



### 3种芽孢杆菌菌剂对望天树苗木生长和光合特性的影响

汪丛啸, 何福英, 杨梅, 戴文君, 李婷

引用本文:

汪丛啸, 何福英, 杨梅, 戴文君, 李婷. 3种芽孢杆菌菌剂对望天树苗木生长和光合特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(2): 213–223.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4462>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 硅对低温胁迫后檀香紫檀苗木生长和光合生理的影响

Effects of Silicon on Growth and Photosynthetic Physiology of Red Sandalwood Seedlings after Cold Stress

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 139–148 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3987>

#### 不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响

Effects of Heavy Metal Pollution on Photosynthetic Characteristics and Heavy Metal Contents in Forage Leaves under Different Planting Patterns

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 31–40 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4244>

#### 盐度、温度和光照强度对针叶蕨藻的生长及光合活性的影响

Effects of Salinity, Temperature and Light Intensity on Growth and Photo-synthetic Activity of *Caulerpa sertularioides*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 626–633 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4378>

#### 印度梨形孢对铁皮石斛种子萌发和原球茎生长的影响

Effects of *Piriformospora indica* on Seed Germination and Protocorm Growth of *Dendrobium officinale*

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 59–66 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4231>

#### 桂西南不同种源蚬木光合和生长特征的研究

Photosynthetic and Growth Characteristics of Different Excentrodendron hsienmu Provenances from Karst District of Southwestern Guangxi, China

热带亚热带植物学报. 2018, 26(2): 164–170 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3799>

向下翻页, 浏览PDF全文

# 3 种芽孢杆菌菌剂对望天树苗木生长和光合特性的影响

汪丛啸<sup>1</sup>, 何福英<sup>2</sup>, 杨梅<sup>1\*</sup>, 戴文君<sup>1</sup>, 李婷<sup>2</sup>

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 广西南宁良凤江国家森林公园, 南宁 530004)

**摘要:** 为加快望天树(*Parashorea chinensis*)幼苗的生长, 采用随机区组试验设计, 1.5 a 生望天树实生苗分别接种胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)、侧孢芽孢杆菌(*B. laterosporus*)和巨大芽孢杆菌(*B. megaterium*)菌剂。结果表明, 3 种芽孢杆菌菌剂处理对苗木的生长、光合指标均有提高, 其中苗高、地径增量分别较对照提高了 30.2%~57.2% 和 5.3%~49.7%, 根系活力提高了 74.5%~227.4%, 净光合速率提高了 15.3%~227.6%。6.0×10<sup>9</sup> cfu/g 的巨大芽孢杆菌处理的苗高、地径、生物量、根表面积、根平均直径、叶面积、叶绿素含量及净光合速率、实际光合效率、光化学淬灭系数均表现最好, 与苗木质量指数和隶属函数法分析结果一致。因此, 6.0×10<sup>9</sup> cfu/g 巨大芽孢杆菌对望天树苗木生长发育的促进作用最大。

**关键词:** 芽孢杆菌菌剂; 光合作用; 苗木生长; 望天树

doi: 10.11926/jtsb.4462

## Effects of Three *Bacillus* Agents on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Parashorea chinensis* Seedlings

WANG Congxiao<sup>1</sup>, HE Fuying<sup>2</sup>, YANG Mei<sup>1\*</sup>, DAI Wenjun<sup>1</sup>, LI Ting<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530007, China; 2. Guangxi Nanning Liangfengjiang National Forest Park, Nanning 530007, China)

**Abstract:** In order to accelerate the growth of *Parashorea chinensis* seedlings, the *Bacillus* agents and dosage were selected. The seedlings at 1.5-year old were treated with different concentration *Bacillus* agents, including *B. mucilaginosus*, *B. laterosporus*, and *B. megaterium*, respectively. The results showed that the growth and photosynthetic indexes of seedlings were improved by three *Bacillus* agents. Compared to CK (irrigated only with clean water), the height and diameter increment of *P. chinensis* seedlings increased by 30.2%–57.2% and 5.3%–49.7%, the root activity increased by 74.5%–227.4%, while the net photosynthetic rate increased by 15.3%–227.6%. The seedling height, ground diameter, biomass, root surface area, root average diameter, leaf area and chlorophyll content were the highest under the treatment of 6.0×10<sup>9</sup> cfu/g *B. megaterium*, as well as the net photosynthetic rate, ΦPS II and qP, which were consistent with the results of seedling quality index and membership function method. Therefore, *Bacillus megaterium* at 6.0×10<sup>9</sup> cfu/g was the most beneficial microbial agent to improve the growth and development of *P. chinensis*.

**Key words:** *Bacillus* agents; Photosynthesis; Seedling growth; *Parashorea chinensis*

望天树(*Parashorea chinensis*), 别名擎天树, 龙脑香科(Dipterocarpaceae)柳安属植物<sup>[1-2]</sup>, 是世界稀

有珍贵树种和热带雨林标志种<sup>[3]</sup>, 2012 年《世界自然保护联盟》(IUCN)将其列入濒危物种红色名录,

收稿日期: 2021-06-02

接受日期: 2021-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960307); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA28110)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31960307), and the Project for Natural Science in Guangxi (Grant No. 2018GXNSFAA28110).

作者简介: 汪丛啸(1998~), 男, 硕士研究生, 研究方向为森林培育学。E-mail: chelly0312@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fjiangmei@126.com

是中国一级濒危保护树种<sup>[4]</sup>,对中国热带植物区系的研究有重要意义。为扩大望天树种群数量,近年来对望天树人工纯林林分密度、光照条件、林地坡向、林木生长节律及林木营养元素等方面开展了研究<sup>[5-6]</sup>,实际生产中存在望天树造林成活率低、抵抗外界环境能力弱等问题,阻碍了望天树人工选育、培育和壮苗的工作<sup>[7]</sup>。

微生物菌肥是含有特定人工培植的有益微生物菌群,经加工后制成的微生物活菌制剂。其能够在土壤或基质中定殖,形成有利于植物生长的微生物优势菌群<sup>[8]</sup>,可有效活化土壤养分、培肥地力、提高化肥利用率,提高作物产品品质和根系发育<sup>[9-11]</sup>,其不仅具有投入成本低、产出效益高且绿色无污染的特性,也能有效改善因传统化肥使用导致的土壤退化问题。有益微生物因其生长过程中产生的胞外多糖或有机酸能溶解土壤中难溶的硅酸盐矿物<sup>[12-13]</sup>,故作为微生物菌肥在近年来得到广泛使用。目前关于微生物菌剂在农作物上的研究应用较广泛,但微生物菌肥在林木上的推广及应用研究的报道较少<sup>[14-15]</sup>。

芽孢杆菌(*Bacillus*)具有固氮解磷、增加植物体内养分含量、提升光合效率<sup>[16]</sup>的作用。胶质芽孢杆菌(*B. mucilaginosus*)、侧孢芽孢杆菌(*B. laterosporus*)和巨大芽孢杆菌(*B. megaterium*)作为3种常见的微生物菌肥,主要具有固氮和活化营养元素、改善根际土壤性状、促进植株生长和养分吸收、抑制植株根际病原菌生长、提升植株抗逆性等作用<sup>[17-18]</sup>。本研究针对望天树苗期生长缓慢、活力较弱等问题,采用含不同活菌数的胶质芽孢杆菌、侧孢芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌处理望天树苗木,探讨芽孢杆菌菌剂处理的苗木生长、光合特性、苗木质量指数及苗木隶属值的变化,筛选出有利于望天树苗木生长的芽孢杆菌菌剂种类及其用量,从而提高望天树苗木培育质量及造林成活率,也为有益微生物在珍贵树种培育方面的应用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于南宁树木园(22°40' N, 108°21' E),属亚热带季风气候,夏季潮湿,冬季稍显干燥,干湿季节分明。太阳辐射强烈,热量充足,年均气温21.6 °C,极端最高气温39.5 °C,最低气温-1.4 °C。雨量充沛,年均降雨量1 304.2 mm,多集中在5—9月。

