

中南林业科技大学学报

*Journal of Central South University of Forestry & Technology*

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.011

论文标题： 复合肥和生物菌肥配施对闽楠苗生长及非结构性碳水化合物的影响

作　　者： 刘首群，展超雨，陈春晖，等

收稿日期： 2025-09-15

引文格式： 刘首群,展超雨,陈春晖,等.复合肥和生物菌肥配施对闽楠苗生长及非结构性碳水化合物的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):110-119.

Liu S Q, Zhan C Y, Chen C H, et al. Effects of combined application of compound fertilizer and biofertilizer on the growth of *Phoebe bournei* seedlings and non-structural carbohydrates[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):110-119.

相关论文推荐

Recommended articles

林下套种闽楠植株构型和生物量分配对林窗大小的响应

Response of plant architecture and biomass allocation of under-canopy *Phoebe bournei* to forest gap sizes

施氮对闽楠挥发性次生代谢物组分和含量的影响

Effects of nitrogen application on components and contents of volatile secondary metabolites in *Phoebe bournei*

3种育苗因素对闽楠容器苗生长和根系发育的影响

Effects of three factors on seedling growth and root development of *Phoebe bournei* container

指数施磷模式对闽楠幼苗生长及光合生理特性的影响

Effects of exponential phosphorus application on the growth and photosynthetic physiological characteristics of *Phoebe bournei* seedlings

水分胁迫对闽楠幼苗生理及光合特性的影响

Effects of water stress on the physiological and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings

闽楠演替过程中叶功能性状特征及其可塑性

Characteristics and plasticity indexes of leaf functional traits during the natural regeneration of *Phoebe bournei*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.011 http: //qks.csuft.edu.cn

# 复合肥和生物菌肥配施对闽楠苗生长及非结构性碳水化合物的影响

刘首群，展超雨，陈春晖，李远湘，叶兴状，施 歌，刘 宝
（福建农林大学 林学院，福建 福州 350002）

**摘 要：**【目的】探究不同施肥处理对闽楠苗 *Phoebe bournei* 的生长和生理的影响，为制定科学施肥方案、培育优质苗木和提高造林成活率提供理论依据。【方法】以 2 年生闽楠苗为试验材料，设置 4 个复合肥水平（0、4、8、16 g/ 株）与 4 个生物菌肥水平（0、5、10、20 g/ 株）进行组合配施，共形成 16 个不同的施肥处理。通过测定苗木的苗高、地径、生物量、叶绿素含量、可溶性蛋白质含量，以及闽楠苗各部位可溶性糖和淀粉含量，并采用多重比较和相关分析等方法，系统研究了施肥处理对苗木生长及 NSC 积累与分配的影响。【结果】施肥显著促进了闽楠苗的生长，T6（4 g 复合肥 +10 g 生物菌肥）和 T7（4 g 复合肥 +20 g 生物菌肥）的苗高、地径和生物量增加最为显著。其中，中肥组综合促进效果最佳，苗木具有较为适宜的高径比和茎根比，同时保持了较高的质量指数和整体生长协调性。因此，建议配施 4 ～ 8 g 复合肥和 10 ～ 20 g 生物菌肥，以促进闽楠苗质量提升及 NSC 的高效积累。相关性分析表明，苗高、地径、可溶性蛋白质含量、叶绿素含量、生物量与各部位 NSC 之间存在相关性。复合肥与生物菌肥的主体间效应分析显示，复合肥的主体效应较强，可显著促进苗高、地径、总生物量、苗木质量等多数指标的提升；生物菌肥的主体效应相对较弱，但在促进根系和枝条的 NSC 积累方面表现突出。【结论】推荐将复合肥与生物菌肥配合施用，以兼顾闽楠苗的快速生长与 NSC 积累，从而缩短闽楠苗的生长周期并增强苗木抗逆性，为闽楠人工林营造和野生种群恢复提供优质苗木支持。

**关键词：**复合肥；生物菌肥；配施；苗木；闽楠；非结构性碳水化合物
**中图分类号：**S723.7 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)08-0110-10

# Effects of combined application of compound fertilizer and biofertilizer on the growth of *Phoebe bournei* seedlings and non-structural carbohydrates

Liu Shouqun, Zhan Chaoyu, Chen Chunhui, Li Yuanxiang, Ye Xingzhuang, Shi Ge, Liu Bao

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:**【Objective】To investigate the effects of different fertilization treatments on the growth and physiology of *Phoebe bournei* seedlings, and to provide a theoretical basis for developing scientific fertilization strategies to cultivate high-quality seedlings that are both tall and robust, thereby improving afforestation survival rates.【Method】Two-year-old *Phoebe bournei* seedlings were used as experimental materials. A factorial design was employed with four compound fertilizer levels (0, 4, 8, 16 g per seedling) and four bio-fertilizer levels (0, 5, 10, 20 g per seedling), forming 16 treatment combinations. Seedling height, ground diameter, biomass, chlorophyll content, soluble protein content, as well as soluble sugar and starch contents in various plant parts (leaves, branches, roots) were measured. Multiple comparisons and correlation analysis were used to systematically study the effects of fertilization on seedling growth and NSC accumulation and allocation.【Result】Fertilization significantly promoted the growth of *Phoebe bournei* seedlings. Treatments T6 (4 g compound fertilizer + 10 g bio-fertilizer) and T7 (4 g compound fertilizer + 20 g bio-fertilizer) showed the most pronounced increases in seedling height, ground diameter, and biomass. The medium fertilizer group overall exhibited the best comprehensive promotion effect, resulting in seedlings with suitable height-to-diameter and shoot-to-root ratios, while maintaining high seedling quality indices and overall growth coordination. Therefore, the combined application of 4-8 g compound fertilizer combined

**收稿日期**（Received）：2025-09-15 **修订日期**（Revised）：2025-11-17
**基金项目：**福建省林业种苗科技攻关第八期项目（ZMGG-0809）；闽楠等珍贵树种种业创新与产业化开发（118-KKE21HO5A）。
**第一作者：**刘首群（2251289695@qq.com），硕士研究生。**通信作者：**刘宝（fafalb@163.com），副教授，博士，硕士研究生导师。
**引文格式：**刘首群 , 展超雨 , 陈春晖 , 等 . 复合肥和生物菌肥配施对闽楠苗生长及非结构性碳水化合物的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(8):110-119.
Liu S Q, Zhan C Y, Chen C H, et al. Effects of combined application of compound fertilizer and biofertilizer on the growth of *Phoebe bournei* seedlings and non-structural carbohydrates[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):110-119.

with 10-20 g biofertilizer is recommended to achieve both quality improvement and efficient NSC accumulation in *Phoebe bournei* seedlings. Correlation analysis indicated widespread correlations among seedling height, ground diameter, soluble protein, chlorophyll, biomass, and NSC contents in different parts. Main effect analysis revealed that compound fertilizer had a strong main effect, enhancing most indicators including seedling height, ground diameter, total biomass, and seedling quality index. Bio-fertilizer had a relatively weaker main effect but was particularly prominent in promoting NSC accumulation in roots and branches.【Conclusion】The combined application of compound fertilizer and biofertilizer is recommended to balance rapid growth and NSC accumulation in *Phoebe bournei* seedlings, shorten the growth cycle, and enhance stress resistance. This study provides support for supplying high-quality seedlings for the establishment of *Phoebe bournei* plantations and the restoration of wild populations.

