3 处理。TF1~TF3 处理芽单胞菌门细菌的相对丰度显著高于 HF 处理和 CK。综上, 炭基肥的应用不仅可以增强辣椒植株对养分的吸收能力, 提高果实中养分的分配比例, 还可以优化土壤理化特性, 提高土壤微生物多样性, 进而提高辣椒果实产量。

**关键词:** 炭基肥; 养分吸收与分配; 土壤理化性质; 土壤细菌群落结构

**中图分类号:** S633.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)04-0692-10

## Effects of biochar-based fertilizer on pepper growth and rhizosphere soil bacterial community structure

WANG Weiwei, SHEN Feng, MEI Yi, WU Yongcheng, ZHENG Jiaqiu, ZHANG Lina,  
FENG Ruchao, ZU Yanxia, LIU Zhe

(*Jiangsu Coastal Area Institute of Agricultural Sciences, Yancheng 224002, China*)

**Abstract:** In order to clarify the effects of biochar-based fertilizer on pepper growth and development, nutrient absorption, soil physical and chemical properties and microbial community structure, a pot experiment was conducted in this study, with treatments including no fertilization control (CK) and compound fertilizer (HF) with N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O contents of 15%, 15% and 15%, biochar-based fertilizer 1 (TF1) with N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O contents of 15%, 15% and 15%, biochar-based fertilizer 2 (TF2) with N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O contents of 15%, 10% and 10%, biochar-based fertilizer 3 (TF3) with N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O contents of 10%, 10% and 10%, respectively. The effects of biochar-based fertilizer prepared by different ratios of biochar and chemical fertilizer on the growth of pepper and the quality of rhizosphere soil were analyzed. The results showed that compared with HF treatment, the stem diameter, root dry matter weight per plant, dry fruit weight per plant and fruit dry matter

收稿日期: 2025-01-24

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(23)3024]; 盐城市(农业)重点研发计划项目(YCBN202413)

作者简介: 王薇薇(1988-), 女, 江苏盐城人, 硕士, 助理研究员, 主要从事蔬菜栽培和育种工作。(E-mail) 754776303@qq.com

通讯作者: 郑佳秋, (E-mail) 110647874@qq.com

distribution ratio of pepper treated with TF1–TF3 treatments increased. The soil total nitrogen contents of TF1–TF3 treatments were significantly higher than those of HF treatment and CK. Compared with HF treatment, the absorptive capacity and distribution proportion of nutrient elements such as nitrogen, phosphorus and potassium in fruits treated with TF1–TF3 showed increasing trends. The Richness index, Chao1 index, Ace index and Shannon index of pepper rhizosphere soil bacteria under TF1–TF3 treatments were higher than those under HF treatment. The dominant phyla of soil bacterial community in different fertilization treatments were Acidobacteria, Proteobacteria and Gemmatimonadetes, and the cumulative relative abundances were 74.69%–82.46%. The relative abundances of Acidobacteria in TF1, TF3 and HF treatments were significantly lower than that in CK. The relative abundances of Myxomycota treated with TF1–TF3 and HF were significantly lower than that of CK. The relative abundance of Methylomirabilota bacteria in HF treatment was higher than those in CK and TF1–TF3 treatments. The relative abundances of Gemmatimonadetes in TF1–TF3 treatment were significantly higher than those in HF treatment and CK. In summary, the application of biochar-based fertilizer can not only enhance the absorption capacity of pepper plants to nutrients, improve the distribution ratio of nutrients in fruits, but can also optimize soil physical and chemical properties, improve soil microbial diversity, and then increase pepper fruit yield.

**Key words:** biochar-based fertilizer; nutrient absorption and partition; soil physicochemical properties; soil bacterial community structure

辣椒(*Capsicum annuum* L.)是重要的茄果类蔬菜作物,在世界范围内被广泛种植。近年来,中国辣椒的种植面积保持在 $2.10 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>以上,居蔬菜作物首位<sup>[1]</sup>。辣椒种植过程中,施用化肥是提质增产的关键因素。然而,不少生产者为了片面追求高产,盲目投入大量化肥,这种做法虽然短期内能提高效益,但长期过量施用化肥会造成土壤板结、速效养分富集、有机质含量减少、土壤微生物群落结构失衡等问题,进而影响作物的生长发育,导致产量和品质大幅下滑<sup>[2-4]</sup>。

生物炭是农作物秸秆等废弃生物质在高温缺氧环境下热解生成的产物,具有较高的有机碳含量、丰富的孔隙和较高的比表面积。施用生物炭能够持留土壤中的养分,有效减缓养分的释放速度,降低养分的流失,提升作物对养分的吸收与利用效率,进而起到土壤改良与作物增产的双重效果<sup>[5-7]</sup>。然而,生物炭自身的养分含量较低,单独施用很难满足作物在生长发育过程中对养分的需求<sup>[8-9]</sup>。因此,将生物炭与化肥、有机肥或其他营养元素采用化学或物理方法混合制成的炭基肥,不仅能够改善土壤质量、提高肥料利用率、稳定农作物产量,还能减少化肥使用次数和总量,进而减轻化学肥料对环境的不良影响<sup>[10]</sup>。李昌娟等<sup>[11]</sup>研究结果表明,施用炭基肥能够显著减缓茶园土壤酸化进程,提升土壤速效养分含量,加强茶树对养分的吸收与利用,从而显著提升茶叶的产量与品质。同时,施用炭基肥还能调控土壤微生物群落结构与多样性。陈懿等<sup>[12]</sup>研究发现,施用炭基肥能增

