植物营养与肥料学报 2012,18(5):1193-1203
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同浓度指数施肥方法下马来沉香与土沉香苗期需肥规律

何 茜[1], 王 冉[2], 李吉跃[1*], 张方秋[3*], 丁晓纲[3], 潘 文[3]
(1 华南农业大学林学院,广东广州 510642; 2 河南省森林航空消防站,河南郑州 471003;
3 广东省林业科学研究院,广东广州 510520)

摘要: 设置每株施 N 0、1000、2000、3000、4000、5000 mg 的 6 个氮素水平处理,进行珍贵树种马来沉香与土沉香苗期指数施肥试验,探讨不同氮素供应水平对其苗期生长、叶片养分含量以及根系形态指标的影响,旨在揭示马来沉香与土沉香苗期的氮素需求特征,确定其适宜施氮量。结果表明,马来沉香与土沉香苗期的地径、苗高以及生物量随着氮素供应水平的增加而增大,当每株施氮量大于 3000 mg 后其生长和生物量趋于稳定; 施氮处理为 3000 mg/plant 时的马来沉香与土沉香根系各生长和形态指标均显著大于其他处理; 运用临界浓度法确定出马来沉香苗期叶片氮、磷、钾含量的临界值分别为 35.55、1.75、17.99 g/kg,最适含量范围分别为 35.55 ~ 53.11、1.75 ~ 2.73、17.99 ~ 26.63 g/kg; 土沉香苗期叶片氮、磷、钾含量的临界值分别为 37.78、3.08、18.89 g/kg,最适含量范围分别为 37.78 ~ 58.56、3.08 ~ 4.44、18.89 ~ 29.28 g/kg。综合 3 种养分的最适含量范围,推断出马来沉香和土沉香苗期的最适施氮量均为 3000 mg/plant。

关键词: 马来沉香; 土沉香; 指数施肥; 叶片养分含量; 根系
中图分类号: S714.8　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)05-1193-11

Nutrient upkate of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different exponential regimes

HE Qian[1], WANG Ran[2], LI Ji-yue[1*], ZHANG Fang-qiu[3*], DING Xiao-gang[3], PAN Wen[3]
(*1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Henan Forest Aviation Fire Station, Zhengzhou 450003, China; 3 Guangdong Forest Research Institute, Guangzhou 510520, China*)

Abstract: Exponential nutrient delivery can bring about a steady state of nutrition in the plant and improve nutrient uptake, and hence accelerate seedling growth. An exponential fertilization trial was conducted with six N dose levels (applying a total of 0, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 mg/plant in this experiment) of nitrogen to assess the effects on different nitrogen levels on growth and foliar nutrient status of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings with the different nitrogen levels. The objective of this study was to reveal the nitrogen demand and determine the optimal nitrogen amount for *A. malaccensis* and *sinensis* seedlings. It was indicated that ground diameter, height and biomass seedlings increased with the increase of nitrogen supply, up to 3000 mg/plant, after then growth performance and biomass were unchanged and leaf area remarkable decreased. Critical level approach was used for identifying N, P and K deficiencies by means of foliar analysis in *A. malaccensis* seedlings, and the critical values of N, P, and K(were 35.55, 1.75 and 17.99 g/kg, while their optimal concentrations ranged from 35.55 to 53.11, 1.75 to 2.73, 17.99 to 26.63 g/kg, respectively. And the critical values of N, P and K of *A. sinensis* were 37.78, 3.08 and 18.89 g/kg, while their optimal concentrations ranged from 37.78 to 58.56, 3.08

收稿日期: 2011-07-22　　**接受日期:** 2012-05-16
基金项目: "948"国际引进项目"马来沉香等优良珍贵树种及扩繁技术引进"(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 号]资助。
作者简介: 何茜(1981—),女,四川成都人,博士,讲师,主要从事森林培育与栽培技术研究。E-mail: heqian69@126.com
* 通讯作者 E-mail: ljyymy@vip.sina.com; fqzhang001@yahoo.com.cn

to 4.44, 18.89 to 29.28 g/kg. Based on these data, it could be inferred that 3000 mg/plant would be the optimal nitrogen amount for *A. malaccensis* and sinensis seedlings.

Key words: *Aquilaria malaccensis*; *Aquilaria sinensis*; exponential fertilization; leaf nutrient concentration; root

在苗木培育过程中主要通过施肥来提高苗木质量,由于施肥方法的不同养分利用效率也存在很大差异,如何提高苗木的养分利用效率也已成为目前研究的热点之一[1]。瑞典生态生理学家 Ingestad 基于溶液培养体系研究,提出按照植物相对生长速率及时、定量地供应各种营养物质的植物稳态矿质营养理论[2],使植物生长速率和体内营养状况均保持稳定状态,避免因供应的养分不能及时被植物所吸收或者淋洗作用而造成的养分有效性降低,从而提高养分的利用率[3]。Timmer 将稳态矿质营养理论应用于轻型基质育苗研究中,明确提出指数施肥法[4],并对美国红松(*Pinusreslnosa*)容器苗进行不同剂量指数施肥与常规施肥的对比研究,指出以每株 N 9.75 mg 的剂量进行指数施肥的效果等同于以每株 N 39 mg 的剂量进行常规施肥[5],指数施肥法提高施肥的有效性。此后,指数施肥法被广泛地应用于北方红栎(*Quercusrubra*)[6]、黑云杉(*Picea mariana*)[7]、铁杉(*Tsuga heterophylla*)[8]等树种的氮素营养研究。指数施肥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。大量研究结果表明,指数施肥方法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,同时也避免了多余的肥料对土壤造成污染[9-11]。

我国自20世纪80年代初引入植物稳态矿质营养理论和相关技术,现在林业上已有一些初步试验报道,取得了较好的效果[12-15]。而应用指数施肥法揭示不同氮素水平下林木苗期的生长表现、养分状况从而提出其氮素需求以及适宜施氮量的研究却鲜见报道,尤其对于南方珍稀树种苗期氮素营养研究尚未见专门报道。马来沉香(*Aquilaria malaccensis*)是世界级濒危树种,土沉香(*Aquilaria sinensis*)为我国Ⅱ级重点保护野生植物,现国内外对马来沉香与土沉香的研究大多集中在生物学和生态学特性、快繁技术等方面,有关其施肥方面的报道还很少,本文采用指数施肥法探究氮素供应水平对2个品种沉香苗期生长与养分状况的影响,旨在揭示沉香苗期的氮素需求特征,确定其适宜的施氮量,为马来沉香与土沉香的合理施肥、育苗技术的完善和制定栽培集约管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 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),年降水量1638 mm,4～9月份的降水量占全年的80%,年平均湿度79%。

