



刘莎,胡雨彤,赵汀葳,张群媛,王旭东,张育林. 沼液对番茄生长和土壤细菌群落及功能的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026,31(04):83-96.
LIU Sha, HU Yutong, ZHAO Tingwei, ZHANG Qunyuan, WANG Xudong, ZHANG Yulin. Effects of biogas slurry application on tomato growth and soil bacterial community and function[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026,31(04):83-96.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.04.07

沼液对番茄生长和土壤细菌群落及功能的影响

刘莎¹ 胡雨彤¹ 赵汀葳¹ 张群媛¹ 王旭东¹ 张育林^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要 为系统揭示沼液施用对土壤-植物的作用,以番茄品种“普罗旺斯”为研究对象,通过盆栽试验,设置了T1(V(水):V(沼液)=1:1)、T2(V(水):V(沼液)=2:3)、T3(V(水):V(沼液)=1:2)、T4处理(V(水):V(沼液)=2:5)以及T5(全施沼液)共5个处理,以不施沼液(100%蒸馏水)为空白对照(CK),测定不同比例的沼液对番茄生长、养分吸收、土壤性质及微生物群落变化的影响。结果表明:1)沼液处理的,番茄地上部分干物质含量达3.99~5.05 g,CK干物质含量为3.97 g,不同比例沼液处理下的地上部分干物质较CK均有不同程度的提高;且5个沼液处理地上部分全氮、全磷含量较CK均显著提高($P<0.05$),其中,T5全施沼液处理地上部分全氮、全磷含量最高,分别为32.66和4.26 g/kg,增长幅度达67.90和51.57%。2)T3和T5沼液处理下,土壤电导率随着施用沼液浓度的增加而增加,电导率在156~746 $\mu\text{S}/\text{cm}$,施用沼液后土壤的pH显著降低($P<0.05$),土壤中硝态氮、有效磷和速效钾的含量随着沼液浓度的增加而显著增加,其中,硝态氮含量的提升最为显著,T5处理下硝态氮含量最高,达到了337.4 mg/kg($P<0.05$)。土壤中的钠离子、钾离子、氯离子、硫酸根离子含量随着沼液浓度的增加显著升高($P<0.05$),在全施沼液的情况下含量最高。3)全施沼液T5处理显著增加了土壤中亮氨酸氨基肽酶(LAP)、 β -乙酰氨基-N-葡萄糖苷酶(NAG)及酸性磷酸酶(AP)的活性($P<0.05$)。4)通过PCoA分析得出全施沼液的土壤细菌多样性显著高于CK($P<0.05$),且全施沼液下细菌群落组成有较大差异。综上,在土壤中添加沼液可以提高番茄生物量,土壤养分含量,其中施用沼液原液可以提升氮磷循环相关土壤酶活性、土壤细菌数量,改善细菌群落组成。本研究为番茄生长中沼液的科学施用提供重要理论依据。

关键词 沼液;番茄;土壤;细菌群落结构

中图分类号 S641.2;S216.4

文章编号 1007-4333(2026)04-0083-14

文献标志码 A

Effects of biogas slurry application on tomato growth and soil bacterial community and function

LIU Sha¹, HU Yutong¹, ZHAO Tingwei¹, ZHANG Qunyuan¹,
WANG Xudong¹, ZHANG Yulin^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northwest China of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract To systematically investigate the effects of biogas slurry application on soil-plant interactions, tomato variety ‘Provence’ was taken as the research object. A pot experiment were conducted with six treatments: T1 treatment (V(water):V(biogas slurry) = 1:1), T2 treatment (V(water):V(biogas slurry) = 2:3), T3 treatment

收稿日期: 2025-05-27;接受日期: 2025-08-12

基金项目: 陕西省农业农村厅农业关键核心技术项目(2023NYGG011);陕煤集团神木红柳林矿业公司集团级科研项目(2020SMHKJ-A-J-03-02/02)

第一作者: 刘莎(ORCID:0009-0005-9397-457X),硕士研究生,E-mail:ls18264069120@163.com

通讯作者: 张育林(ORCID:0000-0002-3030-764X),副教授,主要从事养分资源管理与土壤改良研究,E-mail:yulinzhangbest@126.com

($V(\text{water}): V(\text{biogas slurry}) = 1:2$), T4 treatment, ($V(\text{water}): V(\text{biogas slurry}) = 2:5$), T5 treatment (full application of biogas slurry), and CK (no biogas slurry, distilled water only) (CK). The effects of different concentrations of biogas on tomato growth, nutrient uptake, soil properties and soil microbial community were determined. The results showed that: 1) Under the biogas slurry application treatments (T1-T5), the aboveground dry matter weight of tomato ranged from 3.97 to 5.05 g, while the dry matter content of CK was 3.97 g. The aboveground dry matter under different biogas slurry treatments was higher than that of CK. The contents of total nitrogen and total phosphorus in shoots under different treatments were significantly higher than CK ($P < 0.05$), and the contents of total nitrogen and total phosphorus in shoots under T5 biogas slurry treatment were the highest, which were 32.66 and 4.26 g/kg, representing increases of 67.90% and 51.57%, respectively. 2) Under T3 and T5 treatments, the soil conductivity increased with the increase of biogas slurry concentration, and the variation ranged from 156 to 746 $\mu\text{S}/\text{cm}$. After biogas slurry application, the soil pH decreased significantly ($P < 0.05$). The contents of nitrate nitrogen, available phosphorus and available potassium in soil increased significantly with the increase of biogas slurry concentration, and the increase of nitrate nitrogen content was the most significant ($P < 0.05$). The nitrate nitrogen content was the highest under T5 treatment, reaching 337.4 mg/kg ($P < 0.05$). The contents of sodium ion, potassium ion, chloride ion and sulfate ion in soil increased significantly with the increase of biogas slurry concentration ($P < 0.05$), and the content was the highest at the original concentration. 3) The application of original biogas slurry significantly increased the activities of leucine aminopeptidase (LAP), β -N-Acetylglucosaminidase (NAG) and acid phosphatase (AP) in the soil ($P < 0.05$). 4) PCoA analysis revealed that the soil bacterial diversity using the original biogas slurry was significantly higher than that of the control, and the bacterial community composition differed significantly compared to other treatments ($P < 0.05$). In summary, adding biogas slurry to soil can increase tomato biomass and soil nutrient content. Among them, applying raw biogas slurry can enhance soil enzyme activities related to nitrogen and phosphorus cycling, increase soil bacterial abundance, and improve bacterial community composition. This study provided an important theoretical basis for the scientific application of biogas slurry in tomato growth.

Keywords biogas slurry; tomato; soil; bacterial community structure

畜禽粪便资源化利用能变废为宝,充分挖掘畜禽粪便的资源潜力,是实现可循环农业的重要途径。我国畜禽粪便资源化利用方式主要有以下3种:第一是饲料化利用,其中含有可以被其他动物所摄取的蛋白质与能量物质;第二是以沼气工程为代表的能源化利用,畜禽粪便在沼气池通过厌氧发酵,其中的有机物转化为甲烷和二氧化碳;第三是畜禽粪便直接还田或发酵后作为肥料利用,也是当下最广泛的应用方式^[1-2]。然而,畜禽饲养过程中添加的重金属和激素同样会通过粪便的方式排出体外,会通过农作物、空气或水源危害到人类健康。畜禽废弃物的有效处理对于控制农业面源污染、带动畜牧业发展、建设现代农业具有重要意义^[3]。

沼气工程运行过程中除了产生固体沼渣以外,畜禽粪便在沼气池中经厌氧发酵处理后还会产生大量沼液^[4]。已有研究表明沼液中约含93%的水、4.5%的有机物与2.5%的无机物^[5]。国内外针对沼液的养分含量都进行过相关报道,Mdlambuzi

等^[6]和Sharma等^[7]检测出沼液中氮磷钾含量。施用沼液可以促进植物生长:孔令郁等^[8]研究了玉米种植过程中使用沼液还田替代化肥的效果,发现沼液替代处理能提高玉米的产量;安顺伟^[9]等发现在滴灌条件下沼液能够提高春大棚黄瓜品质、产量和经济效益;郑建等^[10]通过沼液替代氮肥用于番茄,发现该方法能够提高番茄的养分积累量,提高番茄产量。沼液具有改善土壤性质作用,能够显著改变土壤结构、pH以及电导率。例如:研究发现沼液可以改善土壤的物理性质,如持水能力、透气性、稳定性以及渗透力,从而进一步防止或减少土壤侵蚀^[11];Xu等^[12]在水稻-油菜轮作的黄土高原地区持续3年施用由猪粪制成的沼液,研究结果发现土壤pH显著提高,促进了土壤团聚体的形成,并改善了黄土高原土壤本身养分缺乏的问题。此外,施用沼液对土壤中酶的活性以及土壤微生物群落都有着重要影响。土壤酶具有影响微生物代谢活动、参与有机质分解、促进土壤养分循环和稳定性的功

