

氮肥对芳樟幼苗生长、光合特性及叶精油产量的影响

董恩元¹, 章挺^{1,2}, 伍艳芳², 张月婷², 刘新亮^{2*}

(1. 江西农业大学林学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省林业科学院, 国家林业草原樟树工程技术研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】为探究不同氮肥(N)水平对芳樟幼苗生长、光合特性和叶精油质量的影响, 确定最适宜芳樟幼苗生长的氮肥施用量, 为芳樟工业原料林定向培育和优质高效栽培提供理论依据。【方法】以2年生芳樟幼苗为研究对象, 采用单因素随机试验, 设置不同用量的N肥及不施肥空白对照CK, 分析施肥对芳樟幼苗生长、光合特性及叶精油含量的影响。【结果】(1) N肥能显著提高芳樟幼苗苗高、地径净生长量、根、茎、叶及全株生物量($P<0.05$), 且随着N肥施用量的增加, 苗高、地径的净生长量表现出先增加后减小的趋势。(2) N肥处理后叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(g_s)、蒸腾速率(Tr)、水分利用效率(WUE)、表观量子效率(AQY)、最大净光合速率(P_{max})、光饱和点(I_{sp})、光补偿点(I_{cp})、暗呼吸速率(R_d)和叶绿素含量均有不同程度的增加, 表明适量施用氮肥可以提高芳樟幼苗的光合能力, 但过量或不足均不利于幼苗生长。(3) 不同施肥处理对叶精油的得油率影响不显著, 但能显著提高叶片芳樟醇产量($P<0.05$)。(4) 相关性分析结果表明, 芳樟醇产量与AQY、P_{max}、L_{sp}、R_d呈显著正相关, 与C_i呈显著负相关($P<0.05$)。(5) 将芳樟幼苗生长指标及芳樟醇产量与N施用量的关系拟合成一元二次回归方程, 得出芳樟幼苗的最佳N肥施用量应为6.44~7.73 g/株。

关键词: N肥; 芳樟; 生长; 光合特性; 叶精油

The effect of nitrogen fertilizer on the growth, photosynthetic characteristics, and essential oil of linalool type of *Cinnamomum camphora*

Dong Enyuan¹, Zhang Ting^{1,2}, Zhang Yueting², Wu Qiaohua², Liu Xinliang^{2*}, Tang Ming¹

(1. College of forestry in Jiangxi Agricultural University, Nanchang 33001, Jiangxi)

(2. Camphor Engineering and Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330013, Jiangxi)

Abstract: 【Objective】 This study is aimed to study the effects of different levels of nitrogen fertilizer (N) on the growth, photosynthetic characteristics and leaf essential oil quality of linalool type of *C. camphora*, and to determine the most suitable amount of nitrogen fertilizer application for the seedling's growth of Aromatic camphor seedlings, and to provide a theoretical basis for the oriented cultivation of Aromatic camphor industrial raw material forests and high-quality and high-efficiency cultivation. 【Method】 2-year-old linalool type of *C. camphora* cuttings were used as the research materials, and a one-way randomized test was used to analyze the effects of different N fertilizer on the growth, photosynthetic characteristics and leaf essential oil content of *C. camphora*. 【Result】: (1) N fertilizer could significantly increase the growth of height, ground diameter, and the biomass of whole plant, roots, stems and leaves of linalool type of *C. camphora* ($P<0.05$). With the increasing of N fertilizer application, the net growth of seedling height and ground diameter showed a increasing firstly and then decreasing trend. (2) The net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (g_s), transpiration rate (Tr), water use efficiency (WUE), apparent quantum efficiency (AQY), maximum net photosynthetic rate (P_{max}), light saturation point (I_{sp}), light compensation point (I_{cp}), rate of dark respiration (R_d), and chlorophyll content of the leaves after N fertilization were increased with different degrees, indicating that moderate application of N fertilizer could improve the

基金项目: 江西省林业科学院基础研究与人才科研专项项目(2023522702)。

第一作者: 董恩元(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事芳香工业原料林开发利用研究, Email: dongenyuanl@163.com

通信作者: 刘新亮(1986-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事森林培育与育种工作。Email: green-seed@foxmail.com。

photosynthetic capacity of linalool type of *C.camphora*, but excessive or insufficient supplement was adverse to plant growth. (3) The effect of different fertilization treatments on the oil yield of leaf essential oil was not significant, but N supplement could significantly increase the linalool yield of leaves ($P<0.05$). (4) The results of correlation analysis showed that linalool yield was significantly positively correlated with AQY, Pmax, Lsp and Rd, and significantly negatively correlated with Ci ($P<0.05$). (5) The relationship between the growth indexes and linalool production and N application rate of linalool type of *C.camphora* was synthesized into a quadratic regression equation, which showed the optimal N fertilizer application rat was 6.44~7.73 g/plant.

Keywords: N fertilizer; Linalool type of *C.camphora*; Growth; Photosynthetic characteristics; Leaf essential oil

樟树 (*Cinnamomum camphora*), 又名香樟, 樟科植物的典型代表, 在香料、化工、药用、食品、材用和生态等领域被广泛应用 (金志农等, 2020; 郭兰萍等, 2008)。根据叶精油的主成分相对含量, 将樟树分为芳樟醇型 (Linalool, 主含芳樟醇)、异橙花叔醇型 (Iso-nerolidol, 主含异橙花叔醇)、桉油素型 (Cineol, 主含 1,8-桉叶油素)、龙脑型 (Borneol, 主含右旋龙脑) 和樟脑型 (Camphor, 主含樟脑) 5 种化学型 (石皖阳等, 1989)。生产中通常将主含芳樟醇的樟树称为芳樟, 其叶是天然芳樟醇的主要来源, 作为目前世界上应用最广、用量最大的香料之一, 市场需求量巨大 (陈尚钐等, 2013)。芳樟工业原料林主要采用优良无性系人工矮林作业的方式经营, 但随着林业结构优化调整、生产技术的不断提高, 原料林出现了树种单一、优良无性系退化等问题, 此外地上部分的砍伐利用带走了大量的有机物质, 土壤中某些营养元素会出现不足或失去平衡, 使林分生产力下降, 因此, 施肥成为恢复土壤肥力的有效途径之一 (赵娇, 2021; 肖祖飞等, 2021; 罗仙英等, 2022)。