**Keywords:** compound fertilizer; biofertilizer; combined application; seedlings; *Phoebe bournei*; non-structural carbohydrates

闽楠又称竹叶楠、楠木，是樟科楠属的高大常绿乔木，是我国特有的珍贵用材和生态树种，是国家二级重点保护野生植物。闽楠树形通直，枝繁叶茂，木材坚韧，兼具显著的经济价值和观赏价值。此外，闽楠树大根深，具有良好的水土保持功能，有着较高的生态价值，在稳定区域生态系统与发挥碳汇功能方面具有重要作用。然而，长期以来，野生闽楠种群受到过度采伐和生境破坏的影响，天然更新能力弱，幼苗生长缓慢且抗性差，自然恢复速度极低，严重制约了其资源保护与人工林发展。培育优质种苗已成为闽楠人工林营建和野生种群恢复的关键环节，也是当前林木培育领域亟需解决的核心科学技术问题。

施肥是促进植物生长和增强植物逆境适应性的重要手段[1]。现有研究表明，合理施用无机肥料对植物的生长与生理代谢起一定的调控作用[2-3]。然而，长期的农林业施肥实践表明：过度依赖单一无机肥和过量施用无机肥料等不合理施肥行为，易引发土壤板结、环境污染等问题[4-5]。因此，如何在保障苗木健康生长的同时，兼顾土壤质量与生态环境安全，已成为林业可持续发展的核心议题。近年来，生物菌肥因具备改善土壤理化特性、促进苗木养分摄取、增强光合作用与抗逆能力、抑制病原菌以及提升作物产量等功效而受到广泛关注。已有研究表明，施用生物菌肥对欧李 *Prunus humilis*[6]、燕麦 *Avena sativa*[7] 等植物的产量和品质提升有显著效果。将无机肥与生物菌肥配施可实现优势互补，无机肥提供速效养分，生物菌肥改善土壤及提高苗木抗逆性，二者配施可兼顾苗木快速生长与长期生态效益[8]。非结构性碳水化合物（Non-structural carbohydrates，NSC）包括可溶性糖和淀粉，是植物体内的“能量货币”和“构建材料”，不仅为生长提供能量，还参与抗逆性（如抗旱、抗寒）的形成以及胁迫后的恢复过程。苗木的 NSC 水平是关乎其健壮程度和造林后成活潜力的重要因素，也被视为衡量植物营养代谢、抗逆性与适应性的关键指标之一[9-13]。

目前，复合肥或生物菌肥在提升农作物产量与品质以及增强林木抗性方面已有相关报道，但关于二者配施对闽楠苗生长、生理特性及各部位 NSC 积累的影响研究仍相对匮乏。本研究通过不同施肥组合试验，系统研究复合肥与生物菌肥对闽楠苗生长及 NSC 积累的影响，为提升闽楠苗木质量、实现科学施肥提供理论依据与实践指导。

## 1　研究区概况

### 1.1　试验地概况

试验地位于福建省福州市福建农林大学林学院林业苗木强化大棚内，地理坐标为 119°23′E，26°07′N。该区域属于亚热带季风气候，年平均气温 14.8 ～ 19.5 ℃，雨热同期，生长季热量充足，无霜期较长，适合闽楠苗的生长发育。苗木强化大棚采用透光设计，能够满足苗木对光照的需求。

### 1.2　试验材料

本试验采用福建省林业科学院培育的 128 株生长良好、长势相近且无明显病虫害的 2 年生闽楠 NP608 家系苗作为试验对象。2024 年 4 月 7 日上午将苗移入盆中，采用单株盆栽，移栽后缓苗 30 d，2024 年 5 月 7 日开始施肥试验。移栽盆外径 25 cm、内径 23 cm、高 20.5 cm、底径 18.5 cm，能够满足 2 年生闽楠容器苗的生长需求。其栽培基质为 2024 年 3 月 20 日于福建农林大学后山挖取的黄心土，在移栽前暴晒 30 d 后过筛，去除黄心土中的植物根系、落叶、石子及其他杂物，以减少对试验的干扰和误差。试验前，测得土壤全氮、全磷、全钾含量分别为 1.47、0.58、1.97 g/kg，pH 值为 4.8。试验肥料选择史丹利复合肥（氮≥ 15%、磷≥ 15%、钾≥ 15%、总养分≥ 45%）和君德菌动力生物菌肥（主要包含芽孢杆菌 *Bacillus*、木霉菌 *Trichoderma spp*、乳酸菌 *Lactobacillus* 等）。

### 1.3 试验设计

本研究共设置 16 个施肥处理组（表 1），每个处理设 8 个重复，以不施肥组作为对照（CK），并对施肥苗木进行相同的管理养护。施肥量的确定参考前人有关苗木配比施肥试验的设计方法并进行计算 [1]。施肥分 2 次进行，分别为 2024 年 5 月 7 日及 2024 年 12 月 7 日，2025 年 7 月 7 日结束生长测定，共 14 个月，以确保苗木充分吸收肥料。

表 1 闽楠苗各施肥水平处理组 †

**Table 1 Treatment group of each fertilization level of *Phoebe bournei* seedlings**

| 处理组 Treatment | 复合肥 Compound fertilizer /g | 生物菌肥 Biofertilizer /g |
|---|---|---|
| CK | 0 | 0 |
| T1 | 0 | 5 |
| T2 | 0 | 10 |
| T3 | 0 | 20 |
| T4 | 4 | 0 |
| T5 | 4 | 5 |
| T6 | 4 | 10 |
| T7 | 4 | 20 |
| T8 | 8 | 0 |
| T9 | 8 | 5 |
| T10 | 8 | 10 |
| T11 | 8 | 20 |
| T12 | 16 | 0 |
| T13 | 16 | 5 |
| T14 | 16 | 10 |
| T15 | 16 | 20 |

† 表中所示肥量为 2 次施肥的总量。
The fertilizer amount shown in the table is the total quantity of two applications.

### 1.4 指标测定和计算方法

生长指标测定：采用钢尺测量苗木的苗高，测量精度为 0.1 cm；用电子游标卡尺测量苗木地径，测量精度为 0.01 mm；每隔 1 个月测量 1 次。

生理指标测定：施肥苗木的叶绿素含量测定采用丙酮 - 乙醇法 [1]，可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝（G250 法）测定 [1]，淀粉及可溶性糖含量测定分别采用苏州科铭植物淀粉测定试剂盒和苏州科铭植物可溶性糖测定试剂盒。以上生理指标的测定时间为 2025 年 7 月 7 日。

生物量指标测定：苗木采收后，按照分组和部位进行分装。放入烘箱中 105 ℃杀青 30 min，再调至 65 ℃烘干 48 h 至恒质量。烘干后对苗木各部位分别进行称量，计算各部位的生物量和总生物量 [1]。苗木质量相关指标的计算公式参考文献 [2]。

