

供磷水平对米老排苗木生长及养分状况的影响

张阳锋, 杨锦昌*, 尹光天, 李荣生, 邹文涛, 闫彩霞

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520)

摘要: 为探讨供磷(P)对米老排(*Mytilaria laosensis*)生长和养分状况的影响, 采用土培的方法, 研究了不同供磷水平下米老排苗木的生长、养分含量、养分积累量和 P 吸收效率。结果表明, 随着供 P 水平的提高, 米老排苗木的苗高、生物量和养分积累量均呈先上升后下降的趋势; 地径呈先增加后稳定的趋势; 叶片和全株中的养分含量变化一致, 氮(N)含量变化不明显, 钾(K)含量呈先降低后升高的趋势, 而 P 含量明显提高; P 吸收效率呈现降低-升高-降低的趋势。在单株供 P 为 30 mg 时, 米老排苗木的叶生物量、根生物量、叶片中 N 积累量及 P 吸收效率最大。当供 P 水平达到 45 mg 时, 米老排苗木的苗高、茎生物量、总生物量、叶片中的 P、K 积累量和全株中的 N、P、K 积累量均达到最大值。而供 P 水平达 60 mg 时, 米老排苗木苗高、生物量、养分积累量和 P 吸收效率均明显下降。这说明适合米老排苗木生长的供 P 水平为每株 30~45 mg。

关键词: 米老排; 磷; 生长; 养分状况

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.06.002

Effects of Supplying Phosphorus on Growth and Nutrient Status of *Mytilaria laosensis* Seedlings

ZHANG Yang-feng, YANG Jin-chang*, YIN Guang-tian, LI Rong-sheng, ZOU Wen-tao, YAN Cai-xia

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

Abstract: In order to understand the effect of supplying phosphorus (P) on growth and nutrient status of *Mytilaria laosensis*, its growth character, nutrient content and accumulation, and uptake efficiency of P were studied treated with different P levels under soil culture. The results showed that with the supplying P increment, the plant height, biomass, and nutrient accumulation increased initially and then decreased, and the base diameter rose firstly and then kept stable. As supplying P levels increased, the changes in nutrient content of leaves and whole plant were not different, nitrogen (N) content had no obvious change, the content of potassium (K) decreased firstly and then increased, while the P content obviously enhanced, the uptake efficiency of P showed the trend of drop-rise-drop. Supplied with 30 mg P per plant, the biomass of leaves and root, the N accumulation in leaves and uptake efficiency of P were the highest. The plant height, biomass of stem, total biomass, K and P accumulation in leaves, N, P and K accumulation in the plant reached peak supplied 45 mg P per plant. As supplied 60 mg P per plant, the plant height, biomass, nutrient accumulation and uptake efficiency of P declined significantly. Therefore, the optimum supplying P level for plant growth of *M. laosensis* seedlings was 30–45 mg per plant, and beyond that, some obvious inhibitory effects would occur.

Key words: *Mytilaria laosensis*; Phosphorus; Growth; Nutrient status

收稿日期: 2016-03-01 接受日期: 2016-05-10

基金项目: 林业行业专项(201204304); 广东省林业科技创新项目(2016KJCX004)资助

This work was supported by the Project of Forestry Industry Research Special Funds for Public Welfare (Grant No. 201204304), and the Project of Forestry Science and Technology Innovation of Guangdong Province (Grant No. 2016KJCX004).

作者简介: 张阳锋(1993~), 男, 硕士研究生, 主要从事林木培育理论与技术的研究。E-mail: zhayfeng@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fjyjc@126.com

磷(P)是植物生长必需的营养元素之一,是核酸、核蛋白和磷脂等功能性物质的组成成分,参与植物光合、呼吸以及能量代谢等重要生理过程^[1]。但由于其在土壤中难溶解、难移动,施入土壤中的 P 肥大部分难以被苗木吸收利用。同时,我国南方地区高温多雨,富铝化作用明显,多数土壤呈酸性或强酸性,P 固定尤为强烈,土壤有效 P 含量极低,成为影响我国南方林木生长的重要限制性因子^[2]。为满足植物生长对 P 的需求,生产实践中常用施肥的方法来促进苗木生长、弥补养分不足,特别是集约经营的容器育苗^[3]。合适的 P 肥用量不仅能够促进苗木生长和提高 P 肥的使用效率,而且可以减少经济成本和环境污染^[4]。

