

DOI:10.11686/cyxb2025238

http://cyxb.magtech.com.cn

段艳雪, 杨柳, 王勇, 等. 产酶溶杆菌 LE16 对烤烟生长的促进作用. 草业学报, 2026, 35(5): 151—161.

DUAN Yan-xue, YANG Liu, WANG Yong, et al. Promotion effect of *Lysobacter enzymogenes* LE16 on the growth of tobacco. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 151—161.

产酶溶杆菌 LE16 对烤烟生长的促进作用

段艳雪^{1,3}, 杨柳², 王勇², 韩雪¹, 刘东阳², 马超¹, 邓全², 陈玉蓝², 黄建国¹, 李勇^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 四川省凉山州烟草公司, 四川 西昌 615000; 3. 四川省达州市达川区农业农村局, 四川 达州 635000)

摘要: 烤烟是喜肥且需肥量大的经济作物。我国植烟区土壤长期大量施用氮磷等化肥, 虽富含养分, 但多为难溶态有机氮磷, 不易被植物吸收。因此, 通过微生物活化土壤中难溶的养分, 可减少化肥施用量, 降低成本, 实现烤烟的减肥增效。本研究通过土壤培养试验、纯培养试验和盆栽试验, 研究了产酶溶杆菌 LE16 对土壤养分活化和烤烟生长的影响。研究发现, 菌株 LE16 具备分泌蛋白酶和磷酸酶的能力。土壤培养结果表明, 接种 LE16, 土壤中的中性蛋白酶和中性磷酸酶活性、碱解氮和有效磷含量均显著增加 ($P < 0.05$), 其中碱解氮含量与中性蛋白酶活性 ($r = 0.925^{**}$, $P < 0.01$), 有效磷含量与中性磷酸酶活性 ($r = 0.405^*$, $P < 0.05$) 均呈显著正相关关系。盆栽试验结果表明, 与施化肥处理 (CF) 相比, 化肥 + LE16 (CF + LE16) 和 90% 化肥 + LE16 (0.9CF + LE16) 处理根际土壤的中性蛋白酶、中性磷酸酶活性和碱解氮含量分别显著提高了 21.96% 和 46.08%、35.59% 和 52.13%、18.58% 和 12.83% ($P < 0.05$); CF + LE16 和 0.9CF + LE16 处理的土壤有效磷含量均高于 CF 处理, 但无显著差异。CF + LE16 和 0.9CF + LE16 处理的烤烟植株氮、磷和钾养分的吸收量较 CF 处理分别显著提高了 16.55% 和 9.24% (氮)、5.70% 和 4.83% (磷)、18.46% 和 11.59% (钾) ($P < 0.05$)。此外, 0.9CF + LE16 处理的茎鲜重/干重、叶鲜重/干重、株高、最大叶面积等, 与 CF 处理相当。研究表明产酶溶杆菌 LE16 能活化土壤养分, 促进烤烟植株养分的吸收和生长, 在减肥增效中具有较好的应用前景。

关键词: 产酶溶杆菌 LE16; 养分活化; 烤烟; 生长

Promotion effect of *Lysobacter enzymogenes* LE16 on the growth of tobacco

DUAN Yan-xue^{1,3}, YANG Liu², WANG Yong², HAN Xue¹, LIU Dong-yang², MA Chao¹, DENG Quan², CHEN Yu-lan², HUANG Jian-guo¹, LI Yong^{1*}

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Liangshan Tobacco Company of Sichuan Province, Xichang 615000, China; 3. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Dachuan District, Dazhou City, Sichuan Province, Dazhou 635000, China

Abstract: *Nicotiana tabacum* is a cash crop with high fertilizer demands. In Chinese tobacco-growing regions, long-term excessive application of chemical fertilizers, particularly nitrogen and phosphorus, has led to accumulate nutrient-rich in soils, which are poorly available for plant uptake with insoluble organic forms. Utilizing microorganisms to solubilize these bound nutrients presents a viable strategy to reduce fertilizer application, lower costs, and improve nutrient-use efficiency in tobacco cultivation. This study investigated the effects of *Lysobacter enzymogenes* LE16 on soil nutrient mobilization and tobacco growth through soil incubation experiments, pure culture

收稿日期: 2025-06-16; 改回日期: 2025-09-01

基金项目: 四川省烟草公司凉山州分公司 2023 年新品种、新产品、新材料、新技术试验示范 (SCYC202318) 和重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (CSTB2023TIAD-KPX0075) 资助。

作者简介: 段艳雪 (1999—), 女, 云南保山人, 硕士。E-mail: 2294633862@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liyongwf@swu.edu.cn

assays, and pot trials. The results demonstrated that strain LE16 secretes protease and phosphatase enzymes. In soil incubation experiments, inoculation with LE16 significantly enhanced the activities of neutral protease and neutral phosphatase, concurrently increasing the contents of alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus in the soil ($P < 0.05$). Significant positive correlations were observed between alkali-hydrolyzable nitrogen content and neutral protease activity ($r = 0.925^{**}$, $P < 0.01$), and available phosphorus content and neutral phosphatase activity ($r = 0.405^*$, $P < 0.05$). Pot experiments revealed that activities of the neutral protease and neutral phosphatase, as well as the content of alkali-hydrolyzable nitrogen in the rhizosphere soil were significantly higher ($P < 0.05$) in the treatments receiving chemical fertilizer+LE16 (CF+LE16) and 90% chemical fertilizer+LE16 (0.9CF+LE16) compared to treatment with chemical fertilizer (CF). Specifically, neutral protease activity increased by 21.96% and 46.08%, neutral phosphatase activity by 35.59% and 52.13%, and alkali-hydrolyzable nitrogen by 18.58% and 12.83%, in the CF+LE16 and 0.9CF+LE16 treatments, respectively. The available phosphorus content in the CF+LE16 and 0.9CF+LE16 treatments was higher than that in the CF treatment, though not significantly. Furthermore, the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium in tobacco plants was significantly promoted ($P < 0.05$) in the CF+LE16 and 0.9CF+LE16 treatments, with increases of 16.55% and 9.24% for nitrogen, 5.70% and 4.83% for phosphorus, and 18.46% and 11.59% for potassium, respectively. Additionally, growth parameters-including stem fresh/dry weight, leaf fresh/dry weight, plant height, and maximum leaf area-in the 0.9CF+LE16 treatment were comparable to those in the CF treatment. The study demonstrates that *L. enzymogenes* LE16 effectively mobilizes bound soil nutrients, enhances nutrient uptake, and promotes tobacco plant growth, showing considerable potential for reducing fertilizer application while maintaining yield.

