

氮素营养对马褂木家系苗木生长效应分析

樊瑞怀^{1,2}, 杨水平^{1*}, 周志春², 金国庆²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716 2 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要: 选来自贵州黎平马褂木优良种源的 23 个优树自由授粉家系, 设置低氮素和高氮素 2 种水平的盆栽试验, 以研究马褂木家系苗木生长对氮素营养的遗传反应差异及所受遗传控制。结果表明: 不同氮素水平下, 马褂木苗的生长、干物质积累、叶片和根系等性状皆存在显著的家系遗传差异; 低氮胁迫将显著抑制马褂木苗叶片发育和根系生长, 影响苗木高生长和干物质积累, 但低氮素水平下生产的光合产物则较多地分配至地下根系部分以促进对氮素的吸收利用; 与高氮处理比较, 低氮胁迫加大了苗木生长、叶片和根系参数等家系遗传分化, 有利于鉴别高氮效率的马褂木优良家系。马褂木家系氮效率差异很大, 变化在 17.5% ~ 98.8% 间, 初选出乌 10 等 8 个高氮效率且在低氮素水平下生长优良的家系, 以及乌 11 等 12 个氮肥敏感型而在高氮素水平下生长优良的家系。研究发现, 低氮素水平下马褂木苗木高、干物质积累量、叶片性状(叶片数、叶片长、叶片宽)、根系参数(根体积、侧根数和须根数)等都受中到强度的家系遗传控制, 可用这些子性状评价马褂木家系氮效率。

关键词: 马褂木; 家系; 苗木生长; 氮素营养; 氮效率

中图分类号: S722.3 文献标识码: A

Effect of Nitrogen on the Seedling Growth of *Liriodendron chinense* Families

FAN Ruihuai^{1,2}, YANG Shui ping¹, ZHOU Zhichun², JIN Guoqing²

(1 College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2 Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract Pot experiment with twenty-three open-pollinated *Liriodendron chinense* families from Liping of Guizhou at two nitrogen levels was conducted to study family differences of growth response to nitrogen supply. The result showed there existed significant differences among families in seedling growth, dry matter accumulation, leaf shape as well as root parameters at high and low nitrogen levels. Remarkable reduction in seedling height, dry matter accumulation, leaf and root parameters were observed under low nitrogen stress, whereas larger proportion of photosynthesis production was allocated into roots to promote nitrogen absorption. Family variation in seedling growth, leaf and root parameters were increased under low nitrogen stress in comparison with high nitrogen level, which would be benefit to discriminate superior *L. chinense* families with high nitrogen efficiency. Nitrogen efficiency of different *L. chinense* families varied between 17.5% ~ 98.8%. Eight families exhibited high nitrogen efficiency and showed high productivity at low nitrogen level, whereas another twelve families with large nitrogen sensitivity and high productivity at high nitrogen level were identified. The results also demonstrated that seedling height, dry matter accumulation, leaf shape as well as root parameters were under moderate to strong family genetic control, which would be valuable in the evaluation on families performance for N efficiency.

Key words *Liriodendron chinense*, family, seedling growth, nitrogen nutrition, nitrogen efficiency

收稿日期: 2008-05-08

基金项目: 国家林业局“948”引进项目“林木营养遗传改良技术引进”(2006-4-59)

