

引文格式: 卢宇, 马东晓, 周锦涛, 等. 一株产吲哚乙酸的日本野漆树内生枯草芽孢杆菌生长条件及其促生特性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(3): 392–399. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202211010

一株产吲哚乙酸的日本野漆树内生枯草芽孢杆菌生长条件及其促生特性研究*

卢宇¹, 马东晓¹, 周锦涛¹, 胡治旭¹, 杨泽慧¹, 段晓盟¹, 纵丹^{1,2}, 何承忠^{1,2**}

(1. 西南林业大学 生命科学学院, 云南 昆明 650224;

2. 西南林业大学, 云南省高校林木遗传改良与繁育重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要:【目的】从日本野漆树(*Toxicodendron succedaneum*)组培苗分离和筛选了1株产吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)的内生细菌(BSH-1), 对其进行鉴定并分析其促生特性, 为开发微生物肥料提供理论依据。

【方法】通过革兰氏染色法观察菌株BSH-1的形态, 结合16S rRNA基因序列分析和系统发育分析确定其分类学地位; 利用生长曲线法测试菌株BSH-1的适宜生长温度、pH值和NaCl质量浓度; 利用Salkowski显色法测定菌株产生IAA的能力; 采用不同密度的菌株发酵液分别浸泡水稻、云南松和思茅松种子, 通过统计种子萌发率以及水稻幼苗的株高、茎粗、生根数和根长等指标分析菌株的促生特性。【结果】鉴定菌株BSH-1为枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*), 该菌在35℃、pH值为7和10 g/L NaCl条件下生长量最大。菌株BSH-1产IAA的能力达到17.27 mg/L; 可通过促进水稻幼苗的株高、茎粗和生根数促进植株生长, 其中株高和生根数分别比对照高9.0%和20.8%。【结论】枯草芽孢杆菌BSH-1能产生IAA, 促进水稻幼苗生长, 具有生物菌肥开发潜力。

关键词: 植物生长促进细菌; 枯草芽孢杆菌; 分离鉴定; 吲哚乙酸; 促生特性

中图分类号: S718.83

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2023)03-0392-08

Growth Conditions and Growth-promoting Characteristics of an Endophytic Bacterium from *Toxicodendron succedaneum*

LU Yu¹, MA Dongxiao¹, ZHOU Jintao¹, HU Zhixu¹, YANG Zehui¹,
DUAN Xiaomeng¹, ZONG Dan^{1,2}, HE Chengzhong^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Key Laboratory for Forest Genetic and Tree Improvement & Propagation in Universities of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Purpose] An endophytic bacterium named BSH-1 was isolated and selected from the sterile seedlings of *Toxicodendron succedaneum*, which could produce indole-3-acetic acid (IAA), to identify it and to analyse its growth-promoting characteristics, providing theoretical basis for the development of microbial fertilizer. [Methods] The morphology of strain BSH-1 was observed by

收稿日期: 2022-11-07

修回日期: 2023-05-18

网络首发日期: 2023-05-26

*基金项目: 云南省专家工作站建设项目(20200AF150020); 云南省产业技术领军人才项目(YNWR-CYJS-2020-018); 林业和草原科技成果国家级推广项目(2020133107)。

作者简介: 卢宇(1997—), 男, 云南玉溪人, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理学研究。

E-mail: 2397705980@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 何承忠(1970—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 教授, 主要从事林木遗传育种研究。E-mail: hcz70@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/53.1044.S.20230526.0947.001.html>



Gram staining and identified by 16S rRNA gene sequence analysis. The optimum growth temperature, pH and NaCl mass concentration were tested by growth curve. The ability of IAA production was determined by Salkowski chromogenic assay. Seeds of rice, *Pinus yunnanensis* and *P. kesiya* var. *langbianensis* were soaked in different densities of fermentation broth, and the growth-promoting characteristics were analysed by the germination rate of seeds and the effects of suspension on rice seedling height, stem diameter, root number, and root length. [Results] Strain BSH-1 was identified as *Bacillus subtilis*, and its growth was the largest at 35 °C, pH 7 and 10 g/L NaCl, and the IAA production capacity reached 17.27 mg/L. It could promote plant growth by promoting plant height, stem diameter, and root number of rice seedlings. The plant height and root number of rice seedlings were 9.0% and 20.8% higher than those of the control, respectively. [Conclusion] *B. subtilis* BSH-1 can produce IAA and promote the growth of rice seedlings. It has potential application value in promoting plant growth and development.

Keywords: plant growth promoting bacteria; *Bacillus subtilis*; isolation and identification; indole-3-acetic acid; growth-promoting characteristics

自然界中的植物和微生物不断地相互作用、相互影响,这些微生物被认为是环境友好的且有利于改善植物的生长^[1]。植物生长促生细菌(plant growth promoting bacteria, PGPB)可以存活并定殖于植物根系周围的土壤(根际)中^[2-3],或附着在根、茎、叶上,或作为植物组织内的内生菌,与植物建立互惠关系从而促进植物生长。PGPB可以增强植物对生物和非生物环境胁迫的抵抗力^[4-5],能够通过对土壤养分的吸收、调整激素水平等不同的机制促进植物生长,或通过激活诱导系统抗性的防御机制来增强植物对病原体的抗性^[5-7]。

枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)是芽孢杆菌属(*Bacillus*)的革兰氏阳性菌,具有好氧兼性厌氧特性,由于在土壤和植物表面普遍存在而被广泛分离,是当前重点研究的益生菌之一^[8-9]。国内外学者在枯草芽孢杆菌促进植物生长方面开展了大量研究,一些优势菌株已被应用于促进植物生长的生产实践中^[10-11]。研究表明:微生物能产生激素类物质,如生长素、赤霉素和细胞分裂素等,不仅是其自身生长所必需,也能对其生活环境中的其他生物发挥生长调控作用^[12-13]。吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)是一种重要的植物生长激素,对植物的新陈代谢和生长发育起着重要作用。IAA产生菌作为重要的微生物资源,可以通过产生促生长的活性物质来影响新陈代谢,刺激植物生长^[14]。枯草芽孢杆菌普遍存在于多种植物组织中,能产生IAA^[14-15],研究其对植物生

长的促进作用具有重要意义。

日本野漆树(*Toxicodendron succedaneum*)别称日本木蜡树、日本黄栌,为漆树科(Anacardiaceae)漆树属(*Toxicodendron*)落叶乔木^[16]。日本野漆树籽实产量高、籽粒大,生漆和漆蜡含量高且品质优良,是重要的化工原料,应用前景极为广阔^[17],但有关日本野漆树内生菌的研究非常有限。为此,本研究以日本野漆树无菌苗根中分离到的1株菌株为材料,明确其种属,探究其生长的最适条件、产生IAA的能力和促生特性,为后续研究菌株促生机理和开发微生物菌肥提供参考依据和种质资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

日本野漆树组培苗由课题组前期建立的组织培养技术体系^[18]培养所得。菌株分离采用LB固体培养基(含10 g/L胰蛋白胨、5 g/L酵母提取物、10 g/L氯化钠和20 g/L琼脂),于121 °C高压灭菌20 min,存放于锥形瓶中备用^[19]。

1.2 试验方法

1.2.1 菌种分离和纯化

在超净工作台将1株长势良好的日本野漆树组培苗的根、茎、叶各取1 g置于无菌研钵中研磨,加入无菌水10 mL,静置30 min,按 10^{-1} ~ 10^{-5} 梯度进行稀释,每个梯度吸取稀释液0.1 mL均匀涂布于LB固体平板上,重复3次,倒置于

28 ℃ 恒温培养箱中培养 24~48 h。待平板上长出单菌落后,挑取不同形态的细菌单菌落于新的 LB 固体平板上划线纯化^[20]。

1.2.2 形态学鉴定

参照《常见细菌系统鉴定手册》^[21]进行形态学鉴定。用接种环挑取细菌于载玻片上,滴加无菌水使其充分混匀后于酒精灯火焰上部使其干燥,形成 1 层菌膜;冷却后滴加草酸铵结晶紫染液染色 1 min,用无菌水冲洗染液,并滴加革兰氏碘液固定 1 min;再次冲洗染液;从一侧缓慢滴加 95% 乙醇进行脱色,直至无色后用无菌水清洗;滴加番红染液复染 1 min 后水洗,用滤纸吸干多余水分并于显微镜下观察其颜色及形态特征。

1.2.3 分子生物学鉴定

用 Omega 细菌基因组提取试剂盒 (Omega Bio-Tek 公司) 提取菌株 DNA,用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测是否提取成功,从而进行 16S rRNA 基因序列扩增。用于菌种鉴定的通用引物为 27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'和 1492R: 5'-CTACGGCTACCTTGTACGA-3'^[22-23]。扩增反应体系总体积为 25.0 μ L,包括 Super Mix 12.5 μ L,上、下游引物各 1.0 μ L,菌株基因组 DNA 2.0 μ L,ddH₂O 8.5 μ L。PCR 反应条件为:预变性 94 ℃ 3 min,变性 94 ℃ 30 s,退火 55 ℃ 30 s,延伸 72 ℃ 1 min,30 个循环,延伸 72 ℃ 25 min,4 ℃ 保存。将扩增产物送至生工生物工程有限公司进行测序,所得序列在 NCBI 的 GenBank 数据库中进行同源性搜索比对^[23-24];利用 MAFFT 软件 (version 7) 进行序列比对^[25],根据 ModelFinder 选择的核苷酸替代模型 (TIM3+F+R2)^[26-27],利用 IQ-tree 1.6.7^[28]通过 1000 次重复构建系统发育树 (最大似然法)。

1.2.4 菌株生长曲线的测定

保存的菌种于 LB 固体平板上划线活化,挑取单菌落在 LB 液体培养基中于 37 ℃、200 r/min 过夜培养;取过夜培养的菌液 0.5 mL 接种到 50 mL LB 液体培养基中,于 37 ℃、200 r/min 振荡培养 36 h,每 2 h 利用分光光度计 (TU-1901,普析) 测定其在波长 600 nm 处的吸光度,以吸光度为纵坐标、时间为横坐标绘制生长曲线^[29]。

1.2.5 测定菌株生长的最适温度、pH 值及 NaCl 质量浓度

在 50 mL LB 液体培养基中加入过夜培养的菌

液 0.5 mL,于 200 r/min 条件下培养 24 h,分别测定温度 (15、20、25、28、30、35、37 和 40 ℃)、pH 值 (3、4、5、6、7、8、9、10 和 11) 及 NaCl 质量浓度 (0、10、20、30、40 和 50 g/L) 对细菌生长的影响。细菌生物量的测定方法为:用分光光度计测定波长 600 nm 处的吸光度,根据吸光度值判断其生长状态,每个试验重复 3 次^[29-30]。

