

微生物菌剂对华北地区小麦土壤养分及 细菌群落结构的影响

孙佳静¹, 李泽毅^{1,2}, 李旭¹, 付鑫^{1,2}, 彭正萍^{1,2}

(1. 河北农业大学国土资源学院, 资源与环境科学学院, 河北保定 071001;

2. 华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北保定 071001)

摘要: [目的] 为探究小麦-玉米轮作系统小麦季拔节期施用不同类型菌剂对土壤性状的影响。[方法] 于 2022—2024 年布设田间试验, 共设清水对照(CK)、施用生长素微生物菌剂(BS)、施用微生物菌剂(PM)和施用生防微生物菌剂(BSA)4 个处理, 研究不同菌剂对土壤化学性状、细菌群落结构及小麦产量的影响。[结果] 2 个试验年, 0~20 cm 土层, 施用各菌剂较 CK 可显著改善土壤化学性状($p < 0.05$), PM 处理土壤碱解氮和有效磷质量分数提升效果最为显著($p < 0.05$), 分别提高 22.60%~29.61% 和 21.63%~37.51%, pH 显著降低($p < 0.05$), 速效钾质量分数各处理无显著差异。20~40 cm 土层, PM 处理有效磷质量分数较 CK 显著提升 22.05% ($p < 0.05$), 各处理 pH、有机质、碱解氮和速效钾质量分数无显著差异。与 CK 相比, 施用各菌剂均有利于提高根际土壤细菌 α 多样性指数($p < 0.05$), 显著提高 0.73%~7.43%。施入菌剂后对土壤细菌优势菌门相对丰度有显著影响($p < 0.05$), 施入 90 d 后, 与 CK 相比, BS、PM 和 BSA 处理变形菌门的相对丰度分别显著提升 2.70%、5.42% 和 3.71% ($p < 0.05$), PM 处理芽单胞菌门的相对丰度显著降低 4.75% ($p < 0.05$)。各施用菌剂处理根际土壤中具有生防、促生功能的细菌相对丰度高于 CK, 而具有诱病作用的致病菌类诺卡氏属(*Nocardioides*), 在施用后 15、90 d 相对丰度均显著降低($p < 0.05$)。与 CK 相比, 施用菌剂处理 2022—2023 年和 2023—2024 年小麦产量分别显著提高 8.28%~20.43% 和 5.70%~16.23% ($p < 0.05$), 其中 PM 处理效果最显著。[结论] 小麦拔节期施用菌剂在活化土壤养分、提升细菌多样性、生防和促生功能菌丰度及小麦产量方面具有较好效果, 其中施用胶冻样类芽孢杆菌 PM12 效果最佳。

关键词: 微生物菌剂; 化学性状; 细菌多样性; 小麦产量

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0389-11

Effects of Microbial Agents on Soil Nutrients and Bacterial Community Structure in Wheat Fields of North China

SUN Jiajing¹, LI Zeyi^{1,2}, LI Xu¹, FU Xin^{1,2}, PENG Zhengping^{1,2}

(1. College of Land and Resources, College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China; 2. State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of different types of microbial agents applied during the jointing stage of wheat in a wheat-maize rotation system on soil properties. [Methods] Field experiments were conducted from 2022 to 2024. Four treatments were set up: a water control (CK), application of auxin-producing microbial agent (BS), application of microbial agent (PM), and application of biocontrol microbial agent (BSA). The impacts of different agents on soil chemical properties, bacterial community structure, and wheat yield were examined. [Results] In the 0—20 cm soil layer, the application of various microbial agents significantly improved soil chemical properties compared to CK ($p < 0.05$). The PM treatment had the most significant effect on increasing

收稿日期: 2025-02-19

修回日期: 2025-03-13

录用日期: 2025-03-21

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-09

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1901300)

第一作者: 孙佳静(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事微生物菌剂对土壤肥力和细菌群落研究。E-mail: 19831022559@163.com

通信作者: 付鑫(1990—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: fuxinxin12152@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

soil alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus content ($p<0.05$), with increases of 22.60%—29.61% and 21.63%—37.51%, respectively, and a significant decline in pH ($p<0.05$). There was no significant difference in available potassium content among treatments. In the 20—40 cm soil layer, available phosphorus content in the PM treatment was significantly (22.05%) higher than that in CK ($p<0.05$), while there were no significant differences in pH, organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available potassium content among treatments. Compared to CK, the application of all microbial agents significantly increased the α -diversity index of rhizosphere soil bacteria ($p<0.05$), with an increase of 0.73%—7.43%. The application of microbial agents significantly affected the relative abundance of dominant bacterial phyla in the soil. Ninety days after application ($p<0.05$), compared to CK, the relative abundance of Proteobacteria in the BS, PM, and BSA treatments increased significantly by 2.70%, 5.42% and 3.71% ($p<0.05$), respectively, while the relative abundance of Gemmatimonadetes in the PM treatment decreased significantly by 4.75% ($p<0.05$). The relative abundance of bacteria with biocontrol and growth-promoting functions in the rhizosphere soil of all microbial agent treatments was higher than that in CK, while the relative abundance of the pathogenic *Nocardioide*s, which has disease-inducing effects, was significantly reduced at both 15 and 90 days after application ($p<0.05$). Compared to CK, wheat yield in the microbial agent treatments increased significantly by 8.28%—20.43% from 2022 to 2023 and by 5.70%—16.23% from 2023 to 2024 ($p<0.05$), with the PM treatment showing the most significant effect. [Conclusion] The application of microbial agents during the jointing stage of wheat effectively activates soil nutrients, enhances bacterial diversity and the abundance of biocontrol and promotive functional bacteria, and increases wheat yield, with the application of *Paenibacillus mucilaginosus* PM12 being the most effective.

Keywords: microbial agents; chemical properties; bacterial diversity; wheat yield

Received: 2025-02-19

Revised: 2025-03-13

Accepted: 2025-03-21

Online(www.cnki.net): 2025-06-09

小麦是全球第一大口粮作物,是人类重要的食物来源,全球约有 35%~40% 的人口以小麦为主要粮食^[1]。小麦的高产稳产高度依赖科学的农田管理措施,其中施肥是农业生产中关键的环节之一。施用无机肥可有效提高作物产量,改善土壤养分状况^[2]。近年来,长期不合理施用化肥导致土壤酸化、板结、次生盐渍化、养分失衡及氮素淋溶等问题,使土壤肥力下降,土壤微生物群落结构失衡,作物产量品质下降。在我国农业现代化和可持续发展的战略要求下,开发环境友好型绿色肥料有助于缓解生态安全和食品安全问题。

微生物参与土壤养分循环,有益微生物如固氮细菌、磷溶解菌等能提升土壤肥力,菌根真菌可改善土壤结构,促进植物吸收养分,但有害微生物可引发病害^[3]。因此,合理调控土壤微生物群落结构,抑制有害菌的生长,促进有益菌的繁殖,已成为提升土壤质量和农作物产量的重要途径。施用微生物菌剂可通过其有效微生物的生命活动分解土壤有机物,合成作物生长所需的营养元素,同时通过微生物种群间的相互作用,维持根际间微生物区系平衡^[4]。目前,微生物菌剂已在蔬菜栽培、土壤肥力提升、盐碱

