

氮素营养对闽楠幼苗生长及光合特性的影响

王东光, 尹光天*, 邹文涛, 李荣生, 杨锦昌

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520)

摘要: 设置0、50、100、150、200、300、400、600 mg·株⁻¹ 8个N处理, 通过盆栽试验研究氮素对闽楠苗生长及光合特性的影响。结果表明: 随着供氮量的增加, 闽楠苗高、地径、叶面积和根、茎、叶及整株生物量均呈现先增加后降低的趋势, 其中, 苗高、地径和叶面积均在供氮量100 mg·株⁻¹时最高, 而各器官生物量及整株生物量均在供氮量150 mg·株⁻¹时最大; 根冠比则随着供氮量的增加呈现单调递减趋势; 闽楠苗光合特性与生长表现是契合的, 随供氮水平的提高, 闽楠苗叶绿素a、b及总量先升高后降低, 净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率值也均呈先仰后抑之势, 恰在供氮量100 mg·株⁻¹时, 以上光合参数值均达最高, 且不同氮素处理间闽楠苗光合气体交换参数和蒸腾速率差异均显著。综合闽楠苗各生长及光合指标的分析结果, 100~150 mg·株⁻¹的供氮量为闽楠苗温室培育的适宜范围。

关键词: 闽楠; 氮肥; 生长特性; 光合特性

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

Effects of Nitrogen Loading on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Phoebe bournei* Seedlings

WANG Dong-guang, YIN Guang-tian, ZOU Wen-tao, LI Rong-sheng, YANG Jin-chang

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: The growth and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* pot seedlings applied with 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, and 600 mg nitrogen per seedling in a greenhouse were investigated. The 100 mg·seedling⁻¹ level could accelerate the mean height, ground diameter and leaf area growth; the biomass of most organs was the highest for seedling applied with nitrogen at 150 mg per seedling; the ratio of root to shoot decreased with the increasing of nitrogen fertilization; the photosynthetic performance and growth index of *P. bournei* seedling was consistent, the content of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll increased then decreased with the nitrogen fertilization increased; the net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration and transpiration rate were observed to increase with the increase of nitrogen from 0 to 100 mg per seedling and decrease with further increase of nitrogen fertilization from 100 to 400 mg per seedling. Statistical analysis indicated that the photosynthetic gas exchange parameters and transpiration rate varied significantly under different nitrogen treatments. So it is concluded that 100–200 mg nitrogen per seedling is the appropriate range for seedlings of *P. bournei* nursed in a greenhouse.

Key word: *Phoebe bournei*; nitrogen fertilization; growth performance; photosynthetic characteristics

收稿日期: 2012-08-03

基金项目: 国家科技支撑计划“南方阔叶树种新品种选育技术研究”(2012BAD01B04); 广东省林业科技创新项目(2010KJCX002-01)

作者简介: 王东光(1985—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究。E-mail: wangdgking@163.com.

* 通讯作者: 尹光天(1960—), 男, 湖南湘潭人, 研究员, 主要从事森林培育研究。E-mail: yinguangtian@126.com.

施肥对培养优质苗木具有重要作用,科学施肥能有效地改善土壤条件^[1],避免营养流失,提高苗木的质量、抗逆性和移植成活率^[2-4],其中,氮肥的作用尤为突出,因为氮元素是核苷酸、辅助因子和一些常见代谢物的必需元素^[5-6],同时,也是叶绿素的主要成分^[7],所以氮素供应将直接影响林木的生长和光合效率。国内外对氮素需求和有效性进行了大量研究^[8-9],Trubat等^[10]对黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)氮素施肥的研究发现,氮素缺乏会导致其地上生物量降低,但不会影响地下生物量的积累和根形态。Heiskane等^[11]通过对西部铁杉(*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.)指数施肥和恒量施肥的对比试验结果显示,2种施肥处理下苗高和生物量均无显著差异;而珍贵树种马来沉香(*Aquilaria malaccensis* Benth)和土沉香(*A. sinensis* (Lour.) Gigl)的氮素试验结果表明,施氮量显著影响2树种苗木生长和光合特性^[12]。随着矿质营养理论的完善以及对珍稀濒危树种保护的需求,珍贵树种苗期施肥研究逐渐增多^[13-14],但通过揭示不同氮素水平下苗木的生长表现、光合特性从而确定其氮素需求量的研究,在我国南方珍贵乡土阔叶树种中鲜有报道。

