林业科学研究 2012,25(5):590～596
Forest Research

文章编号:1001-1498(2012)05-0590-07

毛红椿不同家系磷素利用特性的研究

孔 超,刘 军,姜景民*,李彦杰

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所,浙江 富阳 311400)

摘要:利用8个对土壤磷素敏感程度各异的毛红椿家系,设置4个磷素水平的土培盆栽试验,研究其不同磷素水平下的磷素利用特性。结果表明:毛红椿对于磷素环境极为敏感,参试的8个家系在少量施磷肥后其干物质积累量比天然红壤基质环境下增长3～19倍。毛红椿不同家系干物质积累量在不同磷素水平下差异巨大,在低磷胁迫下生长最好的家系其干物质积累量是生长最差家系的7倍左右,在高磷水平下生长最好的家系是最差家系的2.6倍左右。磷素吸收量是造成毛红椿家系在不同磷素环境下生长差异的主要原因。相关分析表明:毛红椿家系干物质积累量与苗高和地径、根长、根体积、根表面积、须根数等参数呈显著正相关。初步确定根长、根表面积、根体积、须根数作为耐低磷型优良家系的特异性指标。

关键词:毛红椿;家系;低磷胁迫;遗传变异

中图分类号:S714 **文献标识码**:A

Characteristics of Phosphorus Utilization in Families of *Toona ciliata* var. *pubescens*

KONG Chao, *LIU Jun*, *JIANG Jing-min*, *LI Yan-jie*

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: Soil culture at 4 phosphorus levels was conducted to illustrate characteristics of phosphorus utilization in 8 families of *Toona ciliata* var. *pubescens* with different responses to phosphorus supply. The results indicated that the seedlings were very sensitive to phosphorus supply, and the biomass accumulation of those with minor phosphorus supply were 3-19 times those in natural red soil. At different phosphorus levels, great differences in productivity were found among families. Under low phosphorus stress, the highest ones were 7 times those of the lowest, and under high phosphorus level, the highest ones were 2.6 times those of the lowest. P absorption efficiency was the main reason making differences of dry matter accumulation among families. The dry matter accumulation has a high and positive correlation to height and basal diameter of seedlings and root parameters. The root length, root volume, root surface, and the number of fibrous roots were selected as the special characteristics of families that can endure low phosphorus.

Key words: *Toona ciliata* var. *pubescens*; family; low phosphorus stress; genetic variation

磷素是植物生长所必须的大量元素之一,是构成细胞质和细胞核的重要物质,它参与了植物细胞的众多合成反应,并在能量的转移、传递和光合作用中起到重要作用[1]。我国南方山地缺磷现象严重,全磷含量小于0.05%,且多以难溶性闭蓄态形式存在而被固定,有效磷含量通常为2 mg·kg^{-1},一些土壤甚至在1 mg·kg^{-1}以下[2],严重影响人工经济林的生长发育。相关研究表明,土壤缺磷不仅是"土壤

收稿日期:2012-03-05
基金项目:国家林业公益性行业科研专项重点项目(201104001);浙江省重大科技专项(2008C02004-2)
作者简介:孔 超(1987-),男,山东曲阜人,在读硕士研究生,主要从事林木遗传育种研究.
*通讯作者:Email:jmjiang6001@126.com

学缺磷”,还有“遗传学缺磷”。植物从土壤中吸收的不仅是水溶性磷,而且还能利用难溶性磷,很多研究表明,不同类型植物利用土壤磷素的能力不同,能够活化土壤中难溶性磷的品种才是生产中最有价值的遗传资源[3]。因此,挖掘植物自身潜能,充分利用土壤潜在的磷资源,是解决人工林发展中土壤磷素供给屏障的有效途径[4]。