加种植烟草土壤中细菌物种的操作分类单元(OTU)数量、群落丰富度和多样性,降低土壤真菌群落的OTU数量、群落丰富度和多样性,这对优化土壤生态环境、降低烟草赤星病发病率具有重要作用。目前,炭基肥对茶树<sup>[11]</sup>、烟草<sup>[12]</sup>等作物产量和品质的影响已有初步研究,而其在辣椒生产中的应用还鲜有报道。此外,生物炭与化学肥料不同配比的炭基肥对作物生长的影响亦缺乏分析。因此,本研究利用生物炭与化肥混合制备3种不同N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O含量的炭基肥,并分析其对辣椒生长、养分吸收和根际土壤细菌群落结构的影响,为炭基肥在辣椒生产中的推广与应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试辣椒品种为盐椒4号。试验用土取自试验田0~20 cm土层,其有机质含量48.6 g/kg,全氮含量1.37 g/kg,全磷含量0.86 g/kg,全钾含量12.15 g/kg,pH值8.19。炭基肥由尿素、磷酸二氢钾、氯化钾与稻壳炭(生物炭)等材料制作而成,其中稻壳炭含量30%。稻壳炭的有机质含量499.7 g/kg,全氮含量2.2 g/kg,全磷含量1.36 g/kg,全钾含量7.63 g/kg,pH值9.98。根据不同材料中养分含量的差异,设置不同的配比,制得N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O含量分别为15%、15%、15%的炭基肥1与N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O含量分别为15%、10%、10%的炭基肥2及N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O含量分别为10%、10%、10%的炭基肥3。

## 1.2 试验设计

试验于 2024 年在盐城南洋试验基地连栋塑料大棚中进行。4 月利用穴盘进行辣椒育苗,同时,将取自农田耕作层的土壤风干过筛后装入底口径 15.5 cm、上口口径 22.0 cm、高 15.0 cm 的花盆中,每盆装 3.0 kg 风干土,共 180 盆。试验设不施肥对照(CK)与 4 个施肥处理:复合肥、炭基肥 1、炭基肥 2、炭基肥 3。除 CK 不施肥外,其他处理每盆均统一施 0.45 g N。各处理肥料均在移栽前作基肥一次性施入,此后不再施肥。6 月进行辣椒苗移栽,每盆种植 1 株。每个处理设 3 次重复,每个重复 12 盆。其他管理措施按当地常规辣椒栽培技术进行。

## 1.3 样品采集与测定

1.3.1 植株农艺性状与产量 辣椒成熟期选取各处理长势一致的植株,调查株高、株幅、茎粗和产量。株高为地表至植株最高处的距离,株幅为植株在水平方向最大开展度;茎粗为主茎最粗部位的直径。

1.3.2 土样采集和指标测定 辣椒成熟后,采用抖根法收集辣椒植株根际土壤,分别采用铬酸钾外加热法、凯氏定氮法、碱解扩散法、NaOH 碱熔-钼锑抗分光光度法、NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法、NaOH 碱熔-火焰光度法、NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定土壤有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、全磷含量、有效磷含量、土壤全钾含量和速效钾含量<sup>[13]</sup>。土壤微生物测定与分析方法如下:采用土壤 DNA 提取试剂盒(美国 Omega Bio-Tek 公司产品)提取土壤细菌的总 DNA,用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的质量,检测合格的样本利用引物 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')进行扩增并构建文库,扩增产物委托北京组学生物科技有限公司进行高通量测序和分析。利用 QIIME2 软件进行测序数据分析。采用 Silva(v138)分类数据库对土壤

微生物扩增子序列变体(Amplicon sequence variants)进行物种注释。利用 QIIME2 软件进行土壤微生物的  $\alpha$  多样性和  $\beta$  多样性分析。基于 Binary-Jaccard 距离矩阵的主坐标分析法分析比较微生物群落  $\beta$  多样性,并用 QIIME1 软件进行非参数方差分析检验(Adonis),明确不同处理微生物群落结构差异是否具有显著性。利用 DESeq2 工具明确不同分类水平下,处理间差异显著的物种。

1.3.3 植株养分测定 辣椒成熟期每处理选取代表性植株 6 株,按器官分为根、茎叶、果实 3 部分,杀青后,烘干至恒重,记录干重,磨碎混匀。采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰原子吸收分光光度法<sup>[14]</sup>分别测定各处理植株根、茎叶、果实等器官的氮含量、磷含量和钾含量,并根据各器官干重和养分含量计算各器官养分吸收量。

## 1.4 数据分析

使用 Excel 2010 软件进行试验数据处理、图表绘制,利用 SPSS 20 软件进行处理间差异显著性分析( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 炭基肥对辣椒农艺性状的影响

不同施肥处理对辣椒农艺性状的影响如表 1 所示。从表中可以看出,施用复合肥(HF 处理)有利于辣椒地上部枝叶的生长,其株高、株幅、单株秸秆干重、单株根干重、单株鲜果重和单株干果重均显著高于不施肥对照(CK)。与 HF 处理相比,施用炭基肥(TF1~TF3 处理)辣椒茎粗增加 13.47%~20.84%,单株鲜果重增加 45.26%~130.32%,单株干果重增加 42.42%~123.22%,单株根干重增加 12.33%~17.26%。由此可见,施用炭基肥对辣椒的茎粗、果实和根系的生长有明显的促进作用。