1.2 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。施肥前供试马来沉香的总平均苗高26.96±1.35 cm,地径4.58±0.27 mm,含氮量3.250%;供试土沉香总平均苗高25.51±1.53 cm,地径4.70±0.33 mm,含氮量3.349%。盆栽土壤为沙壤土,pH值7.04,有机质含量7.419 g/kg,全氮0.126 g/kg,全磷0.298 g/kg,全钾0.541 g/kg,速效氮、磷、钾含量分别为58.51、16.75、139.85 mg/kg。盆栽土壤理化性质均在广东省土壤研究所测定。土壤有机质用重铬酸钾容量法,全氮用半微量凯氏法,全磷用氢氟酸-高氯酸消煮—钼锑抗比色法,全钾用氢氟酸-高氯酸消煮—火焰光度法测定;速效氮用碱解扩散法,速效磷用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,速效钾用乙酸铵浸提—火焰光度法测定。

1.3 研究方法

1.3.1 施肥方法　本试验采用指数施肥方法,以与植物生长速率几乎相等的速率供应养分,呈指数递增,其方程式为:

$$NT = N_s(e^{rT} - 1) \quad (1)$$

式中:NT为总的施氮量;N_s为施肥处理前植株体内的初始含氮量;T为施肥的总次数(T=10);r为营养物相对添加率。

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

式中:N_s,r同式(1),Nt为第t次施氮量,t为第几次施肥,N_{t-1}为前$t-1$次累积的施氮量[15]。

1.3.2 施肥量的确定　2009年4月中旬,植苗于规格为25 cm×35 cm ×30 cm(底径×上口径×高)的塑料盆中,每盆栽植1株,6月28日开始用不同施肥方法对其进行处理,试验共设5个指数施肥处理

和 1 个不施肥处理。综合考虑植物生长周期及施肥操作的方便性,指数施肥试验施肥间隔设为 15 d,总施肥次数为 10 次(T = 10)。为了除去潜在的由施肥、灌溉条件对苗木生长和生理产生的交互影响,采用水溶性肥料(普罗丹,N∶P∶K = 20∶20∶20,Plant Products Co. Ltd., Brampton, Ont.)为解决方案[6-7, 16]。以氮为基准计算每次的施入量[17],施入量见表 1。

表 1　马来沉香与土沉香苗期指数施肥方案(mg/plant)

Table 1　Schedule of fertilizer additions by seedling age for quilaria *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis*

品种 Species	处理 Treatment	总氮量 Tot. N (mg)	施肥次数 Fertilization times									
			1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
马来沉香 *Aquilaria malaccensis*	N0	0										
	N1000	1000	5.92	9.38	14.86	23.55	37.31	59.11	93.67	148.42	235.17	372.62
	N2000	2000	7.06	11.99	20.35	34.53	58.62	99.49	168.88	286.65	486.56	1825.87
	N3000	3000	7.77	13.73	24.27	42.89	75.80	133.96	236.76	418.42	739.49	1306.91
	N4000	4000	8.29	15.08	27.42	49.88	90.71	164.99	300.07	545.75	992.57	1805.24
	N5000	5000	8.71	16.19	30.11	55.99	104.12	193.64	360.10	669.68	1245.40	2316.06
土沉香 *Aquilaria sinensis*	N0	0										
	N1000	1000	9.57	14.20	21.03	31.16	46.20	68.51	101.65	150.87	224.02	332.77
	N2000	2000	11.68	18.52	29.37	46.58	73.93	117.38	186.43	296.24	470.93	748.93
	N3000	3000	12.99	21.43	35.36	58.40	96.47	159.44	263.62	436.07	721.61	1194.62
	N4000	4000	13.94	23.67	40.20	68.31	116.12	197.48	335.98	571.85	973.72	1658.71
	N5000	5000	14.71	25.53	44.33	77.01	133.84	232.72	404.82	704.47	1226.46	2136.12

1.3.3 测定指标和方法　在进行施肥处理之前测定马来沉香和各处理苗木的苗高和地径作为第 1 次的数据,并计算总平均值以便了解供试苗木的总体情况。指数施肥每 15 d 进行一次,2009 年 11 月 28 日施肥试验结束。其中,将 6 ~ 7 月定为指数施肥初期,8 ~ 9 月定为指数施肥中期,10 月定为指数施肥中后期,11 月底为指数施肥末期。试验期间,在每个品种各处理中随机选取 10 株苗于每次施肥前进行苗高、地径的测定,求得平均值作为各处理苗木的生长量; 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 至恒重,分别称取其干重得生物量; 每个处理随机抽取 3 株苗木,将其叶片用去离子水洗净、晾干,于 70℃烘箱内连续烘 48 h 至恒重,研磨后分别采用扩散法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定叶片全氮、全磷、全钾含量(LY/T 1269-1999 和 LY/T 1270 - 1999)。根系取样时,将栽植容器放在尼龙网筛上用水冲去泥土,获得整体根系,用流水缓缓冲洗干净,冲洗时在根系下面放置 100 目筛以防止脱落的根系被水冲走,之后迅速将根系带入有空调控温的室内,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)测得整株根系的根长、根表面积、根平均直径、根体积,扫描后的根系全部在 70℃下烘干 48 h 后称其总根干重[18]。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Excel 2003,SPSS(16.0)软件作图、进行方差分析、回归分析,Duncan 法进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同浓度指数施肥处理对苗木生长及生物量的影响

从图 1、图 2 和表 2 可以看出,不同浓度指数施肥处理下,马来沉香苗高均高于对照(N0),其中 N3000 处理的苗高与 N0 相比增幅达 39.86%,其次是 N4000(增幅 33.56%)、N2000(增幅 32.3%)、N1000(增幅 25.98%)、N5000(增幅 15.54%)。表

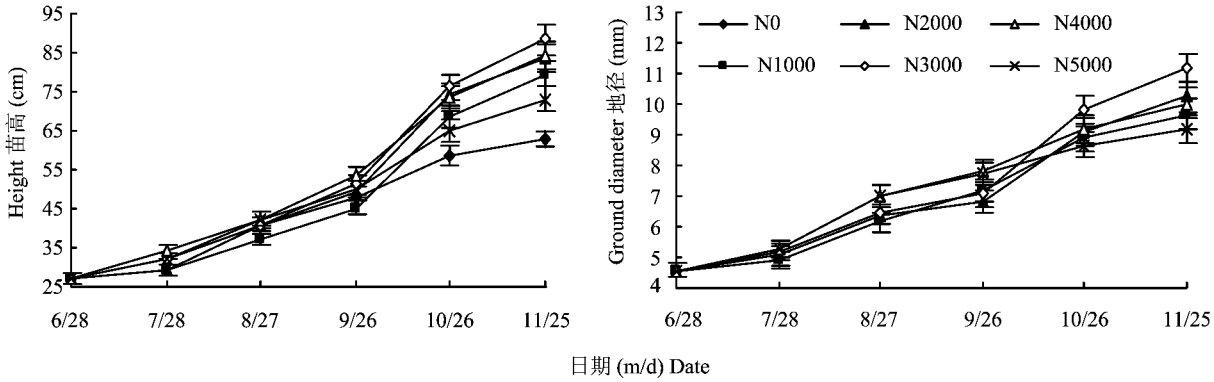

图1 不同指数施肥处理对马来沉香苗高和地径生长的影响

Fig. 1 Variation of height and diameter of *A. malaccensis* seedlings in different exponential fertilization treatments

