

不同供磷水平对云南松幼苗形态建成及 根际有机酸分泌的影响*

邓云^{1,2}, 官会林³, 戴开结^{1,4}, 周文君¹, 沈有信¹,

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 云南大学 生命科学学院, 云南 昆明 650091;

3. 云南师范大学 能源和环境科学学院, 云南 昆明 650092; 4. 中南林学院, 湖南 长沙 410004)

摘要:磷是植物生长所必需的重要元素. 通过在不同梯度的磷营养液中对云南松(*Pinus yunnanensis*) 幼苗 217 d 的培养发现, 云南松根系生物量、侧根数、根部全磷含量、茎叶全磷含量随磷浓度变化而呈二次函数曲线变化. 在较低磷浓度下云南松对供磷变化反映明显, 但随磷浓度的增加, 这种变化呈减弱趋势. 在缺磷处理还导致云南松茎叶生物量减少, 主根长度增加. 在云南松根系分泌物中未发现有机酸的大量分泌, 说明缺磷可以导致云南松体内酸环境的变化, 但不是植物根际酸化的主要原因.

关键词:云南松; 磷梯度; 幼苗形态; 生物量; 有机酸

中图分类号:Q 948.113 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-7971(2006)04-0358-06

磷是植物生长所必需的重要元素. 但是由于磷主要以 H_2PO_4^- 或 HPO_4^{2-} 形式被植物吸收, 而它们在土壤中的浓度一般很低. 大量土壤磷以难溶的磷酸盐形式被固定, 因此在许多情况下磷成为植物生长的限制因素^[1]. 植物可通过一系列的形态、生理变化来主动适应低磷胁迫并改善自身的磷素营养状况. 在玉米、小麦、大豆等多种作物中已发现植物可以在磷胁迫下通过对根毛分化、侧根、不定根发生, 根冠比增加和根轴增长等方式改变自身根系形态和根系构型提高对低磷环境的适应^[2~6]. 有机酸分泌则是植物在磷饥饿状态下的另一种主动适应机制, 通过分泌多种低分子量有机酸, 改变植物根际 pH 值, 活化其附近的难溶磷, 从而提高植物对土壤磷的利用效率^[7]. 在白羽扇豆、木豆、肥田萝卜等植物根际都发现低磷诱导的大量有机酸分泌^[2,8]. 关于根系产酸的机理目前仍在研究当中.

红壤是云南分布最广、面积最大的土壤类型. 红壤地区由于土壤风化强烈, 土壤养分水平低, 磷素往往成为限制作物生长的重要因子^[9]. 云南松

(*Pinus yunnanensis*) 作为云南红壤地区分布面积最广的物种, 可以在当地低磷环境中正常生长并表现出很强的适应能力^[10], 但其在缺磷胁迫下的适应机制却一直未有深入研究. 本文以室内培养试验为基础, 通过在不同磷浓度的营养液中对云南松幼苗进行培养, 试图找寻出其对低磷环境的适应机制.

1 材料与方法

将采自云南省通海秀山森林公园内的健壮云南松林的成熟种子在培养皿中萌发, 发芽 14 d 后将幼苗移至 200 mL 玻璃瓶中于温室内进行水培, 每瓶 4 株, 每个处理 5 个重复. 培养液无磷部分采用改良 Hoagland 营养液配方^[11] (KNO_3 0.51 g/L, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.18 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.49 g/L, KCl 0.075 g/L, H_2BO_3 2.86 mg/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.08 mg/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22 mg/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.81 mg/L, H_2MoO_4 0.05 mg/L, Fe-EDTA 20 mg/L), 不同处理中加入不同浓度的磷溶液(NaH_2PO_3), 磷浓

* 收稿日期: 2005-11-25

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(2002C0069M)

作者简介: 邓云(1983-), 男, 云南人, 硕士生, 主要从事植物生理生态学方面的研究.

通讯作者: 沈有信(1966-), 男, 云南人, 博士, 副研究员, 主要从事植物生态学和恢复生态学方面的研究.

度分别为 2,1/2,1/8,1/32,1/128,1/512,0 mmol/L. 用 pH 试纸测得 pH 在 5~6 之间. 整个实验共进行 6 个月,在最初的 1 个月里直接使用该浓度的培养液,而后 5 个月中培养液浓度改为原培养液浓度的 20%. 营养液每 5 d 一换.

