

研究报告

黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷促生和改进品质的研究

刘思琴, 江美彦, 刘仁浪, 张宇柔, 刘洁, 张嘉恒, 农昌国, 刘亚南, 冯冬菊, 吴卫*

四川农业大学 农学院, 四川 成都 611130

刘思琴, 江美彦, 刘仁浪, 张宇柔, 刘洁, 张嘉恒, 农昌国, 刘亚南, 冯冬菊, 吴卫. 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷促生和改进品质的研究[J]. 微生物学通报, 2025, 52(6): 2679-2693.

LIU Siqin, JIANG Meiyang, LIU Renlang, ZHANG Yurou, LIU Jie, ZHANG Jiaheng, NONG Changguo, LIU Yanan, FENG Dongju, WU Wei. *Aspergillus niger* ZJ-17 combined with film mulching promotes the growth and improves the quality of *Angelica dahurica* var. *formosana*[J]. Microbiology China, 2025, 52(6): 2679-2693.

摘要:【背景】川白芷为著名川产地道中药材, 目前生产中存在盲目施肥、冬旱和春旱等问题。【目的】推动白芷绿色优质栽培模式, 实现化肥减施增效和农业绿色发展。【方法】将从川白芷根际土壤分离筛选出的根际促生真菌黑曲霉(*Aspergillus niger*) ZJ-17 制成微生物菌剂与覆膜联用, 通过随机区组试验探究不同施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷生长、产量、品质, 以及植株和土壤养分的影响。【结果】在 60%、80%和 100%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用均能不同程度促进川白芷生长发育, 其中 60%有机肥和化肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)的川白芷株高、根长和根直径较仅施 60%肥料对照处理(L9)分别显著提高 30.39%、19.10%和 23.00%, 该施肥水平下仅施加菌剂处理(L10)和仅覆膜处理(L11)的川白芷根直径也明显提高; 80%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L8)的株高和根长较其对照处理(L5)分别显著提高 35.47%和 29.62%; 100%施肥水平下菌剂+覆膜处理(L4)与仅 100%施肥对照(L1)相比, 仅根长显著提高。此外, L12 处理土壤的有效磷、有效钾含量较 L9 对照处理也显著提高 64.76%和 28.06%, 并能促进有机质分解利用, 提高植株养分含量; L12 和 L8 处理还能明显提高川白芷品质, 其中 7 种香豆素总含量以 L12 处理最佳, 该处理下川白芷产量和经济效益均最优, 可分别达 26 476 kg/hm²和 178 407 CNY/hm²。【结论】60%有机肥和化肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)的川白芷能

资助项目: 省级财政中医药发展专项(2024-06); 四川省中医药重点学科建设项目(2021-16-4); 四川省科技厅重点研发计划(2021YFYZ0012); 四川农业大学学科建设双支计划(P202108)

This work was supported by the Provincial Finance Special Fund for the Development of Traditional Chinese Medicine (2024-06), the Key Discipline Construction Project of Traditional Chinese Medicine in Sichuan Province (2021-16-4), the Key Research and Development Program of the Science and Technology Department of Sichuan Province (2021YFYZ0012), and the Double Branch Plan of Discipline Construction of Sichuan Agricultural University (P202108).

*Corresponding author. E-mail: ewuwei@sicau.edu.cn

Received: 2024-10-10; Accepted: 2025-01-06; Published online: 2025-03-20

达到高产、质优效果，推荐在实际生产中使用。

关键词：黑曲霉；川白芷；覆膜；有机肥；化肥

Aspergillus niger* ZJ-17 combined with film mulching promotes the growth and improves the quality of *Angelica dahurica* var. *formosana

LIU Siqin, JIANG Meiyan, LIU Renlang, ZHANG Yurou, LIU Jie, ZHANG Jiaheng,
NONG Changguo, LIU Yanan, FENG Dongju, WU Wei*

College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China

Abstract: [Background] *Angelica dahurica* var. *formosana* is a famous local Chinese medicinal herb in Sichuan. The current cultivation of this herb has problems such as blind fertilization, winter drought, and spring drought. [Objective] To promote the green cultivation model for high-quality *A. dahurica* var. *formosana* and achieve the reduction of chemical fertilizer and the green development of agriculture. [Methods] *Aspergillus niger* ZJ-17, a plant growth-promoting fungus isolated and screened from the rhizosphere soil of *A. dahurica* var. *formosana*, was prepared into a microbial agent, which was used in combination with mulching film. A randomized block design was adopted to study the effects of *A. niger* ZJ-17 combined with mulching film on the growth, yield, quality, plant traits, and soil nutrients of *A. dahurica* var. *formosana* under different fertilizer levels. [Results] The combination of *A. niger* ZJ-17 and mulching film at the fertilizer levels of 60%, 80%, and 100% promoted the growth and development of *A. dahurica* var. *formosana* to different degrees. The plant height, root length, and root diameter of *A. dahurica* var. *formosana* treated with 60% organic and chemical fertilizer+*A. niger* ZJ-17+mulching film (L12) increased by 30.39%, 19.10%, and 23.00%, respectively, compared with those in the treatment with 60% fertilizer only (L9). Under the fertilizer level of 60%, the root diameter of *A. dahurica* var. *formosana* treated with *A. niger* ZJ-17 only (L10) and mulching film only (L11) were also significantly increased. The plant height and root length of *A. dahurica* var. *formosana* treated with 80% fertilizer+*A. niger* ZJ-17+mulching film (L8) increased by 35.47% and 29.62%, respectively, compared with those of the treatment with 80% fertilizer only (L5). The treatment of 100% fertilizer+*A. niger* ZJ-17+mulching film (L4) showed a significant increase in root length compared with the treatment with only 100% fertilizer (L1). In addition, the L12 treatment increased the available phosphorus and available potassium in the soil by 64.76% and 28.06%, respectively, compared with the L9 treatment, while promoting the decomposition and utilization of organic matter to increase the nutrient content of plants. Moreover, L12 and L8 treatments improved the quality of *A. dahurica* var. *formosana*, and the total content of 7 coumarins was the highest in the L12 treatment. The yield and economic benefits of *A. dahurica* var. *formosana* in the L12 treatment were the highest, reaching 26 476 kg/hm² and 178 407 CNY/hm², respectively. [Conclusion] The combination of 60% organic and chemical fertilizer+*A. niger* ZJ-17+mulching film (L12) can achieve a high yield and high quality of *A. dahurica* var. *formosana*, being recommended to

be used in production.

Keywords: *Aspergillus niger*; *Angelica dahurica* var. *formosana*; film mulching; organic fertilizer; chemical fertilizer

药材白芷为伞形科植物白芷 [*Angelica dahurica* (Fisch. ex Hoffm) Benth. et Hook. f.]或杭白芷 [*Angelica dahurica* (Fisch. ex Hoffm) Benth. et Hook. f. var. *formosana* (Boiss) Shan et Yuan]的干燥根^[1]。主治感冒头痛、眉棱骨痛、鼻塞、白带、疮疡肿痛,药用历史悠久^[2]。白芷的传统栽培模式以施用化肥为主,但过量施用化肥(尤其氮肥)已造成品质退化及产量降低等现象^[3],利用根际促生菌作为生物制剂和生物肥料是可持续和环境友好的农业发展的潜在替代方案^[4-5]。它具有促进植物生长、提高植物抗逆能力并且增加作物的产量、改进品质的作用^[6]。川白芷道地产区四川遂宁白芷苗期还存在春旱现象,每年 2-5 月需要进行多次人工灌溉和除草,耗时长,人工成本高^[7]。地膜覆盖能够防止杂草生长,增温保湿,有利于土壤微生物的增殖,加速腐殖质转化成无机盐的速度加快,进而促进作物吸收,提高作物产量^[8]。

课题组前期研究发现,黑曲霉(*Aspergillus niger*) ZJ-17 在 100%施肥水平下能明显提高川白芷的产量和经济效益^[9],白芷中地膜覆盖技术筛选出了适宜的覆膜材料(防草布)和覆膜方式(平地覆盖)^[10]。因此,为解决白芷生产中盲目施肥、春旱和冬旱等问题,本研究将课题组前期筛选的具有固氮、溶磷和解钾作用的促生菌黑曲霉 ZJ-17 与防草布联用,探究其对白芷生长发育、产量和品质,以及植株和土壤养分的影响,以期为川白芷优质、高产的绿色种植技术提供理论依据和支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点设在四川省遂宁市船山区唐家乡余

