

N素指数施肥对沉香苗期光合生理特性的影响

王 冉^{1,2} 何 茜² 丁晓纲³ 李吉跃² 张方秋³ 朱报著³ 苏 艳²

(1 河南省森林航空消防站 2 华南农业大学林学院 3 广东省林业科学研究院)

摘要: 设置每株 0、1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 mg 6 个施肥量处理(编号为 I ~ VI), 进行珍贵树种马来沉香与土沉香苗期 N 素指数施肥试验, 探究不同 N 素供应水平对其苗期生长、光合生理特性的影响。结果表明: 施入 N 素对马来沉香、土沉香生长及光合特性有着显著影响。地径、苗高以及生物量随着 N 素浓度增加而增大, 至 N 施用量每株 > 3 000 mg 后其生长表现和生物量趋于稳定。马来沉香(1 995.33 cm²) 与土沉香(1 366.57 cm²) 处理 IV 整株叶面积最大, 在苗期生长季内的比叶质量变化趋势是生长初期和末期低, 而中期比较高, 马来沉香对照(处理 I) 与土沉香指数施肥处理 I ~ V 的比叶质量季节变化曲线是双峰式。马来沉香与土沉香指数施肥处理 IV(3 000 mg/株) 的光合能力最大。

关键词: 马来沉香; 土沉香; 指数施肥; 光合生理特性; 光响应曲线

中图分类号: S718.43 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2011)06-0058-07

WANG Ran^{1,2}; HE Qian²; DING Xiao-gang³; LI Ji-yue²; ZHANG Fang-qiu³; ZHU Bao-zhu³; SU Yan². **Effects of exponential fertilization on seedling growth and photosynthesis of *Aquilarias* spp.**

Journal of Beijing Forestry University (2011) **33**(6) 58-64 [Ch, 36 ref.]

1 Henan Forest Aviation Fire Station, Zhengzhou, 450003, P. R. China;

2 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, P. R. China;

3 Guangdong Forest Research Institute, Guangzhou, 510520, P. R. China.

Exponential nutrient delivery accelerating seedling growth could bring about a steady state of nutrition in the plant and improve nutrient uptake. An exponential fertilization trial was conducted with six nitrogen dose levels (applying a total of 0, 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000 mg/seedling in this experiment) of nitrogen to research the effects of different nitrogen levels on growth and photosynthetic physiology of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings. It was indicated that nitrogen fertilization could bring a significant impact on growth and photosynthetic physiology of seedlings. Ground diameter, height and biomass of seedlings increased with the increase of nitrogen supply up to 3 000 mg/seedling, after then growth performance and biomass were unchanged. The total leaf area of *A. malaccensis*(1 995.33 cm²) and *A. sinensis*(1 366.57 cm²) fertilized by 3 000 mg/seedling achieved maximum, and the lamina mass per unit area (LMA) of *A.* seedlings was high at mid-growth. The nitrogen exponential fertilizations played an important role in the adjustment of net photosynthetic rate, transpiration rate and light response curves of *Aquilaria* seedlings. Under the nitrogen fertilization level (3 000 mg/seedling), the photosynthetic physiology characters of *Aquilarias* seedlings reached the maximums.

Key words *Aquilaria malaccensis*; *Aquilaria sinensis*; exponential fertilization; photosynthetic physiology characteristics; light response curve

苗木培育过程中, 主要是通过施肥来提高苗木质量, N 素是影响苗木生长发育及产量和品质的重

要因素, 选择合理施肥方法, 对提高苗木 N 素利用效率, 产量、品质及保护生态环境非常重要。大量研

收稿日期: 2010-12-08

基金项目: “948”国家林业局引进项目(2008-4-01)、广东省优良乡土树种良种选育与繁育专项资金项目(粤财农[2009]306)。

第一作者: 王冉。主要研究方向: 森林栽培生理。电话: 13503836765 Email: 243671169@qq.com 地址: 450003 河南省郑州市纬五路四十号河南省森林航空消防站。

责任作者: 李吉跃, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林培育及栽培生理生态。电话: 010-62338128 Email: ljyymy@vip.sina.com 地址: 510642 广州华南农业大学林学院。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

究结果表明,指数施肥方法既可以满足植物不同生长时期所需要的养分,提高养分利用效率,增强生存竞争力,节省肥料,也可避免多余的肥料对土壤造成污染^[1-3],现在指数施肥技术在我国林业上已取得一些研究成果^[4-10]。

生理活动指标在一定程度上决定着植物的生长速度,在分析苗木对施肥处理的响应过程中,测定生理活动指标有助于了解其生长规律^[11]。植物的光合生理与生长密切相关。目前,指数施肥条件下的苗木生长表现及光合生理特性研究鲜见报道。马来沉香(*Aquilaria malaccensis*)是世界级濒危树种、土沉香(*A. sinensis*)为我国国家Ⅱ级重点保护野生植物,国内外对马来沉香与土沉香的已有研究集中在生物生态学特性、药理病理、药材质量等方面^[12-14],有关其施肥的研究尚未见报道。本文首次采用指数施肥法探究不同 N 素供应水平下 2 个品种沉香苗期生长及光合生理特性,为马来沉香与土沉香珍贵树种的保护、合理施肥、完善育苗技术及制定栽培集约管理措施提供理论依据。

