

根际解钾菌的筛选及其对烟草钾素吸收的影响

刘岱松¹, 王义伟¹, 蔡柯², 张晓亮¹, 张自豪¹, 马俊锋¹, 苗春雨¹,
刘猛¹, 徐传强¹, 郑玉欣², 胡佳丽², 曹媛媛^{2*}

(1. 湖北省烟草公司十堰市公司, 十堰 442012; 2. 安徽农业大学生命科学院, 合肥 230036)

摘要: 为提高烟叶钾含量, 减少化肥施用量, 采用选择性培养基结合烟草凝集素的筛选方法从烟草根际筛选高效解钾菌株, 并分别通过盆栽试验和田间试验评估菌株对促进烟草生长及钾素吸收的效果。共筛选获得 6 株烟草根际解钾菌株, 其中假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)LK26 菌株具有较优良的促生长特性。盆栽试验表明 LK26 菌株可显著提高烟草叶片和根系重量, 提高烟草根际土壤钾含量及烟叶钾含量。田间试验表明, 与施加减钾肥 20%、未接种菌液及施全肥、未接种菌液的烟草植株相比, 接种 LK26 菌株的烟草植株其根际土壤钾含量分别提高 27.71% 和 10.25%; 其下叶、中叶和上叶钾含量分别提高 17.80% 和 5.30%, 40.59% 和 24.48% 以及 15.69% 和 5.36%。该菌株是一株潜在的烟草用生物钾肥优良菌株, 具有进一步研究和应用潜力。

关键词: 根际解钾菌; 烟草; 假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)LK26 菌株; 筛选; 钾素

中图分类号: S572; S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2023)04-0557-06

Isolation of potassium-solubilizing rhizobacteria and the effects on potassium absorption of tobacco plants

LIU Daisong¹, WANG Yiwei¹, CAI Ke², ZHANG Xiaoliang¹, ZHANG Zihao¹, MA Junfeng¹, MIAO Chunyu¹,
LIU Meng¹, XU Chuanqiang¹, ZHENG Yuxin², HU Jiali², CAO Yuanyuan²

(1. Shiyen Tobacco Company of Hubei Province, Shiyen 442012; 2. School of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: To increase the potassium content in tobacco leaves and reduce the amount of chemical fertilizer applied, a screening method via selective medium combined with tobacco lectin was used to screen highly efficient potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizosphere, and the effects of one of the isolated strains on promoting tobacco growth and potassium absorption were evaluated through pot and field experiments. A total of 6 strains of potassium-solubilizing bacteria were obtained from tobacco rhizosphere, among which *Pseudomonas* sp. strain LK26 exhibited excellent plant growth-promoting traits. The pot experiment showed that LK26 strain could significantly increase the weight of tobacco leaves and roots, and increase the potassium content in tobacco rhizosphere soil and tobacco leaves. The field experiment showed that compared with uninoculated tobacco plants with 20% reduced potash fertilizer and uninoculated tobacco plants with unreduced potash fertilizer, those inoculated with LK26 with 20% reduced potash fertilizer showed 27.71% and 10.25% higher the available potassium content in tobacco rhizosphere soil, respectively; and 17.80% and 5.30% higher potassium content in the lower leaves, 40.59% and 24.48% higher potassium content in the middle leaves, and 15.69% and 5.36% higher potassium content in the upper leaves, respectively. A potentially ideal biological potassium fertilizer-producing strain for use in tobacco production was developed. Strain LK26 has potential for further research and application.

Key words: potassium-solubilizing rhizobacteria; tobacco; *Pseudomonas* sp. strain LK26; screening; potassium

烟草 (*Nicotiana tabacum* L.) 是我国重要的经济作物, 是国家和地方财税的重要经济来源。钾是植物

生长必需的元素之一, 是多种酶的激活剂, 与水的调节、淀粉和蛋白质的合成以及植物的能量系统有关^[1]。

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 湖北省烟草公司科技项目 (027Y2020-011) 和国家级大学生创新创业训练计划项目 (202110364060) 共同资助。