### 1.5 数据统计与分析

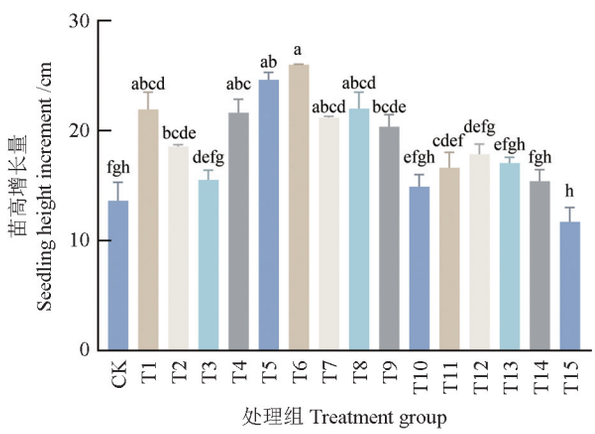
使用 Excel 2010 和 SPSS Statistics 27.0 软件完成数据收集、统计与分析工作，运用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件开展双因素方差分析、多重比较及主成分分析，利用 Origin Pro 软件绘制柱状图并进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对闽楠苗生长的影响

#### 2.1.1 苗高增长量

在各施肥处理组中，T1、T4、T5、T6、T7、T8、T9 处理组的苗高增长量均超过 20 cm。T6 处理组的苗高增长量最大，达 26.00 cm，较对照组（CK）多增长 12.37 cm，为 CK 的 1.91 倍；其次是 T5 处理组，苗高增长量为 24.63 cm，较对照组多增长 11.00 cm，为 CK 的 1.81 倍（图 1）。




不同小写字母表示不同处理组间差异显著（$P < 0.05$），下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatment groups, the same below.

图 1 施肥对闽楠苗高增长量的影响

**Fig. 1 Effect of fertilization on the height growth of *Phoebe bournei* seedlings**

#### 2.1.2 地径增长量

在各施肥处理组中，T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8、T9、T10 和 T11 处理组的地径增长量均超过 2.5 mm。T6 处理组的地径增长量最大，为 3.67 mm，比 CK（1.50 mm）多增长 2.17 mm，为 CK 的 2.45 倍。其次为 T5 处理组，地径增长为 3.65 mm，比 CK 多增长 2.15 mm，为 CK 的 2.43 倍（图 2）。

#### 2.1.3 施肥对闽楠苗生物量的影响

在各施肥处理组中，T7 处理组苗木积累的生

物量最多，平均总生物量为38.76 g，比CK（19.40 g）增加 19.36 g，为 CK 的 2.00 倍。其次为 T6 处理组，总生物量为 34.72 g，比 CK 增加 15.32 g，为 CK 的 1.79 倍。T2、T4、T5、T6、T7、T9、T10 的总生物量均超过 30 g（图 3）。

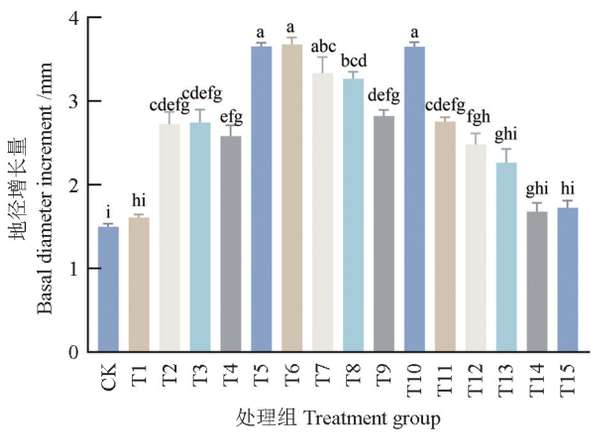



图 2　施肥对闽楠苗地径增长量的影响

**Fig. 2　Effect of fertilization on the growth of ground diameter of *Phoebe bournei* seedlings**

### 2.1.4　施肥对闽楠苗质量的影响

由表 2 可以看出，施肥显著改善了闽楠苗的形态和质量，尤其是中肥水平（如 T6、T7、T10）效果最佳。中等施肥量处理下，苗木不仅具有较低的高径比和适宜的茎根比，还保持较高的质量指数和整体生长协调性。相比之下，低肥处理组的苗木改善效果较为有限；高肥组虽然在单个指标（如高径比）上表现突出，但综合性状不如中肥组。结果表明，适量复合肥与生物菌肥配施可实现苗木的速效营养补充与结构性生长的协调统一，更易培育出优质苗木。

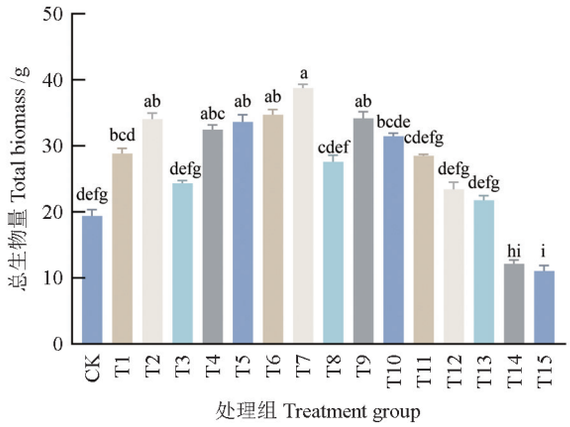



图 3　施肥对闽楠苗生物量的影响

**Fig. 3　Effect of fertilization on seedling biomass of *Phoebe bournei***

## 2.2　施肥对闽楠苗生理的影响

### 2.2.1　施肥对闽楠苗叶绿素含量的影响

由表 3 可知，2 年生闽楠苗在施肥处理后，T6、T7、T8 处理组叶绿素 a 含量最高，均为 2.46 mg/g，比 CK 增加 0.33 mg/g，为 CK 的 1.15 倍。T6 处理组叶绿素 b 含量最高，为 0.99 mg/g，比 CK（0.81 mg/g）增加 0.18 mg/g，为 CK 的 1.22 倍；其次为 T11 处理组，叶绿素 b 含量为 0.96 mg/g，比 CK 增加 0.15 mg/g，为 CK 的 1.19 倍。T6 处理组总叶绿素