樟树对土壤养分变化反应较敏感, 在各项培育技术措施中, 施肥的效果尤为显著 (刘新亮等, 2020)。目前有关施肥对樟树的影响多集中于生长及光合作用 (陈宇琳等, 2024; 朱昌叁等, 2020)。关于大量元素添加对不同化学型叶精油产量及质量的研究较少, 芳樟需肥规律与叶精油质量相互关系尚不明确。已有研究表明, 芳樟叶精油含量与所添加的不同营养元素之间存在显著的相关性 (陈晓明等, 2012)。因此, 本研究采用盆栽法开展芳樟幼苗的 N 肥添加试验, 并观测其生物量、光合特性及叶精油产量相关数据, 探究不同梯度处理对芳樟幼苗生物量积累规律和叶精油品质的影响, 利用回归方程计算出最佳氮素施肥量, 为生产上芳樟工业原料林的定向培育和优质高效栽培提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验在江西省林业科学院大棚内进行 (28°44'N, 115°49'E), 棚内平均气温为 22~27.9 °C, 通风良好, 日照充足, 水量充沛。供试幼苗为同一无性系, 母树是江西省林科院选育的芳樟优良单株‘赣芳2号’; 其叶精油质量分数和芳樟醇相对含量分别为 1.39% 和 86.71%。选取长势至迅速期的 2 年生长, 健康、个体均匀的扦插苗移植于 3 加仑塑料盆中, 基质为淘净河沙, 每盆 1 株, 盆下配有托盘防止养分流失。

1.2 试验设计

以前期研究为基础, 采用单因素随机试验设计, 设置 4 个不同氮 (N) 肥添加水平, 以不施肥空白对照 (CK) 共 5 个处理, 每个处理 10 株幼苗, 重复 3 次。2023 年 4 月中旬开始试验, 6 月、7 月、8 月中旬各追肥 1 次。为避免单因素施肥时其他肥料成为限制因素, 在施肥时, 只设置 P 肥的处理, 每个单因素的各处理均配施一定量的其他肥料。施肥水平见表 1。

表1. 单因素完全随机试验肥料处理水平
Tab. 1 Single-factor completely randomized trial of fertilizer treatment level

肥料种类	施肥水平				
	Fertilization level/g·株 ⁻¹				
Fertilizer	对照	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
尿素 Urea	0	2	4	6	8

注: *水平3为改良Hoagland营养液中P离子摩尔浓度。
Note: * Level 3 was the molar concentration of P ions in the modified Hoagland nutrient solution.

1.3 试验方法

1.3.1 生长指标的测定

钢卷尺测量苗高，电子游标卡尺测量地径。

1.3.2 生物量测定

施肥周期完成后，各处理中随机选取 6 株，进行样品采集，取时保持根系完整，整株洗净并晾干表面水分，将根、茎、叶编号然后分开电子秤称鲜重，烘干后称其干重，并计算根冠比等参数。

$$\text{根冠比} = \text{根生物量} / \text{地上部分生物量}$$

1.3.3 光合色素含量的测定

芳樟叶片叶绿素提取参照（杨慧杰等，2017）的方法，通过测定吸光度计算叶绿素含量。

1.3.4 光合参数和光响应曲线的测定

每个处理取 10 片健康向阳叶片进行测定，光合有效辐射（PAR）设置为 $1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 CO_2 摩尔分数、温度与湿度均为自然环境水平。记录胞间 CO_2 浓度（ C_i ）、气孔导度（ g_s ）、净光合速率（ P_n ）和蒸腾速率（ T_r ），并计算叶片的瞬时水分利用效率（WUE）。

$$\text{WUE} = P_n / T_r$$

测定各处理光响应曲线参考（王雪等，2022）的方法。参数计算方法参考（叶子飘等，2008）的光合响应曲线拟合双曲线修正模型。

1.3.5 精油提取及精油含量的测定

采集各处理每棵供试植株中部成熟叶片，混合均匀，称取 30 g，采用回流式水蒸汽蒸馏法从供试植株鲜叶中提取精油，重复三次消除误差。无水硫酸钠去除水分后以质量分数计算叶精油的得率，计算方法为：

$$\text{叶精油得率}(\%) = \text{蒸馏获得的精油重量}(\text{g}) / \text{叶鲜重}(\text{g}) \times 100\%$$

采用气相色谱（GC）方法检测提取叶精油的主成分芳樟醇含量。具体分析条件参照（胡文杰等，2012）的方法。精油中芳樟醇的相对含量采用峰面积归一化法计算，不考虑不同成分的响应值差异。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据初步处理汇总，并采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析和显著性检验，显著性水平设为（ $P=0.05$ ）。运用 Uniform Design Version 3.00 软件拟合测量指标与施肥量间的一元二次方程回归方程，运用 Excel 对回归方程进行规划求解。Origin2023 软件作图。

2 结果与分析

2.1 氮肥对芳樟幼苗生长的影响

2.1.1 氮肥对芳樟幼苗苗高的影响

氮肥处理对芳樟幼苗苗高净生长的影响如图 1 所示。施肥处理可明显提高苗高净生长量，随着 N 肥施用量的增加，各处理间苗高净生长表现出先增加后减小的趋势均显著高于 CK（ $P<0.05$ ），最大值在 N3 条件下，达到了 74.0 cm，较与 CK 增长了 112%。N4 处理显著低于 N3 处理，但显著高于 CK 和 N1 处理（ $P<0.05$ ）。说明，施用 N 肥过量后对芳樟幼苗苗高生长促进作用会减弱。

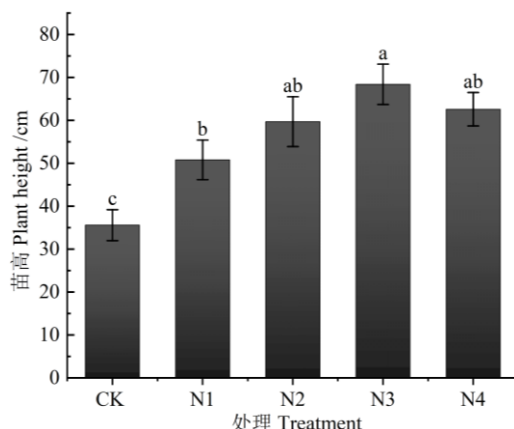


图 1. 不同氮肥水平芳樟幼苗苗高净生长量

Fig. 1 Net growth of seedling height of linalool type of *C. camphora* with different levels of nitrogen fertilization

注：图柱上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同
Note: Different lowercase in same column indicate significant differences between treatments at the $P<0.05$ level.

