

## 微生物菌肥对黄芪生长、活性物质积累及土壤养分吸收的影响

陈燕<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 张丹<sup>2</sup>, 孙永平<sup>3</sup>, 姚文智<sup>4</sup>, 王孝芳<sup>5</sup>, 张琨健<sup>6</sup>, 董妙音<sup>1\*</sup>, 栗孟飞<sup>1,7\*</sup>

1. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070
2. 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070
3. 甘肃大行农业科技开发有限公司, 甘肃 兰州 730070
4. 华池县恒烽中药材苗林有限公司, 甘肃 庆阳 745000
5. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095
6. 大连理工大学 化工海洋与生命学院, 辽宁 盘锦 124221
7. 甘肃农业大学农学院 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**摘要:** 目的 筛选适宜黄芪生长、活性物质积累和土壤养分吸收的微生物菌肥。方法 对大田栽培黄芪施用6种微生物菌肥(T1~T6), 以不施微生物菌肥为对照, 测定生长期白粉病发病率以及收获期成药根生长特性、主要活性物质和土壤养分含量。结果 不同微生物菌肥对黄芪生长、活性物质积累和土壤养分吸收具有显著影响; 其中, T5(溶磷菌)白粉病发病率最低(22.90%), T4(枯草芽孢杆菌)较有利于根产量形成, T3(链霉菌)较有利于多糖、总黄酮和总酚化合物的积累, 4个黄酮类化合物(毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素)总含量以T6(溶磷、固氮菌)最高(744.36 μg/g)、4个皂苷类化合物(黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷IV)总含量以T1(产酶溶杆菌)最高(104.62 μg/g), T4处理1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)清除率最大(61.00%)、T6处理铁离子还原/氧化能力(ferric reducing/antioxidant power, FRAP)值最高(946.10 μmol/L); 综合质量评价(D值)显示T4(0.74)、T3(0.64)和T6(0.58)较有利于黄芪综合质量形成。种植黄芪可导致土壤pH值和全盐量升高以及全钾含量降低, 通过施用微生物菌肥和适量化肥, 可在一定程度上缓解pH值和全盐量升高、提高土壤养分含量; 其中, T6较有利于有机质、全氮和速效磷吸收, T4有利于全钾和碱解氮吸收, T3有利于全氮和碱解氮吸收。结论 施用微生物菌肥可显著促进黄芪质量形成和土壤养分吸收, 其中T4(枯草芽孢杆菌)、T6(溶磷、固氮菌)和T3(链霉菌)较为显著, 将为黄芪微生物菌肥研发和应用提供重要参考。

**关键词:** 黄芪; 微生物菌肥; 生长特性; 活性物质积累; 土壤养分吸收; 毛蕊异黄酮葡萄糖苷; 芒柄花苷; 毛蕊异黄酮; 芒柄花素; 黄芪甲苷I; 黄芪甲苷II; 黄芪甲苷III; 黄芪甲苷IV

中图分类号: R286 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)11-4057-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.11.

## Effects of microbial fertilizers on plant growth, bioactive metabolites accumulation, and soil nutrient absorption of *Astragalus mongholicus*

CHEN Yan<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>2</sup>, SUN Yongping<sup>3</sup>, YAO Wenzhi<sup>4</sup>, WANG Xiaofang<sup>5</sup>, ZHANG Kunjian<sup>6</sup>, DONG Miaoyin<sup>1</sup>, LI Mengfei<sup>1,7</sup>

1. School of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China
2. State Key Lab of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China
3. Gansu Daxing Agricultural Technology Development Co., Ltd., Lanzhou, 730070, China
4. Huachi County Hengfeng Herbal Medicine Seedling Forest Co., Ltd., Qingyang 745000, China
5. School of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China
6. School of Chemical Engineering Ocean and Life Sciences, Dalian University of Technology, Panjin, 124221, China
7. School of Agronomy & State Key Lab of Aridland Crop Science, Agronomy College; Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

收稿日期: 2024-12-05

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3501500); 干旱生境作物学国家重点实验室开放基金资助项目(GSCS-2022-Z04, GSCS-2024-13); 国家现代农业产业技术体系(CARS-21); 甘肃省科技重大专项(23ZDNK002); 甘肃省科技支撑项目(KJZC-2023-11); 甘肃省高校教师创新基金项目(2024A-051); 甘肃省高校青年博士支持项目(2025QB-046)

作者简介: 陈燕(1996—), 女, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要从事药用植物栽培方面研究。E-mail: chenyan042720@163.com

\*通信作者: 董妙音(1992—), 男, 甘肃临夏人, 博士, 副教授, 主要从事药用植物生物学方面研究。E-mail: dongmy@gsau.edu.cn

栗孟飞(1980—), 男, 河南驻马店人, 博士, 教授, 主要从事药用植物资源与利用方面研究。E-mail: lmf@gsau.edu.cn

**Abstract: Objective** To select suitable microbial fertilizers for plant growth, bioactive metabolite accumulation, and soil nutrient absorption of *Astragalus mongholicus*. **Methods** Six microbial fertilizers (T1—T6) were applied for the *A. mongholicus* in the field with the un-applied fertilizer as the control (CK), the incidence of powdery mildew at growth stage, and the growth characteristic of roots, content of main bioactive metabolites as well as absorption of soil nutrients at harvest stage were determined. **Results** Different microbial fertilizers significantly affected growth characteristics, bioactive metabolite accumulation, and soil nutrient absorption of *A. mongholicus*. The lowest incidence of powdery mildew (22.90%) under the T5 (phosphate-solubilizing bacteria), the root yield were improved under the T4 (*Bacillus subtilis*), and the contents of the polysaccharide, total flavonoids and phenolics were increased under the T3 (*Streptomyces avidinii*). The total content of four flavonoids compounds (calycosin-7-O- $\beta$ -D-glucoside, ononin, calycosin, and formononetin) reached the highest level (744.36  $\mu\text{g/g}$ ) under the T6 (nitrogen-fixing and phosphorus-solubilizing compound microbial fertilizer), the total content of four saponins (astragaloside I, astragaloside II, astragaloside III, and astragaloside IV) reached the highest level (104.62  $\mu\text{g/g}$ ) under the T1 (*Bacillus amyloliquefaciens*). The highest DPPH scavenging activity (61.00%) and FRAP value (946.10  $\mu\text{mol Fe(II)/L}$ ) were shown under the T4 and T6, respectively. The comprehensive appraisal value (*D*) showed that comprehensive quality of *A. mongholicus* could be formed under the T4 (0.74), T3 (0.64) and T6 (0.58). Planting *A. mongholicus* could lead to the increase of pH level and total salt content as well as the decrease of total potassium content in the soil, the application of microbial fertilizers supplemented with appropriate amount chemical fertilizers could alleviate the increase of pH level and total salt content, increase the content of soil nutrients. The T6 was conducive to the absorption of organic matter, total nitrogen and available phosphorus; the T4 was conducive to the absorption of total potassium and alkaline nitrogen; and the T3 was conducive to the absorption of total nitrogen and alkaline hydrolyzed nitrogen. **Conclusion** The application of microbial fertilizers can significantly improve the quality formation of *A. mongholicus* and the absorption of soil nutrients, with the T4 (*Bacillus subtilis*), T6 (Nitrogen-fixing and phosphorus-solubilizing compound microbial fertilizer) and T3 (*Streptomyces avidinii*) showing the most significant improvement, these findings will provide important references for microbial fertilizers research and application of *A. mongholicus*.