地治理和作物秸秆促腐等方面得到大范围应用。常用的微生物菌株包括芽孢杆菌、放线菌和固氮菌等,其中芽孢杆菌等微生物菌剂应用广泛。有研究^[5]发现,菌剂施用效果受菌剂类型的影响;贾峥嵘等^[6]研究表明,不同类型菌剂对产量提升效果存在差异,效果表现为枯草芽孢杆菌>解淀粉芽孢杆菌>胶冻样类芽孢杆菌,且施用枯草芽孢杆菌对土壤有机质质量分数提高效果最优,施用胶冻样类芽孢杆菌更有利于提高土壤碱解氮质量分数;高晶霞等^[7]在辣椒土壤施用枯草芽孢杆菌后发现,土壤有效磷质量分数显著提升,但张紫瑶等^[8]在番茄土壤施用枯草芽孢杆菌后,更有利于提升土壤铵态氮与速效钾质量分数,土壤有效磷质量分数无显著变化;LIU 等^[9]研究发现,施用不同菌剂可改变土壤微生物群落,增强微生物联系,使毛竹生物量比对照提高 32.43%~69.04%;常文智等^[10]研究表明,在花生种植中施用胶质芽孢杆菌可以提高土壤细菌和放线菌的数量($p<0.05$),细菌和放线菌数量较对照分别提高 67.2% 和 62.9%。分析表明,菌剂的施用不仅可提升土壤养分,还通过调节微生物群落来促进作物生长。

近年来,高晶霞等^[7]、张紫瑶等^[8]和张萱等^[11]通

过对辣椒、番茄和黄瓜的研究发现,不同微生物菌剂对作物的生长和土壤改良具有显著效果,但探讨华北麦玉轮作区中低产田施用不同类型微生物菌剂对土壤性状及小麦生长的影响研究较少,且农民在使用不同菌剂类型的过程中具有一定盲目性。因此,本研究以麦玉轮作系统小麦为研究对象,基于大田试验分析施用不同类型微生物菌剂对土壤养分、细菌群落结构及小麦产量的影响,探讨微生物菌剂促生提质的作用机制,旨在为微生物菌剂在该区小麦季合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验于 2022 年 10 月至 2024 年 6 月在河北省邢台市宁晋县贾家口镇白木村(115°07′11.99″N, 37°37′12″E)进行。试验地属温带大陆性气候,年平均气温 12.7 ℃,无霜期 199 d,年平均日照时间 2 538.1 h,年平均降水量 449.3 mm,试验期间日平均气温和降水量见图 1。

供试土壤为轻壤质潮土,基础理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基础理化性状

Table 1 Basic physicochemical properties of the tested soil

土层深度/cm	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
0~20	8.11	16.53	1.22	60.30	17.74	107.21
20~40	8.03	11.71	0.95	49.20	13.66	85.46

1.2 试验设计

本试验共设置 4 个处理,分别为对照(CK)、生长素微生物菌剂(BS)、微生物菌剂(PM)和生防微生物菌剂(BSA),各处理 3 次重复,随机排列。每个小区面积 50 m²。各施用菌剂处理施用量均为 75 L/hm²,对照处理用清水替代。菌剂于小麦拔节期冲施。小麦季化肥施用量为 N 210 kg/hm²,P₂O₅ 90 kg/hm²,K₂O 75 kg/hm²,氮肥的基肥和追肥比例为 6:4,磷钾肥全部底施。玉米季化肥施用量为 N 225 kg/hm²,P₂O₅ 120 kg/hm²,K₂O 150 kg/hm²,其他田间管理措施都按照当地传统习惯管理模式进行。

1.3 测定指标与方法

于 2023 年和 2024 年小麦成熟期,按照五点采样法采集 0~20、20~40 cm 土壤样品,采集前移除表层枯落物等,随后进行土壤养分质量分数的测定。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法^[12]测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法^[12]测定,土壤有效磷采用碳酸氢钠法^[12]测定,土壤速效钾采用醋酸铵-火焰光度计法^[12]测定,pH 采用 pH 计测定。产量测定参照小麦测产技术规范^[13],小麦成熟期,随机取样,每处理实收 3

作物种植方式为冬小麦(10月初至翌年6月初)/夏玉米(6月中旬至9月下旬)一年两熟制。供试小麦品种为“马兰 1 号”。供试微生物菌剂由河北润沃生物技术有限公司提供,其中,“生长素微生物菌剂”有效菌为枯草芽孢杆菌(活菌数≥30 亿/mL);“微生物菌剂”有效菌为胶冻样类芽孢杆菌 PM12(活菌数≥2 亿/mL);“生防微生物菌剂”有效菌为枯草芽孢杆菌 NCD-2 和解淀粉芽孢杆菌 BA-2(活菌数≥30 亿/mL)。

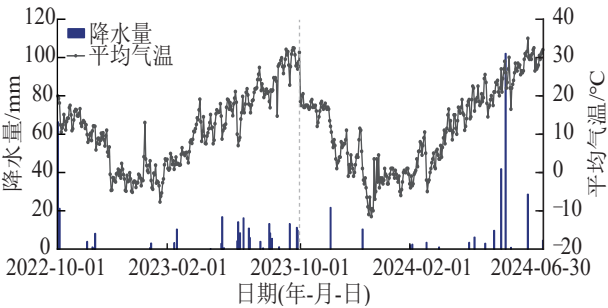


图 1 试验区 2022—2023 年和 2023—2024 年日平均气温和降水量

Fig. 1 Mean daily temperature and precipitation in the experimental area from 2022 to 2023 and from 2023 to 2024

组,每点采样 1 m²双行小麦测有效穗数,采 2 m² 6 行小麦用脱粒机脱粒,按 12.5% 标准水分质量分数折算单位面积产量。

于 2023 年,在菌剂施入后 15、30、90 d 采集根际土壤样品。每个处理随机取 5 个样点,每个样点随机选取 10 株麦苗,挖出根系,用抖根法采集附着在根际表面土壤,混匀后为该处理的根际土壤样品^[14]。将采集的根际土壤样品提取总 DNA 后,使用携带 Barcode 序列的上游引物 338F(5'-ACTCCTACGG GAGGCAGCAG-3')和下游引物 806R(5'-GGACT ACHVGGGTWTCTAAT-3')对 16S rRNA 基因 V3-V4 可变区进行 PCR 扩增,PCR 反应体系为:5× TransStart FastPfu 缓冲液 4 μL,2.5 μmol/L dNTPs 2 μL,上游引物(5 μmol/L)0.8 μL,下游引物(5 μmol/L)0.8 μL,TransStart FastPfu DNA 聚合酶 0.4 μL,模板 DNA 10 ng,补足至 20 μL。扩增程序为:95 ℃预变性 3 min,27 个循环(95 ℃变性 30 s,55 ℃退火 30 s,72 ℃延伸 30 s),然后 72 ℃稳定延伸 10 min,最后在 4 ℃进行保存。使用 2% 琼脂糖凝胶回收 PCR 产物,利用 Omega DNA 纯化试剂盒进行回收产物纯化,并