毛红椿(*Toona ciliata* Roem. var. *pubescens* (Franch.) Hand.-Mazz.)是楝科(Meliaceae)香椿属(*Toona* Roem.)植物,为落叶或近常绿大乔木,树干通直,心材红褐色,切面木纹美丽,素有“中国桃花心木”的美誉,是珍贵的用材树种,具有很高的经济价值和开发前景[5]。毛红椿主要分布于江西、湖南、湖北、四川、广东、贵州和云南等省[6],为国家二级保护植物,也被多个分布省份列为珍稀濒危树种[7-8]。林业实践证明,毛红椿在土层深厚、肥沃、湿润,排水良好的地段生长迅速,是培育大径级材的理想速生树种[9];但在缺磷少氮的土壤上难以表现出其速生潜势。南方山地红壤普遍性地力衰退、缺磷严重,选育耐低磷和高效磷素利用的优良基因型对推动毛红椿人工林发展有重要意义。

目前,国内外在毛红椿育种及造林、生理生态、物种保护、群体遗传结构等方面取得了一定的研究成果[5,9-12],但关于毛红椿磷素利用方面尚未开展研究。本文采用土培盆栽方法,研究毛红椿遗传材料在不同磷素供给水平下的生长和生理反应,从苗木干物质积累、根系形态建成及磷素吸收利用效率角度揭示毛红椿应对低磷胁迫的适应机制和对磷素反应的遗传差异,为毛红椿耐低磷和高效磷素利用育种提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

通过对浙江开化、安徽南陵、江西永丰 3 年生毛红椿家系人工林的调查以及土样的采集化验,根据各毛红椿家系不同立地环境下的生长表现,选取对土壤磷素供给水平敏感程度存在差异的 8 个家系作为试验材料,编号分别为 XJ1、XJ2、GX1、GX2、JX1、JX2、JL1、JL2。

盆栽基质取自试验地所在的山地贫瘠缺磷酸性红壤,其有机质含量为 6.1 g·kg^{-1},全氮、全磷和全钾分别为 0.47、0.18、7.94 g·kg^{-1},水解性氮、有效磷和速效钾含量分别为 44.0、2.15、48.9 mg·kg^{-1}。基质土壤经风干过筛后,与珍珠岩、过磷酸钙混合均匀,土壤与珍珠岩的体积比为 5∶1。营养杯口径 16 cm,高 14 cm。

1.2　试验设计

试验在浙江省富阳市中国林科院亚热带林业研究所(119°57′ E,30°03′ N)温室大棚进行,海拔高度 60 m。棚内平均温度 28 ℃,相对湿度 75% 以上,日光照 12～13 h。

所用过磷酸钙有效磷含量约为 12%。设置对照(P0,不施磷肥)、低磷(P1/2,每千克土施入 1 g 过磷酸钙)、标准磷(P1,每千克土施入 2 g 过磷酸钙)和高磷(P2,每千克土施入 4 g 过磷酸钙)4 个磷素水平处理。8 个参试家系每种磷素水平处理各盆栽 8 盆,共 4 个重复。

2011 年 1 月中旬于温室播种催芽,以培养试验用芽苗,到 5 月中旬选取大小相对一致的芽苗进行移植,每个营养杯移植芽苗 2 株,移植后正常管理。在芽苗开始正常生长后,每 15 d 每盆约施加氮、钾元素各 10 mg(利用 NH_4NO_3 与 KCl),以保持氮、钾等营养元素的正常水平,直至收获。

1.3　测定内容与方法

1.3.1　*生物量与氮、磷含量测定*　2011 年 9 月底盆栽试验苗收获,不同磷素水平下每个家系随机选取 10 株生长正常的苗木,将苗木分成根、茎、叶三部分,测定苗高、地径,最大复叶长度、宽度,并进行根系扫描,经 105 ℃杀青 30 min,79 ℃烘干至恒质量,测定各部分干物质量。参照 Lowther[13] 的方法用 H_2SO_4-H_2O 法消煮,依照 Mukherjee 等[14] 的方法测定各器官全磷含量,用全自动凯氏定氮仪测定全氮含量。相关计算方法:

磷素吸收量 = 磷素含量·株$^{-1}$(mg·株$^{-1}$,每株幼苗吸收的磷素含量);

磷素利用效率 = 总生物量/磷素吸收量(g·g^{-1},植株吸收单位磷素所产生的干物质量)[15]

1.3.2　*根系形态参数测定*　采用 Epson Perfection V700 型双光源扫描仪扫描获得根系形态图片,根系形态参数(根长、根表面积、根体积、须根数)用根系分析软件 WinRHIZO Pro 2005b(加拿大 Regent 仪器公司产品)分析,取平均值。

1.4　数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 进行简单的数据处理,采用 DPS7.05 进行方差分析,Origin7.5 软件绘图。采用 LSD 法进行处理间显著性检验。图中数

据采用平均值±标准误表示。

2 结果与分析

2.1 不同磷素水平下毛红椿家系苗高生长和生物量积累

幼苗生长状况是幼苗生理状况、遗传特性与生存环境条件互相作用的外在表现,在一定程度上反应了幼苗对环境的适应性[16]。试验结果显示:磷素的增加显著促进毛红椿家系幼苗苗高的生长。与对照P0水平相比,添加不同磷素水平的处理使毛红椿各家系幼苗苗高和干物质积累量分别提高1.9～3.6倍和3.7～19.2倍。

表1 不同磷素水平下毛红椿家系的苗高生长和干物质积累量

家系	苗高/cm				干物质积累量/g			
	P0	P1/2	P1	P2	P0	P1/2	P1	P2
XJ1	6.9b	24.8a	35.1ab	41.2a	0.06b	1.14b	2.60a	2.98c
XJ2	12.4a	28.3ab	30.6a	36.7bc	0.43a	1.57a	2.08b	3.51b
GX1	6.4b	23.4c	23.3b	33.5c	0.06b	1.09b	0.96d	3.77b
GX2	12.5a	28.3ab	32.6a	35.3c	0.27ab	1.67a	1.58c	3.01c
JX1	8.2ab	23.8b	29.3b	40.3ab	0.12ab	1.06b	1.27cd	2.76c
JX2	8.8ab	21.7ab	31.1b	33.6c	0.14ab	1.14b	1.38c	1.83d
JL1	9.9ab	24.1ab	31.1ab	44.1a	0.10b	1.10b	2.41a	4.86a
JL2	8.8ab	16.7c	24.4c	34.3c	0.09b	0.51c	1.01d	2.75c
均值	9.2	23.9	29.7	37.4	0.16	1.16	1.66	3.18

注:同一列不同字母表示不同家系间差异极显著(LSD,$P<0.01$),表2同。

方差分析表明:低磷胁迫下对照组毛红椿幼苗苗高和干物质积累量的家系效应均达到极显著水平($p<0.01$),其中家系XJ2、GX2的苗高和干物质积累量最高,分别为12.4、12.5 cm和0.43、0.27 g,家系JX1、JX2、JL1、JL2次之,而家系XJ1和GX1最差。比较分析发现,毛红椿各家系对于土壤磷素的敏感性极高,在P2水平下,参试的8个家系平均苗高和干物质积累量分别为对照组的4.0倍和19.9倍。低磷水平下生长较好的家系XJ2和GX2对磷素的敏感性相对较低,随着磷素水平的提高其苗高和干物质积累量的增幅相对较小,可认为是耐低磷型的优良家系。家系GX1和JL1虽然在低磷水平下生长较差,但对磷素的增加很敏感,投入适当的磷肥就能获得较大的效益,如家系JL1在P2水平下其干物质积累量是P0水平下的48.6倍,是高效的磷素敏感型家系;其他家系则介于耐低磷型和磷素敏感型之间。不同毛红椿家系对于低磷环境的适应性或对磷素的敏感性不同,表明在低(缺)磷的立地上应正确选用适宜的家系,并采用科学的施肥措施提高毛红椿林分的生产力。