**Key words:** *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao; microbial fertilizer; growth characteristic; bioactive metabolite accumulation; soil nutrient absorption; calycosin-7-O- $\beta$ -D-glucoside; ononin; calycosin; formononetin; astragaloside I; astragaloside II; astragaloside III; astragaloside IV

黄芪为豆科植物蒙古黄芪 *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao 或膜荚黄芪 *A. membranaceus* (Fisch.) Bge. 的干燥根, 具有补气升阳、固表止汗、利水消肿、生津养血、托毒排脓、敛疮生肌等功能<sup>[1]</sup>。药理学研究表明, 黄芪具有抗炎、抗氧化、抗肿瘤、增强免疫等功效, 主要依赖于多糖类、皂苷类、黄酮类等化学成分<sup>[2-3]</sup>。黄芪独特和多样的传统功能和现代功效, 已被纳入药食同源目录, 市场需求量急剧增加, 促使人工栽培面积扩大、重茬种植、肥料过量施用, 导致病虫害、连作障碍、土壤板结等问题日益凸显<sup>[4-5]</sup>。近年来调查显示, 黄芪栽培中为害较重的病害有白粉病和根腐病, 其中白粉病的发病率在 9~10 月份可达 100%, 根腐病发病率 30%~50%; 为害严重的害虫有蚜虫、豆荚螟、蛴螬、地老虎等, 危害率约 30%, 可造成大面积减产<sup>[6]</sup>。同时, 人工栽培黄芪的活性成分含量波动显著 (黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷), 较野生药材降低了 50.4% 和 68.1%<sup>[7]</sup>。

研究表明, 连作对作物生长会造成不同程度的危害 (如长势变弱、发育不良、病虫害加剧、产量

和品质降低等), 主要归咎于土壤理化性质恶化、土壤酶活性降低、自毒物质积累、微生物群落结构发生了显著变化<sup>[8]</sup>。目前, 连作障碍在药用植物栽培中尤为严重, 克服的有效措施主要有土壤改良和消毒、微生物防治、抗性品种选育、种子处理、多元栽培模式应用等<sup>[9]</sup>。研究发现, 黄芪长期连作使得土壤有机质、全氮、酶活性、根际菌落多样性和丰富度显著降低, 导致黄芪产量、外观品质和主要活性物质 (如黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、总多糖) 含量等显著下降, 严重影响药材质量稳定性<sup>[10]</sup>。通过多元栽培、配方施肥、微生物菌肥施用等措施可有效缓解黄芪连作障碍, 如 Li 等<sup>[11]</sup>研究发现黄芪与燕麦轮作, 可显著促进黄芪生长, 提高土壤有机质、全氮、全磷和速效钾含量, 增加黄芪根际细菌群落多样性和有益细菌 (如梭菌纲、红色杆菌目和小单孢菌目) 丰度; 高游慧等<sup>[12]</sup>研究发现合理施肥 (有机肥+矿物肥+微生物肥) 可有效促进黄芪根系对氮、钾、铁、锰、铜、锌的吸收和积累, 茎叶对磷的吸收和积累; 梁华等<sup>[13]</sup>研究发现施用固氮菌肥后黄芪株高、根长和干质量分别提高 23.24%、36.25% 和 63.47%, 黄酮、皂苷和多糖含量分别提高 21.51%、

21.52%和 57.42%。

课题组前期研究发现,加拿大一枝黄花根际菌株 395 (产酶溶杆菌 *Lysobacter enzymogenes*) 对尖孢镰刀菌具有较强拮抗效果,可显著促进丹参生长,降低根腐病发病率<sup>[14]</sup>;番茄根际菌株 T-5 (解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amyloliquefaciens*) 对青枯病原菌具有较强拮抗效果,可显著降低番茄青枯病发病率<sup>[15]</sup>;当归根际菌株 (链霉菌 *Streptomyces avidinii*) 对尖孢镰刀菌具有较强拮抗效果,可显著降低当归根腐病发病率;燕麦根际混合菌株 (枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*、蕈状芽孢杆菌 *Bacillus mycoides*、荧光假单胞菌 *Pseudomonas fluorescens*) 对木贼镰刀菌具有较强拮抗作用,能显著促进燕麦和狗尾草生长,降低植株根腐病发病率<sup>[16-17]</sup>;黄芪根际根瘤菌 *Rhizobium* 可显著促进根瘤形成,增加土壤氮含量,促进黄芪生长和代谢物积累,并从根际中分离出具有溶磷 (GNP1、GNP3) 和固氮 (GNN4、GNRN1) 作用的菌<sup>[6]</sup>。本研究基于功能互补原则,选取产酶溶杆菌 (裂解病原菌)、解淀粉芽孢杆菌 (分泌抗菌脂肽) 和根瘤菌 (固氮促生) 等 6 种特性明确的菌株,通过大田试验系统评价微生物菌肥对黄芪生长、活性物质及土壤养分的影响,旨在解析多功能菌群协同增效机制,为黄芪微生物菌肥的研发和应用提供科学依据。

## 1 材料与仪器

### 1.1 材料

供试黄芪种苗由华池县恒烽中药材苗林有限公司提供,经甘肃农业大学董妙音副教授鉴定为蒙古黄芪 *A. membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao 的根。

### 1.2 试验区概况

试验地位于甘肃省榆中县马坡乡河湾村三伏

社 (2616.1 m; 35°45'21"N, 104°0'28"E), 年均气温约 6 °C, 年降雨量约 550 mm, 无霜期约 160 d, 试验地土壤为砂壤土, 前茬板蓝根收获后未施肥料。0~20 cm 土壤理化性质: pH 值 7.47、全盐量 2.97%、有机质 19.05 g/kg、全氮 1.11 g/kg、全磷 0.56 g/kg、全钾 20.15 g/kg、碱解氮 60.12 mg/kg、速效磷 78.21 mg/kg 和速效钾 5.75 mg/kg。

## 2 方法

### 2.1 试验设计

在试验地土壤肥力基础上, 设对照处理 (不施微生物菌肥, CK) 和 6 个微生物菌肥施肥处理 (T1~T6), 于 2024 年 4 月 25 日, 配施 30 kg 硫酸钾复合肥 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=18:18:18), 一次性做基肥施用, 具体施用量参考高游慧等<sup>[12]</sup>的方法 (表 1)。6 个施肥处理深翻 20~30 cm, 耙耱与土壤充分均匀混合。每个处理设 3 个小区重复, 每小区面积为 34.9 m<sup>2</sup>, 相邻小区间设 40 cm 垄宽; 其中, T1、T2 和 T3 菌株由南京农业大学王孝芳副教授提供, T4 菌株由甘肃大行农业科技开发有限公司孙永平总经理提供, T5 和 T6 菌株由甘肃农业大学董妙音副教授提供, T1~T6 微生物菌肥均由甘肃大行农业科技开发有限公司统一生产。2024 年 4 月 28 日~5 月 5 日, 选取大小较为均一的黄芪种苗 (根长 30~35 cm、直径 4~6 mm), 按照行距 30 cm×株距 15 cm 进行膜侧移栽。植株生长至采收期, 除人工除草外, 不再进行施肥和灌溉。

### 2.2 生长指标测定

2024 年 10 月 14 日, 待黄芪植株地上部分开始枯萎, 每个处理小区选取 1 m×1 m 样方, 采挖根系, 抖净泥土, 测定芦头直径 (主根顶端最粗的位置) 和根长 (芦头到根尖的距离), 然后用流水冲洗根表面土壤、自然阴干后称量根干质量, 并换算亩产量。

表 1 不同微生物菌肥施用量

Table 1 Application amount of different microbial fertilizers

处理	微生物菌肥	有效活菌数/(CFU·g <sup>-1</sup> )	施用量/(kg·亩 <sup>-1</sup> ) (1亩=666.7 m <sup>2</sup> )
CK	/		CK
T1	产酶溶杆菌	2×10 <sup>8</sup>	1000+CK
T2	解淀粉芽孢杆菌	1×10 <sup>8</sup>	1000+CK
T3	链霉菌	1×10 <sup>8</sup>	1000+CK
T4	枯草芽孢杆菌	≥2×10 <sup>8</sup>	1000+CK
T5	GNP1单菌 (溶磷菌)	1×10 <sup>8</sup>	1000+CK
T6	GNP1、GNP3、GNN4、GNRN1 (溶磷、固氮菌) 混合菌	1×10 <sup>8</sup>	1000+CK