能^[13-16]。沼液中也存在着丰富的有益微生物群落^[17],可以改善土壤环境促进植物生长。

然而,沼液中一些盐分离子浓度偏高,同时部分沼液含有重金属,若长期施用沼液可能会造成土壤盐分离子含量超标和土壤重金属污染^[18-20]。因为沼液厌氧发酵过程中产生较高的盐分,其施入土壤导致了盐分离子的累积,因此过高的沼液施入量可能导致土壤盐渍化加剧^[18]。在长期施用猪粪沼肥的上海青-茄子轮作试验中,沼液施用区域的土壤Cu、Zn含量随施用年限增长更明显,Pb、Cr含量的变化规律不明显,Cd含量与沼肥Cd本底值相关,As和Hg在土壤中不会明显累积^[21],因此本研究应重点关注施用沼肥的土壤中Cu、Zn的离子积累。

番茄是世界上第二大蔬菜,2022年产量 174×10^6 t,占全球蔬菜市场的15.7%(FAO 2024)。番茄是一种喜肥、需肥量大的作物,尤其是对氮、磷、钾的需求非常旺盛。沼液作为一种富含氮、磷、钾及多种微量元素的有机液体肥料,其肥效研究需要一个对养分反应敏感的“指示植物”^[22]。由于沼液原料的来源不同以及制备工艺不同,不同沼液的营养成分往往差异较大^[23],同时不同土壤对养分的应用效果也存在差异。目前,系统地研究沼液施用后对番茄生长、土壤理化性质、土壤中酶活性以及土壤中微生物群落变化的影响仍然缺乏。因此,本研究以普罗旺斯为研究对象,探索不同浓度: $V(\text{水}):V(\text{沼液})=1:1$ 、 $V(\text{水}):V(\text{沼液})=2:3$ 、 $V(\text{水}):V(\text{沼液})=1:2$ 、 $V(\text{水}):V(\text{沼液})=2:5$ 、全施沼液、不施沼液,共6个浓度沼液施用对番茄从开

花到坐果期生长期的作用,探究不同浓度的沼液施用后壤土土壤理化性质、酶活性和微生物的情况。本研究旨在探究沼液施用后对番茄生长的影响,揭示沼液对土壤-植物间的作用,以期为沼液在番茄生长中的合理利用提供理论依据,为沼液施用改良土壤提供合理参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设计

1.1.1 试验材料

选择陕西省咸阳市杨陵区稷场果蔬大棚番茄苗,番茄品种为“普罗旺斯”,购买四叶一心番茄幼苗进行试验。土壤样品采自陕西省咸阳市杨陵区桶张村(地理位置 $34^{\circ}18'9''\text{N}$, $108^{\circ}0'35''\text{E}$),为农业园区未施用沼液土壤,属于典型的壤土。土壤类型是关中平原常见的壤土,系统命名为土垫旱耕人为土。

在农业区田块上按“S”形布点,清除表层杂物后,用铁锹取耕层0—20 cm土壤样品,将多个采样点的土样混合均匀,带回试验室风干后,备用。供试土壤的基本理化特性:pH为8.0、电导率为 $176\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 、有机质含量为 $17.9\text{ g}/\text{kg}$ 、有效磷含量为 $31.4\text{ mg}/\text{kg}$ 、速效钾含量为 $149.7\text{ mg}/\text{kg}$ 、全铜含量为 $25.35\text{ mg}/\text{kg}$ 、全锌含量为 $80.16\text{ mg}/\text{kg}$ 。

1.1.2 沼液及其理化性质

沼液来自陕西杨凌杨凌本香农业产业集团有限公司沼气工程。猪场粪污经水泡粪工艺收集后,再通过匀浆池搅匀,最后进入发酵罐,经过45 d的发酵后用于农业生产。沼液的基础理化性质见表1。

表1 沼液的基础理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of biogas slurry

指标 Index	值 Value	指标 Index	值 Value	指标 Index	值 Value
pH	8.27	全磷/(mg/L) Total phosphorus	28.1	钙离子/(mg/L) Calcium ion	57.7
Eh/mV	85.75	全铜/(mg/L) Total copper	2.9	镁离子/(mg/L) Magnesium ion	14.1
电导率/(ms/cm) Conductivity	57.7	全锌/(mg/L) Total zinc	9.1	氯离子/(mg/L) Chloride ion	1 194.6
全氮/(mg/L) Total nitrogen	1 224.3	钠离子/(mg/L) Sodium ion	631.4	硫酸根离子/(mg/L) Sulfate ion	739.3
全碳/(mg/L) Total carbon	591.8	钾离子/(mg/L) Potassium ion	1 381.3		

1.1.3 不同处理的设置

本研究共设置6个处理,包括1个对照(100%蒸馏水,CK)、5个不同沼液浓度施肥处理。T1处理, $V(\text{水}):V(\text{沼液})=1:1$; T2处理, $V(\text{水}):V(\text{沼液})=2:3$; T3处理, $V(\text{水}):V(\text{沼液})=1:2$; T4处理, $V(\text{水}):V(\text{沼液})=2:5$; T5处理,全施沼液,每个处理设5个重复。盆栽试验在早棚内进行。每盆装土1.5 kg,均加入480 mL不同配比的沼液使土壤含水量约为75%田间持水量。将四叶一心的番茄幼苗移栽到盆钵中,番茄生长发育期第一次施入山崎配方营养液^[24]。32 d后,在番茄开花坐果期进行一次沼液追施。种植过程中,根据水分损失量用蒸馏水及时浇灌,采用称重法保持土壤含水量为最大田间持水量的75%,培养28 d。在果实膨大期前收获,采集植物样品,测定地上部分的生物量、全氮、全磷和全钾。

植物样品收集的同时用小土钻采集种植番茄后的土壤约200 g,去除土样中的残根等杂物。所有土样分为2份:一份置于4℃冰箱保存,用于测定硝态氮、铵态氮和土壤酶活性;一份自然风干,研磨过2 mm筛,用于测定土壤的pH、电导率、有效磷和速效钾。

鉴于沼液的离子组成特点,为了更直观地反映沼液浓度对土壤主要盐分离子及重金属含量、酶活性和微生物群落的作用,试验中选取不施沼液(CK)、中浓度处理(T3)和全施沼液处理(T5)盆栽土壤为试验材料,分析其在土壤主要盐分离子及重金属含量、酶活性和土壤细菌群落组成方面差异。

1.2 测定方法

1.2.1 沼液理化性质测定

沼液中 Na^+ 、 K^+ 测定采用火焰光度法; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用EDTA滴定法; CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 采用双指示剂中和滴定法,Cl⁻采用硝酸银滴定法, SO_4^{2-} 采用EDTA间接络合滴定法;总氮测定采用凯式消解法;总磷采用钼锑抗比色法;总钾采用原子吸收法;铜、锌采用硝酸-高氯酸氢氟酸消解法。总碳采用TOC分析仪(岛津,日本)测定。

1.2.2 番茄干物质及养分测定

用清水冲洗番茄表面进行冲洗,用滤纸吸干表面水分。用60℃鼓风干燥至恒重并称重获得地上部干重。将部分植物样品放入球磨仪陶瓷

罐内研磨为约100目碎屑。将研磨好的植物样品置于100 mL的消煮管,加浓 H_2SO_4 5 mL,消煮至无色清亮,定容至100 mL,测定全氮、全磷、全钾含量。全氮用自动凯氏定氮仪测定,全磷采用钼锑抗比色法测定,全钾用火焰光度计法测定。

1.2.3 土壤性质的测定

土壤硝态氮、铵态氮用KCl浸提,AA3型连续流动分析仪(Seal,日本)测定;土壤有效磷用 NaHCO_3 浸提,钼锑抗比色法;土壤速效钾用 NH_4OAc 浸提,火焰光度法测定。土壤中的水溶性钾离子和水溶性钠离子的测定用火焰光度法;水溶性碳酸氢根离子用双指示剂—中和滴定法;水溶性氯离子用硝酸银滴定法;水溶性硫酸根离子用EDTA间接络合滴定法;全铜和全锌采用硝酸—高氯酸氢氟酸消解法。为了探明沼液浓度对土壤盐分和重金属离子的累积效应,本试验选取不施沼液组(CK)、中浓度施用组(T3)和全施沼液组(T5)3个处理测定土壤盐分离子和重金属离子含量。

1.2.4 土壤酶活性测定

使用盆栽土壤为试验材料进行酶活性测定。3种土壤胞外酶(亮氨酸氨基肽酶LAP、 β -乙酰氨基-N-葡萄糖苷酶NAG、酸性磷酸酶,AP)的活性采用对硝基苯酚(paraNitroPhenol, pNP)底物比色法测定,单位 $\mu\text{mol}/\text{g}\cdot\text{h}$ 。

1.2.5 土壤细菌群落组成分析

以盆栽土壤为试验材料,进行16S rRNA微生物测序。使用FastDNA SPIN试剂盒(MP Biomedicals,美国)从土壤样品中提取总微生物基因组DNA。

用引物对338F和806R扩增细菌16S rRNA基因的V3-V4区。根据Majorbio Bio-Pharm Technology Co., Ltd.的标准协议,以等摩尔量汇集纯化的扩增子,并在Illumina MiSeq PE300平台/NovaSeq PE250平台(Illumina,美国)上进行配对测序。