米老排(*Mytilaria laosensis* Lec.)为金缕梅科(Hamamelidaceae)常绿阔叶乔木,是我国南亚热带主要的乡土用材树种之一。米老排生长快、干形通直、材质优良,是建筑、家具、造纸和人造板的优质原料,也是水土保持、土壤改良、混交造林及生物防火的优良树种^[5-6]。前人就 N 对米老排苗木生长、养分状况等方面的影响已经开展研究^[7-8],然而有关 P 对米老排苗木生长及养分状况的影响还未见报道。本文通过土培试验,探讨不同供 P 水平对米老排苗木生长、养分含量、养分累积量和 P 吸收效率的影响,为米老排优质苗木培育提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验材料为米老排(*Mytilaria laosensis* Lec.)实生苗,其种子采自广西省靖西市同一优良母树。2014 年 5 月末取长势良好、大小均匀一致、苗高约 10 cm 的幼苗,用去离子水洗净后,移栽于规格为 35 cm×25 cm×30 cm (上口×下口×高)的塑料盆中。培养基质为经高压灭菌的混合基质(泥炭:蛭石:珍珠岩体积比为 3:2:2)。试验期间,温室内为自然光强,温度为 23℃~38℃,相对湿度为 34%~78%。参试肥料为普罗丹缺 P 肥(Planta,加拿大植物营养产品公司),其主要养分含量为:氮(N) 14%、氧化钾(K₂O) 14%、钙(Ca) 5.9%、镁(Mg) 2.9%、硫(S) 0.1%、螯合铁(Fe) 0.05%、螯合锰(Mn) 0.05%、螯合锌(Zn) 0.05%、螯合铜(Cu) 0.05%、硼(B) 0.02%、钼(Mo) 0.015%、EDTA 螯合体 1.00%。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计,6 个处理,4 次重复,24 个小区。6 个供 P 水平(处理)分别为单株 0、10、20、30、45、60 mg,供 P 水平以磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O)的量来控制,采用等量施肥法。每个处理 24 株苗木,共计 576 株。待移苗 15 d 后,每两周施 Planta 和 P 肥 1 次,6 次平均施入,每次施 P 水平分别为单株 0、1.67、3.33、5、7.5、10 mg。根据米老排苗期氮素施肥试验结果^[7],最佳氮素水平为单株 200 mg,折合 Planta 肥总量为 1428.57 mg,按 6 次平均施入,即每次施 Planta 肥 238.10 mg。

1.3 方法

施肥试验结束 15 d 后,收获米老排苗木。用直尺和游标卡尺测量全部苗木的苗高和地径。每个小区选取 4 株标准苗,用去离子水洗净,置于烘箱中 105℃杀青 20 min 后,在 75℃下烘干至恒重,测定根、茎、叶干重。

将烘干的根、茎、叶样品分别粉碎,研磨过筛后用于测定叶片和全株中的养分含量。其中全 N 采用扩散法测定,全 P 采用钼锑钒比色法测定,全 K 采用火焰光度计法测定(LY/T 1269-1999 和 LY/T 1270-1999)。并根据以下公式^[9-10]计算单株养分累积量(mg)=养分含量×生物量;P 吸收效率(%)=(处理植株 P 累积量-对照植株 P 累积量)/施 P 量×100%。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行统计分析并绘制图表,用 SPSS 19.0 进行方差分析和 Duncan 多重比较。

2 结果和分析

2.1 对苗木高度、地径及生物量的影响

从表 1 可见,随着供 P 水平的提高,米老排苗高、叶生物量、茎生物量、根生物量和总生物量均呈先上升后下降趋势,除根生物量外,处理间均存在显著差异;地径呈现先增加后趋于稳定的趋势,处理间差异显著。当供 P 水平为 30 mg 时,叶生物量和根生物量达到最大值,分别比对照提高了 36.4%和 42.3%;苗高、茎生物量和总生物量在供 P 水平为 45 mg 时达到最大值,分别比对照增加了 19.3%、46.4%和 38.6%;当供 P 水平达到 60 mg 时,苗高、叶生物量、茎生物量和总生物量均下降,说