作者简介: 刘岱松, 博士, 高级农艺师。E-mail: 93248645@qq.com

* 通信作者: 曹媛媛, 博士, 教授。E-mail: yq4339@ahau.edu.cn

烟叶钾含量是衡量烟叶质量的重要指标之一,钾含量的增加可显著提高烟叶弹性、燃烧性^[2-3],减少烟气中焦油、CO等有害物质的含量,提升烟叶品质^[4-5]。

Leymonie 和 Etourneaud^[6]提出优质烟叶最低钾含量应达到 2%,美国、津巴布韦等国的烟叶钾含量大多在 2.5%以上,而我国北方烟区烟叶钾含量很少超过 2%,因此烟叶钾含量一直是限制我国烟业发展的主要因素。烟叶中的钾元素主要来源于土壤。虽然土壤中钾含量充足,但速效钾含量不超过 2%,95%的钾为无效形态^[7],限制了植物对钾素的吸收,导致植物缺钾。烟草对钾的需求量极大,烟叶生产中常施用大量钾肥为烟草供给钾元素,而大量化学肥料的施用严重污染了土壤生态环境,并引起灌溉土壤水体污染,对人类健康安全与生态环境造成极大威胁^[8]。因此需要寻找新型无污染生物肥料,减少化肥施用量,提高烟叶品质,减少环境污染。

“生物肥料”被定义为以微生物生命活动导致农作物获得特定肥料效应,达到促进作物生长、提高产量和品质的一类含有活性微生物的制品。生物肥料可提高作物生产力并参与养分循环,已被公认为商业无机肥料的替代品^[9]。土壤由各种矿物质、水和有机质组成,由于一些微生物的存在,使得土壤中有些不溶性或游离性质的必需营养素或微量营养素得以转化成植物可利用的形式从而使土壤肥沃,而根际是微生物活跃的区域,土壤、植物和微生物之间的强烈相互作用在此区域发生^[10-11]。植物根际存在多种微生物,其中具有促进植物生长发育或抑制根际病原菌能力的一类有益菌群称为植物根际促生菌 (plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)^[12],可制成生物肥料,用于农业生产。PGPR 主要为假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.)、芽胞杆菌属 (*Bacillus* sp.)、肠杆菌 (*Enterobacter* sp.)和节杆菌属 (*Arthrobacter* sp.)等^[13]。一些 PGPR 菌株可产生吲哚乙酸 (IAA),起到增加植物生长素的作用,并可通过刺激植物的细胞分裂和伸长促进根系的生长;一些 PGPR 菌株可固定大气中的氮气,为植物生长提供氮源^[14],还有些 PGPR 菌株可通过营养物质/有机物质的增溶和矿化来提高植物根际土壤养分含量。近年来,由于钾矿石稀缺以及化学钾肥价格较高,使得 PGPR 备受瞩目。解钾菌 (potassium solubilizing bacteria) 的使用是满足作物对钾素需求的有效技术之一。解钾菌是 PGPR 的一种,可通过溶解和矿化作用将土壤中难溶性钾元素及被土壤固化的钾素化肥转化为可溶性钾,促进植物对钾素的吸收,减少钾肥施用量,提高钾肥利用率^[15-16],对实现农

业可持续发展具有重要意义^[17]。

本研究筛选对烟草具有亲和性的解钾菌株,考察解钾菌株解钾能力、产 IAA 能力、产铁载体等促生长特性,并进行盆栽及大田试验,研究菌株对烟叶钾含量、烟株生长的影响,以期提高烟叶钾含量,提高烟叶品质,降低烟田钾肥施用量,为研发高效的烟草解钾菌剂提供优良菌种。