1.2.6 菌株产 IAA 能力的测定

采用 Salkowski 比色法测定菌株产 IAA 的能力^[31]。将纯化的菌株置于 LB 液体培养基过夜培养并制成发酵液,取 0.5 mL 接种于含 3 mmol/L 色氨酸的 50 mL LB 培养基中,于 35 ℃、200 r/min 摇床培养 48 h。取发酵液 1 mL 于 4 ℃、10000 r/min 条件下离心 5 min,取上清液 300 μ L 于 2 mL 离心管中,加入 Salkowski 显色剂 300 μ L 进行显色反应。以 60 mg/L IAA 标准溶液 300 μ L 为阳性对照,以不加菌液的 LB 培养基为阴性对照。室温避光静置 30 min,观察颜色变化。取菌株发酵液 2 mL 于 10000 r/min 离心 5 min,取上清液 500 μ L,等体积加入 Salkowski 显色剂,置于室温避光环境下反应 30 min,测定其 OD₅₃₅ 值,根据标准曲线计算单位体积发酵液中产生的 IAA 含量。

1.2.7 菌株发酵液浸种对种子萌发的影响

分别选取籽粒饱满的水稻、云南松和思茅松种子,于 25 ℃ 条件下用无菌水浸种催芽 24 h;再用 0.5% KMnO₄ 对种子进行表面消毒^[32-33],无菌水冲洗 3~5 次后备用。将在 35 ℃、200 r/min 条件下培养 48 h 的发酵液用无菌水配制为 1.0×10^8 CFU/mL 的重悬液 (OD₆₀₀=0.8),并依次稀释为 1.0×10^7 和 1.0×10^6 CFU/mL 的重悬液备用。分别用 50 mL 上述重悬液浸泡种子,以 50 mL 无菌水浸泡作为空白对照 (CK)。浸种 30 min 后将种子转移至含湿润滤纸的培养皿中,每个处理 30 粒种子,设置 3 个重复,每天观察发芽情况,记录发芽率和发芽势,以种子露白作为发芽标准^[34]。

1.2.8 菌株发酵液喷施对水稻幼苗生长的影响

选取已经发芽的水稻种子接种于方形培养皿中,每皿接种 20 粒种子。用上述 3 种密度 (1.0×10^8 、 1.0×10^7 、 1.0×10^6 CFU/mL) 的重悬液喷施种子,以无菌水作为空白对照 (CK)。每皿喷施液体 1 mL,每个密度设置 3 次重复。于 (26 $\pm$ 2) ℃ 下培养,7 d 后测量水稻株高、根长、茎粗和生根数。

1.3 数据统计分析

采用 Excel 2016、SPSS 25 和 Graphpad 8.2 进行数据统计、分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 菌株形态学分析

在日本野漆树组培苗根中分离纯化得到 1 株菌株，将其编号为 BSH-1。将菌株 BSH-1 接种于 LB 固体平板上，其单菌落形态呈圆形，表面湿润且光滑，颜色为橘红色；在显微镜下观察到菌株革兰氏染色后呈紫红色，且细菌形状为

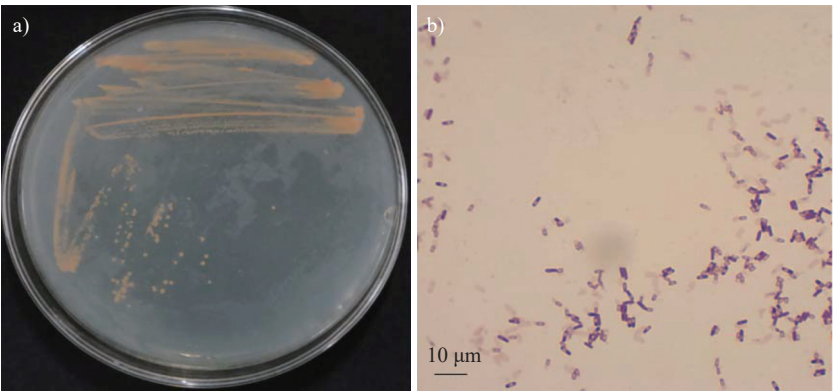
短杆状，可以初步判定其为杆状革兰氏阳性菌 (图 1)。

2.2 菌株 BSH-1 的分子生物学鉴定

由图 2 可知：菌株 BSH-1 和枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 有密切的亲缘关系，结合细菌形态学特征分析结果以及对 16S rRNA 基因的分子生物学分析，初步判定菌株 BSH-1 属于枯草芽孢杆菌。