表 2　施肥对闽楠苗质量的影响 †

**Table 2　Effects of fertilization on the quality of *Phoebe bournei* seedlings**

| 处理组 Treatment | 高径比 Aspect ratio | 茎根比 Stem and root ratio | 苗木质量 Seedling quality | 排序 Rank |
|---|---|---|---|---|
| CK | 9.11 ± 2.01 defgh | 1.10 ± 0.19 bcdefg | 1.96 ± 0.53 cdefg | 13 |
| T1 | 13.64 ±1.41 cdefgh | 1.57 ± 0.07 a | 1.91 ± 0.20 efg | 14 |
| T2 | 6.85 ± 0.69 cdefgh | 2.19 ± 0.52 cdefg | 3.77 ± 0.13 abcdef | 5 |
| T3 | 5.66 ± 0.13 cdefgh | 2.07 ± 0.53 fgh | 3.16 ± 0.13 bcdefg | 9 |
| T4 | 8.4 ± 0.76 bcdefgh | 1.83 ± 0.14 bcdef | 3.18 ± 0.26 bcdefg | 8 |
| T5 | 6.75 ± 0.4 bcdefgh | 2.05 ± 0.39 defg | 3.85 ± 0.44 abcde | 4 |
| T6 | 7.08 ±0.29 bcdefgh | 1.73 ± 0.19 cdefg | 3.95 ± 0.23 abcdef | 3 |
| T7 | 6.39 ± 0.6 efgh | 1.47 ± 0.37 efgh | 4.98 ± 0.70 ab | 2 |
| T8 | 6.71 ± 0.52 a | 3.47 ± 1.87 cdefg | 2.73 ± 0.21 defg | 11 |
| T9 | 7.23 ± 0.7 ab | 2.48 ± 0.29 defg | 3.55 ± 0.49 bcdefg | 6 |
| T10 | 4.09 ± 0.6 abcdef | 2.14 ± 0.20 i | 5.10 ± 0.53 a | 1 |
| T11 | 6.03 ±0.74 abcdefg | 2.11 ± 0.20 fgh | 3.53 ± 0.38 bcdefg | 7 |
| T12 | 7.27 ± 1.15 fgh | 1.04 ± 0.10 bcdefg | 2.85 ± 0.38 cdefg | 10 |
| T13 | 7.60 ± 0.94 h | 0.67 ± 0.07 defg | 2.64 ± 0.18 efg | 12 |
| T14 | 9.31 ± 1.99 defgh | 1.56 ± 0.10 ab | 1.14 ± 0.18 h | 16 |
| T15 | 6.78 ± 1.03 gh | 1.32 ± 0.42 fgh | 1.36 ± 0.09 gh | 15 |

† 同列中不同小写字母表示差异显著性（$P < 0.05$），下同。Different lowercase letters in the same column indicate difference significance ($P < 0.05$), the same below.

含量最高，为3.45 mg/g，比CK（2.94 mg/g）增加0.51 mg/g，为 CK 的 1.17 倍。其次为 T7 处理组，总叶绿素含量为 3.38 mg/g，比 CK 增加 0.44 mg/g，为 CK 的 1.15 倍。

表 3 施肥对闽楠苗叶绿素含量的影响

**Table 3 Effect of fertilization on chlorophyll content of *Phoebe bournei* seedlings** mg/g

| 处理组 Treatment | 叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content | 叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content | 总叶绿素含量 Total chlorophyll content |
|---|---|---|---|
| CK | 2.13±0.01 d | 0.81±0.01 d | 2.94±0.00 e |
| T1 | 2.27±0.02 abcd | 0.80±0.00 d | 3.07±0.01 de |
| T2 | 2.35±0.06 abc | 0.86±0.05 cd | 3.22±0.09 cde |
| T3 | 2.37±0.16 abc | 0.92±0.02 abc | 3.29±0.15 abc |
| T4 | 2.38±0.04 abc | 0.88±0.03 bcd | 3.27±0.05 bcde |
| T5 | 2.39±0.07 abc | 0.94±0.03 ab | 3.33±0.04 abcd |
| T6 | 2.46±0.04 a | 0.99±0.03 a | 3.45±0.02 ab |
| T7 | 2.46±0.10 ab | 0.93±0.01 ab | 3.38±0.09 a |
| T8 | 2.46±0.14 abc | 0.90±0.06 bcd | 3.36±0.20 cde |
| T9 | 2.42±0.02 abc | 0.90±0.02 abc | 3.32±0.04 abcde |
| T10 | 2.43±0.07 abc | 0.88±0.02 bcd | 3.32±0.06 bcde |
| T11 | 2.39±0.02 abc | 0.96±0.07 ab | 3.35±0.05 abcde |
| T12 | 2.26±0.05 bcd | 0.94±0.04 ab | 3.20±0.03 cde |
| T13 | 2.28±0.06 abcd | 0.86±0.07 cd | 3.15±0.03 de |
| T14 | 2.27±0.02 abcd | 0.83±0.04 d | 3.11±0.03 e |
| T15 | 2.29±0.03 abcd | 0.89±0.02 bcd | 3.18±0.05 cde |

### 2.2.2 施肥对闽楠苗可溶性蛋白质含量的影响

在各施肥处理组中，T1、T4、T5、T6、T7 和 T12 处理组的可溶性蛋白质含量均超过5.30 mg/g。其中，T6 处理组可溶性蛋白质含量最高，为 6.17 mg/g，比 CK（4.23 mg/g）增加 1.94 mg/g，为 CK 的 1.46 倍（图 4）。

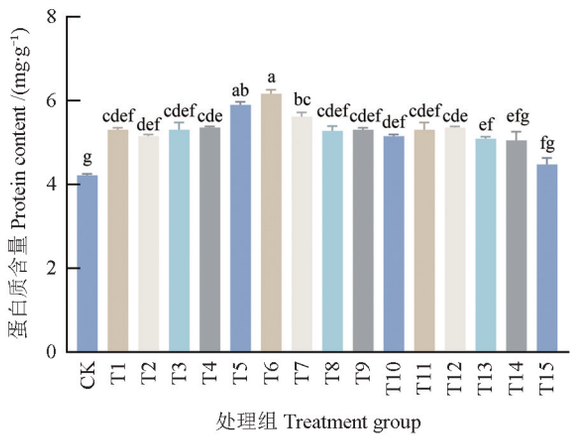



图 4 施肥对闽楠苗蛋白质含量的影响

**Fig. 4 Effect of fertilization on protein content of *Phoebe bournei* seedlings**

## 2.3 施肥对闽楠苗 NSC 含量的影响

### 2.3.1 施肥对闽楠苗淀粉含量的影响

如表 4 所示，在各处理组中，T7 处理组叶淀粉含量最高，为 42.95 mg/g，比 CK（30.60 mg/g）增加 12.35 mg/g，为 CK 的 1.40 倍。其次为 T6 处理组，叶淀粉含量为 41.19 mg/g，比 CK 增加 10.59 mg/g，为 CK 的 1.35 倍。T6 处理组枝淀粉含量最高，为 28.02 mg/g，比 CK（20.51 mg/g）增加 7.51 mg/g，为 CK 的 1.37 倍。其次为 T5 处理组，枝淀粉含量为 24.89 mg/g，比 CK 增加 4.38 mg/g，为 CK 的 1.21 倍。T6 处理组根淀粉含量最高，为