闽楠(*Phoebe bournei* (hemsl.) Yang.)为樟科(Lauraceae)常绿大乔木,是我国特有的珍贵用材树种,属国家Ⅱ级保护植物;其木材纹理直,结构细密,芳香,不易变形及虫蛀,也不易开裂,为建筑、高级家具等的良好用材,又可做优良的行道树、遮阴树或风景树^[15]。由于对闽楠天然资源的过度采伐与利用,加之闽楠人工林规模小、前期生长慢、成材期长等因素致使闽楠资源日渐匮乏^[16],且国内对闽楠的研究起步较晚,多集中于种群生态以及种子活力测定等方面^[17],因此,大规模营造闽楠人工林显得尤为迫切,其首要解决的问题是闽楠壮苗培育,但关于闽楠容器苗育苗的施肥试验鲜有报道。本文采用阶段性差量施肥的方法,研究不同氮素水平对闽楠容器苗生长特性和光合特性的影响,旨在为闽楠施肥实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试幼苗为闽楠实生苗,育苗用种采自福建省南平市政和县。2011年3月在中国林业科学研究院热带林业研究所温室大棚中进行沙床播种,出苗阶段不施任何肥料。2011年6月移苗,加盖50%透

光率的遮荫网。移苗前首先对混合基质(珍珠岩:蛭石:泥炭=2:2:3(体积比))进行高温消毒,然后装入套有白色塑料袋的塑料盆(上口径、下口径和高分别为10、8、8 cm)。2011年7月选取长势、大小均一的苗木(平均苗高4.56 cm)进行盆栽施肥试验。本试验所用肥料为加拿大植物营养公司生产的普罗丹高浓度水溶性复合肥,其中,肥料三要素含量分别为N 20%, P_2O_5 20%, K_2O 20%,螯合铜、螯合锌及螯合锰含量均为0.05%,螯合铁0.10%,镁(Mg)0.15%,硼(B)0.02%,钼(Mo)0.015%,EDTA螯合体1.00%,且此肥料已被广泛应用于林木苗期氮素施肥试验中^[2-3]。

1.2 试验设计

采用完全随机区组试验设计,按照每株施氮总量设置0、50、100、150、200、300、400、600 mg 8个处理,4次重复,每小区48株苗。从7月1日开始施肥,分3个阶段共施肥12次,其中,前4次每次每株施氮量为12次平均值的1/2,中间4次每次施入量为12次的平均值,后4次每次施入量为12次平均值的1.5倍,每次施肥间隔时间为15 d,具体施肥方案见表1。应用蒸馏水溶解复合肥配置营养液,施入每个塑料盆,每个处理每次施入的营养液体积为1 850 mL,每株施入的体积为38.5 mL。基质中初始水量为饱和持水量的75%,此后定期称质量浇水,浇水量视苗木生长状况及天气情况而定。为减小边际效应,每15 d挪动育苗盘1次。

表1 闽楠苗期氮素施肥方案

处理	施总N量/ (mg·株 ⁻¹)	施N量/(mg·株 ⁻¹ ·次 ⁻¹)		
		前4次 (7—8月)	中间4次 (8—10月)	后4次 (11—12月)
N1	0	0.00	0.00	0.00
N2	50	2.08	4.17	6.25
N3	100	4.17	8.33	12.50
N4	150	6.25	12.50	18.75
N5	200	8.33	16.67	25.00
N6	300	12.50	25.00	37.50
N7	400	16.67	33.33	50.00
N8	600	25.00	50.00	75.00

1.3 试验观测

最后1次施肥15 d后,进行各项指标的测定。

1.3.1 苗高、地径及叶面积的测定 测定所有苗的苗高和地径。每小区随机抽取4株苗,使用美国生产的CI-203激光叶面积仪对每株苗的每片叶进行扫描,计算每株苗的总叶面积。

