

不同磷源对云南松幼苗生长和磷吸收量的影响

戴开结¹, 何方², 沈有信^{1,*}, 周文君¹, 邓云¹, 张建华³

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 勐腊 666303; 2. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004;

3. 云南省农业科学院, 云南 昆明 650205)

摘要: 磷是控制生命过程的重要元素, 植物在生长过程中需要大量的磷, 低磷常导致一些植物发生适应性变化。云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 对低磷土壤环境表现出了很强的适应能力, 广泛分布并正常生长于贫瘠的低磷红壤上, 研究不同磷源对云南松幼苗生长和磷吸收量影响, 对揭示云南松的低磷适应机理具有重要参考意义。试验所用培养云南松幼苗的种子采集自云南省通海县秀山森林公园内的健壮云南松林。试验研究了不同磷源对云南松幼苗茎高、主根长、生物量、根冠比、磷含量的影响, 结果表明: (1) 不同磷源处理间云南松幼苗茎高 ($F = 2.352, P = 0.067$)、主根长 ($F = 1.775, P = 0.151$)、茎叶生物量 ($F = 1.359, P = 0.269$)、根系生物量 ($F = 2.807, P = 0.035$) 和总生物量 ($F = 1.017, P = 0.427$) 几个参数并没有表现出实质性差异, 云南松幼苗生长在不同磷源处理间的差异不明显; (2) 不同磷源处理下云南松幼苗根冠比的大小顺序依次为普通磷源 KH_2PO_4 > 钙磷 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ > 铝磷 AlPO_4 > 无磷 CK > 铁磷 $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 幼苗体内磷含量的高低顺序依次为普通磷源 KH_2PO_4 > 铁磷 $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ > 铝磷 AlPO_4 > 钙磷 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ > 无磷 CK; (3) 普通磷源比其它磷源更能够被云南松幼苗吸收利用; (4) 云南松幼苗地下部分磷含量始终比地上部分磷含量高。

关键词: 磷; 云南松; 幼苗; 生长; 环境

文章编号: 1000-0933(2009)08-4078-06 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Effects of different phosphorus on growth and P absorption of *Pinus yunnanensis* Franch. seedlings

DAI Kai-Jie¹, HE Fang², SHEN You-Xin^{1,*}, ZHOU Wen-Jun¹, DENG Yun¹, ZHANG Jian-Hua³

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Mengla, Yunnan 666303, China

2 Central South Forestry University, Changsha, Hunan 410004, China

3 Yunnan Academy of Agriculture, Kunming, Yunnan 650205, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4078 ~ 4083.

Abstract: Phosphorus is an important element that controls the process of plant life, especially during its growth phase. Low-phosphorus in the soil usually leads to adaptive changes in plants. Yunnan Plateau, being its distribution range, *Pinus yunnanensis* Franch. reflects great capability of adapting to low-phosphorus red soil. Therefore, to study the effect of different phosphorus on *Pinus yunnanensis* Franch. seedlings becomes an important reason to help unveil mechanism of adaptation towards low-phosphorus. Present study was to analyze growth and internal P content of seedlings (*Pinus yunnanensis* Franch.) to various phosphorus supplies. The seeds used to culture seedlings were collected from healthy and mature forest of *Pinus yunnanensis* Franch in Xiushang Forest Park, Tonghai county, Yunnan province, China. The results of test were as follows: (1) The growth of *Pinus yunnanensis* Franch. seedlings including shoot height ($F = 2.352, P = 0.067$), taproot length ($F = 1.775, P = 0.151$), shoot biomass ($F = 1.359, P = 0.269$), root biomass ($F = 2.807, P = 0.035$) and total biomass ($F = 1.017, P = 0.427$) did not present substantial differences between different phosphorus supplies; (2) The range of seedling root/shoot ratio was $\text{KH}_2\text{PO}_4 > \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 > \text{AlPO}_4 > \text{CK} > \text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and that of

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(2002c0069m)

收稿日期: 2009-02-24; 修订日期: 2009-05-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxshen@xtbg.ac.cn

internal P content was $\text{KH}_2\text{PO}_4 > \text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O} > \text{AlPO}_4 > \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 > \text{CK}$; (3) KH_2PO_4 was better used by *Pinus yunnanensis* Franch. seedlings; (4) The internal P content of root was always higher than that of shoot.