双端原始测序序列通过Fastp版本0.19.6进行质量过滤,然后通过FLASH版本1.2.7进行拼接。然后使用UPARSE v8.1.1812将优化的序列聚类为操作分类单元(OTU),序列相似度为97%^[25]。使用细菌的SILVA v.128和真菌的UNITE数据库

进行了分类分配, RDP分类器在DILME v1.8中实现^[26]。

1.3 数据分析

使用R(v. 4.2.2)对所有的数据进行分析, 参数检验和非参数检验以数据的正态分布和方差齐性为依据。方差分析(ANOVA)(参数检验)用于分析数据, 然后对Duncan检验进行两两或多次比较($P < 0.05$)。使用Kruskal-Wallis检验(非参数检验)分析数据, 然后对Wilcoxon检验进行两两比较($P < 0.05$)。

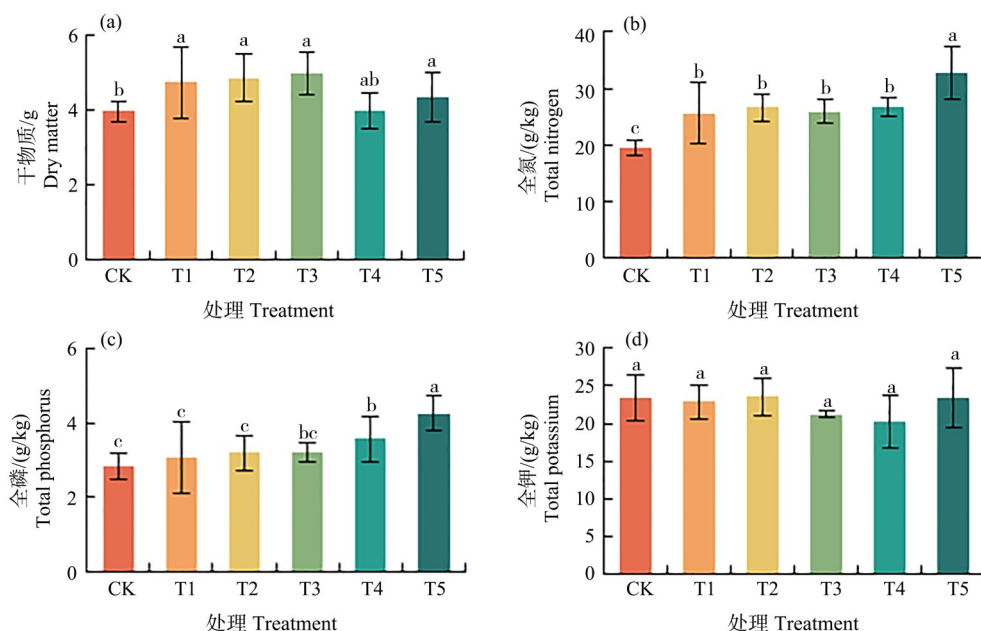
α 多样性指数(ACE)和基于加权Unifrac距离的主坐标分析(PCoA)使用R包“vegan”进行, 然后根据使用999个排列的3个不同处理, 使用距离矩阵(Adonis)进行方差分析(ANOVA)比较微生物群落之间的差异性。

基于番茄盆栽土壤微生物的OTU数值, 使用Duncan检验分析不同处理下差异的土壤微生物类群。使用线性回归模型评估不同微生物类群与番茄生长指标的相关性^[27]。

2 结果与分析

2.1 沼液对番茄地上部分生物量、养分含量的影响

不同浓度的沼液施肥处理下, 番茄的地上部分干物质, 以及地上部分干物质中所含的全氮、全磷和全钾的含量变化见图1。由图1(a)可知, 地上部分干物质含量为3.97~5.05 g, 不同处理下的地上部分干物质较CK均有提高, 其中T1、T2、T3和T5达到显著水平($P < 0.05$)。由图1(b)可知, 地上部分全氮含量在19.45~32.66 g/kg, 施用沼液处理番茄地上部分全氮含量较CK均显著提高($P < 0.05$), T1~T4的增长幅度为33.04%~38.61%, 其中T5处理地上部分全氮最高, 为32.66 g/kg, 增长幅度为67.90%。由图1(c)可知, 地上部分全磷含量为2.81~4.26 g/kg, T4和T5处理番茄地上部分全磷含量显著高于CK($P < 0.05$), 其中T4处理全磷含量为3.56 g/kg, 增加了26.67%, T5处理全磷含量为4.26 g/kg, 增长幅度为51.57%。由图1(d)可知, 地上部分全钾含量为21.21~23.50 g/kg, 地上部分全钾含量随着沼液浓度改变无显著变化($P > 0.05$)。



CK, 不施沼液, 100% 蒸馏水; T1, $V(\text{水}): V(\text{沼液}) = 1:1$; T2, $V(\text{水}): V(\text{沼液}) = 2:3$; T3, $V(\text{水}): V(\text{沼液}) = 1:2$; T4, $V(\text{水}): V(\text{沼液}) = 2:5$; T5, 全施用沼液。柱子上方不同小写字母代表处理间显著差异($P < 0.05$)。下同。

CK, no application of biogas slurry, 100% distilled water; T1, $V(\text{water}): V(\text{biogas slurry}) = 1:1$; T2, $V(\text{water}): V(\text{biogas slurry}) = 2:3$; T3, $V(\text{water}): V(\text{biogas slurry}) = 1:2$; T4, $V(\text{water}): V(\text{biogas slurry}) = 2:5$; T5, full application of biogas slurry. Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同浓度沼液对番茄地上干物质(a)以及全氮(b)、全磷(c)和全钾(d)养分含量的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of biogas slurry on the nutrient content of tomato aboveground dry matter (a), total nitrogen (b), total phosphorus (c), and total potassium (d)

2.2 沼液对土壤理化性质的影响

2.2.1 沼液对土壤电导率及pH的影响

不同浓度的沼液施肥处理下,土壤电导率及pH的变化见图2。由图2(a)可知,土壤电导率为156~

746 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 随着施用沼液浓度的增加而增加,并相较于CK均显著增加($P<0.05$),其中T5处理下,土壤的电导率最高。由图2(b)可知,土壤pH为7.68~8.04,施用沼液后土壤的pH均显著降低($P<0.05$)。

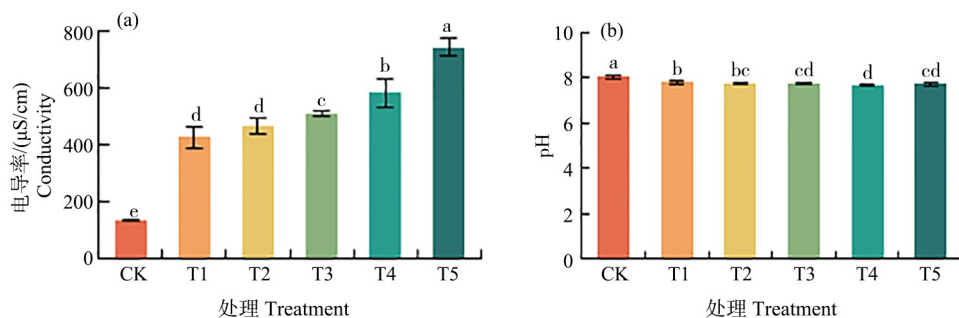


图2 不同浓度沼液对土壤电导率(a)和pH(b)的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of biogas slurry on soil specifically conductivity (a) and pH (b)

2.2.2 沼液对土壤速效养分的影响

不同浓度的沼液施肥处理下,土壤铵态氮、硝态氮、有效磷及速效钾的含量变化见图3。由图3(a)可知,土壤铵态氮的含量没有随着施用沼液的浓度的变化而变化,其中T3处理下的土壤铵态氮含量最高,达到了2.6 mg/kg。由图3(b)可知,土壤硝态氮含量为5.5~337.4 mg/kg,土壤中硝态氮的含

量随着沼液浓度的增加而显著增加($P<0.05$),其中T5处理含量最高。由图3(c)可知,土壤中有有效磷的含量随着沼液浓度的增加而显著增加($P<0.05$),土壤有效磷的含量为29.0~41.7 mg/kg。由图3(d)可知,土壤速效钾的含量为104.8~288.7 mg/kg,土壤中速效钾的含量随着沼液浓度的增加而显著增加($P<0.05$)。