作者简介: 樊瑞怀(1981-), 男, 山西朔州人, 硕士。

* 通讯作者。

氮素是植物生长发育必需的大量营养元素之一,在植物生命活动中具有不可替代的作用^[1]。土壤缺氮是植物高产的重要限制因子。众多研究表明,植物种间和种内不同基因型间在矿质营养的吸收和利用效率上存在明显的遗传差异^[2-4]。通过植物营养性状遗传改良,挖掘和筛选营养高效植物基因型,已成为替代传统施肥方法来提高植物产量的一条重要途径。自从 Paul H. Harvey 首次报道不同玉米 (*Zea mays* Linn) 品种氮素吸收利用效率存在遗传差异以来,植物氮效率基因型差异研究报道涉及玉米、小麦 (*Triticum aestivum* Linn)、大麦 (*Hordeum vulgare* Linn) 等作物,说明植物氮效率基因型差异是普遍存在的现象,遗传改良潜力很大。与作物不同,人工林主要是依靠林木的遗传潜力及与环境的有效整合,而不是通过施肥等措施达到优质高产^[5-6]。林木氮效率遗传和育种研究落后于作物,始于 20 世纪 90 年代,相关研究较少。如 Li 等^[7] 鉴于美国东南部森林土壤严重缺氮,开展火炬松 (*Pinus taeda* Linn) 氮效率的家系遗传研究,结果发现火炬松苗木氮效率在家系间差异显著,受中等至强度的遗传控制^[7]。A. Jonsson 等研究表明欧洲赤松 (*P. sylvestris* Linn) 在不同氮水平上地上生物量和氮生产力受适度的遗传控制,二者遗传力变化分别在 0.22~0.43 和 0.24~0.47 之间,当可利用的氮水平较高时,观察到家系对氮的生长反应差异显著,可培育出氮生产力高、生长期又长的基因型^[8-9]。马祥庆等^[10] 通过氮素胁迫进行氮素高效基因型杉木无性系的选择研究表明,不同杉木无性系的氮素利用效率存在差异,根据不同无性系在胁迫条件下的反应,把供试无性系分成 3 类:耐氮肥性强、耐氮肥性弱及耐氮肥性一般无性系。

马褂木 (*Liriodendron chinense* (Hemsl) Sarg) 为木兰科 (Magnoliaceae) 鹅掌楸属 (*Liriodendron*) 落叶大乔木,是我国二类保护树种,其树干通直、树形美丽、速生丰产性能显著,是适宜南方山地发展的速生优质用材树种和优良的景观绿化造林树种^[11]。近年来,很多省区大力发展马褂木用材林基地,成效显著。由于我国南方森林土壤缺氮少磷严重,地力不断衰退,影响马褂木等人工林的速生高产,选育营养高效的林木新品种对于有效利用有限的土壤营养资源,实现人工林的持续高产意义重大。王剑等^[12] 研究表明马褂木磷效率的种源差异显著,在研究的 6 个种源中认为湖南通道为耐低磷型或高磷效率的优良种源,贵州黎平和湖南邵阳则分别为磷素中等敏感型和磷素敏感型优良种源。本文在马褂木种源磷效率研究的基础上,设置不同氮素水平处理的盆栽实验,以研究马褂

木家系苗木生长对氮素营养的遗传反应和所受的遗传控制,阐明高氮效率家系形成的形态学基础,确定评价家系氮效率的特异性形态指标,初选一批氮素营养高效利用的优良家系,为马褂木高氮效率或耐低氮育种提供理论依据和科学指导。

1 材料与方法

1.1 氮素盆栽试验

供试材料为来自贵州省黎平县乌嘎冲马褂木天然林 20 个优树 (分别编号为乌 1~20) 及东风林场马褂木母树林 4 个优树的自由授粉家系 (分别编号为东 1~4)。已有研究证实贵州黎平是马褂木的优良种源之一^[13]。氮素盆栽试验基质取自中国林科院亚热带林业研究所虎山的贫瘠缺氮少磷的酸性红壤,有机质含量为 6.11 g·kg⁻¹,全氮和全磷含量分别为 0.34 0.33 g·kg⁻¹,水解氮、有效钾和有效磷含量分别为 30.97 220.68 和 5.25 mg·kg⁻¹,pH 值 4.47。2007 年 3 月中旬在中国林科院亚热带林业研究所大棚内布置盆栽试验,设置低氮 (不施氮) 和高氮 (每 kg 土壤施 NH₄NO₃ 0.571 4 g) 2 种氮素水平处理,15 盆小区 (也即 15 次重复),共计 720 盆。基质土壤经风干过筛与珍珠岩 (100 kg 土壤添加 1 kg 珍珠岩) 混合均匀后装盆。营养杯直径 12 cm、高 14 cm,每个营养杯装土约 2.0 kg。马褂木的家系苗木于 2007 年 4 月 16 日移植,每盆移植 2 棵苗木,成活后保留 1 株。高氮处理分别在 5 月中旬、6 月中旬、7 月中旬和 8 月中旬分 4 次追施相应浓度的 NH₄NO₃ 溶液 50 mL,4 次追肥量分别为处理总量的 20%、30%、30% 和 20%。低氮处理每盆注入等体积的水。在整个试验过程中,其它营养处于正常水平。