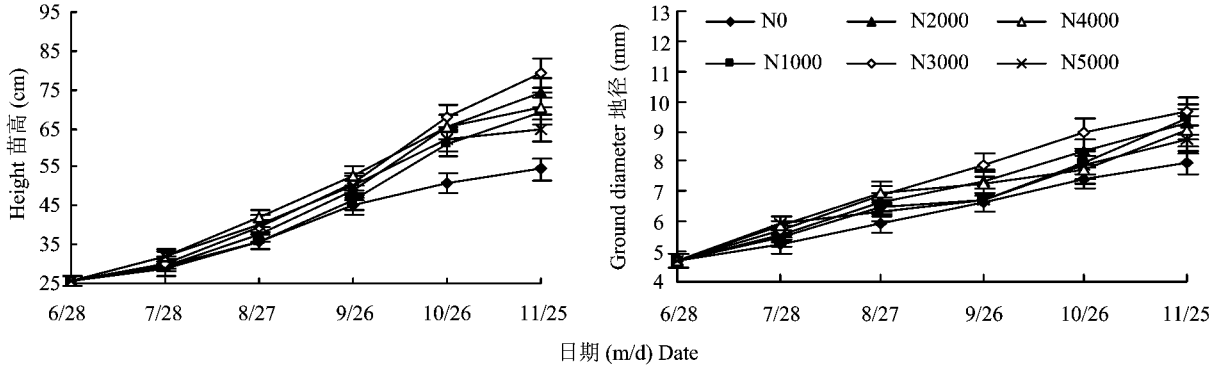

图2 不同指数施肥处理对土沉香苗高和地径生长的影响

Fig. 2 Variation of height and diameter of *A. sinensis* seedlings in different exponential fertilization treatments

2表明,试验结束时,马来沉香不同处理间苗高存在显著差异($P<0.05$),其中N3000处理的苗高为88.39 cm,显著高于其他处理,而N4000和N2000处理间,N2000和N1000处理间差异均不显著。

随着氮素施入量的增大,马来沉香苗期地径各指数施肥处理的地径均大于对照(N0),并且各处理之间存在显著的差异(表2)。其中N3000处理的最大(11.21 mm),显著高于其他处理,比N0(8.01 mm)高39.95%,N1000、N2000和N4000处理间差异不显著,N1000和N5000间差异亦不显著。在指数施肥初期,马来沉香苗高、地径随施肥水平的增加而增加,其中N4000和N5000处理的增长速度较快。随着时间的推移,氮素施入量加大,在指数试验中后期(9月~11月),N4000和N5000处理的增长变缓,而N3000处理的生长表现最好,超过了N4000和N5000。

土沉香苗期生长表现与马来沉香相似,在指数施肥初期,其苗高、地径随着施肥水平的增加而增加(N4000和N5000的增长速度较快)。随着氮素施入量加大,在指数试验中后期,N4000和N5000的增长变缓,同样N3000处理的苗木生长表现最好。如图2和表2所示,土沉香的苗高随着氮素施入量而增大,且经指数施肥处理的(N1000~N5000)土沉香苗高均比对照(N0)高。其中,N3000处理苗高值最大为79.34 cm,显著高于其他处理,N1000、N2000和N4000($P>0.05$)之间苗高差异不显著。处理N1000~N5000处理的苗高分别为对照的1.27、1.36、1.46、1.30和1.19倍。

土沉香苗期地径也随着氮素的施入而增大,各指数施肥处理的地径均显著大于对照(表2)。由多重比较结果可知,N1000、N2000、N5000处理间,N1000、N2000、N4000处理间,及N2000、N4000、N5000处理间均无显著性差异。在各指数施肥处理中,N3000的地径最大,达9.68 mm,N0最小,仅为7.96 mm。

不同指数施肥处理下的马来沉香苗期生物量之

间存在着显著的差异(表 2),N3000 处理的全株生物量(19.45 g),地上部分生物量(14.80 g)与地下部分生物量(4.65 g)均最大,显著高于其他处理,分别为对照的 1.97、2.14 和 1.57 倍。全株生物量的大小顺序为 N3000 > N2000 > N4000 > N1000 > N5000 > N0;地上部生物量的大小顺序为 N3000 > N2000 > N4000 > N5000 > N1000 > N0;地下部分生物量的大小顺序为 N3000 > N2000 > N4000 > N1000 > N5000 > N0。从各处理间马来沉香苗期生长表现的变化情况分析,各生长指标受氮素影响的大小顺序依次为:地上部分生物量 > 总生物量 > 地下部分生物量 > 苗高 > 地径。

表 2　试验结束时 6 个氮素指数处理下马来沉香苗期生长与生物量的差异

Table 2　Growth difference and biomass of *A. malaccensis* seedlings in six nitrogen exponential fertilization treatments at the end of the experiment

品种 Species	处理 Treatment	苗高(cm) Height	地径(mm) Ground diameter	生物量 Biomass(g/plant)		
				地上部 Shoot	地下部 Root	全株 Total plant
马来沉香 *Aquilaria malaccensis*	N0	63.20 ± 3.54 e	8.01 ± 0.32 d	6.90 ± 0.33 e	2.97 ± 0.80 e	9.87 ± 0.49 e
	N1000	79.62 ± 3.98 c	9.68 ± 0.58 bc	8.97 ± 0.45 bd	3.56 ± 0.78 c	12.53 ± 0.63 d
	N2000	83.64 ± 7.53 bc	10.25 ± 0.45 b	11.83 ± 0.83 b	3.84 ± 0.49 b	15.67 ± 0.94 b
	N3000	88.39 ± 11.49 a	11.21 ± 0.70 a	14.80 ± 0.83 a	4.65 ± 0.36 a	19.45 ± 1.17 a
	N4000	84.41 ± 10.13 b	10.01 ± 1.07 b	10.25 ± 0.98 c	3.80 ± 0.40 b	14.05 ± 1.09 c
	N5000	73.02 ± 6.58 d	9.15 ± 0.79 c	9.01 ± 0.45 d	3.16 ± 0.16 d	12.17 ± 0.61 d
土沉香 *Aquilaria sinensis*	N0	54.46 ± 5.23 d	7.96 ± 0.31 d	4.85 ± 0.29 f	2.83 ± 0.50 d	7.68 ± 0.46 f
	N1000	69.27 ± 0.79 b	9.41 ± 0.38 ab	10.10 ± 0.61 d	3.67 ± 0.29 b	13.77 ± 0.90 d
	N2000	73.99 ± 5.92 b	9.25 ± 0.51 abc	12.76 ± 0.77 b	4.11 ± 0.35 a	16.87 ± 1.1 b
	N3000	79.34 ± 9.52 a	9.68 ± 0.39 a	14.61 ± 0.88 a	4.23 ± 0.29 a	18.84 ± 0.83 a
	N4000	70.71 ± 9.19 b	9.02 ± 0.59 bc	11.99 ± 0.60 c	3.61 ± 0.22 b	15.60 ± 0.78 c
	N5000	65.04 ± 5.92 c	8.73 ± 0.71 c	7.84 ± 0.47 e	3.02 ± 0.23 c	10.86 ± 0.67 e