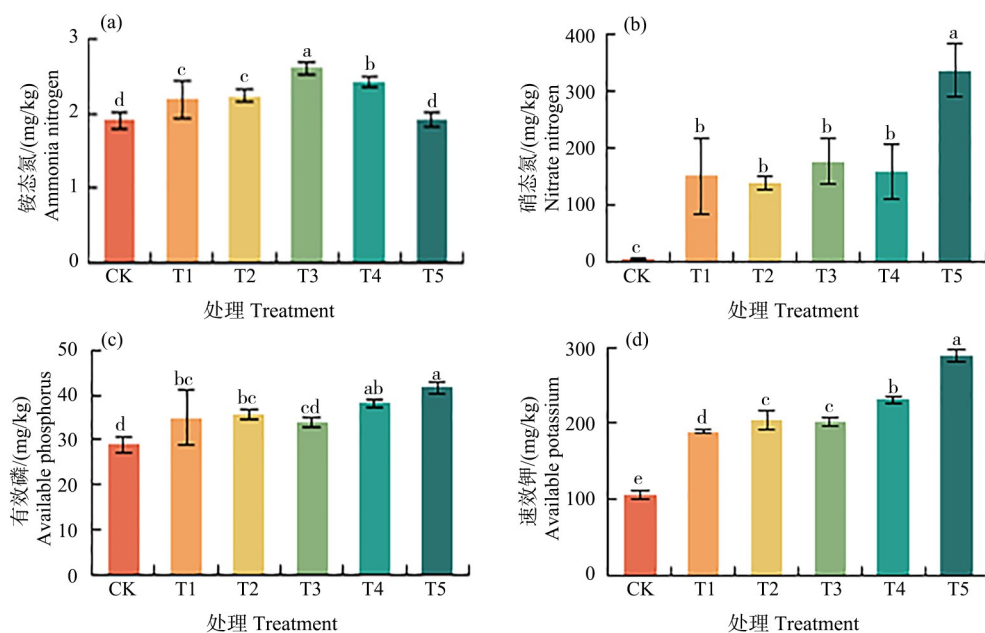


图3 不同浓度沼液对土壤铵态氮(a)、硝态氮(b)、有效磷(c)和速效钾(d)的影响

Fig. 3 Effects of biogas slurry with different concentrations on soil ammonia nitrogen (a), nitrate nitrogen (b), available phosphorus (c), and rapidly available potassium (d)

2.2.3 沼液对土壤离子影响

CK, T3, T5处理下,土壤的水溶性钾离子、硫酸根离子、氯离子、钠离子、碳酸氢根离子与重金属铜、锌含量的变化见图4。由图4(a)可知,钾离子、钠离子、氯

离子与硫酸根离子随着沼液施用浓度的增加而显著增加($P < 0.05$)。与CK相比,施用沼液显著降低了土壤碳酸氢根离子的含量($P < 0.05$)。由图4(b)可知,全铜与全锌的含量较CK无显著变化($P > 0.05$)。

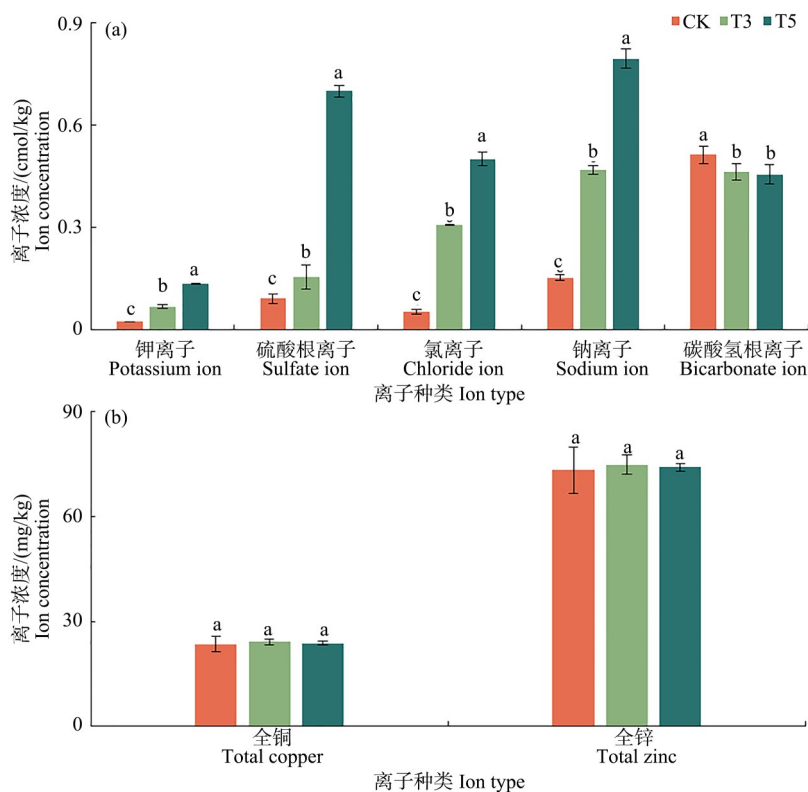


图4 沼液对土壤离子(a)和重金属(b)含量的影响

Fig. 4 Effects of biogas slurry on the content of ions (a) and heavy metals (b) in soils

2.3 沼液对土壤酶活性的影响

不同比例的沼液对土壤中亮氨酸氨基肽酶(LAP)、 β -乙酰氨基-N-葡萄糖苷酶(NAG)、酸性磷酸酶(AP)的活性影响见图5。随着沼液浓度增加LAP、NAG、AP的活性相应增加。其中T5处理的酶活性显著高于其余处理,LAP的活性为 $87.23 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,较CK提高了4.79倍;NAG的活性为 $1.95 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,较CK提高了1.34倍,在低浓度施用沼液的T1~T4处理与CK差异不显著;AP的活性为 $62.87 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,较CK提高了2.25倍。

2.4 沼液对土壤微生物活性的影响

2.4.1 沼液对土壤细菌多样性的影响

不同施用沼液处理对番茄盆栽土壤细菌 α 多样性和 β 多样性的影响见图6。由图6(a)可知,细菌多样性分析结果显示,相较于CK和T3,T5显著增加了土壤细菌的ACE指数,这表明在全施沼液的处理

显著增加了番茄盆栽细菌类群的物种多样性。由图6(b)可知,PCoA1和PCoA2的贡献率分别是40.64%和22.04%,T5的细菌群落结构与CK(T5与CK的PERMANOVA检验, $F=1.69, R^2=0.04, P < 0.05$)和T3(T5与T3的PERMANOVA检验, $F=1.66, R^2=0.45, P < 0.05$)处理的细菌群落结构具有显著的差异,而T3和CK处理之间的群落结构没有显著的差异;T5样品之间与T3,CK样品之间距离较远,T5组内土壤细菌群落差异较大,而T3与CK之间距离比较近且有重合。

2.4.2 不同处理下土壤细菌差异类群分析

由图7可知,通过差异细菌群落分析,结合不同浓度沼液施用下番茄养分的变化,从属水平筛选出4种差异的细菌群落,分别是乳杆菌属(*Lactobacillus*)、未分类的细菌(unclassified_Bacteria)、未分类的肠鼠杆菌(unclassified_

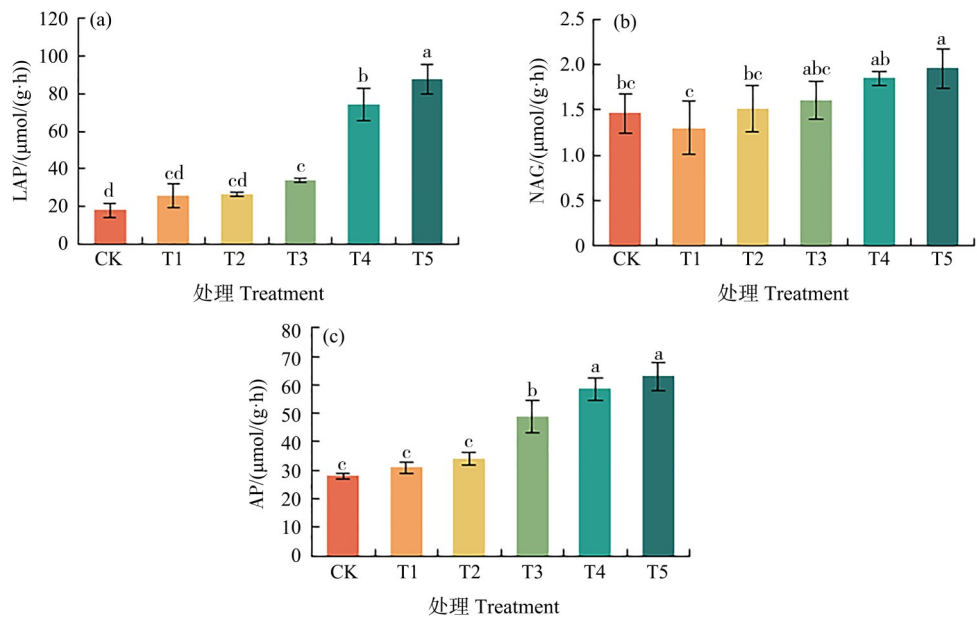
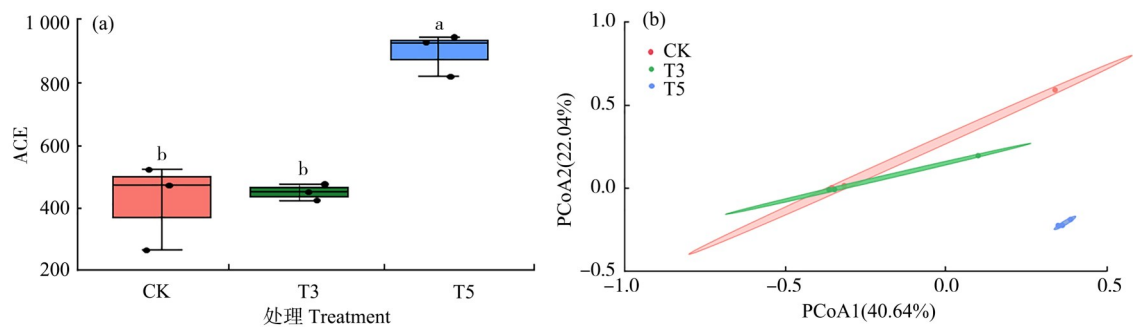