### 2.3 白粉病发病情况统计

2024年8月25日, 种苗移栽后约100 d, 每个处理小区选取1.0 m×1.0 m样方, 统计不同处理下白粉病发病率。

白粉病发病率=样方内发病株数/样方内总株数

### 2.4 主要活性成分测定

**2.4.1 供试品溶液的制备** 取阴干后的根, 粉碎后过80目筛, 准确称取1.0 g粉末置于50 mL离心管, 加入20 mL甲醇超声提取3 h; 然后在4 °C、6 000 r/min下离心10 min, 收集上清液并用甲醇定容至20 mL, 所得供试品溶液于4 °C保存, 每个处理重复3次。

**2.4.2 多糖、总黄酮和总酚含量测定** 多糖含量测定采用硫酸苯酚法<sup>[18]</sup>, 测定时供试品溶液加样量为25 μL, 其含量以蔗糖为标准品标定。总黄酮类化合物含量测定采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠法<sup>[19]</sup>, 测定时供试品溶液加样量为400 μL, 其含量以儿茶素为对照品标定。总酚类化合物含量测定采用福林酚试剂法<sup>[20]</sup>, 测定时供试品溶液加样量为400 μL, 其含量以没食子酸为对照品标定。

#### 2.4.3 黄酮类、皂苷类化合物的测定

(1) 供试品溶液的制备: 具体方法同“2.4.1”项。

(2) 黄酮类化合物对照品溶液的制备: 精密称取毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素各5.0 mg, 色谱甲醇溶解并定容至10 mL, 分别制成0.5 mg/mL的单标储备液; 根据实际检测需求, 将每个单标精密吸取1.25 mL母液, 并用色谱甲醇定容至5 mL, 得质量浓度为125 μg/mL的混合对照品溶液, 4 °C下保存备用。

(3) 皂苷类化合物对照品溶液的制备: 精密称取黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷

IV各5.0 mg, 色谱甲醇溶解并定容至5 mL, 分别制成1 mg/mL的单标储备液; 根据实际检测需求, 将每个单标精密吸取1.25 mL母液, 并用色谱甲醇定容至5 mL, 得质量浓度为250 μg/mL的混合对照品溶液, 4 °C下保存备用。

(4) 色谱条件: 黄酮类化合物含量测定采用HPLC法<sup>[21]</sup>。色谱柱为Eclipse Plus C<sub>18</sub> (250 mm×4.6 mm, 5 μm), 流动相乙腈(A)-0.1%磷酸水溶液(B), 进样量5.0 μL, 体积流量1.0 mL/min, 柱温30 °C; 梯度洗脱(0~5 min, 35%~65% A; 5~10 min, 65%~35% A; 10~13 min, 35%~85% A; 13~15 min, 85%~15% A; 15~20 min, 15%~90% A), 检测波长260 nm。以靶向黄酮类化合物(毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素)混合对照品溶液(125 μg/mL), 代表性色谱图见图1-A, 利用质量浓度和峰面积为参照计算靶向黄酮类化合物含量。

(5) 质谱条件: 皂苷类化合物含量测定采用LC-MS法<sup>[22]</sup>。色谱柱Shim-Pack XR-ODS (75 mm×3.0 mm, 2.2 μm); 流动相0.1%甲酸水溶液(A)-乙腈(B)流动相, 进样量5.0 μL, 体积流量0.3 mL/min, 柱温35 °C, 梯度洗脱(0~5 min, 25%~45% B; 5~8 min, 45%~60% B)。质谱测定采用三重四极杆液质联用, 电喷雾离子源(ESI源), 负离子模式检测, 源喷雾电压4 000 V, 雾化气压力为35 psi。靶向黄芪甲苷IV化合物多反应监测模式(multiple responses monitoring)质谱图见图1-B。

(6) 线性关系考察: 分别精密吸取黄酮类和皂苷类混合对照品溶液适量, 用色谱甲醇分别逐级稀释成不同质量浓度(100、50、25和12.5 μg/mL)黄酮类和(100、50、25和10 μg/mL)皂苷类的对

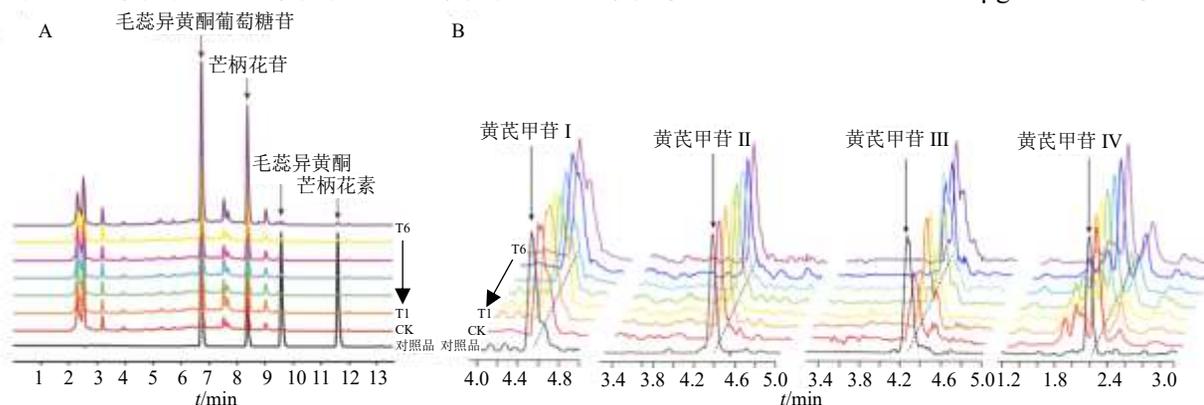


图1 黄酮类化合物测定的HPLC(A)和皂苷类化合物的LC-MS谱图(B)

Fig. 1 HPLC chromatograms for determination of flavonoids (A) and LC-MS spectra for saponins (B)

照品溶液。按照“(4)”“(5)”项下色谱和质谱条件测定，以对照品浓度为横坐标( $X$ )，峰面积为纵坐标( $Y$ )，绘制标准曲线，得线性回归方程，结果见表2。

表2 线性回归方程

Table 2 Linear regression equations

化合物	回归方程	$r^2$	线性范围/ $(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$
毛蕊异黄酮葡萄糖苷	$Y=47.614 X-23.459$	0.999 5	12.5~125
芒柄花苷	$Y=20.756 X-0.981$	0.999 8	12.5~125
毛蕊异黄酮	$Y=44.052 X-0.541$	0.998 2	12.5~125
芒柄花素	$Y=45.545 X-0.419$	0.998 4	12.5~125
黄芪甲苷I	$Y=3.875 X$	0.995 5	10~250
黄芪甲苷II	$Y=13.832 X$	0.995 3	10~250
黄芪甲苷III	$Y=4.348 X$	0.996 2	10~250
黄芪甲苷IV	$Y=0.092 X$	0.994 5	10~250

(7)精密度试验:精密称取样品粉末,按照“(1)”项下方法制备,“(4)”“(5)”项下色谱和质谱条件连续进样6次,计算得到黄酮类化合物(毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素)和皂苷类化合物(黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷IV)相对峰面积RSD分别为5.15%、5.76%、3.97%、4.67%、5.56%、5.60%、5.53%、5.97%。

(8)稳定性试验:精密称取样品粉末,按照“(1)”项下方法制备,“(4)”“(5)”项下色谱和质谱条件在0、2、4、8、12、24 h测定黄酮类化合物(毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素)和皂苷类化合物(黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷IV)相对峰面积RSD值分别为5.91%、4.97%、3.15%、2.52%、5.63%、3.64%、5.92%、2.18%。

(9)重复性试验:精密称取样品粉末6份,按照“(1)”项下方法制备,“(4)”“(5)”项下色谱和质谱条件测定,计算得到黄酮类化合物(毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素)和皂苷类化合物(黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷IV)的质量分数RSD分别为5.06%、2.65%、5.87%、4.58%、3.47%、3.25%、4.61%和5.34%。

(10)加样回收率试验:取本品粉末1.0 g,平行6份,精密加入与样品中含量相当黄酮类化合物(毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素)和皂苷类化合物(黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷IV),按照“(1)”项下方法制备供试品溶液,并计算平均加样回收率及RSD,毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花