表 1 供 P 水平对米老排苗木的苗高、地径及生物量的影响

Table 1 Effect of supplying P on height, ground diameter and biomass of *Mytilaria laosensis* seedlings

P (mg)	苗高 Height (cm)	地径 (mm) Base diameter	生物量 Biomass (g)			
			叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	总和 Total
0	33.16±0.79a	3.41±0.05a	1.98±0.26a	0.97±0.13a	0.52±0.05a	3.47±0.41a
10	36.24±0.88b	3.56±0.04b	2.51±0.21ab	1.17±0.15ab	0.60±0.06a	4.27±0.40ab
20	37.22±0.75b	3.60±0.05b	2.58±0.21ab	1.34±0.15ab	0.70±0.05a	4.62±0.40ab
30	37.17±0.72b	3.53±0.05ab	2.70±0.18b	1.35±0.09ab	0.74±0.07a	4.77±0.33b
45	39.57±0.86c	3.62±0.05b	2.68±0.13b	1.42±0.08b	0.71±0.05a	4.81±0.20b
60	35.99±0.81b	3.64±0.60b	2.10±0.28ab	1.07±0.12ab	0.70±0.10a	3.87±0.49ab

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。

Data followed different letters indicate significant difference at 0.05 levels. The same is followed Tables.

明供 P 水平为 30~45 mg 最适合米老排苗木的生长。

2.2 对养分含量的影响

由表 2 可知, 在不同供 P 水平下, 叶片与全株中的养分含量表现出一致的变化规律。其中叶片和全株中的 N 含量随着供 P 水平的提高变化不明显, 处理间差异不显著; 而叶片和全株中的 K 含量则随

供 P 水平的升高呈先下降后上升的趋势。随着供 P 水平的提高, 叶片和全株的 P 含量显著提高, 分别比对照提高了 2.94%~119.32%和 11.24%~114.89%。当 P 水平为 30 mg, 全株中 P 含量与对照有显著差异; 当供 P 水平为 45 mg, 叶片中 P 含量显著高于对照。由此可见, 供 P 水平的提高可以有效促进米老排苗木对 P 的吸收。

表 2 供 P 水平对米老排苗木养分含量的影响

Table 2 Effects of P levels on nutrient content of *Mytilaria laosensis* seedlings

P (mg)	叶 Leaf (g kg ⁻¹)			全株 Whole plant (g kg ⁻¹)		
	N	P	K	N	P	K
0	24.11±0.99a	2.38±0.18a	21.35±0.88ab	21.28±0.52a	3.29±0.18a	20.15±1.02a
10	25.06±0.41a	2.14±0.17a	18.50±1.36a	21.66±0.23a	3.66±0.28a	19.85±1.70a
20	24.33±1.24a	2.45±0.17a	21.17±1.16ab	21.35±0.87a	4.07±0.55a	18.96±0.58a
30	24.66±0.88a	3.05±0.14a	21.44±0.56ab	21.02±1.07a	6.23±0.54b	21.17±0.87a
45	24.24±0.82a	4.69±0.43b	21.94±1.22ab	21.73±0.51a	6.92±0.94b	21.27±0.52a
60	24.46±0.34a	5.22±0.54b	22.29±0.43b	21.08±1.07a	7.07±1.15b	21.20±0.48a

2.3 对养分累积量的影响

随着供 P 水平的提高, 米老排苗木叶片和全株中 N、P、K 累积量表现出相似的变化规律, 大体上呈先增加后下降的趋势(图 1)。在供 P 水平为 30 mg 时, 叶片中 N 的累积量最大, 单株为 66.19 mg, 比对照提高了 37.41%。当供 P 水平为 45 mg 时, 幼苗叶片中 P、K 积累量和全株中的 N、P、K 累积量达到最大, 叶片中的 P 和 K 累积量单株分别为 12.41 mg 和 59.18 mg, 比对照提高了 168.62%和 41.61%; 全株中的 N、P 和 K 累积量分别为 104.69 mg、33.75 mg 和 102.51 mg, 比对照提高了 42.51%、193.99%和 44.38%。可见, 供 P 的增加能够有效增加苗木叶片和全株对 N、P 和 K 的吸收和累积。多重比较表明, 45 mg 的供 P 水平下的米老排苗木叶片和全株中的 P 累积量显著($P<0.05$)高于 30 mg 以下的处理。

