



葛桂利,李爽,左伟立,倪浩翔,魏文良.生物焖棚对盐渍化设施土壤理化性质与微生物群落结构的影响[J].中国农业大学学报,2025,30(03):95-104.
GE Guili, LI Shuang, ZUO Weili, NI Haoxiang, WEI Wenliang. Effect of bio-stew management on the physicochemical properties and microbial community structure in salinized greenhouse soils[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(03):95-104.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.03.09

生物焖棚对盐渍化设施土壤理化性质与微生物群落结构的影响

葛桂利¹ 李爽² 左伟立³ 倪浩翔³ 魏文良^{1*}

(1. 青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109;

2. 青岛得地德农化科技服务有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 武汉科诺生物科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要 为探究生物焖棚(高温配施有机肥+生物菌剂)对设施蔬菜农田土壤质量的影响,在青岛、潍坊、辽阳、嘉兴、杭州等市的设施蔬菜农田,设置了常规焖棚(T₁)和生物焖棚(T₂)2个处理,测定土壤化学性质、土壤团聚体结构稳定性、土壤微生物群落结构、土壤微生物丰富度与多样性指数和土壤微生物量碳等指标。结果表明:与T₁相比,T₂的土壤有机质、碱解氮、交换性铜和微生物量碳含量均显著增加,增幅分别为19.55%、27.53%、58.43%和37.52%($P<0.05$),土壤团聚体平均重量直径(MWD)增加20.96%($P<0.05$),但对土壤盐分、pH、有效磷、速效钾、交换性锌的改善效果不显著($P>0.05$)。生物焖棚还能够改变土壤微生物的群落结构,其中,细菌群落主要受到土壤微生物量碳、微团聚体和土壤盐分含量的影响。得益于土壤理化性质的改变,土壤中细菌的丰富度与多样性指数分别提高15.06%(Chao 1)、20.63%(PD)、16.97%(Shannon)、12.49%(Simpson),真菌的丰富度与多样性指数分别提高17.63%(Chao 1)、19.29%(PD)、6.11%(Shannon)、4.51%(Simpson)。同时,生物焖棚可使土壤质量几何平均值(GM)提高5.39%。综上,生物焖棚较常规焖棚在提高土壤质量、改善土壤微生物群落结构与功能等方面具有良好的效果,是提高盐渍化设施农田土壤质量的有效措施。

关键词 生物焖棚; 土壤化学性质; 土壤团聚体; 土壤微生物; 设施蔬菜

中图分类号 S156;S626

文章编号 1007-4333(2025)03-0095-10

文献标志码 A

Effect of bio-stew management on the physicochemical properties and microbial community structure in salinized greenhouse soils

GE Guili¹, LI Shuang², ZUO Weili³, NI Haoxiang³, WEI Wenliang^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. Qingdao Dedide Agrochemical Technology Service Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

3. Wuhan Kono Biotechnology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract This study aimed to explore the influence of bio-stew management (high temperature and organic materials + biological agent) on the soil quality of the vegetable greenhouses. Two treatments including conventional sealing (T₁) and biological sealing (T₂) were set up in Qingdao, Weifang, Liaoyang, Jiaying and Hangzhou city. Soil chemical properties, soil aggregate structure, soil microbial community structure, soil microbial richness and diversity index, and soil microbial biomass carbon content were determined.

收稿日期: 2024-09-18

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021QC107);山东省高等学校优秀青年创新团队计划(2023KJ169);武汉科诺生物科技股份有限公司横向项目(660/2423161)

第一作者: 葛桂利(ORCID:0009-0008-6999-8098),硕士研究生,E-mail:3193395313@qq.com

通讯作者: 魏文良(ORCID:0000-0001-7861-2670),副教授,主要从事土壤质量与产能提升、养分资源综合管理研究,E-mail:weiwenliang12@163.com

The results showed that: Compared with T_1 , the contents of soil organic matter, alkali hydrolytic nitrogen, exchange copper and microbial biomass carbon for T_2 were significantly increased by 19.55%, 27.53%, 58.43% and 37.52% ($P < 0.05$), respectively, and the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates was significantly increased by 20.96% ($P < 0.05$). However, the effects on soil salinity, pH, available phosphorus and available potassium, and exchange zinc under T_2 treatment were not significant ($P > 0.05$). The soil microbial community structure was changed by the microbial biomass carbon, microaggregates and soil salinity content. Due to the changes in soil's physical and chemical properties, the richness and diversity index of bacteria were increased by 15.06% (Chao 1), 20.63% (PD), 16.97% (Shannon), 12.49% (Simpson), respectively. The richness and diversity index of fungi were increased by 17.63% (Chao 1), 19.29% (PD), 6.11% (Shannon) and 4.51% (Simpson), respectively. Meanwhile, the geometric mean value (GM) of soil quality was increased by 5.39%. Overall, this study suggest that biological sealing is beneficial for improving soil quality, soil microbial community structure and function compared to conventional sealing. Therefore, biological sealing is an effective measure to improve soil quality in salinized greenhouse soils.

Keywords bio-stew; soil chemical property; soil aggregate; soil microorganism; vegetable greenhouse

我国蔬菜栽培类型主要分为露地和设施栽培2种类型,由于设施栽培在延长蔬菜生长期、高产和高经济价值等方面的优势^[1-2],近几十年来得到了迅猛发展。目前,我国设施蔬菜种植面积约340万 hm^2 ,占我国蔬菜种植面积的18.0%^[2],占到全球设施蔬菜栽培面积的70%以上^[3]。然而,设施蔬菜在生产过程中存在诸多连作带来的土壤与环境问题,例如土壤理化性质恶化、土壤微生物群落多样性与多功能性降低、病虫害发病率增加,以及自毒物质积累等^[3-4],严重制约我国农产品安全、生态环境安全以及农业可持续发展。土壤是作物生产的基础,改善土壤质量是提高土壤生产力、保障未来作物增产的重要途径^[5-6]。因此,开展不同施肥管理措施对设施蔬菜农田土壤质量改善效果的研究对提高设施蔬菜产量与产品品质、促进蔬菜产业的高质量可持续发展具有重要意义。