1.2 试验收获和数据分析

于 2007 年 8 月中旬,采用 SPAD-502 型叶绿素仪测定马褂木家系苗木叶片的 SPAD 值,用以衡量叶片的叶绿素相对含量^[14]。不同氮素水平下每个家系选择 10 株生长正常的苗,分别测定植株上、中和下部 3 片叶的 SPAD 值,并以各层次的算术平均值作为该家系的 SPAD 值。2007 年 9 月底进行马褂木家系氮肥盆栽试验的收获,不同氮素水平下每个家系选取 10 株生长正常的苗木,测量苗高、叶片数、最大叶片的长度和宽度、主根长、侧根数、须根数及根体积等,其中根体积采用排水法测定^[15]。然后将苗木分成根、茎、叶 3 部分,经 105 °C 杀青 30 min,79 °C 烘干至恒质量,测定各部分干物质量,估算干物质积累量的根冠比。本试验中,因家系乌 16 缺苗,没有收获。马褂木家系氮效率按如下公式计算:

氮效率 = 低氮胁迫下干物质积累量 / 高氮条件下干物质积累量 × 100%

用以反映家系对低氮胁迫的适应能力及在低氮胁迫下的生长表现。利用 SAS 软件包中的 GLM 程序分别不同氮素处理进行性状单因素方差分析, 以检验家系效应。采用简单相关分析估算不同氮素水平下马褂木家系氮效率与其子性状的相关系数, 以确定反映家系氮效率的特异性指标。方差分析和相关分析时叶片数、侧根数、须根数等经 $X^{1/2}$ 数据转换。

2 结果与分析

2.1 不同氮素水平下马褂木苗生长、干物质积累及氮效率家系差异

苗高和干物质积累量是衡量苗期生长表现的 2

个最重要的指标。表 1 方差分析表明: 不管是低氮处理还是高氮处理下马褂木苗高和干物质积累量家系差异都达极显著水平 ($P < 0.0001$), 意味着选择耐低氮优良家系的潜力很大。低氮素水平下, 马褂木家系苗高和单株干物质积累量平均值分别为 25.9 cm 和 3.8412 g·株⁻¹, 变幅分别为 11.8~53.4 cm 和 1.3434~8.0011 g·株⁻¹, 最大值与最小值的比值分别为 4.5 和 6.0。高氮素水平下, 家系苗高和单株干物质积累量平均值分别为 49.0 cm 和 7.7377 g·株⁻¹, 变幅分别为 23.9~72.0 cm 和 5.9813~10.8473 g·株⁻¹, 最大值与最小值的比值分别为 3.01 和 1.81。与高氮处理比较, 低氮处理时马褂木家系间生长差异更为显著, 说明低氮胁迫处理下更易鉴别马褂木生长的家系遗传差异。