1 试验地概况

试验地设在广东省林业科学研究院(广州)苗圃内温室,位于 23°14'N、113°23'E,海拔 25 m,典型亚热带季风气候,年平均温度 23℃,最低月平均气温 13.3℃(1月),最高月平均气温 38.1℃(8月),年降雨量 1 638 mm,4—9 月份的降雨量占全年的 80%,年平均湿度 79%。

2 材料与方法

2.1 试验材料

供试材料取自广东省林业科学研究院苗圃,分

别选取生长稳定的 1 年生马来沉香与土沉香播种苗。施肥前马来沉香苗高为(26.96 ± 1.35) cm,地径(4.58 ± 0.27) mm,土壤含 N 量 3.250%;土沉香苗高为(25.51 ± 1.53) cm,地径(4.70 ± 0.33) mm,土壤含 N 量为 3.349%。2009 年 4 月中旬植苗于塑料盆中(25 cm × 35 cm × 30 cm),每盆栽植 1 株,6 月 28 日开始进行不同施肥处理,每 15 d 施肥 1 次,2009 年 11 月 28 日施肥试验结束。

2.2 研究方法

2.2.1 试验设计施肥方法

本次试验采用指数施肥方法,以与植物生长的速率几乎相等的速率供应养分,呈指数递增,其方程为:

$$NT = N_s(e^r - 1) \quad (1)$$

式中:NT 为总的施 N 量, N_s 为施肥处理前植株体内的初始含 N 量, r 为施肥的总次数($t = 10$), r 为营养物相对添加率。

$$N_t = N_s(e^r - 1) - N_{t-1} \quad (2)$$

式中: N_s 、 r 同(1), N_t 为第 t 次施 N 量, r 为第几次施肥, N_{t-1} 为前 $t-1$ 次累积的施 N 量^[15]。

2.2.2 施肥量的确定

本试验共设 5 个指数施肥处理和 1 个不施肥处理(设置每株 0、1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 mg 6 个施肥量处理,编号为 I ~ VI),每个处理 30 株苗木,每次具体施肥量见表 1。综合考虑植物生长周期及施肥操作的方便性,指数施肥试验施肥的间隔设为 15 d,总施肥次数为 10 次($t = 10$)。采用水溶性肥料(普罗丹,质量比为 N:P:K = 20:20:20,Plant Products Co. Ltd., Brampton, Ont.) 为解决方案^[4,16-17],以 N 素为基准计算每次的施入量^[18]。

表 1 马来沉香与土沉香苗期指数施肥方案

Tab. 1 Schedule of fertilizer additions by seedling age for *A. malaccensis* and *A. sinensis*

mg·株⁻¹

品种	施肥处理	总量 / mg	t									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
马来沉香	I (N0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	II (N1 000)	1 000	5.92	9.38	14.86	23.55	37.31	59.11	93.67	148.42	235.17	372.62
	III (N2 000)	2 000	7.06	11.99	20.35	34.53	58.62	99.49	168.88	286.65	486.56	1 825.87
	IV (N3 000)	3 000	7.77	13.73	24.27	42.89	75.80	133.96	236.76	418.42	739.49	1 306.91
	V (N4 000)	4 000	8.29	15.08	27.42	49.88	90.71	164.99	300.07	545.75	992.57	1 805.24
	VI (N5 000)	5 000	8.71	16.19	30.11	55.99	104.12	193.64	360.10	669.68	1 245.40	2 316.06
土沉香	I (N0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	II (N1 000)	1 000	9.57	14.20	21.03	31.16	46.20	68.51	101.65	150.87	224.02	332.77
	III (N2 000)	2 000	11.68	18.52	29.37	46.58	73.93	117.38	186.43	296.24	470.93	748.93
	IV (N3 000)	3 000	12.99	21.43	35.36	58.40	96.47	159.44	263.62	436.07	721.61	1 194.62
	V (N4 000)	4 000	13.94	23.67	40.20	68.31	116.12	197.48	335.98	571.85	973.72	1 658.71
	VI (N5 000)	5 000	14.71	25.53	44.33	77.01	133.84	232.72	404.82	704.47	1 226.46	2 136.12

2.2.3 指标的测定

马来沉香与土沉香每个处理随机选取 10 株苗

于每次施肥前进行苗高、地径的测定;随机选取 3 株苗用去离子水将苗木冲洗干净,于根茎处将其分为

地上和地下 2 部分,放入 70 ℃ 烘箱内连续烘 48 h 至恒质量,测得生物量。每隔 30 d 随机选取不同施肥处理的马来沉香、土沉香苗木各 3 株,用万深 LA-S 植物根系分析系统(杭州万深检测科技有限公司)测得整株叶面积^[4],然后将其置于烘箱中,80 ℃ 下烘干 24 h 后,用 1/1 000 的电子天平称取干质量,计算比叶质量($LMA \text{ g/m}^2$) = 叶干质量/叶面积^[19]。