设施蔬菜传统高温焖棚是利用太阳光线照射的方法,使密封的温室快速升温到50~70℃,土壤温度达到40℃以上,并持续一定时间,达到杀灭土壤有害生物,使温室内土壤及设施环境得到改善的目的^[7]。王悦目等^[8]研究表明,高温焖棚对甜瓜白粉病具有明显的防治效果,且能够使甜瓜大幅增产,与对照相比增产19.9%~33.8%。但是,由于传统高温焖棚的技术单一性,已经不能够有效解决日益加重且复杂的连作障碍问题,以及由于过度使用农药、化肥所导致的土壤退化问题^[9-10]。近年来,有机物料+生物菌剂结合高温焖棚技术是一个使用微生物技术进行土壤改良的整体方案,能够有效

缓解土壤板结、酸化、盐渍化,减少由于土壤退化导致的作物产量和品质下降,以及土传病害增加等问题^[9-11]。何义利等^[9]研究表明,秸秆还田和生物菌剂能够显著提高土壤中各种营养物质含量,并且提高了土壤微生物中子囊菌门(*Ascomycota*)的相对丰度,增幅为9.2%。董海龙等^[10]研究发现,采用秸秆还田配合石灰氮和X-20菌肥+高温闷棚综合处理能够有效降低黄瓜根结线虫发病率,并且处理210d后,黄瓜生物产量较对照增加98.1%。

土壤微生物是最活跃的土壤肥力因子,其丰富度和多样性能够较早地反映环境质量的变化过程,并揭示微生物的生态功能差异,被认为是最有潜力的敏感性生物指标之一^[12-13]。已有研究表明,施加生物菌肥可以增加土壤有效微生物菌群,改善植物根际微生物区系的组成和数量,提高土壤酶的活性^[9-10,13-14]。生物菌肥不仅能够改善微生物群落结构特征,还可以改善土壤的理化性质。李凤梅等^[15]研究表明,施用生物菌肥能够有效降低土壤含盐量45.0%,提高土壤有机质含量43.1%,还能够显著增加土壤速效养分含量、改善土壤结构、增加土壤孔隙度。与单施化肥相比,生物有机肥+化肥能够促进番茄增产47.6%,显著降低果实中的硝酸盐含量^[16]。由此可见,有机肥和生物菌剂联合施用不仅可以显著增加土壤中有益微生物的数量,促进微生物对能源物质的分解利用和矿质养分的循环利用,同时,其在改善作物品质和提高作物产量方面也具有良好的效果。

设施蔬菜由于常年过量施用化肥,导致土壤中

矿质营养元素的累积,破坏了土壤结构和土壤理化性质,导致土壤酸化和次生盐渍化,同时,土传病害增加,微生物群落结构遭到破坏,制约了设施蔬菜的高质量和可持续发展^[17]。生物焖棚是解决上述问题的有效途径,然而,其在不同区域对土壤理化性质、土壤微生物群落结构与多样性的影响,以及微生物与土壤属性的相关关系的研究尚未见报道。本研究通过开展多点试验,测定秸秆/粪肥+生物菌剂结合高温焖棚对设施蔬菜农田土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、盐分、交换性铜、交换性锌、微生物量碳和pH,以及土壤团聚体结构、微生物群落结构和微生物丰富度与多样性等指标,以及微生物与土壤属性的相关关系,旨在明确生物焖棚措施对设施蔬菜农田土壤质量的影响,以为设施蔬菜生产提质增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及处理

试验地点分布在青岛、潍坊、辽阳、嘉兴、杭州等市,选择常年进行高温焖棚的蔬菜大棚,并在周边选择种植年限5~10年,且管理措施相同的蔬菜大棚开展试验,试验点数为18组。

试验设计2个处理,常规焖棚(T_1);生物焖棚(T_2)。生物焖棚操作流程如下:设施蔬菜大棚清棚后,施用鸡粪15 t/hm²,以及300~450 m³/hm²秸秆粉碎后均匀铺撒至地面,同时,施用武汉科诺生物科技股份有限公司研发的微生物菌剂。将菌剂与粪肥、秸秆、耕作层土壤翻耕混匀并推平,灌水浸泡,封闭大棚,进行生物焖棚4周。本试验所用菌剂有3种,菌剂1用量为60 kg/hm²,所含有效菌种主要为枯草芽孢杆菌、酿酒酵母、黑曲霉,有效活菌数 ≥ 0.50 亿CFU/g,产品形态为粉剂;菌剂2用量为60 kg/hm²,所含有效菌种为解淀粉芽孢杆菌,有效活菌数 ≥ 100.00 亿个/mL,产品形态为液体;菌剂3用量为30 kg/hm²,所含有效菌种为多粘类芽孢杆菌,有效活菌数 ≥ 5.00 亿/mL,产品形态为液体。

1.2 样品采集及测定

1.2.1 样品的采集

2023年8—10月,在各试验地采集常规焖棚和生物焖棚后的土壤样品。采用5点取样法,采集0~20 cm深度的混合土壤样品,新鲜样品去除动植物残体、植物根系等杂物后,按编号分装在塑料袋中,并注明采样区名称、采样时间、采样深度。取出的

样品分为2部分,一部分土样置于液氮中保存,用于测定土壤微生物群落、土壤微生物量碳;另一部分土样风干后分别过1.00和0.25 mm筛,用于土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、盐分、交换性铜、交换性锌含量和pH的测定。同时,采集原状土壤用于土壤团聚体结构的测定。

1.2.2 样品的测定

土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用Olsen法测定,速效钾采用醋酸铵-火焰光度法测定,盐分含量采用残渣烘干质量法测定,pH(土水质量比为1.0:2.5)采用电位测定法,土壤交换性铜、锌采用DPTA浸提-ICP测定^[18]。