2.1.2 氮肥对芳樟幼苗地径的影响

施氮肥显著提高了芳樟幼苗地径净生长量（图 2 所示）。各处理均大于 CK，各处理水平趋势为 N1<N2<N4<N3，N3 条件下，地径净生长量最大，达到了 6.41 mm，分别比 CK、N1、N4 增长了 66.1%、26.7%、1.74%，显著高于 CK、N1 处理，与 N4 间差异不显著（ $P<0.05$ ）。

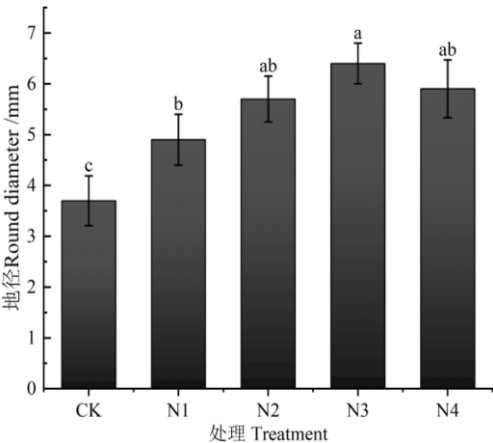


图 2. 不同氮肥水平芳樟幼苗地径生长量

Fig. 2. Ground diameter growth of linalool type of *C. camphora* with different nitrogen fertilization levels

2.1.3 氮肥对芳樟幼苗生物量的影响

由表 2 可以看出。不同 N 处理水平间芳樟幼苗根、茎、叶生物量（干重及鲜重）均与 CK 差异显著（ $P<0.05$ ），其中，根、茎、叶及全株生物量最大值出现在 N3 处理条件下，其中根、茎、叶鲜重相比 CK 分别增加了 59.14%、91.65%、103.5%，根、茎、叶干重比 CK 分别增加了 65.01%、93.19%、105.8%。N4 处理下，芳樟植株生物量较 N3 处理有所降低，说明 N 肥施用量过高不利于芳樟生物量的积累。

表 2 不同氮肥水平下芳樟幼苗生物量

Tab. 2 Biomass of linalool type of *C. camphora* under different levels of nitrogen fertilization

处理 Treat ment	指标 Index/g · 株 ⁻¹								根冠比 Root-sh oot ratio
	根鲜重	茎鲜重	叶鲜	全株	根干	茎干重	叶干	全株干	
	Fresh root	Fresh ste	重	鲜重	重	Shoot	重	重	
	weight	m weight	Fres	Total	Root b	biomass	Leaf b	Total	
			h leaf	fresh	iomass		iomass	biomass	
			weight	weight					
CK	45.38±3.83c	22.17±1.57d	24.77±1.70d	92.31±3.13d	15.55±1.16d	14.85±0.61d	9.820±0.65d	40.23±1.40e	0.63±0.065a
N1	54.06±3.75b	28.65±1.77c	34.12±2.05c	116.83±5.16c	18.29±1.07c	19.50±0.98c	13.85±0.61c	51.64±1.83d	0.55±0.026ab
N2	63.86±5.10a	34.81±1.65b	42.70±2.75b	141.38±2.09b	21.99±2.15b	22.76±1.33b	17.28±1.43b	61.98±0.48c	0.55±0.088ab
N3	72.22±3.51a	42.49±1.41a	50.41±1.13a	165.12±4.72a	25.66±0.91a	28.69±1.29a	20.21±0.34a	74.55±0.85a	0.53±0.033ab
N4	68.88±4.63a	41.95±1.84a	48.28±3.27a	159.10±2.52a	23.92±1.59ab	27.92±0.66a	19.46±1.28a	71.29±0.50b	0.51±0.049b

N 肥处理下芳樟各器官生物量（干重）分配状况结果由表 2 和图 3 所示。不同施 N 肥条件下，根冠比在 0.51~0.55 之间。随着 N 肥施用量的增加，根冠比呈下降趋势，N4 与 CK 间差异显著，与 N1、N2、N3 处理差异不显著（ $P<0.05$ ）。叶和茎占全株重量百分比均呈上升趋势，N4 处理下分别达到 27.45%和 39.09%，远高于 CK 的 24.42 %。可见，N 肥更有利于芳樟茎和叶生物量的积累。

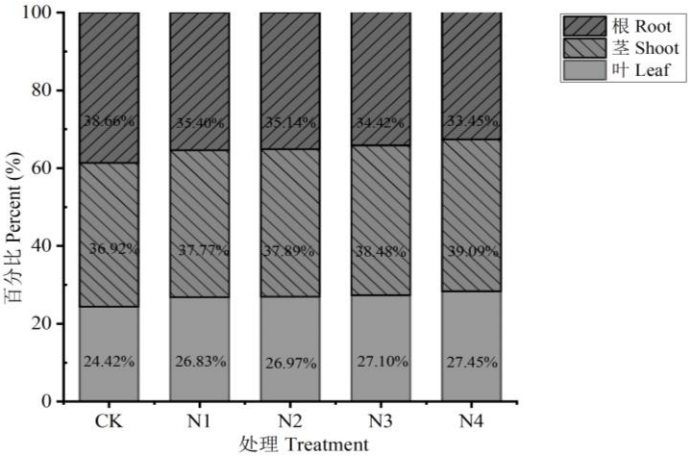


图 3. 不同氮肥水平芳樟幼苗生物量分配

Fig. 3. Biomass allocation of linalool type of *C. camphora* with different nitrogen fertilization levels