用 Qsep-400 对回收产物进行定量检测。构建的扩增子文库由百迈客生物科技有限公司(北京)通过 Illumina Novaseq 6000 测序平台进行双端测序。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据的处理,采用 SPSS 27.0 软件对不同处理间进行方差分析(ANOVA)及差异显著性水平($p<0.05$)分析,通过最小显著差数法(LSD)进行检验,使用 Origin 2021 软件进行作图。通过微生信网站(<https://www.bioinformatics.com.cn/>)绘制主成分分析(PCA)图。

2 结果与分析

2.1 微生物菌剂对土壤养分的影响

微生物菌剂类型对 0~20 cm 土层 pH 和碱解氮质量分数具有显著影响($p<0.05$),对 0~20、20~40 cm 土壤有效磷质量分数具有显著影响($p<0.05$),

试验年份对 0~20、20~40 cm 土层 pH、有机质、碱解氮和有效磷质量分数具有显著影响($p<0.05$),对 0~20 cm 土层速效钾质量分数具有显著影响($p<0.05$),而对 20~40 cm 土层速效钾质量分数无显著影响($p>0.05$),菌剂类型和年份无交互作用(表 2)。综合 2 a 平均,0~20 cm 土层,PM 处理较 CK 土壤 pH 显著降低 1.67%($p<0.05$);PM 和 BSA 处理较 CK 有机质质量分数分别显著提升 5.24% 和 4.50%($p<0.05$);BS、PM 和 BSA 处理较 CK 碱解氮质量分数分别显著提升 17.91%、26.82% 和 23.70%($p<0.05$);BS、PM 和 BSA 处理较 CK 有效磷质量分数分别显著提升 22.02%、28.31% 和 16.53%($p<0.05$);各处理速效钾质量分数无显著差异($p>0.05$)。20~40 cm 土层,PM 处理较 CK 有效磷质量分数显著提升 22.05%($p<0.05$),各处理 pH、有机质、碱解氮和速效钾质量分数无显著差异。

表 2 不同微生物菌剂处理下土壤化学性质变化特征

Table 2 Variations of soil chemical properties under different microbial agent treatments											
年份	处理	pH		有机质/(g·kg ⁻¹)		碱解氮/(mg·kg ⁻¹)		有效磷/(mg·kg ⁻¹)		速效钾/(mg·kg ⁻¹)	
		0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
2022— 2023	CK	8.47±0.20a	8.23±0.20a	12.81±0.05a	7.76±0.64a	63.78±0.19d	41.41±0.72c	16.75±0.73c	13.51±0.69b	90.90±10.87a	83.65±6.28a
	BS	8.29±0.03a	8.28±0.02a	13.03±0.17a	7.90±0.86a	71.46±0.12c	42.02±0.88bc	19.62±0.47ab	14.49±0.80b	94.53±16.61a	90.90±10.87a
	PM	8.25±0.07a	8.22±0.01a	13.17±0.09a	8.05±0.21a	78.20±0.09a	45.48±0.34a	20.38±0.80a	15.92±0.91a	101.77±10.87a	97.42±4.98a
	BSA	8.31±0.02a	8.30±0.14a	13.15±0.41a	7.96±0.76a	76.65±0.50b	42.78±0.16b	18.34±0.35bc	14.04±0.13b	98.15±6.28a	87.28±6.28a
2023— 2024	CK	8.14±0.02ab	7.92±0.01a	14.93±1.75a	9.72±1.45a	96.77±11.74b	85.50±12.50a	12.17±0.70b	6.77±0.80a	121.98±23.21a	83.99±11.61a
	BS	8.17±0.03a	7.94±0.02a	15.71±0.67a	9.76±0.51a	117.86±13.98ab	88.03±1.86a	15.67±0.35a	9.13±1.81a	127.04±8.77a	96.65±8.77a
	PM	8.08±0.04c	7.87±0.11a	16.02±0.54a	10.56±1.43a	125.42±3.42a	91.67±6.39a	16.73±1.08a	8.82±1.30a	134.64±15.82a	81.45±8.77a
	BSA	8.10±0.03bc	7.88±0.02a	15.84±0.75a	10.11±1.14a	121.96±11.08a	90.10±11.19a	15.36±1.94a	8.75±1.17a	129.57±15.82a	101.71±15.20a
平均	CK	8.30±0.09a	8.08±0.10a	13.87±0.85b	8.74±0.90a	80.28±5.81b	63.46±6.61a	14.46±0.30c	10.14±0.34b	106.44±15.71a	83.82±8.43a
	BS	8.23±0.02ab	8.11±0.01a	14.37±0.41ab	8.83±0.65a	94.66±6.93a	65.02±1.22a	17.65±0.11ab	11.81±1.28ab	110.78±10.10a	93.77±9.49a
	PM	8.17±0.05b	8.05±0.06a	14.60±0.27a	9.31±0.64a	101.81±1.69a	68.57±3.26a	18.56±0.93a	12.37±1.02a	118.21±13.22a	89.44±2.99a
	BSA	8.20±0.01ab	8.09±0.08a	14.49±0.17a	9.04±0.28a	99.30±5.35a	66.44±5.54a	16.85±0.93b	11.39±0.63ab	113.86±4.92a	94.50±5.13a
显著性 分析	菌剂类型	*	ns	ns	ns	***	ns	***	*	ns	ns
	年份	***	***	***	***	***	***	***	***	***	ns
	菌剂类型×年份	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);***表示在 0.001 水平差异显著;**表示在 0.01 水平差异显著;*表示在 0.05 水平差异显著;ns 表示差异不显著。下同。

2.2 微生物菌剂对小麦根际微生物群落结构的影响

2.2.1 根际土壤细菌 α 多样性指数的变化 菌剂类型和施用天数对细菌 ACE 指数、Chao1 指数和 Shannon 指数具有显著影响($p<0.05$),且二因素间无交互作用(Shannon 除外)(表 3)。施入 90 d 后,细菌 α 多样性指数较施入 15、30 d 天有显著提高($p<0.05$)。从施用菌剂后 15、30、90 d 的平均值来看,BS 和 BSA 处理较 CK 的 ACE 指数分别显著提高 2.98%

和 4.04%($p<0.05$),PM 处理无显著差异。BS、PM 和 BSA 处理较 CK 的 Chao1 指数分别显著提高 3.79%、2.77% 和 5.59%($p<0.05$)。施用菌剂 15 d 后,各处理间 Shannon 指数无显著差异;施入菌剂 30 d 后,BS、PM 和 BSA 处理 Shannon 指数均显著高于 CK($p<0.05$);施入菌剂 90 d 后,PM 处理 Shannon 指数较其他处理显著下降($p<0.05$),其他处理间无显著差异。

表 3 不同微生物菌剂处理下小麦根际土壤细菌 α 多样性指数

Table 3 Alpha diversity indices of bacterial communities in wheat rhizosphere soil under different microbial agent treatments