### 1.2 材料

试验所用苗木为1.5 a生望天树(*Parashorea chinensis*)容器苗,塑料育苗袋规格为16 cm×20 cm,2017年4月1日选取无病虫害、无损伤、长势相似的健康苗木进行微生物菌剂施放试验,平均苗高、平均地径分别为25.35 cm、4.96 mm。望天树幼苗喜阴,为使其正常生长采取75%透光率的遮光处理<sup>[19]</sup>。育苗基质为椰糠、蛭石、泥炭土(1:1:1),基质中全氮、全磷、全钾含量分别为2.2、0.23、32.83 g/kg,碱解氮含量为75 mg/kg,速效磷和速效钾含量分别为0.5和139.17 mg/g,有机质含量为32.24 g/kg, pH值为5.3。采用自动喷灌,每天早中晚共喷灌3次,每次2 min。

### 1.3 试验设计

试验所用的3种芽孢杆菌菌剂分别为胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*, JZ)、侧孢芽孢杆菌(*B. laterosporus*, CB)、巨大芽孢杆菌(*B. megaterium*, JD),含活菌数分别为 $5.0 \times 10^9$ 、 $2.0 \times 10^{10}$ 和 $2.0 \times 10^{10}$  cfu/g,均由广州市微元生物科技有限公司生产。采用单因素完全随机试验设计,每种菌剂均设置3个剂量,分别为 $4.0 \times 10^9$  (编号1)、 $6.0 \times 10^9$  (编号2)、 $8.0 \times 10^9$  cfu/g (编号3);设置1个复合液态肥处理,记为SF,质量比为N:P:K=1:1:1,施放量5.0 g/ind.;以浇清水为对照(CK),菌剂加水后施于土壤中,各处理施量均为50 mL;共11个处理,每处理3次重复,每重复7株苗木。试验期间进行2次浇施处理,即2017年4、5月各浇施1次,2017年9月30日结束试验进行指标测定。

### 1.4 方法

试验结束后测定所有苗木的生长指标,用卷尺测量苗高、叶长和叶宽;用游标卡尺测量地径;用YMJ-C叶面积仪测叶面积。每处理先取1株长势平均的苗木将地上部分从茎基切除后,称取根尖样品0.5 g,采用TTC法测定根系活力<sup>[20]</sup>;每处理随机选取1株苗木用于根系扫描,将完整无损的根系图像利用WINRHIZO根系分析软件测定根平均直径和根表面积。采用丙酮-乙醇提取法测定叶绿素含量<sup>[21]</sup>。

在晴朗无风的天气条件下,于上午9:00—11:30测定苗木的光合指标。每处理选取1株长势平均的苗木,选取顶端向下的第3轮叶片,使用LI-6400光合测定仪测定净光合速率(net photosynthetic rate,

$P_n$ )、气孔导度(stomatal conductance,  $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度(intercellular  $CO_2$  concentration,  $C_i$ )和蒸腾速率(transpiration rate,  $T_r$ ), 控制叶室温度约为  $28\text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度 65%, 外界  $CO_2$  浓度为  $400\text{ }\mu\text{mol/mol}$ , 光强为  $200\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{ s})$ ; 同时计算水分利用效率(water use efficiency,  $WUE$ )= $P_n/T_r$ [22]。利用 PAM2000 叶绿素荧光仪测定植株叶绿素荧光动力学参数, 包括 PSII 最大量子效率( $F_v/F_m$ )、PSII 实际光合效率( $\Phi_{PSII}$ )、光化学淬灭系数(photochemical quenching,  $qP$ )和非光化学淬灭系数(non-photochemical quenching,  $NPQ$ ), 测定前植株先暗适应 30 min, 光化光和饱和脉冲光分别为  $100$  和  $5\ 000\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{ s})$ 。

测定苗木的光合指标后, 用水仔细冲洗地上部分和地下部分, 并用滤纸吸干水分, 分别测量根、茎、叶鲜质量, 于  $105\text{ }^\circ\text{C}$  杀青 30 min, 置于  $75\text{ }^\circ\text{C}$  下烘干, 测量各器官干质量, 计算根、茎、叶的生物量、苗木质量指数(seedling quality index,  $QI$ )和苗木的隶属值。

### 1.5 数据处理

苗木质量指数  $QI = \text{苗木总干质量} / [(\text{苗高} / \text{地}$

径)+ (茎干质量 / 根干质量)]。隶属值  $U(X_i) = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$ , 式中,  $X_i$  为指标测定值,  $X_{i\max}$ 、 $X_{i\min}$  分别为所有处理中某项指标的最大值、最小值。将各处理不同指标的隶属值累加后求平均以综合判定处理的优劣, 平均值越大则育苗效果越好。利用 SPSS 18.0 软件对苗木各指标进行单因素或双因素方差分析及 Duncan 法多重比较, 以  $P < 0.05$  表示差异显著,  $P < 0.01$  表示差异极显著。

## 2 结果和分析

### 2.1 芽孢杆菌菌剂对苗木生长的影响

**苗高、地径** 从图 1 可见, 芽孢杆菌菌剂中以 JD-2 处理的苗高、地径增长量均为最大, 分别较 CK 提高了 57.2%、49.7%, 其中苗高增量最高的 2 个处理是 JD-2、JD-3, 地径增量最高的 2 个处理是 JD-2、CB-2。施放菌剂、肥料处理的苗高、地径增长量均不同程度高于 CK。