2.2 氮肥对芳樟幼苗气体交换参数的影响

2.2.1 氮肥对芳樟幼苗光合色素含量的影响

氮肥对芳樟叶片叶绿素含量的影响如表 3 所示，随着施用 N 肥的增加，叶绿素含量呈上升趋势。相较于 CK，各处理分别提高了 16.31%、22.2%、35.7%、43.55%，与 CK 差异显著（ $P<0.05$ ），其中，叶绿素 b（chl_b）含量与其他 4 组处理分别提高 48.93%、65.17%、99.15%、126.28%，同样与 CK 差异显著（ $P<0.05$ ）。chl_a 的含量与 chl_b 含量相反，chl_a 呈下降趋势，CK 与其余 4 组处理分别降低了 5.86%、6.83%、7.15%、13.01%，差异显著（ $P<0.05$ ）。Chl_a/b 随着浓度的上升呈下降趋势，各个处理均与 CK 有显著差异（ $P<0.05$ ）。说明，氮肥能提高叶片中叶绿素含量，调整 Chl_a 与 Chl_b 比值，叶片更能适应弱光，进而提高芳樟的光合速率。

表 3. 不同氮肥水平芳樟幼苗叶绿素含量

Tab 3. Chlorophyll content of linalool type of *C. camphora* with different nitrogen fertilization levels

处理 Treatment	叶绿素 a (chl _a) (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b(chl _b) (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b(chl _a /b)
CK	0.704±0.0281a	0.468±0.1886c	1.504±0.1490a
N1	0.665±0.0889bc	0.697±0.3584bc	0.954±0.2480b
N2	0.659±0.0389bc	0.773±0.2808ab	0.853±0.1385b
N3	0.657±0.0621bc	0.932±0.3098ab	0.705±0.2005bc
N4	0.623±0.0323b	1.059±0.3023a	0.588±0.1068c

2.2.2 氮肥对芳樟幼苗光合特性的影响

氮肥对芳樟幼苗光合特性的影响如图 4 所示。随着 N 肥施用量的增加，叶片 P_n 呈现上升趋势，相较于 CK，N1~N4 分别提高了 15.54%、18.74%、29.97%、46.43%，CK 与 N3、N4 处理差异显著，与 N1、N2 处理差异未见显著（ $P<0.05$ ）。可见，低 N 和缺 N 处理都会对芳樟叶片 P_n 造成影响。叶片 C_i 与 P_n 两者的变化基本是呈现相反的趋势，与 CK 相比，N1~N4 分别降低了 9.79%，10.08%，11.91%，13.96%，差异达到了显著水平（ $P<0.05$ ）。另外，随着 N 肥施用量的增加，叶片 g_s、Tr、WUE 均呈现上升趋势，在 N4 处理下效果最佳，相较于 CK，g_s、Tr、WUE 提高了 18.87%、17.21%、23.69%，与 CK 处理差异显著，但与其他处理间差异不显著（ $P<0.05$ ）。

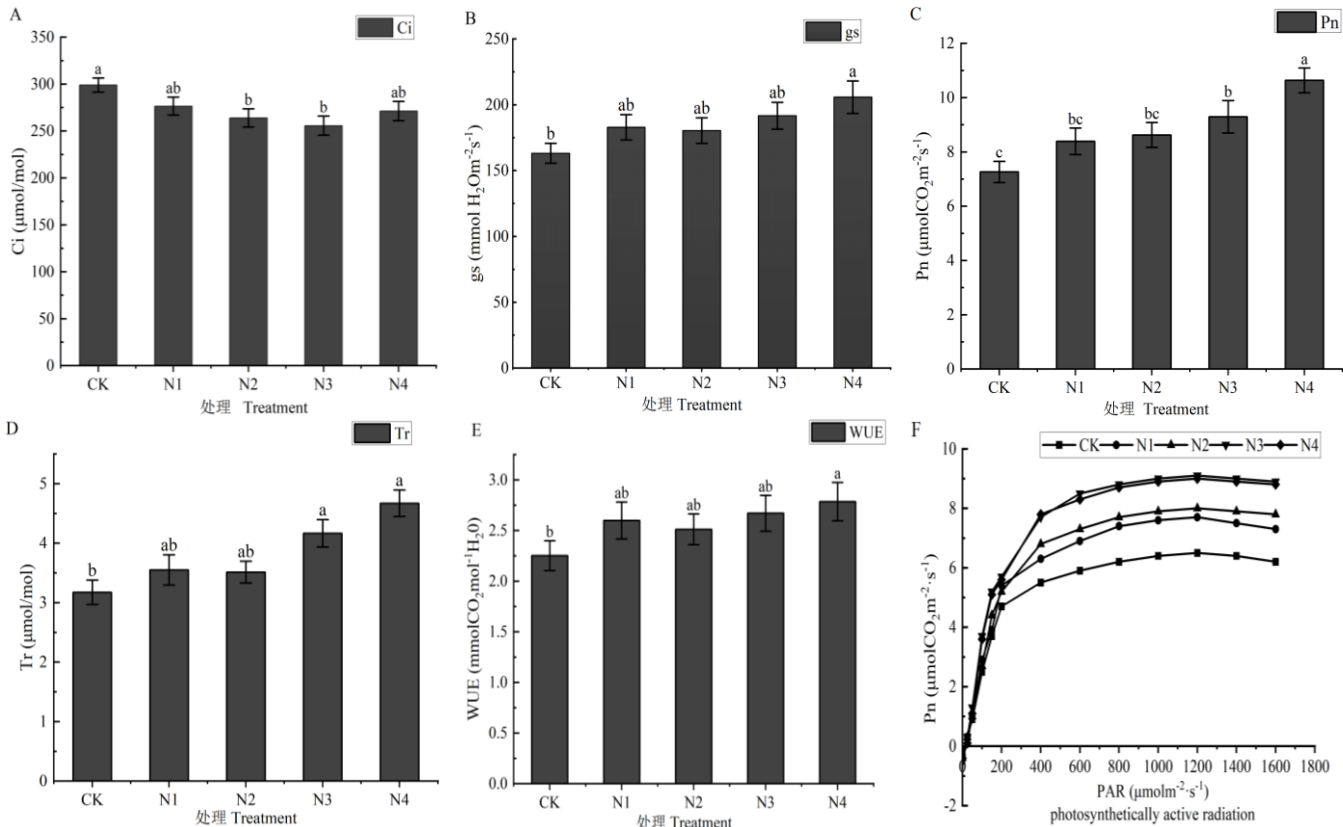


图 4. 不同氮水平下芳樟幼苗光合参数

Fig. 4. Photosynthetic parameters of linalool type of *C. camphora* under different nitrogen levels