图 5 沼液对土壤酶LAP(a)、NAG(b)、AP(c)活性的影响

Fig. 5 Effects of biogas slurry on the activities of soil enzymes LAP (a), NAG (b), and AP (c) in soils



每个箱体上方不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters above the boxes indicate there are significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

图 6 沼液对土壤细菌多样性的影响

Fig. 6 Effect of biogas slurry on bacterial diversity in soils

Muribaculaceae)及马赛菌属(*Massilia*)。以上细菌在全施沼液处理下显著高于其余各组($P < 0.05$)。

番茄地上部分干物质以及养分吸收与土壤筛选出的细菌群落的相关关系见图8。由图8可知,番茄的干物质与*Lactobacillus*具有显著的相关性($P < 0.05$),番茄地上部分全氮与 unclassified_Bacteria ($P < 0.05$) 以及 unclassified_Muribaculaceae ($P < 0.05$)具有显著的相关性,番茄地上部分全磷与*Massilia*具有显著的相关性($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 沼液对番茄地上部分干物质以及养分含量的影响

本研究发现盆栽土壤中施加沼液显著增加了

番茄干物质质量,促进了植物生长。郑健等^[28]在番茄开花结果期施用沼液与清水(体积比为1:8),发现处理的干物质比清水对照组的高12.46%,这与本研究结果一致。已有研究表明沼液的施用不仅能给作物提供必要的有效养分,提升了土壤肥力和根系对土壤中养分的利用率,促进了花芽分化为果实^[29]。因此,在番茄栽培中施用沼液具有明显的增产效果。在开花坐果期灌溉量一致的条件下,番茄总生物量随着沼液配比增加而增加^[30],这与本研究发现沼液作用于番茄所呈现的规律一致,即沼液的施用可以提升番茄干物质质量,且全施沼液的效果最显著。这是由于沼液浓度越高所含养分量越多,对土壤的改善作用越强,因此,番茄生长得越好。本

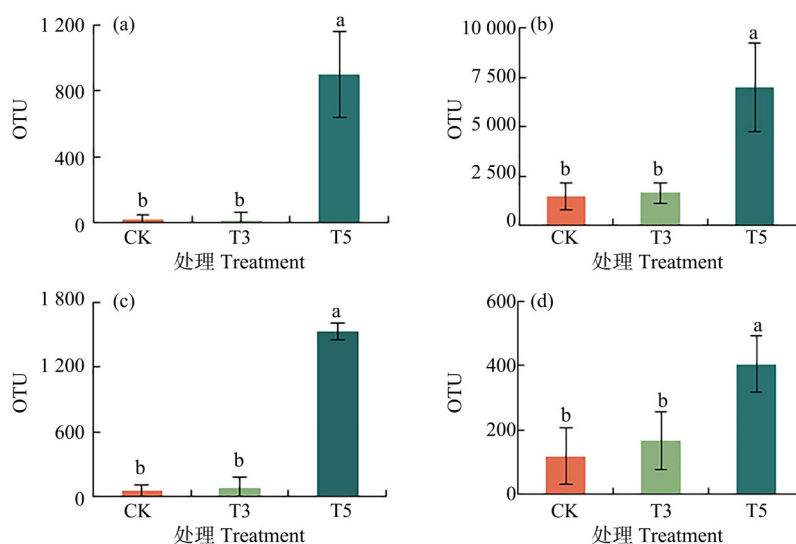


图 7 属水平筛选出 4 种差异的细菌群落 *Lactobacillus* (a)、unclassified_Bacteria (b) 及 unclassified_Muribaculaceae (c)、*Massilia* (d)

Fig. 7 Four distinct bacterial communities were identified through horizontal screening: *Lactobacillus* (a), unclassified_Bacteria (b), and unclassified_Muribaculaceae (c), *Massilia* (d)

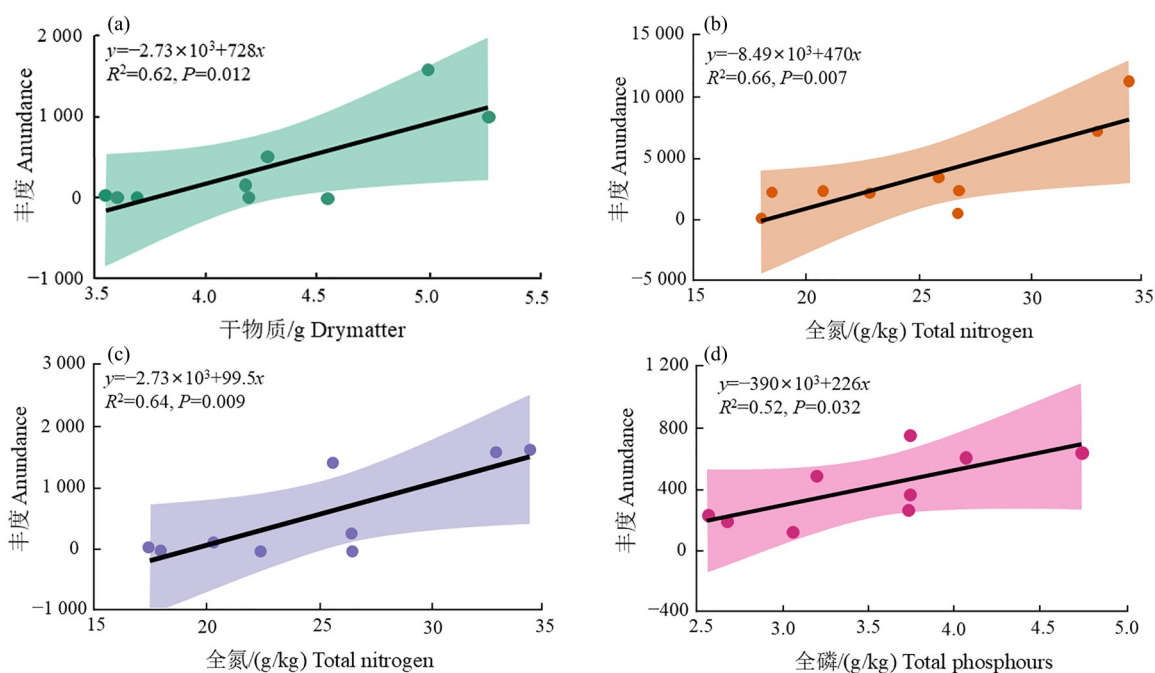


图 8 番茄地上部分干物质以及养分含量与土壤中特定类群 *Lactobacillus* (a)、unclassified_Bacteria (b)、unclassified_Muribaculaceae (c) 及 *Massilia* (d) 的相关关系

Fig. 8 Correlation between aboveground dry matter and nutrient content of tomato and specific groups in soil, including *Lactobacillus* (a), unclassified_Bacteria (b), unclassified_Muribaculaceae (c), and *Massilia* (d)

研究结果显示,施用高比例的沼液能显著提高番茄地上部分干物质、全氮与全磷含量,这与 Koszel 等^[31]在苜蓿栽培中施用了沼液后,与清水对照相比,苜蓿叶片中的氮、磷、钾、钙和镁含量都有所提

高的结果一致。

3.2 沼液对土壤理化性质的影响

本研究发现土壤电导率随沼液浓度增加而增加;而 pH 随沼液浓度的增加而降低。本研究结果

与张苗等^[32]发现适量沼液的施用会降低沿海盐碱地土壤pH相一致。究其原因是沼液中的有机质在土壤中容易与各种阳离子结合和被分解,提高了土壤对pH变化的缓冲能力,从而为作物提供了一个相对稳定的生长条件^[33]。

本研究发现施用沼液可以显著影响土壤的养分含量。已有研究也发现施用沼液能够提高土壤肥力^[34-35]。低浓度沼液不仅可以减少对土壤盐碱化的危害的作用^[36],还可作为追肥施用,对作物养分起到一定的补充作用^[37]。同时,畜禽粪便中含有作物生长所需的氮、磷、钾等营养元素,以其为原料发酵的沼液可以提升土壤中的氮、磷、钾等营养元素的影响。因此,沼液可作为一种优质的速效有机肥料,能显著增加表层土壤碳、氮、磷等速效养分的影响。本研究结果显示土壤中硝态氮、有效磷和速效钾含量随沼液施用浓度增加而增加,因此,施用沼液后会增加番茄养分积累。土壤在生物炭与沼液配施方式下,硝态氮含量显著增加^[38]。黄钦等^[39]研究发现沼液对于有效磷的提高作用最大,其次是速效钾,这也与本研究结果一致。然而,本研究发现,高浓度沼液会导致土壤中的硝态氮含量以及电导率的大幅度提升,长期施用可能会对作物生长造成危害。因此,长期施用沼液时,应避免高浓度沼液直接施用,同时需要考虑土壤剖面构型、雨季时期、灌溉条件、植物类型等其他因素。