施用后时间/d	处理	ACE	Chao1	Shannon
15	CK	4 414.53±60.40Bb	4 311.94±52.14Bc	9.81±0.07Ba
	BS	4 456.56±11.85Bab	4 402.93±22.94Bb	9.76±0.01Ba
	PM	4 559.76±9.75Ba	4 474.10±5.68Ba	9.75±0.01Ba
	BSA	4 515.97±110.23Bab	4 508.07±29.61Ba	9.75±0.03Ba
30	CK	4 364.47±13.41Ba	4 255.93±15.53Bb	9.62±0.02Cc
	BS	4 606.65±244.95Ba	4 470.27±152.04Bab	9.73±0.03Bab
	PM	4 452.91±115.70Ba	4 396.82±116.91Bab	9.69±0.06Bb
	BSA	4 682.32±260.81Ba	4 572.00±130.00Ba	9.75±0.01Ba
90	CK	5 800.70±59.21Ab	5 657.88±87.35Ac	10.08±0.02Aa
	BS	5 951.19±25.99Aa	5 891.01±22.98Aab	10.10±0.02Aa
	PM	5 823.18±70.21Ab	5 749.48±113.52Abc	9.99±0.05Ab
	BSA	5 969.87±76.91Aa	5 941.58±30.54Aa	10.07±0Aa
平均	CK	4 859.90±27.34b	4 741.92±21.61c	9.84±0.02b
	BS	5 004.80±75.45a	4 921.40±52.38b	9.87±0.01a
	PM	4 945.28±55.81ab	4 873.47±49.57b	9.81±0c
	BSA	5 056.05±98.04a	5 007.22±43.03a	9.86±0.01ab
菌剂类型		*	***	**
显著性分析		***	***	***
菌剂类型×天数		ns	ns	***

2.2.2 根际细菌群落 β 多样性的变化 由图 2 可知, 施入菌剂 15、30、90 d 后, 细菌群落结构 2 个主成分 (PC1 和 PC2) 分别解释总变异的 68.30%、58.30% 和 63.10%, 能较好地反映原始变量的信息。施入菌剂

15 d 后, CK、BS、PM 和 BSA 处理反映在 PCA 图中距离较远, 且 CK 分布在 PC1 的负轴, 而 PM 分布在 PC1 的正轴, 表明施用菌剂后 PM 根际土壤细菌群落结构发生较大改变。

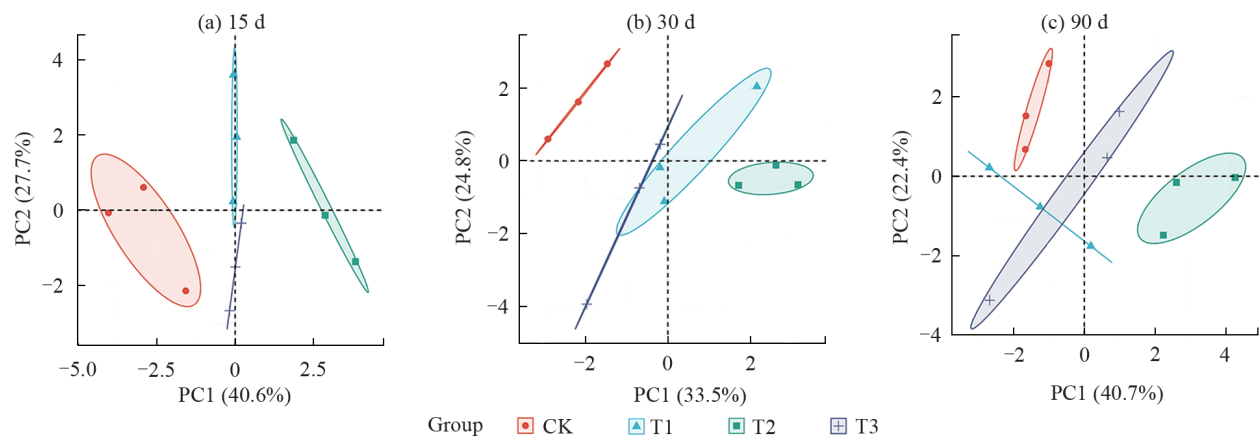


图 2 不同微生物菌剂处理下小麦根际土壤细菌的 β 多样性分析

Fig. 2 Beta diversity analysis of bacterial communities in wheat rhizosphere soil under different microbial agent treatments

施入菌剂 30 d 后, CK、BS 和 PM 反映在 PCA 图中相互分离, 而 BS 和 BSA 处理距离较近, 表明施用微生物菌剂后根际土壤细菌群落结构组成具有很高的相似性。施入菌剂 90 d, CK 与 PM 细菌群落组成差异较大, CK、BS 和 BSA 处理根际土壤细菌群落结构相似性较高。

2.2.3 根际细菌群落组成的变化 由图 3 可知, 在门水平上, 各处理土壤细菌优势菌门 (相对丰度 $> 0.1\%$) 均以变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteriota) 和芽单胞菌门 (Gemmatimonadota) 为主。就优势菌门相对丰度来看, 菌剂施入 15 d 后, 与 CK 相比, BS 和 PM 处理变形菌门相对丰度分别显著

提升 9.02% 和 8.92% ($p < 0.05$), BS、PM 和 BSA 处理酸杆菌门相对丰度分别显著提升 9.73%、9.62% 和 11.10% ($p < 0.05$), PM 处理 CK 较芽单胞菌门相对丰度显著降低 7.81% ($p < 0.05$)。菌剂施入 30 d 后, BS、PM 和 BSA 处理较 CK 变形菌门的相对丰度分别显著提升 4.98%、5.42% 和 3.71% ($p < 0.05$), 而酸

杆菌门和芽单胞菌门的相对丰度无显著差异。菌剂施入 90 d 后, BS、PM 和 BSA 处理较 CK 变形菌门相对丰度分别显著提升 2.70%、5.42% 和 3.71% ($p < 0.05$), PM 处理较 CK 芽单胞菌门相对丰度显著降低 4.75% ($p < 0.05$), 而各处理间酸杆菌门相对丰度无显著差异。

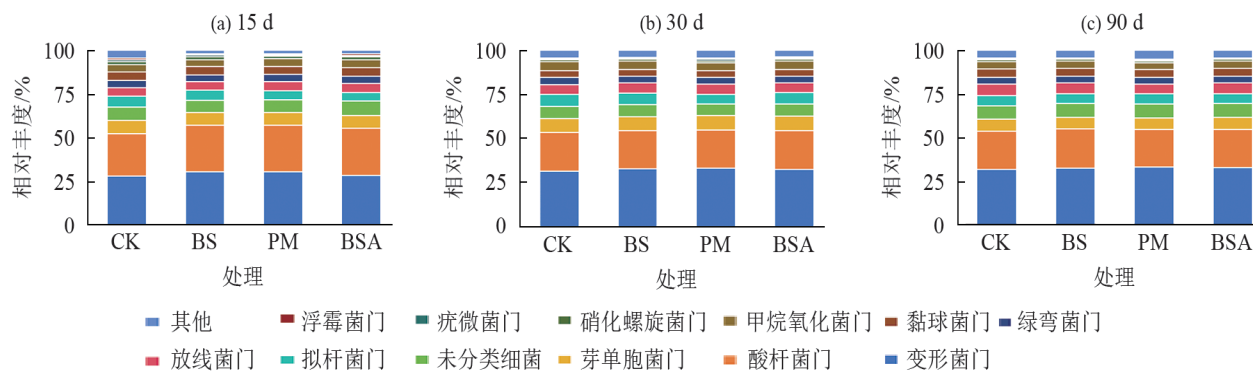


图 3 不同微生物菌剂处理下土壤细菌门水平群落组成

Fig. 3 Composition of soil bacterial communities at the phylum level under different microbial agent treatments