建村白芷生产基地。试验地土壤理化性质: pH 7.69, 有机质含量为 14.57 g/kg, 碱解氮含量为 48.24 mg/kg, 有效磷含量为 15.96 mg/kg, 有效钾含量为 100.40 mg/kg。

1.2 样品

供试的植物材料为四川农业大学吴卫教授选育的‘川芷 2 号’白芷品种,原植物为杭白芷 [*Angelica dahurica* (Fisch. ex Hoffm) Benth. et Hook. f. var. *formosana* (Boiss) Shan et Yuan]。

供试菌株为课题组前期从‘川芷 2 号’根际土壤中分离纯化的黑曲霉 ZJ-17^[11]。

供试的覆膜材料为防草布 0.4 m×200 m,江苏语曦家居有限公司;供试的肥料包括油枯(当地自产,含 N 4.16%、P₂O₅ 1.50%、K₂O 1.4%,有机质≥40%)、尿素(含 N≥46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅≥12%)、硫酸钾(含 K₂O≥50%)。

1.3 培养基、主要试剂和仪器

马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基^[11];欧前胡素和异欧前胡素,中国食品药品检定研究院;水合氧化前胡素、氧化前胡素、佛手柑内酯、白当归素和异欧前胡素,成都普思生物科技股份有限公司;白当归脑,成都德思特生物技术有限公司;色谱纯甲醇和乙腈,赛默飞世尔科技有限公司。

电子天平,常熟市双杰测试仪器厂;酶标仪,Thermo Scientific 公司;火焰光度计,上海精密科学仪器有限公司;全自动间断化学分析仪,北京理加联合科技有限公司;高效液相色谱仪,岛津公司;Agilent1100 Platisil DADC18 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm),安捷伦科技有限公司。

1.4 菌液的制备

将黑曲霉 ZJ-17 接种于 PDA 培养基中,28 °C 恒温培养 7 d 后收集黑曲霉孢子,加入无菌水,

混匀后用血球计数板测定其浓度,并通过添加无菌水或孢子粉调整其浓度为 3.0×10^8 CFU/mL,按照 $1\ 334\ \text{L}/\text{m}^2$,每个小区 $0.06\ \text{L}$,稀释 100 倍施用。

1.5 田间试验

试验采用三因素随机区组设计,设置肥料(A)、覆膜(B)、施菌(C)这 3 个因素,其中因素 A 分别为: A1: 100%肥料; A2: 80%肥料; A3: 60%肥料; 因素 B 分别为: B1: 不覆膜; B2: 覆膜; 因素 C 分别为: C1: 不施菌; C2: 施菌。共 12 个处理(A1B1C1、A1B1C2、A1B2C1、A1B2C2、A2B1C1、A2B1C2、A2B2C1、A2B2C2、A3B1C1、A3B1C2、A3B2C1、A3B2C2,分别命名为 L1–L12),设置不施肥不覆膜不加菌为对照(L0)。共 13 个处理,重复 3 次,小区面积 $20\ \text{m}^2$ ($5\ \text{m} \times 4\ \text{m}$)。

播前覆上油枯,施入磷酸钙和硫酸钾,开沟播种,最后将稀释后的菌液浇入沟中。按行距 $40\ \text{cm}$ 进行条播,当白芷株高 $4\text{--}7\ \text{cm}$ 时,进行 1–2 次间苗,株距 $10\ \text{cm}$ 。每平方米 100%肥料量: 油枯 $75\ \text{g}$ 、尿素 $14\ \text{g}$ 、过磷酸钙 $219\ \text{g}$ 、硫酸钾 $24\ \text{g}$, 80%、60%肥料量依次在该基础上施加。尿素分 3 次施用,即苗肥(12 月)、冬肥(次年 2 月)、春肥(次年 3 月),施用比例为 2:5:3; 过磷酸钙与硫酸钾分 2 次施用(底肥、春肥),施用比例为 5:5; 有机肥作为底肥施用。其余栽培措施与当地栽培措施保持一致。

1.6 测定项目及方法

收获期按照五点取样法采挖,选取具有代表性、长势一致、健康无病虫害的植物,每个小区取 5 株样品。测定白芷根长、根粗和株高。每个小区挖 6 垄测定鲜重并折算每公顷的产量。采用高效液相色谱法测定欧前胡素、异欧前胡素、氧化前胡素、白当归素、佛手柑内酯、白当归脑和水合氧化前胡素含量^[12]。采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮法对川白芷地上和地下部分进行消煮得到消煮液,测定植株全氮(N, 半微量凯氏定氮法)、全磷(P, 钒钼黄比色法)、全钾(K, 火焰光度

法)^[13]。土壤养分测定参照《土壤农化分析》^[14]及《土壤分析技术规范》^[15],阴干土样,测定土壤的 pH (电位计法)、有机质(重铬酸钾容量法)、碱解氮(碱解扩散法)、有效磷($0.5\ \text{mol/L}$ 碳酸氢钠浸提: 钼锑抗比色)和有效钾($1\ \text{mol/L}$ 醋酸铵浸提: 火焰光度法)^[10]。

1.7 数据处理

采用 Excel 2016、SPSS 23.0 和 GraphPad Prism 8 等软件进行统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷农艺性状的影响

60%肥料水平下不同处理川白芷田间生长情况,已提交到国家微生物科学数据中心,编号为 NMDCX0002083。由图 1 可知,相较于不施肥对照,黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷的生长具有不同程度的促进作用($P < 0.05$)。川白芷株高、根长和根直径以 60%肥料水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜联用处理(L12)最佳,分别为 $86.28\ \text{cm}$ 、 $19.66\ \text{cm}$ 和 $39.57\ \text{mm}$,较仅施 60%肥料对照处理(L9)显著提高 30.39%、19.10%和 23.00% ($P < 0.05$)。该施肥水平下仅施加黑曲霉 ZJ-17 菌剂处理(L10)和仅覆膜处理(L11)均显著提高了川白芷的根直径。80%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜联用处理(L8)处理川白芷株高和根长为 $75.33\ \text{cm}$ 和 $19.65\ \text{cm}$,较仅 80%肥料对照处理(L5)比分别显著提高 35.47%和 29.62%; 100%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜联用处理(L4)处理与 L1 对照比,仅根长显著提高。

2.2 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对土壤理化性质的影响

由图 2 可知,不同处理对土壤理化性质有不同程度的影响。图 2A 可知,100%肥料条件下仅施加黑曲霉 ZJ-17 菌剂(L2)、仅覆膜(L3)、施菌+覆膜联用处理(L4)均能显著提高土壤 pH ($P < 0.05$)。由图 2B 可知,相较于仅肥料对照处