姚应上等^[18]研究发现,过量配施会增加土壤盐渍化风险。本研究也发现,钾离子、钠离子、氯离子与硫酸根离子随着沼液施用浓度的增加而极显著增加。已有研究表明可以通过控制稀释沼液的水与沼液的体积比或者选用强抗逆性高价值作物消纳沼液来减轻长期沼液灌溉农田负荷缓解农田盐渍化^[40]。此外,施用沼液会造成土壤及植物重金属过量^[41],高浓度的沼液会抑制植物生长^[42]。本研究未发现土壤中重金属含量显著增加及抑制植物生长的现象。考虑到本研究中使用的沼液钠离子含量较高,可能对植物钙、镁和钾离子等离子的吸收产生竞争作用。本研究发现全铜和全锌含量并没有因施用沼液而导致重金属在土壤中过量累积,且土壤中钠离子的含量显著升高,与刘聪等^[43]的研究结果一致。沼液氮素替代量 $>180\text{ kg/hm}^2$ 的高替代处理土壤,最快需要8年以后才会使土壤铜含量达到土壤风险值,而锌则需要72年才会达到土壤风险

值^[43]。因此,沼液短期施用不会对土壤和植物造成重金属危害。

3.3 沼液对土壤酶活性的影响

土壤酶由微生物与植物代谢而来,在分解有机质、促进营养循环等方面发挥重要功能^[44]。为了探究沼液施用后土壤氮、磷含量变化的原因,本研究重点监测了与氮、磷循环相关的土壤酶LAP、NAG和AP的活性。LAP可水解蛋白质,能够从多肽的N端水解亮氨酸和其他疏水氨基酸^[45]。NAG主要降解的是土壤中的几丁质、甲壳素和具备 β -1,4键的氨基葡萄糖聚合物。AP在核苷酸降解过程中起到重要作用^[46]。

本研究结果表明:LAP、NAG和AP会随施用沼液浓度的升高而增高,全施沼液组的酶活性均显著高于其他配比组;施用低浓度沼液对LAP、NAG和AP活性影响无显著差异。目前关于沼液对土壤NAG活性的报道较少。荣勤雷等^[47]报道了配施绿肥和猪粪,土壤的NAG活性高于单施化肥组,这与本研究结果一致。徐丽丽等^[48]也报道了施用猪粪能够显著增加土壤中LAP与NAG的活性。沼液中的有机物充当了LAP和NAG作用的底物,通过酶的分解作用释放土壤中的氮元素,由此增加了土壤中的硝态氮与铵态氮。AP能够提高土壤中磷的有效性,武继承等^[49]在长期施用沼液的土壤中发现AP活性上升了13.03%~44.44%,这与本试验结果相符。由此可见,沼液施用后LAP、NAG和AP的活性增加促进了土壤中铵态氮、硝态氮和有效磷含量的升高,间接促进了氮元素的转化和植物对养分的吸收。

3.4 沼液对土壤微生物活性的影响

土壤微生物是土壤养分循环的驱动力,沼液通过厌氧发酵而来,含有大量微生物通过与植物根系互作的方式发挥功能^[50]。本研究发现,高量沼液能够显著提高土壤细菌的数量及多样性。类似地,徐铭泽等^[51]报道在施用沼液后能显著地增加土壤细菌群落数量与组成,而在20%沼液与80%化肥配施条件下土壤中细菌数量与全施沼液组土壤中细菌数量比,其数量显著降低。本研究发现,与对照组相比 $V(\text{水}):V(\text{沼液})=1:2$ 处理中土壤细菌群落数量与多样性变化不显著($P>0.05$),这与徐铭泽等^[51]在低沼液高化肥的施用土壤细菌数量较全施沼液组土壤细菌数量下降的结果类似。由于沼液

中有机物和无机物仅占7%^[5],用水稀释了沼液后,营养物质浓度下降,因此稀释后沼液中的营养物质和细菌群落都相应减少。本研究发现盆栽土壤中细菌群落与土壤养分均显著相关,与钾离子和硫酸根离子含量呈显著相关($P<0.05$);全施沼液可显著提高盆栽番茄养分含量、土壤养分含量,有利于提高土壤细菌的数量与多样性。

本研究通过生物信息学分析发现从属水平上筛选出了4种差异细菌,并通过相关性分析明确了具体细菌与番茄养分积累量的相关性。在全施沼液组群落中发现数量最高的马赛菌属(*Massilia*)。马赛菌属细菌从铁山区的金属矿土中被筛选出,该菌株对 As^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Sb^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Cd^{2+} 均有抗性^[52]。马赛菌属的部分菌株具有抗多种重金属的能力,*M. putida* 6NM-7T能够耐受1.0 mmol/L Cd^{2+} 、0.5 mmol/L Zn^{2+} 和1.5 mmol/L Pb^{2+} ^[53]。沼液中还有一定的重金属,这也是马赛菌属会成为优势细菌的原因之一。马赛菌属不仅能够合成多种次级代谢产物和酶,而且具有溶磷、降解菲和耐受重金属等多种功能^[54]。本研究结果也表明:马赛菌属与番茄地上部分全磷含量呈显著正相关($P<0.05$);除了马赛菌属,乳杆菌属(*Lactobacillus*)群落数量在沼液施用后差异显著($P<0.05$)。乳杆菌属隶属于厚壁菌门,该属中多数细菌对土壤中的重金属也具有一定的吸附作用,能够提高植物的抗病性^[55]。乳杆菌属细菌具有固氮、溶磷和解钾功能,提高土壤养分有效性,促进植物生长^[56]。本研究也发现沼液施用后土壤养分含量增加,重金属含量增长并不显著($P>0.05$)。这可能是由于施用沼液增加的重金属含量并不显著。本研究测序结果中发现有2种未分类的细菌,分别是 unclassified_Bacteria 和 unclassified_Muribaculaceae,在不同沼液施用的土壤中数量差异显著($P<0.05$),且分别与全氮显著正相关($P<0.05$)。目前其对土壤改良及植物生长的作用未见相关报道,可以作为下一步重点研究的菌群。综上所述,施用高浓度沼液能在短期内快速提高土壤酶活性,增加土壤微生物数量,改善土壤微生物组成。施用沼液能够促进番茄开花坐果期生长,并且改善土壤理化性质,提高土壤养分含量。

4 结 论

为了能够为番茄生长中沼液的科学施用提供

依据,本研究以番茄品种“普罗旺斯”为研究对象,通过设置盆栽试验,6个不同的沼液处理,这些处理下番茄生长、养分吸收、土壤性质及微生物群落的变化。主要结论如下:

1)施用沼液可以显著增加番茄地上部干物质,不同用量之间差异不明显,T3(水:沼液=1:2)(体积比)处理下生物量达到最高。全施沼液可以显著增加番茄地上部全氮、全磷含量。

2)番茄种植后土壤电导率、硝态氮、速效磷和速效钾随沼液施用量变化显著,其中,土壤电导率和速效钾含量随着沼液浓度的增加而增加;施用沼液后土壤pH显著降低。沼液施用可以显著增加钾离子、钠离子、氯离子和硫酸根离子含量,其含量变化随着沼液浓度的增加而增加。

3)随着沼液用量增加,亮氨酸氨基肽酶(LAP)、 β -乙酰氨基-N-葡萄糖苷酶(NAG)、酸性磷酸酶(AP)活性逐渐增加。

4)沼液可以显著增加土壤细菌群落的数量与组成,高量沼液施用条件下细菌群落会发生明显变化。筛选到4种差异细菌,其中 *Lactobacillus* 与地下部干物质、unclassified_Bacteria 与地上部全氮、unclassified_Muribaculaceae 与地上部全氮、*Massilia* 与地上部全磷之间呈正相关。

参考文献 References

- [1] 仇焕广,廖绍攀,井月,栾江.我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J].环境科学,2013,34(7):2766-2774
Qiu H G, Liao S P, Jing Y, Luan J. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2766-2774 (in Chinese)
- [2] 曹文学.邹平县畜禽养殖粪污处理现状及对策[J].中国人口·资源与环境,2017,27(S1):55-57
Cao W X. Present situation and countermeasure of dung sewage treatment in livestock and poultry in Zouping County[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(S1): 55-57
- [3] 宋雪莹.畜禽粪污的危害及处理方式[J].现代农村科技,2024,(7):131,54
Song X Y. Hazards and treatment methods of livestock manure[J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2024, (7): 131, 54 (in Chinese)
- [4] 贾聪.生物膜中优势藻菌组合构建及其处理养猪沼液废水的研究[D].济南:齐鲁工业大学,2025.
Jia C. Study on the construction of dominant algae-bacteria combination in biofilm and its treatment of pig biogas slurry wastewater[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025. (in Chinese)
- [5] Malav LC, Malav MK, Khan SA, Kumar S. Biogas slurry: Source of nutrients for eco-friendly agriculture[J]. *International Journal of Extensive Research*, 2015, 2: 42-46
- [6] Mdambuzi T, Muchaonyerwa P, Tsubo M, Moshia M E. Nitrogen fertiliser