表 1 23 个家系氮效率及不同氮素水平下的苗高生长和干物质积累量

家系及氮效率类型	苗高 /cm		干物质积累量 /(g·株 ⁻¹)		氮效率 /%				
	- N	+ N	- N	+ N					
稳定型高氮效率家系	低氮素水平下生长优良家系	乌 4	39.5	59.8	4.3984	7.5917	57.9		
		乌 5	44.1	54.1	5.8451	7.2032	81.1		
		乌 7	39.1	58.6	4.5744	7.4669	61.3		
		乌 10	53.4	60.1	8.0011	8.0991	98.8		
		乌 13	38.5	52.7	4.2107	6.4777	65.0		
		乌 15	39.0	37.7	4.7180	6.4778	72.8		
		乌 17	39.8	37.3	5.8276	6.5272	89.3		
		乌 18	43.4	55.4	5.7416	7.8394	73.2		
	低氮素水平下生长劣势家系	乌 20	21.6	33.4	4.4446	6.8944	64.5		
敏感型低氮效率家系	高氮素水平下生长优良家系	乌 2	14.4	59.0	1.9352	7.2033	26.9		
		乌 3	24.5	65.9	3.3830	8.4225	40.2		
		乌 8	23.8	63.3	3.1051	8.3627	37.1		
		乌 9	15.9	55.2	3.1140	8.4495	36.9		
		乌 11	16.4	72.0	3.7140	7.7137	48.1		
		乌 12	18.7	60.5	3.9211	8.4496	46.4		
		乌 14	17.4	49.6	2.8048	7.1151	39.4		
		乌 19	14.8	50.2	1.3434	7.6823	17.5		
		东 1	13.8	35.6	2.6662	8.7011	30.6		
		东 2	11.8	36.8	1.9255	9.9377	19.4		
		东 3	13.0	42.8	2.1774	8.3868	26.0		
		东 4	20.6	34.6	5.3616	10.8473	49.4		
			高氮素水平下生长劣势家系	乌 1	17.2	28.5	3.0785	6.1379	50.2
				乌 6	15.6	23.9	2.0561	5.9813	34.4
			平均值		25.9	49.0	3.8412	7.7377	50.7
	显著性水平		p < 0.0001	p < 0.0001	p < 0.0001	p = 0.0036	-		

注: - N 表示低氮处理 (不施氮); + N 表示高氮处理 (每 kg 土壤施 NH_4NO_3 0.5714 g)。

马褂木不同家系的氮效率差异很大, 变化幅度为 17.5% ~ 98.8%, 最大值是最小值的 5.65 倍。按照氮效率大小, 可将参试家系划分为对氮肥稳定型的高氮效率家系和对氮肥敏感型的低氮效率家系 2 大类, 再结合不同氮素水平下的生长表现又可进一步分为生长优良家系和生长劣势家系 2 亚类。从表

1 可以看出: 家系乌 4 乌 5 乌 7 乌 10 乌 13 乌 15 乌 17 乌 18 不仅氮效率高, 达 57.9% ~ 98.8%, 而且在低氮素水平下苗高和干物质积累量也较大, 这 8 个家系属稳定型高氮效率的优良家系, 其中以家系乌 10 的氮效率最大, 低氮素水平下生长表现最佳, 这些家系可用于低氮立地条件下栽植; 家系乌

20的氮效率也较高,达 64.5%,但其在低氮素水平下生长表现较差,属于高氮效率的生长劣势家系。乌 2 乌 3 乌 8 乌 9 乌 11 乌 12 乌 14 乌 19 东 1 东 2 东 3 和东 4 属于对氮肥敏感型的低氮效率优良家系,氮效率皆小于 50%,如家系乌 19 仅为 17.5%,但这 12 个家系的生长对增施氮肥效果显著,家系乌 19 在高氮素水平下的干物质积累量是低氮素下的 5.7 倍,这些家系适宜在立地条件好的林地上种植或在有条件施用氮肥时选用。家系乌 1 和乌 6 生长对氮肥也较敏感,但其在高氮素水平下生长表现较差,在生产上利用价值较小。

2.2 不同氮素水平下苗木叶片和根系形态的家系差异

叶片和根系形态参数是构成植物营养利用效率的重要子性状^[16],研究这些子性状的遗传变异及环境影响有助于揭示营养高效基因型形成或适应营养胁迫的机制。表 2 方差分析结果显示:在低氮和高氮 2 种氮素水平下,马褂木叶片和根系各性状家系