2.3 菌株 BSH-1 的生长曲线分析

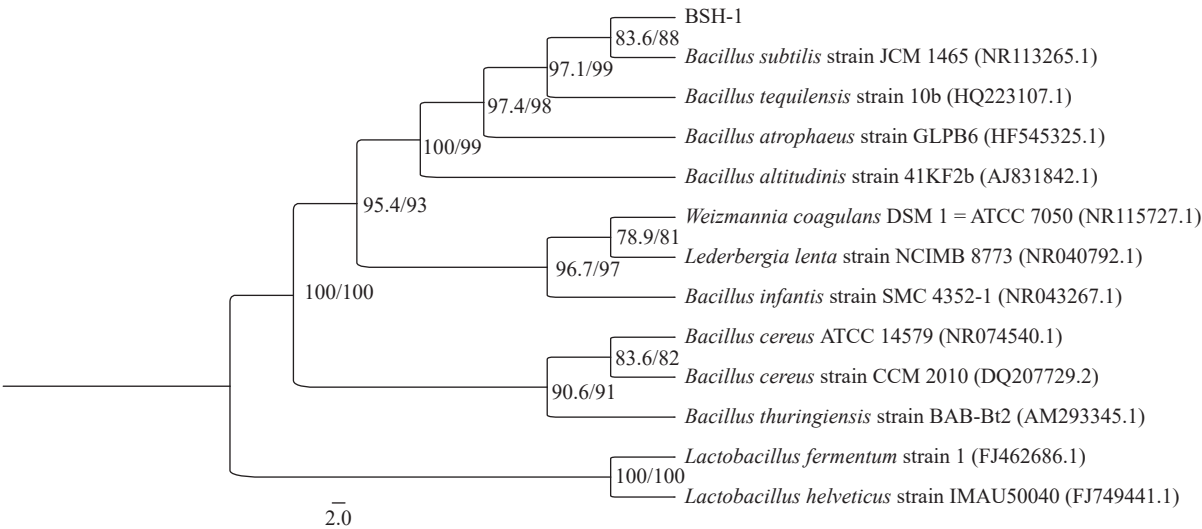
由图 3a 可知：接种菌株 BSH-1 后，延迟期为 0~2 h，此时菌株生长缓慢；对数生长期为



注: a) 菌落形态特征; b) 革兰氏染色及油镜观察 (100×) 结果。
Note: a) colony characteristics; b) Gram staining and oil lens observation.

图 1 菌株 BSH-1 形态学鉴定结果

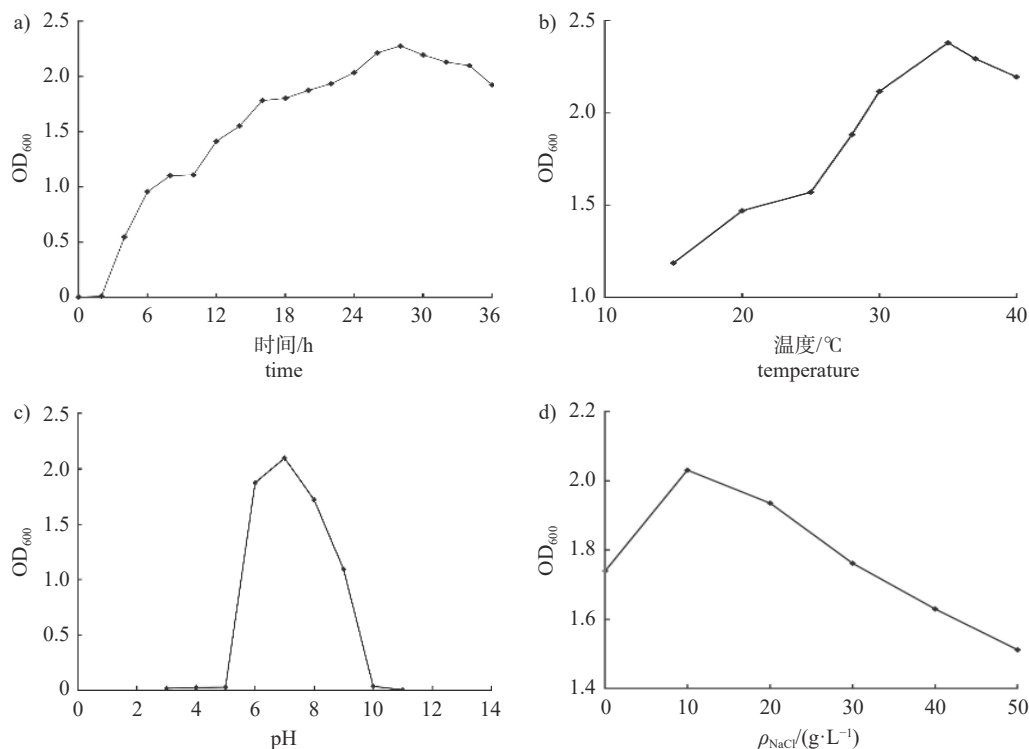
Fig. 1 Morphological identification results of strain BSH-1



注: 系统发育树括号中序号为 GenBank 登录号; 分支处的数字表示对聚类结果的支持率。
Note: The sequence number in the bracket of the phylogenetic tree is the login number of GenBank; the numbers at the branches indicate support rate for the clustering results.

图 2 基于菌株 BSH-1 16S rRNA 基因序列的系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree based on the 16S rRNA gene sequence of strain BSH-1



注: a) BSH-1 的生长曲线; b)、c) 和 d) 分别为温度、pH 值和 NaCl 质量浓度对 BSH-1 生长的影响。

Note: a) growth curve of BSH-1; b), c) and d) are effects of temperature, pH value and NaCl mass concentration on the growth of BSH-1, respectively.