Key Words: phosphorus; *Pinus yunnanensis* Franch.; seedling; growth; environment

磷在人类赖以生存的土壤-植物-动物生态系统中起着不可替代的作用^[1],从 20 世纪 70 年代开始,植物与低磷环境关系的研究便成为国内外科学家的研究热点之一^[2~8]。

云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)是松科常绿针叶乔木,以云南高原为起源和分布中心,是重要的用材树种和荒山造林的先锋树种,在我国西南地区被广泛用于人工造林。云南松对低磷土壤环境表现出了很强的适应能力,广泛分布并正常生长于贫瘠的低磷红壤上^[9,10]。例如,云南楚雄禄丰云南松林土壤有效磷含量不到 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,云南曲靖城关次生云南松林土壤中的有效磷含量仅 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^①。然而,除了低磷胁迫下云南松幼苗根系、生物量分配等方面的少数报道外^[11,12],目前关于云南松低磷适应机理的其它研究还不多。

研究表明,不同磷源会对植物根冠比、植株生长、根际效应等产生影响^[13~15]。本研究的目的在于探讨不同磷源对云南松幼苗生长和磷吸收量的影响,以期能为揭示云南松对低磷土壤环境的响应对策提供参考,并能对云南松林业发展规划或生产实践有所帮助。

1 材料与方法

1.1 幼苗培养

以砂培法培养云南松幼苗,试验须保证幼苗生长情况良好。试验用沙用盐酸浸泡后用蒸馏水清洗,直到清洗液 pH 与蒸馏水一致。试验共设置 5 个处理,其中 1 个处理为对照(无磷处理),4 个为有磷处理。每个处理 6 次重复,每次重复(每盆)植 10 株小苗,6 个月后观测、分析其株高、主根长、生物量和磷含量。4 个不同有磷处理的磷源分别是普磷(即普通磷源 KH_2PO_4 , K-P)、铁磷($\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Fe-P)、铝磷(AlPO_4 , Al-P)和钙磷($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, Ca-P)。保持各处理间磷的浓度相同。根据云南松广泛分布于低磷红壤上这一实际情况,试验所用磷含量参照云南红壤(低磷土壤)平均全磷含量(0.09%)并进行减半处理(试图进行磷胁迫),每盆(长 20cm × 宽 10cm × 高 5 cm)用砂 300g,每盆磷量均为 0.135g (即 $300\text{g} \times 0.09\% / 2$)(表 1)。

表 1 不同磷源对云南松幼苗影响试验的磷浓度

Table 1 P content in the experiment of the effects of different phosphorus on *Pinus Yunnanensis* seedlings

处理 Treatment	P 源 P source	分子量 mol. wt	P 系数 P%	每盆 P 用量(g) P dosage(g/pot)	每盆 P 含量(g) P content(g/pot)
T1 普磷 K-P	KH_2PO_4	138	22.39%	0.6029	0.135
T2 铁磷 Fe-P	$\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	223	13.90%	0.9712	0.135
T3 铝磷 Al-P	AlPO_4	122	25.41%	0.5313	0.135
T4 钙磷 Ca-P	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	310	20%	0.6750	0.135
T5 对照 CK	—	—	—	—	—

除磷源差异外,保持其它处理条件相同,也就是在微量元素和其它大量元素相同的条件下,比较不同磷源的影响。培养期间每 10d 补充无磷培养液 1 次,每次 10ml,浓度为标准培养液(表 2)的 10 倍,并适时补充水。

1.2 幼苗生长情况测定

茎高和主根长用直尺量取,生物量则取干重计算。将量取了茎高和主根长的幼苗用剪刀将根系和茎叶分剪后分别装入不同的信封,之后进行杀青(105°C , 30min)、烘干(65°C , 8h),用天平分别称取根系生物量和茎叶生物量。

① 赵汝铭,段庆钟. 云南省第二次土壤普查数据资料集. 1989.