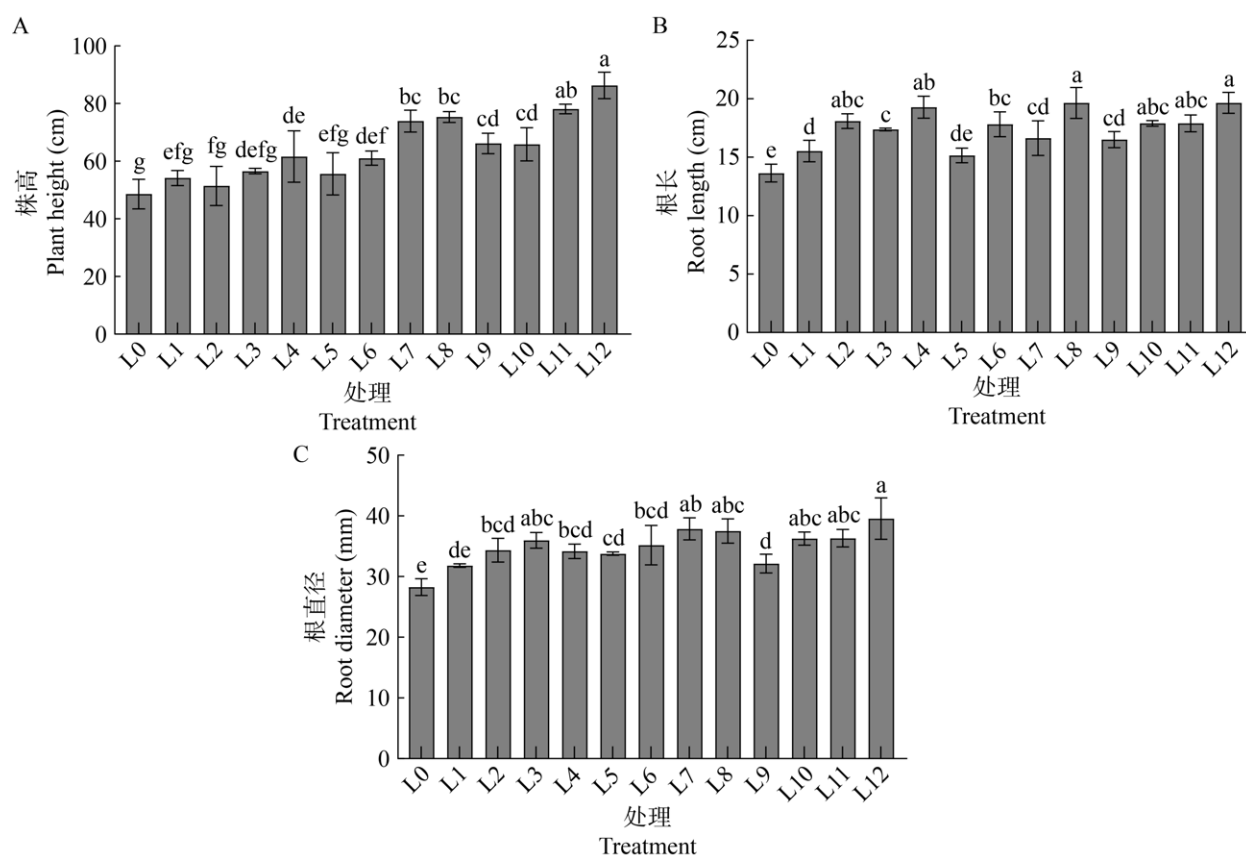


图 1 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷农艺性状的影响 A: 株高; B: 根长; C: 根直径。L0: 不施肥; L1: 100%肥料; L2: 100%肥料+黑曲霉 ZJ-17 菌剂; L3: 100%肥料+覆膜; L4: 100%肥料+黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜; L5: 80%肥料; L6: 80%肥料+黑曲霉 ZJ-17 菌剂; L7: 80%肥料+覆膜; L8: 80%肥料+黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜; L9: 60%肥料; L10: 60%肥料+黑曲霉 ZJ-17 菌剂; L11: 60%肥料+覆膜; L12: 60%肥料+黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同。

Figure 1 Effect of combined use of *Aspergillus niger* ZJ-17 and mulching film on the agronomic traits of *Angelica dahurica* var. *formosana*. A: Plant height; B: Root length; C: Root diameter. L0: No fertilizer; L1: 100% fertilizer; L2: 100% fertilizer+A. *niger* ZJ-17; L3: 100% fertilizer+mulching film; L4: 100% fertilizer+A. *niger* ZJ-17+mulching film; L5: 80% fertilizer; L6: 80% fertilizer+A. *niger* ZJ-17; L7: 80% fertilizer+mulching film; L8: 80% fertilizer+A. *niger* ZJ-17+mulching film; L9: 60% fertilizer; L10: 60% fertilizer+A. *niger* ZJ-17; L11: 60% fertilizer+mulching film; L12: 60% fertilizer+A. *niger* ZJ-17+mulching film. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same below.

理, 60%和 100%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜联用(L12 和 L4)处理的土壤有机质含量均显著降低($P<0.05$)。由图 2C–2E 可知, 在不同施肥水平下菌剂和覆膜联用均能促进土壤速效养分积累, 60%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)土壤有效磷、有效钾含量达 16.66 mg/kg 和 133.57 mg/kg, 较 L9 对照处理分别显著提高

64.76%和 28.06%;80%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L8)的土壤碱解氮、有效磷含量为 57.28 mg/kg 和 16.63 mg/kg, 较 L5 对照处理组显著提高; 100%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L4)土壤有效磷含量较 L1 对照处理显著提高, 该肥料条件下仅施菌(L2)土壤有效磷含量也显著增高($P<0.05$)。

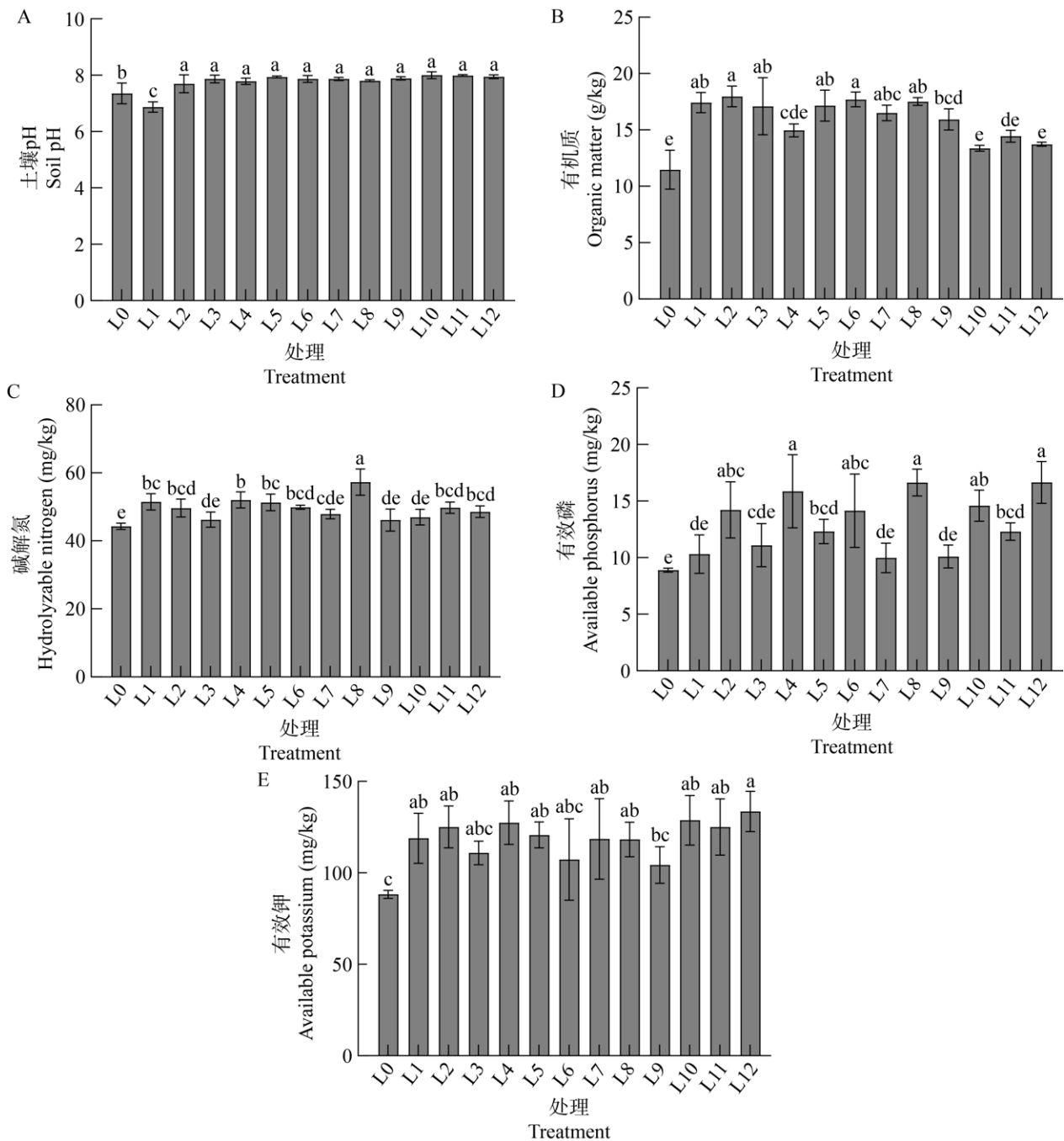


图2 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对土壤理化性质的影响 A: 土壤 pH; B: 有机质; C: 碱解氮; D: 有效磷; E: 有效钾。

Figure 2 Effect of combined use of *Aspergillus niger* ZJ-17 and mulching film on soil physicochemical properties. A: Soil pH; B: Organic matter; C: Alkali hydrolyzed nitrogen; D: Available phosphorus; E: Available potassium.