注(Note):同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表 2 还表明,土沉香在试验结束时苗木生物量之间同样存在着显著的差异($P < 0.05$)。N3000 处理全株生物量(18.84 g),地上部生物量(14.61 g)与地下部生物量(4.23 g)均最大,显著高于其他处理,分别为对照(N0)的 2.45,1.84,1.49 倍。全株生物量和地上部生物是量的大小顺序均为 N3000 > N2000 > N4000 > N1000 > N5000 > N0;地下部分生物量的大小顺序为 N3000 ≈ N2000 > N1000 ≈ N4000 > N5000 > N0。从各处理土沉香苗期生长表现的变化情况分析,各生长指标受氮素影响的大小顺序依次为:总生物量 > 地上部分生物量 > 地下部分生物量 > 苗高 > 地径。

2.2　不同指数施肥处理对苗木养分含量的影响

2.2.1 对马来沉香与土沉香苗期叶片养分含量的影响　不同浓度氮素指数施肥处理间马来沉香与土沉香苗期叶片养分含量差异显著($P < 0.05$)。由图 3A、B、C 可知,马来沉香各处理间叶片氮、磷、钾含量随着氮素施入量的增加而增大,在指数施肥初期各处理间叶片氮、磷、钾含量差异并不显著,在施肥结束后存在着显著差异,且均大于对照。施肥结束时(11 月),N3000 处理的叶片氮含量(3.819%)、磷含量值最大(0.353%),显著高于其他处理。N5000 和 N4000 间叶片氮含量无显著差异;N2000、N4000 和 N5000 处理间叶片磷含量差异不显著;当氮施入量大于每株 3000 mg 后,叶片氮含量、磷含量均降低,说明叶片对氮、磷的吸收达到饱和,氮、磷含量不再随氮施人量的增加而继续增加。叶片含钾量在 N3000、N4000 和 N5000 处理间无显著差异,N0、N1000 和 N2000 处理也差异不显著。

由图 3D、E、F 可知,土沉香叶片氮、磷、钾含量的变化趋势一致,随着氮素施入量的增加而增大;

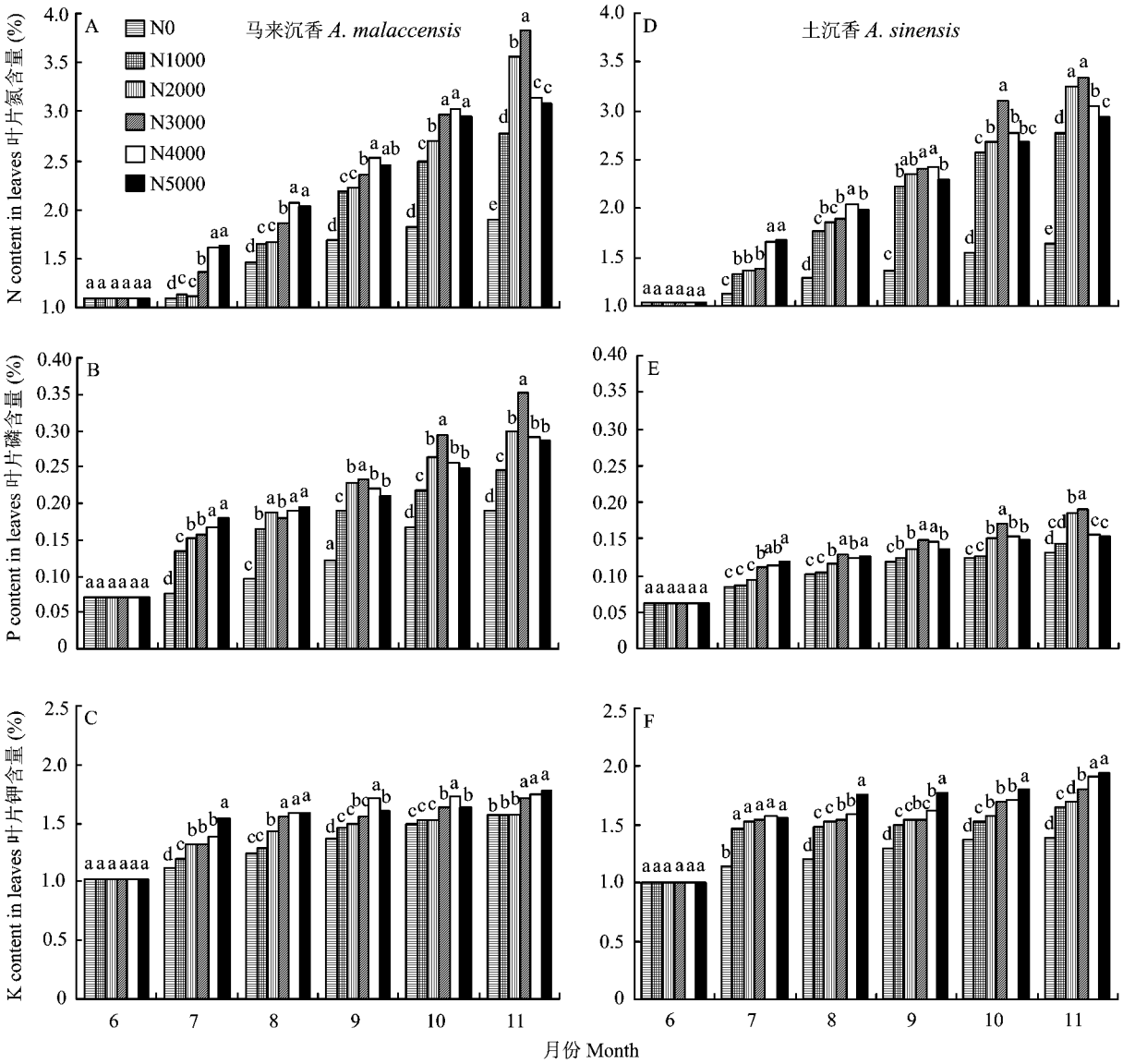

图3 氮素指数施肥处理间马来沉香与土沉香苗期叶片养分含量变化

Fig. 3 Changes of nutrient concentrations in leaves of two *Aquilaria* seedlings in different nitrogen exponential fertilization treatments