土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法^[19]测定,称取6份10.00 g新鲜土样,3份用于氯仿熏蒸,剩余3份作为对照。将称取的土样培养1周后,用于氯仿熏蒸的3份放置到盛有氯仿的真空干燥器中抽至真空,氯仿沸腾3 min后停止抽气,在25℃的黑暗环境下培养24 h;用于对照的3份土样放入真空干燥器中,在相同的环境中培养24 h。培养后,将真空干燥器中的氯仿取出,再次抽真空2~3次,至完全除去土壤中的氯仿。在土样中加入40 mL 0.50 mol/L的K₂SO₄浸提液,震荡提取30 min后,用0.45 μm的滤膜过滤,用荷兰Trace Elemental公司有机碳分析仪(Xper-TOC/TNb)进行土壤有机碳的测定,计算土壤中微生物量碳。

土壤微生物多样性和群落结构采用16S rDNA V3-V4和ITS1高通量测序技术测定,使用DNA试剂盒(美国MOBIO实验室),从土样中提取DNA。利用引物338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAG-CAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGT-WTCTAAT-3')对细菌16S rRNA基因V4区域特异性扩增;利用引物ITS1F(5'-CTTGGTCATT-TAGAGGAAGTAA-3')和ITS2R(5'-GCTGC-GTTCTTCATCGATGC-3')对真菌ITS1区域特异性扩增。采用Illumina MiSeq测序方法测定^[20]。

土壤团聚体采用湿筛法测定^[19,21]。取过8 mm筛的风干土50.00 g,采用湿筛法把土样分为 ≥ 2.000 、 $\geq 0.250 \sim 2.000$ 、 $\geq 0.053 \sim 0.250$ 、 < 0.053 mm团聚体。操作方法如下:室温下将土样放于2 mm套筛上,使桶内的去离子水恰好没过土样,浸泡5 min;将套筛在2 min内垂直移动50次,分别将2.000、0.250、0.053 mm筛子上的组分用去离子水冲洗到已烘干称

重的铝盒中,于60℃下烘干至恒重。计算土壤团聚体的重量平均直径(MWD),mm。

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i \times Y_i$$

$$GM = \sqrt[n]{\text{土壤物理指标} \times \text{土壤化学指标} \times \text{土壤微生物指标}}$$

式中:土壤物理指标包括MWD;土壤化学指标包括土壤盐分、pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性铜、交换性锌;土壤微生物指标包括微生物量碳、细菌丰富度与多样性指数和真菌丰富度与多样性指数; n 为指标数量,本研究中为18。

1.3 数据处理及分析方法

采用SAS(version 8.2; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)进行统计分析,运用配对样本T

式中: X_i 指该粒径土壤团聚体的平均直径,mm; Y_i 为该粒径团聚体所占的质量百分比。

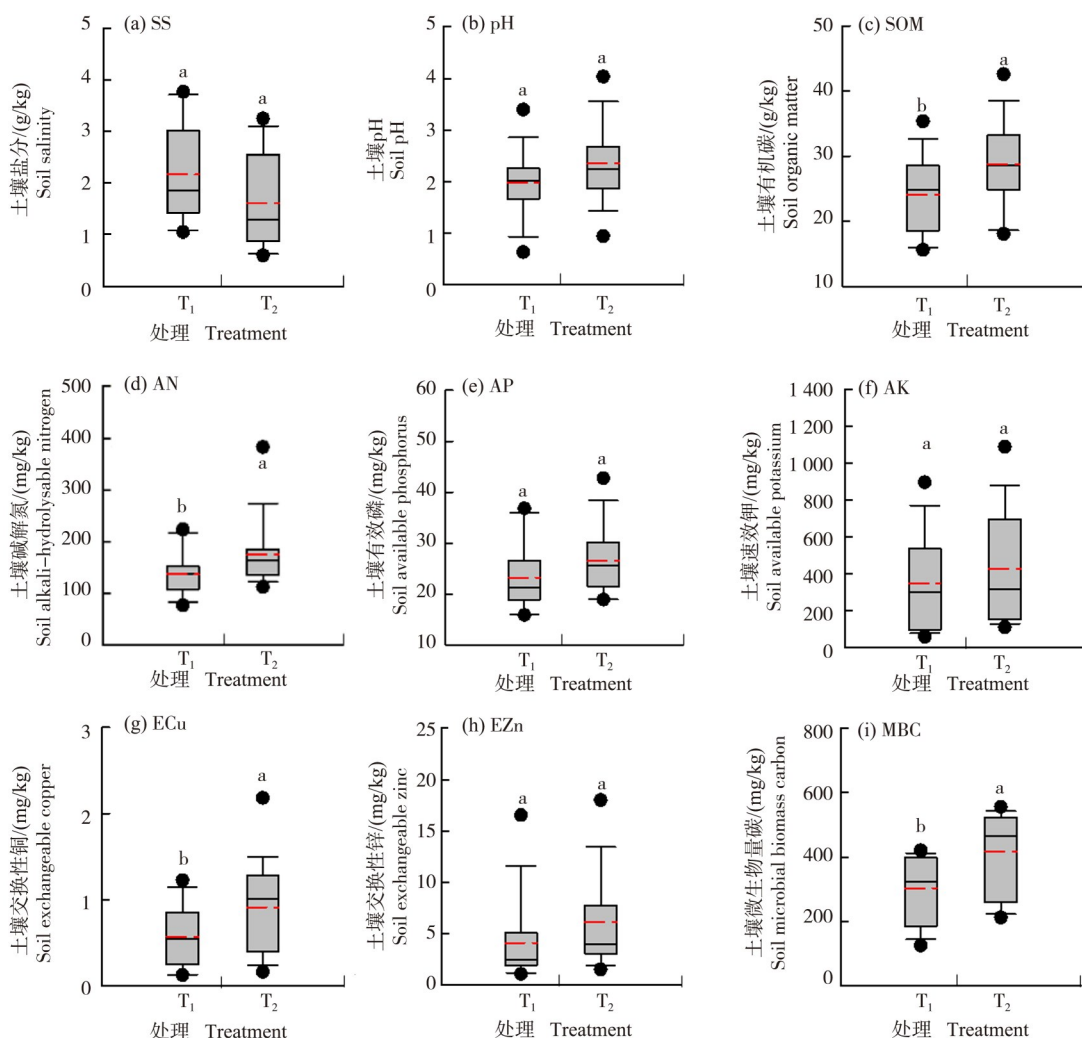
土壤质量几何平均值(GM)^[22]计算公式如下:

检验分析不同处理下土壤性状在5%水平的差异显著性。采用Sigma Plot和Origin 2021 Pro进行相关性分析和作图。

2 结果与分析

2.1 生物焖棚对土壤化学性质的影响

由图1可知,与 T_1 相比, T_2 能够显著提高土壤有机质、碱解氮、交换性铜含量,增幅分别为



SS, 土壤盐分;SOM, 土壤有机质;AN, 碱解氮;AP, 有效磷;AK, 速效钾;ECu, 交换性铜;EZn, 交换性锌;MBC, 微生物量碳。黑线和红线分别代表中位数和平均值。不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

SS, soil salinity; SOM, soil organic matter; AN, alkali-hydrolyzed nitrogen; AP, available phosphorus; AK, available potassium; ECu, exchangeable copper; EZn, exchangeable zinc; MBC, microbial biomass carbon. The black and red lines within the box mark the median and average, respectively. Different lowercase letters indicate a significant difference at 5% level among different treatments. The same below.

图1 不同处理的土壤化学性质

Fig. 1 Chemical properties of soil under different treatments

19.55%、27.53%、58.43% ($P < 0.05$)。T₂处理使土壤盐分降低(由中度转变为轻度盐碱地),降幅为25.85%,土壤pH、有效磷、速效钾和交换性锌含量升高,但未达到显著水平($P > 0.05$)。同时,与T₁相比,T₂处理显著增加了土壤微生物量碳,增幅为37.52%。

2.2 生物焖棚对土壤团聚体结构的影响

由图2可知,与T₁相比,T₂处理后 ≥ 2.000 和 $\geq 0.250 \sim 2.000$ mm的团聚体所占比例均大幅增加,增幅分别为23.25%和21.36%。同时, $\geq 0.053 \sim 0.250$ 和 < 0.053 mm的团聚体所占比例下降,降幅分别为5.91%和29.67%。与T₁相比,

T₂处理的土壤团聚体平均重量直径(MWD)增加了20.96% ($P < 0.05$)。

2.3 生物焖棚对土壤微生物群落的影响及其与土壤属性的相关关系

由图3可知,与T₁相比,T₂处理细菌群落中的 *Deinococci*、*S0134_terrestrial_group*、*Anaerolineae*、*Bacteroidia* 和 *Chloroflexia* 相对丰度均显著增加,增幅分别为1873.90%、399.67%、72.38%、51.54%和18.34%。与T₁相比,T₂处理真菌群落中的 *Aphelidiomycetes*、*Archaeorhizomycetes*、*Glomeromycetes*、*Lobulomycetes* 和 *Lecanoromycetes* 相对丰度显著增加,增幅分别为31083.63%、683.73%、460.21%、155.56%和151.69%。

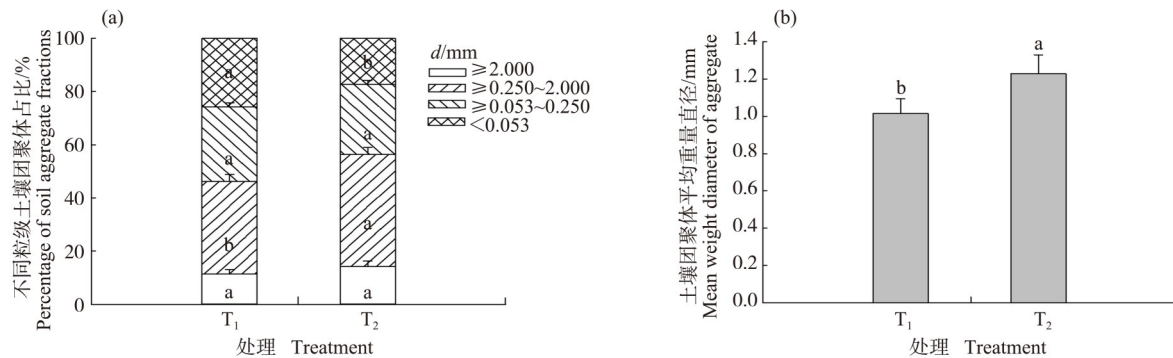


图2 不同处理的土壤团聚体组分(a)和平均重量直径(b)

Fig. 2 Soil aggregate fractions (a) and mean weight diameter (b) under different treatments