2.3 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷植物养分的影响

图 3A-3C 为不同处理川白芷地上部分氮、磷

和钾的含量。相较于 60%肥料对照处理(L9), 该施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12) 的全氮含量显著提高 26.63% ($P < 0.05$), 全磷和

全钾含量差异不显著,单独施菌(L10)、覆膜(L11)对地上部分全氮含量无显著影响;80%和100%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜联用处理(L8 和 L4)川白芷地上部分全氮、全磷和全钾含量与其肥料对照处理比,均无显著差异。

图 3D–3F 为不同处理川白芷地下部分氮、磷和钾的含量,60%肥料+黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)白芷的地下部分全氮、全磷含量分别达 20.23 mg/g 和 1.97 mg/g,较 60%肥料处理(L9)分别显著提高 22.42%和 10.19% ($P<0.05$),仅覆膜处理(L11)也能明显提高地下部分全磷含量;80%肥料水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L8)地下部分全氮、全磷含量较 L5 对照处理分别显著提高 30.57%和 16.98% ($P<0.05$);相较于 L1 对照处理,100%肥料条件下覆膜处理(L3)、菌剂+覆膜联用(L4)的地下部分全氮含量均显著提高($P<0.05$),分别为 20.21 mg/g 和 18.39 mg/g。相较于肥料对照处理,3 种施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂和覆膜联用处理的地下部分全钾含量则均无显著差异。

2.4 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷有效成分含量的影响

由图 4A、4B 可知,欧前胡素含量以 80%肥料条件下施加菌剂(L6)处理为佳;异欧前胡素含量为 L12 处理最高,为 1.26 mg/g,各施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理对欧前胡素和异欧前胡素含量均无明显影响。由图 4C–4F 可知,60%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)川白芷氧化前胡素、白当归脑、佛手柑内酯和白当归素含量分别达 2.15、1.24、0.19 和 0.35 mg/g,较 L9 处理均显著提高,该肥料水平下施菌(L10)、单独覆膜(L11)的氧化前胡素和白当归脑含量差异均不显著;相较于 L5 对照处理,80%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂和覆膜联用(L8)的川白芷氧化前胡素、白当归脑、白当归素和水合氧化前胡素含量均显著增加,该施肥水平下单独覆膜处理(L7)也能显著提高氧化前胡素、白当归素和水合氧化前胡素含量。

相较于 L1 对照处理,100%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂和覆膜联用(L4),仅水合氧化前胡素含量显著提高,为 0.78 mg/g (图 4G)。

由图 4H 可知,相较于不施肥(L0)处理,施用不同量肥料后川白芷 7 种香豆素总含量均显著提高($P<0.05$)。以 60%肥料条件下菌剂+覆膜处理(L12)最高,为 7.99 mg/g,与仅 60%肥料对照处理(L9)比显著提高 18.89% ($P<0.05$),单独施菌(L10)、覆膜处理(L11)则差异不显著;80%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L8)与 L5 对照处理比,川白芷香豆素总量也显著提高($P<0.05$),为 6.82 mg/g;100%施肥水平下二者联用(L4)与 L1 对照处理比则差异不显著。

2.5 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用川白芷产量和经济效益的影响

由表 1 可知,相较于不施肥对照,各种处理均可显著提高川白芷产量($P<0.05$)。但不同施肥水平下,施加菌剂、覆膜及菌剂+覆膜联用处理提升川白芷产量情况有所不同。在 60%肥料水平下,黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)川白芷产量最高,可达 26 476 kg/hm²,与仅 60%肥料处理(L9)比显著提高 45.25%,覆膜(L11)和施菌处理(L10)川白芷产量则分别提高 29.76%和 14.73% ($P<0.05$);在 80%肥料水平下,黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L8)川白芷产量为 24 637 kg/hm²,与对照(L5)比显著提高,单独覆膜处理(L7)、施加菌剂处理(L6)也能显著提高川白芷产量,为 20 835 kg/hm² 和 15 743 kg/hm²;在 100%肥料水平下,黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L4)和覆膜处理(L3)与 L1 对照比,产量分别显著提高 61.11%和 37.80%,为 25 427 kg/hm² 和 21 749 kg/hm²,该肥料水平下,仅施加菌剂处理(L2)对产量无显著影响。

相较于不施肥对照(L0),各种处理均可显著提高川白芷总产值和经济效益($P<0.05$)。川白芷总产值和经济效益均以 60%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)最高,达 198 570 CNY/hm² 和 178 407 CNY/hm²,与仅 60%

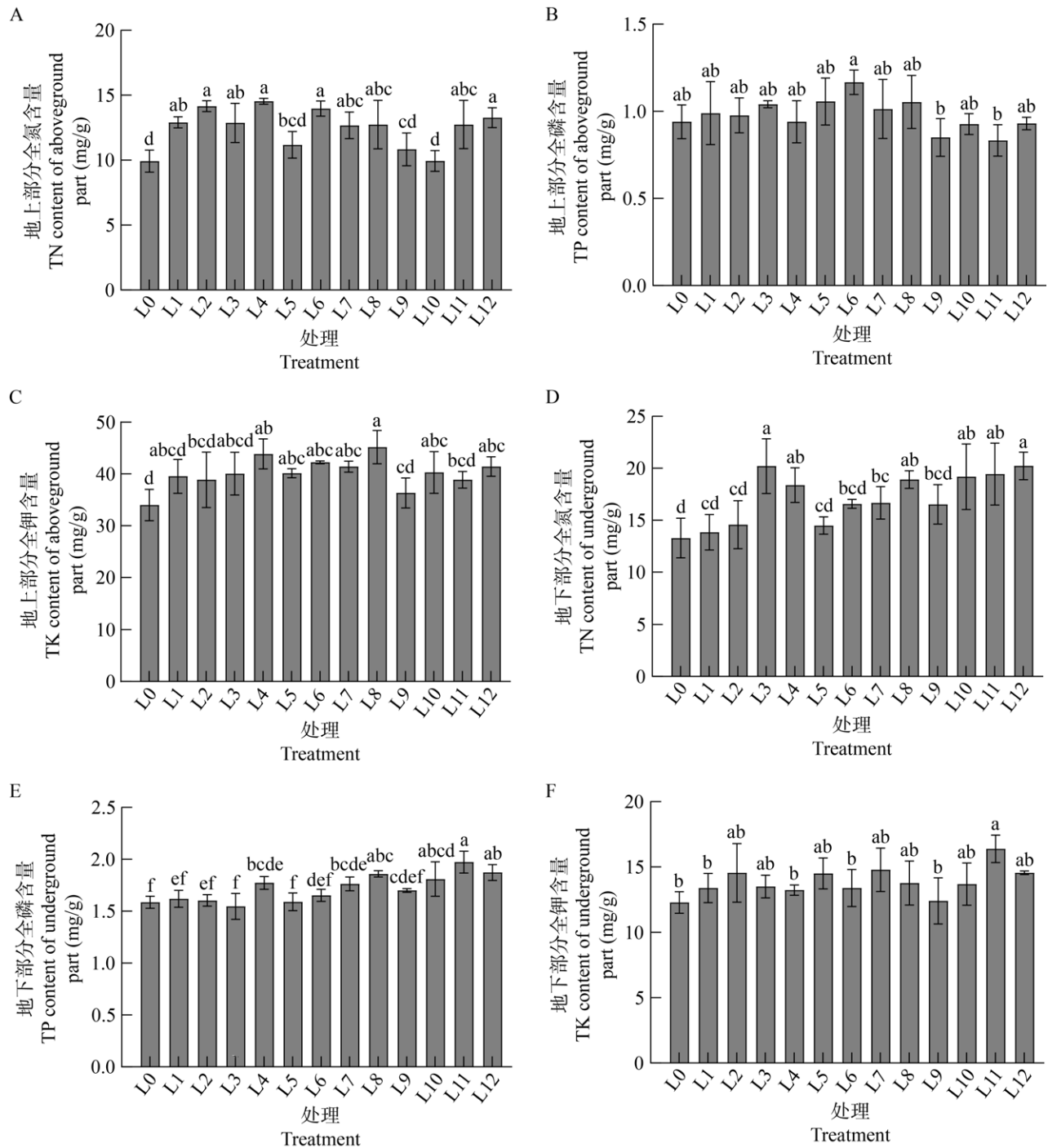


图 3 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷养分含量的影响 A: 地上部分全氮含量; B: 地上部分全磷含量; C: 地上部分全钾含量; D: 地下部分全氮含量; E: 地下部分全磷含量; F: 地下部分全钾含量。
Figure 3 Effect of combined use of *Aspergillus niger* ZJ-17 and mulching film on the nutrient content of *Angelica dahurica* var. *formosana*. A: The TN content of aboveground part; B: The TP content of aboveground part; C: The TK content of aboveground part; D: The TN content of underground part; E: The TP content of underground part; F: The TK content of underground part.