Key words: *Lysobacter enzymogenes* LE16; nutrient activation; *Nicotiana tabacum*; growth

烤烟(*Nicotiana tabacum*)是我国重要的经济作物之一,在农业经济中占据重要地位,据国家统计局统计,2023年我国烤烟产量达219.12万t,税利总额达1.5万亿元。近年来,我国的种烟地区不断扩大,种植面积也在逐年增加^[1]。

烤烟作为一种喜肥、需肥量大的植物,为了获得高产,我国植烟区长期连作,过量施用氮、磷等化肥,但养分利用率不高,增肥不增产。有研究数据显示,在我国烤烟种植体系的养分循环过程中,化肥构成了氮磷钾三大营养元素的主要来源,其贡献率分别高达83.4%(氮)、99.2%(磷)和99.4%(钾)。然而,通过烟株生物量带走的养分比例却显著低于投入量,其中氮素回收率为52.8%,磷素仅7.6%,钾素为27.7%,表明当前施肥模式下存在明显的养分利用效率低下问题^[2]。大量化肥的施入导致植烟区土壤板结、养分失衡、微生态环境失调,造成土壤耕层生产力、烟叶产量产值下降等问题^[3-4],土壤中虽有大量养分,但多以难溶性有机磷和有机氮的形式存在,分别占土壤中全氮和全磷含量的90%以上和20%~40%,不能直接供植株利用,只能通过矿化分解间接为植物提供养分^[5-6]。此外,氮和磷肥的当季利用率一般只有30%~35%和10%~25%^[7-8]。如何提高其产量和品质的同时,降低生产成本,提高经济效益是目前烤烟生产中需要面对的问题^[9-10]。

植物根际促生菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)在改善土壤理化性质和促进作物生长方面起着重要作用^[11]。PGPR能够通过固氮、解磷和解钾的能力,促进植株的生长^[12];陈意超等^[13]研制了一种复合多功能混合促生菌,其盆栽试验结果表明,该菌剂可通过固氮、溶磷及解钾的协同机制,显著提升矿砂基质氮素累积并促进千叶蓍(*Achillea millefolium*)对钾元素的同化效率。Zhang等^[14]筛选出FJS-3吡咯伯克霍尔德菌(*Burkholderia pyromania*)、FJS-7霍氏假单胞菌(*Pseudomonas rhodesiae*)和FJS-16贝蒂卡假单胞菌(*Pseudomonas baetica*)3株具有解磷、固氮等促进植物生长活性的PGPR菌株,并制备成固体生物制剂施入植物中不同程度上显著促进了茶树(*Camellia sinensis*)、辣椒(*Capsicum annuum*)和烤烟植株的生长和品质改良。此外,PGPR菌株还通过分泌铁载体和植物生长激素如吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)、赤霉素等,以刺激植物

生长^[15]。比如,Chamkhi等^[16]筛选出的PGPR通过溶磷作用、分泌铁载体和合成生长激素等促生机制,显著提高藏红花(*Crocus sativus*)叶片生长(叶片数增加28.7%)、叶绿素含量及子球茎产量(提升91%),并使藏红花品质达到I级标准;Aydinoglu等^[17]单独或联合使用能够产生植物生长激素(IAA)、赤霉素的短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)、地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)和凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulans*)对玉米(*Zea mays*)进行生物灌溉,结果玉米根鲜重增加了36%,地上部鲜重增加了39%。许培增等^[18]从广藿香(*Pogostemon cablin*)根际筛选出3株能合成IAA、产氨并形成生物膜能力的根际促生菌,显著提升广藿香的生长指标而不影响其关键次生代谢物含量。因此,筛选出高效的PGPR菌株,对促进植物生长、实现减肥增效具有重要意义。

课题组前期分离得到的产酶溶杆菌(*Lysobacter enzymogenes*)新株LE16能分泌铁载体、IAA及多种水解酶类,是一株PGPR菌株,具有促生的潜力;盆栽试验结果表明,接种菌株LE16显著促进了生菜(*Lactuca sativa*)和辣椒植株的生长和养分吸收^[19]。因此,本研究以LE16菌株和烤烟为对象,通过土壤培养试验、纯培养试验和盆栽试验,研究了LE16对土壤养分活化和烤烟生长的影响。为实现菌株LE16在烤烟减肥增效中的应用提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菌株:产酶溶杆菌LE16(简称菌株LE16)来源于西南大学植物营养实验室^[19]。

供试土壤为采自重庆歇马的紫色土。选取0~20 cm田间耕层土壤样品,剔除杂物后自然风干,经研磨分别过10.00、1.00和0.25 mm筛备用。土壤的基本性质:pH为6.9,有机质含量为24.54 g·kg⁻¹,有机碳含量为14.23 g·kg⁻¹,全氮含量为1.41 g·kg⁻¹,全磷含量为1.11 g·kg⁻¹,全钾含量为16.01 g·kg⁻¹,碱解氮含量为121.06 mg·kg⁻¹,有效磷含量为42.45 mg·kg⁻¹,有效钾含量为388.93 mg·kg⁻¹。

供试烤烟品种为云烟87,烟苗由重庆市彭水县烤烟育苗基地提供。

供试培养基^[19]:牛肉膏蛋白胨培养基(nutrient agar, NA, g·L⁻¹):蛋白胨10.0 g,牛肉膏5.0 g,NaCl 5.0 g,琼脂15.0 g,调节pH 7.0~7.2。液体培养基(nutrient broth, NB)配置方法同上,不加琼脂,用于培养细菌。蛋白酶检测培养基(g·L⁻¹):15.0 g脱脂奶粉,15.0 g琼脂,用于检测产生蛋白酶的能力。蒙金娜有机磷培养基(g·L⁻¹):葡萄糖10.0 g, CaCO₃ 5.0 g,卵磷脂2.0 g, MnSO₄ 1.0 g, (NH₄)₂SO₄ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, MgSO₄·7H₂O 0.3 g, FeSO₄·7H₂O 0.03 g, 琼脂15.0 g, 调节pH 7.0~7.5, 用于分离和鉴定解磷细菌, 检测产生磷酸酶的能力。

供试肥料为农资市场购买的复合肥料(N-P₂O₅-K₂O, 18-9-18)和全水溶性硫酸钾(K₂O≥53.8%)。

1.2 试验方法

1.2.1 菌株LE16种子液制备 将保存于-80℃的LE16菌株接种至NA培养基,于28℃恒温培养48 h进行活化。随后,取活化后的LE16菌体转接至NB培养基中,置于摇床内,在28℃、150 r·min⁻¹条件下振荡培养36 h,制得菌株种子液。最后,将种子液与NB培养基按1:100的体积比混合,继续培养48 h,获得LE16菌悬液。

1.2.2 菌株LE16分泌蛋白酶和磷酸酶能力的检测 LE16菌株的活化同1.2.1。取活化后的LE16菌体用接种环接种到蛋白酶检测培养基,将直径为8 mm带有LE16菌体的菌块接种至蒙金娜有机磷培养基中,每个处理3次重复,于28℃恒温培养48 h后观察并记录。