**叶面积** 不同芽孢杆菌菌剂对苗木的叶长、叶宽和叶面积的影响不同(图 1), 大部分菌剂处理与

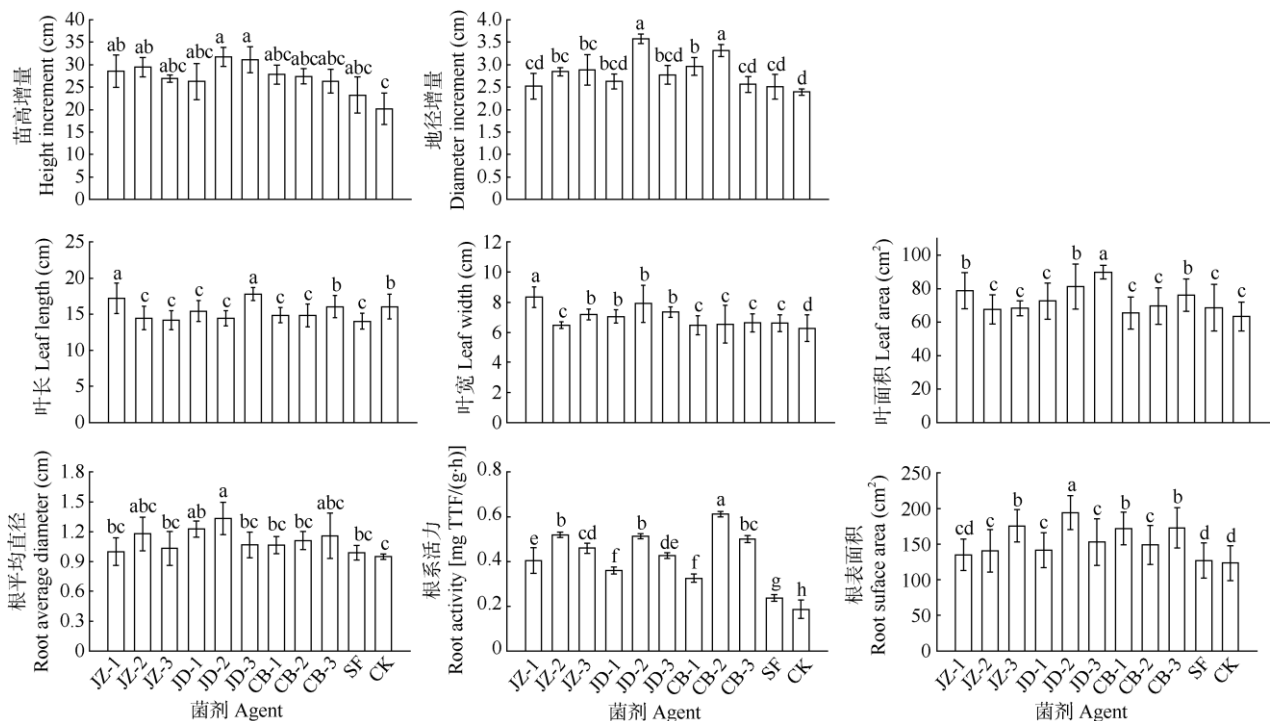


图 1 芽孢杆菌菌剂处理的望天树苗木生理指标。JZ: 胶质芽孢杆菌; JD: 巨大芽孢杆菌; CB: 侧孢芽孢杆菌; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: 液态复合肥料; CK: 对照。柱上不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Fig. 1 Physiological index of *Parashorea chinensis* seedlings treated with *Bacillus* agents. JZ: *Bacillus mucilaginosus*; JD: *B. megaterium*; CB: *B. laterosporus*; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: Compound fertilizer; CK: Control. Different letters upon column indicated significant difference at 0.05 level.

CK 处理没有显著差异。除 JZ 处理外, 叶面积均随菌剂含量的增大而提高, 并以 JD-2 和 JD-3 处理的最高, 显著比 CK 处理提高了 28.3% 和 41.8%。

**根系** 从图 1 可见, 芽孢杆菌菌剂处理后苗木的根直径、根系活力和根表面积均较 CK、SF 提高。JD-2 处理的根平均直径与根表面积最大。相同菌剂以  $6.0 \times 10^9$  cfu/g 处理对根系活力的促进作用最佳, CB-2 处理的根系活力最高, 较 CK 和 SF 处理提高了 227.4% 和 158.3%; JZ-2、JD-2 处理的次之。

**生物量** 从表 1 可见, 3 种芽孢杆菌菌剂处理的苗木生长量均显著高于 SF 和 CK 处理, 且 SF 和 CK 间没有显著差异。JD 处理的苗木总生物量均

高于其他菌剂, 说明该种芽孢杆菌菌剂对于生物量积累的促进效果最佳, 尤以 JD-2 处理的最高。施放菌剂处理均不同程度提高了茎生物量比例, 以 JD-2 处理的茎生物量最高, 比 SF 和 CK 提高了 160.00% 和 165.11%。

**双因素方差分析** 由表 2 可见, 苗高增量、地径增量和根系活力极显著受到菌剂种类和剂量的交互作用 ( $P < 0.01$ ), 而叶面积和生物量受菌剂种类和剂量的影响并不显著。说明苗高、地径和根系活力受种类和剂量共同影响, 且不同处理间差异显著; 同时各处理的叶面积与生物量差异不显著。

表 1 芽孢杆菌菌剂处理的望天树苗木器官生物量(g)

Table 1 Biomass (g) of *Parashorea chinensis* seedling treated with different *Bacillus* agents

菌剂 Agent	根 Root	%	茎 Stem	%	叶 Leaf	%	总和 Total
JZ-1	1.77 ± 0.89a	19.0	4.18 ± 0.31ab	44.1	3.52 ± 0.23ab	37.2	9.47 ± 1.37ab
JZ-2	2.01 ± 0.44ab	17.7	4.86 ± 0.90ab	42.8	4.25 ± 0.86ab	37.4	11.35 ± 2.09ab
JZ-3	2.24 ± 0.78ab	22.3	4.73 ± 1.90ab	47.2	3.20 ± 1.42ab	31.9	10.03 ± 3.81ab
JD-1	2.32 ± 0.54ab	18.2	5.32 ± 1.32a	41.8	5.10 ± 1.75a	40.0	12.74 ± 3.51ab
JD-2	2.58 ± 1.14a	18.7	6.23 ± 1.65a	45.1	4.93 ± 1.05a	35.7	13.82 ± 3.39a
JD-3	2.10 ± 0.54ab	16.1	6.11 ± 0.78a	46.7	4.95 ± 0.59a	37.9	13.07 ± 0.62a
CB-1	2.67 ± 0.72a	23.7	4.47 ± 1.78ab	39.7	4.53 ± 1.17ab	40.2	11.27 ± 3.61ab
CB-2	2.22 ± 0.56ab	18.5	5.39 ± 0.32a	45.0	4.37 ± 0.53ab	36.5	11.98 ± 0.97a
CB-3	2.35 ± 1.06ab	21.7	4.80 ± 1.77ab	44.2	3.70 ± 2.10ab	34.1	10.85 ± 4.93ab
SF	1.11 ± 0.29b	18.4	2.56 ± 1.15b	42.4	2.38 ± 0.71b	39.4	6.04 ± 2.10b
CK	1.49 ± 0.66b	24.8	2.35 ± 2.06b	39.0	2.18 ± 0.70b	36.2	6.02 ± 2.60b

JZ: 胶质芽孢杆菌; JD: 巨大芽孢杆菌; CB: 侧孢芽孢杆菌; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: 液态复合肥; CK: 对照。同列数据后不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

JZ: *Bacillus mucilaginosus*; JD: *B. megaterium*; CB: *B. laterosporus*; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: Compound fertilizer; CK: Control. Data followed different letters within column indicated significant difference at 0.05 level.

表 2 芽孢杆菌菌剂处理望天树苗木生长指标的双因素方差分析

Table 2 Two way ANOVA of growth indexes of *Parashorea chinensis* seedling treated with different *Bacillus* agents

因子 Factor	苗高增量 Height increment	地径增量 Diameter increment	叶面积 Leaf area	生物量 Biomass	根系活力 Root activity
种类 Species	47.121**	3.590**	0.949	2.126	193.866**
剂量 Dosage	10.030**	19.942**	0.277	0.432	450.001**
种类 × 剂量 Species × dosage	9.581**	6.029**	0.496	0.038	36.551**

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$

## 2.2 对叶片光合能力的影响

**叶绿素含量** 从图 2 可见, 相较于 CK 处理, 各剂量芽孢杆菌菌剂处理的叶片叶绿素含量都有显著提高。其中, 叶绿素 a、叶绿素 b 含量均以 JD-2 处理的最高, 分别比 CK 提高了 24% 和 67%; 总叶绿素含量比 CK 提高了 56%。

**叶片气体交换参数** 从图 3 可见, 施放芽孢杆菌菌剂显著增加了苗木叶片的光合速率, 并降低蒸腾速率。望天树苗木叶片的  $P_n$ 、 $G_s$  以 JD-2 处理最大, 显著高于 CK, 同时  $C_i$  最低, 显著低于 CK。  $T_r$  则以 CB-2 最大, 较 CK 提高了 210.42%; 同时, WUE 以 JD-2 处理最大, 较 CK 提高了 96.7%。

