农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

沼液施用下的西蓝花种植土壤微生物群落演变特征

许剑锋, 孟庆婷, 傅佳杰, 金羽清, 蔡建军, 马嘉伟, 王美

引用本文:
许剑锋, 孟庆婷, 傅佳杰, 等. 沼液施用下的西蓝花种植土壤微生物群落演变特征[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3172–3180.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024–1061

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

溶磷真菌固体发酵菌肥对玉米生长及根际细菌群落结构的影响
陈莎莎, 孙敏, 王文超, 李真, 王世梅, 戴乐天, 徐阳春
农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1910–1917 https://doi.org/10.11654/jaes.2017–1629

稻作条件下不同施肥模式对盐碱化土壤细菌和古菌群落结构的影响
李明, 马飞, 肖国举
农业环境科学学报. 2018, 37(3): 495–504 https://doi.org/10.11654/jaes.2017–1107

施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响
李可, 孙彤, 孙涛, 徐应明, 孙约兵
农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2316–2324 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0036

钝化材料对农田土壤Cd形态及微生物群落的影响
兰玉书, 袁林, 杨刚, 程蓉, 石梏岐, 高本汗
农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2743–2751 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0637

模拟地下CO2泄漏对土壤微生物群落的短期影响
张旺园, 张绍良, 陈浮, 侯湖平, 冯启言, 马静
农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1167–1176 https://doi.org/10.11654/jaes.2016–1559

关注微信公众号，获得更多资讯信息

许剑锋, 孟庆婷, 傅佳杰, 等. 沼液施用下的西蓝花种植土壤微生物群落演变特征[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3172-3180.
XU J F, MENG Q T, FU J J, et al. Evolution characteristics of soil microbial communities in broccoli cultivation under biogas slurry application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3172-3180.

开放科学OSID

沼液施用下的西蓝花种植土壤微生物群落演变特征

许剑锋[1], 孟庆婷[2], 傅佳杰[2], 金羽清[1], 蔡建军[1], 马嘉伟[3*], 王美[2*]

(1.临海市农业技术推广中心, 浙江 临海 317000; 2.浙江农林大学动物科技学院·动物医学院, 杭州 311300; 3.浙江农林大学茶学与茶文化学院, 杭州 311300)

摘 要:为探讨沼液施用对西蓝花种植土壤细菌和真菌多样性的影响,通过宏基因组测序技术,对比分析化肥与沼液配施(MIX)以及全量施沼液(BS)处理下西蓝花土壤中细菌与真菌的多样性变化,并结合土壤的理化性质,揭示微生物群落的演变规律。结果显示:与对照(CK)相比,BS处理显著提高了土壤pH值和土壤有机质、速效钾和有效磷含量,其中速效钾和有效磷含量分别增加了633.0%和95.3%;MIX处理降低了土壤pH值,但提升了全氮和有效磷含量。微生物群落分析表明,与CK相比,在细菌方面,BS处理增加了土壤中假单胞菌门和绿弯菌门的丰度,后者的丰度提升高达229.6%;MIX处理则显著提高了土壤中拟杆菌门的丰度。在真菌方面,BS处理显著促进了土壤中子囊菌门的增殖,其丰度提高了148.7%,而MIX处理则提升了土壤中油壶菌门的丰度。相关性分析表明,鞘氨醇单胞菌属的丰度与有机质和速效钾呈正相关;曲霉属的丰度随pH值的提升而增加,但与碱解氮和全磷呈负相关。研究表明,沼液的施用显著提高了土壤pH值和有机质、速效钾、有效磷含量,优化了微生物群落结构,增强了细菌和真菌群落的养分循环与病害抑制能力。沼液作为绿色有机肥料,具有提升农田土壤质量和促进可持续农业发展的潜力。

关键词:沼液;西蓝花;土壤细菌群落;土壤真菌群落

中图分类号:S154.3;S635.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2025)12-3172-09 doi:10.11654/jaes.2024-1061

Evolution characteristics of soil microbial communities in broccoli cultivation under biogas slurry application

XU Jianfeng[1], MENG Qingting[2], FU Jiajie[2], JIN Yuqing[1], CAI Jianjun[1], MA Jiawei[3*], WANG Mei[2*]

(1. Linhai Agricultural Technology Promotion Center, Linhai 317000, China; 2. College of Animal Science and Technology · College of Veterinary Medicine, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 3. College of Tea Science and Tea Culture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: To investigate the impact of biogas slurry application on the diversity of bacterial and fungal communities in soils used for broccoli cultivation. Using metagenomic sequencing technology, we analyzed the changes in bacterial and fungal diversity under two treatments: combined application of chemical fertilizer and biogas slurry (MIX), and sole application of biogas slurry (BS). Combined with soil physicochemical properties, we further revealed the evolutionary patterns of microbial communities. The result shows that: Compared with the control (CK), the BS treatment significantly increased soil pH, soil organic matter (SOM), available potassium (AK), and available phosphorus (AP), with AK and AP content increasing by 633.0% and 95.3%, respectively. In contrast, the MIX treatment reduced soil pH but enhanced total nitrogen (TN) and AP levels. Microbial community analysis revealed that, in terms of bacteria, the BS treatment markedly increased the relative abundances of Pseudomonadota and Chloroflexota, with Chloroflexota showing a notable increase of 229.6% compared to CK. The MIX treatment, on the other hand, significantly enriched Bacteroidota. For fungi, the BS treatment significantly promoted the proliferation of Ascomycota, with a 148.7% increase in abundance, while the MIX treatment enriched

收稿日期:2024-12-04 **录用日期:**2025-04-03
作者简介:许剑锋(1990—),男,浙江临海人,农艺师,主要从事耕地质量与肥料技术推广。E-mail: xujf007@qq.com
***通信作者:**马嘉伟 E-mail:jiawma@zafu.edu.cn; 王美 E-mail:meiwang@zafu.edu.cn
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1902900)
Project supported: National Key Research and Development Program of China(2023YFD1902900)

Olpidiomycota populations in the soil. Correlation analysis indicated that the abundance of *Sphingomonas* was positively correlated with SOM and AK, while the abundance of *Aspergillus* increased with higher pH but was negatively correlated with alkaline hydrolysis nitrogen (AHN) and total phosphorus (TP). In conclusion, the application of biogas slurry significantly improved soil pH, SOM, AK, and AP levels, while simultaneously optimizing the soil microbial community structure. These changes enhanced nutrient cycling and disease suppression potential in bacterial and fungal communities. As an environmentally friendly organic fertilizer, biogas slurry holds great promise for improving soil quality and promoting sustainable agricultural development.