表 4 施肥对闽楠苗各部位淀粉含量的影响

**Table 4 Effect of fertilization on starch content in different parts of *Phoebe bournei* seedlings** mg/g

| 处理组 Treatment | 叶淀粉含量 Leaf starch content | 枝淀粉含量 Branch starch content | 根淀粉含量 Root starch content |
|---|---|---|---|
| CK | 30.60 ± 1.59 defg | 20.51 ± 2.63 cdefg | 23.06 ± 4.23 fgh |
| T1 | 36.21 ± 2.17 abcdef | 23.52 ± 3.19 fgh | 43.05 ± 0.54 fgh |
| T2 | 34.62 ± 0.00 bcdefg | 23.47 ± 1.01 bcdef | 47.67 ± 0.22 cdefg |
| T3 | 35.58 ± 1.30 abcdef | 22.43 ± 1.56 cdefg | 40.76 ± 0.65 fgh |
| T4 | 36.45 ± 0.78 abcdef | 22.72 ± 1.19 defg | 48.40 ± 1.27 cdef |
| T5 | 37.03 ± 1.71 abcdef | 24.89 ± 1.59 bcdef | 50.20 ± 3.05 bcde |
| T6 | 41.19 ± 2.13 abcd | 28.02 ± 0.14 ab | 51.60 ± 2.55 bcd |
| T7 | 42.95 ± 1.24 abc | 23.95 ± 0.08 hi | 42.47 ± 0.13 defg |
| T8 | 35.41 ± 4.20 abcdef | 24.19 ± 0.44 fgh | 47.36 ± 0.19 cdefg |
| T9 | 31.18 ± 1.11 efg | 23.64 ± 0.14 i | 50.39 ± 1.06 bcde |
| T10 | 29.44 ± 1.29 fg | 20.92 ± 0.29 fgh | 48.88 ± 0.75 cdefg |
| T11 | 31.63 ± 1.14 defg | 22.48 ± 1.33 cdefg | 50.44 ± 2.91 bcdef |
| T12 | 30.38 ± 0.84 efg | 24.14 ± 0.55 a | 47.75 ± 0.33 a |
| T13 | 30.57 ± 3.84 fg | 24.26 ± 1.24 bcdef | 44.37 ± 0.80 defg |
| T14 | 37.49 ± 0.66 a | 19.66 ± 0.04 hi | 43.15 ± 2.55 bcde |
| T15 | 29.83 ± 0.23 g | 20.22 ± 2.31 hi | 42.21 ± 0.00 b |

51.60 mg/g，比 CK（33.03 mg/g）增加 18.57 mg/g，为 CK 的 1.56 倍。其次为 T11 处理组，根淀粉含量为 50.44 mg/g，比 CK 增加 17.41 mg/g，为 CK 的 1.53 倍。

#### 2.3.2　施肥对闽楠苗可溶性糖含量的影响

从表 5 可以看出，T9 处理组叶可溶性糖含量最高，为 77.88 mg/g，比 CK（61.66 mg/g）增加 16.22 mg/g，为 CK 的 1.26 倍。其次为 T10 处理组，叶可溶性糖含量为 77.73 mg/g，比 CK 增加 16.07 mg/g，为 CK 的 1.26 倍。T8 处理组枝可溶性糖含量最高，为 51.77 mg/g，比 CK（32.57 mg/g）增加 19.20 mg/g，为 CK 的 1.59 倍。其次为 T11 处理组，枝可溶性糖含量为 50.49 mg/g，比 CK 增加 17.92 mg/g，为 CK 的 1.55 倍。T11 处理组根可溶性糖含量最高，为 52.59 mg/g，比 CK（33.05 mg/g）增加 19.54 mg/g，为 CK 的 1.59 倍。其次为 T4 处理组，根可溶性糖含量为 47.89 mg/g，比 CK 增加 14.84 mg/g，为 CK 的 1.45 倍。

表 5　施肥对闽楠苗各部位可溶性糖含量的影响

**Table 5　Effect of fertilization on soluble sugar content in each part of *Phoebe bournei* seedlings**　　mg/g

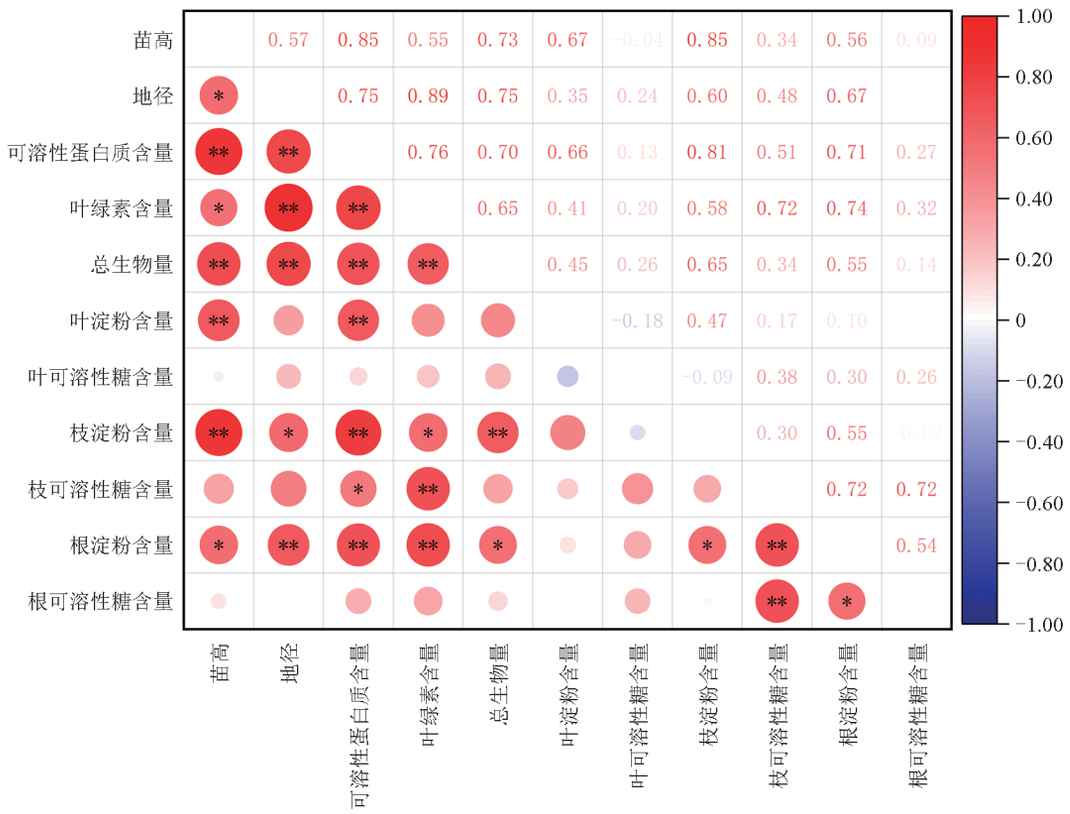
| 处理组 Treatment | 叶可溶性糖含量 Leaf soluble sugar content | 枝可溶性糖含量 Branch soluble sugar content | 根可溶性糖含量 Root soluble sugar content |
|---|---|---|---|
| CK | 61.66 ± 2.76 de | 32.57 ± 1.32 f | 33.05 ± 1.47 g |
| T1 | 66.87 ± 2.84 bcde | 43.35 ± 0 cdef | 47.03 ±1.44 abcde |
| T2 | 66.48 ± 1.43 cde | 44.62 ± 2.68 abcdef | 44.15 ± 0.74 cdef |
| T3 | 68.25 ± 6.86 bcde | 45.65 ± 2.25 abcdef | 44.56 ± 0.6 cdef |
| T4 | 69.97 ± 3.05 abcde | 47.5 ± 1.19 abcdef | 47.89 ± 5.61 bcdef |
| T5 | 64.25 ± 3.49 de | 43.84 ± 2.76 def | 40.05 ± 0.34 efg |
| T6 | 63.98 ± 0.28 e | 45.51 ± 1.12 bcdef | 41.34 ± 1.53 defg |
| T7 | 70.98 ± 5.87 abc | 46.64 ± 1.61 abcdef | 41.18 ± 1.28 fg |
| T8 | 65.4 ± 0.93 cde | 51.77 ± 0.71 a | 42.92 ± 5.63 abcd |
| T9 | 77.88 ± 3.18 ab | 49.86 ± 1.3 ab | 47.45 ±1.69 abcde |
| T10 | 77.73 ± 4.4 a | 45.57 ± 0.48 bcdef | 42.28 ± 0.39 defg |
| T11 | 63.84 ± 0.03 e | 50.49 ± 1.26 abc | 52.59 ± 0.33 a |
| T12 | 71.57 ± 1.34 abcd | 45.32 ± 0.76 bcdef | 44.54 ± 1.5 cdef |
| T13 | 69.79 ± 5.94 cde | 45.32 ± 1.61 bcdef | 39.66 ± 0.9 fg |
| T14 | 69.87 ± 2.23 abcde | 45.79 ± 0.59 bcdef | 45.84 ±2.77 abcdef |
| T15 | 63.53 ± 0.37 e | 43.58 ± 1.74 ef | 42.78 ± 0.09 defg |