1.2.3 菌株LE16对土壤氮磷养分含量的影响 试验方法:称取50 g供试土壤样品,置于150 mL三角瓶内,采用2 μm孔径封口膜进行密封处理。随后,将密封样品置于高压灭菌锅中,通过121℃、60 min的湿热灭菌程序(重复灭菌两次)彻底杀灭微生物,待冷却至室温后备用。本试验共设两个处理组:1)对照组(CK):向三角瓶内注入5.0 mL无菌蒸馏水;2)接菌组(LE16):添加5.0 mL OD₆₀₀值为0.8的LE16菌株菌悬液。

每个处理组设置30次重复。将所有三角瓶置于28℃恒温培养箱中进行培养。自培养当天起,每间隔7 d进行一次采样,每次随机选取5份土样。采样后的土壤样品于阴凉处自然风干,过0.25 mm筛后,用于测定土壤中中性蛋白酶、中性磷酸酶活性,以及碱解氮和有效磷含量。

1.2.4 菌株LE16对烤烟生长的影响 烤烟盆栽试验于2023年5—7月在西南大学资源环境学院温室进行。

试验共设置6个处理组:1)不施肥(CK);2)化肥(chemical fertilizer, CF);3)化肥+LE16菌悬液(chemical fertilizer+LE16, CF+LE16);4)90%化肥+LE16菌悬液(0.9 chemical fertilizer+LE16, 0.9CF+LE16);5)80%化肥+LE16菌悬液(0.8 chemical fertilizer+LE16, 0.8CF+LE16)。

基于大田烤烟种植的肥料施用标准,本研究通过折算确定盆栽试验的肥料用量。盆栽试验统一采用7.0 kg土样,处理组2)、3)作为基准施肥量,每盆分别施用N 2.50 g、 P_2O_5 1.25 g和 K_2O 3.75 g。为探究不同施肥梯度对烤烟生长的影响,处理组4)和5)在基准量基础上,分别下调10%和20%的氮磷钾用量。氮、磷、钾养分通过复合肥($N-P_2O_5-K_2O$, 18-9-18)和 K_2SO_4 ($K_2O \geq 53.8\%$)供应,于幼苗移栽前均匀混入土壤。每盆定植1株具有4~5片真叶的烤烟幼苗,每个处理设5次重复。移栽时,向3)、4)和5)处理的盆钵内幼苗周边均匀施入400 mL菌株LE16菌悬液($OD_{600}=0.8$)。后期补水时,以LE16菌悬液替代灌水2次,每次150 mL。

试验期间,定期补充盆栽土壤水分,使其维持在田间最大持水量的65%~70%。待烤烟成熟后结束试验,监测植株生物量,测定各处理烟株的有效叶片数、最大叶面积、株高、茎粗、叶鲜重/干重及茎鲜重/干重。将植株样品洗净、烘干、磨细后,测定氮、磷、钾养分含量;采集烤烟根际土壤,自然风干后分别过1.00和0.25 mm筛,用于测定土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量及相关酶活性。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 烤烟农艺性状测定 按照YC/T 142-2010行业标准^[20]中烤烟农艺性状调查方法对烤烟农艺性状(茎、叶鲜重、株高、茎粗、叶片数和最大叶面积)进行测定和记录。

1.3.2 土壤和植株理化性质测定 土壤:碱解氮、有效磷含量分别采用碱解扩散法^[21]、钼蓝比色法^[21]测定;速效钾含量采用火焰光度法测定^[21];pH采用水土法(水土比2.5:1.0),用PHS-3E型pH计(上海)测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法(外加热法)^[21]测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用钼蓝比色法测定;全钾含量采用火焰光度法测定^[21]。植株:全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用钼蓝比色法测定;全钾含量采用火焰光度法^[21]测定。各养分吸收量计算公式^[21]:植株氮/磷/钾素吸收量($g \cdot \text{株}^{-1}$)=(叶片全氮/磷/钾含量×叶干重)+(茎全氮/磷/钾含量×茎干重)。

1.3.3 土壤酶活性测定 土壤中性蛋白酶、蔗糖酶、脲酶及过氧化氢酶活性分别采用福林法、3,5-二硝基水杨酸比色法、苯酚钠次氯酸钠比色法及高锰酸钾滴定法^[22]测定;土壤中性磷酸酶活性采用对硝基苯磷酸二钠比色法^[23]测定。

1.4 数据统计与分析

使用Microsoft Excel 2016和SPSS 26.0处理数据,方差分析(ANOVA)在 $\alpha=0.05$ 水平下进行,以Duncan's多重比较检验各处理间的差异。中性蛋白酶活性变化与碱解氮含量、中性磷酸酶活性变化与有效磷含量之间的相关性采用Pearson相关系数分析。图表通过Excel 2016和Origin 2021软件绘制完成。

2 结果与分析

2.1 菌株LE16对土壤有机氮磷的活化作用

2.1.1 菌株LE16分泌蛋白酶和磷酸酶能力的检测 在蛋白酶检测培养基和蒙金娜有机磷培养基

上接种菌株LE16,28℃培养48 h后,观察到明显的透明圈,说明其能够分泌蛋白酶和磷酸酶(图1)。

2.1.2 菌株LE16对土壤有机氮的活化作用 土壤中的中性蛋白酶活性和碱解氮含量的变化结果(图2)表明,不接菌对照(CK)土壤的中性蛋白酶活性和碱解氮含量,随培养时间延长无明显变化,中性蛋白酶活性为 $0 \sim 0.07 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,碱解氮含量维持在 $117.53 \sim 123.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。接菌处理(LE16)7 d后的土壤中性蛋白酶活性和碱解氮含量显著增加,与CK差异显著($P < 0.05$)。培养结束后接菌处理的中性蛋白酶活性为 $41.63 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,

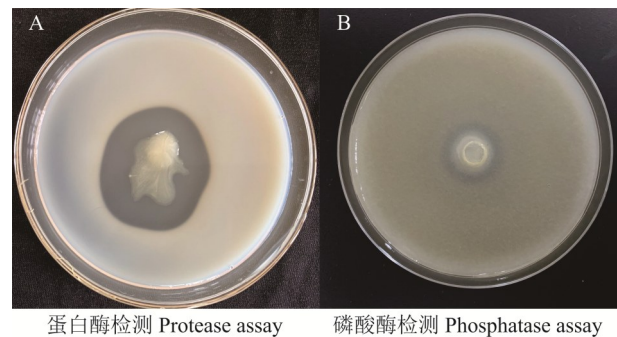


图1 LE16分泌蛋白酶和磷酸酶的结果

Fig. 1 Results of LE16 secreted protease and phosphatase

显著高于CK($P<0.05$);碱解氮含量在培养开始时为 $145.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,培养结束后,其含量为 $384.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著增加了1.6倍,比CK显著增加了2.3倍($P<0.05$)。