在施肥初期各处理叶片氮、磷、钾含量之间无显著性差异,施肥结束后,各处理间叶片氮含量、磷含量与钾含量存在着显著差异($P < 0.05$)。施肥结束后,N2000、N3000 处理的叶片含氮量(3.254%、3.335%)显著大于其他处理;当氮施入量大于每株3000 mg后,叶片氮含量、磷含量均降低,说明叶片对氮、磷的吸收达到饱和,氮、磷含量不再随氮施入量的增加而继续增加;叶片氮含量的大小顺序为:N3000≈N2000 > N4000 > N5000 > N1000 > N0。N3000 处理叶片含磷量显著大于其他处理,N1000、N4000 和 N5000 之间差异不显著,当氮施入量大于每株3000 mg后,叶片磷含量降低;各处理间土沉香叶片含钾量与马来沉香的变化规律一致,随着氮施入水平的增大而增大,说明其对钾的吸收并未达到饱和。由图3B和3E可知,土沉香叶片的含磷量低于马来沉香,说明马来沉香对磷的吸收能力更强。

2.2.2 适宜施氮量的确定 根据苗期生物量与叶片氮、磷、钾含量绘制的散点图(图4)可以看出,叶片氮、磷、钾含量与生物量呈抛物线关系。应用马来沉香、土沉香生物量与叶片氮、磷、钾的含量建立一元二次抛线物方程,6个方程的相关系数范围为0.863~0.971(图4)。方程中与生长量极值相应

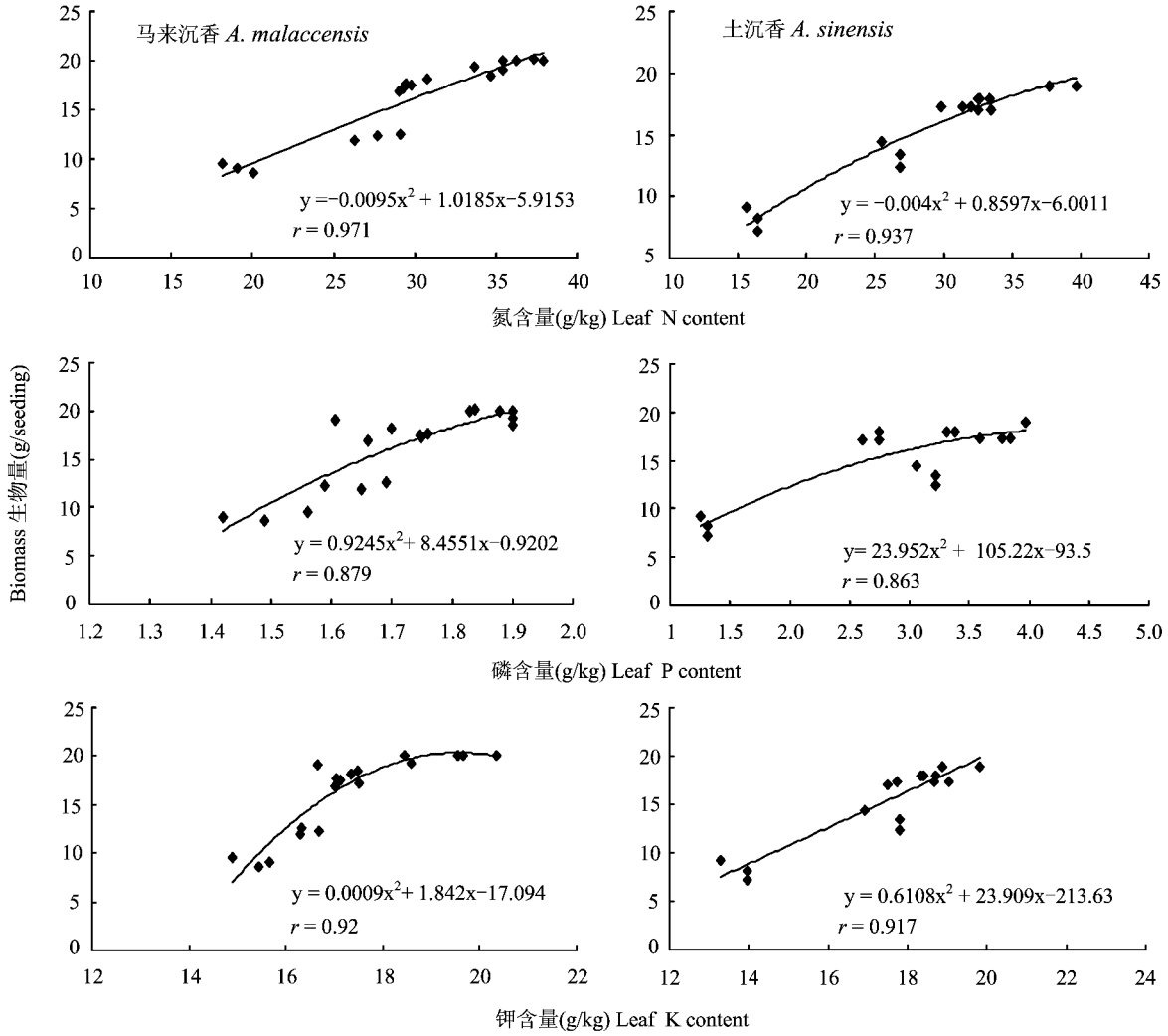

图 4　马来沉香与土沉香苗期叶片各营养元素与生物量关系

Fig. 4　The quadratic relationships between biomass and leaf nutrient concentrations in *Aquilaria* seedlings

的养分浓度即为最适值,最高产量 90% 的相应的养分浓度为临界值[19]。马来沉香苗期叶片氮、磷、钾含量的临界值分别为 35.55、1.75、17.99 g/kg,最适含量范围分别为 35.55 ～ 53.11、1.75 ～ 2.73、17.99 ～26.63 g/kg；土沉香苗期叶片氮、磷、钾含量的临界值分别为 37.78、3.08、18.89 g/kg,最适含量范围分别为 37.78 ～ 58.56、3.08 ～ 4.44、18.89 ～29.28 g/kg。根据叶片氮、磷、钾的最适浓度范围综合得出确定马来沉香与土沉香苗期的最佳施氮量为每株 3000 mg。