表 1 施用炭基肥对辣椒农艺性状的影响

Table 1 Effects of biochar-based fertilizer on agronomic traits of pepper

处理	株高 (cm)	株幅 (cm)	茎粗 (mm)	单株秸秆干重 (g)	单株根干重 (g)	单株鲜果重 (g)	单株干果重 (g)
CK	45.43d	38.86c	7.81c	7.88b	2.09c	23.84d	3.25d
HF	73.00a	60.19a	7.87c	21.61a	4.46b	30.80c	4.22c
TF1	70.76a	60.71a	8.93b	21.21a	5.01a	44.74b	6.01b
TF2	59.57b	59.28a	9.22ab	19.49a	5.21a	70.94a	9.42a
TF3	55.85c	51.71b	9.51a	18.88a	5.23a	67.09a	9.18a

CK:不施肥对照;HF:施用 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 15%、15%、15%的复合肥;TF1:施用 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 15%、15%、15%的炭基肥 1;TF2:施用 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 15%、10%、10%的炭基肥 2;TF3:施用 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 10%、10%、10%的炭基肥 3。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

不同施肥处理对辣椒干物质分配比例的影响如表 2 所示。从表中可以看出, HF 处理辣椒秸秆干物质分配比例比不施肥对照(CK)高 11.73 个百分点, 而根和果实的干物质分配比例分别比 CK 低 1.09 个百分点和 10.64 个百分点。与 HF 处理相比, TF1~TF3 处理的秸秆干物质分配比例分别降低 5.53 个百分点、14.22 个百分点、14.63 个百分点, 而果实的干物质分配比例分别增加 4.71 个百分点、13.67 个百分点、13.64 个百分点, 根的干物质分配比例分别增加 0.82 个百分点、0.55 个百分点、0.99 个百分点。由此可见, 与施用复合肥相比, 施用炭基肥能降低秸秆的干物质分配比例, 提高果实的干物质分配比例。

## 2.2 炭基肥对辣椒养分吸收的影响

2.2.1 炭基肥对辣椒氮素吸收的影响 施肥处理能够显著促进辣椒植株对氮素的吸收(表 3)。3 个炭基肥处理及复合肥处理植株吸氮量均显著高于不施肥对照(CK)。其中, TF3 处理单株吸氮量最高, 达到 536.63 mg, 其次为 HF 处理和 TF2 处理, CK 单株吸氮量仅 174.17 mg。不同施肥处理下器官间的

吸氮量也存在较大差异。HF 处理辣椒秸秆吸氮量分别比 TF1、TF2、TF3 处理增加 36.77%、36.91% 和 16.25%, 而果实的吸氮量分别比 TF1、TF2、TF3 处理下降 19.12%、47.95%、50.89%。相应地, 不同施肥处理辣椒各器官的氮素分配比例亦存在差异。TF1~TF3 处理辣椒果实氮素分配比例显著高于 HF 处理, 而秸秆氮素分配比例比 HF 处理下降 15.78%~26.35%。

表 2 炭基肥对辣椒干物质分配比例的影响

Table 2 Effect of biochar-based fertilizer on dry matter distribution in organs of pepper

处理	干物质分配比例(%)		
	根系	秸秆	果实
CK	15.81a	59.61c	24.58b
HF	14.72b	71.34a	13.94d
TF1	15.54a	65.81b	18.65c
TF2	15.27a	57.12c	27.61a
TF3	15.71a	56.71c	27.58a

CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

表 3 不同施肥处理对辣椒氮素吸收和分配的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on nitrogen absorption and partition of pepper

处理	单株吸氮量(mg)			全株	氮分配比例(%)		
	根系	秸秆	果实		根系	秸秆	果实
CK	38.50c	76.23d	59.44e	174.17d	22.10a	43.77d	34.13a
HF	76.50ab	311.88a	92.74d	481.12b	15.90c	64.82a	19.28c
TF1	75.02ab	228.04c	114.67c	417.73c	17.96b	54.59b	27.45b
TF2	71.24b	227.80c	178.16b	477.20b	14.93c	47.74cd	37.33a
TF3	79.52a	268.28b	188.83a	536.63a	14.82c	49.99c	35.19a

CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

2.2.2 炭基肥对辣椒磷素吸收的影响 与吸氮量相似, 不同施肥处理对辣椒植株吸磷量亦存在较大影响(表 4)。单株吸磷量由高到低依次为 TF3、TF2、TF1、HF 处理和 CK。TF1~TF3 处理和 HF 处理的单株秸秆吸磷量无显著差异, 分别比 CK 增加 77.92%、75.18%、91.69% 和 93.06%, 而 TF1~TF3 处理单株果实吸磷量分别比 CK 和 HF 处理增加 30.68% 和 75.53%、105.26% 和 175.69%、101.19% 和 170.23%, 且 CK 比 HF 处理高 34.31%。TF1~TF3 处理和 CK 辣椒果实磷分配比例分别比 HF 处理增加 14.91 个百分点、26.13 个百分点、20.47 个

百分点、21.45 个百分点, 而秸秆磷分配比例分别比 HF 处理低 13.34 个百分点、22.63 个百分点、22.25 个百分点、20.12 个百分点。

2.2.3 炭基肥对辣椒钾素吸收的影响 同样的, 不同施肥处理对辣椒植株钾吸收与分配有较大影响(表 5)。TF1~TF3 处理和 HF 处理的单株辣椒吸钾量无显著差异, 分别比 CK 增加 143.17%、126.68%、136.54% 和 123.44%。TF1~TF3 和 HF 处理的单株秸秆吸钾量分别比 CK 增加 191.61%、122.15%、153.37% 和 209.47%; TF1~TF3 处理单株辣椒果实吸钾量分别比 CK 和 HF 处理增加 72.25%