苷、毛蕊异黄酮、芒柄花素、黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷IV的回收率分别为98.44%、103.86%、99.81%、103.06%、98.16%、101.01%、105.23%、102.50%,RSD值分别为2.04%、4.72%、3.81%、3.75%、2.09%、2.55%、5.02%、1.73%。

2.4.4 体外抗氧化能力测定 体外抗氧化能力测定采用1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)和铁离子还原/氧化能力(ferric reducing/antioxidant power, FRAP)2种方法<sup>[23-24]</sup>,测定时供试品溶液加样量为800  $\mu\text{L}$ 。

## 2.5 土壤理化性质测定

2024年4月28日,黄芪移栽时采集土壤;2024年10月14日,黄芪成药根采挖时采集土壤。每个处理设3个小区重复,小区内采用5点取样法采集土壤,具体方法为清除土壤表面杂物,垂直挖取20 cm土壤样品,自封袋密封带回实验室后摊开风干,按照四分法取舍,依次过20目、60目筛,分别保留1.0 kg土壤样品。土壤样品具体测定指标包括:有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、pH和全盐量,测定方法见表3。

## 2.6 统计分析与综合评价

2.6.1 统计与分析 每个施肥处理和测定均重复3次,采用SPSS 22.0软件进行One-way ANOVA Duncan数据差异显著性分析,并利用Microsoft Office Excel 2021软件制图。

2.6.2 综合评价 采用模糊综合评价法<sup>[27]</sup>对6种微生物菌肥综合质量进行评价,具体公式为:

$$R(x_i) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$$

$R(x_i)$ 为隶属函数值,  $x_i$ 为 $i$ 的函数值,  $x_{\min}$ 为 $x$ 的最小值,

表3 土壤理化性质测定指标和方法

Table 3 Determination indicators and methods for soil physicochemical properties

测定指标	测定方法 <sup>[25-26]</sup>	测定依据
pH	电极法	LY/T1239-1999
全盐量	电导率法	LY/T1251-1999
有机质	重铬酸钾硫酸氧化-外加热法	LY/T1237-1999
碱解氮	碱解扩散法	LY/T1228-2015
有效磷	碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法	LY/T1232-2015
速效钾	乙酸铵浸提-火焰光度法	LY/T1234-2015
全钾	碱熔-火焰光度法	LY/T1234-2015
全氮	凯氏定氮法	LY/T1228-2015
全磷	硫酸消煮-钼锑抗比色法	LY/T1232-2015

$x_{max}$  为  $x$  的最大值

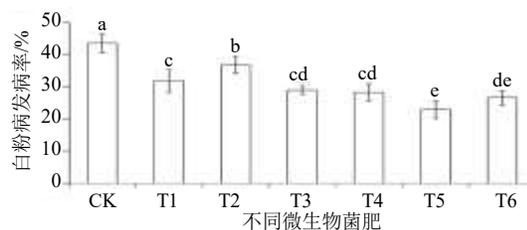
$$D(x_i) = \sum [R(x_i) \times C_i]$$

$D(x_i)$  为综合评价值,  $C_i$  为权重系数

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同微生物菌肥对黄芪白粉病发病率的影响

图2结果显示, 6种微生物菌肥均可显著降低黄芪白粉病发病率, T1~T6相对CK分别降低1.36、1.18、1.50、1.54、1.90和1.64倍, 其中T5发病率最低(22.90%), 显著低于其他处理, 其次为T6(26.50%)和T4(28.18%)。



不同字母表示不同处理之间在  $P < 0.05$  水平下达到显著差异, 下同。  
Different letters indicate a significant difference at  $P < 0.05$  level among different treatments, same as below.

图2 不同微生物菌肥对黄芪白粉病的影响

Fig. 2 Effects of different microbial fertilizers on powdery mildew of *A. mongholicus*

#### 3.2 不同微生物菌肥对黄芪植株生长特性的影响

图3结果显示, 不同微生物菌肥对黄芪根直径、根干质量和产量具有显著影响。T4处理根直径(13.71 mm)显著高于T1、T2和T3, 与T5、T6和CK未达到显著差异; T4处理根干质量最大(15.95 g/株), 显著高于其他处理, T6(14.13 g/株)和T3(13.34 g/株)其次, CK、T1和T2三者无显著差异; T4处理产量最高(438.00 kg/亩)(1亩=666.7 m<sup>2</sup>), 相对CK、T1、T2、T3、T5和T6分别提高1.15、1.30、1.20、1.05、1.05和1.11倍; 然而, 6种微生物肥料处理下根长差异不显著。以上结果表明, T4处理较有利于黄芪植株生长、干质量积累和产量形成。

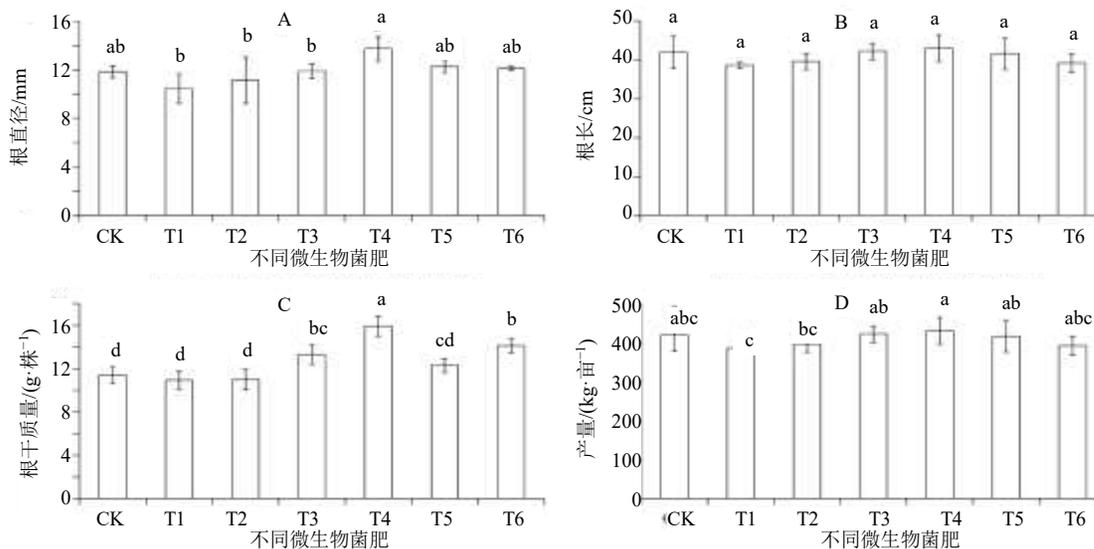


图3 不同微生物菌肥对黄芪生长指标的影响

Fig. 3 Effects of different microbial fertilizers on growth indicators of *A. mongholicus*