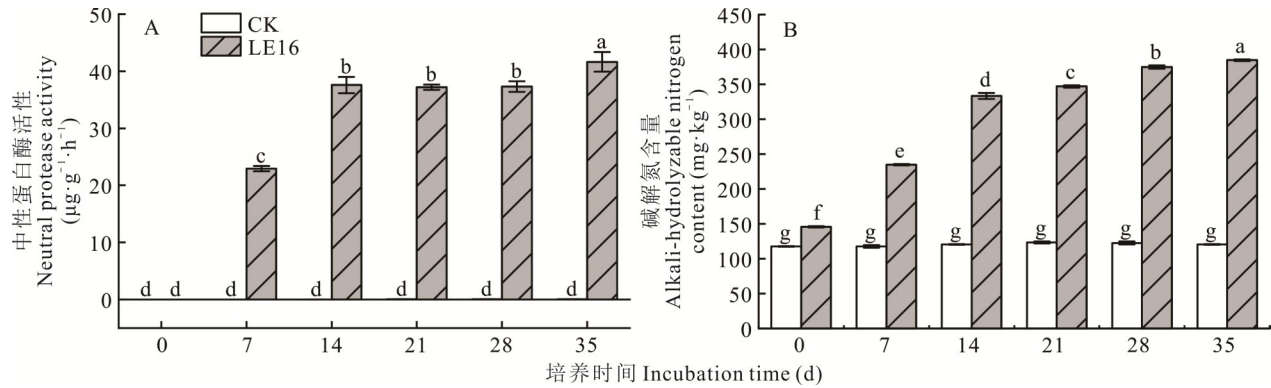


图2 土壤中性蛋白酶活性和碱解氮含量的变化

Fig. 2 The changes of neutral protease activity and content of alkaline dissolved nitrogen in soil

CK为土壤中接入5 mL无菌水的处理,LE16为土壤中接入5 mL LE16菌悬液的处理。不同小写字母表示所有处理间差异显著($P<0.05$),下同。CK represents the treatment with 5 mL sterile water added to the soil, and LE16 represents the treatment with 5 mL *L. enzymogenes* LE16 bacterial suspension added to the soil. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), the same below.

2.1.3 菌株LE16对土壤有机磷的活化作用 土壤的中性磷酸酶活性和有效磷含量的变化结果(图3)表明,对照(CK)的中性磷酸酶活性和有效磷含量在整个培养期间无明显变化;接种LE16菌剂7 d后土壤的中性磷酸酶活性和有效磷含量显著增加,显著高于CK处理($P<0.05$),均在第21天达到最大值,分别为 $113.50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $70.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与CK相比,分别提高了48.72%和83.00%。

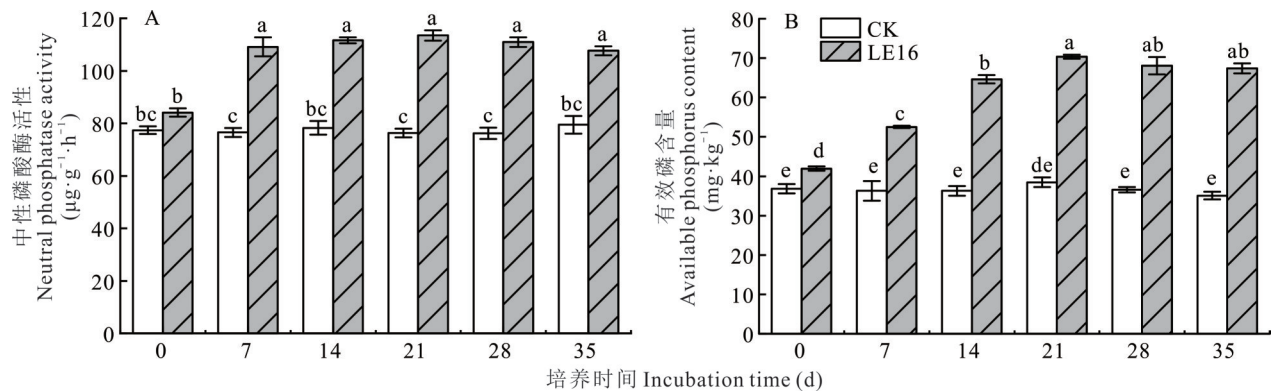


图3 土壤中性磷酸酶活性和有效磷含量的变化

Fig. 3 The changes of neutral phosphatase activity and content of available phosphorus in soil

2.1.4 土壤酶活性和有效养分含量的相关性分析 相关性分析表明(表1),土壤碱解氮含量和中性蛋白酶活性之间存在极显著正相关关系($r=0.925, P<0.01$)。有效磷含量和中性磷酸酶活性之间存在显著正相关关系($r=0.405, P<0.05$)。

2.2 菌株LE16对烤烟生长的影响

2.2.1 菌株LE16对烤烟根际土壤酶活性的影响 90%化肥+LE16菌悬液(0.9CF+LE16)处理的中性蛋白酶活性最高,为 $123.77 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,较不施肥(CK)和化肥(CF)处理分别显著提高了164.35%和46.08%($P<0.05$,图4A)。此外,化肥+LE16菌悬液(CF+LE16)和80%化肥+LE16菌悬液(0.8CF+LE16)处理之间无显著差异($P>0.05$),但均高于CF处理,分别提高了21.96%和29.20%。

表1 土壤酶活性和有效养分含量的相关性

Table 1 Correlation between enzyme activity and available nutrient content in soil

指标 Index	中性蛋白酶 Neutral protease	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen	中性磷酸酶 Neutral phosphatase	有效磷 Available phosphorus
中性蛋白酶 Neutral protease	1.000	0.925**	—	—
碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen	0.925**	1.000	—	—
中性磷酸酶 Neutral phosphatase	—	—	1.000	0.405*
有效磷 Available phosphorus	—	—	0.405*	1.000

—: 未作分析 No analysis. $n=30$; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