### 2.4　相关性分析

如图 5 所示，苗高、地径、可溶性蛋白质含量、叶绿素含量、生物量与 NSC 含量之间存在相关性。苗高与可溶性蛋白质含量、总生物量和枝淀粉含量呈极显著正相关（$P < 0.01$），与地径、叶绿素含量、根淀粉含量呈显著正相关（$P < 0.05$）。地径与可溶性蛋白质含量、叶绿素含量、总生物量、根淀粉含量呈极显著正相关（$P < 0.01$），与枝淀粉含量呈显著正相关（$P < 0.05$）。可溶性蛋白质含量与叶绿素含量、总生物量、叶淀粉含量、枝淀粉含量、根淀粉含量呈极显著正相关（$P < 0.01$），与枝可溶性糖含量呈显著正相关（$P < 0.05$）。叶绿素含量与生物量、枝可溶性糖含量、根淀粉含量呈极显著正相关（$P < 0.01$）。总生物量与枝淀粉含量呈极显著正相关（$P < 0.01$），与根淀粉含量呈显著正相关（$P < 0.05$）。枝淀粉含量与根淀粉含量呈显著正相关（$P < 0.05$）。枝可溶性糖含量与根淀粉含量、根可溶性糖含量呈极显著正相关（$P < 0.01$）。根淀粉含量与根可溶性糖含量呈显著正相关（$P < 0.05$）。

### 2.5　主体间效益分析

主体间效益分析结果显示（表 6），复合肥对苗高、地径、总生物量、苗木质量、可溶性蛋白质含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量、叶淀粉含量、枝淀粉含量、根淀粉含量、枝可溶性糖含量及根可溶性糖含量均产生极显著影响（$P < 0.01$），是促进苗木生长和品质提升的关键因素。生物菌肥对苗高、地径、总生物量、苗木质量、可溶性蛋白质含量、总叶绿素含量、叶淀粉含量、枝淀粉含量及根可溶性糖含量存在显著或极显著影响，但整体效应弱于复合肥。复合肥和生物菌肥的交互作用对苗高、地径、总生物量、苗木质量、可溶性蛋白质含量、叶绿素 b 含量、枝淀粉含量、根淀粉含量、叶可溶性糖含




* 表示 $P < 0.05$，.** 表示 $P < 0.01$。* indicates $P < 0.05$, and ** indicates $P < 0.01$.

**图 5 施肥后闽楠苗各指标相关性分析**

**Fig. 5 Correlation analysis of various indexes of *Phoebe bournei* seedlings after fertilization**

量、枝可溶性糖含量及根可溶性糖含量均产生显著或极显著作用，表明复合肥和生物菌肥配施能够产生协同效应，显著提升闽楠苗的生长、生理特性及非结构性碳水化合物的积累。

## 3 讨 论

在本试验中，施肥处理组的生长、生理指标以及各器官 NSC 含量整体都优于对照组（CK），其中 T6、T7 和 T8 处理组表现最佳。T6 处理组苗高增长量为 CK 的 1.9 倍，地径增长量较 CK 显著提升。这表明复合肥与生物菌肥在一定范围内具有协同促进效应，能够显著提高闽楠苗的生长表现，这一结果与郭艳兰等 [13] 对黑比诺葡萄的组合施肥试验结果相近。从机理上分析，复合肥主要通过提高土壤氮素水平，促进苗木体内可溶性蛋白质和叶绿素合成，进而提高光合速率和光合效率，最终强化“源”的供给能力 [14-15]。这符合碳氮平衡理论的解释，即适度的氮素供给能够改善碳氮关系，促进碳同化产物的积累和分配 [16-17]。例如 T7 与 T3 的对比结果显示，中肥处理组可显著提升苗高、地径及叶绿素含量，同时提升可溶性蛋白质含量，从而为光合产物的积累奠定养分基础。较高的叶绿素含量增强了闽楠苗叶片的光合能力，为苗高和地径的增长提供了足量的营养供应，并使苗木的生物量积累得以增加 [18-20]。

研究结果表明，生物菌肥对根、枝 NSC 含量的提升尤为显著。在本试验中，T1 和 CK 均不施用复合肥，T1 施用 5 g 生物菌肥，CK 不施用生物菌肥。T1 与 CK 相比，枝淀粉含量、根淀粉含量、枝可溶性糖含量和根可溶性糖含量分别增加 14.68%、86.69%、33.10% 和 42.30%。其机理可能在于生物菌肥中的芽孢杆菌、木霉菌、乳酸菌等微生物能够分解有机质、释放养分、改善土壤理化性质，进而优化根际微生态环境，提升碳同化产物向地下器官的分配与储存效率。生物菌肥有效提高了根系活性，使根、枝获得了更强的功能，从而促进根和枝 NSC 的积累 [21-23]。

此外，低肥组（T1 ～ T5）、中肥组（T6 ～ T10）和高肥组（T11 ～ T15）之间表现出明显的生长差异性。中肥组效果最优，低肥组次之，高肥组反而略低。这一结果表明，中量复合肥与中高量生物菌肥的组合能够达成平衡，在维持光合产物生成与 NSC 积累的过程中实现苗木整体的动态协调。这与最小因子定律及养分平衡理论相契合：养分并非越多越好，过量氮素会导致养分失衡，进而削弱根际活力 [24]。