表 2 云南松幼苗试验标准营养液配方

Table 2 Culture solution in the test on *Pinus Yunnanensis* seedlings

大量元素 Macroelement ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	KNO_3 :0.51; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$:1.18; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$:0.49; KCl :0.075。
微量元素 Microelement ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	H_2BO_3 :2.86; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:0.08; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$:0.22; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$:1.81; H_2MoO_4 :0.05; Fe-EDTA :20

* 实际培养液浓度为标准培养液的 10 倍 The test content is 10 times this standard culture solution

1.3 幼苗植株全磷含量测定

将称取了生物量的幼苗材料交由中国科学院西双版纳热带植物园生物地球化学实验室分别进行根系和茎叶全磷含量测定。磷含量测定使用方法为: $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解, HCl 溶解, ICP-AES 测定。

2 结果与分析

2.1 不同磷源对云南松幼苗生长的影响

该试验考察的云南松幼苗生长指标主要包括茎高、主根长、茎叶生物量、根系生物量、总生物量和根冠比。经过 6 个月培养的云南松幼苗茎高在 7.0 ~ 12.4 cm 之间, 叶色正常, 生长良好。

表 3 反映的是不同磷源条件下云南松幼苗的茎高。可以看出, 5 个处理中, 最高茎高 12.4 cm, 最低为 7.0 cm, 相对而言, 处理 5 (无磷处理) 的幼苗茎高最矮, 平均为 8.1 cm, 但云南松幼苗茎高在不同处理间没有什么明显的变化规律, 方差分析结果显示, 各处理间的差异不明显 ($F = 2.352, P = 0.067$)。

表 3 不同磷源处理下云南松幼苗的茎高

Table 3 The height of *Pinus Yunnanensis* seedlings under different P supplies (cm)

处理 Treatment	重复 Repeat						平均 Average
	1	2	3	4	5	6	
T1 普磷 K-P	—	9.0	7.8	—	7.8	8.3	8.2
T2 铁磷 Fe-P	10.2	8.9	10.2	9.0	9.6	7.2	9.2
T3 铝磷 Al-P	7.8	9.1	10.2	8.8	8.2	9.2	8.9
T4 钙磷 Ca-P	12.4	8.5	9.0	9.3	8.4	10.1	9.6
T5 无磷 CK	7.0	7.8	9.6	8.9	7.3	8.3	8.1

表 4 反映的是不同磷源条件下云南松幼苗的主根长度。可以看出, 5 个处理中, 最长主根长 23.7 cm, 最短主根长 7.6 cm, 相差较大, 比较离散。相对而言, 处理 4 (钙磷) 和处理 5 (无磷处理) 的主根较短, 平均为 15.2 cm 和 16.1 cm。但主根长在不同处理间也没有明显的变化规律, 方差分析结果显示, 各处理间的差异不显著 ($F = 1.775, P = 0.151$)。

表 4 不同磷源处理下云南松幼苗的主根长度

Table 4 The taproot length of *Pinus Yunnanensis* seedlings under different P supplies (cm)

处理 Treatment	重复 Repeat						平均 Average
	1	2	3	4	5	6	
T1 普磷 K-P	—	12.0	17.2	—	21.1	17.7	17.0
T2 铁磷 Fe-P	20.5	17.8	18.9	21.9	21.7	22.4	20.5
T3 铝磷 Al-P	19.5	21.8	19.8	23.7	12.3	19.8	19.5
T4 钙磷 Ca-P	7.6	11.0	19.2	15.7	18.1	19.8	15.2
T5 无磷 CK	21.0	10.2	17.5	16.9	17.1	14.1	16.1

表 5 反映的是不同磷源条件下云南松幼苗的茎叶生物量、根系生物量、总生物量和根冠比。可以看出, 茎叶生物量、根系生物量、总生物量几个参数在不同处理间并没有明显的变化规律。方差分析结果显示, 除了根系生物量 ($F = 2.807^*, P = 0.035$) 略有差异外, 茎叶生物量 ($F = 1.359, P = 0.269$) 和总生物量 ($F = 1.017, P = 0.427$) 在各处理间的差异不明显。而对根系生物量差异进行进一步分析发现, 根系生物量在处理间的差

异也没有将 5 个处理中的某一个处理单独明显地区别开来,这个差异也没有体现出很大的实际意义。

表 5 不同磷源处理下云南松幼苗的生物量和根冠比
Table 5 The biomass and root/shoot ratio of *Pinus Yunnanensis* seedlings under different P supplies

处理 Treatment	茎叶生物量 Shoot biomass(g/ind.)	根生物量 Root biomass(g/ind.)	总生物量 Total biomass(g/ind.)	根冠比 Root/shoot ratio
T1 普磷 K-P	0.2801	0.0596	0.3397	0.213
T2 铁磷 Fe-P	0.3197	0.0338	0.3535	0.106
T3 铝磷 Al-P	0.2719	0.0475	0.3194	0.175
T4 钙磷 Ca-P	0.3034	0.0551	0.3585	0.182
T5 无磷 CK	0.2904	0.0485	0.3389	0.167