2.4 对 P 吸收效率的影响

养分的吸收效率直接反映了林木对施入土壤中养分的吸收能力。由图 2 可以看出, 不同供 P 水平下, 苗木的吸收效率存在显著差异。P 吸收效率随着 P 水平的提高呈现降低-升高-降低的趋势。在 30 mg 供 P 水平下, 米老排苗木对 P 的吸收效率达到最大, 为 59.71%; 在高供 P 水平下 (60 mg), 苗木对 P 的吸收效率最低, 仅为 24.34%, 显著低于 30 mg 和 45 mg 处理。养分的吸收效率是由养分累积量和供 P 水平共同决定的, 在供 P 水平较低时, 苗木的养分累积量比较小, 养分吸收效率降低, 随着供 P 水平的提高, 苗木的养分累积量增大, 养分吸收效率升高, 当供 P 水平进一步提高, 养分累积量减小, 吸收效率显著降低。

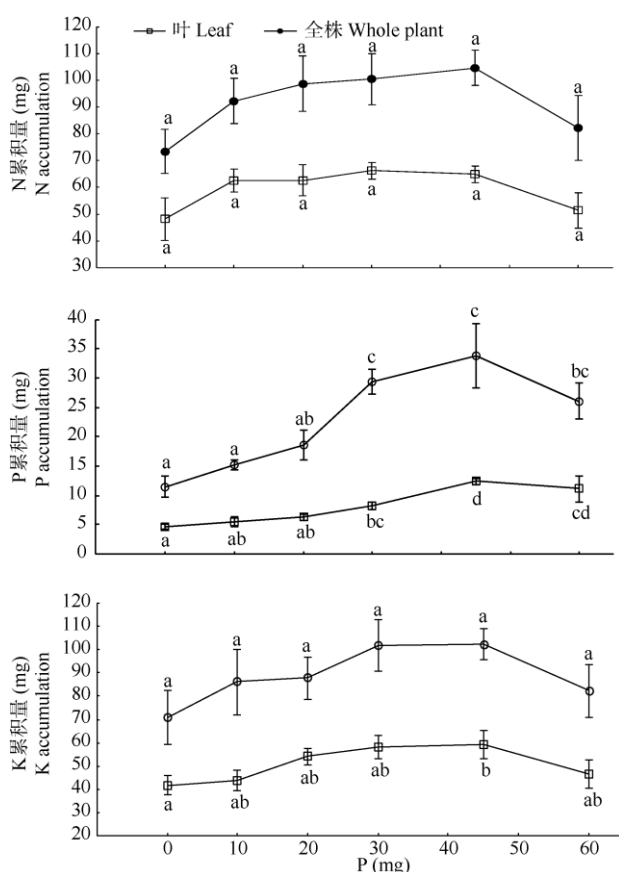


图 1 不同 P 水平对米老排苗木养分积累量的影响。不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Fig. 1 Effects of P levels on nutrient accumulation of *Mytilaria laosensis* seedlings. Different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same is following Figures.

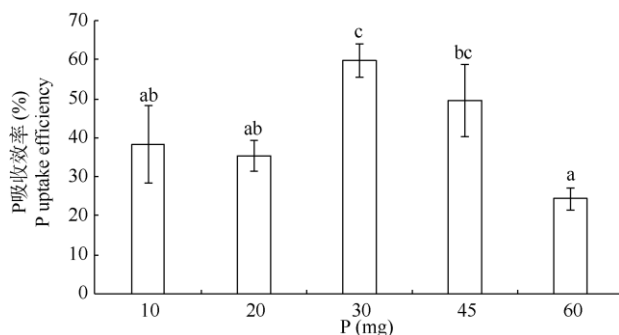


图 2 不同 P 水平对米老排苗木 P 吸收效率的影响

Fig. 2 Effects of P levels on the P uptake efficiency of *Mytilaria laosensis* seedlings

3 结论和讨论

本研究结果表明, 不同供 P 水平对米老排苗木

的苗高、地径、生物量和养分状况都有不同程度的影响。当供 P 水平为 30 mg, 米老排苗木的叶生物量、根生物量、叶片中 N 累积量以及 P 吸收效率最高; 当供 P 水平上升到 45 mg 时, 米老排苗木的苗高、茎生物量、总生物量、叶片中的 P、K 累积量和全株中的 N、P、K 累积量均达到最大, 说明米老排苗木生长的适合供 P 水平为 30~45 mg。