采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪(LED 红蓝光源叶室)完成各项光合生理指标和光合作用光响应的测定。为保证其他环境因子相对稳定,在测定过程中,将 CO_2 浓度控制在当前大气 CO_2 平均浓度值,叶片温度设置为 35 ℃,湿度为自然状态下的湿度。光响应曲线测定时光强设置为 2 000、1 800、1 500、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、20、0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,测量净光合速率的变化。各处理选取生长健壮、大小均匀的苗木 3 株,于 08:30—11:00 定位测定每株苗木 3 片健康成熟叶片(由上向下数第 5~7 片)。采用非直角双曲线模型对马来沉香与土沉香苗木叶片光响应曲线进行拟合,拟合方程为:

$$P_n = \frac{\alpha PAR + P_{\max} - \sqrt{(\alpha PAR + P_{\max})^2 - 4\theta\alpha P_{\max} PAR}}{2\theta} - R_d \quad (3)$$

式中: P_n 为净光合速率, α 为表观量子效率, PAR 为光有效辐射, P_{\max} 为光饱和时的最大净光合速率, R_d 为暗呼吸速率, θ 为光响应曲线曲角。利用上述公式对测量数据进行拟合,求出一系列苗木叶片光响应曲线的特征参数^[20-22],蒸腾速率 T_r ^[23],通过 P_n/T_r

计算瞬时水分利用效率(WUE_i)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003, SPSS(16.0) 软件进行作图、方差分析和多重比较(Duncan 法)。

3 结果与分析

3.1 N 素指数施肥处理对苗木生长表现及生物量的影响

不同指数施肥处理下的马来沉香苗期苗高、地径及生物量之间存在着显著的差异($P < 0.05$, 表 2)。施肥结束后,马来沉香处理 IV 的苗高(88.39 cm)、地径(11.21 mm)、总株生物量(19.45 g)显著高于其他处理。总株生物量的大小顺序为:处理 IV > 处理 III > 处理 V > 处理 II > 处理 VI > 处理 I。从各处理间马来沉香苗期生长表现的变化情况分析,各生长指标受 N 素影响的大小顺序依次为:总生物量 > 苗高 > 地径。不同 N 素供应水平下土沉香苗期苗高、地径及生物量同样存在着显著差异($P < 0.05$, 表 2),经指数施肥处理的(II~VI)土沉香生长指标及生物量均显著大于对照(处理 I)。其中,处理 IV 苗高(79.34 cm)最大,为对照的 1.46 倍,处理 IV 地径(9.68 mm)最大,为对照的 1.22 倍,处理 IV 总株生物量(18.84 g)最大,显著高于其他处理。总株生物量的大小顺序为:处理 IV > 处理 III > 处理 V > 处理 II > 处理 VI > 处理 I。从各处理间土沉香苗期生长表现的变化情况分析,各生长指标受 N 素影响的大小顺序为:总生物量 > 苗高 > 地径。

表 2 不同浓度指数施肥对马来沉香与土沉香生长表现及生物量的影响

Tab. 2 Effects of varied nitrogen exponential fertilization treatments on growth difference and biomass of *A. malaccensis* and *A. sinensis* seedlings

品种	处理	苗高/cm	地径/mm	全株生物量/g
马来沉香	I (N0)	63.20 ± 3.54e	8.01 ± 0.32d	9.87 ± 0.49e
	II (N1 000)	79.62 ± 3.98c	9.68 ± 0.58bc	12.53 ± 0.63d
	III (N2 000)	83.64 ± 7.53bc	10.25 ± 0.45b	15.67 ± 0.94b
	IV (N3 000)	88.39 ± 11.49a	11.21 ± 0.70a	19.45 ± 1.17a
	V (N4 000)	84.41 ± 10.13b	10.01 ± 1.07b	14.05 ± 1.09c
	VI (N5 000)	73.02 ± 6.58d	9.15 ± 0.79c	12.17 ± 0.61d
土沉香	I (N0)	54.46 ± 5.23d	7.96 ± 0.31d	7.68 ± 0.46f
	II (N1 000)	69.27 ± 0.786b	9.41 ± 0.38ab	13.77 ± 0.90d
	III (N2 000)	73.99 ± 5.92b	9.25 ± 0.51abc	16.87 ± 1.1b
	IV (N3 000)	79.34 ± 9.52a	9.68 ± 0.39a	18.84 ± 0.83a
	V (N4 000)	70.71 ± 9.19b	9.02 ± 0.59bc	15.60 ± 0.78c
	VI (N5 000)	65.04 ± 5.92c	8.73 ± 0.71c	10.86 ± 0.67e

注:表中字母为 Duncan 多重比较结果,每栏中处理间相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著 $P < 0.05$ 。

3.2 N 素指数施肥处理对苗木整株叶面积、比叶质量的影响

不同 N 素供应水平的指数施肥对马来沉香与土沉香整株叶面积的影响见图 1。各处理马来沉香

与土沉香整株叶面积随着 N 素的施入而增加,在施肥试验末期(11 月份)存在着显著的差异($P < 0.05$)。在指数施肥初期,2 个品种沉香处理 V、VI 的整株叶面积增长较快,均显著大于其他处理,7 月