由不同 N 肥浓度处理下芳樟幼苗叶片的光合响应拟合曲线（图 4F）可以看出，在光合有效辐射 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下时，净光合速率总体差异不明显，在增加至 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后，各处理均明显高于 CK。光响应曲线特征参数表明（表 4），随着 N 肥浓度的增加，AQY、Pmax、Lsp、Lcp、Rd 均表现出增加的趋势，均与 CK 差异显著（ $P<0.05$ ）。除 Lcp 和 Rd 外，各参数均在 N3 条件下处于最高水平，且显著高于其他处理（ $P<0.05$ ）。因此，施用适量的 N 肥使能明显提高芳樟幼苗的光合能力。

表 4. 不同氮水平下芳樟幼苗光响应曲线特征参数

Table 4. Characteristic parameters of light response curve of linalool type of *C. camphora* under different nitrogen levels

处理	表观量子效率	最大净光合速率	光饱和点	光补偿点	暗呼吸速率
Treatment	AQY	Pmax	Lsp	Lcp	Rd
CK	0.0485±0.003c	6.4272±1.101c	1048.1±232.7c	12.134±2.323c	0.5438±0.082c
N1	0.0523±0.002b	7.5836±0.897b	1062.4±123.3b	13.226±3.376bc	0.6516±0.061b
N2	0.0540±0.002b	7.9743±0.678ab	1094.4±111.1ab	14.787±1.920ab	0.7491±0.086ab
N3	0.0667±0.015a	9.0742±0.546a	1109.2±219.5a	13.947±4.165b	0.8688±0.044ab
N4	0.0643±0.018ab	8.9912±0.980a	1072.3±354.2ab	15.015±5.325a	0.9003±0.038a

2.3 氮肥对芳樟叶精油含量的影响

N 肥对芳樟幼苗叶精油含量的影响如表 5 所示，各处理间得油率经过显著分析并未见显著，但各处理间叶精油芳樟醇相对含量差异显著（ $P<0.05$ ）。N 肥浓度增加，叶精油中芳樟醇相对含量和精油产量表现出先增加后减小的趋势，在 N3 条件下，芳樟醇产量最大，达到了 0.55 mL/株，显著高于 N1 和 CK 处理，与 N2 和 N4 差异不显著（ $P<0.05$ ）。芳樟醇相对含量在 N2 条件下最大 85.60%，显著高于 N4 处理，说明适量 N 肥有利于提高叶精油芳樟醇相对含量，过量施肥则会降低其相对含量。

表 5. 不同氮水平下芳樟叶精油含量

Table .5 Essential oil content of Aromatic camphor leaves under different nitrogen levels

处理 Treatment	精油得率/ % Oil yield	芳樟醇相对含量/ % Relative linalool content	芳樟醇产量/ mL Linalool yield
CK	1.20±0.067a	81.87±1.75ab	0.24±0.028c
N1	1.20±0.067a	85.49±0.79a	0.35±0.039b
N2	1.27±0.067a	85.60±1.18a	0.46±0.057a
N3	1.29±0.077a	85.13±3.18ab	0.55±0.052a
N4	1.22±0.077a	81.29±2.75b	0.48±0.055a

2.4 氮施用量与芳樟生长指标和气体交换参数间的相关性分析

对芳樟幼苗的生长指标和气体交换参数进行相关性分析，结果见表 6。生长指标中苗高与地径、鲜叶重、叶面积、gs、Tr、Lsp 均呈显著正相关（ $P<0.05$ ）。光合指标中 Ci 与 gs、Tr 呈显著正相关，与 Pn、WUE、叶绿素含量、芳樟醇相对含量、芳樟醇产量皆呈显著负相关（ $P<0.05$ ）。chla/b 与 WUE、AQY、Pmax、Lsp、Rd 则呈显著正相关，与苗高、地径、单叶鲜重、叶面积虽然也呈正相关，但相关关系未达到显著水平（ $P<0.05$ ）。芳樟醇产量与精油得率、AQY、Pmax、Lsp、Rd 呈显著正相关（ $P<0.05$ ）。

表 6. 芳樟生长指标及气体交换参数间的相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis between growth indicators and photosynthetic parameters of linalool type of *C. camphor*

处理 Treatment	ci	Gs	Pn	Tr	WUE	叶绿素a Chla	叶绿素b Chlb	叶绿素 a/b chla/b	苗高 Height	地径 Ground diameter	鲜叶重 Fresh leaf weight	叶面积 Leaf area	表观 量子 效率 AQY	最大 光合 效率 Pmax	光饱 和点 Lsp	暗呼吸 速率 Rd	精油 得率 Oil yield	芳樟醇相对 含量 Relative linalool content	芳樟醇 产量 Linalool ol yield
Ci	1	0.442**	-0.594**	0.494**	-0.872**	0.277	-0.428*	-0.397*	0.091	-0.260	0.023	-0.126	-0.042	-0.306	-0.531	-0.192	-0.526	-0.797**	-0.607*
gs		1	0.284	0.879**	-0.263	-0.060	-0.024	-0.035	0.267*	-0.095	0.032	0.189	0.303	0.060	-0.341	0.098	-0.511	-0.725*	-0.454
Pn			1	0.572**	0.806**	-0.296	0.374*	0.338	0.021	0.140	0.090	0.175	0.018	0.235	0.087	0.147	-0.113	0.035	0.063
Tr				1	-0.320	0	-0.117	-0.121	0.251*	-0.125	0.051*	0.097	0.131	-0.083	-0.520	0.016	-0.572	-0.897**	-0.550
WUE					1	-0.275	0.418*	0.387*	-0.145	0.210	0.026	0.092	-0.133	0.132	0.205	0.022	0.227	0.562	0.344
叶绿素 cha						1	-0.322	-0.159	-0.237	-0.062	-0.297	-0.243	0.225	0.072	-0.435	0.132	-0.229	-0.445	-0.165
叶绿素 chb							1	0.986**	0.068	0.077	0.174	0.121	0.963**	0.842*	0.604	0.856*	-0.056	-0.341	0.340
叶绿素 a/b chla/b								1	0.028	0.068	0.129	0.085	0.954*	0.826*	0.568	0.842*	-0.095	-0.400	0.279
苗高 Height									1	0.482**	0.256*	0.435*	0.367	0.662*	0.389	-0.276	-0.327	-0.224	-0.224
地径 Ground diameter										1	0.148	0.075	-0.111	0.164	0.395	0.165	0.114	0.370	0.130
鲜叶重 Fresh leaf weight											1	0.440**	0.380	0.457	-0.001	0.481	-0.465	-0.335	0.121
叶面积 Leaf area												1	0.378	0.362	-0.155	0.395	0.080	-0.170	0.421
表观量子效率 AQY													1	0.955*	0.771*	0.952*	0.592	-0.036	0.893*
最大光合效率 Pmax														1	0.857*	0.984**	0.620	0.132	0.958*
光饱和点 Lsp															1	0.807	0.899*	0.548	0.961**
暗呼吸效率 Rd																1	0.602	-0.005	0.938*
精油得率 Oil yield																	1	0.742*	0.733*
芳樟醇相对含量 Relative linalool content																		1	0.517
芳樟醇产量 Linalool yield																			1