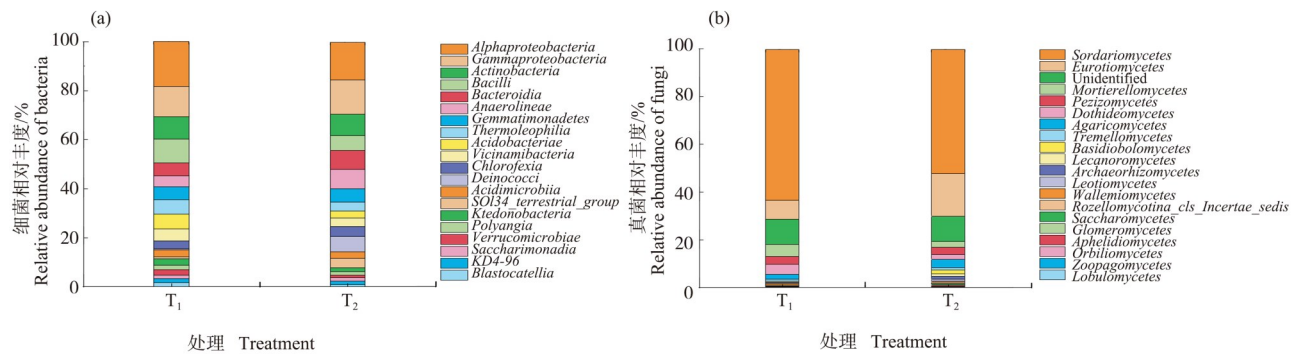


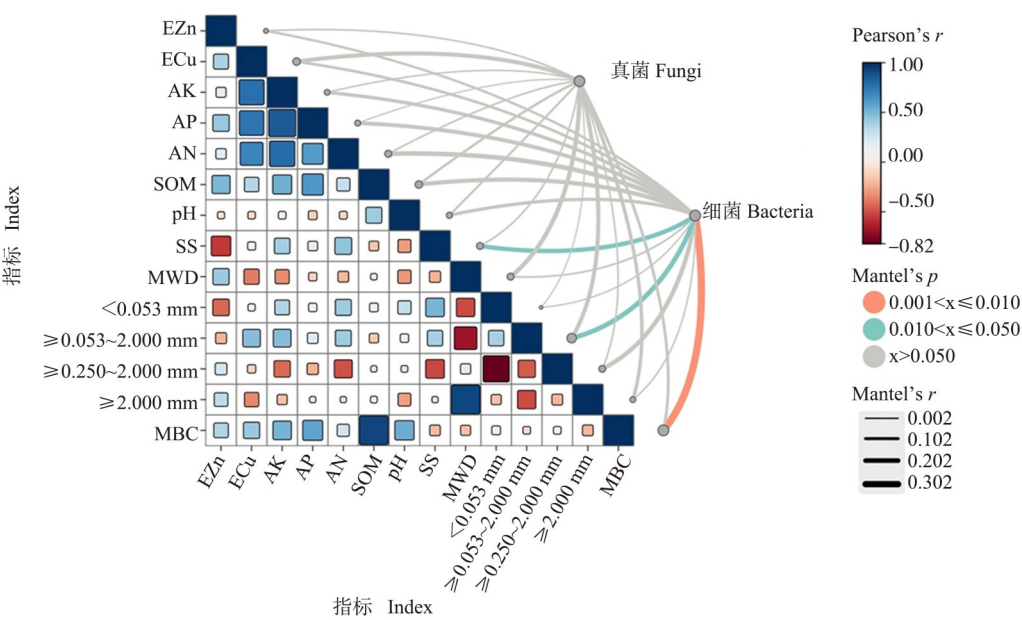
图3 不同处理的土壤细菌(a)和真菌(b)群落结构

Fig. 3 The community structure of soil bacteria (a) and fungi (b) under different treatments

由图4可知,细菌群落与土壤微生物量碳相关性最强(Mantel's $R \geq 0.300$, $P = 0.002$),其次主要受到土壤微团聚体($\geq 0.053 \sim 0.250$ mm)(Mantel's $R \geq 0.200$, $P = 0.044$)和土壤盐分(Mantel's $R \geq 0.200$, $P = 0.038$)的影响。而真菌群落受土壤中各因子的影响均未达到显著水平。

2.4 生物焖棚对土壤微生物丰富度和多样性的影响及其与土壤属性的相关关系

由表1可知,与T₁相比,T₂的细菌和真菌丰富度与多样性指数均有所上升,T₂的细菌Chao 1、PD、Shannon和Simpson指数分别增加15.06%、20.63%、16.97%和12.34%。T₂的真菌Chao 1和



MWD, 平均重量直径。下同。
MWD, mean weight diameter. The same below.

图4 土壤细菌和真菌群落结构与土壤物理和化学特性的相关关系

Fig. 4 Relationships among soil bacteria, fungi and soil chemical and physical properties

表1 不同处理的土壤微生物群落丰富度与多样性指数

Table 1 Soil microbial community richness and diversity index under different treatments

类型 Type	处理 Treatment	丰富度指数 Richness index		多样性指数 Diversity index	
		Chao 1	PD	Shannon	Simpson
细菌 Bacteria	T ₁	3 743.26±168.76 ^b	2 471.45±162.65 ^b	243.29±12.14 ^b	8.41±0.43 ^b
	T ₂	4 307.05±133.04 ^a	2 981.27±121.09 ^a	284.57±9.00 ^a	9.46±0.19 ^a
真菌 Fungi	T ₁	447.83±30.76 ^b	334.30±21.05 ^b	89.56±7.65 ^a	4.43±0.33 ^a
	T ₂	526.79±21.12 ^a	398.80±18.27 ^a	95.03±4.14 ^a	4.63±0.20 ^a

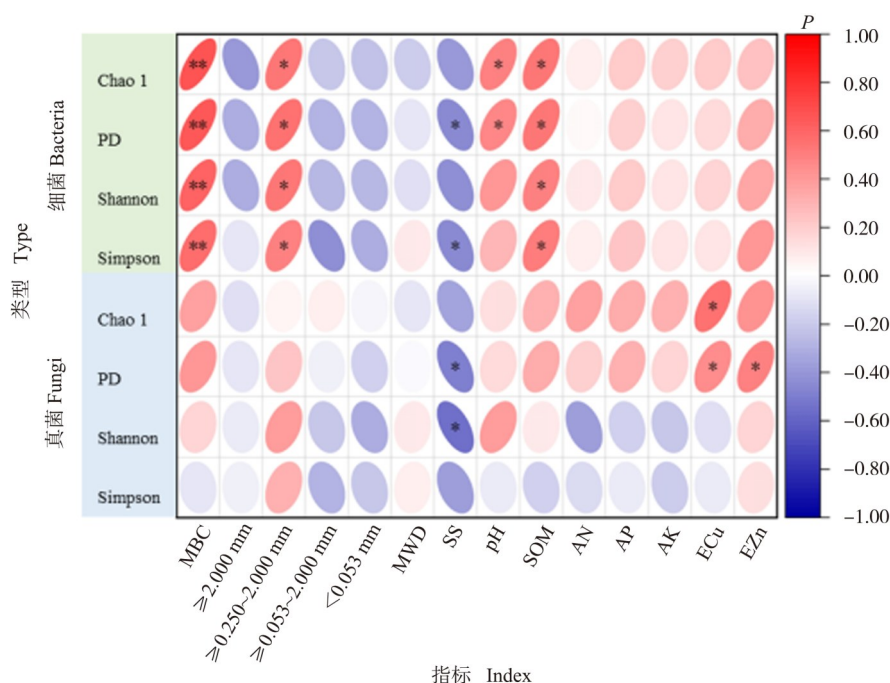
PD 指数分别增加了 17.63% 和 19.29% ($P<0.05$); Shannon 和 Simpson 指数有所提高,但均未达到显著水平($P>0.05$)。