1 材料与方法

1.1 材料

烟草根际土:从十堰烟田健康烟草根际获得。

烟草品种:云烟 87 品种,由湖北省烟草公司十堰市公司提供。

1.2 方法

1.2.1 烟草根际解钾菌的筛选 挑选健康的烟草植株,将烟草根部挖出,除去烟草根系附着的较大土块和碎石块,保留烟草根际土壤。将 1 g 烟草根际土壤加入 100 mL 无菌生理盐水中,120 r·min⁻¹ 振荡 30 min 后制备 10⁻⁴~10⁻⁶ 系列稀释液,分别涂布于解钾细菌培养基^[13]平板,28 °C 培养 7 d,挑取透明圈较明显的菌株进行分离纯化,获得解钾菌株。参考龚文秀等^[18]的方法,按研磨过筛、石油醚脱脂、磷酸缓冲液 (PBS) 浸提、微孔过滤的步骤从烟草种子中提取烟草凝集素粗提液。将筛选获得的解钾菌株接种于 LB 培养基,28 °C,160 r·min⁻¹ 震荡培养 24 h 后用生理盐水离心洗涤 (4 000 r·min⁻¹, 8 min) 3 次,再用生理盐水悬浮,制成浓度为 10⁸ CFU·mL⁻¹ 的菌悬液。在载玻片上滴加 20 μL 上述提取的烟草凝集素粗提液,分别与等量的菌悬液混匀,并在相同条件下,取 20 μL 磷酸缓冲液与等量菌悬液混匀的样品作对照,室温下静置反应 30 min 后自然干燥,使用显微镜观察有无凝集反应。若有凝集反应,则菌株与烟草凝集素具有亲和性,保存备用。

1.2.2 菌株生理生化特征及分子鉴定 按照 Holt 等^[19]的方法,测定菌株部分生理生化特征,包括革兰氏染色、芽胞观察、接触酶试验、甲基红试验 (M-R 试验)、乙酰甲基甲醇试验 (V-P 试验)、葡萄糖氧化发酵试验 (O/F)、产 H₂S 试验和明胶液化试验。采用细菌 16S rDNA 通用引物对各解钾菌株 16S rDNA 序列进行 PCR 扩增,扩增产物送至生工生物工程(上海)有限公司进行测序,通过 BLAST 在 NCBI 中进行序列同源性比对,结合细菌形态及生理生化特征判定菌株种属。

1.2.3 烟草根际解钾菌促生长特性研究 测定菌株解钾能力、产 IAA 能力和产铁载体能力等促生长特

性。其中, 解钾能力采用火焰光度计法测定^[16], 产 IAA 能力采用 Salkowski 比色法测定^[20], 产铁载体能力采用 CAS 法测定^[21]。选取解钾促生能力较强的菌株进行后续盆栽和田间试验。

1.2.4 烟草根际解钾菌 LK26 菌株盆栽试验效果评估 选取解钾能力和产 IAA 能力较好的烟草亲和性解钾菌 LK26 菌株进行盆栽试验。将 LK26 菌株接种于 LB 液体培养基中, 28 °C、160 r·min⁻¹ 培养至 OD₆₀₀ 为 0.8。将烟草种子浸泡于无菌水中 10 h 左右, 除去漂浮的不饱满的种子, 再用无菌水清洗 3 ~ 4 次后, 平铺于已垫有湿润滤纸的无菌培养皿中, 28 °C 光照培养箱中 (光暗比 16:8) 静置 3 ~ 4 d 至烟草种子露白。将露白的烟草种子在上述制备的菌液中浸种 45 min 后, 播种于营养土中, 于 28 °C 人工气候温室 (光暗比 16:8) 育苗, 30 d 后移至装有 10 kg 黄褐土的花盆 (盆高 22 cm, 上口径 33.5 cm, 下口径 18 cm) 中, 室外自然条件下种植。每个处理设 10 个重复, 并以露白的烟草种子浸于无菌 LB 液体培养基中的相同处理为对照。土壤养分含量为铵态氮 17.81 mg·kg⁻¹、有效磷 42.09 mg·kg⁻¹ 和速效钾 233.00 mg·kg⁻¹, 所有土壤施肥 (g·kg⁻¹ 土) CO(NH₂)₂ 0.41。烟草植株生长至盛花期打顶后, 测定烟叶与根系鲜重及干重, 收集中叶, 湿灰化法^[22]测定烟草中叶钾含量, 火焰光度计法^[23]测定根际土壤速效钾含量。采用单因素检验分析方法对数据进行差异显著性和相关性分析。

1.2.5 烟草根际解钾菌 LK26 菌株田间试验效果评估 田间试验在湖北省十堰市竹溪县泉溪镇烟田开展, 试验面积 12 亩。将烟草亲和性解钾菌 LK26 菌株接种于 LB 液体培养基中, 28 °C、160 r·min⁻¹ 培养至 OD₆₀₀ 为 0.8。烟草采用漂浮床育苗, 待生长至出苗期时, 顺着烟苗茎部施加 LK26 菌液, 每株烟