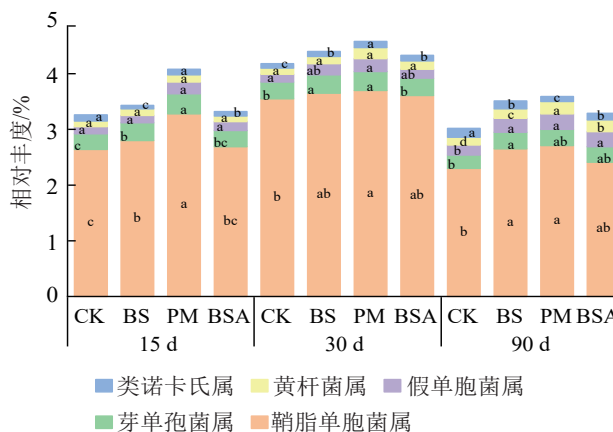
2.2.4 基于功能分析的细菌分类分析 对根际土壤细菌属水平进行部分分类统计, 参照文献将微生物的功能主要划分为生防、促生和诱病^[15]。

由图 4 可知, 各施用菌剂处理根际土壤中具有生防、促生功能的细菌相对丰度高于 CK, 而具有诱病作用的致病菌类诺卡氏属 (*Nocardioideae*) 在施用菌剂 15、90 d 相对丰度均显著降低 ($p < 0.05$)。在施用 15 d 后, 与 CK 相比, BS 和 PM 处理鞘脂单胞菌属相对丰度分别显著提高 6.06% 和 24.24% ($p < 0.05$), BS 和 PM 处理芽单胞菌属相对丰度分别显著提高 14.29% 和 28.57% ($p < 0.05$), BS 和 BSA 处理类诺卡氏菌属相对丰度分别显著降低 45.45% 和 27.27% ($p < 0.05$)。在施用 30 d 后, 与 CK 相比, PM 处理鞘脂单胞菌属相对丰度显著提高 4.23% ($p < 0.05$), BS 和 PM 处理芽单胞菌属相对丰度分别显著提高 10.00% 和 13.33% ($p < 0.05$), 各菌剂处理类诺卡氏菌属相对丰度显著提高 12.25%~37.50% ($p < 0.05$)。在施用 90 d 后, 与 CK 相比, BS 和 PM 处理鞘脂单胞菌属相对丰度分别显著提高 15.22% 和 17.83% ($p < 0.05$), BS 处理芽单胞菌属相对丰度显著提高 25.00% ($p < 0.05$), 各菌剂处理假单胞菌属和黄杆菌属相对丰度分别显著提高 38.89%~55.56% 和 21.43%~57.14% ($p < 0.05$), 类诺卡氏菌属相对丰度显著降低 12.50%~43.75% ($p < 0.05$)。

2.3 微生物菌剂对小麦产量及构成要素的影响

由表 4 可知, 试验年份对有效穗数、千粒重和产量有显著影响 ($p < 0.05$), 菌剂类型对小麦有效穗数、穗粒数、千粒重和产量有显著影响 ($p < 0.05$), 且二因

素无交互作用。综合 2 a 平均, 小麦各施用菌剂处理较 CK 有效穗数、穗粒数、千粒重和产量分别显著提升 7.90%~20.05%、10.95%~19.98%、5.37%~8.94% 和 6.97%~18.29% ($p < 0.05$), 其中 PM 处理效果最佳。



注: 图中不同字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 4 基于功能的细菌分类统计

Fig. 4 Function-based classification of bacteria

2.4 主成分分析

采用主成分分析对土壤化学性质、细菌群落结构与作物产量进行综合评价 (表 5 和表 6), 前 2 个主成分的特征值 > 1 , 累计贡献率达到 73.64%, 数据具有可信度。因此, 可以选择 2 个主成分要素作为综合评价指标计算综合得分, 其不同处理组综合得分排序由高到低为 PM > BSA > BS > CK, 表明不同处理对土壤化学性质、微生物群落结构及作物产量品质影响存在差异, 以 PM 效果最佳, CK 最差。

表 4 微生物菌剂类型对小麦产量及构成要素的影响
Table 4 Effects of microbial agent type on wheat yield and its components

年份	处理	有效穗数/(10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数/个	千粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
2022—2023	CK	444.47±10.72d	30.45±1.92b	43.11±0.24c	5 861.00±26.59c
	BS	492.25±7.70c	32.93±1.15b	44.58±0.75b	6 346.45±32.79b
	PM	557.81±16.44a	36.98±0.81a	45.59±0.62a	7 058.19±47.33a
	BSA	517.80±8.39b	36.95±1.60a	45.17±0.29ab	6 412.77±90.55b
2023—2024	CK	525.58±13.88c	31.52±0.48b	44.12±0.84b	6 078.97±98.05c
	BS	554.47±10.18b	35.82±2.19ab	47.33±0.83a	6 425.59±66.06b
	PM	606.70±14.53a	37.37±3.09a	49.43±1.45a	7 065.87±94.69a
	BSA	567.81±8.39b	36.13±3.24ab	48.38±1.30a	6 485.16±20.24b
平均	CK	485.02±1.67d	30.98±0.80c	43.62±0.46c	5 969.98±58.12c
	BS	523.36±8.82c	34.38±1.56b	45.96±0.73b	6 386.02±22.97b
	PM	582.25±0.96a	37.18±1.65a	47.51±0.65a	7 062.03±64.23a
	BSA	542.80±8.39b	36.54±1.35ab	46.78±0.78ab	6 448.96±36.69b
显著性分析	年份	***	ns	***	**
	菌剂类型	***	***	***	***
	年份×菌剂类型	ns	ns	ns	ns

表 5 微生物菌剂类型对土壤化学性质、细菌群落结构及作物产量主成分评分系数矩阵

Table 5 Principal component score coefficient matrix of soil chemical properties, bacterial community structure, and crop yield under different microbial agent types

指标	主成分 1	主成分 2
pH	-0.78	0.22
有机质	0.50	0.33
碱解氮	0.93	0.13
有效磷	0.90	0.12
速效钾	0.49	-0.37
ACE	0.26	0.92
Chao1	0.40	0.89
Shannon	-0.61	0.63
产量	0.92	-0.26
特征值	4.20	2.43
贡献率/%	46.66	26.99
累积贡献率/%	46.66	73.64

表 6 微生物菌剂类型对土壤化学性质、细菌群落结构及作物产量综合评分及排序

Table 6 Comprehensive scoring and ranking of soil chemical properties, bacterial community structure, and crop yield under different microbial agent types