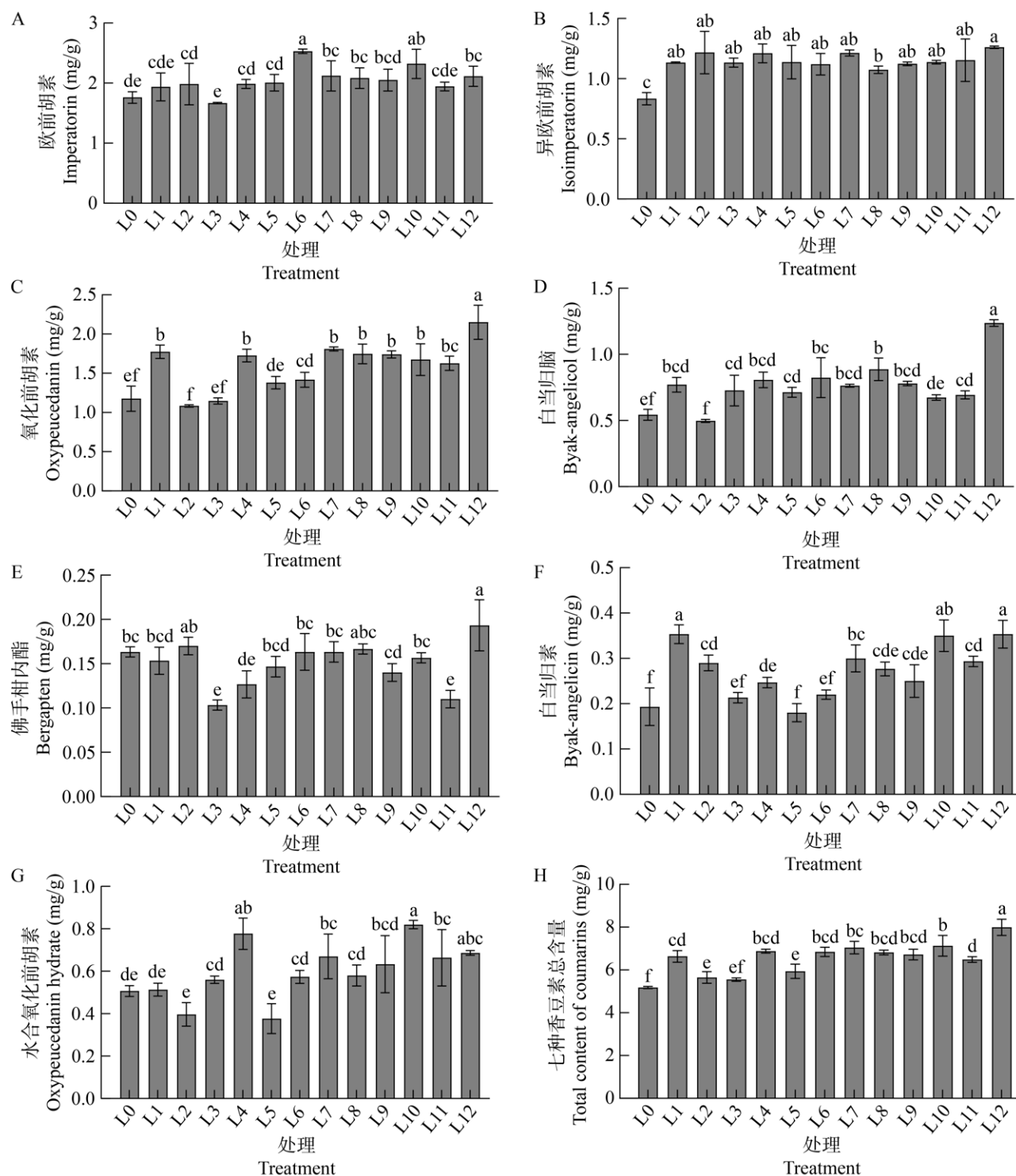


图 4 黑曲霉 ZJ-17 与覆膜联用对川白芷各香豆素含量的影响 A: 欧前胡素; B: 异欧前胡素; C: 氧化前胡素; D: 白当归脑; E: 佛手柑内酯; F: 白当归素; G: 水和氧化前胡素; H: 七种香豆素。

Figure 4 Effect of combined use of *Aspergillus niger* ZJ-17 and mulching film on the content of coumarin of *Angelica dahurica* var. *formosana*. A: Imperatorin; B: Isoimperatorin; C: Oxypeucedanin; D: Byak-angelicol; E: Bergapten; F: Byak-angelicin; G: Oxypeucedanin hydrate; H: Coumarins.

表 1 各处理对川白芷产量和经济效益的影响

Table 1 The yield and economic benefit of *Angelica dahurica* var. *formosana* under different treatment

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	投入成本 Input cost (CNY/hm ²)				收入 Income (CNY/hm ²)	
		肥料成本 Fertilizer cost	除草成本 Weed cost	地膜成本 Mulch cost	菌肥成本 Bacterial cost	总产值 Total output value	经济效益 Economic benefits
L0	9 607g	0	33 350	0	0	72 053g	38 703h
L1	15 782e	4 984	33 350	0	0	118 365e	85 015f
L2	17 191de	4 984	33 350	0	566	128 933de	90 033ef
L3	21 749c	4 984	0	16 608	0	163 118c	141 526c
L4	25 427ab	4 984	0	16 608	566	190 703ab	168 545ab
L5	13 748f	3 987	33 350	0	0	103 110f	65 773g
L6	15 743e	3 987	33 350	0	566	118 073e	80 170f
L7	20 835c	3 987	0	16 608	0	156 263c	135 668c
L8	24 637ab	3 987	0	16 608	566	184 778ab	163 617b
L9	18 228d	2 989	33 350	0	0	136 710d	100 371e
L10	20 913c	2 989	33 350	0	566	156 848c	119 943d
L11	23 653b	2 989	0	16 608	0	177 398b	157 801b
L12	26 476a	2 989	0	16 608	566	198 570a	178 407a

油枯、尿素、过磷酸钙、硫酸钾价格分别是 3、1.9、0.7 和 4 CNY/kg，防草布成本包括覆膜与揭膜成本，黑曲霉 ZJ-17 制备成本按 566 CNY/hm² 计算，总产值按 7.5 CNY/kg 鲜货市场价计算。

The prices of oil cake, urea, calcium superphosphate and potassium sulfate are 3, 1.9, 0.7 and 4 CNY/kg, respectively. The cost of weed control fabric includes the costs of film mulching and film removal. The preparation cost of *A. niger* ZJ-17 is calculated at 566 CNY/hm², and the total output value is calculated based on the market price of 7.5 CNY/kg for fresh goods.