1.1 形态及生物量数据 实验结束后用刻度直尺直接测量各处理的苗高、主根长,人工计量侧根数;之后分开根部和茎叶部分,先测其鲜重,再在 105℃下 30 min 杀青,60~80℃下 8 h 烘干,测其根系生物量、茎叶生物量并计算根冠比^[12].

1.2 全磷 由中国科学院西双版纳热带植物园生物地球化学实验室测定. 使用硝酸-高氯酸消解,盐酸溶解,ICP-AES 测定.

1.3 有机酸

(1) 将各处理的云南松置于蒸馏水中(200 mL/瓶),在阳光下培养 2 h 后收集各组水液,用旋转蒸发仪浓缩至 10 mL^[13];

(2) 各取云南松不同处理中的根部和茎叶部分 1 g,加水研碎,滤纸过滤,定容至 10 mL,与上组样品一起送中国科学院昆明植物所进行高效液相色谱分析;

(3) 检测方法:使用 Agilent 1100 高压液相色谱仪,色谱柱型号、规格:ZORBAX SB-AQ,4.6 mm×250 mm,5 μm. 柱温 30℃ 流动相为 20 mmol/L V(KH₂PO₄):V(乙腈)=99:1 混合液. 加入 0.05%磷酸. 流速 0.6 mL/min. 检测波长 211 nm.

1.4 数据分析 采用常用统计软件 SPSS11.0 进

行.

2 结果与分析

2.1 云南松生物量与磷处理浓度关系 生物量是描述植物生长状况的最直接指标. 云南松幼苗培养实验结果(表 1)表明,不论是根系还是茎叶部分生物量都与磷浓度的变化呈正相关关系. 随着磷浓度的增加,茎叶生物量呈一上升的平滑曲线变化,并在 1/8 mmol/L 时曲线出现明显转折,由此趋于平缓. 根系生物量虽在连线图上略有波动,但总体上还是趋于一直线,对应方程为 $Y = 0.1778 + 0.0398X$ ($R^2 = 0.869, P < 0.01$). 由于其本身的数值远低于茎叶部分,因此对总生物量曲线的变化影响不大. 总生物量与茎叶生物量趋势相近.

由于茎叶生物量所占的较大比重,因此植株根冠比也在很大程度上受其影响,并随供磷量增加而降低. 但根冠比与预测曲线的拟合度仍然偏低. 在方差分析中也发现不同处理间的平均茎叶生物量和总生物量的差异较为显著,而根系生物量、根冠比则无明显变化(表 1). 这表明在低磷时云南松主要通过保持根系生物量的相对稳定和降低地上部分的营养生长来适应磷的胁迫,从而使根冠比增加. 就其图像来看,根冠比的最低值出现在 1/2 mmol/L 处,同时自 1/32 mmol/L 处理以上浓度的几个处理的变化显然不如低浓度的几个处理变化显著. 这也说明低 P 环境对云南松根冠分化影响较大,但在达到一定浓度之后这种影响就会迅速弱化.

表 1 不同磷处理的云南松幼苗生物量和根冠比(P = 0.05)

Tab. 1 Biomass and root-shoot ratio of *Pinus yunnanensis* seedlings under different phosphorus supplies

处理 c(P)/ (mmol L ⁻¹)	最终存活 数/株	平均茎叶 生物量/g	平均根系 生物量/g	平均 总生物量/g	根冠比
2	9	1.385 ±0.195 ^a	0.257 ±0.027 ^a	1.642 ±0.208 ^{ab}	0.191 ±0.022 ^a
1/2	16	1.225 ±0.160 ^{ab}	0.198 ±0.017 ^{ab}	1.423 ±0.173 ^b	0.166 ±0.013 ^a
1/8	15	1.136 ±0.132 ^{abc}	0.185 ±0.017 ^{bb}	1.320 ±0.135 ^{abc}	0.170 ±0.022 ^a
1/32	10	1.013 ±0.113 ^{bc}	0.190 ±0.032 ^{ab}	1.204 ±0.138 ^{acd}	0.186 ±0.025 ^a
1/128	12	0.855 ±0.059 ^{cd}	0.193 ±0.030 ^{ab}	1.048 ±0.063 ^{acd}	0.233 ±0.047 ^a
1/512	16	0.653 ±0.039 ^d	0.169 ±0.020 ^b	0.822 ±0.047 ^{cd}	0.260 ±0.032 ^a
0	8	0.222 ±0.030 ^e	0.159 ±0.003 ^b	0.381 ±0.030 ^d	0.743 ±0.097 ^b