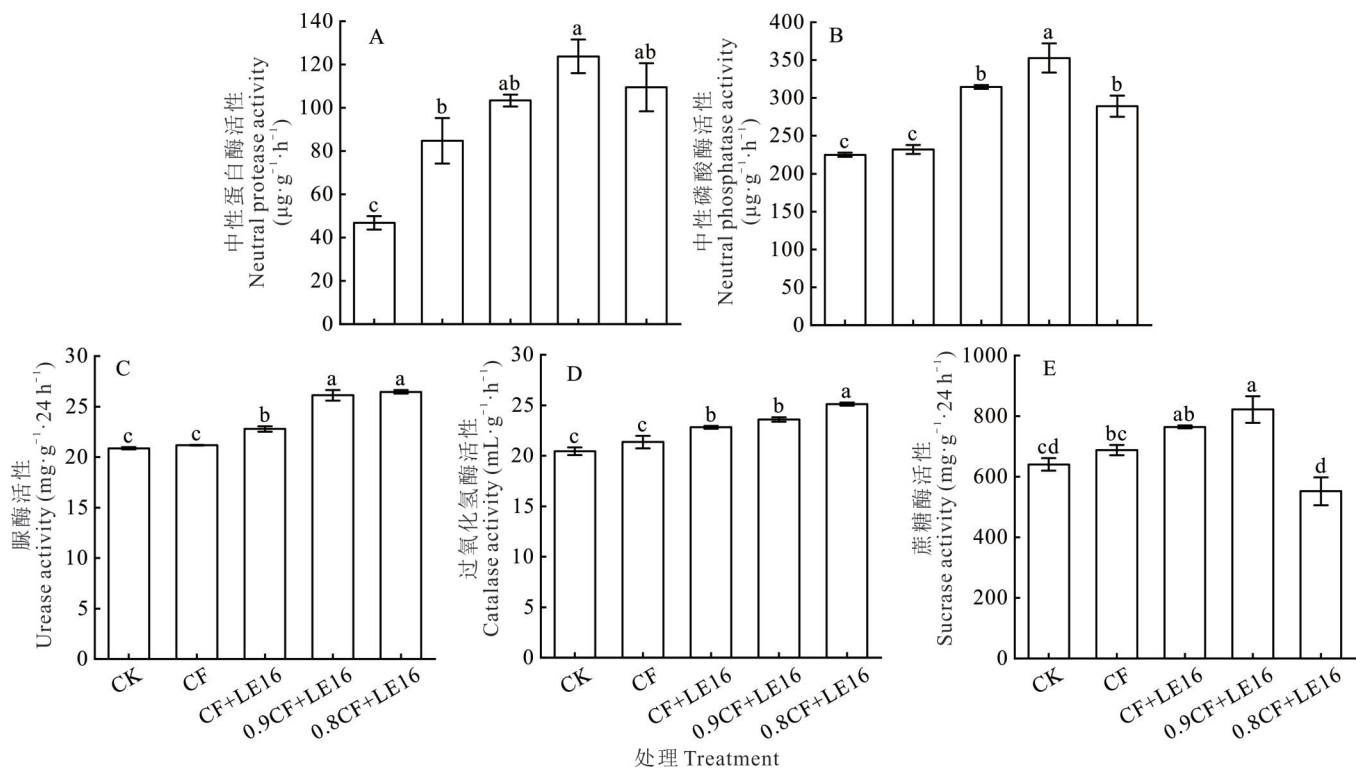


图4 不同处理中烤烟根际的土壤酶活性

Fig. 4 The enzyme activities of different treatments in tobacco rhizosphere soil

CK为不施肥,CF为化肥处理,CF+LE16为化肥+LE16菌悬液,0.9CF+LE16、0.8CF+LE16分别为90%化肥+LE16菌悬液和80%化肥+LE16菌悬液,下同。CK refers to the control group without fertilization, CF represents the chemical fertilizer treatment, CF+LE16 denotes chemical fertilizer combined with *L. enzymogenes* LE16 suspension, while 0.9CF+LE16 and 0.8CF+LE16 indicate 90% and 80% chemical fertilizer combined with LE16 suspension, respectively, the same below.

0.9CF+LE16处理的土壤中性磷酸酶活性最高,为 $352.78 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,较CK、CF、CF+LE16和0.8CF+LE16处理分别显著提高了56.83%、52.13%、12.20%和21.97%;此外,接种LE16处理的中性磷酸酶活性较CF处理,显著提高了24.73%~52.13% ($P<0.05$,图4B)。

CF+LE16、0.9CF+LE16和0.8CF+LE16处理的土壤脲酶活性均显著高于CK和CF,分别提高了9.20%~26.80%和7.61%~24.94% ($P<0.05$,图4C)。土壤过氧化氢酶活性分析结果表明(图4D),0.8CF+LE16处理下最高,为 $25.12 \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,CF+LE16、0.9CF+LE16和0.8CF+LE16处理的过氧化氢酶活性较CK、CF处理,分别显著提高了11.54%~22.79%、6.79%~17.60%。土壤蔗糖酶活性(图4E)具体表现为0.9CF+LE16处理最高,达 $821.90 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{h}^{-1}$,显著高于CK、CF和0.8CF+LE16处理 ($P<0.05$),分别提高了28.31%、19.47%和48.88%;其中,0.9CF+LE16与CF+LE16处理间无显著差异。

2.2.2 菌株 LE16 对烤烟根际土壤养分的影响 CF+LE16、0.9CF+LE16 和 0.8CF+LE16 处理的碱解氮含量均显著高于 CF 处理,分别提高了 18.58%、12.83% 和 20.72% ($P<0.05$)。土壤全氮含量在 CF+LE16、0.9CF+LE16 和 0.8CF+LE16 处理之间无显著差异 ($P>0.05$)。

0.9CF+LE16 处理的土壤有效磷含量最高,为 $55.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与 CF 和 CF+LE16 处理无显著差异;0.8CF+LE16 处理的土壤全磷含量最高,为 $1.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,CF+LE16 和 0.8CF+LE16 处理之间无显著差异,且均显著高于 CF 处理。

CF 处理的土壤速效钾含量最高,为 $392.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,0.9CF+LE16 处理次之,且两个处理之间无显著差异。土壤全钾含量在 CF、CF+LE16、0.9CF+LE16 和 0.8CF+LE16 处理之间无显著差异。此外,0.8CF+LE16 处理的有机质含量显著高于 CF 处理,CF+LE16、0.9CF+LE16 和 0.8CF+LE16 处理的有机质含量无显著差异(表 2)。

表 2 不同处理的烤烟根际土壤养分含量

Table 2 The nutrients content of different treatments in tobacco rhizosphere soil

处理 Treatment	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available phospho- rus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phospho- rus ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 Total potassium ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	$26.63\pm 1.11\text{ab}$	$92.27\pm 0.90\text{c}$	$49.49\pm 1.16\text{b}$	$230.00\pm 2.89\text{d}$	$1.42\pm 0.03\text{ab}$	$1.05\pm 0.01\text{c}$	$14.73\pm 0.33\text{b}$
CF	$26.17\pm 0.35\text{b}$	$93.33\pm 0.88\text{c}$	$51.47\pm 0.52\text{ab}$	$392.67\pm 24.23\text{a}$	$1.39\pm 0.01\text{b}$	$1.09\pm 0.01\text{bc}$	$15.07\pm 0.13\text{ab}$
CF+LE16	$26.80\pm 0.38\text{ab}$	$110.67\pm 1.86\text{a}$	$51.44\pm 0.86\text{ab}$	$291.67\pm 6.01\text{c}$	$1.44\pm 0.01\text{ab}$	$1.16\pm 0.01\text{a}$	$15.07\pm 0.33\text{ab}$
0.9CF+LE16	$26.63\pm 0.55\text{ab}$	$105.30\pm 1.36\text{b}$	$55.69\pm 3.11\text{a}$	$356.67\pm 6.01\text{ab}$	$1.42\pm 0.03\text{ab}$	$1.10\pm 0.02\text{bc}$	$15.10\pm 0.20\text{ab}$
0.8CF+LE16	$28.77\pm 0.47\text{a}$	$112.67\pm 0.59\text{a}$	$47.68\pm 1.10\text{b}$	$323.33\pm 13.33\text{bc}$	$1.50\pm 0.04\text{a}$	$1.17\pm 0.04\text{a}$	$15.80\pm 0.40\text{a}$

同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$),下同。Different lowercase letters of the same column indicate that the difference reaches a significant level ($P<0.05$), the same below.