处理	主成分 1	主成分 2	综合得分	排序
CK	-3.04	-0.92	-1.67	4
BS	0.07	1.20	0.36	3
PM	2.27	-1.47	0.66	1
BSA	0.70	1.19	0.65	2

3 讨论

3.1 微生物菌剂对土壤养分的影响

在小麦拔节期施用微生物菌剂后,土壤养分质量分数均有所增加,其中PM处理效果最佳(表2),与宋以玲等^[16]研究结果一致,即施用微生物菌剂后土壤有机质及速效氮、磷和钾质量分数显著高于对照;岳明灿等^[17]研究发现,施用微生物菌剂后,土壤有机质和速效养分显著提升。施用菌剂后土壤养分的提升可能归因于菌剂中的功能微生物,本研究中施用的菌剂有效菌主要包括枯草芽孢杆菌、胶冻样类芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌。其中,枯草芽孢杆菌通过其代谢途径,能够将土壤中的难溶性磷转化为植物可吸收的有效磷形态,从而增强作物对磷素的吸收效率^[18],而胶冻样类芽孢杆菌则具备解磷和解钾的能力,能够通过其生理活动影响土壤中磷和钾的生物有效性^[19]。解淀粉芽孢杆菌不仅促进作物根茎生长,还能产生嗜铁素、蛋白酶、纤维素酶和吲哚乙酸(IAA),以抑制病原菌的生长^[20],从而保护作物免受病虫害。微生物菌剂中的有益菌能通过自身代谢和生理活动活化土壤中被螯合的矿物,可以分泌有机酸参与溶磷,并通过酸解、螯合和络合反应等从硅酸盐矿物中释放钾元素促进其被植物吸收利用,从而促进植物根系的固氮协同作用。

保善存等^[21]研究表明,胶冻样芽孢杆菌在提升枸杞土壤养分中的效果优于解淀粉芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌。本研究也发现,PM处理(胶冻样类芽孢杆菌PM12)改善土壤养分效果最佳,BSA(枯草芽孢杆菌NCD-2与解淀粉芽孢杆菌BA-2)和BS(枯草芽孢杆

菌)处理效果次之。是因为胶冻样类芽孢杆菌可通过胶凝作用与土壤养分结合,同时促进土壤团聚体的生成,从而提高土壤对养分的吸附和固持能力^[22],不仅具有保肥效果,而且对养分释放产生缓释作用,增强土壤的缓冲能力和速效养分的固持能力,最终提升土壤中活性组分及氮、磷和钾等速效养分的质量分数。

3.2 微生物菌剂对细菌群落的影响

前人^[9]研究发现,根系微生物可影响土壤养分循环,并直接或间接影响作物的生长发育和品质形成。本试验表明,与对照相比,施用微生物菌剂 15、30、90 d 后均能明显提高小麦根际细菌多样性。韩永琴等^[23]研究表明,施用芽孢杆菌可以改变辣椒根际土壤微生物群落,提升细菌种群的多样性;游偲等^[24]研究表明,枯草芽孢杆菌施用后,土壤细菌多样性和丰富度指数均有所提高,且随着菌剂施用时间的延长,根际土壤中细菌的丰富度显著增加,并在施用后 90 d 达到峰值。有研究^[25]发现,小麦根部约 27% 的光合碳分配到根际土壤,与菌剂成分共同促进细菌生长繁殖,使细菌数量和种类增加,微生物群落丰富度提高。表明菌剂施用与植物根部碳分配协同作用对土壤细菌群落有积极影响。

从根际土壤细菌群落构成而言,其优势细菌主要为变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteriota)和芽单胞菌门(Gemmatimonadota)。与对照相比,施加微生物菌剂 90 d 后,PM 处理显著提高变形菌门(Proteobacteria)相对丰度,降低芽单胞菌门(Gemmatimonadota)相对丰度,主要是因为胶冻样类芽孢杆菌在土壤中生长繁殖时,改变土壤营养平衡,而变形菌门细菌适应性和代谢多样性强,能更好地适应这种变化,从而获得竞争优势。其代谢产生的有机酸和胞外多糖等分泌物,可改善土壤结构,为变形菌门细菌提供更适宜的环境,但对芽单胞菌门细菌产生不利影响。胶冻样类芽孢杆菌可能通过产生抗生素等物质直接抑制芽单胞菌门细菌^[26],或与变形菌门细菌形成互惠共生关系^[27],间接降低芽单胞菌门细菌相对丰度;还能促进植物生长,增加根系分泌物,改变根际微环境,使变形菌门细菌更易生长,芽单胞菌门细菌则因敏感而生长受抑。此机制相互协同,促使微生物群落结构发生动态变化^[4]。

从根际土壤细菌属水平来看,鞘脂单胞菌属(*Sphingomonas*)的某些种能够产生赤霉素和吲哚乙酸,对植物生长具有重要促进作用^[28];黄杆菌属(*Flavobacterium*)具有 ACC 脱氨酶活性,能够合成生长素、赤霉素和细胞分裂素等植物激素^[29];假单胞菌

属(*Pseudomonas*)同样具有 ACC 脱氨酶活性,促进赤霉素、脱落酸、吲哚乙酸和胞外多糖的产生^[30];芽单胞菌属(*Gemmatimonas*)具有多种功能特性,包括通过释放胞外酶分解和利用土壤复杂有机质,产生不同类型的生物活性化合物促进植物生长,而类诺卡氏属(*Nocardioide*s)是一种致病菌属^[31]。本试验通过 BS、PM 和 BSA 处理显著增加鞘脂单胞菌属、芽单胞菌属、假单胞菌属和黄杆菌属的相对丰度,能够快速分解土壤中的养分,满足小麦生长的需求,从而显著改善小麦的农艺性状。而具有诱病作用的病原细菌的相对丰度在施入后 15、90 d 显著降低,表明菌剂的施用可改善土壤健康状况,可降低小麦发生病害的风险。

3.3 微生物菌剂对小麦生长发育及产量的影响

本研究结果表明,合理施用微生物菌剂能够促进小麦的生长发育并提高产量。在添加微生物菌剂后,小麦的有效穗数、穗粒数、千粒重及产量均明显提升,这是由于微生物菌剂含有多种有益的活性微生物和天然活性物质,能够直接作用于土壤,分解有机物并释放出多种必需的微量元素,从而改善土壤质量,增强植物抗逆性,提升产量和农产品质量。然而,菌剂的类型、微生物数量及施用方式均对作物产量产生影响^[11]。本研究中各处理增产效果表现为 PM(胶冻样类芽孢杆菌 PM12)>BSA(枯草芽孢杆菌 NCD-2 和解淀粉芽孢杆菌 BA-2)>BS(枯草芽孢杆菌)。其原因一方面是胶冻样类芽孢杆菌能够拮抗常见植物病原菌,优化土壤微生物群落结构,使其更有利于作物生长^[32];另一方面,胶冻样类芽孢杆菌可产生大量胞外聚合物,增强土壤颗粒之间的黏结力,促进水稳性团聚体的形成,从而为小麦生长提供良好的水、气、温环境^[33]。胶冻样类芽孢杆菌对土壤养分具有吸附和固持作用,可延缓养分释放,满足小麦在不同生长阶段对养分的需求,从而促进其生长发育^[34]。贾峥嵘等^[6]在甘薯的研究发现,枯草芽孢杆菌的效果优于解淀粉芽孢杆菌和胶冻样类芽孢杆菌,与本研究结果不同,一方面可能与不同宿主植物有关,同时菌剂与宿主植物的作用时间也显著影响试验结果^[35];另一方面,受气候条件等外部因素的影响,贾峥嵘等^[6]的试验地平均气温较高,降水量较低,随着温度的升高,活菌数和孢子数也受到不利影响^[36],而本试验地平均气温较低,降水量较高,适合微生物生长。2 个试验地土壤养分质量分数差异较大,本研究中土壤养分质量分数较低,而有学者^[37]发现,在养分质量分数较高的土壤中解淀粉芽孢杆菌与枯草芽孢杆菌的效果更为显著。