低 P 胁迫下, 一些植物可通过调节干物质分配、增加根系生物量和抑制地上部分生长来适应胁迫^[11-12]。本研究中, 不施 P 处理苗木的根生物量没有明显增大, 反而稍低于施 P 处理, 说明低 P 胁迫会抑制米老排苗木的根系生长, 这与黄花苜蓿 (*Medicago falcata*)、蒺藜苜蓿 (*Medicago truncatula*)、剑麻 (*Agave sisalana*)、纽荷兰脐橙 (*Citrus sinensis*) 等的研究结果一致^[13-15]。在高供 P 水平下, 米老排苗木的苗高、叶生物量、茎生物量和总生物量均明显减小, 与闽楠 (*Phoebe bournei*)^[16]、红松 (*Pinus koraiensis*)^[17] 和甜瓜 (*Cucumis melo*)^[18] 等的研究结果相似。这说明与正常 P 水平相比, 供 P 水平过高或过低都会抑制植物的生长发育。

大量研究表明, 供 P 水平提高能够促进植物对 P 的吸收和累积^[19-23], 本研究结果与其一致。臧成凤等^[24]研究表明, 铁核桃 (*Juglans sigillata*) 实生苗木叶片中的 N 和 K 含量随供 P 水平增加呈现先升高后降低的趋势。王东光^[16]等的研究表明, 除对照处理外, 闽楠叶片 N 含量各处理变化幅度较小, 最高值仅为最低值的 1.12 倍。在本研究中, 米老排苗木和叶片中的 N 含量变化无明显变化, 这可能与基质中的 N 素营养供应充足有关。研究表明, 纽荷兰脐橙叶片中的 K 含量随 P 水平的提高呈先升高后下降的趋势^[13], 与本研究结果相反, 可能 P 的吸收对 K 含量造成稀释作用^[25], 其具体原因还需进一步探讨。在本研究中, N、P 和 K 累积量均随供 P 水平的提高呈现先升高后降低的趋势, 说明适量的施肥有助于米老排苗木对养分的吸收和累积。有研究表明, 通过施肥提高苗木体内养分的积累量, 能够促进苗木造林后的生长和竞争力^[26-27]。

养分吸收效率是衡量施肥是否合理的一个重要参数。本试验中随着施肥量的增加, 养分吸收效率有所提高, 但当施肥量超过一定值以后, 养分的吸收效率呈下降的趋势。因此, 合理施肥不仅能够减少施肥的经济投入, 而且可以避免对自然环境造成污染, 保证林业生产的可持续发展。