1.3.2 生物量的测定 每小区随机抽取3株苗,用去离子水将苗洗净晾干,把根、茎、叶分离后装入信封并编号,然后分别置于烘箱中,105℃杀青30 min后,75℃下烘干至恒质量,分别称其干质量。

1.3.3 叶绿素含量的测定 叶绿素浸提液采用丙酮、无水乙醇和蒸馏水(配置比例为4.5:4.5:1)混合液。每小区随机取鲜叶0.25 g,将叶片剪成0.2 cm左右的细丝或小块混合均匀后置于试管中,立即注入10 mL混合液,并用塑料薄膜封口防止液体挥发,在黑暗环境中浸提24 h。以混合液为对照,测定各处理提取液在波长663、645 nm处的吸光值(A)。叶绿素浓度(C)及含量计算公式如下:

$$C_a = 12.72A_{663} - 2.59A_{645}$$

$$C_b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663}$$

$$C_T = C_a + C_b = 20.92A_{645} + 8.05A_{663}$$

叶绿素含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) = $(C \times V \times n) / (W \times 1000)$

上式中, C 为叶绿素浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为提取液体积(mL); n 为稀释倍数; W 为叶片鲜质量。

1.3.4 光合指标的测定 采用Li-6400便携式光合仪(LED红蓝光源叶室)进行光合指标测定。选择晴朗天气,测定前用饱和光强进行气孔诱导约20 min,每日上午09:30—11:30进行测定,饱和光强设为 $1600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;采取空气供应 CO_2 ,流速设定为 $500 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,温度为 $23 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度约为30%, CO_2 浓度为 $405 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。每个小区随机选取4株叶片完整的苗,每株选取3片第2轮以下的叶片,每叶重复测定4次。

1.4 数据处理

运用Excel 2003进行数据的录入和图表的绘制,采用SPSS 18.0对数据进行方差分析、Duncan多重比较。由于实验结束时N8处理苗叶片枯萎脱落、顶芽下垂,大部分死亡,说明已产生肥害,因此N8不参与数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮素处理对闽楠生长表现的影响

2.1.1 不同氮素处理对闽楠苗苗高、地径和叶面积的影响 闽楠苗的苗高、地径及叶面积,随着供氮水平的不断升高,呈现先增后降趋势(表2)。3个指标均是N3处理($100 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$)最大,分别为18.84 cm、2.45 mm、 167.12 cm^2 ,是其对照的2.10、1.40、

6.31倍。

表2 氮素处理对闽楠苗高、地径和叶面积的影响

处理	施N总量/ ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)	苗高/ cm	地径/ mm	叶面积/ cm^2
N1	0	8.96 ± 0.20d	1.75 ± 0.03d	26.49 ± 2.11c
N2	50	16.21 ± 0.42c	2.26 ± 0.04b	119.58 ± 5.36b
N3	100	18.84 ± 0.53a	2.45 ± 0.05a	167.12 ± 8.50a
N4	150	18.43 ± 0.42a	2.43 ± 0.04a	164.68 ± 6.03a
N5	200	18.26 ± 0.49ab	2.35 ± 0.05ab	163.19 ± 3.18a
N6	300	16.57 ± 0.40bc	2.25 ± 0.04bc	148.08 ± 3.30a
N7	400	15.56 ± 0.43c	2.13 ± 0.06c	139.19 ± 8.44ab

注:表中字母为Duncan多重比较结果,同栏中处理间相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$),不同则表示差异显著($P < 0.05$),±后的数值为标准误,下同。

方差分析结果表明:不同氮素处理间闽楠苗的生长指标(苗高、地径和叶面积)均差异显著($P < 0.05$)。从表2可以看出:N3处理的苗高和地径与N4、N5处理间差异不显著($P > 0.05$),但其值显著高于N1、N2、N6和N7处理;而N3处理的叶面积与N1、N2差异显著,但与N4、N5、N6、N7处理差异不显著。