2.2.3 菌株 LE16 对烤烟农艺性状的影响 接种菌株 LE16 后烤烟农艺性状分析结果(表 3)表明,烤烟植株的茎鲜重和干重、叶鲜重和干重、株高、茎粗、叶片数和最大叶面积均表现为施肥处理显著高于 CK 处理 ($P<0.05$);而 CF+LE16、0.9CF+LE16 和 0.8CF+LE16 处理的叶干重均大于 CF 处理,0.9CF+LE16 的茎干重大于 CF 和 CF+LE16 处理,但均无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 不同处理的烤烟农艺性状

Table 3 The tobacco agronomic traits of different treatments

处理 Treatment	茎 Stem ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)		叶 Leaf ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)		株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	最大叶面积 Maximum leaf area (cm^2)	叶片数 Leaf number (No. $\cdot\text{plant}^{-1}$)
	鲜重	干重	鲜重	干重				
	Fresh weight	Dry weight	Fresh weight	Dry weight				
CK	$27.0\pm 1.5\text{b}$	$3.8\pm 0.3\text{b}$	$51.3\pm 2.4\text{b}$	$3.5\pm 0.3\text{b}$	$51.0\pm 1.2\text{b}$	$3.6\pm 0.03\text{b}$	$234.0\pm 16.3\text{d}$	$11\pm 0.9\text{b}$
CF	$234.0\pm 12.9\text{a}$	$30.6\pm 0.7\text{a}$	$339.3\pm 38.8\text{a}$	$41.7\pm 1.1\text{a}$	$115.5\pm 1.8\text{a}$	$5.9\pm 0.13\text{a}$	$845.0\pm 19.1\text{bc}$	$20\pm 0.7\text{a}$
CF+LE16	$259.7\pm 14.3\text{a}$	$30.4\pm 3.3\text{a}$	$375.0\pm 36.7\text{a}$	$42.7\pm 2.0\text{a}$	$117.3\pm 4.3\text{a}$	$6.1\pm 0.12\text{a}$	$1008.7\pm 52.2\text{a}$	$21\pm 1.2\text{a}$
0.9CF+LE16	$237.7\pm 13.3\text{a}$	$31.7\pm 2.1\text{a}$	$340.0\pm 34.8\text{a}$	$42.4\pm 5.6\text{a}$	$113.2\pm 3.3\text{a}$	$6.1\pm 0.06\text{a}$	$805.8\pm 29.0\text{c}$	$19\pm 1.0\text{a}$
0.8CF+LE16	$227.3\pm 19.9\text{a}$	$30.5\pm 4.5\text{a}$	$351.3\pm 14.8\text{a}$	$49.5\pm 4.7\text{a}$	$107.8\pm 5.0\text{a}$	$6.2\pm 0.21\text{a}$	$947.2\pm 51.5\text{ab}$	$20\pm 0.7\text{a}$

2.2.4 菌株 LE16 对烤烟植株养分吸收量的影响 接种菌株 LE16 能显著促进烤烟植株对养分的吸收(图 5)。烤烟植株对氮、磷、钾养分的吸收量表现为 CF+LE16 和 0.9CF+LE16 处理之间无显著差异,但均显著高于 CF 处理 ($P<0.05$),分别提高了 16.55% 和 9.24% (氮)、5.70% 和 4.83% (磷)、18.46% 和 11.59% (钾);0.8CF+

LE16与CF处理间的氮和钾养分的吸收量无显著差异,0.8CF+LE16处理的磷养分的吸收量显著低于CF处理。此外,0.8CF+LE16烤烟植株对氮、磷、钾的吸收量均显著低于CF+LE16和0.9CF+LE16处理($P < 0.05$)。

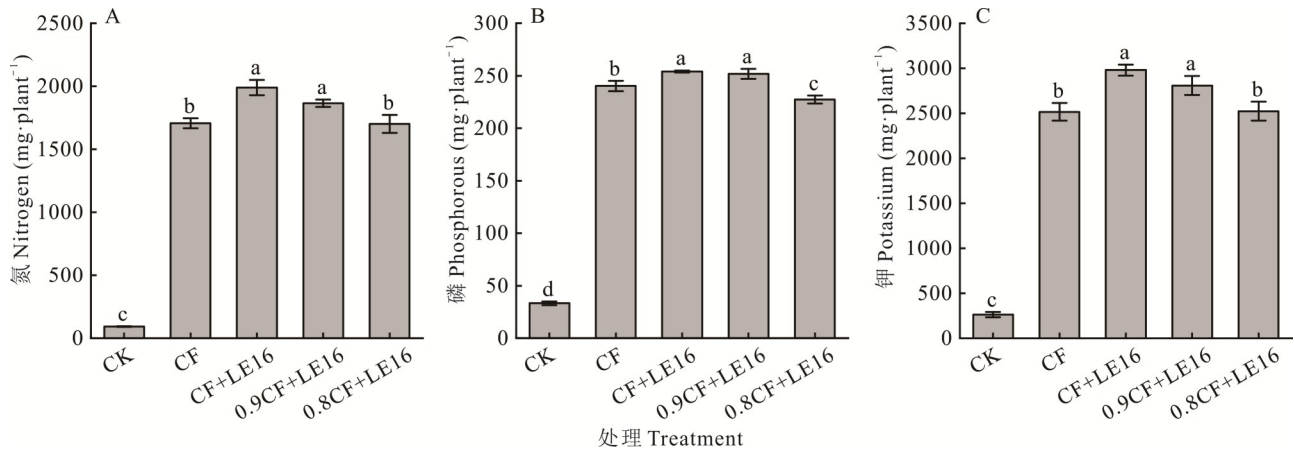


图5 不同处理烤烟的养分吸收量

Fig. 5 The nutrient uptake content of tobacco in different treatments

3 讨论

微生物是土壤中酶活性的重要来源之一,它们通过分泌多种胞外酶参与土壤有机质的分解和养分循环过程^[24]。土壤酶是衡量土壤肥力的一个重要指标,是土壤养分代谢的主要驱动因子,可以直接指示土壤养分转化和生化过程的发生程度和方向^[25-26]。其中,土壤中的蛋白酶和磷酸酶在有机氮和有机磷转化中具有重要作用,土壤蛋白酶的活性是土壤氮循环中的一个重要指标,蛋白酶催化蛋白质和多肽水解成寡肽和氨基酸,可用于指示土壤氮的矿化程度^[27];同时磷酸酶能够促进有机磷的转化和矿化,增加土壤中的有效磷含量^[28]。在实验室水平下,通过平板检测,菌株LE16能够分泌蛋白酶和磷酸酶。其次,土壤培养试验结果表明,土壤中接入LE16菌株可显著提高土壤中中性蛋白酶、中性磷酸酶的活性,以及碱解氮和有效磷的含量;说明菌株LE16通过提高土壤中酶的活性,矿化土壤中的有机氮和有机磷,进而增加其的含量,同时这也表明该菌株具有促生的潜力。