Keywords: biogas slurry; broccoli; soil bacterial community; soil fungal community

西蓝花是一种营养价值极高的蔬菜，富含维生素C、维生素E、槲皮素和萝卜硫素等多种活性成分，这些成分具有显著的抗氧化、抗炎及降低慢性疾病风险的潜力[1-2]。土壤微生物是农田生态系统的重要组成部分，在有机质转化和养分循环过程中发挥着关键作用[3-5]。它们不仅能够加速土壤养分循环，还可显著提升蔬菜作物的营养价值及健康功能[6-9]。土壤细菌和真菌通过参与养分循环、改良土壤结构、与植物相互作用等方式缓解沼液的负面效应，进而影响蔬菜的品质和安全性[9-10]。近年来，宏基因组测序技术的广泛应用逐步加深了人们对土壤微生物群落组成及其功能的认识[11]。然而，关于西蓝花种植过程中土壤微生物群落的研究相对较少，其具体机制亟待深入探讨。

不合理的施肥方式易导致土壤质量退化、微生物群落失衡及肥力下降，已成为制约农业可持续发展的重要障碍[12]。例如，过量施用化肥会导致肥料利用率下降和农作物产出减少，进而引发土壤酸化、水体富营养化和大气污染等诸多环境问题[13-14]。相反，合理施肥能够优化微生物群落结构、改善土壤质量，从而提高作物产量[15-19]。沼液是有机物厌氧发酵后的液态副产物，富含植物生长所需的氮、磷、钾等营养元素及多种活性物质，能够显著提升土壤酶活性、改善作物根系活力，并最终提升作物的品质与产量[20-22]。沼液中的活性成分能够增强植物的抗病能力，抑制病原菌，从而降低农药使用频率，提高资源利用效率[23]。此外，沼液中的水溶性有机碳不仅能增加土壤有机质含量，还可作为土壤团聚体的胶结剂，有助于改善土壤结构[24]。本研究以浙江省临海市桃渚镇的某农用地为研究对象，系统分析在长期施用沼液条件下西蓝花种植土壤中细菌与真菌多样性的变化规律，旨在揭示不同施肥模式对西蓝花土壤微生物群落的影响机制。研究结果将为化肥减量与有机肥合理施用提供科学依据，并为改善农田土壤健康状况、提升蔬菜的产量和品质及推动农业的可持续发展奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点设于浙江省临海市桃渚镇某农田（28°40′~29°04′N，120°49′~121°41′E）。该地区具有明显的亚热带季风气候特征，年平均气温17 ℃，年降水量约为1 550 mm。

1.2 试验设计

以“稻-稻轮作”模式下的水稻土壤为对照，选取“水稻-西蓝花轮作”模式下连续5年（2018—2023年）施用不同追肥处理的西蓝花（品种：早熟炎秀，种植时间：8—12月）土壤为研究对象。西蓝花的施肥方案为基肥和追肥分次施用，基肥在西蓝花移栽前7~10 d施加化肥（复合肥16-16-16）；追肥基于等氮原则设置MIX（80%化肥+20%猪粪发酵沼液）和BS（全量施猪粪发酵沼液）两种处理。化肥与沼液年施用量分别为1.8 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$和150 $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。沼液基础性质为：pH 7.3，全氮含量1 105.13 $mg\cdot L^{-1}$，全磷含量125.24 $mg\cdot L^{-1}$，铵态氮含量913.12 $mg\cdot L^{-1}$，硝态氮含量4.3 $mg\cdot L^{-1}$。2023年12月西蓝花收获后，按照五点取样法采集0~20 cm耕层土壤，每处理采集1 kg混合样。样品剔除石砾和植物残体等杂物后，装入无菌袋并迅速带回实验室。土样分为两部分：一部分风干后过2 mm筛用于土壤理化性质分析；另一部分鲜样储存于-80 ℃超低温冰箱，用于土壤微生物群落分析。所有处理田间管理措施（灌溉、病虫害防治等）均保持一致，以排除非施肥因素干扰。

1.3 土壤理化性质测定

土壤pH值采用土水比1∶2.5（*m*/*V*）混合，静置30 min后使用pH计测定。土壤有机质含量通过重铬酸钾-硫酸外加热法测定；全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定；全磷和全钾通过硫酸-高氯酸消煮法提取，并分别使用钼锑抗比色法和火焰光度计法测定。速效磷含量采用$NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定；速效钾含量采用HF-$HClO_4$消煮-火焰光度计法测

定；碱解氮含量采用碱解扩散法测定，即用碱液处理样品，硼酸吸收后以标准酸滴定。以上测定方法均参考《土壤农化分析》进行[25]。

1.4 土壤微生物群落分析

使用HiPure Soil DNA Mini Kit从土壤样品中提取基因组DNA，随后利用1%琼脂糖凝胶电泳检测DNA的完整性和纯度。接着，通过Covaris M220（Gene Company Limited）对提取的DNA片段化，筛选符合质量要求的片段用于构建基因组文库。随后在Illumina HiSeq X Ten测序平台上对每个文库进行高通量测序（PE150）[26]。

1.5 数据统计分析

参照刘臻岳等[27]的方法进行生物信息学分析。基础数据处理采用Excel 2016完成，方差分析使用SPSS Statistics v26.0。用单样本t检验比较各指标间的差异显著性。相关性分析（Pearson）和热图绘制通过R v4.2.1完成，其他图形绘制使用Origin 2019软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同沼液施用方式下的西蓝花土壤理化性质变化

由表1可知，不同施肥方式对土壤理化性质产生了显著影响。BS处理使土壤pH值显著提高，较CK组提高了0.46个单位（$P<0.05$）。而MIX处理导致土壤pH值相较于CK有所降低。此外，与CK处理相比，BS处理对土壤有机质、全氮、速效钾、有效磷的含量均产生影响，分别增加了16.4%、21.2%、633.0%和95.3%，而全磷含量则显著降低（$P<0.05$）。在MIX处理下，土壤全氮、全磷、碱解氮、速效钾和有效磷的含量均较CK有所增加，但全钾含量则显著下降（$P<0.05$）。

2.2 不同沼液施用方式下的西蓝花土壤细菌与真菌群落结构变化

图1显示了不同施肥处理对西蓝花种植土壤细菌群落在门水平和属水平下结构特征的影响。在门水平上（图1a），土壤中主要的优势菌群为假单胞菌门（Pseudomonadota）、酸杆菌门（Acidobacteriota）、芽单胞菌门（Gemmatimonadota）、拟杆菌门（Bacteroidota）和绿弯菌门（Chloroflexota）。与CK处理相比，BS处理使变形菌门和绿弯菌门的相对丰度显著提高（$P<0.05$），分别增加了44.8%和229.6%。然而显著降低了酸杆菌门的相对丰度（$P<0.05$），减少幅度达到了74.4%。MIX处理下，拟杆菌门的丰度与CK组相比显