2.2 根长、苗高、侧根数与磷处理浓度关系 主根长、侧根数和苗木高度是描述植物对环境适应的另一重要指标.实验结果表明,随磷浓度降低,云南松主根长度有增加的趋势,而苗木高度则随之降低.方差分析结果显示,不同处理的云南松在主根长和苗高上常常存在显著差异,但在侧根数方面的差异却并不明显(表 2).这说明云南松在低磷胁迫下主

要通过增加根长和减少苗高来对环境做出适应,而侧根数的变化在这种适应中的作用不明显.3 者在(图 1)图上均是在 1/32 mmol/L 处开始出现转折.苗高和根长的最值出现在 1/2 mmol/L 处,侧根数的最值则是在 1/8 mmol/L 时.曲线估计显示,侧根数的变化与二次函数曲线较吻合($Y = 11.0413 - 4.3544 X + 5.3414 X^2$, $R^2 = 0.948$, $P < 0.05$).

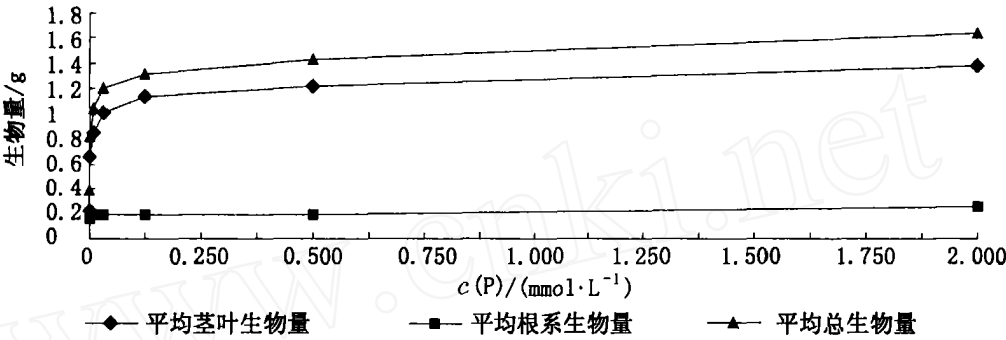


图 1 不同磷处理水平下云南松生物量变化

Fig. 1 Biomass of *Pinus yunnanensis* seedlings under different phosphorus supplies

表 2 不同磷处理水平下云南松幼苗主根长、苗高、侧根数($P = 0.05$)

Tab. 2 Stem height ,primary root length and the number of lateral roots of *Pinus yunnanensis* seedlings under different phosphorus supplies

处理 $c(P) / (mmol \cdot L^{-1})$	最终存活数/株	苗高/cm	主根长/cm	侧根数/根
2	9	14.89 ± 1.23^{ab}	25.22 ± 0.76^{abcd}	23.7 ± 2.8^a
1/2	16	16.29 ± 0.66^b	19.72 ± 1.61^{ab}	10.8 ± 1.4^{bc}
1/8	15	14.47 ± 0.75^{ab}	21.99 ± 1.84^{bc}	8.9 ± 0.9^b
1/32	10	14.69 ± 1.18^{ab}	25.00 ± 2.37^{bcd}	10.6 ± 1.4^{bc}
1/128	12	13.80 ± 0.71^{ac}	26.27 ± 2.17^{cd}	10.1 ± 1.9^{bc}
1/512	16	11.94 ± 0.80^c	29.09 ± 2.78^d	12.9 ± 1.4^c
0	8	6.63 ± 0.48^d	53.81 ± 4.25^e	11.5 ± 0.9^{bc}

表 3 不同磷处理水平下云南松幼苗含磷量

Tab. 3 Phosphorus content of *Pinus yunnanensis* seedlings under various phosphorus supplies

处理 $c(P) / (mmol \cdot L^{-1})$	最终存活数	地下全磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	地上全磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
2	9	4.81	2.52
1/2	16	3.4	2.06
1/8	15	2.32	1.55
1/32	10	1.86	1.28
1/512	16	0.9	0.55
0	8	0.36	0.34

2.3 全磷与磷处理浓度关系 不论是地上还是地

下部分,云南松幼苗中的全磷含量均随供磷量的增加而增加,二者之间呈显著的相关关系,Pearson 简单相关系数分别达到了 0.803 ($P < 0.05$) 和 0.880 ($P < 0.01$),这说明供磷量变化对云南松全磷含量有直接影响.但在曲线估计中植物根部、茎叶部分全磷含量仍然有类似二次曲线的变化 ($Y = b_0 + b_1 X + b_2 X^2$,表 4),这又证明云南松可通过一定的自我调控机制调节自身在不同磷供应条件下对磷的吸收和利用.