我国土壤经过长期、大量的施肥,目前已经累积了大量的养分,其全氮和全磷含量位于较高水平^[29-30]。但是,其中大部分是以有机氮和有机磷的形式存在,不能被植物直接吸收利用,微生物通过分泌酶类(如蛋白酶、磷酸酶等)催化有机氮和有机磷的水解,将其转化为植物可利用的无机态养分^[24,31]。有研究表明,土壤中添加微生物菌剂,通过提高土壤的酶活性,将土壤中复杂的有机化合物转化为更易吸收的小分子,为植物生长提供足够的氮和磷等营养来源,从而促进其生长^[32-33]。近年来,国内外在植物根际促生菌(PGPR)的研发与应用方面取得了显著进展,有效促进了多种作物的生长,并提高其产量^[34-36]。在烟草种植中,接种PGPR能够显著优化土壤的营养环境,增强磷酸酶活性,并调控耕作层中 $phoD$ 功能基因的微生物组成^[37]。在烤烟栽培过程中,施用含有克里本类芽孢杆菌(*Paenibacillus kribbensis* CX-7)的生物肥料,可在减少50%化肥用量的情况下,仍显著促进烟株的生长,并提高烟叶产量及经济产值^[38];研究表明,由解淀粉芽孢杆菌PEBA20制备的土壤改良剂对烤烟各项农艺性状有不同程度的促进效果,还能改变烟田土壤的理化性状及养分含量^[39],对烟田施用微生物有机肥菌剂可以有效改善烟株的各项农艺性状,烟株长势更好,烟田的产量、质量均得到显著改善^[40]。

本研究中,化肥配施LE16菌悬液能够提高土壤中性蛋白酶和中性磷酸酶活性,且试验结束后土壤碱解氮和有效磷含量较高。此外,化肥配施LE16菌悬液还显著促进了烤烟植株对氮、磷、钾养分的吸收量。说明将LE16菌悬液施入土壤中能够活化土壤中的中性蛋白酶和中性磷酸酶活性,矿化土壤中的有机氮和有机磷,进而增加土壤有效氮和有效磷的含量,并且在促进烤烟植株对氮、磷、钾养分吸收方面具有显著效果,尤其在减量化肥条件下仍能维持较高的养分吸收效率。因此,在烤烟的种植中,添加LE16菌悬液可以减少烤烟中氮肥和磷肥的施

入量。

4 结论

菌株 LE16 具备分泌蛋白酶和磷酸酶的能力。土壤培养试验结果表明,接种 LE16,土壤中的中性蛋白酶、中性磷酸酶活性、碱解氮和有效磷含量均显著增加。说明该菌株具有活化土壤碱解氮和有效磷的潜力。进一步盆栽试验结果表明,与单施化肥相比,90% 化肥+LE16 菌悬液能显著提高根际土壤中性蛋白酶和中性磷酸酶活性,促进有机氮和有机磷的矿化,从而提高烤烟对养分的吸收。因此,接种 LE16 能提高土壤酶活性,活化土壤养分,促进烤烟植株的生长,从而达到减肥增效的目的。

参考文献 References:

- [1] Wang H T, Zhong Z. Comparative advantage analysis of main planting areas of flue cured tobacco in China-calculation based on the data of 22 provinces in China from 1996 to 2021. *Modern Agricultural Research*, 2024, 30(1): 93–100.
王红桃, 钟自. 我国烤烟主要种植区域比较优势分析——基于全国 22 省 1996–2021 年数据测算. *现代农业研究*, 2024, 30(1): 93–100.
- [2] Tao F, Teng W, Li C J, *et al.* Nutrient input and output balance in flue-cured tobacco production in China. *Chinese Tobacco Science*, 2007, 28(3): 1–5.
陶芾, 滕婉, 李春俭, 等. 我国烤烟生产体系中的养分平衡. *中国烟草科学*, 2007, 28(3): 1–5.
- [3] Zhang W T. Problems and countermeasures of flue-cured tobacco fertilization in Shaanxi Province. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 61(4): 88–90.
张卫婷. 陕西省烤烟施肥的问题及对策. *陕西农业科学*, 2015, 61(4): 88–90.
- [4] Song G H, Yang X Y, Pan J H. Current status, existing problems and counter measures of fertilization for flue-cured tobacco in China. *Chinese Tobacco Science*, 1998, 19(4): 34–36.
宋国菡, 杨献营, 潘吉煊. 我国烤烟施肥现状、存在问题及对策. *中国烟草科学*, 1998, 19(4): 34–36.
- [5] Wang Y Z, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260–268.
王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260–268.
- [6] Wu H Q, Du S Y, Wang D Y, *et al.* Response of soil organic nitrogen fractions and tomato yield to irrigation and nitrogen fertilization in greenhouse. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 805–813.
吴汉卿, 杜世宇, 王丹阳, 等. 设施土壤有机氮组分及番茄产量对水氮调控的响应. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 805–813.
- [7] Xia F Y, Wei S L, Zhou S L. Research progress of soil phosphorous types and availability. *Forest Investigation Design*, 2009(3): 65–67.
夏凤禹, 魏胜利, 周胜利. 土壤磷素形态及其有效化途径的研究进展. *林业勘查设计*, 2009(3): 65–67.
- [8] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.
- [9] Hu T W, Mao Z Z, Shi J, *et al.* The role of taxation in tobacco control and its potential economic impact in China. *Tobacco Control*, 2010, 19(1): 58–64.
- [10] Shen S. Analysis on issues and countermeasures of tobacco industry in China. *Research on Development*, 2019(3): 136–140.
申坤. 中国烟草业存在的问题及对策. *开发研究*, 2019(3): 136–140.
- [11] Wang T T, Xu J X, Chen J, *et al.* Progress in microbial fertilizer regulation of crop growth and soil remediation research. *Plants*, 2024, 13(3): 346.
- [12] Philippot L, Raaijmakers J M, Lemanceau P, *et al.* Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, 11: 789–799.
- [13] Chen Y C, Sun X Y, Xie Z J, *et al.* Screening of rhizosphere growth promoting bacteria and their application in tailings improvement. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 50–63.
陈意超, 孙晓莹, 解智杰, 等. 根际促生菌的筛选及其在尾矿改良中的应用. *草业学报*, 2022, 31(7): 50–63.
- [14] Zhang T R, Jian Q H, Yao X Z, *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and quality of several