由图 5 可知,细菌的 Chao 1、PD、Shannon、Simpson 指数与土壤微生物量碳呈极显著正相关($P<0.01$),与 $\geq 0.250\sim 2.000$ mm 的土壤团聚体组分和土壤有机质含量呈显著正相关($P<0.05$)。细菌 Chao 1、PD 指数与土壤 pH 均呈显著正相关($P<0.05$)。细菌的 Chao 1、PD、Shannon、Simpson 指数与土壤碱解氮、有效磷、速效钾、交换性铜、交换性锌之间均呈正相关,与 ≥ 2.000 、 $\geq 0.053\sim 0.250$ 和

<0.053 mm 的土壤团聚体组分以及 MWD 均呈负相关,但均未达到显著水平。真菌的 Chao 1 指数与交换性铜呈显著正相关($P<0.05$),与土壤盐分含量呈显著负相关($P<0.05$)。Shannon 指数与土壤盐分呈显著负相关($P<0.05$)。

2.5 生物焖棚对土壤质量几何平均值的影响

由图 6 可知,与 T₁ 相比,T₂ 处理能够显著提高土壤质量几何平均值(GM),增幅为 5.39%。因此,生物焖棚措施对于改善设施农田盐渍化土壤质量具有良好的效果。



*, 在 0.05 水平显著; **, 在 0.01 水平显著。

*, significant at the 0.05 level; while **, extremely significant at the 0.01 level.

图5 土壤微生物丰富度和多样性与土壤物理和化学特性的相关关系

Fig. 5 Relationships among soil microbial community richness, diversity index and soil chemical and physical properties

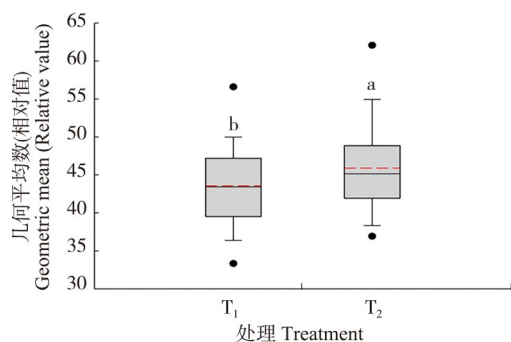


图6 不同处理的土壤质量几何平均值

Fig. 6 The geometric mean of the soil quality properties

3 讨论

我国蔬菜生产系统是全球“高投入-高产出”的热点系统,受传统观念的影响,盲目过量施用化肥导致一系列土壤和生态环境问题^[4]。有机物料具有营养元素全面丰富、肥效快、绿色环保等优点,同时,在提升土壤质量与产能、替代化肥提高肥料利用效率等方面发挥重要作用^[19,21]。刘国辉等^[23]研究表明,施用有机物料能够显著提高盐碱地土壤养分水平,其中,土壤有机质、碱解氮、速效钾和有效磷含量较对照处理分别升高 33.41%、46.70%、

19.65% 和 81.27%。有机肥配施生物菌剂在土壤肥力提升和土壤微生态环境改善方面效果显著^[24]。于占东等^[25]研究表明,有机肥配施生物菌肥可以增加设施蔬菜土壤的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,有效提高土壤肥力。本研究发现,有机物料配合生物菌剂进行高温焖棚可增加土壤有机质、碱解氮、交换性铜含量,增幅分别为 19.55%、27.53% 和 58.43% ($P < 0.05$) (图 1)。这与朱诗君等^[14]、李凤梅等^[15]的研究结果一致。一方面是由于有机物料的投入直接增加了土壤有机质的累积;另一方面,生物菌剂的施用有利于增加土壤有机质的周转速率,提高了矿质养分的释放。化肥过量施用还会导致土壤中有毒害物质的长期积累,且无法被有效降解,严重影响植物的生长发育^[26-27]。生物菌剂在土壤中的代谢活动能够在提升土壤质量的同时,不会对环境造成污染^[28],其产生的有益微生物对设施蔬菜大棚生产中的连作障碍具有显著的改良效果^[29],本研究结果表明,有机物料配合生物菌剂进行高温焖棚较常规焖棚土壤盐分含量低 25.85%,能够有效改善土壤盐渍化(图 1)。这与刘国辉等^[23]、王文团^[30]研究结果一致。此外,本研究发现,生物焖棚措施能够显著增加土壤大团聚体含

量,土壤团聚体平均重量直径显著增加20.96%(图2),这有利于团聚体对土壤有机碳的物理保护作用,通过减少微生物对土壤有机碳的矿化作用达到增加其固定的目的^[19]。

生物闷棚在改善土壤化学性质和土壤团聚体结构方面具有良好的效果,同时可以改善土壤微生物群落结构和多样性(图3,表1)。在微生物群落的丰富度与多样性方面,生物闷棚可使土壤中细菌、真菌的丰富度指数均显著增加,提高了土壤微生物的多样性。这与金珊等^[24]的研究结果一致。土壤微生物丰富度和多样性指数的变化主要受到土壤理化特性的影响(图5)。生物闷棚后土壤微生物优势菌种也发生了相应的变化,对细菌而言,生物闷棚后的 *Deinococci*、*S0134_terrestrial_group*、*Anaerolineae*、*Bacteroidia*、*Chloroflexia* 数量显著增加。*Deinococci* 菌种可以抵抗伽马辐射^[31]。*S0134_terrestrial_group* 在提高作物抗旱性方面具有一定作用^[32],*Anaerolineae* 和 *Bacteroidia* 属于厌氧菌种^[33],*Chloroflexia* 与土壤中 SO_4^{2-} 呈正相关^[34]。对真菌而言,生物闷棚后的 *Aphelidomyces*、*Archaeorhizomycetes*、*Glomeromycetes*、*Lobulomycetes* 和 *Lecanoromycetes* 数量均显著增加。有益菌群的增加可以改善土壤微生态环境,有利于作物的生长发育。相关性分析发现,生物闷棚后土壤细菌群落的变化主要受到土壤微生物量碳、 $\geq 0.053 \sim 0.250$ mm 土壤微团聚体和土壤盐分的影响。而真菌群落受土壤中各因子的影响均未达到显著水平(图4)。