而从根冠比的情况看,普通磷源 KH_2PO_4 处理(T_1)的根冠比最大,铁磷 $\text{FePO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 处理最小,铝磷 AlPO_4 、钙磷 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 和无磷 3 个处理居中。

不同磷源处理下云南松幼苗茎高、主根长、茎叶生物量、根系生物量和总生物量 5 个参数 ANOVA 方差分析的详细情况见表 6。

表 6 不同磷源对云南松幼苗生长影响的 ANOVA 方差分析结果图
Table 6 Analysis of the effects of different phosphorus on *Pinus Yunnanensis* seedlings' growth

项目 Item		平方和 Sum of squares	自由度 df	均方和 Mean square	F 值 F	显著性概率 Sig.
茎高 Height	Between Groups	13.706	5	2.741	2.352	0.067
	Within Groups	32.630	28	1.165		
	Total	46.336	33			
主根长 Taproot length	Between Groups	120.386	5	24.077	1.775	0.151
	Within Groups	379.842	28	13.566		
	Total	500.228	33			
茎叶生物量 Shoot biomass	Between Groups	1.250×10^{-2}	5	2.500×10^{-3}	1.359	0.269
	Within Groups	5.150×10^{-2}	28	1.839×10^{-3}		
	Total	6.400×10^{-2}	33			
根生物量 Root biomass	Between Groups	2.239×10^{-3}	5	4.478×10^{-4}	2.807	0.035
	Within Groups	4.467×10^{-3}	28	1.595×10^{-4}		
	Total	6.706×10^{-3}	33			
总生物量 Total biomass	Between Groups	1.352×10^{-2}	5	2.704×10^{-3}	1.017	0.427
	Within Groups	7.446×10^{-2}	28	2.659×10^{-3}		
	Total	8.798×10^{-2}	33			

2.2 不同磷源对云南松幼苗磷吸收量的影响

表 7 表明,在 5 个处理中,从处理 1 到处理 5,云南松幼苗体内磷含量依次减少,表现为普通磷源 KH_2PO_4 > 铁磷 $\text{FePO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ > 铝磷 AlPO_4 > 钙磷 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ > 无磷 CK,不同处理间磷含量在茎叶和根系上呈现出一致的变化趋势。处理 1(T_1)即普通磷源 KH_2PO_4 供应条件下,云南松幼苗体内的磷含量大大高于其它 4 个处理,其地上部分磷含量是其它 3 个有磷处理的 2.98 ~ 4.86 倍,地下部分磷含量更是高达其它 3 个有磷处理的 8.40 ~ 11.65 倍。而铁磷 $\text{FePO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、铝磷 AlPO_4 和钙磷 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 这 3 个处理间云南松幼苗植株体内磷含量相互差异的幅度则未超过 1.63 倍。相反,无磷处理的幼苗植株磷含量明显低于 4 个有磷处理。

另一方面,在全部 5 个处理中,地下部分磷含量均比地上部分磷含量高,而地下部分磷含量与地上部分磷含量间的差距由处理 1 到处理 5 依次不断缩小(表 7)。

3 小结与讨论

3.1 普通磷源比其它磷源更能够被云南松幼苗吸收利用

本试验对云南松幼苗的研究结果表明,在 5 个处理中,普通磷源 KH_2PO_4 处理的云南松幼苗根系生物量最

大,根冠比最大,幼苗植株体内磷含量也最高。这说明 KH_2PO_4 比其它 3 种磷源的效果更好,更能够被云南松幼苗吸收利用。这与宋勇春等取得的研究结果相似。宋勇春等^[15]以红三叶草为对象研究不同磷源对植株生长和吸磷总量影响,结果表明,施用不同磷源对植株生长有较大影响,其中磷酸二氢钾处理的植株干物重最大。

这样的结果与磷酸二氢钾的磷有效性有关。磷酸二氢钾为水溶性强的无机盐,有效性高,而铁磷、铝磷、钙磷等磷源的磷有效性则较低。这与现实土壤环境的情形大抵相似,实际上,现实土壤环境中的全磷含量并不低,只是由于钙、铁、铝以及土壤粘粒的大量存在,大部分磷与 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等结合成难溶性磷酸盐,95% 以上的磷为无效形式,植物根系很难吸收利用,使植物表现为缺磷,呈现所谓的“遗传学缺乏”^[16]。