图 3 菌株 BSH-1 的生长特性

Fig. 3 Growth characteristics of strain BSH-1

2~16 h, 此时菌体数量明显增多, 其中培养到 11 h 时生长速率达到最大; 稳定期为 16~28 h, 菌体数量不再增加, 28 h 菌体的 OD₆₀₀ 值达到最大, 为 2.278; 28 h 后进入衰亡期, 菌体数量下降。可见, 菌株 BSH-1 的最适培养时间为 16~28 h。

2.4 温度、pH 及 NaCl 质量浓度对菌株 BSH-1 生长的影响

由图 3b 可知: 菌株 BSH-1 在 15~40 °C 均可生长, 其中, 菌株在 15~35 °C 条件下的生长速率随着温度的升高而加快, 35 °C 时生长量达到最大, 35 °C 后生长速率减缓。由图 3c 可知: 当 pH 值小于 5 或大于 10 时, 菌株几乎不生长; 当 pH 值在 5~7 时, 菌株生长速率逐渐加快, pH 值为 7 时菌株生长量达到最大, pH 大于 7 时菌株生长速率呈下降趋势。由图 3d 可知: NaCl 质量浓度为 10 g/L 时, 菌株 BSH-1 的生长量最大。可见, 菌株 BSH-1 生长的最适温度为 35 °C, 最适 pH 值为 7, 最适 NaCl 质量浓度为 10 g/L。

2.5 BSH-1 产 IAA 能力的鉴定

Salkowski 比色试验确定 BSH-1 菌株的代谢过

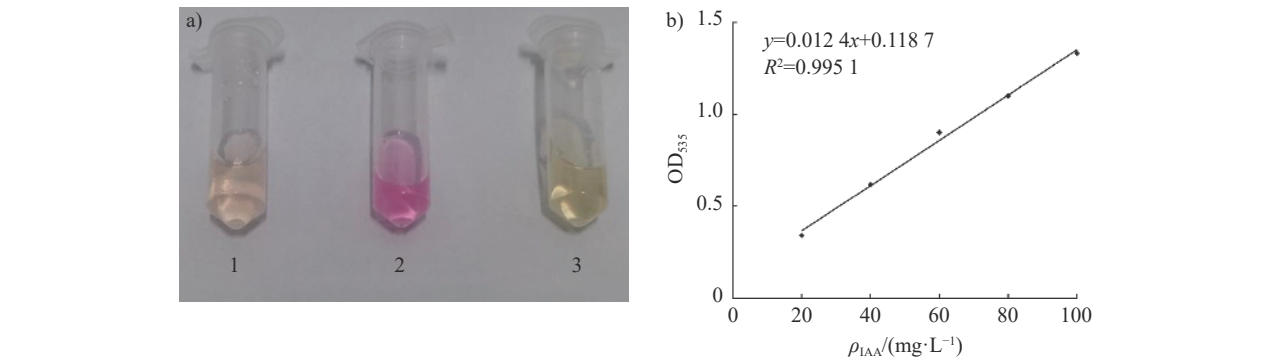
程可产生 IAA; 以吸光值 OD₅₃₅ 为纵坐标 (y)、IAA 质量浓度为横坐标 (x) 绘制标准曲线 (图 4), 得到线性回归方程 $y=0.0124x+0.1187$, $R^2=0.9951$ 。根据标准曲线测定菌株 BSH-1 产 IAA 的能力可知: 菌株发酵液中 IAA 的含量为 17.27 mg/L。

2.6 BSH-1 发酵液浸种对种子萌发的影响

由表 1 可知: 水稻、云南松和思茅松种子在不同密度的 BSH-1 发酵液浸泡下, 其发芽率和发芽势均无显著差异, 说明发酵液浸种对 3 种植物种子萌发无显著促进作用。

2.7 BSH-1 发酵液喷施对水稻幼苗生长的影响

由图 5 可知: 与对照组相比, 喷施菌株 BSH-1 发酵液后水稻幼苗的株高和生根数显著增加, 且当喷施 1.0×10^6 CFU/mL 发酵液时促进作用最显著, 分别提高 9.0% 和 20.8%; 当喷施 1.0×10^7 和 1.0×10^6 CFU/mL 发酵液时, 水稻幼苗茎粗较对照组显著增加; 喷施发酵液对水稻幼苗的根长无显著影响。可见, 喷施菌株 BSH-1 发酵液对水稻幼苗有较显著的促生效果, 且对水稻幼苗生根的促进作用更明显。



注: a) 菌株 BSH-1 产生 IAA 的定性结果, 1. 试验组, 2. 阳性对照, 3. 阴性对照; b) IAA 标准曲线。
Note: a) qualitative results of IAA produced by strain BSH-1, 1. experimental group, 2. positive control, 3. negative control; b) IAA standard curve.

图 4 菌株产 IAA 能力的检测
Fig. 4 Detection of IAA producing ability of strain

表 1 不同密度 BSH-1 发酵液浸种对 3 种种子萌发的影响

Tab. 1 Effects of seed soaking with different densities of BSH-1 fermentation broth on the germination of three kinds of seeds						
密度/(CFU·mL ⁻¹) density	水稻 rice		云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>		思茅松 <i>Pinus kesiya</i> var. <i>langbianensis</i>	
	发芽率	发芽势	发芽率	发芽势	发芽率	发芽势
	germination rate	germination potential	germination rate	germination potential	germination rate	germination potential
CK	0.93±0.03 a	0.92±0.01 a	0.83±0.06 a	0.43±0.06 a	0.86±0.11 a	0.78±0.05 a
1.0×10 ⁶	0.97±0.06 a	0.96±0.05 a	0.84±0.05 a	0.47±0.12 a	0.92±0.05 a	0.59±0.10 a
1.0×10 ⁷	0.98±0.04 a	0.97±0.03 a	0.83±0.03 a	0.44±0.05 a	0.96±0.05 a	0.53±0.15 a
1.0×10 ⁸	0.94±0.02 a	0.93±0.03 a	0.80±0.07 a	0.48±0.10 a	0.91±0.02 a	0.61±0.08 a

注: CK. 无菌水浸泡; 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK. soaking in sterile water; different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