- value of biogas slurry and cattle manure for maize (*Zea mays* L.) production [J]. *Heliyon*, 2021, 7(5): e07077
- [7] Sharma A, Sharma S, Sabir N, El-Sheikh M A, Alyemeni M. Impact assessment of Karanja deoiled cake and sundried biogas slurry as a mixed substrate on the nematicidal potential of *Purpureocillium lilacinum* [J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2021, 33(3): 101399
- [8] 孔令郁, 袁盛硕. 绿色种养循环模式下玉米种植中沼液替代化肥技术研究[J]. 粮油与饲料科技, 2025(11): 80-82
- Kong L Y, Yuan S S. Study on replacing chemical fertilizer with biogas slurry in maize planting under green planting and breeding cycle mode[J]. *Grain Oil and Feed Technology*, 2025(11): 80-82 (in Chinese)
- [9] 安顺伟, 陈广锋, 刘保文, 胡潇怡, 赵凡, 沈欣, 牟国兴. 大棚黄瓜沼液滴灌适宜EC值试验[J]. 中国农技推广, 2025, 41(6): 73-76
- An S W, Chen G F, Liu B W, Hu X Y, Zhao F, Shen X, Mou G X. Experiment on suitable EC value of cucumber biogas slurry drip irrigation in greenhouse[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2025, 41(6): 73-76 (in Chinese)
- [10] 郑健, 宿智鹏, 刘俊彦, 王燕. 基于养分平衡原理的温室番茄沼液替代氮肥适宜模式及评价[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 77-90
- Zheng J, Su Z P, Liu J Y, Wang Y. Suitable model and evaluation of nitrogen fertilizer replacement by greenhouse tomato digestate based on nutrient balance principle[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2): 77-90 (in Chinese)
- [11] Peng X, Zhu Q H, Xie Z B, Darboux F, Holden N M. The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol [J]. *CATENA*, 2016, 138: 30-37
- [12] Xu M, Xian Y, Wu J, Gu Y F, Yang G, Zhang X H, Peng H, Yu X Y, Xiao Y L, Li L. 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
- [13] 冉毅, 吕夙凤. 四川省沼气安全形势研判及建议[J]. 四川农业与农机, 2024(4): 31
- Ran Y, Lv Y F. Research and suggestions on biogas safety situation in Sichuan Province[J]. *Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery*, 2024(4): 31 (in Chinese)
- [14] Trivedi P, Delgado-Baquerizo M, Trivedi C, Hu H W, Anderson I C, Jeffries T C, Zhou J Z, Singh B K. Microbial regulation of the soil carbon cycle: Evidence from gene-enzyme relationships[J]. *The ISME Journal*, 2016, 10(11): 2593-2604
- [15] Wang J X, Lu X N, Zhang J E, Wei G C, Xiong Y. Regulating soil bacterial diversity, community structure and enzyme activity using residues from golden apple snails[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 16302
- [16] 苏启航. 产吡啶乙酸菌株的筛选鉴定及促进沼液肥料化利用的效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024
- Su Q H. Screening and identification of indole-3-acetic acid-producing strains and study on their effectiveness in promoting the fertilization utilization of biogas slurry [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [17] Xu Z H, Chen C R, He J Z, Liu J X. Trends and challenges in soil research 2009; Linking global climate change to local long-term forest productivity[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, 9(2): 83-88
- [18] 姚应上, 孙晓雷, 柳维扬, 尤永军, 李发永. 秸秆还田与沼液配施对盐渍化土壤养分及酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 117-126
- Yao Y S, Sun X L, Liu W Y, You Y J, Li F Y. Effects of straw returning and biogas slurry combined application on salinized soil nutrients and enzyme activities[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(4): 117-126 (in Chinese)
- [19] 王嘉元, 秦翠兰. 沼液滴灌入渗对次生盐渍化土壤水盐运移特征的影响[J]. 南方农机, 2025, 56(10): 1-4, 10
- Wang L Y, Qin C L. Effect of biogas slurry drip irrigation infiltration on water and salt transport characteristics of secondary salinized soil[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2025, 56(10): 1-4, 10 (in Chinese)
- [20] 冉毅. 沼液养分特性、重金属含量分析及连续施用风险评估[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024
- Ran Y. Nutrient characteristics, heavy metal content analysis, and continuous application risk assessment of biogas fertilizer [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [21] 崔豫蒙, 谭占明, 程云霞, 杨艳超, 康雪梅, 梁爽, 王琦, 邵国莉. 加工番茄育种研究进展及展望[J]. 新疆农业科技, 2023(4): 35-39
- Cui Y M, Tan Z M, Cheng Y X, Yang Y C, Kang X M, Liang S, Wang Q, Shao G L. Research progress and prospect of processing tomato breeding[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2023(4): 35-39 (in Chinese)
- [22] 武虹宇. 盐胁迫下氮磷钾配施对加工番茄生长及酶活性的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023
- Wu H Y. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on growth and enzyme activity of processing tomato under salt stress[D]. Ala'er: Tarim University, 2023 (in Chinese)
- [23] 张瑞, 张贵龙, 陈冬青, 姬艳艳, 张海芳, 杨殿林. 不同施肥对农田土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2): 133-139
- Zhang R, Zhang G L, Chen D Q, Ji Y Y, Zhang H F, Yang D L. The effects of different fertilization on the functional diversity of soil microbial community [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(2): 133-139 (in Chinese)
- [24] 山崎肯哉. 营养液栽培大全[M]. 刘步洲, 刘宜生, 安志信, 赵士杰, 李书民译. 北京: 中国农业大学出版社, 1989
- Yamazaki K. *Complete Guide to Nutrient Solution Cultivation* [M]. Liu B Z, Liu Z X, Zhao S J, Li S M trans. Beijing: China Agricultural University Press, 1989 (in Chinese)
- [25] Edgar R C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. *Nature Methods*, 2013, 10(10): 996-998
- [26] Kõljalg U, Nilsson R H, Abarenkov K, Tedersoo L, Taylor A F S, Bahram M, Bates S T, Bruns T D, Bengtsson-Palme J, Callaghan T M, Douglas B, Drenkhan T, Eberhardt U, Dueñas M, Grebenc T, Griffith G W, Hartmann M, Kirk P M, Kohout P, Larsson E, Lindahl B D, Lücking R, Martín M P, Matheny P B, Nguyen N H, Niskanen T, Oja J, Peay K G, Peintner U, Peterson M, Pöldmaa K, Saag L, Saar I, Schüßler A, Scott J A, Senés C, Smith M E, Suija A, Taylor D L, Telleria M T, Weiss M, Larsson K H. Towards a unified paradigm for sequence-based identification of fungi[J]. *Molecular Ecology*, 2013, 22(21): 5271-5277
- [27] Chen D L, Wang X X, Carrión V J, Yin S, Yue Z F, Liao Y, Dong Y H, Li X G. Acidic amelioration of soil amendments improves soil health by impacting rhizosphere microbial assemblies [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 167: 108599
- [28] 郑健, 颜斐, 马彪, 潘占鹏, 冯正江, 任海伟. 生育期沼液调控对番茄生长、产量、品质及土壤全氮的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 23-31
- Zheng J, Yan F, Ma B, Pan Z P, Feng Z J, Ren H W. Using biogas slurry to regulate growth, field and fruit quality of greenhouse tomato and nitrogen dynamics in root zone[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7): 23-31 (in Chinese)
- [29] 嵇东. 沼渣沼液对提高葡萄产量与品质的研究[J]. 河南农业, 2017(20): 13-14
- Ji D. Study on improving the yield and quality of grapes by biogas residue biogas slurry[J]. *Agriculture of Henan*, 2017(20): 13-14 (in Chinese)