2.2 不同磷素水平下毛红椿家系磷素吸收量与磷素利用效率

磷素吸收量指的是每株幼苗吸收的磷素含量,代表了植株对磷素的吸收能力。磷素利用效率是指植株吸收单位磷素所产生的干物质量,单位磷素吸收量产生的干物质量越高,表明其对磷素的利用越充分。由表2可以看出:P0水平时毛红椿家系磷素吸收量最低,随着磷素水平的增加,毛红椿家系幼苗的磷素吸收量呈不断上升的趋势,而磷素利用效率没有明显规律。方差分析表明:不同毛红椿家系的磷素吸收量存在极显著的磷肥效应($p<0.01$)和较高的家系效应($p=0.07$),而磷素利用效率存在极显著的磷肥效应($p<0.01$),家系间差异不明显($p=0.65$)。在低磷胁迫下,家系XJ2和GX2有较高的磷素吸收量且具有较高的磷素利用效率,即能够吸收较多的磷素并且对已获得磷素的利用效率较高,因而在低磷水平下有较好的生长表现。家系JL1在低磷胁迫下磷素吸收量和磷素利用效率都较小,而高磷水平下有较大的磷素吸收量和磷素利用效率,因而对磷肥有较高的敏感性。

2.3 不同磷素水平下毛红椿家系的根系形态参数

图1为不同磷素水平下毛红椿家系的根系形态参数变化。与苗高和干物质积累量相似,少量地施用磷肥,根系各形态参数即呈现数倍的增长。方差分析表明:根系形态参数(根长、根体积、根表面积、须根数)在磷素水平、家系及其交互作用间均存在极显著差异(表3)。随磷素水平的增加,根系各形态参数基本呈现增加的趋势。低磷胁迫下,生长较好的家系XJ2和GX2其根长、根体积、根表面积和须根数也较大。

表 2　不同磷素水平下毛红椿家系的磷素吸收量与磷素利用效率

家系	磷素吸收量/(mg·株$^{-1}$)				磷素利用效率/(g·g^{-1})			
	P0	P1/2	P1	P2	P0	P1/2	P1	P2
XJ1	1.9b	30.7d	90.9a	100.6d	319.8d	333.7a	286.1a	296.3bc
XJ2	10.3a	57.2a	86.7a	125.1b	420.5a	274.4c	239.4bc	280.4c
GX1	2.1b	40.0bc	40.9d	117.2c	278.1e	272.9c	234.4c	321.3ab
GX2	7.1ab	54.0a	65.1b	110.9c	382.1b	309.7ab	242.3bc	271.5c
JX1	3.3ab	41.2bc	55.1c	87.6e	337.2cd	283.0bc	231. 5c	314.5b
JX2	3.2ab	44.7b	58.6bc	66.1f	357.4bc	255.6c	235.9c	277.2c
JL1	3.2ab	34.6cd	84.2a	137.7a	317.7d	317.9a	286.9a	352.6a
JL2	2.7ab	19.5e	37.1d	95.2d	280.7e	261.3c	272.0ab	318.0b
均值	4.2	40.2	64.8	105.1	336.7	288.6	253.6	304.0