另一方面,虽然在任何情况下云南松茎叶部分的全磷含量均高于其根系部分,但随着磷供应的减少这种差距有缩小的趋势.这个结果证明云南松能

够通过限制茎叶部分的磷供应从而保证根系正常生长.

2.4 根际有机酸分泌与磷处理浓度关系 根际酸度的调整是植物改善根际磷有效性的最重要手段之一^[14].通过对收集的云南松根系分泌物进行液相色谱分析发现,检测的 5 种有机酸中仅检出草酸、酒石酸、苹果酸 3 种.相对白羽扇豆、水稻、玉米等能大量分泌有机酸^[15]的植物来说,这里的 3 种酸分泌总量和分泌速率都较低(表 5),与磷梯度变化的相关系数亦很低,因此并不足以反映酸分泌曲线随磷梯度变化而变化的趋势.

2.5 植株内有机酸含量与磷处理浓度关系 对植株内部有机酸测定后发现,在根系分泌物中相对较多的酒石酸在植物组织内却基本没有检出,而相对根系分泌物数据的低浓度而言,组织中的其他几种酸含量都相对较高,其中地下部分的草酸 ($Y = 1.684\ 3 + 21.861\ 8 X - 7.987\ 8 X^2$, $R^2 = 0.903$, $P < 0.05$)、苹果酸 ($Y = 6.608\ 6 + 9.493\ 6 X$, $R^2 = 0.669$, $P < 0.05$)、失水苹果酸 ($Y = 6.710\ 6 + 105.212 X - 50.025 X^2$, $R^2 = 0.944$, $P < 0.05$),地上部分的失水苹果酸 ($Y = 4.966\ 9 - 2.473\ 5 X$, $R^2 = 0.928$, $P < 0.01$)还能体现出一定的随磷梯度变化而变化的趋势.草酸在根茎中都体现出类似生物量变化的随磷量增加而增加,并且增长速率逐渐

下降的现象,这可能是长期的磷缺乏影响了植物内部的能量代谢所致.相关性检测表明,根系所含的草酸、苹果酸和茎叶中的失水苹果酸都与供磷量的梯度变化呈显著相关关系,Pearson 相关系数分别达到 0.848,0.818,-0.963 ($P < 0.05$);但是另外一些有机酸又似乎与供磷量的变化无关.

3 讨 论

在本试验中发现云南松根系生物量、侧根数、根部全磷含量、茎叶全磷含量等指标均与磷处理浓度呈显著正相关.这说明在长期培养条件下磷供应状况仍然是云南松幼苗生长的主要影响因素.但是由于云南松幼苗自我调节作用的存在,导致了几乎所有数据都不是简单的线性变化.在多数情况下低磷会迫使植物采取更为积极的措施,当磷浓度达到一定水平后这种变化就将趋于缓和,甚至有所回落.试验中云南松的主根长度、苗高和侧根数在 $c(P) = 1/32\text{ mmol/L}$ 时这种变化就开始趋缓,在 $c(P) = 1/2 \sim 1/8\text{ mmol/L}$ 时各数据曲线就达到峰值.这说明云南松对磷量适应的最适点就在此附近,同时也证明云南松对磷的需求较其它植物偏低,有利于其在含磷偏低的红壤上生长,并成为其在当地的竞争优势.