注： ** 表示在 0.01 水平上显著相关， * 表示在 0.05 水平上显著相关。

Note: ** is significantly correlated at the 0.01 level, and * is significantly correlated at the 0.05 level.

2.5 氮施用量与芳樟生长指标及叶芳樟醇产量间的回归分析

以芳樟幼苗 N 肥处理各生长指标的苗高、地径、叶生物量、总生物量、叶芳樟醇产量的最佳效果为因变量，N 施肥量为自变量进行回归分析，通过一元二次回归方程，得出最佳施肥量^[16]。N 施用量与生长指标及叶芳樟醇产量间的回归分析结果见表 7。各方程的决定系数均较大，均大于 0.90，拟合程度较高，可得出芳樟幼苗的最佳 N 肥施用量为 6.13~8.47 g/株。综合考虑叶生物量与叶芳樟醇产量，最佳 N 肥施用量应为 6.44~7.73 g/株。

表 7. 施氮量与芳樟幼苗生长指标及叶芳樟醇产量间的回归分析

Tab7. Regression analysis between nitrogen application and growth index of linalool type of *C. camphor* and yield of leaf essential oil

因素/x factors	指标/y Index	回归方程 Regression equation	决定系 数/R ² square	理论最佳值 Theoretical harv est	施肥量/ g·株 ⁻¹ Correspondi ng amount of N
-----------------	---------------	-----------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	--

N	苗高 Height	$y=31.00+11.90x-0.97x^2$	0.91	67.57 cm	6.13
	地径 Ground diameter	$y=3.56+0.77x-0.056x^2$	0.99	6.23 mm	6.93
	叶生物量 Leaf biomass	$y=9.57+2.70x-0.18x^2$	0.98	19.84 g	7.73
	总生物量 Total biomass	$y=39.06+8.13x-0.48x^2$	0.96	73.49 g	8.47
	叶芳樟醇产量 Leaf linalool yield	$y=0.23+0.089x-0.0069x^2$	0.95	0.51 mL	6.44

3 讨论

施肥是提高土壤肥力培育优质林木的关键技术之一。研究表明,在合适的范围内增加 N 素含量可显著提高芳樟幼苗的苗高、地径及全株生物量。另外, N 肥还会影响芳樟幼苗的营养分配,生理及代谢等过程。从根冠比上看, N4 与 CK 的根冠比差异显著 ($P<0.05$), 施 N 肥更有利于芳樟幼苗地上部分的生物量积累,这与前人研究结果一致(张华林等, 2014; 范川等, 2015)。当 N 肥水平达 $6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,各指标均达最大值,随着 N 肥施用量的增加,芳樟幼苗的苗高、地径以及各部分生物量等生长指标均呈先上升后下降趋势。说明在一定 N 肥水平下,施氮可有效促进芳樟幼苗的生长,但过高的 N 肥浓度会减缓芳樟幼苗生长。这与(李佳秋等, 2024)对皂荚(*Gleditsia sinensis*)、(钱燕萍等, 2016 对欧洲鹅耳枥(*Carpinus betulus*)、(王晓丽等, 2021)对桉木苗(*Eucalyptus maideni*)的研究结果基本一致。

芳樟幼苗的光合色素含量随 N 肥施用量而增加,施肥后的各处理均与 CK 差异显著 ($P<0.05$)。这是因为植物叶片大约 75% 的 N 素存在于叶绿体中(邹振华等, 2012),施肥提高芳樟幼苗 N 素的供应,使叶片合成更多的叶绿素,从而提高了叶片的光合作用。气体交换参数中, P_n 、 g_s 、 T_r 和 WUE 皆随着 N 肥施用量的增加而升高,且 g_s 和 T_r 、 C_i 、苗高呈显著正相关,这可能是由于气孔的打开使得 C 源能更好的进入细胞的叶绿体中,进而提高光合产物合成与积累。光响应曲线是研究植物光合生理活动规律和植物光能利用效率重要途径之一(陆燕元等, 2015)。本研究中,随 N 施用量增加, AQY、 P_{max} 、 L_{cp} 、 L_{sp} 、 R_d 呈先增加后减少的趋势,除 L_{cp} 和 R_d 外,各参数均在 N3 条件下处于最高水平,且显著高于其余 4 组处理 ($P<0.05$)。说明施 N 肥可增强叶片吸光强度、光捕获能力和光化学反应效率。而 CK 处理各项光合参数皆低于正常值,可能是由于植物在缺素的胁迫下,光系统发育不充分或受到损伤,影响植物光合进程,造成能量供应不足,代谢产物积累减少(赵晶晶等, 2022)。这与(尹梦雅等, 2022)对黄栀子(*Gardenia jasminoides*)的研究一致。