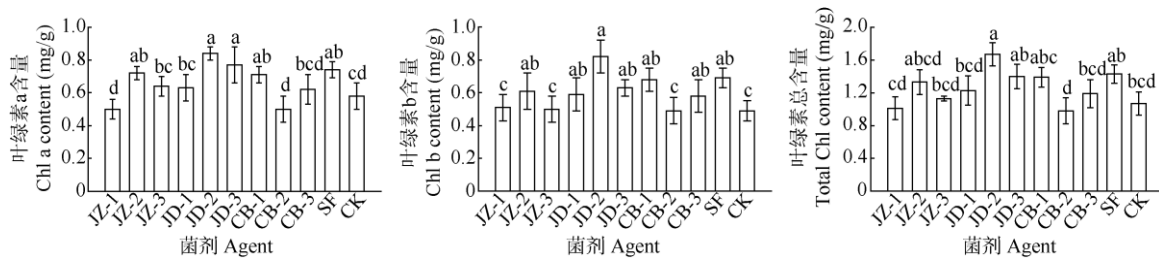


图 2 不同芽孢杆菌菌剂处理下望天树苗木的叶绿素含量。JZ: 胶质芽孢杆菌; JD: 巨大芽孢杆菌; CB: 侧孢芽孢杆菌; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: 液态复合肥; CK: 对照。柱上不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Fig. 2 Chlorophyll contents of *Parashorea chinensis* seedling treated with different *Bacillus* agents. JZ: *Bacillus mucilaginosus*; JD: *B. megaterium*; CB: *B. laterosporus*; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: Compound fertilizer; CK: Control. Different letters upon column indicated significant difference at 0.05 level.

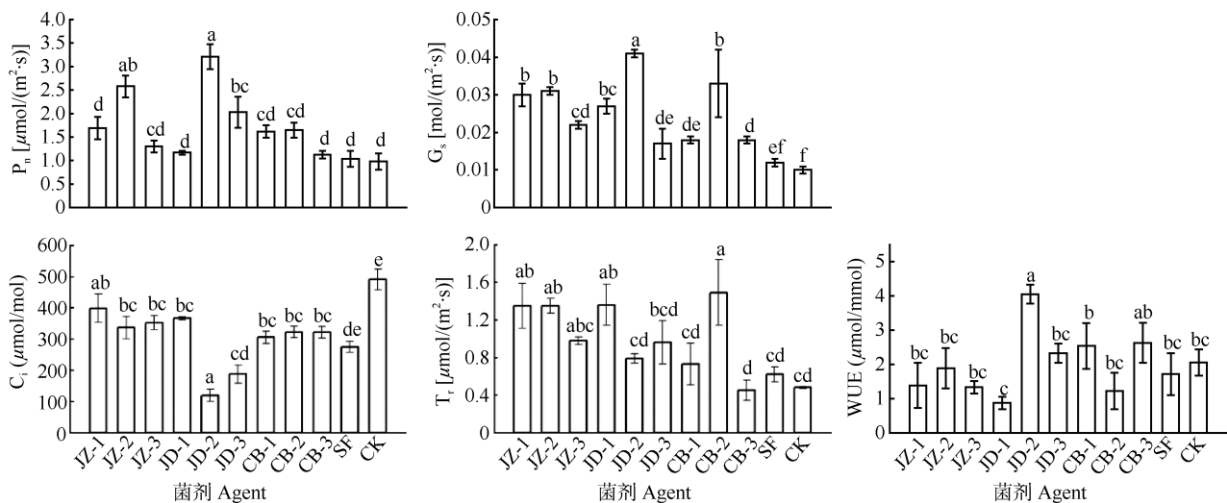


图 3 不同芽孢杆菌菌剂处理望天树苗木的光合特性。JZ: 胶质芽孢杆菌; JD: 巨大芽孢杆菌; CB: 侧孢芽孢杆菌; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: 液态复合肥; CK: 对照;  $P_n$ : 净光合速率;  $G_s$ : 气孔导度;  $C_i$ : 胞间  $CO_2$  浓度;  $T_r$ : 蒸腾速率; WUE: 水分利用效率。柱上不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Fig. 3 Photosynthetic characteristics of *Parashorea chinensis* seedling under the treatments of different *Bacillus* agents. JZ: *Bacillus mucilaginosus*; JD: *B. megaterium*; CB: *B. laterosporus*; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: Compound fertilizer; CK: Control.  $P_n$ : Net photosynthetic rate;  $G_s$ : Stomatal conductivity;  $C_i$ : Intercellular  $CO_2$  concentration;  $T_r$ : Transpiration rate; WUE: Water use efficiency; Different letters upon column indicated significant difference at 0.05 level.

**叶绿素荧光参数** 从图 4 可见, 3 种芽孢杆菌菌剂均未对苗木叶片的  $F_v/F_m$  产生显著影响, 而叶片的  $\Phi PS II$ 、 $qP$  在施用菌剂后均有提高。其中, JD-2 处理的  $\Phi PS II$ 、 $qP$  最高, 较 CK 分别提高了 145.5% 和 144.4%。叶片的 NPQ 在施用菌剂后显著降低, 以 JD-2、CB-2 处理的最低。

**双因素方差分析** 由表 3 可见, 苗木叶片的叶绿素含量和  $P_n$  受菌剂种类和剂量间有显著的交互作用 ( $P < 0.05$ ), WUE 有极显著的交互作用 ( $P < 0.01$ ), 说明这些指标受菌剂种类和剂量的共同影响。而  $\Phi PS II$  仅对菌剂种类为主效应时有显著差

异, 说明不同菌剂种类是引起  $\Phi PS II$  差异的主要原因。

表 3 芽孢杆菌菌剂处理苗木光合指标的双因素方差分析

Table 3 Two-Way ANOVA of photosynthetic indexes of seedlings treated with *Bacillus* agents

因子 Factor	叶绿素含量 Chl content	$P_n$	WUE	$\Phi PS II$
种类 Species	5.138*	4.487*	68.653**	5.066*
剂量 Dosage	0.850	12.999**	27.606**	2.873
种类 × 剂量 Species × dosage	4.043*	3.884*	19.732**	2.258