本研究明确了秸秆/粪肥+生物菌剂结合高温闷棚对设施蔬菜农田土壤质量的影响效果,揭示了土壤微生物与土壤属性的相关关系。今后应进一步加强对生物闷棚长期效应的跟踪,及其对设施蔬菜品质的提升效果评价,并进行经济效益分析,为生物闷棚技术措施的推广应用提供科学支撑。

4 结 论

生物闷棚(高温配合施用有机肥+生物菌剂)措施可显著增加设施蔬菜农田耕层土壤有机质、碱解氮、交换性铜和微生物量碳含量,有效降低土壤盐分、提高土壤pH。生物闷棚能够显著增加土壤大团聚体比例,促进良好的土壤团粒结构形成,改善土壤理化性质。生物闷棚能够改善土壤微生物群落结构,细菌和真菌的丰富度与多样性指数显著提高,其中,细菌主要受土壤微生物量碳、微团聚体和

盐分的影响,而真菌与土壤理化性质无显著相关关系。同时,生物闷棚能够显著提高土壤质量几何平均值。因此,生物闷棚可用于我国东部沿海区域常规施肥设施菜田的土壤盐渍化改良与质量提升。

参考文献 References

- [1] Boeing H, Bechthold A, Bub A, Ellinger S, Haller D, Kroke A, Leschik-Bonnet E, Müller M J, Oberitter H, Schulze M, Stehle P, Watzl B. Critical review: Vegetables and fruit in the prevention of chronic diseases [J]. *European Journal of Nutrition*, 2012, 51(6):637-663
- [2] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 陆晓民, 田婧, 王军伟. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. *中国蔬菜*, 2012, 1(18):1-14
Guo S R, Sun J, Shu S, Lu X M, Tian J, Wang J W. Analysis of general situation, characteristics, existing problems and development trend of protected horticulture in China [J]. *China Vegetables*, 2012, 1(18):1-14 (in Chinese)
- [3] 苏浩, 张锐澎, 吴思炫, 姚槐应, 李雅颖. 连作障碍产生机理及防控现状[J]. *土壤*, 2024, 56(2):242-254
Su H, Zhang R P, Wu S X, Yao H Y, Li Y Y. Mechanisms of continuous cropping obstacles and current situation of prevention and control [J]. *Soils*, 2024, 56(2):242-254 (in Chinese)
- [4] 王孝忠. 我国蔬菜生产的环境代价、减排潜力与调控途径:以辣椒为例[D]. 北京:中国农业大学, 2018
Wang X Z. Environmental cost, emission reduction potential and regulation approach of vegetable production in China: Taking pepper as an example [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [5] Fan M S, Shen J B, Yuan L X, Jiang R F, Chen X P, Davies W J, Zhang F S. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(1):13-24
- [6] Qiao L, Wang X H, Smith P, Fan J L, Lu Y L, Emmett B, Li R, Dorling S, Chen H Q, Liu S G, Benton T G, Wang Y J, Ma Y Q, Jiang R F, Zhang F S, Piao S L, Müller C, Yang H Q, Hao Y N, Li W M, Fan M S. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(6):574-580
- [7] 辛颖. 日光温室高温闷棚消毒技术[J]. *农业工程技术*, 2021, 41(2):22-24
Xin Y. Disinfection technology of high temperature stuffy shed in solar greenhouse [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2021, 41(2):22, 24 (in Chinese)
- [8] 王悦目, 东保柱, 孟焕文, 赵媛, 苗建军, 包立岚, 周洪友. 一种高温闷棚防治甜瓜白粉病的方法[J]. *农业与技术*, 2024, 44(3):75-78
Wang Y M, Dong B Z, Meng H W, Zhao Y, Miao J J, Bao L L, Zhou H Y. Method for controlling melon powdery mildew of melon by high temperature stuffy shed [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(3):75-78 (in Chinese)
- [9] 何义利, 丁建莉, 魏丹, 李沛, 黄子鹏, 张祎. 设施闷棚与蔬菜秸秆原位还田对土壤真菌群落的影响[J]. *北方园艺*, 2023(23):83-91
He Y L, Ding J L, Wei D, Li P, Huang Z P, Zhang Y. Effects of greenhouse and vegetable straw returning in situ on soil fungal community [J]. *Northern Horticulture*, 2023(23):83-91 (in Chinese)