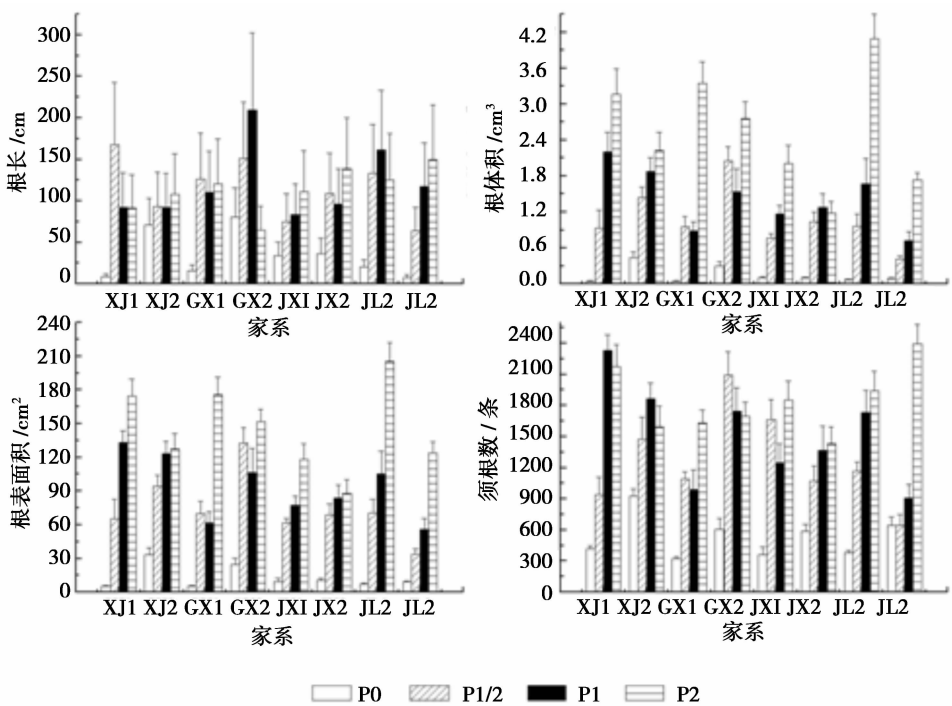

图 1　不同磷素水平下毛红椿家系的根系形态参数

毛红椿家系在不同磷素水平下不同径级的根长变化见图 2。各径级根长随磷素水平的增高呈现增大的趋势。根长主要集中在 0.0 ～0.5 mm 和 0.5 ～1.0 mm 2 个径级,1 ～2 mm 和 >2 mm 2 个径级根系所占比例很小,特别是 >2 mm 径级。方差分析表明:各径级根长在磷素水平、家系及其交互作用间均存在极显著差异(表 3)。比较分析发现:在低磷条件下生长较好的家系 XJ2 和 GX2 其 0 ～0.5 mm 和 0.5 ～1 mm 径级的根系,即细根的根长明显超过其他的家系。

2.4　毛红椿家系磷素吸收利用的相关分析

植物对磷素环境的适应机制有其特定的形态学和生理学基础,这里进一步研究磷素吸收量、磷素利用效率与苗木生长、干物质积累、根系形态参数的相关性,以确定不同磷素环境下毛红椿干物质积累的特异性指标。表 4 结果显示:毛红椿干物质积累量与磷素利用效率相关性较小,而与磷素吸收量表现出极显著的正相关,这表明毛红椿家系的磷素吸收能力可以较好地反映干物质积累能力。

盆栽条件下,毛红椿家系磷素吸收量与苗高和地径具有极显著相关性。干物质积累量与根系形态参数的相关结果揭示:毛红椿家系根系形态特征与磷素吸收量、干物质积累量呈极显著正相关,磷素吸收量高的家系其根长长、根表面积大、根体积大、须根数多,进而具有较高的干物质生产能力。由于盆栽条件下苗木根系的生长受到育苗容器大小的制约,这里未发现根冠比与磷素吸收量、干物质积累量间的相关性。