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ 。

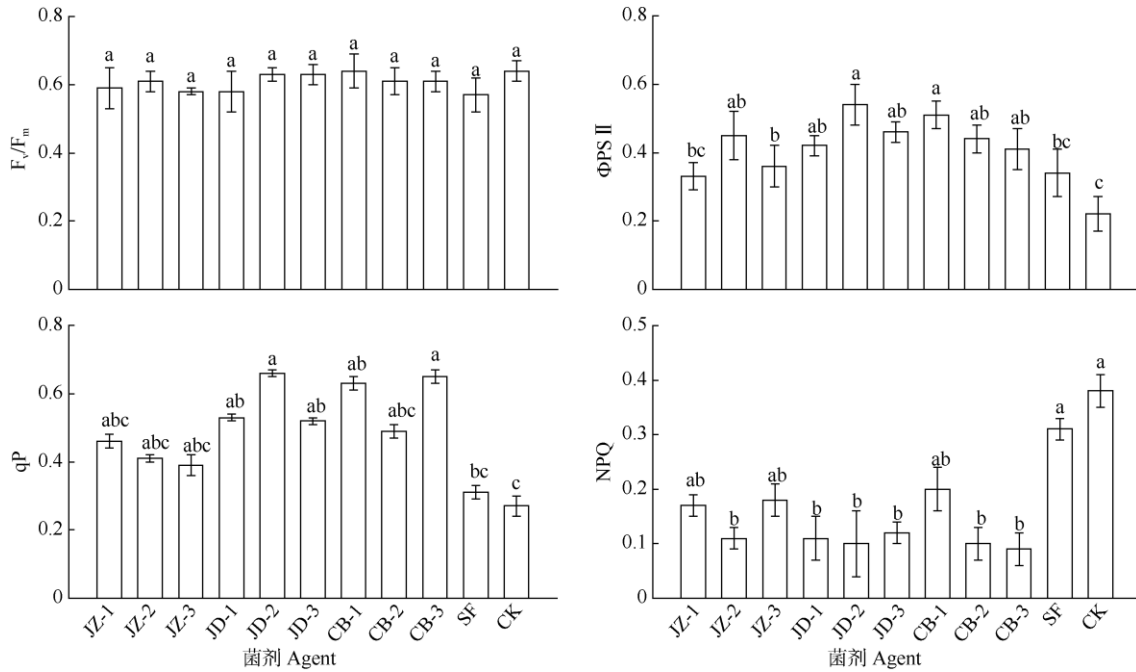


图 4 不同芽孢杆菌菌剂处理望天树苗的叶绿素荧光参数。JZ: 胶质芽孢杆菌; JD: 巨大芽孢杆菌; CB: 侧孢芽孢杆菌; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: 液态复合肥; CK: 对照;  $F_v/F_m$ : PSII 最大量子效率;  $\Phi PSII$ : PSII 实际光合效率;  $qP$ : 光化学淬灭系数;  $NPQ$ : 非光化学淬灭系数。柱上不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Fig. 4 Chlorophyll fluorescence parameters of *Parashorea chinensis* seedling treated with different *Bacillus* agents. JZ: *Bacillus mucilaginosus*; JD: *B. megaterium*; CB: *B. laterosporus*; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: Compound fertilizer; CK: Control;  $F_v/F_m$ : PSII maximum quantum efficiency;  $\Phi PSII$ : Actual photosynthetic efficiency of PSII;  $qP$ : Photochemical quenching coefficient;  $NPQ$ : Non-photochemical quenching coefficient. Different letters upon column indicated significant difference at 0.05 level.

### 2.3 苗木质量指数与隶属分析

单个形态指标常常只反映了苗木的某个侧面, 而苗木各部分之间的协调和平衡对于初期生长又十分重要, 苗木质量指数(QI)是反映苗木生长优劣的多指标综合指数<sup>[23]</sup>。从表 4 可见, JD-2 处理的苗木质量指数最高, 为 0.947, 分别比 SF、CK 高 80.7%、115.2%; 而 JD-1 处理的 QI 值最低, 为 0.712, 但仍比 SF、CK 提高了 35.9%、61.8%, 说明芽孢杆菌菌剂处理均对苗木质量有较大提升。

苗木的隶属值可将植物对外界的适应能力分为高抗型( $0.6 \leq$ 隶属值 $\leq 1$ )、中抗型( $0.4 \leq$ 隶属值 $< 0.6$ )、弱抗型( $0.2 \leq$ 隶属值 $< 0.4$ )和不抗型(隶属值 $< 0.2$ )<sup>[24]</sup>。综合苗木生长及生理指标后(表 5), 苗木隶属值与质量指数的排名不完全一致, 但 JD-2 处理的苗木隶属值仍是最大(0.804), 说明该处理苗木的综合生长情况最优。芽孢杆菌菌剂处理后的苗木平均隶属值均达中抗型标准(0.527), 明显高于 SF、CK 处理, 说明芽孢杆菌菌剂有利于提高望天树苗的环境适应能力。

表 4 不同芽孢杆菌菌剂处理望天树苗苗木质量指数

Table 4 Quality index (QI) of *Parashorea chinensis* seedling treated with *Bacillus* agents

菌剂 Agent	高径比 Height-diameter ratio	茎根比 Stem-root ratio	QI	综合排名 Rank
JZ-1	8.69	4.34	0.727	8
JZ-2	10.35	5.51	0.824	5
JZ-3	9.33	4.07	0.847	4
JD-1	10.01	4.49	0.712	9
JD-2	11.04	3.38	0.947	1
JD-3	10.29	3.78	0.878	3
CB-1	10.70	4.18	0.929	2
CB-2	8.26	4.39	0.782	6
CB-3	10.27	3.62	0.781	7
SF	8.44	3.05	0.524	10
CK	9.27	4.46	0.440	11

JZ: 胶质芽孢杆菌; JD: 巨大芽孢杆菌; CB: 侧孢芽孢杆菌; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: 液态复合肥; CK: 对照。  
JZ: *Bacillus mucilaginosus*; JD: *B. megaterium*; CB: *B. laterosporus*; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: Compound fertilizer; CK: Control.

表 5 芽孢杆菌菌剂处理望天树苗木的指标隶属分析

Table 5 Subordinate analysis of indexes of *Parashorea chinensis* seedlings treated with *Bacillus* agents

指标 Index	JZ-1	JZ-2	JZ-3	JD-1	JD-2	JD-3	CB-1	CB-2	CB-3	SF	CK
苗高增量 Height increment	0.946	0.803	0.584	0.528	0.659	0.722	1.000	0.531	0.625	0.265	0.000
地径增量 Diameter increment	1.000	0.382	0.416	0.197	0.107	0.320	0.483	0.143	0.781	0.098	0.000
总生物量 Biomass	0.440	0.900	0.681	0.858	0.671	0.511	0.997	0.616	0.761	0.000	0.000
叶面积 Leaf area	0.582	0.160	0.187	0.349	0.677	1.000	0.077	0.482	0.235	0.200	0.000
根平均直径 Mean root diameter	0.130	0.591	0.217	0.722	1.000	0.304	0.296	0.417	0.539	0.096	0.000
根系活力 Root activity	0.513	0.644	0.782	0.408	0.564	0.766	0.327	1.000	0.739	0.118	0.000
根表面积 Root surface area	0.160	0.239	0.738	0.255	1.000	0.418	0.682	0.358	0.697	0.049	0.000
叶绿素 a Chl a	0.013	0.806	0.510	0.493	1.000	1.000	0.782	0.431	0.000	0.889	0.300
叶绿素 b Chl b	0.064	0.371	0.029	0.319	1.000	0.420	0.572	0.267	0.000	0.599	0.004
叶绿素 a+b Chl a+b	0.036	0.507	0.219	0.355	1.000	0.610	0.597	0.304	0.000	0.653	0.122
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.318	0.717	0.143	0.085	1.000	0.471	0.287	0.300	0.067	0.027	0.000
质量指数 Quality index (QI)	0.566	0.757	0.803	0.536	1.000	0.864	0.964	0.675	0.673	0.166	0.000
隶属值 Membership	0.401	0.575	0.442	0.425	0.804	0.621	0.590	0.462	0.424	0.266	0.036
综合排名 Rank	9	4	6	7	1	2	3	5	8	10	11

JZ: 胶质芽孢杆菌; JD: 巨大芽孢杆菌; CB: 侧孢芽孢杆菌; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: 液态复合肥; CK: 对照。

JZ: *Bacillus mucilaginosus*; JD: *B. megaterium*; CB: *B. laterosporus*; 1:  $4.0 \times 10^9$  cfu/g; 2:  $6.0 \times 10^9$  cfu/g; 3:  $8.0 \times 10^9$  cfu/g; SF: Compound fertilizer; CK: Control.