- [10] 董海龙, 路平, 张作刚, 徐玉梅, 李新风, 王建明. 秸秆+石灰氮+X-20菌肥+高温闷棚处理对根结线虫种群数量变化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(4):52-58
Dong H L, Lu P, Zhang Z G, Xu Y M, Li X F, Wang J M. Effects on the population numbers of root-knot nematode after treated with mixture of straw, lime nitrogen, X-20 bio-fertilizers and high-temperature sealing treatments[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(4): 52-58 (in Chinese)
- [11] 张光明, 王翠花. 高温闷棚是克服设施蔬菜连作障碍的有效技术[J]. 长江蔬菜, 2005, 7:12-13
Zhang G M, Wang C H. High temperature stew house is an effective technology to overcome the obstacles of continuous vegetable cultivation [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2005, 7:12-13 (in Chinese)
- [12] Zhou R R, Liu Y, Dungait J A J, Kumar A, Wang J S, Tiemann L K, Zhang F S, Kuzyakov Y, Tian J. Microbial necromass in cropland soils: A global meta-analysis of management effects [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(7):1998-2014
- [13] Tian J, Lou Y L, Gao Y, Fang H J, Liu S T, Xu M G, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Response of soil organic matter fractions and composition of microbial community to long-term organic and mineral fertilization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(5):523-532
- [14] 朱诗君, 王丽丽, 金树权, 周金波, 卢晓红. 生物有机肥和菌剂对土壤肥力及草莓生长品质的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(21):36-43
Zhu S J, Wang L L, Jin S Q, Zhou J B, Lu X H. Effects of bio-organic fertilizer and microbial agents on soil fertility and growth and quality of strawberry[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(21):36-43 (in Chinese)
- [15] 李凤梅, 郭书海, 程凤莲, 李景铭, 佟梦晗, 丁存利. 生物有机改良剂对辽河口翅碱蓬湿地滩涂土壤改良效果[J]. 生态学杂志, 2023, 42(7):1548-1553
Li F M, Guo S H, Cheng F L, Li J M, Tong M H, Ding C L. Effects of biological organic amendments on soil quality in tidal flat of Suaeda heteroptera wetland in Liaohe estuarine[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(7):1548-1553 (in Chinese)
- [16] 窦宗信, 庞勇, 王宝春, 李冠男. 生物有机肥对日光温室番茄产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(1):28-32
Dou Z X, Pang Y, Wang B C, Li G N. Effects of bio-organic fertilizer on yield and quality of tomato under solar greenhouse condition[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(1):28-32 (in Chinese)
- [17] 王宝石, 王成云. 棚室蔬菜过量施用化肥的危害[J]. 中国果菜, 2016, 36(8):80-81
Wang B S, Wang C Y. Harm of excessive application of chemical fertilizer to vegetables in greenhouse[J]. *China Fruit Vegetable*, 2016, 36(8):80-81 (in Chinese)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京:中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. *The third edition*. China Agriculture Press, Beijing, China, 2000 (in Chinese)
- [19] Li S, Wei W L, Liu S T. Long-term organic amendments combined with nitrogen fertilization regulates soil organic carbon sequestration in calcareous soil [J/OL]. *Agronomy*, (2023-01-18). DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020291>
- [20] Xu X L, Wang J Y, Niu Y M, Jiang W, Wang Y, Liu S T, Wei W L. 44-years of fertilization altered soil microbial community structure by changing soil physical, chemical properties and enzyme activity [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(2):3150-3161
- [21] Cui H, Liu Q J, Zhang H Y, Zhang Y X, Wei W L, Jiang W, Xu X L, Liu S T. Long-term manure fertilization increases rill erosion resistance by improving soil aggregation and polyvalent cations[J/OL]. *CATENA*, (2023-01-13). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106909>
- [22] Garcia-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B, Carreira J A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2137-2145
- [23] 刘国辉, 买文选, 田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果: Meta 分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1):86-96
Liu G H, Mai W X, Tian C Y. Effects of organic fertilizer application on the improvement of saline soils: Meta analysis [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 86-96 (in Chinese)
- [24] 金珊, 刘雪, 陈卓帛, 李路瑶, 陈雪, 耿兵. 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9):1995-2003
Jin S, Liu X, Chen Z B, Li L Y, Chen X, Geng B. Effects of organic fertilizer containing biofertilizer on soil improvement of vegetables in facilities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9):1995-2003 (in Chinese)
- [25] 于占东, 刘云峰, 温丹, 王晓, 孙凯宁, 王克安, 杨宁. 有机肥配施生物菌肥对设施蔬菜土壤改良及面条菜生长、品质的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(8):99-103
Yu Z D, Liu Y F, Wen D, Wang X, Sun K N, Wang K A, Yang N. Effects of organic fertilizer combined with biological bacterial fertilizer on facility soil improvement and growth and quality of *Silene conoidea* L[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(8):99-103 (in Chinese)
- [26] 李联铁, 王正银, 邹国纯. 尿素和缩二脲含量对作物的双重毒害作用[J]. 西南农业大学学报, 1993, 15(6):76-81
Li L T, Wang Z Y, Zou G C. Double toxic action of biuret and urea on crop growth[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1993, 15(6):76-81 (in Chinese)
- [27] Norse D, Ju X T. Environmental costs of China's food security[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209:5-14
- [28] 张旭奇, 刘文钰. 生物菌肥作用机制研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(23):163-165, 169
Zhang X Q, Liu W J. Research progress on mechanism of biological fertilizer[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(23): 163-165, 169 (in Chinese)
- [29] 武杞蔓, 张金梅, 李玥莹, 张颖. 有益微生物菌肥对农作物的作用机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(5):221-230
Wu Q M, Zhang J M, Li Y Y, Zhang Y. Recent advances on the mechanism of beneficial microbial fertilizers in crops[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(5):221-230 (in Chinese)
- [30] 王文团. 耐盐碱细菌筛选与生物菌肥对盐碱地作物的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2020
Wang W T. Screening of saline-alkali tolerant bacteria and effects of biological fertilizer on saline-alkali crops [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [31] Basu B. The radiophiles of Deinococcaceae family: Resourceful microbes for innovative biotechnological applications[J/OL]. *Current Research in Microbial Sciences*, (2022-07-03). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100153>
- [32] Cao Y, Li Z Y, Du P H, Ji J H, Sun W, Xu J Z, Liang B W. Effects of different dwarfing interstocks on the rhizosphere, endophytic bacteria, and drought resistance of apple trees[J/OL]. *Microbiological Research*,

(2024-03-09). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127690>

- [33] Ni J L, Ji J Y, Li Y Y, Kubota K. Microbial characteristics in anaerobic membrane bioreactor treating domestic sewage: Effects of HRT and process performance[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 111: 392-399

- [34] Gao M L, Dong Y M, Deng H, Qiu W W, Song Z G. Impact of microplastics on microbial-mediated soil sulfur transformations in flooded conditions [J/OL]. *Journal of Hazardous Materials*, (2024-02-22). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133857>

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 葛桂利, 青岛农业大学资源与环境学院资源利用与植物保护专业硕士研究生。参与国家重点研发计划子课题(2023YFD2001402)、山东省自然科学基金(ZR2021QC107)和武汉科诺生物科技股份有限公司横向项目(660/2423161)。



通讯作者简介: 魏文良, 博士, 青岛农业大学资源与环境学院副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤质量与产能提升、土壤碳氮周转、养分资源管理等方面的研究。现为山东省高等学校优秀青年创新团队计划核心成员、山东省科技特派员、九三学社山东省委员会农林专门委员会委员(第二届); *Climate Smart Agriculture* 期刊第一届青年编委, *Soil and Tillage Research*, *Journal of Integrative Agriculture*, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 和《土壤通报》等期刊审稿专家。近5年来, 主持国家重点研发计划、山东省自然科学基金等省部级科研项目3项, 参与科研项目20余项; 发表科研论文28篇, 其中SCI论文17篇; 申报国家发明专利2项, 授权国际专利8件; 主编著作1部。