表1 不同施肥处理土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil under different fertilization treatments

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg^{-1})	全氮 Total nitrgen/ (g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus/ (g·kg^{-1})	全钾 Total postassium/ (g·kg^{-1})	碱解氮 Alkali-hydro-lyzable Nitrgen/(mg·kg^{-1})	速效钾 Available phosphorus/ (mg·kg^{-1})	有效磷 Available postassium/ (mg·kg^{-1})
CK	8.21b	9.22b	0.66b	0.883b	18.50a	48.84b	94.98c	6.62c
MIX	7.95b	10.18ab	0.91a	1.269a	16.73b	63.29a	319.97b	16.10a
BS	8.67a	10.73a	0.80ab	0.828c	18.24ab	46.02b	696.20a	12.93b

注：同列不同字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

Note：Different letters in the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

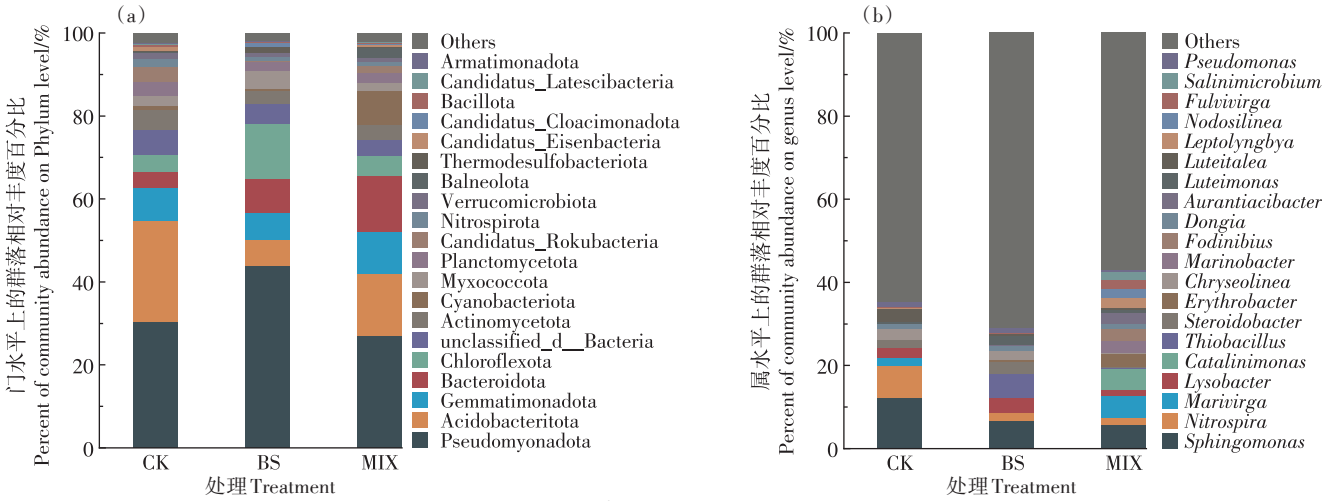


图1 各处理土壤中细菌门和属的相对丰度

Figure 1 Relative abundance of bacterial phyla and genera in each treated soil

著增加（$P<0.05$）。在属水平上（图1b），土壤核心菌属包括鞘氨醇单胞菌属（*Sphingomonas*）、硝化螺旋菌属（*Nitrospira*）、*Marivirga*、溶杆菌属（*Lysobacter*）和卡他霉单胞菌属（*Catalinimonas*）。与CK处理相比，BS处理的溶杆菌属和卡他霉单胞菌属的相对丰度显著增加（$P<0.05$），分别提高了54.5%和128.5%。然而鞘氨醇单胞菌属和硝化螺旋菌属的相对丰度显著降低（$P<0.05$），分别下降了44.3%和77.9%。在MIX处理中，*Marivirga*的相对丰度显著提升（$P<0.05$）。

图2展示了不同施肥处理对西蓝花种植土壤真菌群落变化的影响特征。在门水平上（图2a），各处理土壤中的主要真菌门包括子囊菌门（Ascomycota）、毛霉门（Mucoromycota）、担子菌门（Basidiomycota）和油壶菌门（Olpidiomycota）。与CK处理相比，BS处理显著提高了子囊菌门的丰度（$P<0.05$），增加了148.7%；而MIX处理则提升了油壶菌门的丰度。在属水平上（图2b），土壤中优势真菌属包括根霉属（*Rhizopus*）、曲霉属（*Aspergillus*）、弗里德曼霉菌属（*Friedmanniomyces*）、油壶菌属（*Olpidium*）和球囊霉属（*Glomus*）。与CK处理相比，BS处理显著提升了根霉属的丰度，同时显著抑制了曲霉属的丰度（$P<0.05$）。在MIX处理中，弗里德曼霉菌属和油壳菌属的相对丰度均有所提高。

2.3 不同沼液施用方式下的西蓝花土壤细菌与真菌群落功能代谢分析

如图3显示，与CK处理相比，BS处理在优化西蓝花土壤细菌和真菌功能方面表现出显著优势。BS处理增强了土壤细菌群落的基因转录（K）、DNA复制/重组/修复（L）及细胞壁/膜合成（M）功能（图3a）。此外，BS处理还增强了土壤真菌群落的氮代谢相关功能（E、P）及能量产生与转换功能（C）等代谢活动，并增强了菌群的防御机制（图3b）。而MIX处理在这些功能上的促进作用较弱。

图4展示了BS处理及MIX处理对西蓝花土壤细菌和真菌代谢途径的影响。同CK处理相比，BS处理显著提升了细菌群落的碳水化合物代谢（Carbohydrate metabolism）、氨基酸代谢（Amino acid metabolism）和抗药性功能（Drug resistance：antimicrobial）（图4a）。同CK处理相比，BS处理显著提高了真菌群落的能量代谢（Energy metabolism）、翻译（Translation）与基因表达功能（Replication and repair）（图4b）。而MIX处理在这些功能上的作用效果较弱。

2.4 不同沼液施用方式下的土壤理化性质与细菌、真菌群落的相关性分析

图5揭示了种植西蓝花的土壤的微生物群落与土壤理化性质的相关性。图5a显示，土壤有机质、速效钾含量的提高与溶杆菌属和鞘氨醇单胞菌属的生长之间存在显著正相关（$P<0.05$），但与硝化螺旋菌属的增殖呈显著负相关（$P<0.05$）。图5b表明，土壤pH值的升高与根霉属、曲霉属的生长呈显著正相关（$P<0.05$）。