和 49.59%、149.65% 和 116.81%、105.79% 和 78.72%。HF 处理秸秆钾分配比例比 TF1 处理提高 9.91 个百分点,而 TF1 处理秸秆钾分配比例又高于

TF2、TF3 处理和 CK,TF2 和 CK 果实钾分配比例显著高于 TF1 处理和 HF 处理。

表 4 不同施肥处理对辣椒磷素吸收及分配的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on phosphorus absorption and partition of pepper

处理	单株吸磷量(mg)				磷分配比例(%)		
	根系	秸秆	果实	全株	根系	秸秆	果实
CK	2.98c	9.51b	15.97c	28.46e	10.47b	33.41c	56.12a
HF	4.05b	18.36a	11.89d	34.30d	11.81b	53.53a	34.66c
TF1	4.31b	16.92a	20.87b	42.10c	10.24b	40.19b	49.57b
TF2	4.48b	16.66a	32.78a	53.92b	8.31c	30.90c	60.79a
TF3	7.92a	18.23a	32.13a	58.28a	13.59a	31.28c	55.13ab

CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

表 5 不同施肥处理对辣椒钾素吸收及分配的影响

Table 5 Effects of different fertilization treatments on potassium absorption and partition of pepper

处理	单株吸钾量(mg)				钾分配比例(%)		
	根系	秸秆	果实	全株	根系	秸秆	果实
CK	20.56d	87.60c	56.11c	164.27b	12.52ab	53.33c	34.15ab
HF	31.34c	271.10a	64.61c	367.05a	8.54d	73.86a	17.60e
TF1	47.35a	255.45a	96.65b	399.45a	11.85b	63.95b	24.20de
TF2	37.68b	194.60b	140.08a	372.36a	10.12c	52.26c	37.62a
TF3	51.14a	221.95b	115.47ab	388.56a	13.16a	57.12bc	29.72bc

CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 炭基肥对土壤理化性质的影响

不同施肥处理对土壤理化性质的影响如表 6 所示。从表中可以看出,TF1~TF3 处理土壤有机质含量比 CK 分别增加 14.94%、17.45% 和 17.15%。TF1~TF3 处理土壤全氮含量显著高于 HF 处理和

CK。TF3 处理土壤有效磷含量显著高于其他处理。TF1~TF3 处理土壤速效钾含量与 HF 处理无显著差异,但分别比 CK 增加 11.02%、11.12%、18.14%。不同施肥处理(TF1~TF3 和 HF)与 CK 土壤碱解氮含量、全磷含量和全钾含量均无显著差异。

表 6 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

Table 6 Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties

处理	有机质含量(g/kg)	全氮含量(g/kg)	碱解氮含量(mg/kg)	全磷含量(g/kg)	有效磷含量(mg/kg)	全钾含量(g/kg)	速效钾含量(mg/kg)
CK	26.71b	0.98b	51.03a	0.81a	5.77d	11.56a	123.52b
HF	29.56ab	0.98b	52.26a	0.87a	6.98bc	11.71a	138.47a
TF1	30.70a	1.01a	51.56a	0.81a	7.76b	11.76a	137.13a
TF2	31.37a	1.03a	52.65a	0.86a	6.56cd	11.58a	137.26a
TF3	31.29a	1.01a	51.77a	0.87a	12.54a	11.85a	145.93a

CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.4 炭基肥对土壤微生物群落的影响

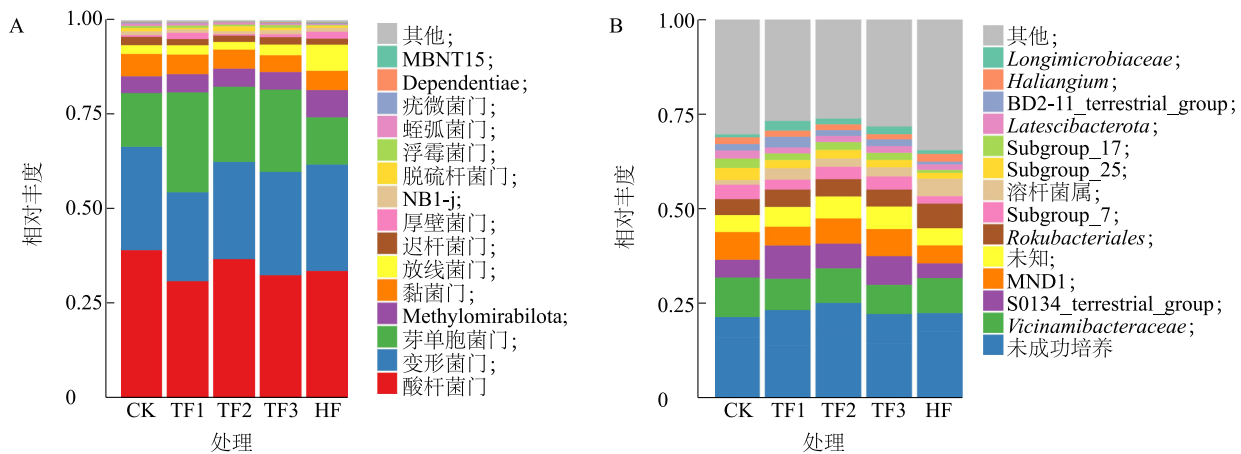
2.4.1 不同施肥处理对土壤细菌群落组成的影响  
门水平上,不同施肥处理土壤细菌群落主要由酸