苗施加菌液 1 mL。烟苗生长至成苗期移栽至大田。田间试验的对照组分为两组: 减钾肥 20%, 未接种菌液 (CK1); 施全肥, 未接种菌液 (CK2)。移栽时, 施菌处理组烟苗移栽入钾肥用量减少 20% 的田块。大田土壤为壤土, 施肥情况为每亩施烟草专用肥 55 kg、饼肥 30 kg, 施全肥对照组 CK2 每亩另施硫酸钾 4.44 kg、硝酸钾 3.3 kg, 施菌处理组和减钾肥 20% 对照组 CK1 每亩另施硝酸钾 0.7 kg。烟叶成熟后采收、烘烤、分类, 选取各处理组上桔二、中桔三和下桔二叶片, 湿灰化法^[22]测定烟叶钾含量, 并取各处理根际土壤, 火焰光度计法^[23]测定根际土壤速效钾含量。采用单因素检验分析方法对数据进行差异显著性和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 烟草根际解钾菌的筛选、鉴定及促生长特性研究

通过解钾细菌培养基平板初筛, 获得 21 株烟草根际解钾菌。采用烟草凝集素复筛, 其中 6 株菌对烟草凝集素具有亲和性, 分别命名为菌株 LK2、LK23、LK24、LK25、LK26 和 LK41。这 6 株解钾菌均不产芽胞, 其中 4 株菌革兰氏染色呈阳性; 1 株菌分解葡萄糖的方式为氧化型, 4 株菌分解葡萄糖的方式为发酵型, 1 株菌不分解葡萄糖, 为产碱型; 4 株菌 VP 试验为阳性, 5 株菌明胶液化试验为阳性, 6 株菌 M-R 试验均为阴性, 所有菌均具有接触酶活性, 但均不能产硫化氢 (表 1)。经 16S rDNA 测序分析结合菌株生理生化特征, 2 株菌 (LK26、LK41) 被鉴定为假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.), 3 株菌 (LK2、LK23 和 LK24) 被鉴定为节杆菌属 (*Arthrobacter* sp.), 1 株菌 (LK25) 被鉴定为类节杆菌属 (*Paenarthrobacter* sp.) (表 2)。

表 1 烟草根际解钾菌株部分生理生化特征

Table 1 Selected physiological and biochemical characteristics of potassium-releasing rhizobacteria isolated from the tobacco rhizosphere

| 菌株编号 | 革兰氏染色 | 芽胞 | 接触酶 | M-R | VP | 葡萄糖氧化发酵 | 产硫化氢 | 明胶液化 |
|------|-------|----|-----|-----|----|---------|------|------|
| LK2 | + | - | + | - | + | 氧化型 | - | + |
| LK23 | + | - | + | - | + | 发酵型 | - | + |
| LK24 | + | - | + | - | - | 发酵型 | - | + |
| LK25 | + | - | + | - | + | 产碱型 | - | + |
| LK26 | - | - | + | - | + | 发酵型 | - | + |
| LK41 | - | - | + | - | - | 发酵型 | - | - |

“+”：阳性；“-”：阴性。

测定菌株解钾能力、产 IAA 能力、产铁载体能力等促生长特性, 结果 (表 3) 显示 6 株菌均具有解钾和产 IAA 能力, 5 株菌具有产铁载体能力。其中, LK26 菌株解钾和产 IAA 能力最强, 分别达 12.00

mg·L⁻¹ 和 11.46 mg·L⁻¹; LK25 菌株产铁载体能力最强, 达++水平。综合 3 个促生长特性指标, 假单胞菌 LK26 菌株性能较优良, 因此选取该菌株进行后续盆栽和田间试验, 评估菌株增钾效果。菌株 LK26

的菌落形态、革兰氏染色后的细胞形态及其在解钾培养基上形成的解钾圈见图 1。

表 2 菌株鉴定结果
Table 2 Identification of the isolates

| 属名 | 菌株编号 |
|--------------------------------------|---------------|
| 假单胞菌属 (<i>Pseudomonas</i> sp.) | LK26、LK41 |
| 节杆菌属 (<i>Arthrobacter</i> sp.) | LK2、LK23、LK24 |
| 类节杆菌属 (<i>Paenarthrobacter</i> sp.) | LK25 |