3 讨论

3.1 不同沼液施用方式对土壤理化性质的影响

土壤pH是表征土壤化学性质的重要指标，直接影响土壤中各类养分的形态和有效性。本实验结果表明，BS处理显著提高了西兰花土壤的pH值，而MIX处理则导致土壤pH值下降。这一现象与高刘

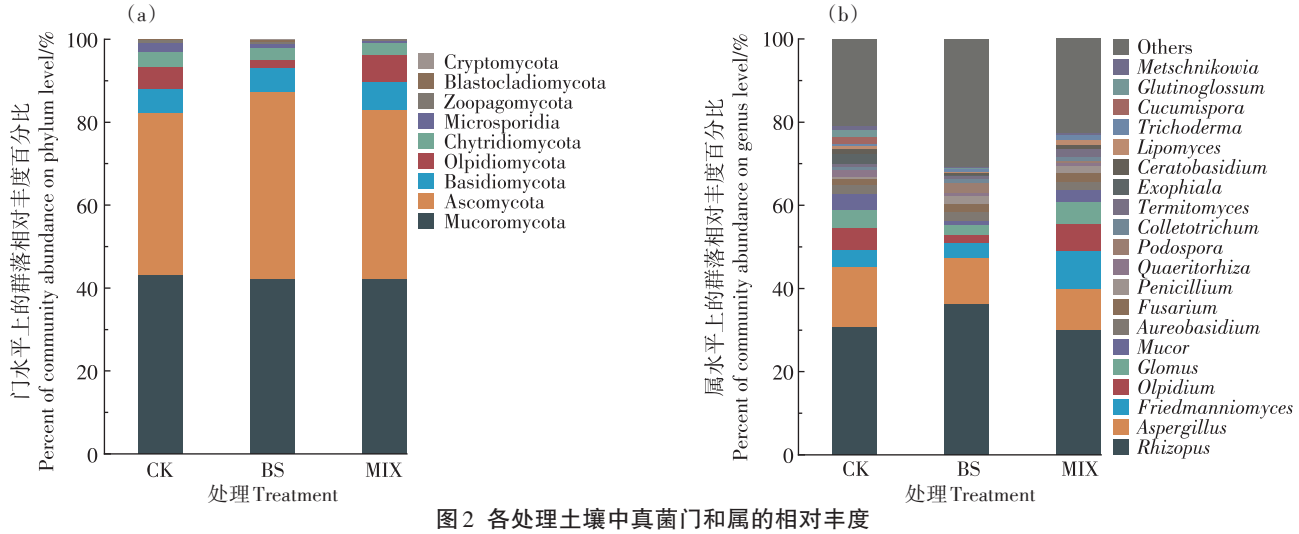


图2 各处理土壤中真菌门和属的相对丰度

Figure 2 Relative abundance of fungal phyla and genera in each treated soil

等[28]和杜彩艳等[29]的研究结果一致，但与蔡茂等[30]的研究结果存在差异，可能是由于蔡茂等[30]所采用的酸性沼液是未完全发酵的沼液。有机质为作物生长提供必需的营养成分，促进土壤团粒结构的形成与稳定，从而可提高土壤的保水及保肥能力[28]。氮、磷、钾含量在作物生长过程中直接影响其品质与产量。本实验中，无论是BS处理还是MIX处理，均显著提高了土壤有机质含量，这与以往的研究结果相符[17,31]。此外，各处理下土壤全氮、速效钾、有效磷等养分含量均有不同程度上的增加，与郑学博等[32]和张媛等[33]的结论一致，表明施用沼液能够显著改善土壤的理化性质。BS处理组中，土壤碱解氮、全磷和全钾含量较CK组有所下降，可能原因如下：沼液施用增加土壤湿度，为氨气挥发创造了条件，同时加速了微生物的硝化和反硝化作用，这些过程综合导致了碱解氮含量下降；沼液中的不稳定磷形态在微生物作用下被分解为有效磷，有效磷一部分被植物吸收利用，另一部分则可能被土壤固定或淋溶至深层，从而导致全磷含量下降[34]；此外，虽然沼液中的有机物能够改善土壤结构、促进团聚体形成并提高对钾离子的吸附能力，但沼液施用也可能通过增加土壤湿度和溶解态钾的迁移性，导致钾的淋溶损失，综合作用下使全钾含量下降[35]。总体而言，相较于BS处理，MIX处理在提高土壤养分有效性方面更具优势。

3.2 不同沼液施用方式对土壤细菌与真菌群落结构及功能的影响

研究表明，土壤pH值直接影响微生物群落的组成和活性[36]。在酸性土壤中，嗜酸性微生物占主导地位。一些学者认为，土壤微生物群落结构在不同环境中存在较大差异，但优势菌群基本相似[37]。酸杆菌门可以参与土壤有机物的碳氮循环，从而为土壤提供养分、为微生物生长提供能源[38]。虽然酸杆菌门是嗜酸菌并偏好低氮环境，但在本实验中，其作为优势菌的存在可能与全量施用沼液引起的土壤pH值与全氮含量提升形成的微环境有关[39]。与CK相比，BS处理显著增加了假单胞菌门和绿弯菌门的相对丰度，这与康婉青等[35]的研究结果相似。这一现象可能源于二者属于适应低营养环境的寡营生物，但在养分含量升高的条件下，其丰度也会增加，可能与沼液改善了其适宜的生长环境有关[40]。已有研究指出，鞘氨醇单胞菌属是一类土壤益生菌，能提高生防、反硝化及代谢芳香化合物等生态功能[41]。何琳[42]发现鞘氨醇单胞菌属在沼液处理组中的相对丰度明显高，但本实验结果显示，与CK处理相比，BS处理显著降低了鞘氨醇单胞菌属的相对丰度。这可能是由于该过程引入的其他微生物与鞘氨醇单胞菌属之间产生竞争机制，从而