2.1.2 氮素处理对闽楠苗生物量的影响 不同氮素处理间闽楠苗地下生物量、茎、叶及整株生物量均差异显著($P < 0.05$),各器官及整株生物量均为N4处理最大,分别达0.42、0.34、1.09、1.84 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$,分别是对照的3.23、4.86、4.54和4.18倍。N4的地下生物量显著高于N1、N2、N5、N6和N7处理,而与N3处理差异不显著;N3、N4、N5和N6处理间叶生物量无显著差异,但其显著高于其它处理;N3、N4处理的茎生物量显著高于N7和对照,而与其他处理差异不显著;N4的地上生物量与N3、N5处理无显著差异,但显著高于其它处理;N4和N3、N5处理的整株生物量没有显著差异,但显著高于其它处理。各器官中,叶生物量占整株生物量的比重最大,说明适宜的氮素水平直接作用是促进闽楠苗木叶片的生长,进而促使整株苗木干物质的积累。

对于植物苗木生物量的研究,比较其地下、地上生物量及根冠比差异是最有效的。在本研究中,各处理间闽楠苗地上生物量均显著高于地下生物量;各处理间的根冠比差异不显著,但显著低于对照,对照的根冠比约为其它处理的1.62~3.13倍,说明氮素水平的提高有利于闽楠苗地上生物量的积累,使得根冠比逐渐降低。

表 3 氮素处理对闽楠苗各器官及整株生物量和根冠比的影响

处理	施 N 总量/ (mg · 株 ⁻¹)	地下生物量/ (g · 株 ⁻¹)	地上生物量/(g · 株 ⁻¹)			整株生物量/ (g · 株 ⁻¹)	根冠比
			茎	叶	总		
N1	0	0.13 ± 0.03 d	0.07 ± 0.01 c	0.24 ± 0.10 c	0.31 ± 0.05 d	0.44 ± 0.09 e	0.47 ± 0.14 a
N2	50	0.27 ± 0.02 bc	0.27 ± 0.08 ab	0.76 ± 0.05 b	1.03 ± 0.07 c	1.30 ± 0.16 cd	0.26 ± 0.01 b
N3	100	0.36 ± 0.09 ab	0.33 ± 0.09 a	1.07 ± 0.11 a	1.40 ± 0.09 ab	1.75 ± 0.19 ab	0.25 ± 0.01 b
N4	150	0.42 ± 0.08 a	0.34 ± 0.16 a	1.09 ± 0.19 a	1.43 ± 0.19 a	1.84 ± 0.44 a	0.29 ± 0.03 b
N5	200	0.28 ± 0.03 bc	0.24 ± 0.07 ab	1.02 ± 0.04 a	1.26 ± 0.03 ab	1.54 ± 0.07 abc	0.23 ± 0.02 b
N6	300	0.18 ± 0.02 cd	0.20 ± 0.07 ab	1.00 ± 0.03 a	1.20 ± 0.05 bc	1.39 ± 0.10 bcd	0.15 ± 0.02 b
N7	400	0.15 ± 0.03 d	0.13 ± 0.03 b	0.77 ± 0.08 b	0.90 ± 0.09 c	1.05 ± 0.13 d	0.16 ± 0.02 b

2.2 氮素处理对闽楠苗光合作用的影响

2.2.1 氮素处理对闽楠苗叶绿素含量的影响 随着供氮量的增加,叶绿素 a、b 含量及二者之和大致呈先增加后减少的趋势,且均在 100 mg · 株⁻¹ (N3) 时达到最大(表 4),其值分别为 0.67、0.21、0.89 mg

· g⁻¹,约为 N1(对照)的 1.18、1.31 和 1.22 倍,但各处理间均差异不显著;各处理间叶绿素 a/b 差异显著(P < 0.05), N2 处理的叶绿素 a/b 值最大,显著高于对照,而与其他处理间无显著差异。