间遗传差异都达极显著水平。较之于高氮素水平,低氮素水平下马褂木苗木叶片和根系各形态参数平均值虽然显著减小,但家系间的遗传差异却明显增大。如低氮素水平下家系平均叶片长和叶片宽分别仅为高氮素水平下的 77.0% 和 76.9%,但 2 者的家系遗传变异系数却分别为高氮素水平时的 275.6% 和 247.1%。氮素营养环境的改善促进了苗木叶片的发育和根系的生长,提高了叶片的叶绿素含量(叶片 SPAD 值),各家系的生长潜力得到了充分发挥,进而缩小了家系叶片和根系形态的表型分化,这意味着马褂木叶片和根系发育对氮素环境存在明显的可塑性反应。此外还发现,低氮胁迫下,马褂木根冠比和主根长明显增大或增长,低氮素水平下根冠比平均值为 0.58 较高氮素水平下的 0.40 高出 45.0%,说明在低氮素水平下苗木生产的光合产物将较多地分配至地下根系部分以促进对氮素的吸收利用,这是马褂木应对低氮胁迫的一种重要适应机制。

表 2 不同氮素水平下马褂木家系苗木叶片和根系参数的方差分析

氮素水平	性状	变异来源		平均值	变异幅度	变异系数 %	
		家系	机误				
- N	叶片长 /cm	65.3925**	5.1880	13.00	7.65~18.60	23.37	
	叶片宽 /cm	74.8541**	7.7136	15.34	9.45~22.90	21.40	
	叶片数 /片	0.6658**	0.0969	8.5	5.00~15.00	20.10	
	叶片 SPAD 值	43.0456**	12.0505	27.19	23.20~31.60	7.97	
	根体积 /cm ³	117.5163**	19.1823	10.35	1.76~19.80	38.65	
	主根长 /cm	113.7540**	41.8962	19.03	12.14~25.30	19.71	
	侧根总长 /cm	27.0399989**	6.119.7760	138.96	29.21~280.00	43.44	
	侧根数 /根	2.8010**	0.4765	18.0	5.00~35.0	26.21	
	须根总数 /根	30.0522**	8.1480	100.1	4.30~361.3	41.97	
	根冠比	0.2276**	0.0364	0.58	0.25~0.84	30.54	
	+ N	叶片长 /cm	18.5176**	4.3652	16.89	14.91~20.67	8.48
		叶片宽 /cm	25.7826**	7.4074	19.96	17.72~24.28	8.87
叶片数 /片		0.1548**	0.0749	10.5	6.00~18.0	8.66	
叶片 SPAD 值		27.3960**	11.4839	32.98	30.10~51.04	12.88	
根体积 /cm ³		127.9888**	29.3775	18.76	9.00~26.4	23.40	
主根长 /cm		82.6004**	37.1515	18.05	13.10~25.6	17.56	
侧根总长 /cm		27.9393857**	6.020.9100	166.17	57.50~293.3	37.14	
侧根数 /根		1.6632**	0.3572	20.8	8.00~38.0	21.32	
须根总数 /根		47.8925**	7.3822	141.5	12.80~471.6	39.47	
根冠比		0.0912**	0.0142	0.40	0.19~0.72	26.94	

注:家系和机误的自由度分别为 22 和 9, ** 表示差异极显著,下同。

2.3 马褂木家系氮效率与其子性状的相关性

植物氮效率的大小有其自身的形态学和生理学基础,将氮效率剖析为与其相关的一些子性状,可使氮效率育种相对简单和有效。表 3 相关分析结果表明:马褂木家系氮效率与其在低氮胁迫下的苗高、单株干物质质量、叶片数、叶片长、叶片宽、叶片 SPAD 值、根体积、侧根数、须根数等都呈显著或极显著的