4 结 论

1)通过2a试验表明,在麦玉轮作系统小麦拔节期施用微生物菌剂可显著提高土壤碱解氮和有效磷质量分数,对土壤pH、有机质和速效钾影响较小。

2)施入菌剂后15、30、90 d均提高小麦根际细菌丰富度,促进细菌生长繁殖,改善土壤细菌群落结构,且90 d达到峰值。施用微生物菌剂可显著提高根际土壤中具有生防、促生功能的细菌相对丰度,而具有诱病作用的致病菌类诺卡氏菌属显著降低。

3)施用微生物菌剂对小麦有效穗数、穗粒数、千粒重及产量有显著影响。

4)通过综合分析不同类型微生物菌剂对土壤养分、细菌群落结构及小麦产量的影响,以施用胶冻芽孢杆菌PM12处理效果最佳。

参考文献:

- [1] 赵广才,常旭虹,王德梅,等.小麦生产概况及其发展[J].作物杂志,2018,34(4):1-7.
ZHAO G C, CHANG X H, WANG D M, et al. General situation and development of wheat production[J]. Crops, 2018(4):1-7.
- [2] 唐继伟,徐久凯,温延臣,等.长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报, 2019,25(11):1827-1834.
TANG J W, XU J K, WEN Y C, et al. Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(11): 1827-1834.
- [3] 阮文渊,任剑豪,郭美娜,等.氮磷养分介导的植物-微生物互作研究进展[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7): 1322-1328.
RUAN W Y, REN J H, GUO M N, et al. Advances in the study of plant-microbial interactions coordinated by nitrogen and phosphorus nutrients[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1322-1328.
- [4] 侯鹏飞,贾振华,宋水山.生长素和细胞分裂素调控植物根和微生物互作的研究进展[J].生物技术通报,2017, 33(7):1-6.
HOU P F, JIA Z H, SONG S S. Auxin and cytokinin modulate root microbe interactions[J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(7):1-6.
- [5] 周益帆,白寅霜,岳童,等.植物根际促生菌促生特性研究进展[J].微生物学通报,2023,50(2):644-666.
ZHOU Y F, BAI Y S, YUE T, et al. Research progress on the growth-promoting characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Microbiology China, 2023, 50(2):644-666.
- [6] 贾峥嵘,郝佳丽,郝艳芳,等.四种芽孢杆菌菌剂对甘薯不同时期产量及品质的影响[J].作物杂志,2023(1):170-175.
JIA Z R, HAO J L, HAO Y F, et al. Effects of four bacillus species on yield and quality of sweet potato at different stages[J]. Crops, 2023(1):170-175.
- [7] 高晶霞,张凤宝,许旺旺,等.连作辣椒土壤理化性状及土壤酶活性对微生物菌剂的响应[J].北方园艺,2025(1):115-121.
GAO J X, ZHANG F B, XU W W, et al. Response of soil physicochemical properties and soil enzyme activity to microbial agents in continuous cropping peppers[J]. Northern Horticulture, 2025(1):115-121.
- [8] 张紫瑶,谈韞,樊航,等.绿色木霉和枯草芽孢杆菌对番茄苗期根系形态及土壤速效养分的影响[J].江苏农业科学,2022,50(9):111-115.
ZHANG Z Y, TAN Y, FAN H, et al. Impacts of *Trichoderma viride* and *Bacillus subtilis* on root morphology and soil available nutrients of tomatoes at seedling stage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(9):111-115.
- [9] LIU Y H, NESSA A, ZHENG Q Y, et al. Inoculations of phosphate-solubilizing bacteria alter soil microbial community and improve phosphorus bioavailability for moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) growth[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 189:e104911.
- [10] 常文智,马鸣超,李力,等.施用胶质类芽孢杆菌对土壤生物活性和花生产量的影响[J].中国土壤与肥料,2014(1):84-89.
CHANG W Z, MA M C, LI L, et al. Effects of *Paenibacillus mucilaginosus* on soil biological activity and yield of peanut[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(1):84-89.
- [11] 张莹,杨玉莹,王花,等.微生物菌剂对黄瓜幼苗生长及基质理化环境的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(3):49-61.
ZHANG X, YANG Y Y, WANG H, et al. Effects of microbial agents on the growth of cucumber seedlings and the physicochemical environment of the substrate[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(3):49-61.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 安徽省地方标准.小麦测产技术规范:DB34/T 1964—2013[S].合肥:安徽省质量技术监督局,2013.
Anhui Provincial Local Standard. Technical specifications for wheat yield measurement: DB34/T 1964—2013[S]. Hefei: Anhui Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2013.