2.3　不同浓度指数施肥处理对苗木根系生长的影响

氮素对根系形态、生长及其在介质中分布的影响是所有矿质营养中最大的[20]。不同浓度施肥方法对 2 种沉香苗木根系形态指标的影响(6 月～11 月)如图 5 ～图 8 所示,施肥诱导根系总根长增长,根系表面积增大,根系平均直径增粗,根系体积增大。指数施肥初期,马来沉香与土沉香总根长随着施入氮素浓度的增大而增大；指数施肥中后期,N5000 处理的总根长小于其他处理；指数施肥末期,马来沉香各处理总根长大小顺序为 N3000 > N2000 > N1000 > N4000 > N0 > N5000,土沉香各处理总根长大小顺序为 N3000 > N2000 > N1000 > N0 > N4000 > N5000(图 5)。

指数施肥初期,马来沉香与土沉香根系表面积随着施入氮素浓度的增大而增大。指数施肥中期,随着氮素浓度加大,N5000 和 N4000 处理的根系表面积增长的速率减慢；指数施肥末期,N3000 处马来沉香根系表面积是 N0 的 1.38 倍,N2000 是 N0 的 1.33 倍,N4000 与 N1000 是 N0 的 1.31 倍,处理

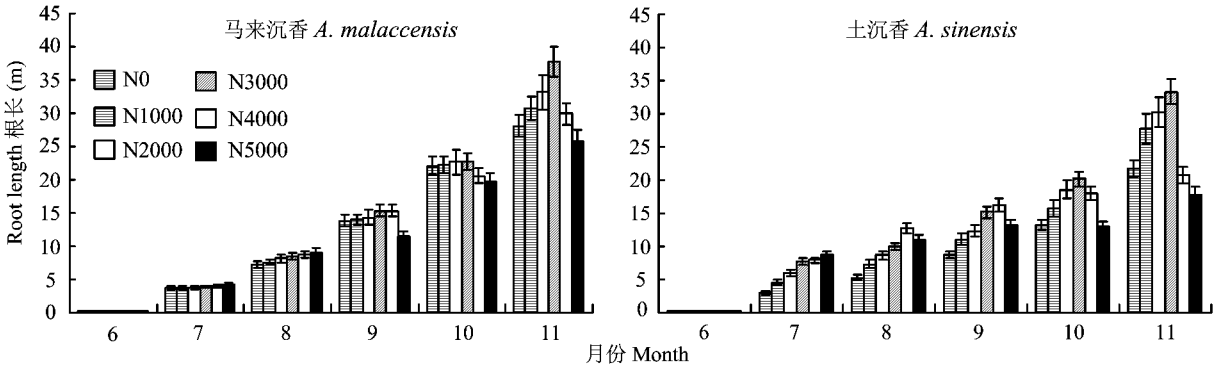

图5 不同浓度指数施肥对马来沉香与土沉香苗期根长的影响

Fig. 5 The root length of *Aquilaria* seedlings to the nitrogen exponential fertilization treatments

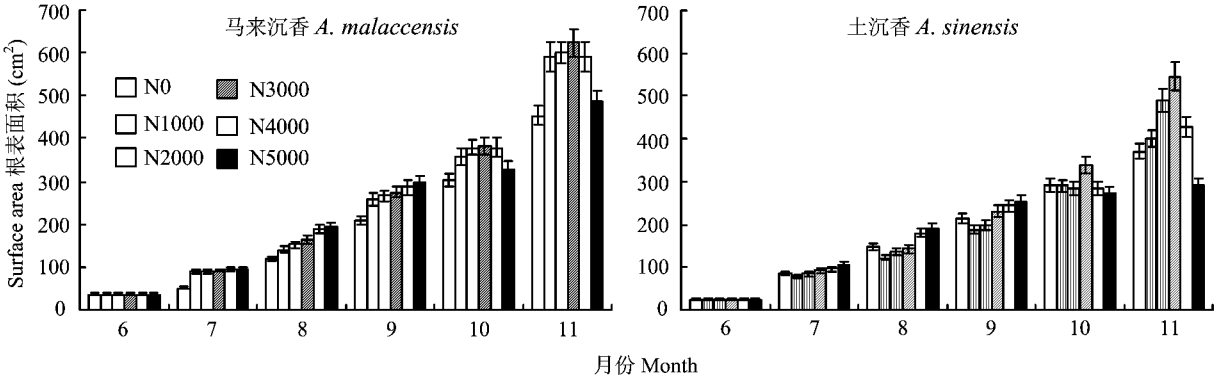

图6 不同浓度指数施肥对马来沉香与土沉香苗期根系表面积的影响

Fig. 6 The root surface area of *Aquilaria* seedlings to the nitrogen exponential fertilization treatments

N5000 为 N0 的 1.08 倍(图 6),土沉香各处理根系表面积以 N3000 处理最大,N5000 处理最小(图 6)。

指数施肥初期,马来沉香与土沉香根系体积随着施入氮素浓度的增大而增大。指数施肥中期,马来沉香 N5000、N4000 处理的根系体积生长的速率减慢,土沉香对不同浓度氮素的响应与施肥初期相同。指数施肥末期,N3000 处理的马来沉香根系体积最大,比对照提高了 8.6%,其次是 N2000 和 N1000 处理。N4000 和 N5000 的根系体积低于对照,说明当施氮量 >3000 mg/plant 时,高浓度的氮对马来沉香根系体积的增大起到了抑制作用;土沉香各处理的根系体积表现为 N3000 > N2000 > N4000 > N5000 > N1000 > N0(图 7)。

指数施肥初期,与其他根系形态特征指标相同,马来沉香与土沉香根系平均直径随着施入氮素浓度的增大而增大。指数施肥中期,马来沉香 N3000、N4000、N5000 处理的根系平均直径最大,而土沉香为 N5000 > N4000 > N3000 > N2000 > N1000 > N0 处理。指数施肥末期,N3000 处理的马来沉香与土沉香根系平均直径最大,分别比对照提高了 19.9% 和 52.2%;马来沉香各处理具体表现为 N3000 > N2000 > N1000 > N0 > N4000 > N5000,N5000 和 N4000 的根系平均直径低于对照,说明当施入氮量 >3000 mg/plant 时,高浓度的氮对马来沉香根系平均直径的增大起到了抑制作用;土沉香根系平均直径与根系体积表现相似,各处理大小为 N3000 > N2000 > N4000 > N5000 > N1000 > N0(图 8)。

3 讨论与结论

马来沉香与土沉香苗期地径、苗高及生物量随着氮素施用量的增加而递增,至 3000 mg/plant 后其生长状况和生物量趋于稳定。地上部分生物量的积累较地下部分快,随着氮素供应水平的增加,相同施氮浓度条件下,马来沉香苗高、地径、地上部分生物量、地下部分生物量与总生物量等生长指标均大