#### 3.3 不同微生物菌肥对黄芪活性物质积累的影响

3.3.1 不同微生物菌肥对黄芪多糖、总黄酮和总酚含量影响 图4结果显示, 相对于CK, 施用微生物

菌肥均可显著促进黄芪多糖、总黄酮和总酚化合物的积累, 但不同微生物菌肥处理间多糖、总黄酮和总酚含量存在较大差异。以干质量计算, T3处理

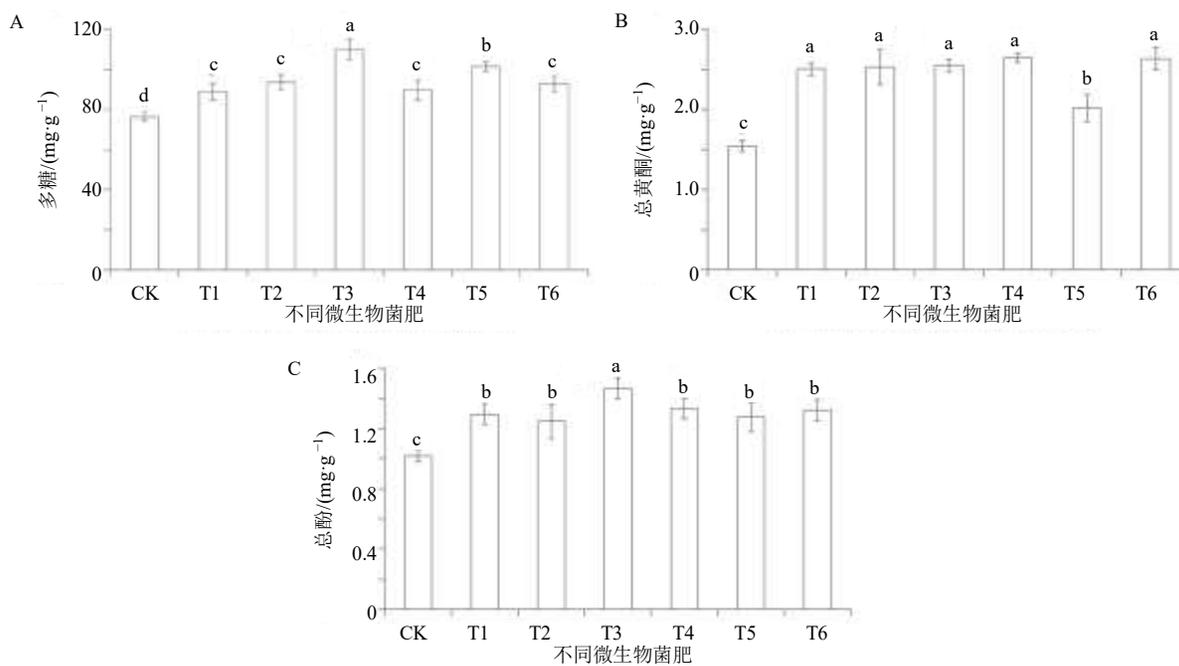


图4 不同微生物菌肥对黄芪多糖 (A)、总黄酮 (B) 和总酚 (C) 的影响

Fig. 4 Effects of different microbial fertilizers on polysaccharides (A), total flavonoids (B), and total phenolics (C) in *A. mongholicus*

多糖含量最高 (109.94 mg/g), T1、T2、T4 和 T6 之间无显著差异; T4 处理总黄酮含量最高 (2.64 mg/g), 与 T1、T2、T3 和 T6 无显著差异; T3 处理总酚含量最高 (1.47 mg/g), 显著高于其他处理, 其他处理之间无显著差异; T3 处理多糖、总黄酮和总酚三者总含量最高 (113.92 mg/g)、其次为 T5 (104.68 mg/g) 和 T2 (92.39 mg/g), CK 最低 (78.86 mg/g)。以上结果表明, T3 处理较有利于黄芪多糖、总黄酮和总酚化合物含量的合成和积累。

**3.3.2 不同微生物菌肥对黄酮类和黄芪甲苷类化合物含量的影响** 图 5 结果显示, 不同微生物菌肥对 4 个黄酮类 (毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、芒柄花素和毛蕊异黄酮) 和 4 个皂苷类 (黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和黄芪甲苷IV) 化合物积累具有显著影响。以干质量计算, T6 处理芒柄花苷 (419.62  $\mu\text{g/g}$ ) 和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量 (317.14  $\mu\text{g/g}$ ) 显著高于对照和其他处理; T4 处理芒柄花素 (5.39  $\mu\text{g/g}$ ) 和毛蕊异黄酮 (5.22  $\mu\text{g/g}$ ) 显著高于对照其他处理 (图 5-A); 4 个黄酮类化合物总含量以 T6 最高 (744.36  $\mu\text{g/g}$ ), T1 (642.98  $\mu\text{g/g}$ ) 和 T3 (615.15  $\mu\text{g/g}$ ) 次之。T1 处理黄芪甲苷IV (103.20  $\mu\text{g/g}$ )、黄芪甲苷I (0.82  $\mu\text{g/g}$ ) 和黄芪甲苷III (0.32  $\mu\text{g/g}$ ) 含量显著高于对

照和其他处理; T1 (0.29  $\mu\text{g/g}$ )、T4 (0.29  $\mu\text{g/g}$ ) 和 T6 (0.27  $\mu\text{g/g}$ ) 处理黄芪甲苷II含量显著高于对照和其他处理, 但 T1、T4 和 T6 之间无显著差异 (图 5-B); 4 个皂苷类化合物总含量以 T1 最高 (104.62  $\mu\text{g/g}$ ), CK (92.65  $\mu\text{g/g}$ ) 和 T2 (91.88  $\mu\text{g/g}$ ) 次之。

**3.3.3 不同微生物菌肥对黄芪体外抗氧化能力的影响** 图 6 结果显示, 不同微生物菌肥对黄芪体外抗氧化能力具有显著影响。T1、T3、T4 和 T6 处理 DPPH 清除率显著高于 CK, 其中, T4 处理清除率最大 (61.00%), 尽管 T2 和 T5 高于 CK, 但未达到显著差异 (图 6-A); 6 个处理中, 除 T5 与 CK 无显著差异, 其他处理均显著高于 CK, 其中 T6 处理 FRAP 值最高 [946.10  $\mu\text{mol Fe (II) /L}$ ], 其次为 T1 [808.46  $\mu\text{mol Fe (II) /L}$ ] 和 T4 [796.02  $\mu\text{mol Fe (II) /L}$ ], 见图 6-B。

### 3.4 不同微生物菌肥黄芪生长特性、活性物质含量和抗氧化能力的综合评价

表 4 结果显示, 采用 FCAM 对 6 种微生物菌肥处理下黄芪生长特性 (根直径、根长、根干质量和产量)、主要活性物质 (多糖、总黄酮、总酚类、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮、芒柄花素、黄芪甲苷I、黄芪甲苷II、黄芪甲苷III和

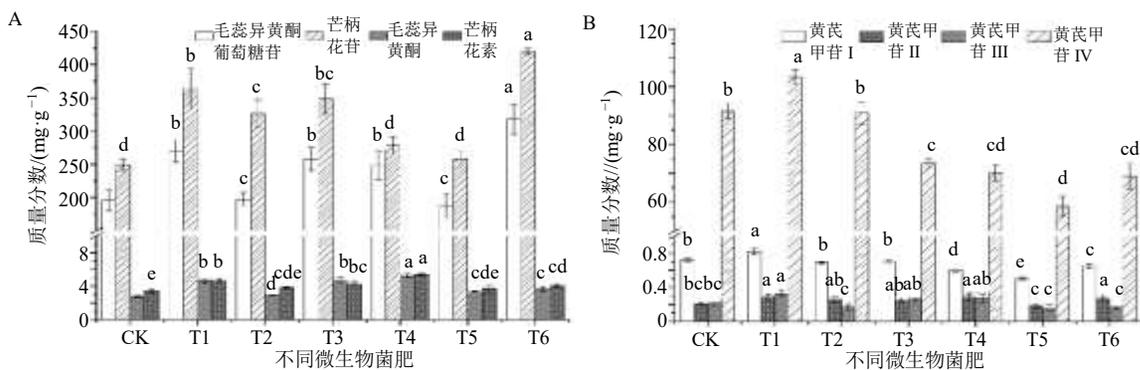


图5 不同微生物菌肥对黄芪黄酮类 (A) 和皂苷类 (B) 化合物含量的影响

Fig. 5 Effects of different microbial fertilizers on contents of target flavonoids (A) and saponins (B) in *A. mongholicus*