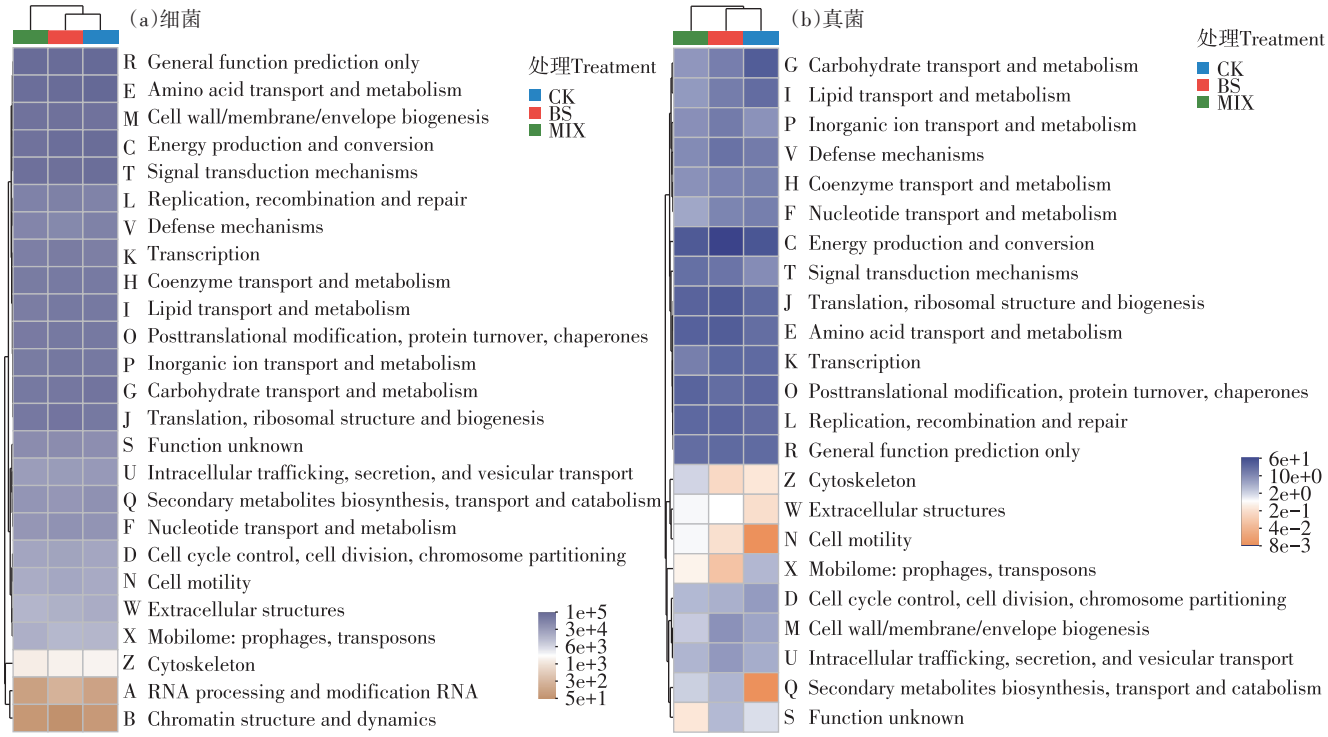


图3 细菌与真菌的COG功能丰度热图

Figure 3 Heatmap of bacterial and fungal COG functions

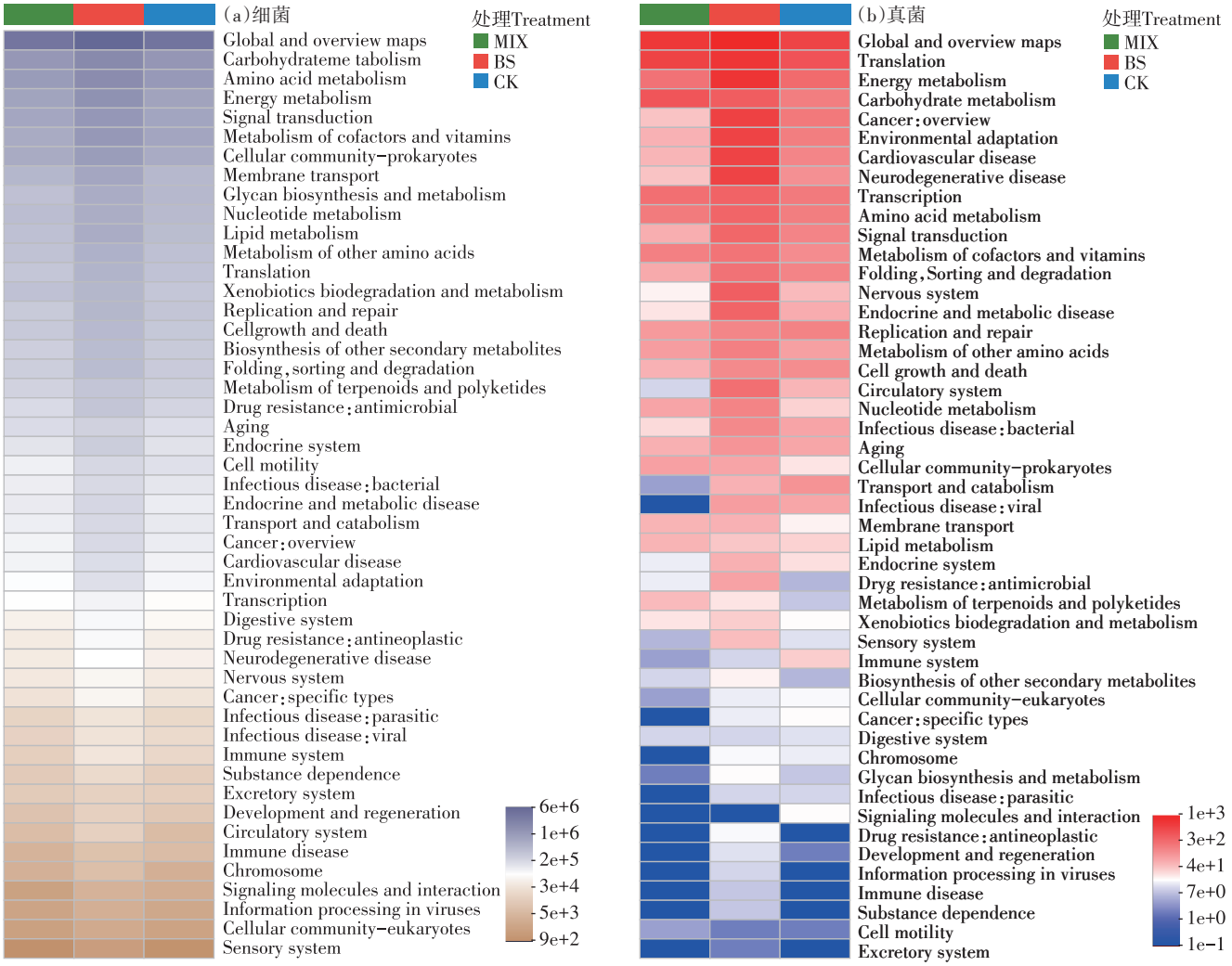
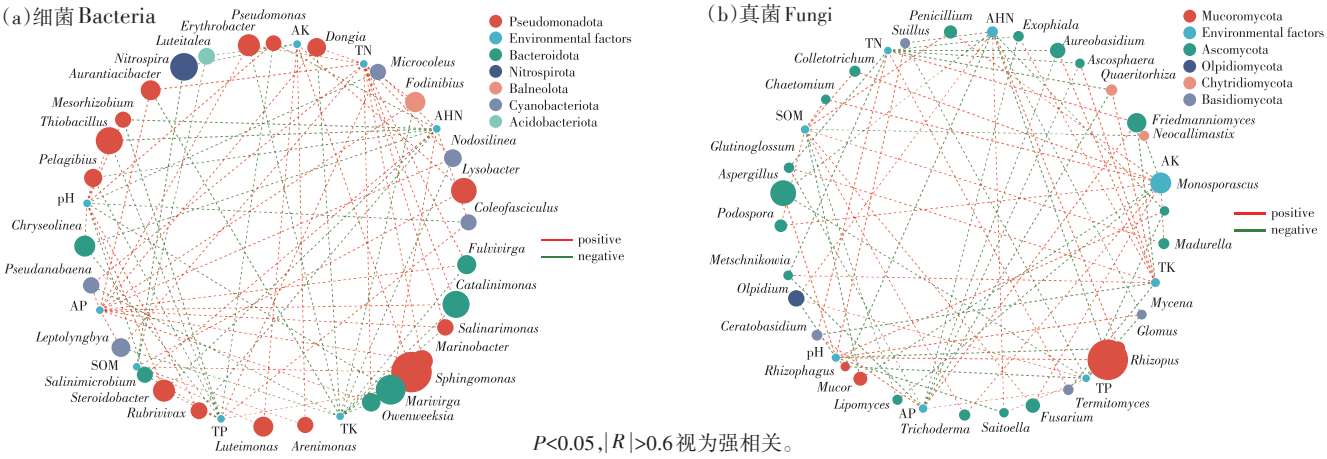