表 3 菌株促生长特性
Table 3 Plant growth-promoting traits of the isolates

| 菌株编号 | 解钾能力/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | 产 IAA 能力/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | 产铁载体能力 |
|------|--|--|--------|
| LK2 | 6.47±0.52 | 9.86±0.75 | + |
| LK23 | 11.03±0.97 | 4.22±0.35 | + |
| LK24 | 7.13±0.71 | 2.92±0.14 | + |
| LK25 | 6.70±0.80 | 6.50±0.26 | ++ |
| LK26 | 12.00±0.91 | 11.46±0.76 | + |
| LK41 | 5.77±0.22 | 4.98±0.31 | - |

注：“-”表示为不产铁载体，“+”表示为产铁载体，“+”越多表示为产铁载体能力越强。

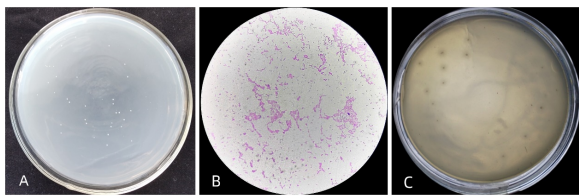
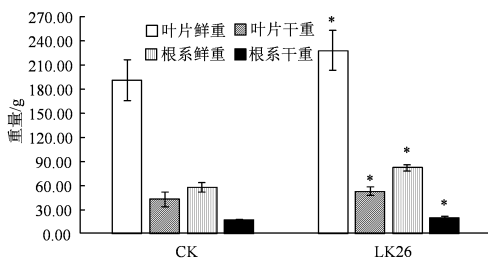


图 1 菌株 LK26 的菌落形态(A)、细胞形态(B)和解钾圈(C)
Figure 1 Colony morphology(A), cell morphology(B) and transparent circles(C) around the colonies appeared in potassium-releasing bacteria medium of strain LK26



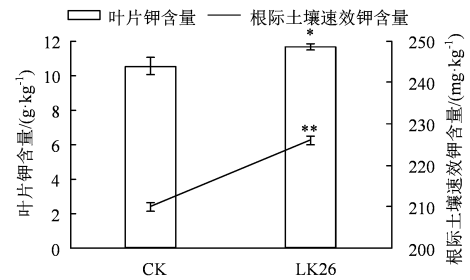
CK 为未接种菌液的烟草植株, LK26 为接种 LK26 菌液的烟草植株, *表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
图 2 盆栽试验中 LK26 菌株对烟草叶片重量和根系重量的影响

Figure 2 Effects of strain LK26 on the leaf weight and root weight of tobacco plants in a pot experiment

2.2 烟草根际解钾菌 LK26 菌株盆栽试验效果

盆栽试验中解钾菌 LK26 菌株对烟草叶片重量和根系重量的影响结果(图 2)显示, 与未接种菌液的对照植株相比, 接种 LK26 菌液的植株其烟草叶片鲜重、叶片干重、根系鲜重和根系干重分别提

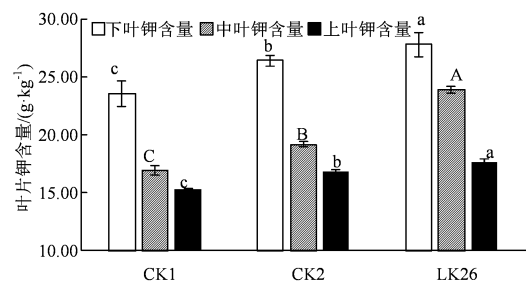
高 19.10%、23.23%、42.58%和 21.10%。LK26 菌株对烟草叶片鲜重、叶片干重、根系鲜重和根系干重均具有显著地促进作用 ($P < 0.05$), 可显著促进烟草的生长。



CK 为未接种菌液的烟草植株, LK26 为接种 LK26 菌液的烟草植株, *表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), **表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

图 3 盆栽试验中 LK26 菌株对烟草叶片钾含量及根际土壤速效钾含量的影响

Figure 3 Effects of strain LK26 on the potassium content in tobacco leaves and the available potassium content in tobacco rhizosphere soil in a pot experiment



CK1 为减钾肥 20%、未接种菌液的烟草植株; CK2 为施全肥、未接种菌液的烟草植株; LK26 为接种 LK26 菌液的烟草植株; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