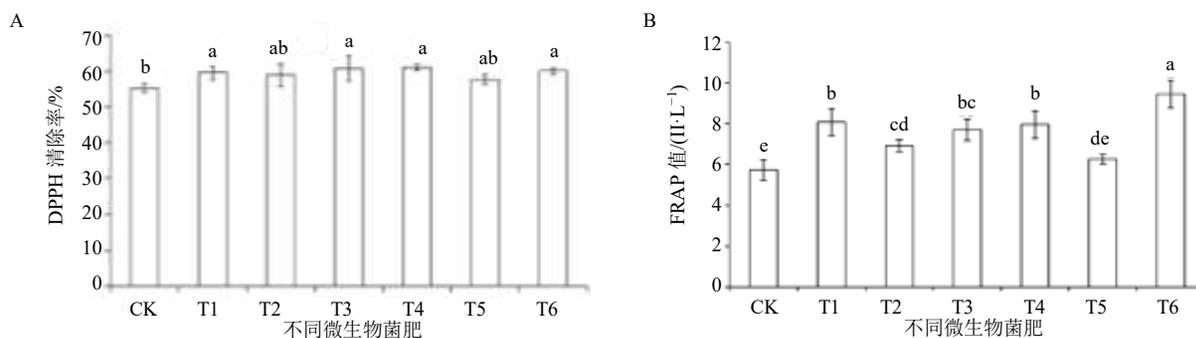


图6 不同微生物菌肥对黄芪 DPPH 清除率 (A) 和 FRAP 值 (B) 的影响

Fig. 6 Effects of different microbial fertilizers on DPPH radical scavenging rate (A) and FRAP value (B) of *A. mongholicus*

芪甲苷IV) 含量以及抗氧化能力 (DPPH 清除率和 FRAP 值) 进行综合质量评价。综合质量评价价值 (*D* 值) 为 0.21~0.74, T4 处理黄芪 *D* 值 (0.74) 最高, T3 (0.64) 和 T6 (0.58) 次之, CK 最小 (0.21)。以上结果表明, T4、T3 和 T6 处理较有利于黄芪综合质量的提升。

### 3.5 不同微生物菌肥对土壤理化性质的影响

表 5 结果显示, 与移栽前土壤 (CK0) 相比, 种植黄芪后土壤 pH 值、全盐量和除全钾外的土壤养分 (土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾) 均呈现不同程度升高。与 CK 相比, 施用 6 种微生物菌肥后, 土壤 pH 值和全盐量均呈现显著下降; 其中, T5 处理 pH (7.61) 最低, 比其他处理低 0.1~0.2; T3 处理全盐量最低 (3.259%), 比其他处理低 0.366%~1.221%。土壤养分含量呈现不同程度变化; 有机质含量在 T5 处理 (35.60 g/kg) 显著增加, 其他处理无显著差异; 全氮含量在 T2 (1.77 g/kg)、T4 (1.78 g/kg) 和 T5 处理 (1.77 g/kg) 均显著增加, T6 处理显著降低, T3 处理无显著差

异; 全磷、全钾和碱解氮含量在 T1~T6 处理均无显著差异; 速效磷含量在 T2~T5 处理均显著增加, 其中 T2 处理含量最高 (27.32 mg/kg), T6 处理显著降低, T1 处理无显著差异; 速效钾含量在 T1~T6 处理均显著增加, 其中 T2 处理含量最高 (136.30 mg/g)。以上结果表明, 种植黄芪可导致土壤 pH 值和全盐量升高, 施用微生物菌肥可在一定程度上缓解 pH 值和全盐量升高; 除全钾降低外, 其他土壤养分均在一定程度上增加。

### 4 讨论

微生物菌肥是指将具有促生和抗病特性的微生物菌株添加到有机物料中进行发酵而形成的一种有机肥料, 其能通过提供营养物质、调节激素水平、激活免疫系统、改善土壤微生物群落结构和功能等作用促进药用植物生长发育和活性物质合成<sup>[28-29]</sup>。本研究发现施用微生物菌肥可显著促进黄芪生长、活性物质积累和土壤养分吸收。

前人研究发现, 芽孢杆菌<sup>[30]</sup>、链霉菌<sup>[31]</sup>和假单胞杆菌等可通过分泌抗菌物质 (如脂肽类、铁载体)

表4 不同微生物菌肥处理下黄芪生长特性、活性物质含量和抗氧化能力的综合评价

Table 4 Comprehensive appraisal of growth characteristics, bioactive compounds contents, and antioxidant capacity of *A. mongholicus* under different microbial fertilizer treatments

综合质量评价	不同处理隶属函数值							平均值	标准差系数	权重系数
	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6			
根直径	0.76	0.00	0.22	0.81	1.00	0.67	0.13	0.51	4.38	0.06
根长	0.43	0.00	0.20	0.44	1.00	0.56	0.50	0.45	4.02	0.05
根干质量	0.10	0.00	0.01	0.48	1.00	0.27	0.64	0.36	6.01	0.08
产量	0.41	0.00	0.26	0.78	1.00	0.78	0.59	0.55	3.66	0.05
白粉病发病率	0.00	0.56	0.33	0.71	0.74	1.00	0.83	0.60	3.26	0.04
多糖	0.00	0.37	0.51	1.00	0.40	0.75	0.49	0.50	3.60	0.05
总黄酮	0.00	0.78	1.00	0.88	0.94	0.58	0.84	0.72	2.77	0.04
总酚	0.00	0.62	0.51	1.00	0.70	0.57	0.67	0.58	2.99	0.04
毛蕊异黄酮葡萄糖苷	0.06	0.63	0.07	0.54	0.47	0.00	1.00	0.40	5.39	0.07
芒柄花苷	0.00	0.67	0.45	0.58	0.17	0.05	1.00	0.42	5.05	0.07
毛蕊异黄酮	0.00	0.79	0.07	0.81	1.00	0.26	0.35	0.47	4.86	0.06
芒柄花素	0.00	0.61	0.20	0.42	1.00	0.14	0.28	0.38	5.14	0.07
黄芪甲苷I	0.70	1.00	0.60	0.62	0.31	0.00	0.47	0.53	3.44	0.05
黄芪甲苷II	0.20	1.00	0.73	0.63	0.99	0.00	0.81	0.62	3.58	0.05
黄芪甲苷III	0.34	1.00	0.05	0.65	0.72	0.00	0.05	0.40	5.66	0.07
黄芪甲苷IV	0.74	1.00	0.72	0.33	0.26	0.00	0.23	0.47	4.38	0.06
DPPH	0.08	0.74	0.00	0.64	1.00	0.67	0.86	0.57	3.88	0.05
FRAP	0.00	0.63	0.32	0.53	0.60	0.14	1.00	0.46	4.23	0.06
D值	0.21	0.57	0.31	0.64	0.74	0.32	0.58			
排名	7	4	6	2	1	5	3			

表5 不同微生物菌肥对土壤酸碱度、全盐量和土壤养分含量变化的影响 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

Table 5 Effects of different microbial fertilizers on changes in soil pH, total salt content, and soil nutrients contents ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

处理	pH	全盐量/%	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·g <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·g <sup>-1</sup> )
CK0	7.47±0.08	2.965±0.002	19.05±0.42	1.11±0.00	0.56±0.03	20.15±0.70	60.12±2.10	5.75±0.91	78.21±2.49
CK	8.00±0.00 <sup>a</sup>	4.480±0.005 <sup>a</sup>	30.85±1.15 <sup>bcd</sup>	1.70±0.02 <sup>c</sup>	0.64±0.06 <sup>a</sup>	17.64±0.21 <sup>a</sup>	97.63±3.97 <sup>abc</sup>	13.74±0.20 <sup>d</sup>	77.22±1.14 <sup>e</sup>
T1	7.66±0.03 <sup>c</sup>	3.625±0.002 <sup>bc</sup>	32.21±0.88 <sup>b</sup>	1.74±0.00 <sup>b</sup>	0.69±0.07 <sup>a</sup>	18.88±0.33 <sup>a</sup>	93.91±8.85 <sup>abcd</sup>	12.00±0.13 <sup>de</sup>	87.45±4.00 <sup>f</sup>
T2	7.82±0.04 <sup>c</sup>	3.904±0.001 <sup>b</sup>	31.23±1.24 <sup>bcd</sup>	1.77±0.01 <sup>a</sup>	0.63±0.02 <sup>a</sup>	18.31±0.87 <sup>a</sup>	87.15±5.86 <sup>bcd</sup>	27.32±0.67 <sup>a</sup>	136.30±1.98 <sup>a</sup>
T3	7.74±0.01 <sup>d</sup>	3.259±0.002 <sup>c</sup>	30.26±0.51 <sup>cd</sup>	1.68±0.01 <sup>c</sup>	0.68±0.01 <sup>a</sup>	19.66±0.57 <sup>a</sup>	84.12±4.03 <sup>cd</sup>	22.40±0.99 <sup>b</sup>	112.21±3.48 <sup>c</sup>
T4	7.83±0.03 <sup>bc</sup>	3.701±0.002 <sup>bc</sup>	31.57±0.91 <sup>bc</sup>	1.78±0.00 <sup>a</sup>	0.64±0.02 <sup>a</sup>	18.01±1.23 <sup>a</sup>	82.26±8.85 <sup>d</sup>	16.02±1.92 <sup>c</sup>	103.29±3.18 <sup>d</sup>
T5	7.61±0.00 <sup>e</sup>	3.776±0.006 <sup>b</sup>	35.60±0.42 <sup>a</sup>	1.77±0.01 <sup>a</sup>	0.69±0.03 <sup>a</sup>	18.59±2.06 <sup>a</sup>	100.90±12.03 <sup>ab</sup>	17.68±1.43 <sup>c</sup>	119.47±0.99 <sup>b</sup>
T6	7.87±0.01 <sup>b</sup>	3.787±0.003 <sup>b</sup>	29.84±0.16 <sup>d</sup>	1.59±0.01 <sup>d</sup>	0.65±0.02 <sup>a</sup>	18.92±2.60 <sup>a</sup>	102.77±6.67 <sup>a</sup>	11.30±0.30 <sup>e</sup>	93.06±1.51 <sup>e</sup>