肥料处理(L9)比均显著提高，仅覆膜处理(L11)、施加菌剂(L10)总产值和经济效益也显著提高($P<0.05$)；此外，相较于对照处理(L5、L1)，在 80%和 100%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理的总产值和经济效益也均显著提高($P<0.05$)。综上，黑曲霉 ZJ-17 菌剂与覆膜联用总体上对提高川白芷产量、总产值和经济效益确实有明显作用。

2.6 相关性分析

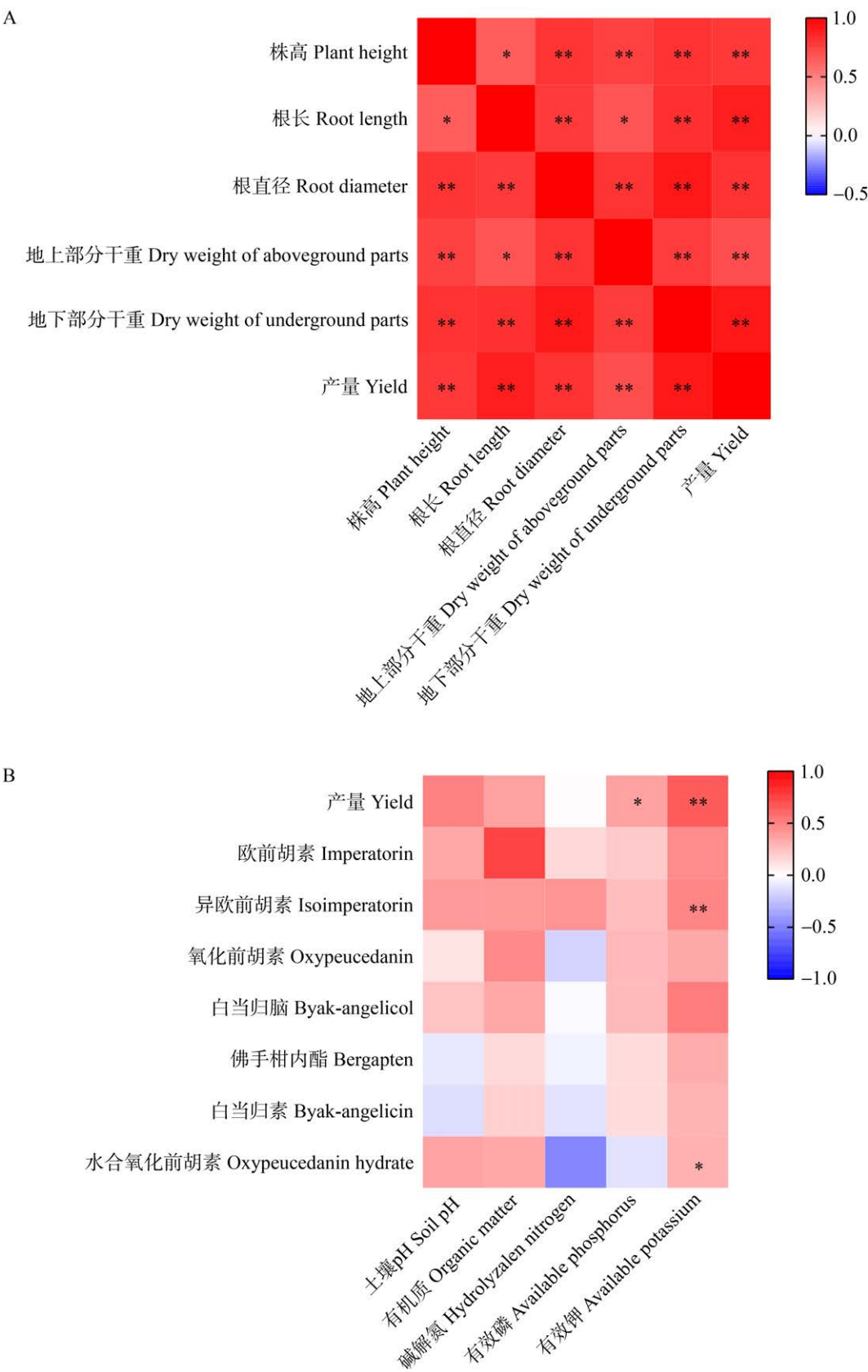
农艺性状与川白芷产量和品质间的关系如图 5A 所示。由图 5A 可知，川白芷株高、根长、根直径、地上部分干重、地下部分干重与产量均呈极显著正相关。由图 5B 可知，川白芷产量与土壤有效钾含量呈极显著正相关，与有效磷含量呈显著正相关，其余土壤理化性质指标与产量无显著相关性。植株氮、磷和钾含量与川

白芷产量和品质间的关系见图 5C。由图 5C 可知，地下部分氮含量、地下部分磷含量与产量呈极显著正相关，地上部分钾含量与产量呈显著正相关。地上部分氮含量、地下部分钾含量与异欧前胡素含量呈显著正相关。由图 5D 可知，地上部分钾含量与土壤有效钾、碱解氮含量呈极显著正相关，与有效钾含量呈显著正相关；地下部分钾含量与土壤有效钾含量呈显著正相关。

3 讨论

3.1 黑曲霉和覆膜联用可改善土壤养分状况和植物养分

土壤是植物生长繁育的基地，土壤养分对植物生长发育有重要作用^[16]。胡庆兰^[17]研究发现，覆膜和施肥较对照露地不施肥处理相比能够显著增加土壤中速效养分含量 12.02%–39.43%。



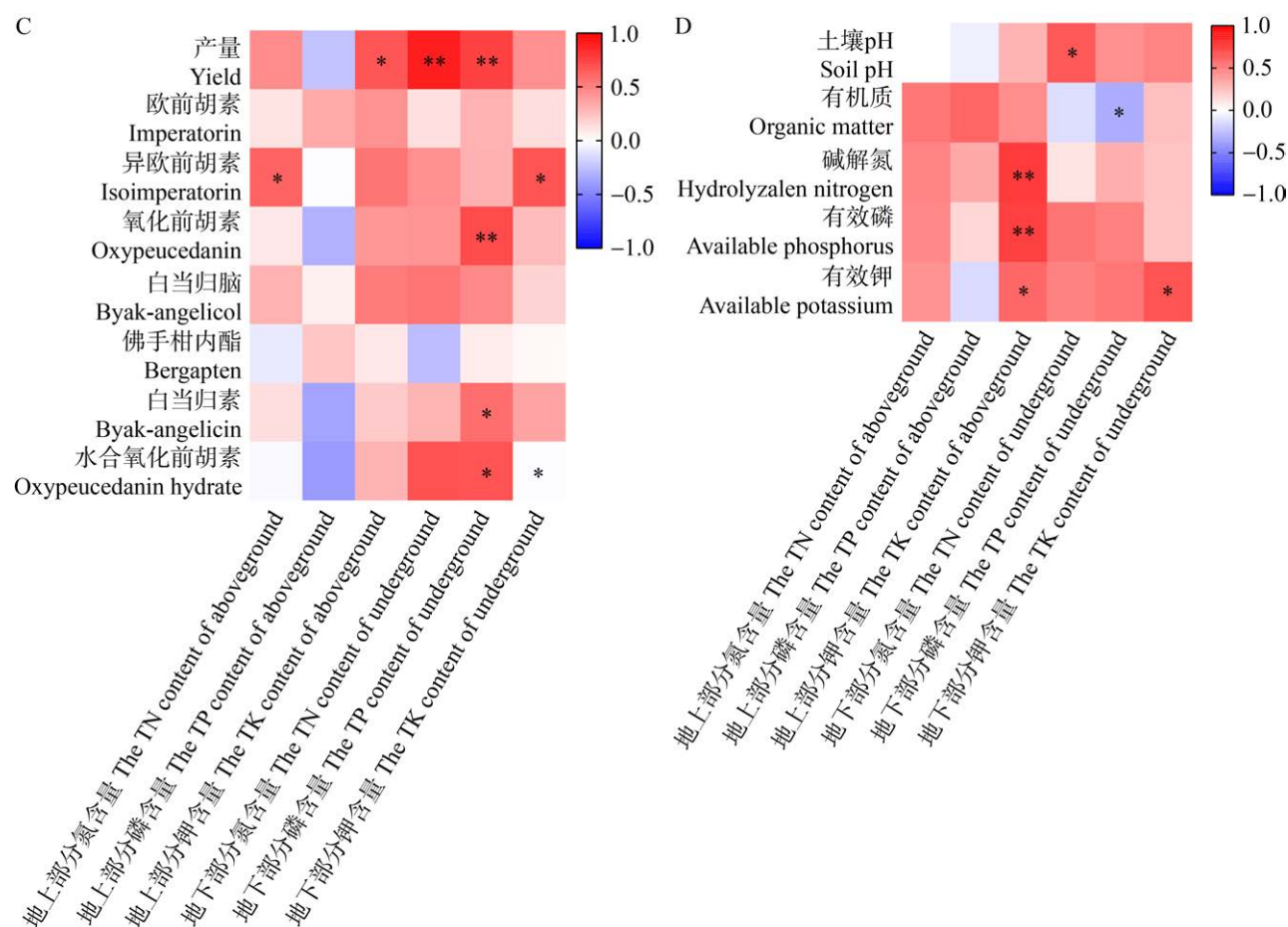


图 5 各测定指标相关性分析热图 A: 农艺性状与川白芷产量相关性热图; B: 土壤理化性质与川白芷产量和品质相关性热图; C: 植株养分含量与川白芷产量和品质相关性热图; D: 土壤理化性质与植株养分含量相关性热图。**表示差异极显著, $P < 0.01$; *表示差异显著, $P < 0.05$ 。

Figure 5 Heat map of correlation analysis of various determination indexes. A: Heat map of correlation between agronomic traits and yield of *A. dahurica* var. *formosana*; B: Heat map of correlation between soil physicochemical properties and yield and quality of *A. dahurica* var. *formosana*; C: Heat map of correlation between plant nutrient contents and yield and quality of *A. dahurica* var. *formosana*; D: Heat map of correlation between soil physicochemical properties and plant nutrient contents. ** indicates that the difference is extremely significant, $P < 0.01$; * indicates that the difference is significant, $P < 0.05$.