### 3 结论和讨论

芽孢杆菌施入土壤后会向外分泌植酸酶、磷酸酶和有机酸等<sup>[25]</sup>, 提高了土壤养分的有效性, 同时微生物的代谢物会产生根际效应, 从而刺激或调控植株的生长<sup>[26-27]</sup>。植物根系是水分与养分吸收的主要器官, 其生长状况与活力水平直接影响地上部的产量水平。研究表明, 接种芽孢杆菌菌剂后望天树幼苗的苗高、地径、根系性状、生物量等指标较 CK 均有不同程度的提高, 说明芽孢杆菌改良了根际微环境, 促进了植株的生长发育<sup>[17]</sup>。3 种芽孢杆菌菌剂中, 巨大芽孢杆菌处理下望天树苗木的根平均直径和根表面积最大, 从而扩大了根系吸收养分的面积, 同时该菌剂处理下的根系活力也较优, 其产生的根系综合效应能更好地促进望天树的根系对水分和养分的吸收利用, 增强光合作用, 对幼苗的促生效果更佳; 而胶质芽孢杆菌、侧孢芽孢杆菌更多的是改善土壤团粒构造, 抑制重茬病害、增加植物抗逆性等<sup>[28-29]</sup>, 即先通过改善林木生长环境, 促进根系的生理代谢功能, 再加速根系的生长。

微生物菌肥如芽孢杆菌菌剂能显著提高植株的叶绿素含量和光合特性, 使叶片浓绿, 延缓叶片衰老等<sup>[30-32]</sup>, 还可以通过改变叶片的光合特性从而提高光合速率<sup>[33-34]</sup>。寇伟峰等<sup>[35]</sup>认为,  $G_s$  增加意味着进入细胞的  $CO_2$  增多, 若此时  $C_i$  减小, 则说明光合作用所消耗的  $CO_2$  增多,  $P_n$  将增大。施用菌剂后

望天树苗木叶片的  $P_n$ 、 $G_s$  显著提升, 且显著降低了  $C_i$  含量, 说明 3 种芽孢杆菌是通过促进叶片气孔开放来提高光合效率。通过苗木质量指数与苗木隶属值的综合评价, 施用 3 种芽孢杆菌后苗木的生长情况与光合作用均比 CK 有明显提升, 其中  $6.0 \times 10^9$  cfu/g 的巨大芽孢杆菌处理的苗木质量指数和苗木隶属值排名均为第一, 且大幅度提高叶片的叶绿素 a、b 含量、光合效率和水分利用效率, 增强植株有效利用水分和叶片捕获光能以及生产、转运光合产物的能力, 从而促进苗高、地径生长及生物量积累, 表现出更好的生长状况。

叶绿素荧光参数能精确反映叶片功能<sup>[36-37]</sup>。非环境胁迫下, 植物叶片 PS II 最大量子效率一般保持恒定<sup>[38]</sup>, 且受物种与生长条件的影响较小。施用微生物菌肥后, 望天树幼苗叶片的 PS II 最大量子效率没有显著变化, 说明各处理下叶片的 PS II 反应中心没有受到明显的影响。胶质芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、侧孢芽孢杆菌均提高了叶片的 PS II 实际光合效率与光化学淬灭系数, 同时降低了非光化学淬灭系数, 说明 3 种芽孢杆菌均有利于提升叶片的原初光合捕获效率和 PS II 反应中心的开放程度, 促进从 PS II 氧化侧向 PS II 反应中心的电子流动, 增加碳水化合物化合物的积累, 同时减少了以热辐射方式耗散的光能, 提高了光能利用率<sup>[39]</sup>。

望天树幼苗大部分生长、光合指标如苗高地径增量、根系活力、叶绿素含量、净光合速率及水分



利用效率等均在芽孢杆菌的种类与浓度间有显著的交互作用,二者共同影响了植株的形态器官建成与光合作用<sup>[40]</sup>。叶片的实际光合效率受菌剂剂量影响较大,而菌剂种类以及种类与剂量的交互作用都未产生显著差异,说明微生物的含量及其消长是土壤养分内循环的重要内容,能在一定程度上影响植株的光合作用<sup>[41-42]</sup>。适宜的微生物种类与剂量可以给作物提供生长所需要的营养物质,还能分泌维生素、氨基酸、有机酸以及赤霉素、细胞分裂素等活性物质,提升土壤肥力和植株根系活力<sup>[43-44]</sup>,而过高浓度的微生物菌剂会导致土壤中有机的过量积累而不利于根系养分吸收,抑制植株生长<sup>[45-46]</sup>。 $6.0 \times 10^9$  cfu/g 的芽孢杆菌菌剂处理的根系活力最高,叶片的净光合速率与苗木的总生物量也最高,说明该剂量最适宜望天树苗的生长,且苗木生长随菌剂剂量的增加呈先增后减的趋势,即芽孢杆菌菌剂用量过大时植物的根系机能受到一定影响<sup>[47]</sup>;用量过高不利于微生物群落的繁殖,从而降低了土壤微生物活性与土壤有效养分<sup>[48]</sup>。因此,还需要进一步研究微生物菌剂对望天树根际微环境因子的调控作用,以阐明其对望天树的促生效果和机理。

综上所述,芽孢杆菌菌剂有利于改善望天树苗的形态学性状与光合特性,且以含活菌数为  $6.0 \times 10^9$  cfu/g 巨大芽孢杆菌处理的促进作用最为明显。综合苗木质量指数与苗木隶属值,以含活菌数为  $6.0 \times 10^9$  cfu/g 巨大芽孢杆菌处理望天树幼苗可提高苗木培育质量和造林成活率。

## 参考文献

- [1] SHUI Y M, WEN J, CHEN W H. *Parashorea chinensis* Wang Hsie and *P. chinensis* var. *kwangsiensis* Lin Chi: Two exceptional cases of names with a corporate authorship [J]. *Taxon*, 2011, 60(4): 1165–1167. doi: 10.1002/tax.604018.
- [2] LI Q M, HE T H, XU Z F. Generic relationships of *Parashorea chinensis* Wang Hsie (Dipterocarpaceae) based on cpDNA sequences [J]. *Taxon*, 2004, 53(2): 461–466. doi: 10.2307/4135622.
- [3] MENG L Z, ZHANG J L, CAO K F, et al. Diurnal changes of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence in canopy leaves of four dipterocarp species under *ex-situ* conservation [J]. *Acta Phytocool Sin*, 2005, 29(6): 976–984.  
孟令曾, 张教林, 曹坤芳, 等. 迁地保护的 4 种龙脑香冠层叶光合速率和叶绿素荧光参数的日变化 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 976–984.
- [4] DAI W J, ZHOU L, YANG M. Research and utilization of Dipterocarpaceae plants in China [J]. *World For Res*, 2017, 30(6): 46–51. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0056.y.  
戴文君, 周磊, 杨梅. 中国龙脑香科植物研究及利用现状 [J]. *世界林业研究*, 2017, 30(6): 46–51. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0056.y.
- [5] LIU K, ZHU Y F, YANG M, et al. Diameter and height class structure distribution of *Parashorea chinensis* Wang Hsie. plantations in different slope directions [J]. *J S Agric*, 2018, 49(4): 763–767. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2018.04.22.  
刘奎, 朱友飞, 杨梅, 等. 不同坡向望天树人工林径级和高度级结构分布 [J]. *南方农业学报*, 2018, 49(4): 763–767. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2018.04.22.
- [6] YAN X F, CAO M. Effects of light intensity on seed germination and seedling early growth of *Shorea wantianshue* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(1): 23–29. doi: 10.1360/yc-007-1324.  
闫兴富, 曹敏. 不同光照对望天树种子萌发和幼苗早期生长的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 23–29. doi: 10.1360/yc-007-13-24.
- [7] YAN L, YUN C G, QIN W M, et al. Progress in the study of the rare and endangered *Parashorea chinensis* [J]. *For Sci Technol*, 2014, 39(2): 59–62. doi: 10.3969/j.issn.1001-9499.2014.02.019.  
严理, 云朝光, 秦武明, 等. 珍稀濒危树种望天树的研究进展 [J]. *林业科技*, 2014, 39(2): 59–62. doi: 10.3969/j.issn.1001-9499.2014.02.019.
- [8] HOU L M, MENG R Q, NIE L C, et al. Effects of different microbial agents on substrate enzyme activities and tomato yield and quality [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27(8): 2520–2526. doi: 10.13287/j.1001-9332.201608.015.  
侯乐梅, 孟瑞青, 乜兰春, 等. 不同微生物菌剂对基质酶活性和番茄产量及品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2520–2526. doi: 10.13287/j.1001-9332.201608.015.
- [9] ZHU Z Y, TIAN Z H, LI J X. Function of *Streptomyces* and their application in agriculture [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(5): 580–590. doi: 10.11926/jtsb.4095.  
朱志炎, 田志宏, 李建雄. 链霉菌的功能及其在农业上的应用 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(5): 580–590. doi: 10.11926/jtsb.4095.
- [10] LI T, HU X Y, LI J P, et al. Comparison of microbial agents applied to netted melon [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2020, 36(25): 45–52. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb20190800571.  
李婷, 胡满怡, 李金萍, 等. 微生物菌剂在深网纹甜瓜上的应用效果比较 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(25): 45–52. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb20190800571.
- [11] FANG C, YUE M C, WANG D S, et al. Effects of fertilizer reduction combined with microbial agent application on growth and soil fertility