份分别达到了 339.44 和 345.19 cm^2 、319.46 和 320.18 cm^2 ;随着 N 素施入量的增大,增长速度变缓,指数施肥末期,二者在处理 IV 的整株叶面积最大。11 月份各指数施肥处理马来沉香整株叶面积的大小顺序为:处理 IV (1 995.33 cm^2) > 处理 III

(1 806.47 cm^2) > 处理 V (1 749.65 cm^2) > 处理 II (1 578.63 cm^2) > 处理 VI (1 389.27 cm^2) > 处理 I (1 042.8 cm^2);土沉香的大小顺序为:处理 IV (1 366.57 cm^2) 最大,处理 I (926.08 cm^2) 最小。

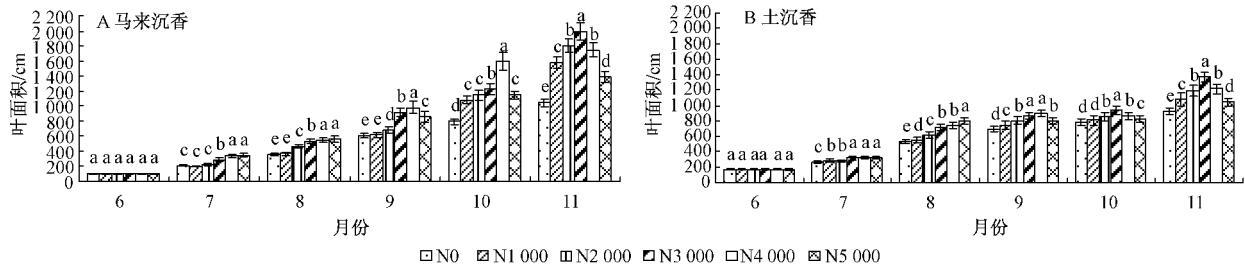


图1 不同施肥方法浓度指数施肥对马来沉香与土沉香叶面积的影响

Fig. 1 Effects of varied nitrogen exponential fertilization treatments on leaf area of *A. malaccensis* and *A. sinensis* seedlings

比叶质量是衡量叶片光合作用性能的一个参数,它反映了植物的光合碳同化能力,多数情况下, LMA 随光强的增加而增大^[24-26]。马来沉香与土沉香苗期 LMA 的季节变化如图 2 所示。总体来看,马来沉香与土沉香苗期生长季内的 LMA 变化趋势是生长初期和末期低,而中期比较高;不同 N 素供应水平苗木的 LMA 变化曲线不同,2 个树种 LMA 变化曲线可分为双峰式和单峰式 2 种类型,马来沉香对照(处理 I)与土沉香指数施肥处理 I ~ V 的

LMA 季节变化曲线是双峰式。马来沉香处理 I 第 1 个高峰出现在 7 月,第 2 个高峰出现在 11 月;土沉香处理 I 第 1 个高峰出现在 7 月,第 2 个高峰出现在 11 月;土沉香处理 II ~ V 第 1 个高峰出现在 8 月,第 2 个高峰出现在 11 月。马来沉香指数处理 II ~ VI,土沉香指数施肥处理 VI 为单峰式。不同树种之间 LMA 季节变化的差异,是树种生物学特性与环境条件共同作用的结果,即为不同树种适应环境方式相异而在叶片形状上的表现。

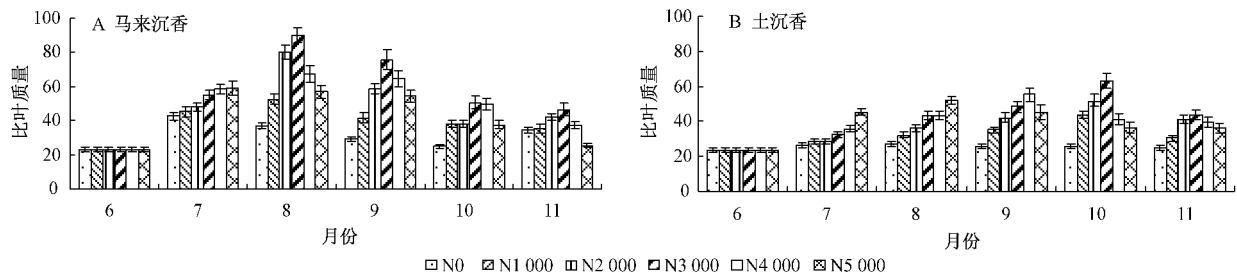


图2 不同浓度指数施肥施肥方法对马来沉香与土沉香比叶质量的影响

Fig. 2 Effects of varied nitrogen fertilization treatments on LMA of *A. malaccensis* and *A. sinensis*

LMA 反映了植物体物质积累和转移的状况^[27]。施入 N 素后, LMA 增加迅速,苗木 LMA 对 N 素的响应随着浓度增加而增加,7 月马来沉香指数施肥处理 I ~ VI 增长幅度分别是 11.9%、21.5%、20.2%、37.5%、50.5%、92.7%;土沉香为 25.4%、36.5%、52.3%、58.4%、84.2%、93.2%,说明生长季初期叶片组织结构迅速形成,功能在不断完善,7、8 月,树木生长旺盛,有机物合成和积累迅速,同时此期也是 1 年中降水的集中期,树木得到较为充足的水分供应,所以总叶面积在快速增加的同时, LMA 也在升高。而在施肥试验末期,树木叶片衰老失水,同时养分发生转移,因此 LMA 下降。