3 讨论

植物体内普遍存在内生菌, 彼此间不断相互作用、相互适应^[35]。植物为内生菌提供生存环境, 内生菌通过代谢刺激和促进植物生长^[36]。内生菌由德国科学家 DE BARY 于 1866 年首次提出^[37], 随着研究领域不断拓宽和研究方法的不断优化, 植物与内生菌互作的重要性逐渐被揭示, 对其研究也成为当前的热点之一。在植物生长发育过程中, 植物激素吲哚乙酸 (IAA) 有着重要的促进作用。枯草芽孢杆菌作为 PGPR 占比最多的一类内生菌, 其具备的产 IAA 能力能显著促进植物生长发育。已有研究在甘蔗^[9]、水稻^[20]、地黄^[38]和烤烟^[39]等作物中分离到具有产生 IAA 能力且对植物生长有促进作用的枯草芽孢杆菌。桂楚伊^[40]在番茄中分离鉴定得到 1 株枯草芽孢杆菌 B21, 其 IAA 产量达到 9.3 mg/L, 并且能够促进小麦的生长。刘晓瑞^[41]从水稻中分离鉴定得到 1 株芽孢杆菌属内生菌 A48, 其 IAA 产量达到 41.55 mg/L。

赵柏霞^[42]对甜樱桃中的阿氏芽孢杆菌 (*B. aryabhattai*) B20 进行产生 IAA 的条件优化, 提高了 IAA 的产量。本研究从日本野漆树组培苗根系中分离得到枯草芽孢杆菌 BSH-1, 其 IAA 产量达 17.27 mg/L, 且对水稻苗高、茎粗和生根数具有显著的促进作用。下一步将对菌株 BSH-1 的装液量、碳源和氮源等最适培养条件进行优化, 从而探究其产生 IAA 的最适条件。鉴于菌株 BSH-1 的促生特性, 筛选出最适菌株发酵液密度也是非常必要的。此外, 随着分离菌株数量的增加, 也为探讨 BSH-1 与其他有促生效果的菌株混合使用对植物生长的促进效果提供了可能。

枯草芽孢杆菌普遍存在于植物界, 其对植物的促生和保护作用为深入研究植物与微生物互相作用的分子调控机制提供了有利依据^[43]。此外, 枯草芽孢杆菌具有较好的抗逆性和促生特性, 能够为开发绿色、环保、高效的微生物肥料提供资源^[44], 在一定程度上为中国农业和林业的发展提供帮助。

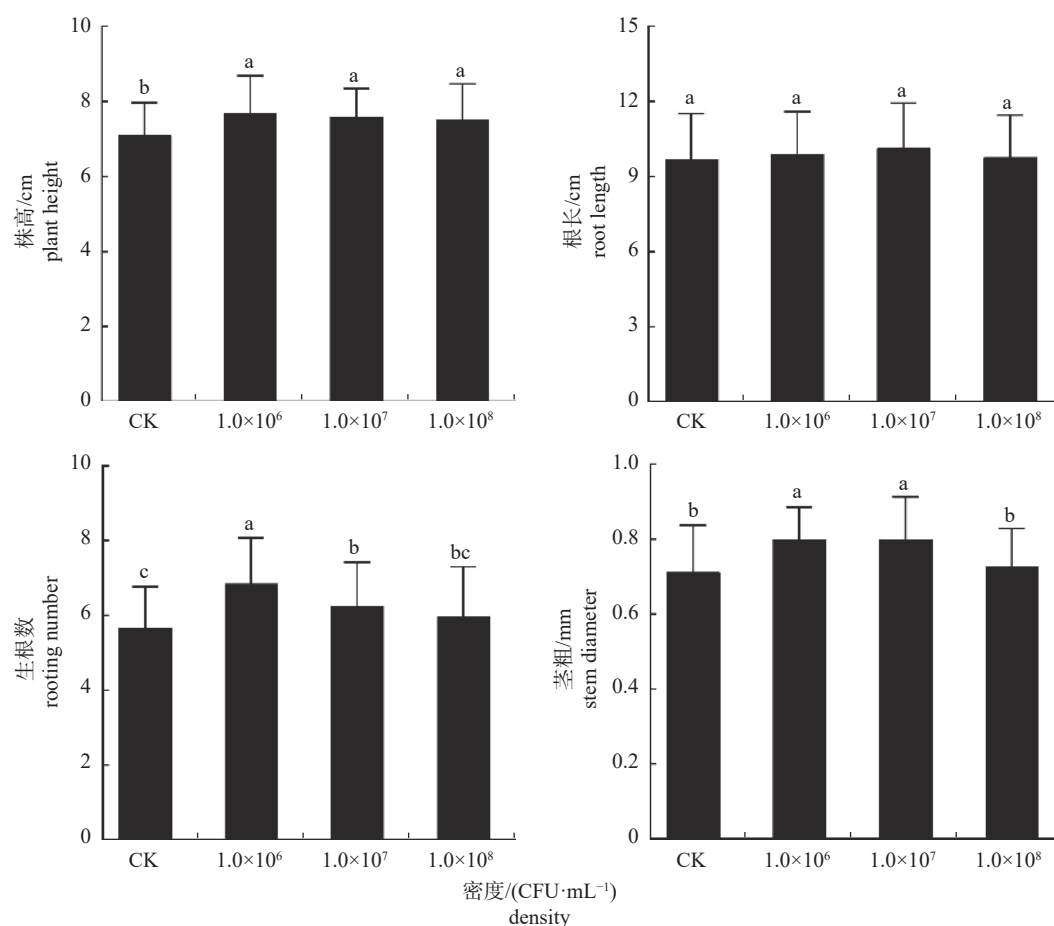


图 5 喷施菌株 BSH-1 发酵液对水稻幼苗生长的影响

Fig. 5 Effect of spraying fermentation broth of strain BSH-1 on the growth of rice seedlings