杆菌门、变形菌门、芽单胞菌门、Methylomirabilota、黏菌门、放线菌门等细菌组成。优势菌门为酸杆菌门、变形菌门和芽单胞菌门,各处理下累计相对丰度为

74.69%~82.46%。TF1、TF3 和 HF 处理酸杆菌门细菌的相对丰度显著低于 CK; TF1~TF3 和 HF 处理的黏菌门细菌的相对丰度显著低于 CK; HF 处理 Methyloirabilota 门细菌的相对丰度高于 CK 和 TF1~TF3 处理。TF1~TF3 处理芽单胞菌门细菌的相对丰度显著高于 HF 处理和 CK(图 1A)。

属水平上,不同施肥处理土壤主要优势菌属为 *Vicinamibacteraceae*、S0134\_terrestrial\_group、MND1、*Rokubacteriales*、Subgroup\_7。TF1~TF3 和 HF 处理

*Vicinamibacteraceae*、MND1 和 Subgroup\_7 等属细菌的相对丰度低于 CK, TF1 和 TF3 处理 *Vicinamibacteraceae* 菌属细菌的相对丰度显著低于 CK 和 HF 处理; TF1 和 HF 处理 MND1、Subgroup\_7 菌属细菌的相对丰度显著低于 CK。TF1~TF3 处理 S0134\_terrestrial\_group 菌属细菌的相对丰度显著高于 CK 和 HF 处理; HF 处理 *Rokubacteriales* 菌属细菌的相对丰度显著高于 CK 和 TF 处理(图 1B)。



A: 门水平; B: 属水平。CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。

图 1 门和属水平上不同施肥处理的土壤细菌群落组成

Fig.1 Community composition of soil bacteria at phylum and genus levels under different fertilization treatments

2.4.2 土壤细菌群落多样性 不同施肥处理对土壤细菌  $\alpha$  多样性指数的影响如表 7 所示。从表中可以看出,各处理的覆盖度均  $\geq 0.989$ ,说明测序深度基本覆盖样品中所有的物种,分析结果具有代表性。HF 处理土壤细菌群落的 Richness 指数显著低于 CK,而 TF1~TF3 处理 Richness 指数与 CK 无显著差异。TF1 和 TF2 处理土壤细菌群落的 Chao1 指数和 Ace 指数显著高于 HF 处理。HF、TF1 和 TF2 处理土壤细菌群落的 Shannon 指数显著低于 CK,且 TF2 处理和 TF3 处理 Shannon 指数均显著高于 HF 处理,说明施肥处理后土壤细菌的多样性和均匀度有降低趋势。不同施肥处理细菌群落的 Simpson 指数无显著变化。

基于 Binary-Jaccard 距离进行主坐标分析 (PCoA) 的结果如图 2 所示。从图中可以看出,第一主坐标 (PC1) 和第二主坐标 (PC2) 对细菌群落结构总变异的贡献率分别为 16.77% 和 9.88%。非参数方差分析检验 (Adonis) 结果表明,不同施肥处理土

壤细菌群落组成差异极显著 ( $R^2 = 0.36196$ ,  $P = 0.001$ )。TF3 处理样本的主坐标位置与 TF1 处理重合,与 TF2 处理部分重合,说明 TF1、TF2 和 TF3 处理土壤细菌群落组成相似,CK 样本的主坐标位置与 TF1、TF2 和 TF3 处理距离较近,与 HF 处理距离较远,表明 TF1~TF3 处理的土壤细菌群落结构与 CK 更相似。

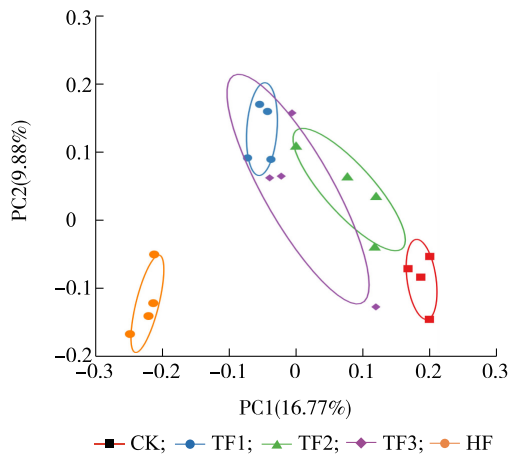
2.4.3 土壤细菌群落显著富集种群差异分析 属水平上,不同处理间差异显著的土壤细菌属如图 3 所示。与 CK 相比,TF1~TF3 处理溶杆菌属 (*Lysobacter*)、*Longimicrobiaceae*、S0134\_terrestrial\_group 等 15 个属细菌的相对丰度显著增加, *Vogesella*、IS-44、*Steroidobacter* 等 18 个属细菌的相对丰度显著降低。与 HF 处理相比,TF1~TF3 处理 Subgroup\_7、OM190、*Longimicrobium* 等 10 个属细菌的相对丰度显著升高,而 *Pseudomonas*、*Gaiellales-uncultured* 等属细菌的相对丰度显著下降。

表 7 不同施肥处理对土壤细菌  $\alpha$  多样性指数的影响

Table 7 Alpha diversity index of soil bacteria under different treatments

处理	Richness 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao1 指数	Ace 指数	覆盖度
CK	1 399±35a	9.37±0.04a	0.996 9±0.000 1a	1 451.00±50.45a	1 458.82±48.13a	0.991
HF	1 238±46b	9.03±0.10c	0.995 8±0.000 5a	1 286.50±67.80b	1 289.56±61.15b	0.993
TF1	1 372±8a	9.13±0.05bc	0.995 9±0.000 3a	1 454.03±22.97a	1 462.12±18.31a	0.989
TF2	1 382±60a	9.19±0.12b	0.996 2±0.000 6a	1 456.37±49.25a	1 460.07±56.31a	0.990
TF3	1 335±28a	9.27±0.07ab	0.996 4±0.000 1a	1 362.20±17.10b	1 372.49±31.20b	0.994

CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。



CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。

图 2 不同施肥处理对土壤细菌  $\beta$  多样性的影响

Fig. 2 Beta diversity index of soil bacteria under different treatments

### 3 讨论

#### 3.1 炭基肥对辣椒植株生长的影响

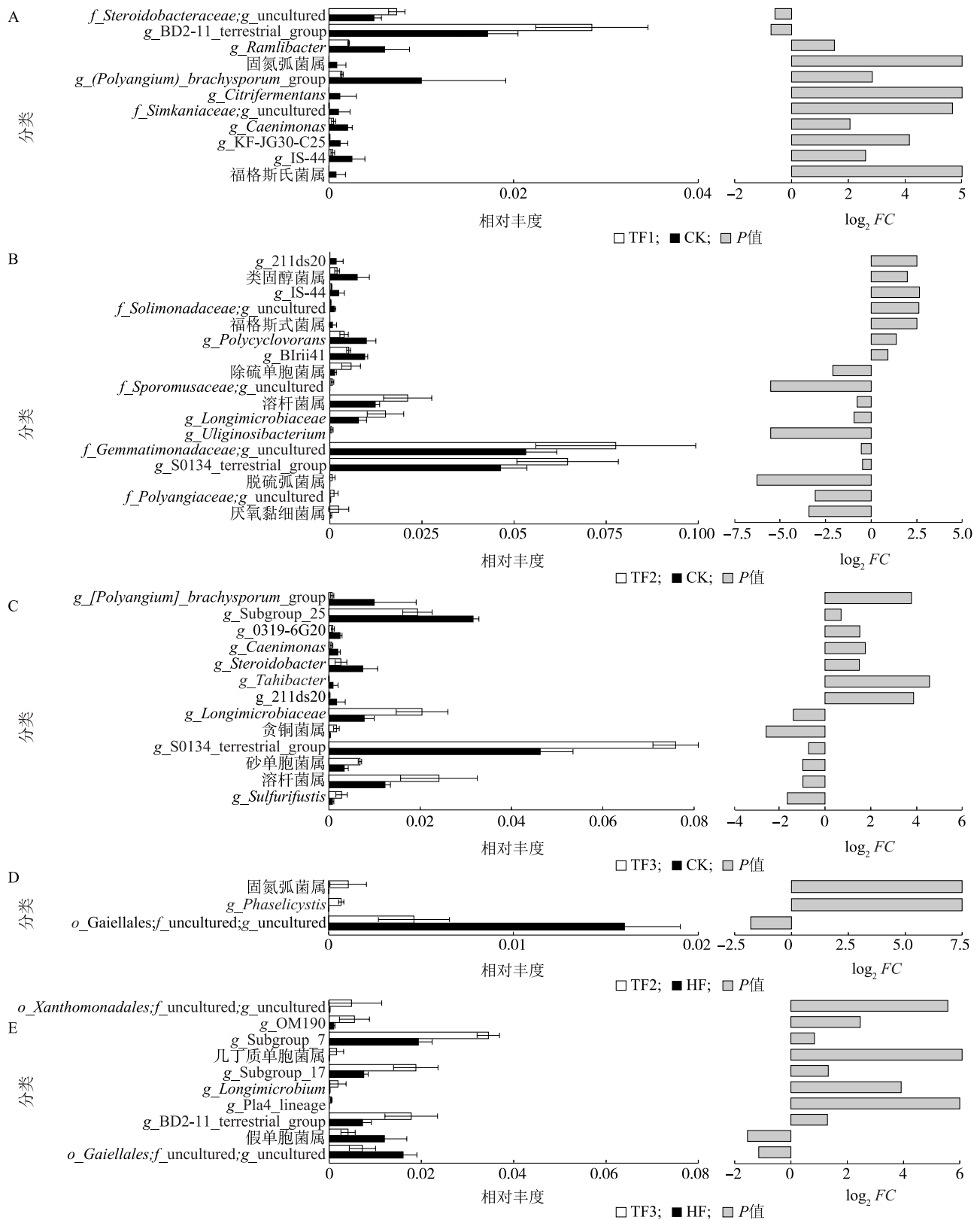
以生物炭为载体制备炭基肥被认为是一种能弥补生物炭自身养分不足、提高肥料利用率、增加作物产量的有效途径<sup>[15]</sup>。肖琳等<sup>[16]</sup>的研究结果表明,与单施复合肥、生物炭处理相比,施用炭基肥能够促进火力楠生长,提高其生物量。其中,木屑炭基肥处理后火力楠的株高、冠幅、茎生物量和总生物量明显高于其他处理。谢婷婷等<sup>[17]</sup>研究发现,与施用常规化肥相比,施用炭基肥能显著提高鲜食玉米的干物质积累量,增加收获期玉米籽粒的干物质分配比例,进而增产 25.43%~35.26%。本研究结果显示,施用炭基肥能促进辣椒茎、果实和根部的生长,与单施复合肥处理相比,施炭基肥(TF1~TF3 处理)辣椒茎粗增加 13.47%~20.84%,单株鲜果重增加 45.26%~