植株在面对不同的外部环境时,会有不同的生长表现,为保证自身各种生长代谢活动的需求,植株会进行一系列调整,从而完成正常生长发育(Craigne et al., 2001)。芳樟叶精油含量和主成分芳樟醇是次生代谢的产物,其合成和转化不仅受遗传特性和体内生理生化反应的影响而且会很大程度受生长环境条件的制约(于静波等 2013; 张国防等, 2012)。本次试验中, N 肥处理对芳樟叶精油含量有提高但不明显,这与(刘新亮等, 2021)研究一致。这可能是叶精油含量受遗传因子的影响更大,也可能是 N 肥促进幼苗生长的同时也会消耗代次生代谢物。芳樟醇产量和相对含量影响较大,合适的 N 肥更有利于芳樟醇等萜类化合物的合成,具体影响机理还需要进一步探讨。

4 结论

研究表明,(1)适宜的 N 肥会显著促进苗高、地径和全株生物量,超过一定后促进作用明显下降。(2)添加 N 肥可提高叶绿素含量显著高于 CK 处理。气体交换参数中, C_i 随着 N 浓度的提高会有所下降。 P_n 、 g_s 、 T_r 、WUE 相较于 CK 均显著提高。AQY、 P_{max} 、 L_{cp} 、 L_{sp} 、 R_d 高于 CK,可见施入 N 肥后会提高叶片利用光的能力从而积累更多有机物。(3)本次试验表明,添加 N 肥后叶精油产量没有显著的提高,芳樟醇产量相较于 CK 提高 56.36%。

(4)将指标与施肥量回归方程,得出芳樟幼苗的最佳 N 肥施用量应为 6.44~7.73 g/株。

参考文献

金志农, 张北红, 艾卿, 等. 2020. 香料樟树研究的必要性与可行性分析. 南昌工程学院学报, 39(6):1-13.

- (Jin Z N, Zhang B H, Ai Q, *et al.* 2020. Necessity and feasibility analysis of research on *Cinnamomum* spp. and *Litsea* spp. used in spice. Journal of Nanchang Engineering College, 39(6):1-13. [in Chinese])
- 郭兰萍, 黄璐琦, 华永丽, 等. 2008. 从表型可塑性、生态型到药用植物化学型的研究. 资源科学, 2(5):744-753.
- (Guo L P, Huang L Q, Hua Y L, *et al.* 2008. From phenotypic plasticity and ecotype to chemotype of medicinal plants. Resource Science, 2(5):744-753. [in Chinese])
- 石皖阳, 何伟, 郭得选, 等. 1989. 樟精油成分和类型划分. 植物学报, 31(3):209-214.
- (Shi W Y, He W, Guo D X, *et al.* 1989. Composition and typology of camphor essential oil. Journal of Botany, 31(3):209-214. [in Chinese])
- 陈尚钊, 赵玲华, 徐小军. 2013. 天然芳樟醇资源及其开发利用. 林业科技开发, 27(2):13-17.
- (Chen S X, Zhao L H, XU X J. 2013. Natural linalool resources and its development and utilization. Forestry Science and Technology Development, 27(2):13-17. [in Chinese])
- 赵姣. 2021. 芳樟枝叶精油含量与营养元素含量的动态变化及其相关性. 林业科学, 57(12):57-67.
- (Zhao J. 2021. Dynamic changes of the contents of essential oil and nutrients of *Cinnamomum camphora* var. *linaloolifera* and their correlation. Science Silvae Sin, 57(12):57-67. [in Chinese])
- 肖祖飞, 艾卿, 金志农, 等. 2021. 芳樟矮林生长节律及精油动态变化研究[J]. 江西农业大学学报, 43(4):834-841.
- (Xiao Z F, Ai Q, Jin Z N, *et al.* 2021. A study on the dynamic changes in growth rhythm and essential oil in linalool type *Cinnamomum camphora* dwarf forest. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 43(4): 834-841. [in Chinese])
- 罗仙英, 莫荣海, 丁贵杰, 等. 2022. 不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响. 广西植物, 42(4):608-616.
- (Luo X Y, Mo R H, Ding G J, *et al.* 2022. Effects of different ratios of fertilizer application on the growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings. Guangxi Plant, 42(4):608-616. [in Chinese])
- 刘新亮, 刘蕾, 何小三, 等. 2020. 施肥和修枝对材用樟树幼林生长的影响. 中南林业科技大学学报, 40(12):54-59.
- (Liu X L, Liu L, He X S, *et al.* 2020. Effects of fertilization and pruning on growth of *Cinnamomum camphora* plantations. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 40(12):54-59. [in Chinese])
- 陈宇琳, 吴凤英, 张伟婷, 等. 2024. 不同类型生物炭对芳香樟生长及光合特性的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 52(2):70-80.
- (Chen Y L, WU F Y, Zhang W T *et al.* 2024. Effects of different types of biochar on the growth and photosynthetic characteristics of aromatic camphor. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 52(2):70-80. [in Chinese])
- 朱昌叁, 梁晓静, 李开祥, 等. 2020. 不同配方施肥对樟树无性系人工林生长的影响. 广西林业科学, 49(1):17-21.
- (Zhu C S, Liang X J, Li K X, *et al.* 2020. Effects of different formulations of fertilization on the growth of *Cinnamomum camphora* clonal plantation. Guangxi Forestry Science, 49(1):17-21. [in Chinese])
- 陈晓明, 韦璐阳, 刘海龙, 等. 2012. 配方施肥对芳樟枝叶产量和含油率的影响研究. 西部林业科学, 41(5):68-72.
- (CHEN X M, WEI L Y, LIU H L, *et al.* 2012. Effects of formulated fertilizer application on branch and leaf yield and oil content of Aromatic camphor. Western Forestry Science, 41(5):68-72.)
- 杨慧杰, 原向阳, 祁祥, 等. 2017. 谷子对拔节期弱光胁迫的光合生理响应. 核农学报, 31(2):386-393.
- (Yang H J, Yuan X Y, Qi X, *et al.* 2017. Photosynthetic physiological response of foxtail millet to weak light stress at jointing-stage. Acta Agric. Nucl. Sci., 31(2):386-393. [in Chinese])
- 王雪, 康敏, 王偲媛, 等. 2022. 不同光合-CO₂响应模型对水稻快速A-Ci响应(RACiR)曲线拟合效果的比较研究. 南京农业大学学报, 45(6):1099-1106.
- (Wang X, K M, Wang Y Y, *et al.* 2022. Comparative study on the effect of different photosynthetic-CO₂ response models in fitting the rapid A-Ci response (RACiR) curve of rice. Journal of Nanjing Agricultural University, 45(6):1099-1106. [in Chinese])
- 叶子飘, 于强. 2008. 光合作用光响应模型的比较. 植物生态学报, 32(6):1356-1361.
- (Ye Z P, Yu Q. 2008. Comparison of new and several classical models of photosynthesis in response to irradiance. Chinese Journal of Plant Ecology, 32(6): 1356-1361. [in Chinese])