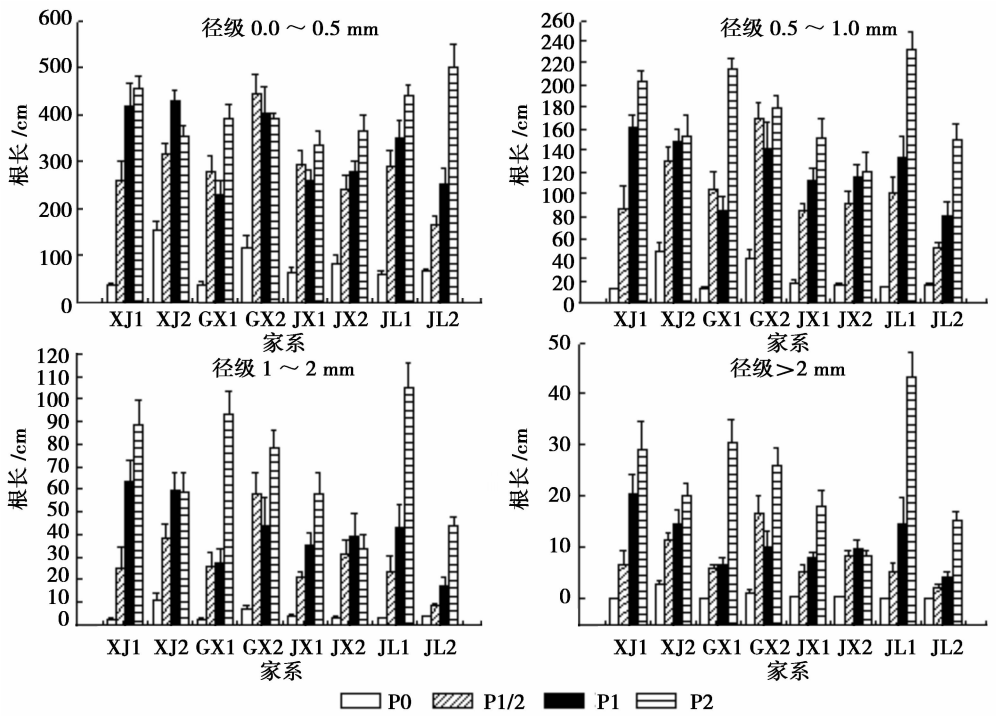

图2 不同磷素水平下毛红椿家系不同径级的根长变化

表3 毛红椿家系幼苗根系形态参数方差分析

变异来源	根长		根体积		根表面积		须根数	
	均方	F 值	均方	F 值	均方	F 值	均方	F 值
家系	82 656.61	7.06**	2.40	8.73**	5 619.60	8.49**	669 062.96	5.36**
处理	2 209 949.89	188.86**	38.34	139.37**	114 204.04	172.6**	11 882 951.55	95.23**
家系×处理	54 914.18	4.69**	1.56	5.69**	3 433.37	5.19**	750 799.19	6.02**
机误	11 701.53		0.28		661.69		124 787.33	

变异来源	径级 0.0～0.5 mm		径级 0.5～1.0 mm		径级 1～2 mm		径级 >2 mm	
	均方	F 值	均方	F 值	均方	F 值	均方	F 值
家系	26 473.58	5.98**	7 263.77	7.46**	1 853.16	7.35**	253.11	8.09**
处理	741 987.18	167.51**	165 683.55	170.23**	28 510.37	113.11**	3 662.62	117.1**
家系×处理	20 873.88	4.71**	4 409.72	4.53**	1 216.05	4.83**	189.24	6.05**
机误	4 429.51		973.28		252.06		31.28	

注：**表示 $P<0.01$。

表4 毛红椿家系磷素利用效率、磷素吸收量、干物质积累量与其相关性状之间的相关系数

项目	相关系数			项目	相关系数		
	磷素利用效率	磷素吸收量	干物质积累量		磷素利用效率	磷素吸收量	干物质积累量
磷素吸收量	-0.21			根体积	-0.08	0.95**	0.97**
干物质积累量	-0.07	0.98**		须根数	-0.19	0.85**	0.82**
苗高	-0.29	0.93**	0.91**	径级 0.0～0.5 mm	-0.25	0.88**	0.84**
地径	-0.24	0.95**	0.92**	径级 0.5～1.0 mm	-0.18	0.95**	0.94**
根冠比	0.01	0.29	0.30	径级 1～2 mm	-0.12	0.94**	0.95**
根总长	-0.21	0.93**	0.91**	径级 >2 mm	-0.01	0.93**	0.96**
根表面积	-0.15	0.96**	0.96**				