表 4 氮素处理对闽楠苗叶绿素含量的影响

处理	施 N 总量/(mg · 株 ⁻¹)	叶绿素 a 含量/(mg · g ⁻¹)	叶绿素 b 含量/(mg · g ⁻¹)	叶绿素 a/b	总叶绿素含量/(mg · g ⁻¹)
N1	0	0.57 ± 0.08	0.16 ± 0.03	2.53 ± 0.10 b	0.73 ± 0.11
N2	50	0.59 ± 0.04	0.17 ± 0.01	3.55 ± 0.02 a	0.77 ± 0.05
N3	100	0.67 ± 0.18	0.21 ± 0.05	3.23 ± 0.28 ab	0.89 ± 0.23
N4	150	0.59 ± 0.15	0.18 ± 0.03	3.16 ± 0.48 ab	0.78 ± 0.18
N5	200	0.57 ± 0.25	0.19 ± 0.07	2.88 ± 0.27 ab	0.77 ± 0.32
N6	300	0.35 ± 0.07	0.13 ± 0.02	2.71 ± 0.20 ab	0.49 ± 0.09
N7	400	0.29 ± 0.03	0.10 ± 0.01	2.86 ± 0.09 ab	0.40 ± 0.04

注:表中未标注字母栏表示各处理间无显著差异。

2.2.2 氮素处理对闽楠苗光合和蒸腾速率的影响 由图 1 可知:随着供氮量的增加,闽楠苗木光合气

体交换参数与蒸腾速率均呈先升高后下降的趋势,当供氮量达到 100 mg · 株⁻¹ (N3) 时,净光合速率(Pn)、

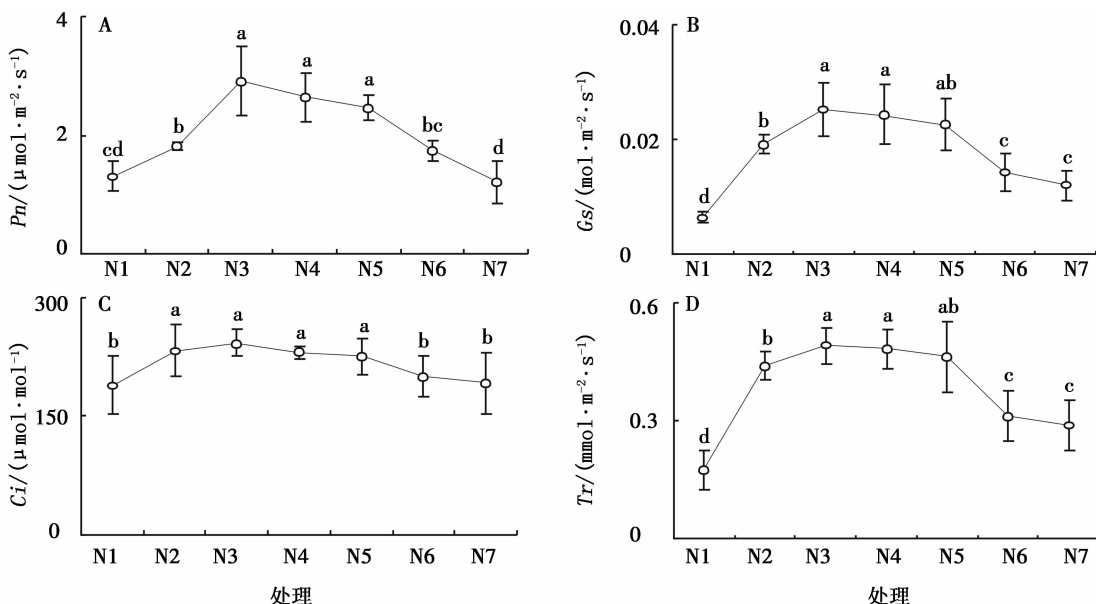


图 1 氮素处理对闽楠苗净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)的影响

气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr) 4个参数值均达最大,分别为 $2.92 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.025 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $241.88 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $0.50 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,分别为对照处理的 2.23、4.17、1.29、2.88 倍。