3.4 N 素指数施肥处理对苗木蒸腾速率的影响

蒸腾作用 (T_r) 是水分从活的植物体表面以水蒸汽状态散失到大气中的过程^[28]。整个过程不仅

受外界环境条件的影响,而且还受植物本身的调节和控制,因此它是一项复杂的生理过程,也是植物叶片重要的生理功能之一^[24]。不同 N 素供应水平马来沉香与土沉香蒸腾高峰主要集中在 7、8 月份,10、11 月份随着外界温度降低、光照减弱,蒸腾作用也在减弱。其中,指数施肥处理 III 马来沉香叶片 T_r (4.032 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、处理 II 土沉香叶片 T_r (3.830 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 在 9 月份达到最大(图 3A、B)。

11 月份,马来沉香 N 素各处理的 T_r 大小顺序为:处理 IV > 处理 III > 处理 V > 处理 VI > 处理 II > 处理 I;土沉香为:处理 IV > 处理 V > 处理 VI > 处理 III > 处理 II > 处理 I。蒸腾作用是植物水循环的动力,而且当蒸腾作用正常进行时,气孔开放,有利于 CO_2 进入叶片进行光合作用。综上所述,在蒸

腾强度较大时(8月份),处理Ⅳ的 T_r 最大,在蒸腾强度较弱时(11月份),各处理 T_r 均呈现下降的趋势,此时以处理Ⅳ最大,说明过量和少施 N 肥都会

在后期降低马来沉香与土沉香叶片的蒸腾速率,从而光合作用下降。

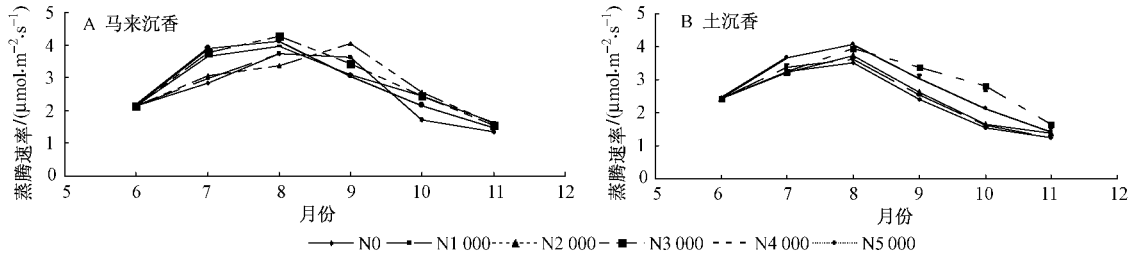


图 3 不同浓度指数施肥施肥方法对马来沉香与土沉香蒸腾速率的影响

Fig. 3 Effects of varied nitrogen exponential fertilization treatments on T_r of *A. malaccensis* and *A. sinensis* seedlings

3.5 N 素指数施肥对苗木水分利用效率的影响

叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)用净光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r)的比值表示。不同浓度 N 素供应水平对马来沉香、土沉香叶片瞬时水分利用效率的影响见表 3。就总的趋势而言,随着 N 素的施入, WUE_i 经历了先升高后降低再升高再降低过程。马来沉香与土沉香 WUE_i 在 9 月份最高,11 月份最低。比较 9 月份指数施肥各处理 WUE_i 发现,马来

沉香处理Ⅳ的最高($6.78 \mu\text{mol}/\text{mmol}$),为对照的 1.67 倍,其次按大小顺序是处理Ⅴ、处理Ⅲ、处理Ⅵ、处理Ⅱ;土沉香叶片 WUE_i 的大小顺序是处理Ⅳ>处理Ⅲ>处理Ⅴ>处理Ⅵ>处理Ⅱ>处理Ⅰ;其中,处理Ⅳ最大($6.02 \mu\text{mol}/\text{mmol}$),表明在相同 N 素供应水平的指数施肥试验中,马来沉香叶片 WUE_i 在同一时期大于土沉香。在 11 月份施肥末期,马来沉香、土沉香叶片 WUE_i 与 9 月顺序相同。

表 3 不同浓度指数施肥对马来沉香与土沉香叶片水分利用效率的影响

$\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$

Tab. 3 Effects of varied nitrogen exponential fertilization treatments on WUE_i of *A. malaccensis* and *A. sinensis* seedlings

树种名称	施肥方法	处理	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
马来沉香	指数施肥	I (N0)	2.68	2.73	3.51	4.06	2.07	1.67
		II (N1 000)	2.68	3.11	3.88	4.88	2.46	1.79
		III (N2 000)	2.68	3.62	4.53	5.47	2.63	1.92
		IV (N3 000)	2.68	4.68	4.95	6.78	3.86	2.04
		V (N4 000)	2.68	3.54	3.91	6.12	3.33	1.93
		VI (N5 000)	2.68	2.97	3.53	4.97	2.28	1.71
土沉香	指数施肥	I (N0)	2.75	3.00	3.14	4.06	1.99	1.35
		II (N1 000)	2.75	3.18	3.68	4.28	2.32	1.66
		III (N2 000)	2.75	3.31	4.06	5.05	2.46	1.88
		IV (N3 000)	2.75	3.87	4.56	6.02	3.19	1.94
		V (N4 000)	2.75	3.30	3.67	4.89	2.92	1.76
		VI (N5 000)	2.75	3.11	3.34	4.33	2.06	1.53