130.32%,单株干果重增加 42.42%~123.22%,果实的干物质分配比例增加 4.71~13.67 个百分点,这与前人的研究结果<sup>[17]</sup>相似。其原因可能是一次性施肥情况下,复合肥前期养分释放速率快,促进了辣椒地上部生长,后期土壤养分供应不足,限制了辣椒植株的生殖生长;炭基肥中的生物炭对养分具有吸持作用,能够在生育后期缓慢释放养分,满足植株对养分的需求,有利于后期辣椒果实的生长。

#### 3.2 炭基肥对辣椒养分吸收和土壤理化性质的影响

植物对氮、磷、钾等营养元素的吸收与利用,极大地影响着植株的生长发育和产量形成。与施用常规化肥相比,施用炭基肥能促进烤烟及蔬菜作物对土壤氮、磷和钾素的吸收,提高肥料农学利用率<sup>[18-19]</sup>。这可能与炭基肥中的生物炭具有改良土壤、增强土壤通透性、提升土壤持水能力有关,且炭基肥料能够为根系的生长发育提供良好的生态环境,促进根系生长,进而促进植株对养分的吸收和积累<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,不同施肥措施对辣椒植株养分吸收和分配有较大影响。与施用复合肥相比,施用炭基肥能在不同程度上促进辣椒植株对氮和磷的吸收,并提高辣椒果实中的氮、磷、钾分配比例。

炭基肥的施用效果很大程度上受到炭基肥种类、施用量、作物类型以及试验地土壤特性等因素的影响。叶菁等<sup>[21]</sup>研究发现,炭基肥替代化肥连续施用 5 年能改善土壤的理化性质,且随着替代比例的增加,土壤 pH、有机质含量、全氮含量等均显著提升。但任依等<sup>[22]</sup>研究发现,炭基肥施用后土壤的理化性状与常规施肥处理无显著差异。本研究结果表明,与 HF 处理相比,TF3 处理能明显提高土壤全氮含量和有效磷含量,而对土壤碱解氮含量、全磷含量、全钾含量、速效钾含量的影响不明显,这与高文慧等<sup>[23]</sup>的研究结果基本一致。生物炭内含丰富的碳元素,且结构稳定,被施加到土壤中后,微生物很



CK、HF、TF1、TF2、TF3 见表 1 注。FC: 差异倍数。

图 3 不同处理差异显著的土壤细菌属

Fig.3 Soil bacterial genera with significant differences among different treatments

难对其进行分解利用,因此,施用炭基肥能提升土壤有机质含量。本研究中可能生物炭的添加量较低,导致TF1~TF3处理的有机质含量与施用复合肥处理相比无显著差异。

### 3.3 炭基肥对土壤微生物的影响

微生物群落的多样性是影响土壤生态系统功能的关键因素之一,其水平与生态系统的健康程度成正比<sup>[24]</sup>。本研究结果表明,与施用复合肥相比,施用炭基肥处理(TF1~TF3处理)土壤微生物群落的Shannon指数、Chao1指数和Ace指数整体上呈增加趋势,这与高文慧等<sup>[23]</sup>和骆晓声等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。上述结果说明施用炭基肥可以在一定程度上增加土壤微生物群落的丰富度,这可能是由于炭基肥的施用增加了土壤中的碳源<sup>[26-27]</sup>,且生物炭的多孔结构能为土壤微生物提供适宜的生存环境,进而提高土壤微生物群落的多样性<sup>[28]</sup>。

土壤微生物能参与土壤有机物分解和养分循环等关键生态过程<sup>[29-30]</sup>。放线菌门和酸杆菌门细菌含有多种纤维素、半纤维素和多糖降解基因,能够有效促进土壤中的有机物降解和土壤碳循环<sup>[31]</sup>,而变形菌门和芽单胞菌门细菌则分别在土壤氮循环和土壤固氮过程中发挥着重要作用<sup>[32-33]</sup>。本研究结果表明,5个处理的优势菌门均为酸杆菌门、变形菌门和芽单胞菌门,总相对丰度为74.69%~82.46%。其中,TF1~TF3处理芽单胞菌门细菌的相对丰度显著高于HF处理和CK,且TF1~TF3处理还能有效提高辣椒根系和果实的干物质积累量,这可能与芽单胞菌门细菌能促进土壤固氮相关。此外,本研究发现,TF1、TF3和HF处理酸杆菌门细菌的相对丰度显著低于CK,这与刘威帆等<sup>[34]</sup>、张毅等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。可能原因是酸杆菌门作为一种嗜酸性细菌,适宜在低pH的环境中生存,而炭基肥能够很大程度地降低土壤中的交换性铝含量,明显提升土壤的pH,从而导致酸杆菌门细菌相对丰度降低<sup>[36-37]</sup>。

## 4 结论

炭基肥能够显著增加土壤全氮含量和有效磷含量,提高土壤细菌多样性和优势菌门细菌的总相对丰度,同时促进养分在根部与果实间的分配,在一定程度上增加辣椒植株对氮、磷的吸收,有助于植株的生长,从而显著提高辣椒产量。