正相关,与根冠比呈极显著的负相关,这些子性状都可很好地指示马褂木家系氮效率的高低,尤其可通过低氮胁迫下家系的叶片数量、叶片大小和叶片 SPAD 值等外在易观测的简便的指标来鉴别马褂木家系的氮效率。在试验中未发现家系主根长和侧根总长与氮效率间的显著相关性,这与盆栽条件下苗木主根生长受到容器大小的制约有关。

表 3 低氮胁迫下马褂木家系氮效率与其子性状的相关系数

项目	性状											
	根冠比	苗高	干物质量	叶片数	叶片长	叶片宽	叶片 SPAD 值	侧根数	须根数	主根长	侧根总长	根体积
氮效率	0.9097*	0.9476*	0.8616*	0.9141*	0.9280*	0.5364*	0.4806*	0.4171*	-0.0572	0.2687	0.6703*	-0.7672*

注: * 表示差异显著; ** 表示差异极显著。

2.4 马褂木氮效率子性状的家系遗传及氮素环境影响

表 4 列出了与氮效率密切相关的 10 个子性状的家系遗传力。研究发现, 低氮素水平下马褂木苗高、干物质积累量、叶片形态、根系参数等皆受中等以上程度的家系遗传控制, 其家系遗传力估算值在

0.7201~0.9633 间。施用氮肥后, 苗高、干物质积累量和叶片 (叶片数、叶片长、叶片宽、SPAD 值) 等性状的家系遗传力明显下降。随着土培介质氮素营养的改善, 根体积、侧根数、须根总数等根系子性状的家系遗传力变化很小, 说明根系性状受很强的遗传控制, 较少受氮素环境影响^[17]。

表 4 不同氮素水平下马褂木氮效率子性状的家系遗传力

氮素水平	苗高	干物质量	叶片长	叶片宽	叶片数	叶片 SPAD 值	根冠比	根体积	侧根数	须根总数
-N	0.9633	0.8343	0.9207	0.8970	0.8544	0.7201	0.8403	0.8368	0.8299	0.7289
+N	0.8729	0.5630	0.7643	0.7127	0.5157	0.5808	0.8448	0.7705	0.7852	0.8459

3 结论与讨论

马褂木具有速生、须侧根发达、喜肥等特点, 与松类 (*P. spp.*) 等针叶树种比较, 马褂木对土壤肥力的生长反应更为敏感。本文利用来自贵州黎平马褂木优良种源 23 个优树自由授粉家系的氮肥盆栽试验发现, 在缺氮的土壤增施氮肥后, 家系平均苗高和单株干物质积累量分别增长了 89.19% 和 101.44%, 说明施用氮肥对马褂木增产效果极其明显。然而不同家系对氮素的生长反应差异很大, 家系氮效率变化在 17.5%~98.8% 间。根据氮效率大小可将参试家系划分为氮肥稳定型的高氮效率家系和氮肥敏感型的低氮效率家系 2 大类, 再结合不同氮素下的生长表现又可进一步分为生长优良家系和生长劣势家系 2 亚类。初选出的 8 个高氮效率优良家系乌 4、乌 5、乌 7、乌 10、乌 13、乌 15、乌 17、乌 18 具有在低氮胁迫下叶片宽大、叶绿素含量高、根系发达、生长表现佳等特点, 这类家系不仅在立地条件好的富氮林地上能获得高产, 而且在低氮立地上种植也能获得较高收益。另外 12 个家系乌 2、乌 3、乌 8、乌 9、乌 11、乌 12、乌 14、乌 19、东 1、东 2、东 3 和东 4 属于氮肥敏感型优良家系, 这类家系在低氮胁迫条件下生长表现较差, 但增氮后表现出速生的优点, 适宜在立地条件好或施氮肥时选用。