3.6 N 素指数施肥处理对苗木光响应曲线的影响

采用非直角双曲线模型对不同 N 素供应水平下马拉沉香与土沉香 10 月份净光合速率对光的响

应曲线进行拟合,达到了良好的效果, R^2 的范围是 0.947~0.999(表 4)。

图 4A 为 6 个处理下的马来沉香光响应曲线,

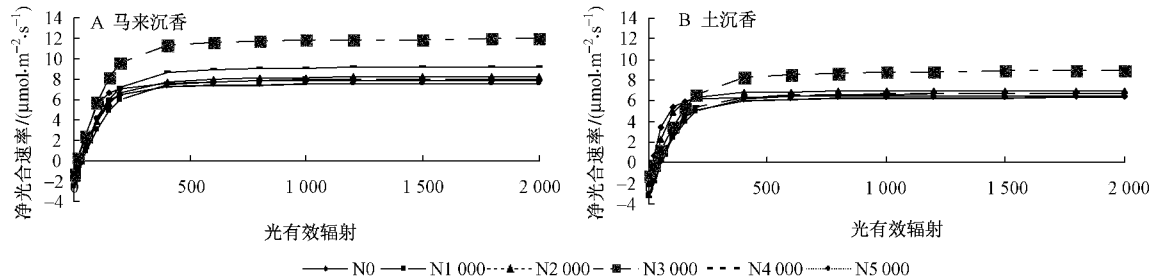


图 4 不同指数施肥浓度下马来沉香与土沉香光响应曲线(10 月)

Fig. 4 Effects of varied nitrogen exponential fertilization treatments on light response curve of *A. malaccensis* and *A. sinensis* seedlings(October)

结果显示: 处理 VI 的 P_n 对光强的响应值明显高于其他处理, 最低的是处理 VI。不同指数施肥处理下马来沉香苗期净光合速率对光强的响应曲线参数特征值存在着显著的差异 ($P < 0.05$)。由表 4 可得, 表观量子效率 (α) 的大小顺序为: 处理 IV ($0.079\ 8$) > 处理 V ($0.076\ 7$) > 处理 III ($0.069\ 1$) > 处理 II ($0.068\ 2$) > 处理 I ($0.063\ 3$) > 处理 VI ($0.059\ 0$), 表明处理 IV 的马来沉香叶片转化光能的效率高。处理 IV 的 P_{\max} 值最大, 为 $13.4\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 显著高于其他处理, 处理 I 最低, 仅为 $9.17\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。暗呼吸速率 (R_d) 可以判断植物在黑暗时的消耗状况, 按消耗能力大小来排序为: 处理 VI > 处理 II > 处理 III > 处理 IV, V > 处理 I。处理 III 的光补偿点 (LCP) 最大 ($23.9\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 显著高于其他处理, 处理 I 的最小 ($14.5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 显著低于其他处理。光饱和点 (LSP) 的大小顺序为: 处理 VI > 处理 V > 处理 III > 处理 VI > 处理 II > 处理 I, 其中, 处理 IV 的 LSP 值高达 $1\ 130\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

图 4B 为 6 个指数施肥处理下的土沉香光响应

曲线, 与马来沉香趋势相似, 处理 VI 光响应曲线明显高于其他处理, 其次是处理 III, 最低的是处理 VI, 其余处理光响应曲线较为接近。不同浓度指数施肥处理下马来沉香苗期净光合速率对光强的响应曲线参数特征值存在着显著的差异 (表 4, $P < 0.05$)。表观量子效率的大小顺序为: 处理 III > 处理 IV > 处理 V > 处理 VI > 处理 II > 处理 I。 R_d 处理 VI 为 $-1.29\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 显著大于其他处理, 且与处理 I ($-1.39\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 差异不显著。 P_{\max} 的范围是 $7.91 \sim 10.31\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 大小顺序为: 处理 IV > 处理 V > 处理 III > 处理 VI > 处理 II > 处理 I, 其中处理 IV、V、III、VI 间差异不显著。处理 V、VI 的 LCP 最大 ($46.6、46.6\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 显著高于其他处理, 处理 I 的最小 ($12.5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。LSP 的大小顺序为: 处理 IV ($1\ 120\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) > 处理 V > 处理 VI > 处理 III > 处理 II > 处理 I ($600\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。综上可得, 当施入 N 量 > 3 000 mg/株, 光合能力及各项响应特征指标不再增加。

表 4 不同浓度 N 素指数施肥下马来沉香与土沉香光合速率光响应曲线参数比较

Tab.4 Effects of varied nitrogen exponential fertilization treatments on parameters of photosynthetic rate in response to light intensity of *A. malaccensis* and *A. sinensis* seedlings