- [30] 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 闵伟. 棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2192-2203
Zhou Y X, Chen J, Li Y, Hou Z A, Min W. Effects of cotton stalk returning on soil enzyme activity and bacterial community structure diversity in cotton field with long-term saline water irrigation[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2192-2203 (in Chinese)
- [31] Koszel M, Lorencowicz E. Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizer[J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015, 7: 119-124
- [32] 张苗, 阮宏华, 沈彩芹, 丁学农, 曹国华. 长期施用沼液对杨树人工林土壤碳氮磷及其计量比的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2024, 48(6): 102-110
Zhang M, Ruan H H, Shen C Q, Ding X N, Cao G H. Effects of long-term application of biogas slurry on soil carbon, nitrogen, phosphorus and their metering ratio in poplar plantations [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2024, 48(6): 102-110 (in Chinese)
- [33] 孙广辉. 沼液灌溉对蔬菜产量和品质以及土壤质量影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
Sun G H. Studies on the effects of vegetable yield and qualities and soil qualities after application of biogas slurry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006 (in Chinese)
- [34] 柴彦君, 张睿, 江建锋, 姚光伟, 范志斌, 李艳, 李子川, 张进, 孟俊. 沼液化肥配施对芦笋地土壤肥力及芦笋品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 120-127
Chai Y J, Zhang R, Jiang J F, Yao G W, Fan Z B, Li Y, Li Z C, Zhang J, Meng J. Effects of the combined biogas slurry with chemical fertilizer on soil fertility and *Asparagus* quality in field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(5): 120-127 (in Chinese)
- [35] 刘银秀, 池永清, 董越勇, 叶波, 范志斌, 聂新军, 邢佳佳. 不同沼液施用年限土壤养分含量和微生物群落结构差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 483-495
Liu Y X, Chi Y Q, Dong Y Y, Ye B, Fan Z B, Nie X J, Xing J J. Variation of nutrient content and microbial community in soils under different application years of biogas slurry [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(3): 483-495 (in Chinese)
- [36] 朱爱孔. 乡村振兴背景下农村畜禽粪污资源化利用的探索: 以农牧产业融合为例[J]. 广东饲料, 2021, 30(4): 11-14
Zhu A K In the context of rural revitalization: Exploration of resource utilization of rural livestock and poultry manure[J]. *Guangdong Feed*, 2021, 30(4): 11-14 (in Chinese)
- [37] 娄雨, 李艳, 姜灵伟, 李明新, 王琦璋, 马继涛, 林聪, 段娜. 不同浓度沼液及施用方式对小白菜生长效果的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 86-94
Lou Y, Li Y, Jiang L W, Li M X, Wang Q Z, Ma J T, Lin C, Duan N. Effects of different concentrations and application methods of liquid digestate on the growth of Chinese cabbage [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(8): 86-94 (in Chinese)
- [38] 唐存柳, 靳译文, 姚光伟, 平立凤, 虞轶俊, 郑一玲, 范栩妙, 单胜道. 生物质炭-沼液联合施用对调控氮循环功能基因促进氮素增效的影响[J]. 环境化学, 2023, 42(8): 2843-2852
Tang C L, Jin Z W, Yao G W, Ping L F, Yu Y J, Zheng Y L, Fan X M, Shan S D. Effects of combined application of biochar and biogas slurry on regulating nitrogen cycle function genes and promoting nitrogen efficiency[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(8): 2843-2852 (in Chinese)
- [39] 黄钦. 基于人工智能的养殖沼液施肥工艺对土壤化学性状的影响[J]. 化学工程与装备, 2022(12): 327-329
Huang Q. Effects of fertilization technology of farming biogas slurry on soil chemical properties based on artificial intelligence[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2022(12): 327-329 (in Chinese)
- [40] 王志刚, 韩雪, 徐少奇, 魏雨泉, 刘运平, 裴浪, 宋潇, 李伟, 王婷, 郭立月. 基于 Meta 分析的沼液施用对作物-土壤系统效应的研究[J]. 中国沼气, 2023, 41(4): 3-10
Wang Z G, Han X, Xu S Q, Wei Y Q, Liu Y P, Qiu L, Song X, Li W, Wang T, Guo L Y. Study on the crop yield and soil fertility under the biogas slurry application: A meta-analysis[J]. *China Biogas*, 2023, 41(4): 3-10 (in Chinese)
- [41] 张心良. 猪场污水还田与化肥配施对农田水土环境和作物产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 645-650
Zhang X L. Effects of application of swine farm wastewater coupled with chemical fertilizer on water, soil and crop[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4): 645-650 (in Chinese)
- [42] Feng H, Qu G F, Ning P, Xiong X F, Jia L J, Shi Y K, Zhang J. The resource utilization of anaerobic fermentation residue [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11: 1092-1099
- [43] 刘聪. 沼液施用条件对土壤养分、生态风险与玉米产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021
Liu C. Effects of biogas slurry application conditions on soil nutrients, ecological risks and corn yield [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [44] 张金钰, 邱新彩, 刘欣, 彭道黎, 程顺. 间伐对塞罕坝华北落叶松人工林土壤酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 300-307
Zhang J Y, Qiu X C, Liu X, Peng D L, Cheng S. Effects of thinning on soil enzyme activities in *Larix principis-rupprechtii* plantations in Saihanba Mechanical Forest Farm[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(2): 300-307 (in Chinese)
- [45] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 张文, 杨晓辉. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 194-202
He C C, Wang L G, Wang Y C, Zhang W, Yang X H. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 194-202 (in Chinese)
- [46] 郑婕, 陈刘胤, 楚晓燕, 李颖畅, 李学鹏. 酸性磷酸酶的生物信息学分析及抑制剂筛选[J]. 中国食品学报, 2025, 25(5): 195-205
Zheng J, Chen L Y, Chu X Y, Li Y C, Li X P. Bioinformatics analysis and inhibitor screening of acid phosphatase in rainbow trout [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2025, 25(5): 195-205 (in Chinese)
- [47] 荣勤雷, 梁国庆, 周卫, 刘东海, 王秀斌, 孙静文, 李双来, 胡诚. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1168-1177
Rong Q L, Liang G Q, Zhou W, Liu D H, Wang X B, Sun J W, Li S L, Hu C. Effects of different organic fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1168-1177 (in Chinese)
- [48] 徐丽丽, 王秋兵, 张心昱, 孙晓敏, 戴晓琴, 杨凤亭, 部金凤, 王辉民. 不同肥料对稻田红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 909-914
Xu L L, Wang Q B, Zhang X Y, Sun X M, Dai X Q, Yang F T, Bu J F, Wang H M. Effects of applying different kind fertilizers on enzyme activities related to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in reddish paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 909-914 (in Chinese)
- [49] 武继承, 杨永辉, 郑惠玲, 潘晓莹. 水肥互作对小麦-玉米周年产量及水分利用率的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(7): 67-72

- Wu J C, Yang Y H, Zheng H L, Pan X Y. Effects of water-fertilizer interaction on yield and anniversary water use efficiency of wheat and corn [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(7): 67-72 (in Chinese)
- [50] 张翔宇. 丛枝菌根真菌提高葵藜苜蓿耐铅机制的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020
- Zhang X Y. *Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate lead stress in Medicago truncatula*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020 (in Chinese)
- [51] 徐铭泽, 孙丽英, 张良, 张忠兰, 潘仕梅, 杨守军, 董仁杰. 沼液与化肥配施对西红柿生长和土壤组分的影响[J]. 中国沼气, 2017, 35(6): 75-82
- Xu M Z, Sun L Y, Zhang L, Zhang Z L, Pan S M, Yang S J, Dong R J. Effect of biogas slurry combined with chemical fertilizer on tomato growth and soil composition[J]. *China Biogas*, 2017, 35(6): 75-82 (in Chinese)
- [52] Du Y, Yu X, Wang G J. *Massilia tieshanensis* sp nov, isolated from mining soil[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, 62(Pt. 10): 2356-2362
- [53] Feng G D, Yang S Z, Li H P, Zhu H H. *Massilia putida* sp nov, a dimethyl disulfide-producing bacterium isolated from wolfram mine tailing [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2016, 66(1): 50-55
- [54] 杨恩东, 崔丹曦, 汪维云. 马赛菌属细菌研究进展[J]. 微生物学通报, 2019, 46(6): 1537-1548
- Yang E D, Cui D X, Wang W Y. Research progress on the genus *Massilia* [J]. *Microbiology China*, 2019, 46(6): 1537-1548 (in Chinese)
- [55] 方宇, 蔡永占, 韩小女, 白涛, 刘冬梅, 刘舜, 王瑞宝, 郭永升, 陈小龙, 黄飞燕, 余磊, 刘佳妮. 黑胫病对不同品种烟草根际土壤细菌群落的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(3): 118-125
- Fang Y, Cai Y Z, Han X N, Bai T, Liu D M, Liu S, Wang R B, Guo Y S, Chen X L, Huang F Y, Yu L, Liu J N. Effects of black shank on rhizosphere soil bacterial community of different tobacco varieties [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(3): 118-125 (in Chinese)
- [56] Yao Z M, Chen Y L, Luo S Y, Wang J L, Zhang J F, Zhang J F, Tian C J, Tian L. Culturable screening of plant growth-promoting and biocontrol bacteria in the rhizosphere and phyllosphere of wild rice[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(7): 1468-1468

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 刘莎, 硕士研究生, 现就读于西北农林科技大学资源环境学院, 土壤学专业, 研究生期间连续两年获得校二等奖学金。2019年9月-2023年7月, 本科, 青岛农业大学资源与环境学院, 农业资源与环境专业, 本科期间获得校三等奖学金和三好学生。先后参与“秸秆高量深施对土壤有机碳组分的影响”及“秸秆高量深施对温室气体排放的影响”的研究。



通讯作者简介: 张育林, 博士, 西北农林科技大学副教授、硕士生导师。2003年9月—2007年7月, 本科, 西北农林科技大学资源环境学院, 农业资源与环境专业; 2007年9月—2010年7月, 硕士, 西北农林科技大学资源环境学院, 土壤物理专业; 2010年9月—2015年2月, 博士, 澳大利亚阿德莱德大学, 土壤化学专业。主要从事土壤肥力提升、土壤改良和旱地养分资源管理等方面的研究。主讲《土壤与植物营养》、《土壤学》、《土壤科学进展》、《植物营养科学进展(全英文)》、《生态环境监测与评估》等课程。主持国家自然科学基金青年科学基金项目、国家重点研发计划、农业农村部软科学项目、陕西省农业农村厅农业关键核心技术项目等研究课题9项; 在 *Soil & Tillage Research*、*European Journal of Soil Science*、*Plant Soil* 等期刊发表学术论文30余篇; 参与出版谢英荷主编教材《土壤学》(第3版); 获得专利2项。