注：**表示 $P<0.01$。

2.5　毛红椿家系幼苗生长性状的遗传控制及与磷素环境的关系

表 5 列出了 12 个与干物质生产能力关系密切相关性状的家系遗传力。家系遗传力的估算表明:毛红椿家系磷素吸收量、磷素利用效率及几个重要的生长、根系性状在各磷素水平下均受中等以上程度的遗传控制,其家系遗传力估算值变化在 0.671 4～0.995 1 间;随着土培介质磷素营养的改善,这些磷素效率相关性状的家系遗传力略有下降,却仍保持较高水平,其中,干物质积累量及磷素吸收量均表现出极高的遗传效应,为毛红椿磷素高效基因型的选育提供了理论支持。

表 5　不同磷素水平下毛红椿家系干物质积累相关性状的家系遗传力

性状	磷素水平			
	P0	P1/2	P1	P2
苗高	0.942 0	0.860 7	0.813 0	0.703 9
地径	0.926 3	0.946 6	0.888 9	0.766 5
干物质积累量	0.991 3	0.960 2	0.974 0	0.954 3
根总长	0.882 2	0.837 5	0.810 9	0.765 3
根体积	0.887 0	0.845 9	0.703 7	0.888 1
根表面积	0.890 6	0.846 6	0.763 0	0.868 8
须根数	0.899 3	0.874 4	0.845 5	0.693 5
径级 0.0～0.5 mm	0.871 5	0.824 7	0.813 5	0.714 1
径级 0.5～1.0 mm	0.890 2	0.846 3	0.715 4	0.834 1
径级 1～2 mm	0.814 0	0.794 8	0.671 4	0.884 4
径级 >2 mm	0.830 7	0.823 6	0.703 3	0.890 5
磷素吸收量	0.995 1	0.980 9	0.982 5	0.963 2

3　结论与讨论

磷素缺乏是南方红壤地区普遍存在的问题,是人工林实现速生丰产目标的重要制约因素。林业生产与农作物生产不同,充分利用自然力而非大量的人为施肥投入仍是达到速生、高效目的的重要途径。进行林木磷素高效基因型育种,依靠其遗传潜力与外部环境的整合解决“基因型缺乏”,显得尤为重要。研究发现,毛红椿幼苗对于土壤磷素极为敏感,通过少量的施肥,其生物量可以数倍的增加。

磷素高效基因型是指在磷素营养供应不足时,能够较其他基因型获得更多干物质量或经济产量。在植物耐低磷育种实践中,根据在不同磷素环境中的生长表现可筛选出磷素高效基因型。基于盆栽土培试验,本研究对毛红椿 8 个家系的磷素吸收利用特性作了系统分析,初步筛选出家系 XJ2 和 GX2 作为耐低磷型优良家系,这 2 个家系不仅适宜于较好的立地条件,在有效磷含量较低的立地上也有较好的表现。家系 GX1 和 JL1 在低磷胁迫下干物质积累量较低,但在适当施肥的条件下(P2 水平)其生长的表现要优于家系 XJ2 和 GX2,可优先在有效磷含量较高的立地上应用,或配合施用磷肥发挥其生长潜力。

磷素高效基因型一般有 2 种适应机制:1 种是在缺磷环境中能够吸收较多的磷素,主要是活化难溶态磷;1 种是对已吸收磷素的充分利用,主要是植物体内磷素代谢效率的提高,以少量的磷素即可维持正常的生长。这 2 种机制可分别用磷素吸收量和磷素利用效率进行量化比较。不同植物为适应不同的磷素环境形成了各异的适应机制,或采用 1 种或多种机制适应地磷胁迫。本文研究表明,毛红椿家系干物质积累量与磷素吸收量呈极显著正相关,与磷素利用效率相关性较小,即不同磷素环境下造成家系间生长差异的因素是磷素吸收量,这一结论与周志春等[17]关于低磷胁迫下马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)种源磷效率的研究结果有异。磷素吸收量的提高即是通过增加根系对土壤中磷素的吸收。研究发现,低磷胁迫下生长较好的家系 XJ2 和 GX2 较其他家系具有较长的根长、较大的根体积、较广的根表面积和更多的须根数。