图 4 田间试验中 LK26 菌株对烟草叶片钾含量的影响
Figure 4 Effects of strain LK26 on the potassium content in tobacco leaves in a field experiment

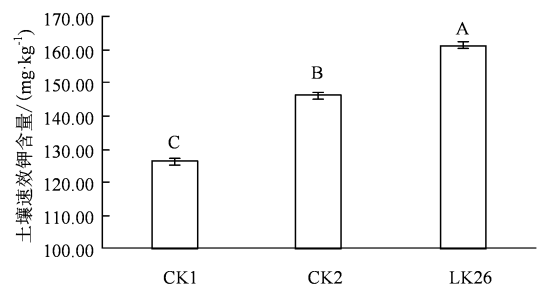


图 5 田间试验中 LK26 菌株对烟草根际土壤速效钾含量的影响

Figure 5 Effects of strain LK26 on the available potassium content in tobacco rhizosphere soil in a field experiment

盆栽试验中解钾菌 LK26 菌株对烟草叶片钾含量和根际土壤速效钾含量的影响见图 3。由图 3 可看出,较未接种菌液的对照植株相比,接种 LK26 菌液的植株其叶片钾含量提高 10.72%, 达显著水平 ($P < 0.05$); 根际土壤速效钾含量提高 7.62%, 达极显著水平 ($P < 0.01$)。表明该菌株可活化土壤中难溶态钾, 释放速效钾, 为烟草提供钾素养分, 提高烟叶钾含量。

2.3 烟草根际解钾菌 LK26 菌株田间试验效果

田间试验中解钾菌 LK26 菌株对烟草叶片钾含量的影响结果(图 4)表明:与减钾肥 20%、未接种菌液的烟草植株 (CK1) 以及施全肥、未接种菌液的烟草植株 (CK2) 相比,接种 LK26 菌液的烟草下叶钾含量 ($27.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别提高 17.80% 和 5.30%, 达显著水平 ($P < 0.05$); 中叶钾含量 ($23.90 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别提高 40.59% 和 24.48%, 达极显著水平 ($P < 0.01$); 上叶钾含量 ($17.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别提高 15.69% 和 5.36%, 达显著水平 ($P < 0.05$)。田间野外条件下, LK26 菌株亦可有效提高烟叶钾含量。

田间试验中解钾菌 LK26 菌株对烟草根际土壤速效钾含量的影响见图 5。由图 5 可看出:接种 LK26 菌液的烟草根际土壤钾含量 ($161.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 较减钾肥 20%, 未接种菌液的烟草植株 (CK1) 提高 27.71%; 较施全肥, 未接种菌液的烟草植株 (CK2) 提高 10.25%, 均达极显著水平 ($P < 0.01$)。田间野外条件下, LK26 菌株亦可释放土壤速效钾, 提高烟草根际土壤钾含量, 为烟草生长提供钾素养分。

3 讨论与结论

烟草是喜钾植物, 影响烟草品质的关键指标之一是烟叶钾含量^[24], 但由于土壤中的难溶态钾难以被有效吸收利用, 我国生产的烟叶大多难以达到优质烟的标准。采用生物生态法促进土壤矿物形态的钾素溶解, 是提高土壤中可供烟草吸收利用的有效钾, 提升烟叶品质, 减少化学肥料施用量, 响应国家生物农业发展的有效途径^[25]。

解钾菌可活化土壤钾素养分、改善土壤理化性质, 达到改善农作物品质和提高产量的目的。Postma 等^[26] 研究表明, 施用解钾菌后的土壤速效钾含量提升了 $13.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。高加明等^[27] 研究表明, 施加解钾菌 NGW1 的烟草上、中、下烟叶含钾量均显著提升。谢雨歆等^[28] 利用植物根际促生菌提升烤烟质量, 结果发现 B2F 和 C3F 等级烟叶的钾含量分别较对照组增加 16.0% 和 35.4%; 万兵兵等^[29] 采用筛选出的高效解钾菌株 YC4 进行盆栽试验, 发