本研究发现, 60%施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜处理(L12)的土壤有效磷、有效钾明显提高, 该肥料水平下仅施加菌剂(L10)、覆膜(L11)土壤有效磷含量也显著提高。不同施肥水平下黑曲霉 ZJ-17 菌剂和覆膜联用均能提高土壤养分含量, 促进有机质分解。江美彦^[18]研究发现, 盆栽试验中施加黑曲霉 ZJ-17 菌剂能促进有机质分解, 本研究通过大田试验进一步证实了上

述结果。有效磷、钾较为丰富的土壤是川白芷高产的基础^[19]。本研究发现, 土壤碱解氮、有效磷与川白芷产量均有显著相关性, 这与前人研究结果基本一致, 即丰富的速效养分含量是川白芷高产的基础。本研究结果还表明, 60%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂+覆膜(L12)对川白芷植株地上部分氮含量、地下部分氮含量和磷含量也有明显促进作用。川白芷植株养分含

量与土壤碱解氮、有效磷和有效钾含量均显著性相关,因此,土壤养分的积累对川白芷植株养分含量有积极作用。本试验为推动川白芷绿色栽培模式、开发适用于川白芷的微生物菌肥及配套栽培措施奠定了基础,将有利于川白芷绿色种植,减肥增效。

3.2 黑曲霉和覆膜联用可促进川白芷生长发育,促产增效

研究表明,根际促生菌已被广泛应用,提高养分的利用率,提高玉米、大豆、番茄等作物的产量^[20-22]。薄膜覆盖可以显著改善土壤 pH 值、土壤水分、土壤碳储量等土壤指标,提高土壤微生物的活性,从而增加了产量^[23-25]。本研究发现,3 种施肥水平下,黑曲霉 ZJ-17 菌剂与覆膜联用均能不同程度促进川白芷的生长发育,其中以 60%施肥水平(L12)促进效果最佳。课题组前期研究中,100%施肥水平下田间应用黑曲霉 ZJ-17 菌剂川白芷产量明显提高^[9]。本研究进一步发现 60%施肥水平下该菌剂与防草布联用后产量和经济效益最佳,分别为 26 476 kg/hm² 和 178 407 CNY/hm²,较仅 60%肥料处理(L9)显著提高 45.25%和 77.74%,说明引入防草布条件后能减少部分化肥使用,同时达到增产效果。植物根际促生菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)作为一类根际有益细菌,对药用植物的生长发育兼备促生和抵御逆境胁迫两重有益效应,较大程度化解化肥与农药过量施用引发的负面影响,对实现化肥减施增效和农业绿色发展具有重要意义^[26]。

3.3 黑曲霉和覆膜联用可提高川白芷品质

大量研究发现,接种根际促生菌能提高白花前胡^[27]、金线莲^[28]、苜蓿^[29]和百合^[30]等药用植物的品质。本研究中,60%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂和覆膜联用(L12)时川白芷氧化前胡素、白当归脑、佛手柑内酯和白当归素含量均显著提高,7 种香豆素总含量显著提高,达 7.99 mg/g;80%肥料条件下黑曲霉 ZJ-17 菌剂和覆膜联用(L8)

川白芷品质也明显提高。课题组前期研究中,100%施肥水平下播种时添加黑曲霉 ZJ-17 仅提高川白芷产量,对其品质无明显促进作用^[9]。本研究引入覆膜条件后,可同时促进川白芷产量和品质的提高,可能是因为防草布覆盖下适宜的水热条件能够刺激黑曲霉 ZJ-17 的生长和繁殖,使土壤中微生物数量增加,黑曲霉充分发挥固氮、溶磷和解钾作用,能改善土壤养分状况,提高植株养分含量,进而直接或间接调控植株的生长发育过程,并最终提高川白芷产量和品质。

4 结论

不同施肥水平下,黑曲霉 ZJ-17 菌剂与覆膜联用均能不同程度促进川白芷生长发育和产量提高,其中以 60%肥料条件下应用效果更优。60%肥料条件下菌剂+覆膜处理(L12)土壤有效磷、有效钾含量明显增加,促进有机质分解利用,提高植株养分含量,川白芷品质明显提高;该处理下川白芷产量和经济效益最高。因此,在实际生产中,黑曲霉 ZJ-17+覆膜配施 60%有机肥和化肥的川白芷能达到高产、质优效果,有效解决川白芷生产中盲目施肥、冬旱和春旱等问题,为改良川白芷土壤环境、保障川白芷优质高产,最终实现川白芷绿色种植提供科学栽培措施奠定理论基础。

作者贡献声明

刘思琴:研究设计,实验操作,数据收集与分析并撰写论文;江美彦:提供实验材料与技术支持;刘仁浪:实验操作与数据收集,协助数据分析;张宇柔:系统梳理国内外相关研究现状与发展趋势,明确研究背景和意义;刘洁:协助取样相关工作;张嘉恒:参与试验设计全过程,确保试验的可行性和有效性;农昌国:协助完成土壤理化性质测定相关实验;刘亚南:协助完成试验结果分析部分撰写;冯冬菊:实验操作与数据收集,协助数据分析;吴