参考文献

- [1] PAN R Z. Plant Physiology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008: 97–103.
潘瑞炽. 植物生理学 [M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2008: 97–103.
- [2] QIU Y, ZHANG D H. Research progress on phosphorus transformation in southern acid soils [J]. Fujian Sci Techn Rice Wheat, 2003, 21(3): 14–17. doi: 10.3969/j.issn.1008-9799.2003.03.005.
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. doi: 10.3969/j.issn.1008-9799.2003.03.005.
- [3] 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(3): 231–237. doi: 10.1051/forest:2006001.
- [4] WITHERS P J A, ROGER S B, JONES D L, et al. Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain [J]. Environ Sci Techn, 2014, 48(12): 6523–6530. doi: 10.1021/es501670j.
- [5] LIN J G, ZHANG X Z, WENG X. Effects of site conditions on growth and wood quality of *Mytilaria laosensis* plantations [J]. J Plant Resour Environ, 2004, 13(3): 50–54. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2004.03.011.
林金国, 张兴正, 翁闲. 立地条件对米老排人工林生长和材质的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(3): 50–54. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2004.03.011.
- [6] LIU E, LIU S R. The research of carbon storage and distribution feature of the *Mytilaria laosensis* plantation in south subtropical area [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(16): 5103–5109. doi: 10.5846/stxb201108141190.
刘恩, 刘世荣. 南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征 [J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5103–5109. doi: 10.5846/stxb201108141190.
- [7] YAN C X, YANG J C, YIN G T, et al. Effects of different nitrogen loading regimes and levels on growth dynamic of *Mytilaria laosensis* seedlings [J]. J NE For Univ, 2015, 43(5): 11–16. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2015.05.003.
闫彩霞, 杨锦昌, 尹光天, 等. 供氮方式及水平对米老排苗期生长动态的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(5): 11–16. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2015.05.003.
- [8] CHEN L, ZENG J, JIA H Y, et al. Growth and nutrient uptake dynamics of *Mytilaria laosensis* seedlings under exponential and conventional fertilizations [J]. Soil Sci Plant Nutr, 2012, 58(5): 618–626. doi: 10.1080/00380768.2012.708879.
- [9] HAMMOND J P, BROADLEY M R, WHITE P J, et al. Shoot yield drives phosphorus use efficiency in *Brassica oleracea* and correlates with root architecture traits [J]. J Exp Bot, 2009, 60(7): 1953–1968. doi: 10.1093/jxb/erp083.
- [10] ZHAO C B, SONG S Y, ZHAO J, et al. Variation in nitrogen uptake and utilization efficiency of different cucumber varieties in northern China [J]. Sci Agri Sin, 2015, 48(8): 1569–1578. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2015.08.11.
赵春波, 宋述尧, 赵靖, 等. 北方地区不同黄瓜品种氮素吸收与利用效率的差异 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1569–1578. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2015.08.11.
- [11] CHEN Y W, GAO J, ZHANG Y, et al. Effects of different phosphorus concentration on growth and development of moso bamboo [J]. J Trop Subtrop Bot, 2013, 21(1): 78–84. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.01.012.
陈媛文, 高健, 张颖, 等. 水培条件下不同磷水平对毛竹实生苗生长发育的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(1): 78–84. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.01.012.
- [12] LI J, HUANG J H, HONG T, et al. Effect of low phosphorus stress on morphological indexes and biomass of *Tripterygium wilfordii* Hook. f. seedlings [J]. J Trop Subtrop Bot, 2012, 20(5): 482–488. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.05.009.
李健, 黄锦湖, 洪滔, 等. 低磷胁迫对雷公藤幼苗形态指标及生物量的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(5): 482–488. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.05.009.
- [13] FAN W G, WANG L X. Effect of different phosphorus levels on growth and leaf element contents of young Newhall navel orange trees [J]. Sci Agri Sin, 2012, 45(4): 714–725. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.04.012.
樊卫国, 王立新. 不同供磷水平对纽荷尔脐橙幼树生长及叶片营养元素含量的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(4): 714–725. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.04.012.
- [14] XI J G, TAN S B, HE C P, et al. Effects of different phosphorus levels on growth and phosphorus utilization of sisal [J]. Chin J Trop Crops, 2014, 35(11): 2109–2114. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2014.11.002.
习金根, 谭施北, 贺春萍, 等. 不同磷水平对剑麻生长和磷肥效率的影响 [J]. 热带作物学报, 2014, 35(11): 2109–2114. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2014.11.002.
- [15] GAO Y, TIAN Q Y, SHI F L, et al. Comparative studies on adaptive strategies of *Medicago falcata* and *M. truncatula* to phosphorus deficiency in soil [J]. Chin J Plant Ecol, 2011, 35(6): 632–640. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.00632.
高艳, 田秋英, 石凤翎, 等. 黄花苜蓿与蒺藜苜蓿对土壤低磷胁迫适应策略的比较研究 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 632–640. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.00632.
- [16] WANG D G, YIN G T, YANG J C, et al. Effects of phosphorus fertilization on growth and foliar nutrient (N, P, K) of *Phoebe bournei* seedlings [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2014, 38(3): 40–44. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.03.008.
王东光, 尹光天, 杨锦昌, 等. 磷肥对闽楠苗木生长及叶片氮磷钾