现试验土壤中的速效钾比未施菌的对照提高 4.72%, 植株钾含量提升 29.57%。

假单胞菌是一种重要的植物根际促生菌, 是已知植物根际有益微生物中种群数量较大的细菌种类之一。很多研究者从不同植物根际筛选获得了多株具有促生功能的荧光假单胞菌^[30-32], 并发现其中一些菌株具有解钾能力, 可显著促进根际土壤速效钾和植物叶片钾含量^[33-34]。但将假单胞菌应用于田间以提高烟叶钾含量却鲜有报道。

本研究采用选择性培养基结合烟草凝集素的筛选方法从烟草根际筛选到 6 株与烟草凝集素具有亲和性的烟草根际解钾菌, 这些菌株分属 3 个属, 分别为假单胞菌属 (*Pseudomonas* sp.)、节杆菌属 (*Arthrobacter* sp.) 和类节杆菌属 (*Paenarthrobacter* sp.)。其中假单胞菌 LK26 菌株具有较优良的解钾和产 IAA 能力, 用于进一步的盆栽试验和田间试验, 评估菌株增钾效果。田间野外条件下, 接种 LK26 菌株的烟草根际土壤钾含量较减钾肥 20%、未接种菌液和施全肥、未接种菌液的烟草植株分别提高 27.71% 和 10.25%; 其下叶、中叶和上叶钾含量分别提高 17.80% 和 5.30%, 40.59% 和 24.48% 以及 15.69% 和 5.36%。在钾肥施用量减少 20% 的同时, 烟草下叶和中叶钾含量分别达 2.78% 和 2.39%, 达优质烟叶标准。研究结果表明 LK26 菌株可显著促进烟草生长, 活化土壤难溶态钾, 提高土壤速效钾含量, 有效提高烟叶钾含量。该菌株是一株潜在的烟草用生物钾肥优良菌株, 具有进一步研究和应用的潜力。本研究为研发烟草用高效解钾生物肥料提供优良菌株材料和技术指导。

参考文献:

- [1] 索雲凯, 刘丽红, 张雷, 等. 解钾菌解钾作用研究进展[J]. 当代化工, 2021, 50(4): 924-929.
- [2] WANG X Q, WANG B W, SONG Z B, et al. A spatial-temporal understanding of gene regulatory networks and NtARF-mediated regulation of potassium accumulation in tobacco[J]. *Planta*, 2021, 255(1): 9.
- [3] PI K, LUO W, MO Z J, et al. Overdominant expression of related genes of ion homeostasis improves K^+ content advantage in hybrid tobacco leaves[J]. *BMC Plant Biol*, 2022, 22(1): 335.
- [4] 于建军, 李国栋, 李世勇, 等. 烤烟矿质元素含量、静燃速率与烟气成分的相关分析[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(4): 355-357.
- [5] 汪波, 屠兢, 俞寿明, 等. 钾盐在烟草燃烧过程中的作用[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(4): 433-439.
- [6] LEYMONIE J P, ETOURNEAUD F. Fertilizer and to-