植物的磷素高效基因型具有数量遗传的性质,主要受加性基因的作用,由微效多基因控制[18]。这些微效基因决定了植物在特定磷素环境下在形态、构造以及一系列生理、生化特征上的适应性改变。毛红椿家系在不同磷素环境下生长差异显著,说明不同家系在对磷素环境的适应过程中产生了遗传变异。从本文给出的毛红椿干物质积累量相关性状的家系遗传力来看,磷素吸收量、磷素利用效率及几个重要的生长、根系性状在各磷素水平下均受较强的的遗传控制,说明遗传因素对这些磷素高效利用相关性状的影响是主要的。

研究表明,毛红椿家系根长、根表面积、根体积、须根数与干物质积累呈极显著正相关,且受较强的遗传控制。结合耐低磷家系 XJ2 和 GX2 较其他家系具有较长的根长、较大的根体积、较广的根表面积和更多的须根数的特征,可初步确定根长、根表面积、根体积、须根数作为耐低磷型优良家系的特异性指标。由于试验时间及试验条件的限制,本研究结果有待今后开展大田试验及生理生化试验以进一步完善。

参考文献:

[1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2003:35-45

[2] 邱 燕,张鼎华. 南方酸性土壤磷素化学研究进展[J]. 福建稻麦科技,2003,21(3):14-17

[3] 柏栋阴,冯国华,张会云,等. 低磷胁迫下磷高效基因型小麦的筛选[J]. 麦类作物学报,2007,27(3):407-410

[4] 杨瑞吉,张小红,王鹤龄,等. 不同基因型春小麦对磷胁迫适应性研究[J]. 西北植物学报,2005,25(11):2314-2318

[5] 刘 军,陈益泰,罗阳富,等. 毛红椿天然林群落结构特征研究[J]. 林业科学研究,2010,23(1):93-97

[6] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第四十三卷第三分册[M]. 北京:科学出版社,1978:36-37

[7] 楼炉焕,金水虎. 浙江古田山自然保护区种子植物区系分析[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):33-39

[8] 张光富. 安徽珍稀濒危植物及其保护[J]. 安徽师范大学学报,2000,23(1):36-39

[9] 邹高顺. 珍贵速生树种红椿与毛红椿引种栽培研究[J]. 福建林学院学报,1994,14(3):271-276

[10] 赵 坤,吴际友,陈 瑞,等. 毛红椿光合及水分生理生态特性[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(5):87-91

[11] 黄红兰,梁跃龙,张 露. 毛红椿资源保护与培育的研究现状与对策[J]. 林业科技开发,2010,24(1):10-14

[12] 刘 军,陈益泰,孙宗修,等. 基于空间自相关分析研究毛红椿天然居群的空间遗传结构[J]. 林业科学,2008,44(6):45-52

[13] Lowther J R. Use of a single sulphuric acid-hydrogen peroxide digest for the analysis of *Pinus radiata* needles[J]. Commun Soil Sci Plant Anal,1980,11(2):175-188

[14] Mukherjee S K, Asanuma S. Possible role of cellular phosphate pool and subsequent accumulation of inorganic phosphate on the aluminum tolerance in *Bradyrhizobium japonicum*[J]. Soil Biology and Biochemistry,1998,30(12):1511-1516

[15] 曹 靖,张福锁. 低磷条件下不同基因型小麦幼苗对磷的吸收和利用效率及水分的影响[J]. 植物生态学报,2000,24(6):731-735

[16] 陈 斌. 林业苗木质量评定与控制方法探讨[J]. 四川林业科技,2004,25(2):78-80

[17] 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):25-31

[18] 王庆仁,李继云,李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究[J]. 生态学报,1999,19(3):417-421