- crops. *Heliyon*, 2024, 10(10): e31553.
- [15] Lugtenberg B, Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 2009, 63: 541–556.
- [16] Chamkhi I, Sbabou L, Aurag J. Improved growth and quality of saffron (*Crocus sativus* L.) in the field conditions through inoculation with selected native plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Industrial Crops and Products*, 2023, 197: 116606.
- [17] Aydinoglu F, Kahriman T Y, Balci H. Seed bio-priming enhanced salt stress tolerance of maize (*Zea mays* L.) seedlings by regulating the antioxidant system and miRNA expression. *3 Biotech*, 2023, 13(11): 378.
- [18] Xu P Z, Bao Y Z, Guo K, *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria in the rhizosphere of *Pogostemon cablin*: isolation, screening, and plant growth-promoting characterization. *Microbiology China*, 2025, 52(9): 4141–4156.
许培增, 包韵滋, 郭焜, 等. 广藿香根际促生菌的分离、筛选及促生特性. *微生物学通报*, 2025, 52(9): 4141–4156.
- [19] Chen D M. Functions and mechanisms of the new *Lysobacter enzymogenes* strain LE16 in plant growth promoting and disease biocontrol. Chongqing: Southwest University, 2020.
陈丹梅. 产酶溶杆菌新株 *Lysobacter enzymogenes* LE16 的促生防病作用及机理. 重庆: 西南大学, 2020.
- [20] State Tobacco Monopoly Administration. Investigating and measuring methods of agronomical character of tobacco: YC/T 142–2010. Beijing: China Standards Press, 2010.
国家烟草专卖局. 烟草农艺性状调查测量方法: YC/T 142–2010. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [21] Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring. Beijing: China Land Press, 2008.
杨剑虹, 王成林, 代亭林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [22] Guan S Y. Soil enzymes and research methods. Beijing: Agricultural Press, 1986.
关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [23] Dick R P. Methods of soil enzymology. Madison: Soil Science Society of America, 2011.
- [24] Chaparro J M, Sheflin A M, Manter D K, *et al.* Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(5): 489–499.
- [25] Aponte H, Meli P, Butler B, *et al.* Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139744.
- [26] Ma S K, Huo K, Zhang D X, *et al.* Effects of maize straw return combined with nitrogen on soil enzyme activity and nitrogen fertilizer use efficiency in western dryland wheat fields of Henan Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 120–133.
马嵩科, 霍克, 张冬霞, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对豫西旱地小麦土壤酶活性和氮肥利用效率的影响. *草业学报*, 2023, 32(6): 120–133.
- [27] Greenfield L M, Puissant J, Jones D L. Synthesis of methods used to assess soil protease activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 158: 108277.
- [28] Chang D N, Chen Z Y, Han M, *et al.* Differences in phosphorus acquisition characteristics and rhizosphere properties among different hairy vetch genotypes. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 122–134.
常单娜, 陈子英, 韩梅, 等. 毛叶苕子磷获取特征及根际特性的基因型差异. *草业学报*, 2024, 33(4): 122–134.
- [29] Qu J F, Li J M, Xu M G, *et al.* Response of typical soil phosphorus evolution to long-term single nitrogen fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(11): 3933–3939.
曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 中国典型农田土壤磷素演化对长期单施氮肥的响应. *中国农业科学*, 2009, 42(11): 3933–3939.
- [30] Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, *et al.* Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687–694.
张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略. *植物学通报*, 2007, 24(6): 687–694.
- [31] Qi R S, Dang T H, Yang S Q, *et al.* Forms of soil phosphorus and P adsorption in soils under long-term crop rotation and fertilization systems. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1136–1146.
戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1136–1146.
- [32] Wang R, Shi J, Yao T, *et al.* Effects of two growth-promoting strains on tobacco growth and bacterial community in rhizosphere soil. *Chinese Tobacco Science*, 2025, 46(1): 46–55.
王睿, 师晶, 姚涛, 等. 两种促生菌对烟草生长和根际土壤细菌群落的影响. *中国烟草科学*, 2025, 46(1): 46–55.
- [33] Zhang S X, Li F M, Chang L Y, *et al.* Broad-spectrum applications of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) across

- diverse crops and intricate planting systems. *Microbiology Spectrum*, 2025, 13(3): e01879–24.
- [34] Sun Q P, Fan Y H, Li P Q, *et al.* Optimization of enzyme-producing conditions and probiotic effect of three strains of ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(2): 234–241.
孙庆培, 樊永红, 李佩琪, 等. 三株产 ACC 脱氨酶的植物根际促生菌产酶条件优化及促生作用研究. *中国土壤与肥料*, 2023(2): 234–241.
- [35] Dong A J, Qiu H Z, Dong L, *et al.* The colonization characteristics of *Paenibacillus jamilae* QHZ11-gfp in potato plants and its growth-promoting effect. *Microbiology China*, 2021, 48(11): 4075–4086.
董爱菊, 邱慧珍, 董莉, 等. 类芽孢杆菌 QHZ11-gfp 在马铃薯植株上的定殖特征及促生效果. *微生物学通报*, 2021, 48(11): 4075–4086.
- [36] Li H, Qiu Y, Yao T, *et al.* Effects of PGPR microbial inoculants on the growth and soil properties of *Avena sativa*, *Medicago sativa*, and *Cucumis sativus* seedlings. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104577.
- [37] Liang H, Wang Y, Chen Y L, *et al.* Effects of PGPR inoculants on physical and chemical properties of tobacco planting soil and composition of bacterial community containing *phoD*. *Chinese Tobacco Science*, 2022, 43(5): 61–67.
梁辉, 王勇, 陈玉蓝, 等. PGPR 菌剂对植烟土壤理化性状及 *phoD* 基因群落结构的影响. *中国烟草科学*, 2022, 43(5): 61–67.
- [38] Zhang A M. Screening of the specific solubilizing phosphate and potassium CX-7 strain and research on its applying experiment. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014.
张爱民. 解磷解钾特异菌株 CX-7 的筛选及其应用试验研究. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [39] Jiang M M. Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* on agronomic traits of tobacco and soil properties in tobacco field. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.
蒋敏敏. 解淀粉芽孢杆菌菌剂对烟草农艺性状及烟田土壤性状的影响. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [40] Liu H J, Liu L, Liu Y H, *et al.* Effects of different bio-organic fertilizers on yield and quality of flue-cured tobacco and soil nutrients. *Ecological Science*, 2018, 37(6): 91–96.
刘汉军, 刘蕾, 刘轶豪, 等. 不同生物有机肥对烤烟产质量及土壤养分的影响. *生态科学*, 2018, 37(6): 91–96.