树种	方法	处理	$\alpha /$ ($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$P_{\max} /$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$R_d /$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	R^2
马来沉香	指数施肥	I	$0.063\ 3 \pm 0.004\text{cd}$	$9.17 \pm 0.459\text{d}$	$-1.21 \pm 0.061\text{a}$	$14.5 \pm 0.725\text{e}$	$620 \pm 21\text{d}$	0.947
		II	$0.068\ 2 \pm 0.003\text{bc}$	$9.80 \pm 0.490\text{cd}$	$-1.64 \pm 0.082\text{c}$	$31.6 \pm 1.580\text{a}$	$881 \pm 32\text{c}$	0.978
		III	$0.069\ 1 \pm 0.003\text{b}$	$9.91 \pm 0.496\text{bcd}$	$-1.41 \pm 0.071\text{b}$	$23.9 \pm 1.195\text{b}$	$978 \pm 44\text{b}$	0.954
		IV	$0.079\ 8 \pm 0.004\text{a}$	$13.40 \pm 0.670\text{a}$	$-1.26 \pm 0.063\text{a}$	$16.4 \pm 0.820\text{d}$	$1\ 130 \pm 54\text{a}$	0.973
		V	$0.076\ 7 \pm 0.002\text{a}$	$10.60 \pm 0.530\text{b}$	$-1.26 \pm 0.063\text{a}$	$21.3 \pm 1.065\text{c}$	$1\ 010 \pm 50\text{b}$	0.994
		VI	$0.059\ 0 \pm 0.004\text{d}$	$10.30 \pm 0.515\text{bc}$	$-2.59 \pm 0.130\ \text{d}$	$32.5 \pm 1.625\text{a}$	$955 \pm 47\text{b}$	0.979
土沉香	指数施肥	I	$0.041\ 1 \pm 0.006\text{c}$	$7.91 \pm 0.395\text{c}$	$-1.39 \pm 0.070\ \text{a}$	$12.5 \pm 0.521\text{e}$	$600 \pm 30\text{d}$	0.954
		II	$0.048\ 3 \pm 0.002\text{c}$	$8.83 \pm 0.442\text{b}$	$-2.03 \pm 0.102\ \text{b}$	$42.3 \pm 1.113\text{b}$	$867 \pm 43\text{c}$	0.973
		III	$0.093\ 2 \pm 0.005\text{a}$	$9.80 \pm 0.490\text{a}$	$-2.03 \pm 0.102\ \text{b}$	$22.7 \pm 1.100\text{d}$	$944 \pm 47\text{b}$	0.994
		IV	$0.070\ 5 \pm 0.004\text{b}$	$10.31 \pm 0.515\text{a}$	$-1.29 \pm 0.065\ \text{a}$	$25.0 \pm 0.889\text{c}$	$1\ 120 \pm 56\text{a}$	0.979
		V	$0.066\ 3 \pm 0.003\text{b}$	$10.11 \pm 0.505\text{a}$	$-3.29 \pm 0.165\ \text{c}$	$46.6 \pm 0.798\text{a}$	$950 \pm 47\text{b}$	0.992
		VI	$0.051\ 4 \pm 0.004\text{c}$	$9.57 \pm 0.479\text{a}$	$-3.11 \pm 0.156\ \text{c}$	$46.6 \pm 1.022\text{a}$	$950 \pm 41\text{b}$	0.989

注: 表中字母为 Duncan 多重比较结果, 每栏中处理间含相同字母表示差异不显著, 否则表示差异显著 $P < 0.05$ 。

4 结论与讨论

施肥可提高植株的光能利用率和生产力, 指数施肥作为理想的施肥方法, 根据苗期指数生长的需要, 增加施肥量, 从而诱导出稳定态营养, 广泛地应用于黑云杉 (*Picea mariana*)^[17]、铁杉 (*Tsuga heterophylla*)^[16] 等树种的 N 素营养研究。在本研究中, N 素指数施肥对马来沉香与土沉香生长、光合生理具有明显的促进作用, 其苗期地径、苗高、生物量、整株叶面积、比叶质量随着 N 素施用量的增加而递增, 至 3 000 mg/株 (处理 IV) 后趋于稳定, 表明 N 素

供应充足适量, 叶片可以合成较多的叶绿素, 提高光合性能, 从而实现植物高产, 施 N 量过大会造成过剩 N 代谢消耗和营养生长旺盛, 进而与产量器官生长竞争光合产物^[29]。在相同施 N 浓度条件下, 马来沉香各生长、生理指标均大于土沉香。

随着供 N 水平的增高, 蒸腾速率也随着增大, 至每株施 N 量 3 000 mg 时达到最大, 之后随着供 N 水平的增高而降低, 表明 2 个品种沉香对 N 素利用是有限度的。就总趋势而言, 各处理马来沉香与土沉香叶片蒸腾高峰主要集中在 7、8 月份, WUE_i 经历了先升高后降低再升高再降低过程。N 素有效地