卫: 指导研究思路, 参与实验设计与数据分析, 审阅并修改论文。

作者利益冲突公开声明

作者声明绝无任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

REFERENCES

- [1] 赵中振, 肖培根. 当代药用植物典: 第1册[M]. 上海: 上海世界图书出版公司, 2007.
ZHAO ZZ, XIAO PG. Canon of Contemporary Medicinal Plants: Volume I[M]. Shanghai: Shanghai World Publishing Corporation, 2007 (in Chinese).
- [2] 中华人民共和国卫生部药典委员会. 中国药典 2020年版(第四部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
Pharmacopoeia Commission of the Ministry of Health of the People's Republic of China. Chinese Pharmacopoeia 2020 Edition (Volume IV)[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020 (in Chinese).
- [3] 郑利, 邓聪, 冯亮, 王露, 武寒, 江雪. 遂宁川白芷产业发展现状与分析[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(20): 181-182.
ZHENG L, DENG C, FENG L, WANG L, WU H, JIANG X. Development status and analysis of Suining Chuan Baizhi industry[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2020, 31(20): 181-182 (in Chinese).
- [4] 童有仁, 马志超, 陈卫良, 李德葆. 枯草芽孢杆菌 B034 拮抗蛋白的分离纯化及特性分析[J]. 微生物学报, 1999, 39(4): 339-343
TONG YR, MA ZC, CHEN WL, LI DB. Purification and partial characterization of antagonistic proteins from *Bacillus subtilis* B034[J]. Acta Microbiologica Sinica, 1999, 39(4): 339-343 (in Chinese).
- [5] 闫洪雪, 刘露, 李丽, 张鹏鹏, 梁文辉, 赵宏涛. PGPR 的研究进展及其在农业上的应用[J]. 黑龙江农业科学, 2016(6): 148-151.
YAN HX, LIU L, LI L, ZHANG PP, LIANG WH, ZHAO HT. Research progress on agriculture of plant growth promoting rhizobacteria[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(6): 148-151 (in Chinese).
- [6] SANTOYO G, URTIS-FLORES CA, LOEZA-LARA PD, del CARMEN OROZCO-MOSQUEDA M, GLICK BR. Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR)[J]. Biology, 2021, 10(6): 475.
- [7] 刘仁浪, 江美彦, 陈靳松, 杜宣, 郑全林, 侯凯, 陈银银, 吴卫. 不同类型地膜覆盖对白芷生长发育、产量及主要有效成分的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(3): 540-550.
LIU RL, JIANG MY, CHEN JS, DU X, ZHENG QL, HOU K, CHEN YY, WU W. Effects of different types plastic film on the growth, yield and main active ingredients of *Angelica dahurica* var. *formosana*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(3): 540-550 (in Chinese).
- [8] 柳玉凤, 谢英荷, 李廷亮, 加武斌, 高慧洲, 李超, 黄涛, 窦露. 地膜覆盖对旱地作物产量及土壤水分影响的概述[J]. 山西农业科学, 2018, 46(3): 461-465.
LIU YF, XIE YH, LI TL, JIA WB, GAO HZ, LI C, HUANG T, DOU L. Overview of effect of film mulching on crop yield and soil moisture in dry land[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(3): 461-465 (in Chinese).
- [9] 刘思琴, 江美彦, 刘仁浪, 张宇柔, 侯凯, 冯冬菊, 徐东北, 郑全林, 吴卫. 黑曲霉 ZJ-17 配合有机肥和化肥施用对白芷生长、产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(10): 1911-1922.
LIU SQ, JIANG MY, LIU RL, ZHANG YR, HOU K, FENG DJ, XU DB, ZHENG QL, WU W. Effects of *Aspergillus niger* ZJ-17 combined with organic and chemical fertilizers on the growth, yield and quality of *Angelica dahurica* var. *Formosana*[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(10): 1911-1922 (in Chinese).
- [10] 刘仁浪. 川白芷不同地膜、覆盖方式及肥料互作栽培关键技术研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
LIU RL. Key cultivation techniques for the interaction of different mulching films, covering methods, and fertilizers in *Angelica dahurica* var. *formosana*[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023 (in Chinese).
- [11] 江美彦, 刘仁浪, 周杨, 刘思琴, 杨云舒, 姚菲, 杜宣, 陈银银, 冯冬菊, 徐东北, 吴卫. 白芷根际促生真菌筛选及其促生效果研究[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(19): 5172-5180.
JIANG MY, LIU RL, ZHOU Y, LIU SQ, YANG YS, YAO F, DU X, CHEN YY, FENG DJ, XU DB, WU W. Screening and promoting effect of grow-promoting fungi in rhizosphere of *Angelica dahurica* var. *Formosana*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2023, 48(19): 5172-5180 (in Chinese).
- [12] 黄文娟. 白芷早抽薹对其香豆素类化合物影响及 NAC 家族早抽薹基因挖掘[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021.
HUANG WJ. The effect of early bolting on coumarin compounds in *Angelica dahurica* var. *formosana* and the mining of NAC family genes related to early bolting[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2021 (in Chinese).
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
LI HS. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999 (in Chinese).
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO SD. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [15] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
National Agricultural Technology Extension Service Center. Technical Specification for Soil Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese).
- [16] 王媛. 生物炭配施植物根际促生菌(PGPR)对作物生长及土壤理化和生物性状的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
WANG Y. Effects of biochar combined with plant

- growth promoting rhizobacteria (PGPR) on crop growth and soil physical, chemical and biological properties[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019 (in Chinese).
- [17] 胡庆兰. 地膜覆盖及不同施肥处理对土壤微生物学特性和玉米产量的影响[D]. 西宁: 青海大学, 2023. HU QL. Effect of plastic film mulching and different fertilization treatments on soil microbiological characteristics and maize yield[D]. Xining: Qinghai University, 2023 (in Chinese).
- [18] 江美彦. 基于不同土壤和基因型的川白芷与根际微生物互作关系分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022. JIANG MY. Analysis of the interaction between *Angelica dahurica* var. *formosana* and rhizosphere microorganisms based on different soil types and genotypes[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [19] 陈兴福, 丁德蓉, 刘岁荣, 黄文秀, 卢进. 白芷生长土壤的研究[J]. 中国中药杂志, 1994, 19(10): 591-593. CHEN XF, DING DR, LIU SR, HUANG WX. Studies on the soil s for growth of *Angelica dahurica* (Fisch.) Benth. et. Hook[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 1994, 19(10): 591-593 (in Chinese).
- [20] 常沛尹, 王中华, 李凤敏, 高梓源, 张辉红, 王伟, 李芳, 韩燕来, 姜瑛. 玉米根际多功能促生菌的筛选及其对冬小麦-夏玉米轮作体系产量提升效果[J]. 生物技术通报, 2024, 40(1): 231-242. CHANG LY, WANG ZH, LI FM, GAO ZY, ZHANG HH, WANG Y, LI F, HAN YL, JIANG Y. Screening multi-functional rhizobacteria from maize rhizosphere and their chancing effects on winter wheat-summer maize rotation system[J]. Biotechnology Bulletin, 2024, 40(1): 231-242 (in Chinese).
- [21] 谢延彬, 王士强, 赵海红, 张兴梅. 生物制剂拌种对大豆的促生作用及对产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2009, 21(1): 15-18. XIE YB, WANG SQ, ZHAO HH, ZHANG XM. Effects of the seeds dressing biological reagents on soybean plant-growth promoting and yield[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009, 21(1): 15-18 (in Chinese).
- [22] 辛树权, 何正飏, 赵骥民, 章有知, 王贵. 促生菌对番茄产量影响和氮肥替代效应的研究[J]. 北方园艺, 2008(1): 39-41. XIN SQ, HE ZB, ZHAO JM, ZHANG YZ, WANG G. The exploring of PGPR effects on the outputs of tomato and nitrogen fertilizers substitution[J]. Northern Horticulture, 2008(1): 39-41 (in Chinese).
- [23] FU W, FAN J, HAO MD, HU JS, WANG H. Evaluating the effects of plastic film mulching patterns on cultivation of winter wheat in a dryland cropping system on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106550.
- [24] HOU LJ, XI J, CHEN XT, LI XW, MA W, LU JK, XU J, LIN YB. Biodegradability and ecological impacts of polyethylene-based mulching film at agricultural environment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 378: 120774.
- [25] HU Q, LI XY, GONÇALVES JM, SHI HB, TIAN T, CHEN N. Effects of residual plastic-film mulch on field corn growth and productivity[J]. Science of The Total Environment, 2020, 729: 138901.
- [26] 焦松林, 欧阳湖, 刘浪, 祝钺洋, 周东海. 植物根际促生菌对药用植物生长影响的研究进展[J]. 现代医药卫生, 2024, 40(2): 316-320. JIAO SL, OUYANG H, LIU L, ZHU ZY, ZHOU DH. Research progress on the effects of Plant growth-promoting rhizobacteria on the growth of medicinal plants[J]. Journal of Modern Medicine & Health, 2024, 40(2): 316-320 (in Chinese).
- [27] 张萌. 接种根际促生菌对白花前胡的品质提升研究[D]. 大理: 大理大学, 2023. ZHANG M. Study on the effect of inoculation with different plant growth-promoting rhizobacteria on quality improvement of *Peucedanum praeruptorum* dunn[D]. Dali: Dali University, 2023 (in Chinese).
- [28] 杨娟, 赵涵予, 陈婷, 周鑫烨, 林文雄, 林生. 不同根际促生菌对金线莲生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(2): 186-189. YANG J, ZHAO HY, CHEN T, ZHOU XY, LIN WX, LIN S. Effects of different rhizosphere promoting bacteria on physiological characteristics of *Anoectochilus roxburghii*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 186-189 (in Chinese).
- [29] 李昌宁, 李政璇, 曹全熙, 李建宏, 姚拓, 冉福, 冯影. 5 株植物根际促生菌对紫花苜蓿生长和品质的影响[J]. 草原与草坪, 2018, 38(3): 29-34. LI CN, LI ZX, CAO QX, LI JH, YAO T, RAN F, FENG Y. Effects of 5 plant growth-promoting rhizobacteria on the growth and quality of *Medicago sativa*[J]. Grassland and Turf, 2018, 38(3): 29-34 (in Chinese).
- [30] 张天谣, 徐俊, 李文祥, 李新艺, 贾颜, 邵琳亚, 黄海泉, 黄美娟. 含 ACC 脱氨酶的植物根际促生菌对重瓣百合生长及采后品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11): 142-149. ZHANG TY, XU J, LI WX, LI XY, JIA Y, SHAO LY, HUANG HQ, HUANG MJ. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) with ACC-deaminase on growth and postharvest quality of Asian double-flower lily[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(11): 142-149 (in Chinese).