### 参考文献:

- [1] 邹学校,马艳青,戴雄泽,等. 辣椒在中国的传播与产业发展[J]. 园艺学报,2020,47(9):1715-1726.
- [2] 刘雅仙,安 宁,吴正超,等. 长期水稻秸秆及生物炭还田替代等养分量化肥对寒地水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(10):1771-1782.
- [3] 邱子健,申卫收,林先贵. 化肥减量增效技术及其农学、生态环境效应[J]. 中国土壤与肥料,2022(4):237-248.
- [4] 黄绍文,唐继伟,李春花,等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6):1480-1493.
- [5] 陈温福,张伟明,孟 军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
- [6] 张伟明,修立群,吴 迪,等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. 作物学报,2021,47(1):1-18.
- [7] ZHAO Y, LI X, LI Y Y, et al. Biochar acts as an emerging soil amendment and its potential ecological risks: a review [J]. Energies,2023,16(1):410.
- [8] 李昌娟,杨文浩,周碧青,等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. 土壤通报,2021,52(2):387-397.
- [9] 刘长涛,侯建伟,索全义,等. 玉米秸秆生物质炭基肥的结构与性质表征[J]. 土壤,2019,51(3):465-469.
- [10] 魏春辉,任奕林,刘 峰,等. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展[J]. 河南农业科学,2016,45(3):14-19.
- [11] 李昌娟,杨文浩,周碧青,等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. 土壤通报,2021,52(2):387-397.
- [12] 陈 懿,吴 春,李彩斌,等. 炭基肥对植烟黄壤细菌、真菌群落结构和多样性的影响[J]. 微生物学报,2020,60(4):653-666.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 中华人民共和国农业部. 植物中氮、磷、钾的测定:NY/T 2017-2011[S]. 北京:中国农业出版社,2011.
- [15] 陈宇琳,童晨晓,吴凤英,等. 烟秆炭基肥对烤烟生长和品质的影响[J]. 南方农业学报,2022,53(6):1625-1633.
- [16] 肖 琳,冯为迅,罗志忠,等. 生物炭和生物炭基肥对林木生长和土壤肥力的影响[J/OL]. 华南农业大学学报[2025-01-02]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20240805.1243.002>.
- [17] 谢婷婷,赵 欢,肖厚军,等. 炭基肥对贵州黄壤鲜食玉米光合特性、干物质积累及产量形成的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(3):61-67.
- [18] 陈 懿,林英超,黄化刚,等. 炭基肥对植烟黄壤性状和烤烟养分积累、产量及品质的影响[J]. 土壤学报,2019,56(2):495-504.
- [19] 姜丽娜,索琳娜,梁丽娜,等. 生物炭基肥基施对大白菜产量、品质、养分吸收及土壤性质影响研究[J]. 中国土壤与肥料,2023(7):23-31.
- [20] 曾 雯,胡 旺,杨子或,等. 施用南荻生物炭对水稻养分利用特征的影响[J]. 农业资源与环境学报,2023,40(3):689-698.

- [21] 叶 菁,王义祥,刘岑薇,等. 连续炭基肥替代化肥对菜园土壤性质和细菌群落结构的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2023,31(4):494-502.
- [22] 任 依,姜培坤,鲁长根,等. 炭基肥与有机肥替代部分化肥对青紫泥水稻土壤微生物丰度及酶活性的影响[J]. 浙江农林大学学报,2022,39(4):860-868.
- [23] 高文慧,郭宗昊,高 科,等. 生物炭与炭基肥对大豆根际土壤细菌和真菌群落的影响[J]. 生态环境学报,2021,30(1):205-212.
- [24] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota[J]. Science,2004,304(5677):1629-1633.
- [25] 骆晓声,寇长林,张济世,等. 炭基肥对麦-玉轮作农田土壤酶活性和真菌群落及作物产量的影响[J/OL]. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405297>.
- [26] DAI Z M, XIONG X Q, ZHU H, et al. Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes[J]. Biochar,2021,3(3):239-254.
- [27] GUO X F, LI H S, HU Y M. Effects of biochar on the diversity and community structure of soil fungi in intercropping system[J]. Applied Ecology and Environmental Research,2019,17(4):8817-8834.
- [28] 冯慧琳,徐辰生,何欢辉,等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学,2021,42(1):422-432.
- [29] HAN Z Q, XU P S, LI Z T, et al. Microbial diversity and the abundance of keystone species drive the response of soil multifunctionality to organic substitution and biochar amendment in a tea plantation[J]. GCB Bioenergy,2022,14(4):481-495.
- [30] FIERER N. Embracing the unknown; disentangling the complexities of the soil microbiome[J]. Nature Reviews. Microbiology,2017,15(10):579-590.
- [31] SHENG Y Q, ZHU L Z. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH[J]. Science of the Total Environment,2018,622:1391-1399.
- [32] DIN M, NELOFER R, SALMAN M, et al. Production of nitrogen fixing *Azotobacter* (SR-4) and phosphorus solubilizing *Aspergillus niger* and their evaluation on *Lagenariasiceraria* and *Abelmoschus-esculentus*[J]. Biotechnology Reports,2019,22:e00323.
- [33] 刘东明,郭宇轩,童晨晓,等. 烟秆炭基肥对植烟土壤氮组分及微生物群落结构的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(4):932-941.
- [34] 刘威帆,王晓港,刘吉利,等. 炭基肥对旱区玉米农田土壤理化性质、酶活性及微生物群落的影响[J]. 环境科学,2025,46(3):1905-1914.
- [35] 张 毅,杨文浩,周碧青,等. 炭基肥对酸化茶园土壤细菌和真菌数量及群落结构的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2023,52(2):247-257.
- [36] 赵 琳,刘桂珍,钱笑杰,等. 炭基肥添加对蜜柚果园酸性土壤 pH 和交换性能的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(3):244-251.
- [37] WANG L, BUTTERLY C R, WANG Y, et al. Effect of crop residue biochar on soil acidity amelioration in strongly acidic tea garden soils[J]. Soil Use and Management,2014,30(1):119-128.

(责任编辑:石春林)