4 结论

本研究从日本野漆树组培苗根系中分离得到 1 株菌株, 并将其鉴定为枯草芽孢杆菌 (*B. subtilis*)。该菌株在 35 ℃、pH 值为 7 以及 10 g/L NaCl 条件下生长最旺盛。该菌具备产生 IAA 的能力, 可通过促进株高、茎粗和生根数促进水稻苗生长。研究结果为该菌株微生物肥料的开发和利用提供了理论依据。

[参考文献]

- [1] WANG X N, ZHANG J C, WANG X F, et al. The growth-promoting mechanism of *Brevibacillus laterosporus* AMCC100017 on apple rootstock *Malus robusta*[J]. Horticultural Plant Journal, 2022, 8(1): 22. DOI: [10.1016/j.hpj.2021.11.005](https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.11.005).
- [2] TIAN T, SUN B B, SHI H W, et al. Sucrose triggers a novel signaling cascade promoting *Bacillus subtilis* rhizosphere colonization[J]. The International Society for Microbial Ecology Journal, 2021, 15(9): 2723. DOI: [10.1038/s41396-021-00966-2](https://doi.org/10.1038/s41396-021-00966-2).
- [3] YIN J H, CHENG D, ZHU Y L, et al. Development of a

whole-cell biosensor for detection of antibiotics targeting bacterial cell envelope in *Bacillus subtilis*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2022, 106(2): 789. DOI: [10.1007/s00253-022-11762-z](https://doi.org/10.1007/s00253-022-11762-z).

- [4] ANDRÉS-BARRAO C, ALZUBAIDY H, JALAL R, et al. Coordinated bacterial and plant sulfur metabolism in *Enterobacter* sp. SA187-induced plant salt stress tolerance[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(46): e2107417118. DOI: [10.1073/pnas.2107417118](https://doi.org/10.1073/pnas.2107417118).
- [5] DE ZELICOURT A, AL-YOUSIF M, HIRT H. Rhizosphere microbes as essential partners for plant stress tolerance[J]. Molecular Plant, 2013, 6(2): 242. DOI: [10.1093/mp/sst028](https://doi.org/10.1093/mp/sst028).
- [6] GLICK B R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications[J]. Scientifica, 2012, 2012: 963401. DOI: [10.6064/2012/963401](https://doi.org/10.6064/2012/963401).
- [7] LUGTENBERG B, KAMILOVA F. Plant-growth-promoting rhizobacteria[J]. Annual Review of Microbiology, 2009, 63: 541. DOI: [10.1146/annurev.micro.62.081307.162918](https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918).
- [8] 辛娜, 邓露芳, 郭亮, 等. 枯草芽孢杆菌体外益生效果评估[J]. 饲料研究, 2022, 45(4): 84. DOI: [10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2022.04.019](https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2022.04.019).
- [9] 刘鲁峰, 狄义宁, 何丽莲, 等. 内生枯草芽孢杆菌B9促生长效果及产吲哚乙酸(IAA)能力研究[J]. 云南农业大