- bacco[J]. Tobacco Reporter, 1996 (4): 69-72.
- [7] 连宾. 硅酸盐细菌的解钾作用研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1998.
- [8] 刘淑琮, 冯妍, 于洁. 植物根际促生菌的研究进展及其环境作用[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(11): 2882-2887.
- [9] KOUR D, RANA K L, YADAV A N, et al. Microbial bio-fertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability[J]. Biocatal Agric Biotechnol, 2020, 23: 101487.
- [10] GROVER M, BODHANKAR S, SHARMA A, et al. PGPR mediated alterations in root traits: way toward sustainable crop production[J]. Front Sustain Food Syst, 2021, 4: 618230.
- [11] MENDES R, GARBEVA P, RAAIJMAKERS J M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms[J]. FEMS Microbiol Rev, 2013, 37(5): 634-663.
- [12] GOUDA S, KERRY R G, DAS G, et al. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture[J]. Microbiol Res, 2018, 206: 131-140.
- [13] AI W F, GUO T T, LAY K D, et al. Isolation of soybean-specific plant growth-promoting rhizobacteria using soybean agglutinin and evaluation of their effects to improve soybean growth, yield, and soil nutritional status[J]. Microbiol Res, 2022, 261: 127076.
- [14] KHATOON Z, HUANG S L, RAFIQUE M, et al. Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems[J]. J Environ Manag, 2020, 273: 111118.
- [15] CHEN Y P, REKHA P D, ARUN A B, et al. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities[J]. Appl Soil Ecol, 2006, 34(1): 33-41.
- [16] ZHANG C S, KONG F Y. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants[J]. Appl Soil Ecol, 2014, 82: 18-25.
- [17] 谢如林, 谭宏伟, 周柳强, 等. 无径流和淋溶条件下钾肥利用率的研究[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(1): 36-41.
- [18] 龚文秀, 曹媛媛, 倪海婷, 等. 烟草亲和性解钾 PGPR 菌株筛选及其促生效果研究[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(1): 55-63.
- [19] HOLT J G, KRIEG N R, SNEATH P H A, et al. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. 9th[M]. Philadelphia: Lippincott Williams&Wilkins, USA, 1994.
- [20] MOHITE B. Isolation and characterization of indole acetic acid (IAA) producing bacteria from rhizospheric soil and its effect on plant growth[J]. J Soil Sci Plant Nutr, 2013(ahead).
- [21] SCHWYN B, NEILANDS J B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores[J]. Anal Biochem, 1987, 160(1): 47-56.
- [22] TANG Z H, ZHANG A J, WEI M, et al. Physiological response to potassium deficiency in three sweet potato (*Ipomoea batatas*[L.]Lam.) genotypes differing in potassium utilization efficiency[J]. Acta Physiol Plant, 2015, 37(8): 184.
- [23] 张乃凤. 土壤速效钾的测定—醋酸铵浸提、火焰光度计测定法[J]. 土壤肥料, 1974(1): 33-35.
- [24] DING M M, WEI B, ZHANG Z, et al. Effect of potassium organic and inorganic salts on thermal decomposition of reconstituted tobacco sheet[J]. J Therm Anal Calorim, 2017, 129(2): 975-984.
- [25] 付恭华, 王莹, 鄢帮有. 生态农业与中国未来的粮食安全[J]. 江西农业大学学报(社会科学版), 2013, 12(3): 289-294.
- [26] POSTMA J A, LYNCH J P. Root cortical aerenchyma enhances the growth of maize on soils with suboptimal availability of nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. Plant Physiol, 2011, 156(3): 1190-1201.
- [27] 高加明, 张健行, 余梦林, 等. 土壤高效解钾菌的筛选鉴定及烟草栽培应用效果评价[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(7): 34-39, 46.
- [28] 谢雨歆, 曾庆宾, 杨军伟, 等. 植物根际促生细菌在烤烟提质增产中的作用[J]. 烟草科技, 2017, 50(7): 14-21, 30.
- [29] 万兵兵, 刘晔, 吴越, 等. 烟草根际解磷解钾菌的筛选鉴定及应用效果研究[J]. 河南农业科学, 2016, 45(9): 46-51.
- [30] GAMEZ R, CARDINALE M, MONTES M, et al. Screening, plant growth promotion and root colonization pattern of two rhizobacteria (*Pseudomonas fluorescens* Ps006 and *Bacillus amyloliquefaciens* Bs006) on banana cv. Williams (*Musa acuminata* Colla)[J]. Microbiol Res, 2019, 220: 12-20.
- [31] LUKASHE N S, MUPAMBWA H A, GREEN, et al. Inoculation of fly ash amended vermicompost with phosphate solubilizing bacteria (*Pseudomonas fluorescens*) and its influence on vermi-degradation, nutrient release and biological activity[J]. Waste Manag, 2019, 83: 14-22.
- [32] STRITZLER M, TISSERA A D, SOTO G, et al. Plant growth-promoting bacterium *Pseudomonas fluorescens* FR1 secretes a novel type of extracellular polyhydroxybutyrate polymerase involved in abiotic stress response in plants[J]. Biotechnol Lett, 2018, 40(9): 1419-1423.
- [33] 杨晓帆, 梁家慧, 于文英, 等. 促生荧光假单胞菌对桃树根区土壤环境和植株生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(8):1494-1508.
- [34] CAO Y Y, NI H T, LI T, et al. *Pseudomonas* sp. TK35-L enhances tobacco root development and growth by inducing HRGPnt3 expression in plant lateral root formation [J]. J Integr Agric, 2020, 19(10): 2549-2560.