破坏病原菌细胞膜完整性来诱导细胞凋亡，导致基质金属蛋白酶减少和孢子活性氧积累，抑制孢子萌发和菌丝生长<sup>[32]</sup>。本研究发现，含有产酶溶杆菌、解淀粉芽孢杆菌、链霉菌、枯草芽孢杆菌、溶磷菌、固氮菌等6种微生物菌肥均可降低黄芪白粉病发病率，其中含有溶磷菌的T5处理显著降低了22.90%，原因是溶磷菌不仅能抑制病原菌，还能通过溶磷作用提高土壤磷有效性，进而增强黄芪抗病性<sup>[31]</sup>。

微生物菌肥对药用植物生长特性具有显著影响。比如，重茬地施用微生物菌肥（假单胞菌属和

芽孢杆菌属）可显著提升太子参产量（257.54%）<sup>[33]</sup>；生物肥料（芽孢杆菌和油菜假单胞杆菌）可显著提高当归芦头直径（31.39%）和根干质量（100.5%）<sup>[34]</sup>；固氮菌肥（根瘤菌T16、中华根瘤菌T21、芽孢杆菌J1、芽孢杆菌G4和节杆菌J2）可显著提高黄芪根长（56.16%）、地上部分干质量（23.18%）和根干质量（68.06%）<sup>[35]</sup>。以上研究表明，功能微生物菌肥增产存在较大差异，可能是由于在生产实践中功效受到菌种类和稳定性、微生物有效定植、发酵工艺、底物选择和安全性等问题的限制<sup>[33]</sup>。本研究

发现, 含枯草芽孢杆菌的 T4 处理可显著促进黄芪根直径、根长、根干质量和产量形成, 这可能与芽孢杆菌分泌的生长调节物质密切相关<sup>[36]</sup>。微生物中的益生菌可通过影响次生代谢物合成途径, 调控次生代谢物合成和积累<sup>[37-38]</sup>。比如, 假单胞菌属和泛菌属可产生植物激素吲哚-3-乙酸 (indole-3-acetic acid, IAA) 和多糖, 刺激丹参中酚类物质 (丹酚酸 B) 积累<sup>[37]</sup>; 短小芽孢杆菌可上调甘草 SQS、HMGR、 $\beta$ -AS 关键酶的表达, 进而促进多糖、总黄酮、甘草酸在根部积累<sup>[38]</sup>; 含枯草芽孢杆菌和施氏假单胞菌有利于重茬地黄中环烯醚萜苷和苯乙醇苷积累<sup>[39]</sup>。本研究发现, 含有链霉菌的 T3 处理有利于多糖、总黄酮和总酚化合物积累, 含有溶磷、固氮复合菌的 T6 处理有利于 4 个黄酮类化合物 (毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮和芒柄花素) 积累, 含有产酶溶杆菌的 T1 处理有利于皂苷类化合物积累。以上研究结果充分说明, 不同微生物菌肥对黄芪代谢产物的调控具有多样性和特异性, 对于上述微生物-黄芪互作的分子机制还需要进一步探究。

前人研究发现, 微生物菌肥中有益菌在代谢过程中可产生有机酸, 能溶解土壤中矿物质, 释放被固定的养分, 增加可溶性离子数量, 降低土壤 pH、全盐量及提高土壤养分 (有机质、全氮、全钾、全磷、速效氮、速效磷和速效钾)<sup>[40-41]</sup>。本研究发现, 种植黄芪可导致土壤 pH 值和全盐量升高, 通过施用微生物菌肥可在一定程度上缓解 pH 值、降低全盐量和提高土壤养分 (除全钾) 含量。深入研究表明, 不同功能微生物通过基因调控形成互补的养分转化体系, 如根瘤菌可通过 *nif* 基因调控固氮酶合成, 将大气中  $N_2$  转化为被植物利用  $NH_4^+$  形态, 显著提高土壤中硝态氮和铵态氮含量<sup>[42]</sup>; 荧光假单胞菌可激活解磷基因 (*PhoU*、*PhoB* 和 *PhoR*), 合成并向外界分泌有机酸、多糖等物质促进难溶性磷溶解, 显著提高土壤有效磷含量<sup>[43-44]</sup>; 胶质芽孢杆菌可将含钾矿物 (如云母类) 不能被作物吸收利用的矿物态钾分解产生水溶性钾, 显著提高土壤速效钾含量<sup>[45]</sup>。

微生物菌肥中的益生菌不仅可以直接参与土壤养分转化过程, 提高土壤养分有效性, 还能通过色氨酸代谢产生内源性生长素 IAA 诱导细胞分裂和细胞伸长, 影响根形态和发育, 增加根表面积、体积和长度, 使植物更容易获得土壤中的养分, 促

进对养分的吸收利用<sup>[46-47]</sup>。本研究发现, 含溶磷和固氮菌的 T6 处理较有利于有机质、全氮和速效磷吸收, 含枯草芽孢杆菌的 T4 处理有利于全钾和碱解氮吸收, 含链霉菌的 T3 处理有利于全氮和碱解氮吸收; 根据综合质量评价 T4、T3 和 T6 较有利于黄芪综合质量形成。以上研究结果充分说明, 不同微生物菌肥使得黄芪对土壤养分吸收存在较大差异, 从而引起黄芪综合质量存在一定差异, 对于不同微生物菌肥复合施用效果还需要进一步试验。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 315-316.
- [2] 张梅儂, 刘海龙, 王瑞琼, 等. 黄芪化学成分和药理作用及 Q-Marker 预测分析 [J]. 中国新药杂志, 2023, 32(4): 410-419.
- [3] Tian H Y, An L Z, Wang P W, et al. Review of *Astragalus membranaceus* polysaccharides: Extraction process, structural features, bioactivities and applications [J]. *Chin Herb Med*, 2025, 17(1): 56-69.
- [4] 马桂花, 段晓明, 徐文华, 等. 蒙古黄芪根腐病原鉴定及防治药剂室内筛选 [J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1122-1130.
- [5] 栗瑞红, 李红霞, 李长胜, 等. 微生物菌剂对连作蒙古黄芪生物量及土壤真菌群落结构的影响 [J]. 北方农业学报, 2022, 50(6): 50-56.
- [6] 王引来, 夏建红, 贾萍, 等. 陇西县黄芪制种田病虫害与用药情况调查 [J]. 中国植保导刊, 2023, 43(7): 83-85.
- [7] Dong M Y, Su H Y, Li J J, et al. Multi-omics reveal wild habitat is more favorable for the metabolite accumulation in *Astragalus mongolicus* [J]. *Ind Crops Prod*, 2024, 222: 119953.
- [8] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展 [J]. 土壤, 2020, 52(4): 651-658.
- [9] 吴红淼, 林文雄. 药用植物连作障碍研究评述和发展透视 [J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2020, 28(6): 775-793.
- [10] 李志军, 孙德智, 贾俊英, 等. 不同栽培方式对蒙古黄芪药效品质及土壤微生态的影响 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(1): 197-200.
- [11] Li B Z, Zhang Q Q, Chen Y H, et al. Different crop rotation systems change the rhizosphere bacterial community structure of *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao [J]. *Appl Soil Ecol*, 2021, 166: 104003.