- of fresh corn [J]. *Soils*, 2020, 52(4): 743–749. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.013.
- 方成, 岳明灿, 王东升, 等. 化肥减施配施微生物菌剂对鲜食玉米生长和土壤肥力的影响 [J]. *土壤*, 2020, 52(4): 743–749. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.013.
- [12] 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. doi: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002.
- [13] ADNAN M, FAHAD S, ZAMIN M, et al. Coupling phosphate-solubilizing bacteria with phosphorus supplements improve maize phosphorus acquisition and growth under lime induced salinity stress [J]. *Plants*, 2020, 9(7): 900. doi: 10.3390/plants9070900.
- [14] AMOO-AGHAIE R, MOSTAJERAN A, EMTIAZI G. Effect of *Azospirillum* inoculation on some growth parameters and yield of three wheat cultivars [J]. *J Sci Technol Agric Nat Resour*, 2003, 7(2): 127–139.
- [15] ZHANG L M, FANG P, ZHU R Q. Recent advances in research and application of associated nitrogen-fixation with graminaceous plants [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(9): 1650–1654.
- 张丽梅, 方萍, 朱日清. 禾本科植物联合固氮研究及其应用现状展望 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1650–1654.
- [16] EGAMBERDIYEVA D. The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils [J]. *Appl Soil Ecol*, 2007, 36(2/3): 184–189. doi: 10.1016/j.apsoil.2007.02.005.
- [17] WANG G H, ZHAO Y, ZHOU D R, et al. Review of phosphate-solubilizing microorganisms [J]. *Ecol Environ*, 2003, 12(1): 96–101. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2003.01.024.
- 王光华, 赵英, 周德瑞, 等. 解磷菌的研究现状与展望 [J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 96–101. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2003.01.024.
- [18] FENG Y H, YAO T, LONG R J. Research progress of phosphate-dissolving microorganisms in plant rhizosphere [J]. *Grassl Turf*, 2003(1): 3–7. doi: 10.3969/j.issn.1009-5500.2003.01.001.
- 冯月红, 姚拓, 龙瑞军. 土壤解磷菌研究进展 [J]. *草原与草坪*, 2003(1): 3–7. doi: 10.3969/j.issn.1009-5500.2003.01.001.
- [19] HUANG J, WEI L P, ZHOU H P. Effects of shading on chlorophyll fluorescence and physiological and biochemical characteristics of *Parashorea cathayensis* Wang Hsie [J]. *J SW China Norm Univ (Nat Sci)*, 2021, 46(2): 74–79. doi: 10.13718/j.cnki.xsxb.2021.02.013.
- 黄菁, 魏丽萍, 周会平, 等. 遮荫对望天树生长和生理生化特性的影响 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(2): 74–79. doi: 10.13718/j.cnki.xsxb.2021.02.013.
- [20] ZHANG Z Y, BU J J, WANG S F, et al. Effect of coronatine on cotton root activity determined by TTC assay at different levels of potassium [J]. *Plant Physiol J*, 2015, 51(5): 695–701. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2014.0585.
- 张志勇, 卜晶晶, 王素芳, 等. 冠菌素对不同钾水平下 TTC 法测定的棉花根系活性的影响 [J]. *植物生理学报*, 2015, 51(5): 695–701. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2014.0585.
- [21] ZHANG F, ZHANG Y K, MAO P J, et al. Status and development of measuring method in plant chlorophyll content [J]. *J Agric Mech Res*, 2014, 36(4): 238–241. doi: 10.13427/j.cnki.njyi.2014.04.057.
- 张伏, 张亚坤, 毛鹏军, 等. 植物叶绿素测量方法研究现状及发展 [J]. *农机化研究*, 2014, 36(4): 238–241. doi: 10.13427/j.cnki.njyi.2014.04.057.
- [22] ZHANG G L, LI Y Q, LUO X Q, et al. Change of water use efficiency of different species in karst secondary forest under seasonal drought [J]. *Earth Environ*, 2021, 49(1): 25–31. doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.087.
- 张桂玲, 李艳琴, 罗绪强, 等. 季节性干旱下喀斯特次生林不同树种水分利用效率变化 [J]. *地球与环境*, 2021, 49(1): 25–31. doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.087.
- [23] DAI W J. Effect of microbial agent on the growth and fertility of seedlings of *Parashorea chinensis* Wang Hsie [D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 12. doi: 10.7666/d.Y3436208.
- 戴文君. 微生物菌剂对望天树苗木生长及肥力效应的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2018: 12. doi: 10.7666/d.Y3436208.
- [24] YAO J B, YUAN X J, ZHOU X H, et al. Scheme optimization for big container seedlings of *Taxus wallichiana* var. *mairei* [J]. *J NE For Univ*, 2019, 47(11): 11–16. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2019.11.003.
- 姚甲宝, 袁小军, 周新华, 等. 南方红豆杉 2 年生容器苗育苗方案优选 [J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(11): 11–16. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2019.11.003.
- [25] OTEINO N, LALLY R D, KIWANUKA S, et al. N. Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates [J]. *Front Microbiol*, 2015, 6: 745. doi: 10.3389/fmicb.2015.00745.
- [26] ZHOU C G, XU S J, ZHANG M L, et al. Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* biofertilizer on tea yield and quality [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(2): 253–257.
- 周晨光, 徐圣君, 张茉莉, 等. 解淀粉芽孢杆菌微生物菌剂对茶叶产量和品质的影响 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(2): 253–257.
- [27] SHEN R F, ZHAO X Q. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(20): 6584–6591. doi: 10.5846/stxb201506051140.
- 沈仁芳, 赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用 [J]. *生态*