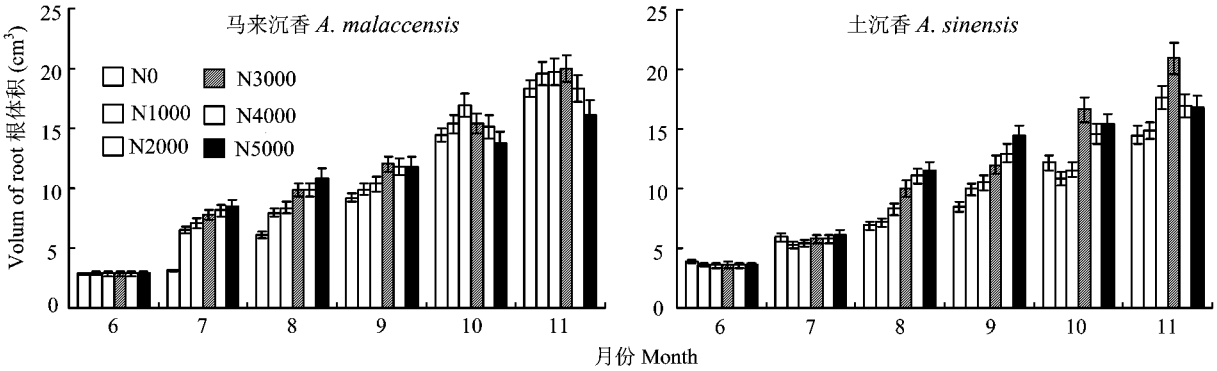

图 7　不同浓度指数施肥对马来沉香与土沉香苗期根系体积的影响

Fig. 7　The volume of root of two *Aquilaria* seedlings to the nitrogen exponential fertilization treatments

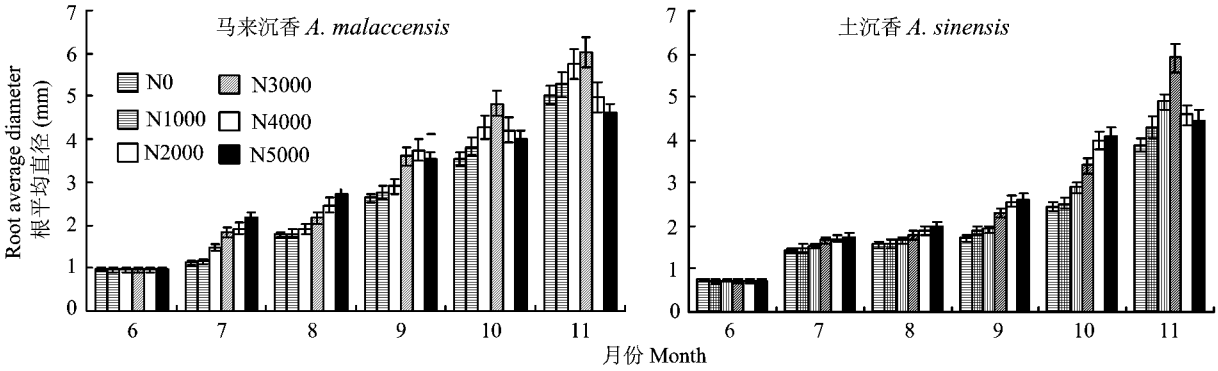

图 8　不同浓度指数施肥对马来沉香与土沉香苗期根系平均直径的影响

Fig. 8　The root average diameter of the *Aquilaria* seedlings to the nitrogen exponential fertilization treatments

于土沉香。马来沉香与土沉香各处理间叶片含氮、磷、钾含量随着氮素施入量的增加而增大,在施肥初期各处理间叶片养分含量差异并不显著,在施肥结束后存在着显著差异($P<0.05$)。当氮施入浓度为 3000 mg/plant 时,叶片氮、磷、钾含量达到最大,当大于每株 3000 mg 时,叶片氮含量、磷含量降低。土沉香叶片氮含量与磷含量的变化趋势一致,随着氮素施入量的增加而增大;在施肥初期 N1000、N2000、N3000、N4000 和 N5000 处理叶片氮含量与磷含量之间无显著性差异;施肥结束后,各处理间叶片氮含量与磷含量存在着显著差异($P<0.05$)。高氮水平下指数施肥的苗木养分含量并没有提高,是因为试验材料对高浓度的养分添加反应不明显且竞争作用使得养分含量下降[8]。植物对养分的吸收以及最终产量的形成是根系形态特征和生理特性共同影响的结果[21]。具有较长的根长和多而发达的侧根的植物,其根系与介质中养分的接触面积大,因而对氮素的吸收和产量形成也有更大的潜力[22]。指数施肥是理想的施肥方法,更有利于培育健康完整的根系[20]。本研究中,每株施氮 3000 mg 处理下,马来沉香与土沉香总根长、根系表面积、根体积、根系平均直径等根系形态指标均显著大于其他处理。因此综合而言,每株 3000 mg 的施氮量是满足马来沉香与土沉香苗期生长和养分吸收的临界点。

Ulrich 等[19]提出以植物最大理论生长量或产量的 90% 所对应的叶片养分含量作为临界含量之后,临界值营养诊断方法广泛应用于林木营养诊断[23]。陈琳等运用临界浓度法确定出西南桦(*Betula alnoides*)幼苗叶片全氮、全磷、全钾的最适含量范围分别为 37.8 ~ 59.1,4.1 ~ 6.3,24.4 ~ 34.7 g/kg[23];黄益宗等确定出 1 年生尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)幼林临界养分氮、磷、钾含量范围分别为 15.3 ~ 18.1,1.2 ~ 1.7 和 4.2 ~ 5.6 g/kg[24];Shedley 等确定出 3 种不同氮源供应条件下蓝桉(*Eucalyptus globules*)苗期叶片氮的最适含量

范围分别为29～47 g/kg（硫酸铵），26～43 g/kg（硝酸铵）和24～33 g/kg（硝酸钙）[25]。本研究中，马来沉香苗期叶片氮、磷、钾含量的临界值分别为35.55、1.75、17.99 g/kg，最适含量范围分别为35.55～53.11、1.75～2.73、17.99～26.63 g/kg，土沉香苗期叶片氮、磷、钾含量的临界值分别为37.78、3.08、18.89 g/kg，最适含量范围分别为37.78～58.56、3.08～4.44、18.89～29.28 g/kg。

本文通过叶片的最适养分含量确定出马来沉香、土沉香苗期的适宜施氮范围为每株3000 mg。植物吸收养分与生长表现是一个复杂的生理生态过程，本次试验马来沉香与土沉香光合作用等生理变化对氮素指数施肥的响应还有待进一步研究。此外，根据本研究得出的马来沉香、土沉香苗期适宜施氮量范围，进一步开展不同施氮量的常规施肥，以探究不同施肥方法对马来沉香与土沉香苗期生长及养分状况的影响，进而优化其苗期施肥方案，亦为其他树种相关研究提供借鉴。

参考文献：

[1] 魏红旭，徐程，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.
Wei H X, Xu C, Ma L Y *et al*. Nutrient upkate of Larix olgensis seedlings in response to different exponential regimes[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(3): 685-690.