不同氮素处理间的光合气体交换参数及蒸腾速率均差异显著($P < 0.05$)。N3、N4、N5 处理间的净光合速率无显著差异($P > 0.05$),但与其它处理差异显著;N3、N4 处理的气孔导度和蒸腾速率显著高于 N1、N2、N6 和 N7 处理,而与 N5 处理差异不显著;N2、N3、N4、N5 处理间的胞间 CO_2 浓度无显著差异,但与其他处理差异显著。由此可见,适宜的供氮量有利于闽楠苗木叶片光合效率的提高,同时可以促进叶片气孔开放,增强植物 CO_2 吸收能力和蒸腾拉力。

3 结论与讨论

氮元素是植物生长发育必不可少的矿质营养元素,它既与碳代谢及其有效性密切相关,同时又控制着植物新组织的形成。本试验中,闽楠苗生长指标均随供氮量的增加而先升高后缓慢降低,当供氮量增至 $100 \text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 后,苗高、地径及叶面积开始持续下降,而各器官及整株生物量在供氮量 $150 \text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 处达到最大,当供氮量大于 $200 \text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,苗高、地径和地上、地下及整株生物量均显著降低。这是因为随着供氮水平的提高导致了叶片中氮素的积累,从而直接影响苗光合作用,其内在表现为:(1) 氮素供应失衡使得 CO_2 由细胞进入叶绿体时受阻^[18-19];(2) 氮肥施用量不适当影响加氧酶活性^[20];(3) 氮素供应极度缺乏或过量,会导致磷酸丙糖代谢受阻^[21]。闽楠苗叶绿素 a、b 含量、总量和光合气体交换参数及蒸腾速率亦均随供氮量的提高呈先升后降的趋势,其测定值均于供氮量 $100 \text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 时最高,且除叶绿素变化不显著外,其它值也均于供氮量 $200 \text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 后显著降低。通过上述闽楠苗光合及生长对应性比较得出:氮素供应量 $100 \sim 150 \text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 是闽楠苗生长及光合表现优良适宜范围。于爽等^[22]对落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzeneva)、范志强等^[23]对水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)研究表明,氮素营养可以促进植物苗木生物量的积累,特别是对叶生物量及地上生物量积累最有效,若氮素供给过剩则容易导致苗木干物质质量积累受阻。曹兆阳等^[24]对银杏(*Ginkgo biloba*

L.)、杨自立等^[25]对栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume)的研究结果表明:缺氮严重影响苗木的光合特性,过量供氮也会使得叶片的光合能力下降,导致林木幼苗生长受影响。以上研究结果与本文研究结论一致。

近年来,国内外最盛行的容器苗培育施肥技术,多采用指数施肥法,但是指数施肥法容易导致前期施肥不足而后后期施肥过量^[11],且指数施肥法不便于在生产实践中实施。本研究尝试采用简易的3阶段差量施肥法,随着供氮水平的增加,其苗高、地径、叶面积和生物量与指数施肥法一样亦呈现出升高—平稳—下降的变化规律。本试验得出的闽楠苗适宜供氮量($100 \sim 150 \text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)与贾瑞丰等^[26]对红厚壳(*Calophyllum inophyllum* L.)和陈琳等^[27]对西南桦(*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don)在同样条件下进行的苗期氮素指数施肥试验结果相比,幼苗所需的适宜氮素供应量偏低,其原因由闽楠自身生物学特性所致,即闽楠苗早期生长比红厚壳和西南桦慢,所以苗期需氮量随之降低。

综上所述,随供氮水平的提高,各生长指标、光合参数和蒸腾速率多数于 N3 或 N4 处理达到最大值后开始显著降低,所以每株约 $100 \sim 150 \text{mg}$ 氮素供应量是满足闽楠苗光合及生长的适宜范围。本研究在温室环境下完成,尚未进行大田移苗试验,移植后苗木是否表现良好,也需要在本试验的基础上开展更深入的研究,进而为闽楠苗培育乃至幼林施肥提供有力的理论支持和实践指导。

参考文献:

- [1] 赵燕,董雯怡,张志毅,等. 施肥对毛白杨杂种无性系苗木生长和光合的影响[J]. 林业科学,2010,46(4):70-77
- [2] Salifu K, Timmer V. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture[J]. Canadian Journal of Forest Research,2003,33(7):1287-1294
- [3] Manter D K, Kavanagh K L, Rose C L. Growth response of douglas-fir seedlings to nitrogen fertilization: Importance of rubisco activation state and respiration rates[J]. Tree physiology,2005,25(8):1015-1021
- [4] 李玲莉,李吉跃,张方秋,等. 容器苗指数施肥研究综述[J]. 世界林业研究,2010,23(2):22-27
- [5] 武维华. 植物生理学[M]. 北京:科学出版社,2008:117-176
- [6] Taiz L, Zeiger E. Plant physiology(ed fifth)[M]. USA:S inauer Associates,2010:125-220
- [7] 刘悦秋,孙向阳,王勇,等. 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响[J]. 生态学报,2007,27(8):3457-3464
- [8] 彭明俊,郎南军,吴涛,等. 不同供氮水平对青桐苗木生长的

- 影响[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3):97-100
- [9] 冷华妮, 陈益泰, 饶龙兵, 等. 供氮水平对枫香种源苗木生长及氮、磷吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6):79-84
- [10] Trubart R, Cortina J, Vilagrosa A. Plant morphology and root hydraulics are altered by nutrient deficiency in *Pistacialentiscus* (L.) [J]. *Trees-Structure and Function*, 2006, 20(3):334-339
- [11] Hawkins B J, Burgess D, Mitchell A K. Growth and nutrient dynamics of western hemlock with conventional or exponential greenhouse fertilization and planting in different fertility conditions[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(4):1002-1016
- [12] 王冉, 何茜, 丁晓纲, 等. N素指数施肥对沉香苗期光合生理特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6):58-64
- [13] 吴家胜, 张往祥, 曹福亮. 氮磷钾对银杏苗生长和生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2003, 27(1):63-66
- [14] 陈海波, 卫星, 王婧, 等. 水曲柳苗木根系形态和解剖结构对不同氮浓度的反应[J]. 林业科学, 2010, 46(2):61-66
- [15] 吴征镒. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社, 1999
- [16] 唐小燕, 袁位高, 沈爱华, 等. 闽楠容器苗各器官生物量的分配格局及水分特征研究[J]. 植物研究, 2012, 32(1):99-104
- [17] 李冬林, 金雅琴, 向其柏. 我国楠木属植物资源的地理分布、研究现状和开发利用前景[J]. 福建林业科技, 2004, 31(1):5-9
- [18] Evans J R. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Plant physiology*, 1983, 72(2):297
- [19] Terashima I, Evans J R. Effects of light and nitrogen nutrition on the organization of the photosynthetic apparatus in spinach [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1988, 29(1):143-155
- [20] Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, et al. Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings [J]. *Trees-Structure and Function*, 2001, 15(8):453-461
- [21] Cheng L, Fuchigami L H. Rubisco activation state decreases with increasing nitrogen content in apple leaves [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(351):1687-1694
- [22] 于爽, 张永乐, 曲秀春, 等. 落叶松苗木生物量及氮含量对氮素的响应[J]. 牡丹江师范学院学报:自然科学版, 2008(2):3-4
- [23] 范志强, 王政权, 吴楚, 等. 不同供氮水平对水曲柳苗木生物量、氮分配及其季节变化的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9):1497-1501
- [24] 曹兆阳, 舒洪岚, 俞元春. 氮、磷、钾对银杏苗木养分吸收及生长的影响[J]. 林业科技开发, 2009, 23(6):108-110
- [25] 杨自立, 马履一, 贾忠奎, 等. 不同供氮水平对栓皮栎播种苗光响应曲线的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5):56-60
- [26] 贾瑞丰, 尹光天, 杨锦昌, 等. 不同氮素水平对红厚壳苗木生长及光合特性的影响[J]. 林业科学研究, 2012, 25(1):23-29
- [27] 陈琳, 曾杰, 徐大平, 等. 氮素营养对西南桦苗木生长及叶片养分状况的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(5):35-40