3.2 云南松幼苗在处理间的非实质性差异与其耐低磷特性有关

本试验结果表明,云南松幼苗茎高、主根长、茎叶生物量、根系生物量和总生物量几个参数在不同磷源处理间并没有表现出实质性差异,即不同磷源处理间磷有效性差异对云南松幼苗生长的影响尚未体现。这说明即使在云南低磷红壤平均全磷含量进行减半处理后的磷供应水平下,磷依旧还未成为云南松幼苗生长的限制因素。这进一步反映了云南松具有的耐低磷特性。

3.3 不同磷源对不同作物根冠比的影响程度不同

不同磷源会对作物根冠比产生直接影响。低磷环境下,作物根冠比、根系比表面积增加,是作物对逆境的一种主动适应反应机制。但不同磷源对不同作物根冠比的影响程度并不完全相同。研究表明^[13],不同磷源对象草、猪屎豆根冠比的影响为 $\text{CK} > \text{RP} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{CK} + \text{P}$,而对肥田萝卜的影响为 $\text{CK} > \text{RP} > \text{Al-P} > \text{Fe-P} > \text{CK} + \text{P}$ 。而在本试验中,不同磷源处理下云南松幼苗根冠比的大小顺序依次为普通磷源 > 钙磷 > 铝磷 > 无磷 > 铁磷。

本试验不同磷源云南松幼苗根冠比表现出了普通磷源 > 钙磷 > 铝磷 > 无磷 > 铁磷的大小顺序,这与磷胁迫条件下磷含量越低根冠比就越大这一常规研究结论不同。本试验的磷供应量参照云南红壤平均全磷含量并进行减半处理,目的之一是试图对云南松幼苗进行磷胁迫,但结果表明,此磷供应水平尚没有造成磷胁迫环境,还没有对云南松幼苗造成磷胁迫。这一结果与有关云南松的其它研究结果相吻合,已有研究表明^[11],云南松幼苗低磷忍耐的临界值大约在培养液磷浓度 $0.03125 \sim 0.00781 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间或附近,而本试验设计的砂培磷含量却远远高于此临界值。

而为什么普通磷源供应条件下云南松幼苗的根冠比明显比其它磷源供应条件下的根冠比大,却有待进一步研究。

3.4 不同磷源对不同植物所产生的作用不同,原因是多方面的。

本试验不同磷源对云南松幼苗的生长没有产生实质性影响,这样的结果与其它一些植物的研究结果不同,这除了与云南松的耐低磷特性有关外,还因为不同磷源对不同植物所产生的作用并不相同。其原因是多方面的:首先,这与不同植物自身的磷利用特性(遗传特性)有关;其次,不同植物根系分泌物对难溶性磷的活化能力不同;第三,不同磷源会对土壤磷酸酶活性、植物根际效应等产生不同影响^[14],会导致植物根际土壤的不同反应;第四,不同植物利用不同磷源的能力并不相同。例如,油菜利用磷矿粉中的磷的能力极强,施用磷活性度高的磷矿粉的农学有效性可与普钙相当,甚至超过普钙。刘世亮等^[14]的研究结果表明,对于不同磷源处理,小麦生长过程中根际、非根际微生物种群的数量及根际效应(R/B)有显著差异,其大小顺序为: K_2HPO_4

表 7 不同磷源处理下云南松幼苗的磷含量

Table 7 P content of *Pinus yunnanensis* seedlings under different P supplies

处理 Treatment	地上部分磷含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) P content of shoot	地下部分磷含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) P content of root
T1 普磷(K-P)	5.88	23.53
T2 铁磷(Fe-P)	1.97	2.80
T3 铝磷(Al-P)	1.35	2.27
T4 钙磷(Ca-P)	1.21	2.02
T5 无磷(CK)	0.93	0.98

(磷酸氢二钾) > CaMg-P(钙镁磷肥) > SSP(过磷酸钙) > FA(氟磷灰石) > CK(对照,不施磷肥)。

关于不同磷源导致云南松幼苗植株体内磷含量差异的原因却很复杂,有待进一步深入探讨。

References:

- [1] Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Dynamics and prospect on study of high acquisition of soil unavailable phosphorus by plant. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998,4(2):107—116.
- [2] Islam A, Mandal R, Osman K T. Direct absorption of organic phosphate by rice and jute plants, *Plant and Soil*. 1979,53:49—54.
- [3] Bertrand I, Hinsinger P, Jaillard B, Arxieu J C. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. *Plant and Soil*, 1999,211:111—119.
- [4] Song Joong Yun, Shawn M Kaeppler. Induction of maize acid phosphatase activities under phosphorus starvation. *Plant and Soil*, 2001,237:109—115.
- [5] John T Scott, Leom Condron. Dynamics and availability of phosphorus in the rhizosphere of a temperate silvopastoral system. *Biology and Fertility of Soil*, 2003,39:65—73.
- [6] LI F, Pan X H, Liu S Y, LI M Y, Yang F S. Effect of phosphorus deficiency stress on root morphology and nutrient absorption of Rice Cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 2004,30:438—442.
- [7] Jean-Jacques Drevon, Ueli A Hartwig. Phosphorus deficiency increases the argon-induced decline of nodule nitrogenase activity in soybean and alfalfa. *Planta*, 1997,201:463—469.
- [8] Günter Neumann, Agnès Massonneau, Enrico Martinoia, Volker Römheld. Physiological adaptations to phosphorus deficiency during proteoid root development in white lupin. *Planta*, 1999,208:373—382.
- [9] Wu Z Y, ZHU Y C, Jiang H Q. Yunnan vegetation. Beijing: Science Press, 1987. 417—419.
- [10] Wang W F. Yunnan Soil. Kunming: Yunnan Science Press, 1996. 228—260, 420—429.
- [11] Dai K J, He F, Shen Y X, Deng Y, Zhou W J, Cui J Y. Biomass and its allocation of *Pinus yunnanensis* seedlings under phosphorus deficiency. *Guihaia*, 2006,26:183—186.
- [12] Dai K J, Shen Y X, Zhou W J, Deng Y, Liu W Y. Mechanism of *Pinus yunnanensis* seedlings root response to phosphorus deficiency under controlled conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,25(9): 2423—2426.
- [13] Shen H, Shi W M, Wang X C, Cao Z H. Study on adaptation mechanisms of different crops to low phosphorus stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001,7(2):172—177.
- [14] Liu S L, Zhai D M, Jie X L, Li Y T, An Z Z, Hu Z B, Wang J Y. Effect of Different Phosphorus on Rhizosphere Organism Activity and Rhizosphere Effect in Wheat. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2002,(11):26—30.
- [15] Song Y C, Feng G, Li X L. Effects of different P sources on phosphatase activity of mycorrhizosphere of red clover inoculated with AMF. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003,14(4):781—784.
- [16] Epstein E. Better crops for food. *Ciba Foundation Symposium*, 1983,97(2):61—68.

参考文献:

- [1] 王庆仁,李继云,李振声.植物高效利用土壤难溶态磷研究动态及展望. *植物营养与肥料学报*, 1998,4(2):107~116.
- [6] 李锋,潘晓华,刘永英,李木英,杨福孙.低磷胁迫对不同水稻品种根系形态和养分吸收的影响. *作物学报*, 2004,30:438~442.
- [9] 吴征镒,朱彦承,姜汉桥.云南植被.北京:科学出版社,1987. 417~419.
- [10] 王文富.云南土壤.昆明:云南科技出版社,1996. 228~260,420~429.
- [11] 戴开结,何方,沈有信,邓云,周文君,崔景云.低磷胁迫下云南松幼苗的生物量及其分配. *广西植物*, 2006,26(2):183~186.
- [12] 戴开结,沈有信,周文君,邓云,刘文耀.在控制条件下云南松幼苗根系对低磷胁迫的响应. *生态学报*, 2005,25(9): 2423~2426.
- [13] 沈宏,施卫明,王校常,曹志洪.不同作物对低磷胁迫的适应机理研究. *植物营养与肥料学报*, 2001,7(2):172~177.
- [14] 刘世亮,翟东明,介晓磊,李有田,安志装,胡著邦,王建玉.不同磷源对小麦根际生物活性及其根际效应的影响. *河南农业科学*, 2002,(11):26~30.
- [15] 宋勇春,冯固,李晓林.不同磷源对红三叶草根际和菌根际磷酸酶活性的影响. *应用生态学报*, 2003,14(5):781~784.