- 胡文杰, 高捍东, 江香梅, 等. 2012. 樟树油樟、脑樟和异樟化学型的叶精油成分及含量分析. 中南林业科技大学学报, 32(11):186-194.
- (Hu W J, Gao H D, Jiang X M, *et al.* 2012. Analysis on constituents and contents in leaf essential oil from three chemical types of *Cinnamum camphora*. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 32(11):186-194. [in Chinese])
- 王玉杰, 张大克. 2002. 多元肥料效应函数模型的优化方法. 生物数学学报, 2(1):74-77.
- (Wang Y Zhang D K. 2002. Optimization method for multivariate fertilizer effect function model. Journal of Biomathematics, 2(1):74-77. [in Chinese])
- 张华林, 彭彦, 谢耀坚, 等. 2014. 两种氮肥施用法对尾巨桉轻基质容器苗生长的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 38(1):53-58.
- (Zhang H L, Peng Y, Xie Y J, *et al.* 2014. Effects of two nitrogen fertilizer application methods on the growth of light substrate container seedlings of *Eucalyptus tiliaceus*. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 38(1):53-58. [in Chinese])
- 范川, 舒翔, 李晓清, 等. 2015. 施肥对香樟幼苗生长及养分分配的影响. 广西植物, 35(2):98-102.
- (Fan C, Shu X, Li X Q, *et al.* Effects of fertilization on growth and nutrient partitioning of balsam fir seedlings. Guangxi Plant, 2015, 35(2):98-102. [in Chinese])
- 李佳秋, 田佳赫, 于丽娜, 等. 2024. 不同施氮量对皂荚幼苗生长及光合特性的影响. 林业与生态科学, 39(1):28-33.
- (LI J Q, TIAN J H, YU L N, *et al.* 2024. Effects of different nitrogen application rates on the growth and photosynthetic characteristics of soap pod seedlings. Forestry and Ecological Science, 39(1):28-33. [in Chinese])
- 钱燕萍, 祝遵凌. 2016. 氮素营养对欧洲鹅耳枥幼苗生长及光合特性的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 44(6):71-78.
- (Qian Y P, Zhu Z L. 2016. Effects of nitrogen nutrition on growth and photosynthetic characteristics of European gooseberry seedlings[J]. Journal of Northwest A&F University: natural science edition, 44(6):71-78. [in Chinese])
- 王晓丽, 吴波, 杨杰, 等. 2021. N、P配施对直干桉苗木生长和光合生理的影响. 西北林学院学报, 36(5):57-62.
- (Wang X L, W B, Yang J, *et al.* 2021. Effects of N and P fertilization on the growth and photosynthetic physiology of *Eucalyptus* spp. seedlings. Journal of Northwest Forestry College, 36(5):57-62. [in Chinese])
- 邹振华, 党宁, 王惠群, 等. 2012. 不同氮素水平对营养生长期南荻植株光合特性的影响. 作物研究, 26(3):255-259.
- (Zou Z H, Dang N, W H Q, *et al.* 2012. Effects of different nitrogen levels on photosynthetic characteristics of Ogi plants during the nutritive growth period. Crop Research, 26(3):255-259. [in Chinese])
- 陆燕元, 马焕成, 李昊民, 等. 2015. 土壤干旱对转基因甘薯光合曲线的响应. 生态学报, 35(7):2155-2160.
- (Lu Y Y, Ma H C, Li H M, *et al.* 2015. Response of soil drought to photosynthetic profiles of transgenic *sweetpotato*. Journal of Ecology, 2015, 35(7):2155-2160. [in Chinese])
- 赵晶晶, 詹万龙, 周浓. 2022. 非生物胁迫下植物体内活性氧和丙酮醛代谢的研究进展. 南方农业学报, 53(8):2099-2113.
- (Zhao J J, Zhan W L, Zhou N. 2022. Progress of reactive oxygen species and pyruvic aldehyde metabolism in plants under abiotic stress. Southern Journal of Agriculture, 2022, 53(8):2099-2113. [in Chinese])
- 尹梦雅, 李志辉, 杨艳, 等. 2022. 施肥对黄栀子幼苗生长与光合特性的影响. 东北林业大学学报, 50(5):32-36.
- (YIN M Y, LI Z H, YANG Y, *et al.* 2022. Effects of fertilization on the growth and photosynthetic characteristics of yellow gardenia seedlings. Journal of Northeast Forestry University, 50(5):32-36. [in Chinese])
- Craine J M, Froehle J, Tilman D G, *et al.* The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients. Oikos, 2001, 93(2):274-285.
- 于静波, 张国防, 李左荣, 等. 2013. 不同施肥处理对芳樟叶精油及其主成分芳樟醇含量的影响. 植物资源与环境学报, 22(1):76-81.
- (Yu J B, Zhang G F, Li Z R, *et al.* 2013. Effects of different fertilization treatments on the content of essential oil and its main

component linalool in the leaves of *Camphorus arundinacea*. Journal of Plant Resources and Environment, 22(1):76-81. [in Chinese])

张国防, 于静波, 冯娟. 2012. 芳樟无性系叶精油及芳樟醇含量变异分析. 植物资源与环境学报, 21(2):117-118.

(Zhang G F, Yu J B, Feng J. 2012. Variation analysis of leaf essential oil and linalool content in asexual lines of *Camphorus niloticus*. Journal of Plant Resources and Environment, 21(2):117-118. [in Chinese])

刘新亮, 戴小英, 章挺, 等. 2021. 大量元素缺乏对樟树幼苗生长的影响. 南方林业科学, 49(5):16-20.

(Liu X L, Dai X Y, Zhang T, *et al.* 2021. Effects of massive element deficiencies on the growth of camphor seedlings. Southern Forestry Science, 49(5):16-20. [in Chinese])