- 学报, 2015, 35(20): 6584–6591. doi: 10.5846/stxb201506051140.
- [28] CHEN Q, ZHANG X X, ZHAO H, et al. Advance in research and application of some functional microbes in bio-organic fertilizer [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2010, 16(2): 294–300. doi: 10.3724/SP.J.1145.2010.00294.
- 陈谦, 张新雄, 赵海, 等. 生物有机肥中几种功能微生物的研究及应用概况 [J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(2): 294–300. doi: 10.3724/SP.J.1145.2010.00294.
- [29] WU J F, LIN X G. Existing status and development tendency of microbial fertilizer study in China [J]. *Soils*, 2002, 34(2): 68–72. doi: 10.3321/j.issn:0253-9829.2002.02.003.
- 吴建峰, 林先贵. 我国微生物肥料研究现状及发展趋势 [J]. *土壤*, 2002, 34(2): 68–72. doi: 10.3321/j.issn:0253-9829.2002.02.003.
- [30] LEI X D, LI J W, XU X L, et al. Effect of microbial inoculants on spinach growth characteristics and soil microbial diversity [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2012, 20(4): 488–494. doi: 10.3724/SP.J.1011.2012.00488.
- 雷先德, 李金文, 徐秀玲, 等. 微生物菌剂对菠菜生长特性及土壤微生物多样性的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(4): 488–494. doi: 10.3724/SP.J.1011.2012.00488.
- [31] ZHANG X G, WANG Y, HE X Y, et al. Effect of fertilization treatments on the photosynthesis, enzyme activity and yield in peanut [J]. *J Henan Agric Univ*, 2016, 50(6): 726–733. doi: 10.16445/j.cnki.1000-2340.2016.06.004.
- 张幸果, 王允, 和小燕, 等. 施复合微生物肥和抗重茬肥对不同花生品种(系)光合特性、酶活性及产量的影响 [J]. *河南农业大学学报*, 2016, 50(6): 726–733. doi: 10.16445/j.cnki.1000-2340.2016.06.004.
- [32] ZHANG M C, CHENG T, DUO L A, et al. Effects of microbial agents on the growth of turfgrass *Festuca arundinacea* and soil enzyme activity [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(14): 4763–4769. doi: 10.5846/stxb201604200743.
- 张美存, 程田, 多立安, 等. 微生物菌剂对草坪植物高羊茅生长与土壤酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37(14): 4763–4769. doi: 10.5846/stxb201604200743.
- [33] WANG Q C, SUN J, SHU S, et al. Effects of microbial agents on growth and photosynthesis of pepper in solar greenhouse [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2012, 35(6): 7–12. doi: 10.7685/j.issn.1000-2030.2012.06.002.
- 王其传, 孙锦, 束胜, 等. 微生物菌剂对日光温室辣椒生长和光合特性的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(6): 7–12. doi: 10.7685/j.issn.1000-2030.2012.06.002.
- [34] LÜ D Q, ZHANG M G, MA Y Z, et al. Effect of fulvic acid on cotton growth and soil chemical properties in a garlic-cotton intercropping system [J]. *J Soil Water Conserv*, 2020, 34(2): 222–230. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.032.
- 吕冬青, 张铭谷, 马玉增, 等. 黄腐酸对蒜套棉制度下棉花产量品质及土壤性状的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 222–230. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.032.
- [35] KOU W F, LIU Z P, CHEN M D, et al. Effects of sea water at different concentrations on the photosynthesis and chlorophyll-fluorescence properties of oil sunflower seedlings [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2006, 26(1): 73–77. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.01.014.
- 寇伟锋, 刘兆普, 陈铭达, 等. 不同浓度海水对油葵幼苗光合作用和叶绿素荧光特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2006, 26(1): 73–77. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.01.014.
- [36] GUO W, LIU P, DENG L, et al. Effect of light intensity on growth and chlorophyll fluorescence parameters of *Belosynopsis ciliate* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2018, 26(3): 255–261. doi: 10.11926/jtsb.3816.
- 郭微, 刘萍, 邓磊, 等. 不同光照强度对假紫万年青生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, 26(3): 255–261. doi: 10.11926/jtsb.3816.
- [37] FASEELA P, SINISHA A K, BRESTIČ M, et al. Chlorophyll a fluorescence parameters as indicators of a particular abiotic stress in rice [J]. *Photosynthetica*, 2020, 58(S1): 293–300. doi: 10.32615/ps.2019.147.
- [38] LI X, FENG W, ZENG X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2006, 26(10): 2186–2196. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.10.037.
- 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展 [J]. *西北植物学报*, 2006, 26(10): 2186–2196. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.10.037.
- [39] XU K, GUO Y P, ZHANG S L. Effect of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves [J]. *Sci Agric Sin*, 2005, 38(2): 369–375. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2005.02.024.
- 徐凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(2): 369–375. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2005.02.024.
- [40] LI L, HONG J P, XIE Y H, et al. Effect of bacterial manure on soil biological activity, yield and quality of rape in reclaimed core-mining areas [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18(5): 939–944. doi: 10.3724/SP.J.1011.2010.00939.
- 栗丽, 洪建平, 谢英荷, 等. 生物菌肥对采煤塌陷复垦土壤生物活性及盆栽油菜产量和品质的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5): 939–944. doi: 10.3724/SP.J.1011.2010.00939.
- [41] LIU Y Y, LUO H Y, WANG F Z, et al. Effect of *Bacillus megaterium* (BM002) microbial organic fertilizer on growth and development of rape [J]. *Shandong Agric Sci*, 2012, 44(7): 63–66. doi: 10.3969/j.issn.

- 1001-4942.2012.07.020.
- 柳艳艳, 骆洪义, 王凤忠, 等. 巨大芽孢杆菌(BM002)生物有机肥对油菜生长发育的影响 [J]. 山东农业科学, 2012, 44(7): 63-66. doi: 10.3969/j.issn.1001-4942.2012.07.020.
- [42] LU J Z, WANG K Q, ZHAO Y Y, et al. Effects of different EM inoculants concentrations on red soil characteristics and peanut biomass [J]. J SW For Univ, 2018, 38(4): 53-58. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2018.04.008.
- 卢锦钊, 王克勤, 赵洋毅, 等. 不同EM菌剂浓度对花生种植的红壤性状及产量影响 [J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(4): 53-58. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2018.04.008.
- [43] SONG Y L, YU J, CHEN S G, et al. Effects of complex microbial agent on cotton physiological characteristics, microorganism and physicochemical properties in rhizosphere soil [J]. Soils, 2019, 51(3): 477-487. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2019.03.009.
- 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 复合微生物菌剂对棉花生理特性及根际土壤微生物和化学性质的影响 [J]. 土壤, 2019, 51(3): 477-487. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2019.03.009.
- [44] VESSEY J K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers [J]. Plant Soil, 2003, 255(2): 571-586. doi: 10.1023/A:1026037216893.
- [45] WANG M, YIN C M, SUN M M, et al. Effect of fulvic acid on leaf photosynthesis fluorescent parameters of apple (*Malus hupehensis*) under replant condition [J]. Plant Physiol J, 2019, 55(1): 99-106. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2018.0051.
- 王玫, 尹承苗, 孙萌萌, 等. 黄腐酸微生物菌剂对连作平邑甜茶光合特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2019, 55(1): 99-106. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2018.0051.
- [46] SONG S S, SUN B P, ZHANG J F, et al. Effects of water-retaining agent and microbial agent on soil moisture and nutrient content [J]. Arid Zone Res, 2018, 35(4): 761-769. doi: 10.13866/j.azr.2018.04.02.
- 宋双双, 孙保平, 张建锋, 等. 保水剂与微生物菌剂对土壤水分、养分的影响 [J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 761-769. doi: 10.13866/j.azr.2018.04.02.
- [47] ZHANG X Y, TIAN L, GAO Y M, et al. Effects of bioorganic fertilizer on cucumber seedling growth, substrate nutrient content and seedling root characteristics [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2013, 29(1): 117-125.
- 张雪艳, 田蕾, 高艳明, 等. 生物有机肥对黄瓜幼苗生长、基质环境以及幼苗根系特征的影响 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 117-125.
- [48] ZHANG A M, LI N K, ZHAO G Y, et al. Research progress on the phosphate-solubilizing and potassium-solubilizing microorganisms [J]. J Hebei Univ (Nat Sci), 2015, 35(4): 442-448. doi: 10.3969/j.issn.1000-1565.2015.04.019.
- 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. doi: 10.3969/j.issn.1000-1565.2015.04.019.