- [12] 高游慧, 江春艳, 胡跃高, 等. 不同肥料处理对有机黄芪养分吸收与分配的影响 [J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2021, 29(3): 453-464.
- [13] 梁华, 陈灿灿, 陈家炜, 等. 固氮菌肥对山西道地黄芪品质及产量的影响 [J]. 山西农业科学, 2019, 47(5): 841-844.
- [14] 游川, 张驰, 袁若钰, 等. 产酶溶杆菌生物有机肥对丹参根腐病的防控效果及微生态机制解析 [J/OL]. 土壤学报, [2025-1-13]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20241119.1636.002>
- [15] Ren P, Chen P J, Guo S S, *et al.* Fermented *Chrysanthemum* stem as a source of natural phenolic compounds to alleviate tomato bacterial wilt disease [J]. *Hortic Res*, 2025, 12(5): uhaf027.
- [16] 贺善睦, 姚拓, 雷杨, 等. 微生物菌剂与化肥减量配施对猫尾草生长的影响 [J]. 草业科学, 2024, 41(11): 2706-2714.
- [17] 金艳丽, 姚拓, 兰晓君, 等. 4 株生防细菌对燕麦根腐病原菌抑菌特性研究 [J]. 草原与草坪, 2023, 43(6): 9-16.
- [18] 栗孟飞, 刘学周, 魏建和, 等. 基于生物量、活性物质积累和抗氧化能力的当归高海拔种植区域选择 [J]. 中草药, 2020, 51(2): 474-481.
- [19] Lay M M, Karsani S A, Mohajer S, *et al.* Phytochemical constituents, nutritional values, phenolics, flavonols, flavonoids, antioxidant and cytotoxicity studies on *Phaleria macrocarpa* (Scheff.) Boerl fruits [J]. *BMC Complement Altern Med*, 2014, 14: 152.
- [20] Beato V M, Orgaz F, Mansilla F, *et al.* Changes in phenolic compounds in garlic (*Allium sativum* L.) owing to the cultivar and location of growth [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2011, 66(3): 218-223.
- [21] 刘小花, 崔方, 张梦婷, 等. HPLC 法同时测定黄芪中的 5 种黄酮类成分的含量: 一种新的应用于药理学实验分析方法 [J]. 实验技术与管理, 2016, 33(2): 24-27.
- [22] 陈秋谷, 吴锦如, 李常慧, 等. HPLC-MS/MS 法同时测定黄芪桂枝五物汤中 21 种成分的含量 [J/OL]. 中成药, [2025-1-6]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1368.r.20231226.1145.006>
- [23] Nencini C, Menchiari A, Franchi G G, *et al.* *In vitro* antioxidant activity of aged extracts of some Italian *Allium* species [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2011, 66(1): 11-16.
- [24] Benzie I F F, Strain J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay [J]. *Anal Biochem*, 1996, 239(1): 70-76.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 166-187.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-24.
- [27] 师立伟, 李美玲, 崔秀文, 等. 39 个居群款冬花综合质量评价及影响因素分析 [J]. 中草药, 2022, 53(12): 3784-3792.
- [28] Niu B, Wang W X, Yuan Z B, *et al.* Microbial interactions within multiple-strain biological control agents impact soil-borne plant disease [J]. *Front Microbiol*, 2020, 11: 585404.
- [29] 程龙媛, 张国卉, 孙燕, 等. 药用植物-内生菌-根际微生物互作研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(15): 5264-5273.
- [30] Hegde G M, Malligawad L H, Sreenivasa M N, *et al.* Role of plant growth promoting microbes in the control of fungal foliar diseases of tomato under protected cultivation [J]. *Egypt J Biol Pest Contr*, 2022, 32(1): 105.
- [31] 杨美英, 王春红, 武志海, 等. 大豆根际溶磷菌分离鉴定及溶磷过程中有机酸的分泌 [J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(5): 38-44.
- [32] Yi Y J, Yin Y N, Yang Y G, *et al.* Antagonistic activity and mechanism of *Bacillus subtilis* XZ16-1 suppression of wheat powdery mildew and growth promotion of wheat [J]. *Phytopathology*, 2022, 112(12): 2476-2485.
- [33] 吴红森, 张晟恺, 焦艳阳, 等. 微生物菌肥对太子参连作障碍和药理作用的改良效应 [J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2021, 29(8): 1315-1326.
- [34] 李娟, 王文丽, 赵旭. 生物肥料对当归生长及土壤酶活性、微生物多样性的影响 [J]. 广东农业科学, 2020, 47(6): 39-46.
- [35] Shi Z Y, Guo Y X, Wang Y Y, *et al.* Nitrogen-fixing bacteria promote growth and bioactive components accumulation of *Astragalus mongholicus* by regulating plant metabolism and rhizosphere microbiota [J]. *BMC Microbiol*, 2024, 24(1): 261.
- [36] Radhakrishnan R, Hashem A, Abd Allah E F. *Bacillus*: A biological tool for crop improvement through biomolecular changes in adverse environments [J]. *Front Physiol*, 2017, 8: 667.
- [37] You H, Yang S J, Zhang L, *et al.* Promotion of phenolic compounds production in *Salvia miltiorrhiza* hairy roots by six strains of rhizosphere bacteria [J]. *Eng Life Sci*, 2017, 18(3): 160-168.
- [38] Xie Z C, Chu Y K, Zhang W J, *et al.* *Bacillus pumilus* alleviates drought stress and increases metabolite accumulation in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch [J]. *Environ Exp Bot*, 2019, 158: 99-106.
- [39] 郭志祥, 钮颜宇, 徐淑慧, 等. 微生物肥对连作地黄生长及产量品质的影响 [J]. 北方园艺, 2022(19): 100-106.
- [40] 冯玉倩, 米俊珍, 赵宝平, 等. 秸秆配施微生物菌肥对

- 盐碱地土壤及作物盐分含量的影响 [J]. 华北农学报, 2023, 38(6): 101-107.
- [41] 姜霞, 赵俊禧, 石盼盼, 等. 不同菌肥对党参生理及其根际土壤环境的影响 [J/OL]. 中国实验方剂学杂志, [2025-02-03]. <https://doi.org/10.13422/j.cnki.syfjx.20241814>.
- [42] Hoffman B M, Dean D R, Seefeldt L C. Climbing nitrogenase: Toward a mechanism of enzymatic nitrogen fixation [J]. *Acc Chem Res*, 2009, 42(5): 609-619.
- [43] 银婷婷, 王敬敬, 柳影, 等. 高效解磷菌的筛选及其促生机制的初步研究 [J]. 生物技术通报, 2015, 31(12): 234-242.
- [44] Monds R D, Newell P D, Schwartzman J A, *et al.* Conservation of the *pho* regulon in *Pseudomonas fluorescens* Pf0-1 [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2006, 72(3): 1910-1924.
- [45] 张爱民, 李乃康, 赵钢勇, 等. 土壤中解磷、解钾微生物研究进展 [J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2015, 35(4): 442-448.
- [46] 武杞蔓, 张金梅, 李玥莹, 等. 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.
- [47] Parray J A, Jan S, Kamili A N, *et al.* Current perspectives on plant growth-promoting rhizobacteria [J]. *J Plant Growth Regul*, 2016, 35(3): 877-902.

[责任编辑 时圣明]