- 学学报(自然科学), 2020, 35(2): 227. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201907034](#).
- [10] 张晓冰, 杨星勇, 杨永柱, 等. 芽孢杆菌促进植物生长机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(3): 73. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2020.03.012](#).
- [11] 赵新林, 赵思峰. 枯草芽孢杆菌对植物病害生物防治的作用机理[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(15): 3025. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2011.15.039](#).
- [12] 张霞, 唐文华, 张力群. 枯草芽孢杆菌B931防治植物病害和促进植物生长的作用[J]. 作物学报, 2007, 33(2): 236. DOI: [10.3321/j.issn:0496-3490.2007.02.010](#).
- [13] 刘雪, 穆常青, 蒋细良, 等. 枯草芽孢杆菌代谢物质的研究进展及其在植病生防中的应用[J]. 中国生物防治, 2006(S1): 179. DOI: [10.16409/j.cnki.2095-039x.2006.s1.038](#).
- [14] 闵勇, 刘晓艳, 陈凌, 等. 一株产吲哚乙酸巴基斯坦赖氨酸芽孢杆菌的快速筛选与鉴定[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(23): 68. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.23.014](#).
- [15] 周铭典, 蔡冠竟, 宁静, 等. 一株产吲哚乙酸菌的筛选、鉴定及培养条件优化[J]. 生物学杂志, 2021, 38(2): 65. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1736.2021.02.065](#).
- [16] 陈新强, 李志良, 陈桂琼, 等. 日本野漆树在梅州地区的引种表现[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(4): 41. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2020.04.007](#).
- [17] 孙颖, 刘儒, 雷小林, 等. 日本野漆树果实品质的灰色关联度分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 38. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.04.007](#).
- [18] 李锦宇, 何小帆, 李旦, 等. 日本野漆树的组织培养[J]. 植物生理学报, 2019, 55(1): 41. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2018.0413](#).
- [19] 曹凤明, 杨小红, 马鸣超, 等. 枯草芽孢杆菌近缘种群鉴定方法研究进展[J]. 微生物学通报, 2014, 41(5): 968. DOI: [10.13344/j.microbiol.china.130421](#).
- [20] 祖雪, 周瑚, 朱华琚, 等. 枯草芽孢杆菌 K-268 的分离鉴定及对水稻稻瘟病的防病效果[J]. 生物技术通报, 2022, 38(6): 136. DOI: [10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2021-1124](#).
- [21] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [22] 程爽, 包朋鑫, 徐玉晨, 等. 一株脂肪酶产生菌的筛选鉴定及其发酵条件优化[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(11): 73. DOI: [10.19804/j.issn1006-2513.2021.11.011](#).
- [23] 王红莹, 李春燕, 宋发军, 等. 一株白及内生细菌的分离鉴定及抑菌机理初步研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 246. DOI: [10.12130/znmzdk.2021.0305](#).
- [24] 曹丹, 彭浩, 兰阿峰, 等. 一株 α -淀粉酶产生菌的分离、鉴定及产酶条件研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 169. DOI: [10.12161/j.issn.1005-6521.2020.06.029](#).
- [25] KATO H K, STANDLEY D M. MAFFT Multiple sequence alignment software version 7: improvements in performance and usability[J]. Molecular Biology Evolution, 2013, 30(4): 772. DOI: [10.1093/molbev/mst010](#).
- [26] KALYAANAMOORTHY S, MINH B Q, WONG T K F, et al. ModelFinder: fast model selection for accurate phylogenetic estimates[J]. Nature Methods, 2017, 14(6): 587. DOI: [10.1038/nmeth.4285](#).
- [27] ZHANG X L, HE C Z, ZONG D. The complete mitochondrial genome of *Populus rotundifolia* var. *duclouxii* [J]. Mitochondrial DNA (Part B: Resources), 2021, 6(10): 2858. DOI: [10.1080/23802359.2021.1972480](#).
- [28] NGUYEN L T, SCHMIDT H A, VON HAESELER A, et al. IQ-TREE: a fast and effective stochastic algorithm for estimating maximum-likelihood phylogenies[J]. Molecular Biology Evolution, 2015, 32(1): 268. DOI: [10.1093/molbev/msu300](#).
- [29] 朱亚珠, 夏率博, 陈琳, 等. 一株贝莱斯芽孢杆菌的生长特性及抑菌活性研究[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 85. DOI: [10.12301/spxb202100281](#).
- [30] 许有燊, 陈钊, 李霞, 等. 水产养殖环境中芽孢杆菌的筛选及生长特性研究[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(5): 41. DOI: [10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2020.05.014](#).
- [31] BRIC J M, BOSTOCK R M, SILVERSTONE S E. Rapid in situ assay for indoleacetic acid production by bacteria immobilized on a nitrocellulose membrane[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, 57(2): 535. DOI: [10.1128/AEM.57.2.535-538.1991](#).
- [32] 郭群利, 胡晋, 洪中川. 高锰酸钾浸种对杂交水稻种子发芽率、成秧率的影响[J]. 种子, 2007, 26(6): 87. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2007.06.072](#).
- [33] 周安佩, 李莲芳, 刘东玉, 等. 不同处理对云南松种子胚根和胚轴伸长的影响实验[J]. 西部林业科学, 2012, 41(5): 81. DOI: [10.16473/j.cnki.xbykx1972.2012.05.019](#).
- [34] 付学鹏, 沈童飞, 孙晓波, 等. 链霉菌株 *Streptomyces* sp. FXP04 对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 作物杂志, 2020(6): 163. DOI: [10.16035/j.issn.1001-7283.2020.06.024](#).
- [35] 巫艳, 周云莹, 朱玺燊, 等. 植物内生菌多样性及其病害生防机制研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(5): 897. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202203041](#).
- [36] 方珍娟, 张晓霞, 马立安. 植物内生菌研究进展[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(10): 41. DOI: [10.16772/j.cnki.1673-1409.2018.10.011](#).
- [37] 郭良栋. 内生真菌研究进展[J]. 菌物系统, 2001, 20(1): 148. DOI: [10.13346/j.mycosystema.2001.01.029](#).
- [38] 王春艳, 腊贵晓, 苏秀红, 等. 地黄不同时期内生促生细菌的筛选及其促生特性分析[J]. 生物技术通报, 2022, 38(4): 242. DOI: [10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2021-0964](#).
- [39] 李永赞, 曾宗梁, 杨军伟, 等. 烤烟根际烟碱降解细菌的多样性及其促生特性分析[J]. 微生物学通报, 2021, 48(10): 3632. DOI: [10.13344/j.microbiol.china.210012](#).
- [40] 桂楚伊. 三株番茄根内生细菌产 IAA 能力的测定及其应用研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
- [41] 刘晓瑞. 吲哚乙酸(IAA)产生菌的筛选鉴定及生物炭负载菌株的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [42] 赵柏霞, 刘浩强, 孙丽娜, 等. 甜樱桃根际 IAA 产生菌的筛选、鉴定及最佳产素条件优化[J]. 中国南方果树, 2017, 46(3): 23. DOI: [10.13938/j.issn.1007-1431.20160652](#).
- [43] 陈龙, 梁子宁, 朱华. 植物内生菌研究进展[J]. 生物技术通报, 2015, 31(8): 30. DOI: [10.13560/j.cnki.biotech.bu.11985.2015.08.005](#).
- [44] 刘文欢, 邱芳颖, 王娅, 等. 枯草芽孢杆菌液态肥对柑橘养分吸收和果实品质的影响[J]. 园艺学报, 2022, 49(3): 509. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2021-0053](#).

责任编辑: 何馨成