图4 细菌与真菌的KEGG Level 2功能丰度热图

Figure 4 Heatmap of KEGG Level 2 functional classification for bacteria and fungi



$P<0.05$，$|R|>0.6$视为强相关。

图5 土壤理化性质与细菌群落、真菌群落的相关性分析

Figure 5 Correlation analysis between soil physicochemical properties and bacterial communities and fungal communities

导致该菌属丰度降低，具体原因尚需进一步研究。本研究还发现，BS处理提高了子囊菌门的丰度，该真菌被认为可通过改善根系吸收能力和参与养分转化，为作物提供更强的养分支持和抗病保障[43-44]。根霉属和曲霉属分别属于接合菌门和子囊菌门，已有研究表明，全量沼液施肥可以增强上述两菌门[45]。拟杆菌门

不仅在物质循环和养分转化中发挥关键作用，还能改善土壤结构、抑制病原体，并参与污染物修复，研究证明在化肥和沼液配施处理下拟杆菌门和变形菌门的丰度增加[46]。*Marivirga*属于变形菌门，弗里德曼霉菌属属于子囊菌门，其在本实验中的变化与已有研究结果一致。此外，长期施用化肥可能导致某些病原真菌的丰度增加，从而对土壤健康和作物生产力产生潜在的负面影响[47-48]。进一步分析发现，BS处理的土壤显著增强了基因信息转导、细胞代谢、信号传导等功能。尽管MIX处理也提高了这些功能，但其效果相对较弱。由此表明，沼液施用对土壤微生物群落的影响显著。施用沼液不仅改善了土壤性质，为土壤环境提供了直接的营养支持；还通过优化土壤微生物群落结构与功能，间接提升了西蓝花的抗病性和抗逆能力。

3.3 土壤理化性质与微生物群落之间的相互影响

土壤微生物在维持土壤生态系统的稳定性方面发挥着重要作用。康婉青等[35]的研究表明，不同土壤微生物菌属的丰度与土壤养分含量之间存在显著关联。因此，土壤微生物群落丰度可作为评价土壤肥力的有效指标。全量施用沼液引发的土壤理化性质变化调控了微生物群落的结构与功能，反映了环境因子与微生物适应性之间的复杂关系[49]。土壤pH值的提升不仅改变了微生物的生态位分布，还可能直接影响土壤中离子的交换能力和养分的有效性[50]。这种变化显著提高了假单胞菌门和绿弯菌门的丰度，而酸杆菌门丰度的下降可能与其偏好酸性环境的代谢特性直接相关[51]。从微生物功能的角度来看，pH值的变化可能通过调节群落间的竞争关系和资源利用效率[52]，为碱性偏好菌群提供竞争优势[53]，同时限制某些酸性偏好菌在有机质分解或特定次生代谢途径中的生态功能。因此，在土壤酸碱度调控过程中，需进一步研究不同菌群的生态适应策略。土壤养分的增加，特别是速效钾和有机质含量的显著提升，为微生物群落提供了充足的代谢资源。然而，这种资源富集可能并非完全有利[54]。尽管溶杆菌属丰度的显著增加表明这些菌群在高有机质环境中具有一定的竞争优势，但硝化螺旋菌属丰度的显著减少反映了资源过剩环境会对某些功能菌产生负面效应[55]。在功能层面，全量施用沼液显著增强了细菌群落基因转录、DNA修复功能，以及真菌群落的碳代谢和信号传导功能[56]。这表明，在沼液施用条件下，土壤微生物群落表现出更高的代谢活性和环境适应能力。因此，沼液替代化肥在提升西蓝花种植土壤健康及作物生产力方面具有巨大的应用潜力。

4 结论

（1）通过比较不同沼液施用方式下西蓝花种植土壤微生物群落的演变特征，揭示了沼液作为绿色肥料在可持续农业中具有巨大的应用潜力。具体表现在施用沼液显著提高了土壤速效钾、全氮和有机质含量，从而改善了西兰花种植土壤的养分供应能力。

（2）全量施用沼液的西兰花土壤微生物群落在信息存储与细胞信号传导等功能方面明显增强，优于化肥与沼液配施处理。

（3）本研究未对不同比例化肥与沼液配施的作用效果进行比较，后续研究可进一步探讨其最佳配比，为合理施用有机肥料提供更多的数据参考。

参考文献：

[1] CHEVILLY S, DOLZ-EDO L, BLANCA J, et al. Identification of distinctive primary metabolites influencing broccoli（*Brassica oleracea*, var. *Italica*）taste[J]. *Foods*, 2023, 12(2)：339.