提高各处理的叶片瞬时水分利用效率。指数施肥处理下马来沉香与土沉香对光强响应特征相似,当N施入量为3 000 mg/株时,光合能力最大,当N施入量>3 000 mg/株,光合能力及各项响应特征指标不再增加。马来沉香处理Ⅳ(0.079 8),土沉香处理Ⅲ(0.093 2)表观量子效率最大,表明该处理下的苗木叶片吸收与转换光能的色素蛋白复合体可能越多,利用弱光的能力强^[30]。本试验应用指数施肥技术,探讨不同浓度N素施入量对马来沉香与土沉香光合特性的影响,至N施用量每株>3 000 mg后,苗木生长表现、生物量及光合生理指标趋于稳定,可以得出3 000 mg/株是最佳施N量,本研究为实现高产、优质和高效育苗技术提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] BURGESS D. Western hemlock and Douglas fir seedling development with exponential rates of nutrient addition[J]. *Forest Science*, 1991, 37(1): 54-67.
- [2] QUORESHI A M, TIMMER V R. Early outplanting performance of nutrient-loaded containerized black spruce seedlings inoculated with *Laccaria bicolor*: A bioassay study[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(5): 744-752.
- [3] DUMROESE R K, DUMROESE D S, SALIFU K F, et al. Exponential fertilization leaching fractions, and early out planting performance of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(12): 2961-2968.
- [4] 王冉,李吉跃,张方秋,等.不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 98-106.
- [5] 魏红旭,徐程扬,马履一,等.不同指数施肥方法下长白落叶松播种苗的需肥规律[J]. *生态学报*, 2010, 30(3): 685-690.
- [6] 陈琳,曾杰,徐大平,等.氮素营养对西南桦幼苗生长及叶片养分状况的影响[J]. *林业科学*, 2010, 46(5): 35-40.
- [7] 贾慧君,INGESTAD T. 兰考泡桐和刺槐幼苗最适营养需要的研究[J]. *林业科学*, 1989, 25(1): 1-6.
- [8] 贾慧君,郑槐明,李江南,等.稳态营养原则在杉木、湿地松苗木施肥中的应用[J]. *北京林业大学学报*, 1994, 16(4): 65-74.
- [9] 贾慧君,郑槐明.兰考泡桐幼苗稳态矿质营养比较研究[J]. *北京林业大学学报*, 1993, 15(3): 12-17.
- [10] 贾慧君,郑槐明.湿地松容器苗稳态营养与土壤矿化作用的研究[J]. *林业科学*, 1998, 34(1): 9-17.
- [11] GUILLERMO M P, MARIA V L, PABLO L P. Photosynthetic plasticity of *Nothofagus pumilio* seedlings to light intensity and soil moisture[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 243: 274-282.
- [12] JIN Q I, LU J J, LIU J H, et al. Flavonoid and a rare benzophenone glycoside from the leaves of *Aquilaria sinensis*[J]. *Chem Pharm Bull*, 2009, 57(2): 134-137.
- [13] LUO Y Q, HUI D F, CHENG W X et al. Canopy quantum yield in a mesocosm study[J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 100: 35-48.
- [14] 梁振益,张德拉,刘长生,等. CGC-MS 法测定白木香挥发油的化学成分[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2005, 23(3): 228-232.
- [15] INGESTAD T, LUND S A B. Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants[J]. *For Res*, 1986(1): 439-453.
- [16] 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.
- [17] SALIFU K F, TIMMER V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33: 1287-1294.
- [18] IMO M, TIMMER V R. Vector diagnosis of nutrient dynamics in mesquite seedlings[J]. *Forest Science*, 1997, 43(2): 1-6.
- [19] 郑淑霞,上官周平.不同功能型植物光合特性及其与叶氮含量、比叶重的关系[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 171-181.
- [20] RICHARDSON A D, BERLVN G. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield[J]. *Vermont, USA American Journal of Botany*, 2002, 89(1): 88-94.
- [21] 王冉,何茜,李吉跃,等.中国12种珍稀树种光合生理特性[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(11): 15-20.
- [22] 刘奇峰,梁宗锁,蔡靖,等.4种药用植物光合特性的研究[J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(6): 10-13.
- [23] 刘茜.樟树叶片蒸腾特性及其与生理生态因子关系分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2009, 29(1): 1-6.
- [24] ROSATI A, BADECK F W, DEJONG T M. Estimating canopy light interception and absorption using leaf mass per unit leaf area in *Solanum melongena*[J]. *Annual of Botany*, 2001, 88: 101-109.
- [25] GRASSI G, COLOM M R, MINOTTA G. Effect of nutrient supply on photosynthetic acclimation and photo inhibition of one-year-old foliage of *Picea abies*[J]. *Physiologia Plantarum*, 2001, 111: 245-254.
- [26] VINCENT G. Leaf photosynthetic capacity and nitrogen content adjustment to canopy openness in tropical forest tree seedlings[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2001, 17: 495-509.
- [27] 冯玉龙,曹坤芳,冯志立,等.四种热带雨林树种幼苗比叶重,光合特性和暗呼吸对生长光环境的适应[J]. *生态学报*, 2002, 22(6): 901-910.
- [28] 冯建灿,张玉洁,张秋娟,等.干旱胁迫与抗蒸腾剂对喜树几项生理指标及喜树碱含量的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2002, 36(2): 138-143.
- [29] 金继运,何萍.氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(4): 55-62.
- [30] 许大全.光合作用效率[M].上海:上海科学技术出版社, 2006.

(责任编辑 赵 勃)