表 6　主体间效益分析 †
**Table 6　Analysis of inter-subject benefits**

| 性状 Character | 肥种 Fertilizer type | 平方和 Square sum | 均方 Mean square | *F* 值 *F* value |
|---|---|---|---|---|
| 苗高 Seedling height | 复合肥 | 403.942 | 134.647 | 38.427** |
| | 生物菌肥 | 134.617 | 44.872 | 12.806** |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 196.892 | 21.877 | 6.243** |
| 地径 Ground diameter | 复合肥 | 15.526 | 5.175 | 142.932** |
| | 生物菌肥 | 1.451 | 0.484 | 13.359** |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 8.128 | 0.903 | 24.943** |
| 总生物量 Total biomass | 复合肥 | 2062.24 | 687.413 | 354.739** |
| | 生物菌肥 | 133.064 | 44.355 | 22.889** |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 737.950 | 81.994 | 42.313** |
| 苗木质量 Seedling quality | 复合肥 | 30.661 | 10.22 | 78.714** |
| | 生物菌肥 | 4.354 | 1.451 | 11.177** |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 23.909 | 2.657 | 20.460** |
| 可溶性蛋白质含量 Soluble protein content | 复合肥 | 4.677 | 1.559 | 46.953** |
| | 生物菌肥 | 0.990 | 0.330 | 9.941** |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 3.826 | 0.425 | 12.802** |
| 叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content | 复合肥 | 0.216 | 0.072 | 14.255** |
| | 生物菌肥 | 0.074 | 0.025 | 4.880 |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 0.062 | 0.007 | 1.352 |
| 叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content | 复合肥 | 0.051 | 0.017 | 11.97** |
| | 生物菌肥 | 0.015 | 0.005 | 3.621 |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 0.058 | 0.006 | 4.504** |
| 总叶绿素含量 Total chlorophyll content | 复合肥 | 0.463 | 0.154 | 26.091** |
| | 生物菌肥 | 0.129 | 0.043 | 7.272** |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 0.174 | 0.019 | 3.266 |
| 叶淀粉含量 Leaf starch content | 复合肥 | 394.520 | 131.507 | 17.800** |
| | 生物菌肥 | 84.047 | 28.016 | 3.792* |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 397.741 | 44.193 | 5.982 |
| 枝淀粉含量 Branch starch content | 复合肥 | 62.005 | 20.668 | 7.680** |
| | 生物菌肥 | 43.209 | 14.403 | 5.352* |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 267.293 | 29.699 | 11.036** |
| 根淀粉含量 Root starch content | 复合肥 | 415.943 | 138.648 | 14.519** |
| | 生物菌肥 | 73.122 | 24.374 | 2.552 |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 416.800 | 46.311 | 4.850** |
| 叶可溶性糖含量 Leaf soluble sugar content | 复合肥 | 189.986 | 63.329 | 5.242* |
| | 生物菌肥 | 89.534 | 29.845 | 2.470 |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 745.003 | 82.778 | 6.852** |
| 枝可溶性糖含量 Branch soluble sugar content | 复合肥 | 376.972 | 125.657 | 53.774** |
| | 生物菌肥 | 32.077 | 10.692 | 4.576 |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 394.531 | 43.837 | 18.760** |
| 根可溶性糖含量 Root soluble sugar content | 复合肥 | 125.021 | 41.674 | 7.733** |
| | 生物菌肥 | 61.297 | 20.432 | 3.791* |
| | 复合肥 + 生物菌肥 | 672.093 | 74.677 | 13.857** |

† * 表示 $P < 0.05$，** 表示 $P < 0.01$。* indicates $P < 0.05$, and ** indicates $P < 0.01$.

高肥处理组的苗高、地径及 NSC 含量整体低于低肥组，其原因可能在于过量复合肥在根部诱发了高肥胁迫，导致根系活力下降，同时维持细胞低水势的代谢成本增加。植物为维持根毛区的水势平衡和膨压，不得不消耗更多的可溶性糖，从而降低糖向淀粉的转化与积累效率，最终影响苗木的生长和碳水化合物储存，进而使得植物在逆境生理中倾向于将碳分配优先用于维持生存而非储存 [25]，这一结果与雷娇娇等 [26] 利用长枝木霉菌开展的闽楠苗施肥试验结果相似。高肥组闽楠苗需在叶片合成的可溶性糖满足苗木机体需求后仍有足量盈余，才会将较高水平的过剩产物以淀

粉形式储存于叶、枝、根中[27-28]，否则便会将光合产物用于维持基础代谢。

综上所述，复合肥与生物菌肥的适量配施不仅能提高光合能力和氮素利用效率，还能改善根际微生态，强化源 - 库关系，从而显著促进苗木生长和 NSC 积累。但当施肥水平过高时，碳氮平衡被打破，苗木将光合产物主要用以维持水分代谢，导致光合产物分配异常和储存不足，最终抑制生长。这为闽楠苗施肥模式的优化提供了理论依据与实践参考[29-30]。

## 4 结 论

研究结果表明，复合肥与生物菌肥配合施用显著促进了 2 年生闽楠苗的生长，其中 T6（4 g 复合肥 +10 g 生物菌肥）处理组效果最佳，T6 处理组苗高增长量为不施肥对照组（CK）的 1.91 倍；其次为 T7（4 g 复合肥 +20 g 生物菌肥），T7 的苗高增长量为 CK 的 1.81 倍。同时，T6 处理组的地径增长量和总生物量与 CK 相比同样存在极显著差异。本研究推荐施用 4 ～ 8 g 复合肥配合 10 ～ 20 g 生物菌肥，该配施方案能最有效地促进 2 年生闽楠苗的快速生长与非结构性碳水化合物的积累。

## 参考文献：


[1] 魏丽娜 . 氮磷施肥对水曲柳幼树光合特性和各器官非结构性碳的影响 [D]. 哈尔滨 : 东北林业大学 ,2021:5.
Wei L N. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrate of various organs in *Fraxinus mandshurica* sapling[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2021:5.

[2] 杨志坚 . 施肥对闽楠幼苗养分利用及土壤微生物的影响 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2021:17.
Yang Z J. Effect of fertilization on nutrients utilization and soil microorganism of *Phoebe bournei* seedlings[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2021:17.

[3] 邹宇星 . 氮磷添加对刨花楠混交林林木生长及叶片主要性状的影响 [D]. 福州 : 福建师范大学 ,2019:1.
Zou Y X. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the growth and leaf main trait of *Machilus pauhoi* in a mixed forest[D]. Fuzhou: Fujian Normal University,2019:1.

[4] 薛磊 , 凡莉莉 , 李云鸽 , 等 . 生物菌肥不同施用量对鼓节竹发笋期生长和光合特性的影响 [J]. 热带作物学报 ,2018,39(7):1332-1337.
Xue L, Fan L L, Li Y G, et al. Effects of different application rates of biological bacteria fertilizer on growth and photosynthetic characteristics of *Bambusa tuldoides* during shooting period[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2018,39(7):1332-1337.

[5] 彭守华 , 许铭铭 , 尉继强 , 等 . 生物菌肥 FBR1 不同施用方式对花生生长发育及产量的影响 [J]. 中国农业科技导报 , 2024,26(6):200-205.
Peng S H, Xu M M, Wei J Q, et al. Effects of increase applying of biofertilizer strain FBR1 on growth development and yield of peanut[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2024, 26(6):200-205.

[6] 蒋林沛 . 复合肥与生物菌肥配施对欧李生长发育的影响 [D]. 长春 : 吉林农业大学 ,2023:36.
Jiang L P. Effects of compound fertilizer and biological fertilizer on the growth and development of *Cerasus humilis*[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2023:36.

[7] 祝丹 . 复合微生物肥料对燕麦的促生效果研究 [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨师范大学 ,2022:69.
Zhu D. Study on growth promoting effect of compound microbial fertilizer on oat[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022:69.

[8] 王佳 , 李明聪 . 微生物菌肥在植物减肥增效中的应用研究进展 : 以果树为例 [J]. 微生物学通报 ,2024,51(11):4394-4415.
Wang J, Li M C. Research progress in the application of microbial fertilizers in chemical fertilizer reduction and efficiency increase in orcharding[J]. Microbiology China,2024,51(11): 4394-4415.

[9] 金珊 , 刘雪 , 陈卓帛 , 等 . 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果 [J]. 农业环境科学学报 ,2023,42(9):1995-2003.
Jin S, Liu X, Chen Z B, et al. Effects of organic fertilizer containing biofertilizer on soil improvement of vegetables in facilities[J]. Journal of Agro-Environment Science,2023,42(9): 1995-2003.