[2] LI L Z, MA P H, NIRASAWA S, et al. Formation, immunomodulatory activities, and enhancement of glucosinolates and sulforaphane in broccoli sprouts：a review for maximizing the health benefits to human [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(20)：7118-7148.

[3] JIANG N J, TANG C S, HATA T, et al. Bio-mediated soil improvement：the way forward[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(2)：185-188.

[4] CHEN H L, WANG Q Y, CAI Y P, et al. Effect of perfluorooctanoic acid on microbial activity in wheat soil under different fertilization conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 264：114784.

[5] CHEN L, LI F, LI W, et al. Organic amendment mitigates the negative impacts of mineral fertilization on bacterial communities in Shajiang black soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 150：103457.

[6] WU D, WANG W X, YAO Y P, et al. Microbial interactions within beneficial consortia promote soil health[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 900：165801.

[7] QI X, XIAO S Q, CHEN X M, et al. Biochar-based microbial agent reduces U and Cd accumulation in vegetables and improves rhizosphere microecology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 436：129147.

[8] SUN Y, HUANG Z, CHEN S, et al. Higher-quality pumpkin cultivars need to recruit more abundant soil microbes in rhizospheres[J]. *Microorganisms*(*Basel*), 2022, 10(11)：2219.

[9] XU Z M, WANG Z, GAO Q, et al. Influence of irrigation with microalgae-treated biogas slurry on agronomic trait, nutritional quality, oxidation resistance, and nitrate and heavy metal residues in Chinese cabbage[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244：453-461.

[10] XU M, XIAN Y, WU J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil

properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5):2534-2542.

[11] 马龙. 不同施肥模式对设施菜田土壤微生物群落结构及氮循环的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2021:2-4. MA L. Effects of different fertilization patterns on soil microbial community and N cycle in greenhouse vegetable production[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021:2-4.

[12] 陈国徽, 张颂, 陈艳芳, 等. 长江流域油-稻轮作区不同肥料运筹对土壤理化性质和油菜产量的影响[J]. 江西农业学报, 2023, 35(8):106-111. CHEN G H, ZHANG S, CHEN Y F, et al. Effects of different fertilizer application on soil physicochemical properties and rapeseed yield in oil-rice rotation area of Yangtze River basin[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(8):106-111.

[13] 邓江茹, 刘文娟, 马琨, 等. 减氮和控释肥替代对宁夏引黄灌区玉米产量及土壤无机氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9):2069-2079. DENG J R, LIU W J, MA K, et al. Impact of nitrogen reduction and controlled-release fertilizers on maize yields and soil inorganic nitrogen in the Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(9):2069-2079.

[14] 李建强, 王强, 马军伟, 等. 氮肥减施时期对水稻产量、氮肥利用率及氮肥去向的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(8):147-153. LI J Q, WANG Q, MA J W, et al. Effects of nitrogen reduction time on rice yield, nitrogen use efficiency and fate of fertilizer nitrogen[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(8):147-153.

[15] 王慧颖, 徐明岗, 周宝库, 等. 黑土细菌及真菌群落对长期施肥响应的差异及其驱动因素[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5):914-925. WANG H Y, XU M G, ZHOU B K, et al. Response and driving factors of bacterial and fungal community to long-term fertilization in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5):914-925.

[16] BI Y C, CAI S Y, WANG Y, et al. Structural and microbial evidence for different soil carbon sequestration after four-year successive biochar application in two different paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2020, 254:126881.

[17] 练金山, 王慧颖, 徐明岗, 等. 长期施用有机肥潮土细菌的多样性及功能预测[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12):2073-2082. LIAN J S, WANG H Y, XU M G, et al. Diversity and function prediction of bacteria community in fluvo-aquic soils as affected by long-term organic fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(12):2073-2082.

[18] LUO X S, HAN S, FU X Q, et al. The microbial network in naturally fertile paddy soil possibly facilitates functional recruitment in the rice mature stage[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 135:174-181.

[19] 张杰. 不同灌溉条件下施肥模式对土壤养分的影响[J]. 农业技术与装备, 2023(12):21-23. ZHANG J. Effects of fertilization modes on soil nutrients under different irrigation conditions[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2023(12):21-23.

[20] 张典, 孙楷清, 杨全刚, 等. 沼液替代氮肥对轻度盐化潮土土壤性质和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(9):111-117. ZHANG D, SUN K Q, YANG Q G, et al. Effects of replacing nitrogen fertilizer with biogas slurry on soil properties and corn yield in lightly salinized fluvo-aquic soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(9):111-117.

[21] 刘银秀, 聂新军, 叶波, 等. 基于知识图谱分析的沼液还田利用研究现状与发展趋势[J]. 土壤通报, 2023, 54(1):192-201. LIU Y X, NIE X J, YE B, et al. Research of returning biogas slurry to cropland based on knowledge graph analysis and its development trend[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(1):192-201.

[22] 董志胜, 韩有国, 宋海萍, 等. 沼液肥对设施番茄生长及土壤养分的影响分析[J]. 中国果菜, 2021, 41(8):61-64. DONG Z S, HAN Y G, SONG H P, et al. Effects of biogas slurry fertilizer on growth and soil nutrient of protected tomato[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2021, 41(8):61-64.

[23] 刘艳丽, 赵娜娜, 范贝贝, 等. 浓缩沼液中添加芽孢杆菌对促生和抑菌功能的强化效应[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(7):68-78. LIU Y L, ZHAO N N, FAN B B, et al. Enhancement effect of *Bacillus* spp. added to concentrated biagas slurry on the functions of growth promotion and bacterial inhibition[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(7):68-78.

[24] 唐蛟, 王威, 潘飞飞, 等. 沼液灌施对潮土土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2):10-17. TANG J, WANG W, PAN F F, et al. The effects of biogas slurry irrigation on aggregation and stability of fluvo-aquic soil in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(2):10-17.

[25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2005. BAO S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[26] 申晓晴, 高华军, 拓阳阳. 基于宏基因组的烟田土壤细菌群落结构和功能分析[J]. 烟草科技 2024, 57(1):46-57. SHEN X Q, GAO H J, TUO Y Y. Metagenomic analysis of structure and function of bacterial community in tobacco field soils[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2024, 57(1):46-57.

[27] 刘臻岳, 范玉婧, 陈苗苗, 等. 铵态氮对生物过滤塔甲烷净化性能的影响及其微生物学机理[J]. 环境工程学, 2023, 17(3):1001-1010. LIU Z Y, FAN Y J, CHEN M M, et al. Effects of ammonium nitrogen on methane purification performance of biofilter and its microbiological mechanism[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(3):1001-1010.