- [14] 刘佳欢,王倩,罗人杰,等.黄腐酸肥料对小麦根际土壤微生物多样性和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1808-1816.
- LIU J H, WANG Q, LUO R J, et al. Effect of fulvic acid fertilizer on microbial diversity and enzyme activity in wheat rhizosphere soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10):1808-1816.
- [15] 杨潇湘,张蕾,黄小琴,等.基于高通量测序分析大豆和油菜根际微生物群落结构的差异[J].应用生态学报,2019,30(7):2345-2351.
- YANG X X, ZHANG L, HUANG X Q, et al. Difference of the microbial community structure in the rhizosphere of soybean and oilseed rape based on high-throughput pyrosequencing analysis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7):2345-2351.
- [16] 宋以玲,于建,陈士更,等.复合微生物菌剂对棉花生理特性及根际土壤微生物和化学性质的影响[J].土壤,2019,51(3):477-487.
- SONG Y L, YU J, CHEN S G, et al. Effects of complex microbial agent on cotton physiological characteristics, microorganism and physicochemical properties in rhizosphere soil[J]. Soils, 2019, 51(3):477-487.
- [17] 岳明灿,王志国,陈秋实,等.减施化肥配施微生物菌剂对番茄产质量和土壤肥力的影响[J].土壤,2020,52(1):68-73.
- YUE M C, WANG Z G, CHEN Q S, et al. Effects of reduction of chemical fertilizer combined with application of microbial agents on growth and soil fertility of cherry tomato[J]. Soils, 2020, 52(1):68-73.
- [18] TAO S Y, WU Z S, WEI M M, et al. *Bacillus subtilis* SL-13 biochar formulation promotes pepper plant growth and soil improvement [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2019, 65(5):333-342.
- [19] 赵艳,张晓波,郭伟.不同土壤胶质芽孢杆菌生理生化特征及其解钾活性[J].生态环境学报,2009,18(6):2283-2287.
- ZHAO Y, ZHANG X B, GUO W. Physiological and biochemical characteristics and capacities of potassium-releasing of *Bacillus mucilaginosus* screened from different soils[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(6):2283-2287.
- [20] 张娟,杨彩梅,曹广添,等.解淀粉芽孢杆菌及其作为益生菌的应用[J].动物营养学报,2014,26(4):863-867.
- ZHANG J, YANG C M, CAO G T, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* and its application as a probiotic[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(4):863-867.
- [21] 保善存,吕亮雨,龙启辰,等.不同促生菌剂对柴达木枸杞土壤生物学特性的影响[J].干旱地区农业研究,2025,43(1):250-257.
- BAO S C, LÜ L Y, LONG Q C, et al. Effects of different growth-promoting microbial agents on soil biological characteristics of *Lycium barbarum* in Chaidamu[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(1):250-257.
- [22] 李婷,朱立安,林梓,等.土壤改良剂(CMC)在新垦耕地土壤改良中的应用[J].中国农学通报,2023,39(21):88-93.
- LI T, ZHU L A, LIN Z, et al. The application of soil conditioner (CMC) in soil improvement of new cultivating farmland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(21):88-93.
- [23] 韩永琴,陈新建,罗路云,等.生防菌剂多黏类芽胞杆菌对辣椒根际土壤细菌群落的影响[J].植物保护,2020,46(2):135-142.
- HAN Y Q, CHEN X J, LUO L Y, et al. Effects of the biocontrol agent *Bacillus polymyxa* on the bacterial community in the rhizosphere of pepper[J]. Plant Protection, 2020, 46(2):135-142.
- [24] 游偲,张立猛,计思贵,等.枯草芽孢杆菌菌剂对烟草根际土壤细菌群落的影响[J].应用生态学报,2014,25(11):3323-3330.
- YOU C, ZHANG L M, JI S G, et al. Impact of biocontrol agent *Bacillus subtilis* on bacterial communities in tobacco rhizospheric soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11):3323-3330.
- [25] 孙昭安,朱彪,张译文,等.小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献[J].农业环境科学学报,2021,40(10):2257-2265.
- SUN Z A, ZHU B, ZHANG Y W, et al. Contributions of wheat and maize growth to soil carbon input and output [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(10):2257-2265.
- [26] 李海利,徐引弟,王治方,等.胶冻样芽孢杆菌对革兰氏阴性菌的抑菌活性及其抗菌次级代谢产物分析[J].河南农业科学,2024,53(10):159-169.
- LI H L, XU Y D, WANG Z F, et al. Analysis of antibacterial activity and secondary metabolites of *Paenibacillus kribbensis* against gram-negative bacteria [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(10):159-169.
- [27] LI W X, ZHANG Y P, MAO W, et al. Functional potential differences between *Firmicutes* and *Proteobacteria* in response to manure amendment in a reclaimed soil [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2020, 66(12):689-697.
- [28] ASAF S, NUMAN M, KHAN A L, et al. *Sphingomonas*: From diversity and genomics to functional role in environmental remediation and plant growth [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2020, 40(2):138-152.
- [29] CASTRO-SOWINSKI S. Microbial models: From envi-

- ronmental to industrial sustainability [M]. Singapore: Springer Singapore, 2016.
- [30] YASMIN H, BANO A, WILSON N L, et al. Drought-tolerant *Pseudomonas* sp. showed differential expression of stress-responsive genes and induced drought tolerance in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Physiologia Plantarum*, 2022, 174(1): e13497.
- [31] GU S H, WEI Z, SHAO Z Y, et al. Competition for iron drives phytopathogen control by natural rhizosphere microbiomes [J]. *Nature Microbiology*, 2020, 5(8): 1002-1010.
- [32] 侯栋, 李亚莉, 岳宏忠, 等. 微生物菌肥替代部分化肥对花椰菜产量、品质及土壤微生物的影响[J]. *浙江农业学报*, 2024, 36(3): 589-599.
- HOU D, LI Y L, YUE H Z, et al. Effects of microbial fertilizer instead of partial chemical fertilizer on yield, quality and soil microorganisms of cauliflower [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(3): 589-599.
- [33] LIANG T W, TSENG S C, WANG S L. Production and characterization of antioxidant properties of exopolysaccharide(s) from *Peanibacillus mucilaginosus* TKU032 [J]. *Mar Drugs*, 2016, 14(2): e40.
- [34] 茹素龙, 赵永龙, 王紫薇, 等. 产胞外多糖菌株的分离鉴定及其功能研究[J]. *微生物学报*, 2023, 63(11): 4315-4329.
- RU S L, ZHAO Y L, WANG Z W, et al. Isolation, identification, and functional characterization of exopolysaccharide-producing strains [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(11): 4315-4329.
- [35] 贾峥嵘, 郝佳丽, 郝艳芳, 等. 4种促生菌剂对甘薯生长及土壤肥力的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(9): 166-172.
- JIA Z R, HAO J L, HAO Y F, et al. Effects of four growth-promoting bacteria on the growth of sweet potato and soil fertility [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(9): 166-172.
- [36] 朱晋, 杨文佳, 王宁. 贝莱斯芽孢杆菌高密度发酵工艺优化及其生物有机肥对水稻生长的影响[J]. *南方农业*, 2024, 18(23): 26-34.
- ZHU J, YANG W J, WANG N. Optimization of high-density fermentation process of *Bacillus velezensis* and the effect of bio-organic fertilizer prepared on rice growth [J]. *Southern Agriculture*, 2024, 18(23): 26-34.
- [37] 许立阳, 王亚男, 曾希柏, 等. 微生物菌肥对瘠薄稻田土壤养分及水稻生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(10): 2350-2362.
- XU L Y, WANG Y N, ZENG X B, et al. Microbial fertilizer effects on soil nutrients and rice growth in barren paddy fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(10): 2350-2362.
- (上接第388页)
- [31] 蒋容, 余一, 唐玉蓉, 等. 增温和生物炭添加对农田土壤酶活性的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(1): 72-77.
- JIANG R, YU Y, TANG Y R, et al. Effects of warming and biochar addition on soil enzyme activities in farmland [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(1): 72-77.
- [32] DOTANIYA M L, APARNA K, DOTANIYA C K, et al. Role of soil enzymes in sustainable crop production [M]// *Enzymes in Food Biotechnology*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 569-589.
- [33] LI H, DAI M W, DAI S L, et al. Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland: A review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 159: 293-300.
- [34] 许宏伟. 秸秆还田方式及施氮水平对小麦-玉米轮作系统土壤 N₂O 排放的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- XU H W. Effects of straw returning method and nitrogen application level on soil N₂O emission in wheat-corn rotation system [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.