低氮胁迫虽然影响马褂木家系苗木的生长、叶片和根系发育, 但却将较多的光合产物分配至地下根系部分, 促进根冠比显著提高以利于苗木对氮素

的吸收利用, 这是马褂木在形态上应对低氮胁迫的一种重要适应机制, 这在很多作物中都有发现^[18-19], 马褂木在应对低磷胁迫时也存在类似的现象^[2]。叶片和根系形态参数等皆是构成林木营养利用效率的重要形态子性状, 试验结果表明, 低氮胁迫下马褂木苗高、单株干物质质量、叶片数、叶片长、叶片宽、叶片 SPAD 值、根体积、侧根数、须根数等都与家系氮效率呈显著或极显著的正相关, 而与根冠比呈极显著的负相关, 这些叶片和根系性状在低氮素水平下的家系分化比高氮素水平下显著, 可用其作为特异性指标筛选马褂木耐低氮优良种质。此外, 遗传力估算结果表明, 马褂木苗木叶片和根系等氮效率子性状受中等至强度的家系遗传控制, 进一步证实了林木氮效率性状受适度或较强的遗传控制^[7], 通过氮效率的遗传改良可促进马褂木对土壤氮素的吸收和有效利用。

参考文献:

- [1] 荆家海. 植物生理学 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994: 23
- [2] 李建民, 王 剑, 周志春, 等. 磷素环境与马褂木种源的生长和干物质积累 [J]. 林业科学, 2000, 41(5): 192-195
- [3] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松种源磷效率研究 [J]. 林业科学, 2005, 41(4): 25-30
- [4] Theodorou C, Bowen G D. Root morphology, growth and uptake of phosphorus and nitrogen of *Pinus radiata* families in different soils [J]. Forest Ecology and Management, 1993, 56: 43-56
- [5] 胡炳堂, 洪顺山, 关志山, 等. 马尾松造林施肥两年生长反应 [J]. 林业科学研究, 1996, 9(2): 215-220

- [6] 周运超, 梁瑞龙, 蒙福祥, 等. 马尾松中幼林施肥试验研究[J]. 贵州农学院丛刊, 1997 (总 36): 72-78
- [7] Li B M, Keand S E, Allen H L, *et al*. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings[J]. Forest Science, 1991, 37(2): 613-626
- [8] Jonsson A, Domling I, Eriksson G, *et al*. GCA variance components in 36 *Pinus sylvestris* L. full sib families cultivated at five nutrient levels in a growth chamber[J]. Forest Science, 1992, 38(3): 575-593
- [9] Jonsson A, Ericsson T, Eriksson G, *et al*. Interfamily variation in nitrogen productivity of *Pinus sylvestris* seedlings[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1997, 12(1): 1-10
- [10] 马祥庆, 刘爱琴, 黄宝龙, 等. 氮素高效基因型杉木无性系的选择研究[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 53-57
- [11] 李建民, 封剑文, 谢芳, 等. 鹅掌楸人工林的丰产特性[J]. 林业科学研究, 2000, 13(6): 622-627
- [12] 王剑, 周志春, 金国庆, 等. 马褂木种源磷效率特性差异研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 211-215
- [13] 李建民. 马褂木地理遗传变异和优良种源选择[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 41-49
- [14] 李刚华, 丁艳锋, 薛利红, 等. 利用叶绿素计 (SPAD-502) 诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 412-416
- [15] 伯姆 W. 根系研究法[M]. 薛德榕, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 178-185
- [16] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 44-51
- [17] 王秀全, 陈光明, 何丹, 等. 玉米根系性状的遗传及相关分析[J]. 中国农业科学, 2000, 33(增刊): 119-123
- [18] 杨光梅, 钱晓刚, 韩宁, 等. 玉米耐低氮基因型筛选压力的选择[J]. 种子, 2007, 26(6): 31-37
- [19] 任书杰, 张雷明, 张岁岐, 等. 氮素营养对小麦根冠协调生长的调控[J]. 西北植物学报, 2003, 23(3): 395-400