- 浓度的影响 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(3): 40–44. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.03.008.
- [17] LI H X, LI Z H, GUO S P, et al. Effects of different nitrogen and phosphorus supply levels on C, N accumulation and partitioning in *Pinus koraiensis* seedlings [J]. J NE For Univ, 2013, 28(5): 24–29. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2013.05.05.
- 李海霞, 李正华, 郭树平, 等. 不同氮磷水平对红松幼苗碳氮积累与分配的影响 [J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 24–29. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2013.05.05.
- [18] CHEN B L, WU H H, LUO J, et al. Effects of phosphorus fertilization on biomass accumulation and phosphorus use efficiency of trellis-cultivated melon [J]. Chin J Appl Ecol, 2016, 27(2): 511–518.
- 陈波浪, 吴海华, 罗佳, 等. 施磷对立架甜瓜干物质积累及磷肥利用效率的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 511–518.
- [19] XIE Y P, LI A R, YAN Z L, et al. Effect of different phosphorus levels on phosphorus nutrient uptake transformation and phosphorus utilization efficiency of oil flax [J]. Acta Pratac Sin, 2014, 23(1): 158–166. doi: 10.11686/cyxb20140119.
- 谢亚萍, 李爱荣, 闫志利, 等. 不同供磷水平对胡麻磷素养分转运分配及其磷肥效率的影响 [J]. 草业学报, 2014, 23(1): 158–166. doi: 10.11686/cyxb20140119.
- [20] WANG Q Y, TIAN J M, HAN X, et al. Effect of phosphorus on yield and nutrient absorption and utilization in starch-type sweet potato [J]. J Plant Nutri Fert, 2015, 21(5): 1252–1260. doi: 10.11674/zwyf.2015.0519.
- 王秋媛, 田江梅, 韩叙, 等. 磷对淀粉型甘薯产量及养分吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1252–1260. doi: 10.11674/zwyf.2015.0519.
- [21] SUN Y, LI G L, LIU Y, et al. Growth and P-uptake for *Larix olgensis* seedling with phosphorus top-dressed using fertigation [J]. J Zhejiang Agri For Univ, 2011, 28(2): 219–226. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2011.02.008.
- 孙宇, 李国雷, 刘勇, 等. 水施磷肥对长白落叶松苗木生长和磷吸收的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(2): 219–226. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2011.02.008.
- [22] JI M M, PENG L, WEN Z, et al. Nitrogen and phosphorus absorption and utilization characteristics of apple rootstocks under different phosphorus levels [J]. J Plant Nutri Fert, 2015, 21(4): 1016–1021. doi: 10.11674/zwyf.2015.0421.
- 季萌萌, 彭玲, 文昭, 等. 供磷水平对苹果砧木氮、磷吸收和利用特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1016–1021. doi: 10.11674/zwyf.2015.0421.
- [23] GUO Z H, HE L Y, XU C G. Effect of phosphorus level on root growth and N, P & K uptake of rice with different P efficiencies at seedling stage [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2006, 12(4): 449–452. doi: 10.3321/j.issn:1006-687X.2006.04.001.
- 郭再华, 贺立源, 徐才国. 磷水平对不同耐低磷水稻苗根系生长及氮、磷、钾吸收的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(4): 449–452. doi: 10.3321/j.issn:1006-687X.2006.04.001.
- [24] ZANG C F, FAN W G, PAN X J. Effect of phosphorus levels on growth, morphological characteristics and leaf element contents of *Juglans sigillata* Dode seedlings [J]. Sci Agri Sin, 2016, 49(2): 319–330. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.02.012.
- 臧成凤, 樊卫国, 潘学军. 供磷水平对铁核桃实生苗生长、形态特征及叶片营养元素含量的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(2): 319–330. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.02.012.
- [25] YU Q M, XU F L, WANG W L. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on biomass and nutrient distribution of *Cunninghamia lanceolata* seedlings [J]. J Plant Nutr Fert, 2014, 20(1): 118–128. doi: 10.11674/zwyf.2014.0113.
- 于钦民, 徐福利, 王渭玲. 氮、磷肥对杉木幼苗生物量及养分分配的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 118–128. doi: 10.11674/zwyf.2014.0113.
- [26] OLIET J A, PLANELLES R, ARTERO F, et al. Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: Relative influence of seedling morphology and mineral nutrition [J]. New For, 2009, 37(3): 313–331. doi: 10.1007/s11056-008-9126-3.
- [27] BOIVIN J R, SALIFU K F, TIMMER V R. Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings: Intensive loading and outplanting response on greenhouse bioassays [J]. Ann For Sci, 2004, 61(8): 737–745. doi: 10.1051/forest:2004073.