[10] 李玮晔 , 林榆 , 陈志强 , 等 . 微生物菌肥对芒萁生理特性的影响 [J]. 热带农业科学 ,2023,43(11):12-17.
Li W Y, Lin Y, Chen Z Q, et al. Effect of microbial fertilizers on physiological characteristics of *Dicranopteris pedata*[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2023,43(11):12-17.

[11] 马杰 , 赵姣 , 万盛英 , 等 . 柠檬醛型樟枝叶非结构性碳水化合物含量动态特征及调配关系 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2025,45(12):65-74.
Ma J, Zhao J, Wan S Y, et al. Dynamic characteristics and allocation relationships of leaf and branch non-structural carbohydrate content in citral type of *Cinnamomum camphora*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(12):65-74.

[12] 陈铁石 , 王韶水 , 赵玉卓 , 等 . 氮磷及生物菌肥配施对 1.5 代园樟子松生长和生理特性的影响 [J]. 辽宁林业科技 ,2024(2): 5-9.
Chen T S, Wang S S, Zhao Y Z, et al. Effects of nitrogen and phosphorus combined with biological fertilizer on growth and physiological characteristics of 1.5 generation *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation[J]. Liaoning Forestry Science & Technology, 2024(2):5-9.

[13] 郭艳兰 , 牟德生 , 张勤德 , 等 . 化肥减量配施不同用量微生物菌肥对黑比诺葡萄生长、品质及土壤肥力的影响 [J]. 江苏农业学报 ,2023,39(9):1938-1944.
Guo Y L, Mou D S, Zhang Q D, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with microbial fertilizer on growth, quality and soil fertility of Pinot Noir grape[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2023,39(9):1938-1944.

[14] De Sales R A, Rossini F P, Galvão E R, et al. Growth and physiological parameters in conilon coffee seedlings fertilized through foliar application of tannery sludge[J]. Plant Physiology Reports,2021,26(4):722-728.

[15] Przemieniecki S W, Kosewska A, Purwin C, et al. Biometric, chemical, and microbiological evaluation of common wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings fertilized with mealworm (*Tenebrio molitor* L.) larvae meal[J]. Applied Soil Ecology,2021, 167:104037.

[16] 杨志坚 , 冯金玲 , 吴小慧 , 等 . 氮磷钾施肥对闽楠幼苗营养元素吸收与利用的影响 [J]. 生态学杂志 ,2021,40(4):998-1011.
Yang Z J, Feng J L, Wu X H, et al. Effects of N, P, and K fertilization on nutrient uptakes and utilizations of *Phoebe bournei* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(4): 998-1011.

[17] 王晓 , 王樱琳 , 韦小丽 , 等 . 不同指数施氮量对闽楠幼苗生长生理及养分积累的影响 [J]. 浙江农林大学学报 ,2020,37(3): 514-521.
Wang X, Wang Y L, Wei X L, et al. Growth, physiology and nutrient accumulation of *Phoebe bournei* seedlings under different amount of exponential nitrogen fertilization[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2020,37(3):514-521.

[18] 王丽云 , 喻龙华 , 陈家堂 , 等 . 土壤、光照和 NAA 对闽楠生长和植株构型的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(7): 23-31.
Wang L Y, Yu L H, Chen J T, et al. Effects of soil, light and NAA on the growth and configuration of *Phoebe bournei*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(7):23-31.

[19] Angay O, Fleischmann F, Recht S, et al. Sweets for the foe-effects of nonstructural carbohydrates on the susceptibility of *Quercus robur* against *Phytophthora quercina*[J]. New Phytologist, 2014,203:1282-1290.

[20] He W Q, Liu H Y, Qi Y, et al. Patterns in nonstructural carbohydrate contents at the tree organ level in response to drought duration[J]. Global Change Biology,2020,26:3627-3638.

[21] 梅惠敏 . 滨海盐碱地枸杞施用木霉菌肥的效果及机理 [D]. 沈阳 : 辽宁大学 ,2022:31.
Mei H M. Effects and mechanism of *Trichoderma* fertilizer applied to Chinese wolfberry (*Lycium chinense*) in coastal saline-alkali land[D]. Shenyang: Liaoning University,2022:31.

[22] Dong R K, Li N, Li M H, et al. Carbon allocation in *Picea jezoensis*: adaptation strategies of a non-treeline species at its upper elevation limit[J]. Forest Ecosystems,2024,11:100188.

[23] Yang Q P, Zhang W D, Li R S, et al. Different responses of non-structural carbohydrates in above-ground tissues/organs and root to extreme drought and re-watering in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) saplings[J]. Trees,2016,30(5): 1863-1871.

[24] 王妍 , 冯金玲 , 吴小慧 , 等 . 施肥对闽楠根系形态及苗木质量的调控作用 [J]. 西北农林科技大学学报 ( 自然科学版 ), 2022,50(10):44-56.
Wang Y, Feng J L, Wu X H, et al. Effects of fertilization on root morphology and seedling quality of *Phoebe bournei*[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022,50(10):44-56.

[25] 毛子军 , 贾桂梅 , 刘林馨 , 等 . 温度增高、$CO_2$ 浓度升高、施氮对蒙古栎幼苗非结构碳水化合物积累及其分配的综合影响 [J]. 植物生态学报 ,2010,34(10):1174-1184.
Mao Z J, Jia G M, Liu L X, et al. Combined effects of elevated temperature, elevated $CO_2$ and nitrogen supply on non-structural carbohydrate accumulation and allocation in *Quercus mongolica* seedlings[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(10): 1174-1184.

[26] 雷娇娇 , 于存 , 田力 , 等 . 长枝木霉菌肥优化及其对闽楠幼苗生长、生理及土壤养分的影响 [J]. 生态学杂志 ,2022, 41(3):473-478.
Lei J J, Yu C, Tian L, et al. Optimization of *Trichoderma longibrachiatum* biological fertilizer and its effects on growth, physiology and soil nutrients of *Phoebe bournei* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(3):473-478.

[27] 潘俊峰 , 王博 , 崔克辉 , 等 . 氮肥对水稻节间和叶鞘非结构性碳水化合物积累转运特征的影响 [J]. 中国水稻科学 ,2016, 30(3):273-282.
Pan J F, Wang B, Cui K H, et al. Effects of nitrogen application on accumulation and translocation of nonstructural carbohydrates in internodes and sheaths of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2016,30(3):273-282.

[28] 陈平 , 王小东 , 涂白连 , 等 . 氮磷耦合对樟树幼苗根叶功能性状的影响 [J]. 西南林业大学学报 ( 自然科学 ),2025,45(4): 32-39.
Chen P, Wang X D, Tu B L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus coupling on root and leaf functional traits of *Cinnamomum camphora*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2025,45(4):32-39.

[29] Yu D P, Wang Q W, Liu J Q, et al. Formation mechanisms of the alpine Erman's birch (*Betula ermanii*) treeline on Changbai mountain in northeast China[J]. Trees,2014,28:935-947.

[30] Simard S, Giovannelli A, Treydte K, et al. Intra-annual dynamics of non-structural carbohydrates in the cambium of mature conifer trees reflects radial growth demands[J]. Tree Physiology, 2013,33:913-923.

[ 本文编校：戴欧琳 ]