[28] 高刘, 余雪标, 李然, 等. 沼液配方肥对香蕉产量、品质及香蕉园土壤质量的影响[J]. 热带生物学报, 2017, 8(2):209-215. GAO L, YU X B, LI R, et al. Effects of biogas formulated manure on yield and quality of banana and soil quality[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2017, 8(2):209-215.

[29] 杜彩艳, 鲁海燕, 熊艳竹, 等. 连续两年沼液与化肥配施对桃生长及土壤理化性质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(8):165-175. DU C Y, LU H Y, XIONG Y Z, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on peach growth and soil physical and chemical properties for two consecutive years[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(8):165-175.

[30] 蔡茂, 余雪标, 周卫卫, 等. 沼液排放对土壤质量的影响[J]. 热带生物学报, 2014, 5(1):52-56. CAI M, YU X B, ZHOU W W, et al. Effect of slurry on soil quality[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2014, 5(1):52-56.

[31] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(3):364-371. ZHANG J G, QIN J T, YAO W Q, et al. Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils[J]. *Soils*, 2010, 42(3):364-371.

[32] 郑学博, 樊剑波, 周静, 等. 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3):675-684. ZHENG X B, FAN J B, ZHOU J, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on soil nutrients and peanut yield in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3):675-684.

[33] 张媛, 洪坚平, 王炜, 等. 沼液对石灰性土壤速效养分含量的影响[J]. 中国沼气, 2008, 26(2):14-16. ZHANG Y, HONG J P, WANG W, et al. Effect of biogas slurry on the available nutrient of calcareous soil[J]. *China Biogas*, 2008, 26(2):14-16.

[34] NIYUNGEKO C, LIANG X Q, LIU C L, et al. Effect of biogas slurry application on soil nutrients, phosphomonoesterase activities, and phosphorus species distribution[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2):900-910.

[35] 康婉青, 徐娅玲, 徐晓玲, 等. 不同沼液施用量对土壤养分和土壤细菌群落结构的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(10):75-83. KANG W Q, XU Y L, XU X L, et al. Effects of different biogas slurry application rates on soil nutrients and soil bacterial community structure[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(10):75-83.

[36] GIOVANNETTI M, SALVIOLI DI FOSSALUNGA A, STRINGLIS I A, et al. Unearthing soil-plant-microbiota crosstalk: looking back to move forward[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13:1082752.

[37] 孙建波, 李淑霞, 李春强, 等. 有机无机肥配施对香蕉田土壤细菌群落数量和结构的影响[J]. 福建农业学报, 2022, 37(11):1476-1482. SUN J B, LI S X, LI C Q, et al. Response of bacterial community in soil of banana plantation to combined use of organic and inorganic fertilizers[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(11):1476-1482.

[38] KIM H S, LEE S H, JO H Y, et al. Diversity and composition of soil *Acidobacteria* and *Proteobacteria* communities as a bacterial indicator of past land-use change from forest to farmland[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797:148944.

[39] VAN DER BOM F, NUNES I, RAYMOND N S, et al. Long-term fertilisation form, level and duration affect the diversity, structure and functioning of soil microbial communities in the field[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122:91-103.

[40] KUMAR U, SAQIB H S A, ISLAM W, et al. Landscape composition and soil physical-chemical properties drive the assemblages of bacteria and fungi in conventional vegetable fields[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(6):1202.

[41] LI Q, HUANG Y N, WEN D D, et al. Application of alkyl polyglycosides for enhanced bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil using *Sphingomonas changbaiensis* and *Pseudomonas* stutzeri[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719:137456.

[42] 何琳. 增施沼液对镉胁迫下皇竹草生长特性及其根际土壤微生物特性的影响[D]. 成都:成都大学, 2020:43-44. HE L. Effects of digestate on growth characteristics and rhizosphere soil microbial characteristics of *Pennisetum hydridum* under Cd stress[D]. Chengdu: Chengdu University, 2020:43-44.

[43] ZHAO S C, QIU S J, XU X P, et al. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition in different long-term fertilization soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 138:123-133.

[44] MALEWSKI T, BOROWIK P, GOLIŃSKA P, et al. Organic inputs positively alter the bacteriome of post-agricultural soils[J]. *Forests*, 2023, 14(9):1711.

[45] BEI S K, ZHANG Y L, LI T T, et al. Response of the soil microbial community to different fertilizer inputs in a wheat-maize rotation on a calcareous soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 260:58-69.

[46] ZHANG H L, LI S X, ZHENG X Q, et al. Effects of biogas slurry combined with chemical fertilizer on soil bacterial and fungal community composition in a paddy field[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12:655515.

[47] XIA H, RIAZ M, ZHANG M Y, et al. Biochar increases nitrogen use efficiency of maize by relieving aluminum toxicity and improving soil quality in acidic soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 196:110531.

[48] DELLAGI A, QUILLERE I, HIREL B. Beneficial soil-borne bacteria and fungi: a promising way to improve plant nitrogen acquisition[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(15):4469-4479.

[49] LIANG X Y, WANG H T, WANG C J, et al. Disentangling the impact of biogas slurry topdressing as a replacement for chemical fertilizers on soil bacterial and fungal community composition, functional characteristics, and co-occurrence networks[J]. *Environmental Research*, 2023, 238:117256.

[50] LIU D, LIU G H, CHEN L, et al. Soil pH determines fungal diversity along an elevation gradient in Southwestern China[J]. *Science China Life Sciences*, 2018, 61(6):718-726.

[51] PHILIPPOT L, CHENU C, KAPPLER A, et al. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 22(4):226-239.

[52] WANG X, LIN J H, PENG X Y, et al. Microbial rrn copy number is associated with soil C:N ratio and pH under long-term fertilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954:176675.

[53] 王智慧, 蒋先军. 紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤pH的差异响应[J]. 环境科学, 2022, 43(7):3876-3883. WANG Z H, JIANG X J. Contrasting responses of the microbial community structure and functional traits to soil pH in purple soils[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7):3876-3883.

[54] PAN C C, YUAN F, LIU Y L, et al. Soil bacterial and fungal diversity and composition respond differently to desertified system restoration [J]. *PLoS One*, 2025, 20(1):e0309188.

[55] ZHOU Z H, WANG C K, LUO Y Q. Effects of forest degradation on microbial communities and soil carbon cycling: a global meta-analysis [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 27(1):110-124.

[56] JIAO S, CHEN W M, WANG J L, et al. Soil microbiomes with distinct assemblies through vertical soil profiles drive the cycling of multiple nutrients in reforested ecosystems[J]. *Microbiome*, 2018, 6(1):146.

（责任编辑:潘淑君）