[2] Ingestad T L, S A B. Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants[J]. For. Res., 1986, 1: 439-453.

[3] Walters D T, Malzer G L. Nitrogen management and nitrification inhibitor effects on nitrogen-15 urea: I. Yield and fertilizer use efficiency[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54: 115-122.

[4] Timmer V R, Armstrong G. Growth and nutrition of containerized *Pinus resinosa* at exponentially increasing nutrient additions[J]. Can. J. For. Res, 1987, 17(7): 644-647.

[5] Timmer V R, Miller B D. Effects of contrasting fertilization and moisture regimes on biomass, nutrients and water relations of container grown red pine seedlings[J]. New For., 1991, 5: 335-348.

[6] Salifu K F, Jacobs D F. Characterizing fertility targets and multi-element interactions in nursery culture of *Quercus rubra* seedlings[J]. Ann. For. Sci., 2006, 63: 231-237.

[7] Salifu K F, Timmer V R. Optimizing nitrogen loading of *Piceamariana* seedlings during nuery culture[J]. Can. J. For. Res., 2003, 33(7): 1287-1294.

[8] Hawkins B J, BurgessD, Mitchell A K. Growth and nutrient dynamics of western hemlock with conventional or exponential greenhouse fertilization and planting in different fertility conditions[J]. Can. J. For. Res., 2005, 35 (4): 1002-1016.

[9] Burgess D. Western hemlock and Douglas fir seedling development with exponential rates of nutrient addition[J]. For. Sci., 1991, 37(1): 54-67.

[10] Quoreshi A M, Timmer V R. Early outplanting performance of nutrient- loaded containerized black spruce seedlings inoculated with *Laccaria bicolor*: a bioassay study[J]. Can. J. For. Res., 2000, 30 (5): 744-752.

[11] Dumroese R K, Page-Dumroese D S, Salifu K F *et al*. Exponential fertilization leaching fractions, and early out planting performance of Pinusmonticola seedlings: nutrient uptake efficiency[J]. Can. J. For. Res., 2005, 35 (12): 2961-2968.

[12] 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.
Jia H J, Ingestad T. A study on optimum nutrient requirements of *Paulownia elongata* and *Robinia pseudoacacia* seddlings[J]. Sci. Silv. Sin., 1989, 25(1): 1-6.

[13] 贾慧君，郑槐明，李江南，万细瑞. 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.
Jia H H, Zheng H M, Li J N, Wan X R. Application of steady state mineral nutrition principle to fertilization of potted conifer seedlings[J]. J. Beijing For. Univ., 1994, 16(4): 65-74.

[14] 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.
Jia H J, Zheng H M. Comparative study on the steady state mineral nutrition of *Paulownia elongata* seedlings[J]. J. Beijing For. Univ., 1993, 15(3): 12-17.

[15] 贾慧君，郑槐明，李江南，万细瑞. 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.
Jia H J, Zheng H M, Li J N, Wan X R. Application of steady-state nutrition and *Pisolihus tinctrius mycorrhiza* to *Pinus elliottii* nursery land[J]. Sci. Silv. Sin., 2004, 40(1): 41-46.

[16] Ingestad T. Relative addition rate and external concentration: Driving variables used in plant nutrition research[J]. Plant Cell Environ., 1982, 5: 443-453.

[17] 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.
Wang R, Li J Y, Zhang F Q *et al*. Growing dynamic root system of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different fertilizing methods[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(1): 98-106.

[18] Imo M, Timmer V R. Nitrogen uptake of mesquite seedlings at conventional and exponential fertilization schedules[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(3): 927-934.

[19] Ulrich A, Hills F. Principles and practices of plant analysis[A]. Westerman R L. Soil test and plant analysis part Ⅱ. [M]. Madison, US: Soil Science Society of America, 1967. 1-24.

[20] Kamh M, Wiesler F, Ulas A *et al*. Root growth and N-uptake activity of oilseed rape (*Brassica napus* L) cultivars differing in nitrogen efficiency[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2005, 168: 130-137.

[21] Lynch J P. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physio1., 1995, 109: 7-13.

[22] 黄高宝，张恩和，胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的 生态生理机制[J]. 植物营养与肥料学报，2001，7(3)：293-297.
Huang G B, Zhang E H, Hu H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties[J]. Plant Natr. Fert. Sci., 2001, 7(3): 293-297.

[23] 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.
Chen L, Zeng J, Xu D P *et al*. Effects of exponential nitrogen loading on growth and foliar nutrient status of *Betula alnoides* seedlings[J]. Sci. Silv. Sin., 2010, 46(5): 35-40.

[24] 黄益宗，冯宗炜，李志先，等. 尾叶桉叶片氮磷钾钙镁硼元素营养诊断指标[J]. 生态学报，2002，22(8)：1254-1259.
Huang Y Z, Feng Z W, Li Z X *et al*. Diagnosis of foliar nutrients (N, P, K, Ca, Mg, B) of Young Eucalyptus urophylla trees [J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(8): 1254-1259.

[25] Shedley E, Dell B, Grove T. Diagnosis of nitrogen deficiency and toxicity of *Eucalyptus globules* seedlings by foliar analysis [J]. Plant Soil, 1995, 177: 183-189.

欢迎订阅 2013 年《中国稻米》杂志

《中国稻米》是由农业部主管，中国水稻研究所主办，全国农业技术推广服务中心等单位协办的全国性水稻科学技术期刊。设有“专论与研究”、“品种与技术”、“各地稻米”、“综合信息”等栏目，具学术性、技术性、知识性、信息性等特点。据《中国科技期刊引证报告》(核心版)统计，《中国稻米》2008～2011 年的影响因子为 0.358～0.611。2008 年度有一篇文章被评为中国百篇最具影响的国内文章。适合水稻产区的各级技术人员及农业与粮食行政管理人员、科研教学人员和稻农阅读。本刊为双月刊，标准大 16 开本，单月 20 日出版。每期定价 10.00 元，全年 60.00 元，公开发行，邮发代码 32-31，国内刊号 CN33-1201/S，国际刊号 ISSN 1006-8082，E-mail：zgdm@163.com，网址：www.zgdm.net，欢迎新老读者到当地邮局订阅，也可直接到本刊编辑部订阅。

地址：浙江省杭州市体育场路 359 号　　邮政编码：310006

电话(传真)：(0571)63370271，63370368