表 4 不同磷处理水平下云南松幼苗全磷变化的曲线方程

Tab.4 Equation of P content of *Pinus yunnanensis* ' seedlings under different phosphorus supplies

检验项目	R^2	自由度	F 检验值	相伴概率 P	b_0	b_1	b_2
地下全磷	0.914	4	21.16	0.007	1.118 0	6.001 3	- 2.080 2
地上全磷	0.859	4	12.21	0.020	0.7580	3.571 8	- 1.347 3

表 5 不同磷浓度处理下云南松幼苗的根际有机酸分泌

Tab.5 Organic acids exudation in root rhizosphere of *Pinus yunnanensis* ' seedlings under different phosphorus supplies
mmol $\cdot$ kg⁻¹ $\cdot$ h⁻¹

处理 $c(P)/(\text{mmol L}^{-1})$	草酸	酒石酸	苹果酸	柠檬酸	失水苹果酸
2	0	0.0145 790 9	0	0	0
1/2	0	1.208 657 53	0.127 050 41	0	0
1/32	0.014 209 72	0	0.029 357 13	0	0
1/128	0.011 571 84	0	0	0	0
1/512	0	1.236 317 450	0.038 173 20	0	0
0	0.062 151 71	3.794 308 21	0.090 537 38	0	0

表 6 不同磷处理水平下云南松幼苗有机酸含量(干重)

Tab. 6 Organic acids content in *Pinus yunnanensis* seedlings under different phosphorus supplies(dry weight) mol ·kg⁻¹

处理	c(P) / (mmol L ⁻¹)	草酸	酒石酸	苹果酸	柠檬酸	失水苹果酸
地下部分	2	13.458 476 60	17.076 786 63	27.137 231 33	13.087 546 01	17.035 969 81
	1/2	10.586 946 27	0	5.140 965 28	15.585 252 69	46.770 442 59
	1/32	3.026 213 04	0	7.229 859 99	4.651 088 98	9.467 008 69
	1/128	0	0	6.245 084 55	10.755 921 07	10.218 073 90
	1/512	4.628 717 93	0	15.676 500 40	15.950 389 57	11.457 692 48
	0	0	0	2.345 448 90	0	0
地下部分	2	9.434 771 32	0	9.926 544 17	27.676 087 42	0
	1/2	9.483 641 75	0	5.262 327 98	25.888 911 90	3.810 247 45
	1/32	6.240 652 44	0	9.992 414 18	28.834 445 89	5.070 201 55
	1/128	4.638 533 97	0	10.541 943 56	34.878 134 94	4.321 131 17
	1/512	3.381 800 46	0	9.275 930 33	22.868 523 19	4.447 417 73
	0	0	0	14.416 708 94	35.157 844 85	5.867 023 80

根冠比的变化也被认为是植物对低磷的耐受机制之一,根系生长量相对增加和根冠比增加被认为是植物对低磷胁迫适应性反应和耐低磷能力的标志^[2].有研究表明玉米、大豆、小麦等在缺磷胁迫初期有更多的碳水化合物向根系运输,使根冠比增加;而白羽扇豆在缺磷 40 d 后相对于正常植株叶片组织中的磷水平大大降低,向根运输的同化物显著降低^[16].本实验中发现随着供磷量的减少不同磷处理间根系生物量有减少的趋势但无明显变化;根冠比虽有增加但也并不显著;与之相对应的是地上生物量的明显减少和地上、地下部分全磷含量略有增加而相互差距的逐渐增大.这说明在长期条件下磷的总量控制始终要占据主导地位.在这样的长期环境下植物的适应主要是通过控制对地上部分的营养供应来保证地下部分的相对正常生长.我国对小麦、油菜、玉米、水稻等的研究也表明缺磷时不同作物品种间的地上部分干重变化很大,磷高效品种的根冠比远大于磷低效品种^[2~4,17].云南松的类似变化也说明了其对缺磷环境的适应,是其在当地生境下长期进化的结果.

有研究表明缺磷会导致植物体内生长素含量的增加,从而导致根轴长度的增加和侧根密度的明显增加^[3],本试验与此结论部分一致.当 $c(P) < 1/8 \text{ mmol/L}$ 时,主根长度和侧根数的确与 P 浓度呈负相关,但是当 $c(P) > 1/8 \text{ mmol/L}$ 后,关系开

始转变为正相关,并且高磷状态下的植株侧根数远远高于低磷组,同时多数处理在侧根数上的差异不显著.推测这是由于在长期培养条件下,只有高磷组具有充足的磷供应其生长,而对低磷组而言早期的磷缺乏也诱导了侧根的发生,但是随时间的推移由于其没有足够的磷进行补充,因此侧根的分化停止,转而供给主根生长以获得较大的根长,这更有利于植物在现有可分配资源极为有限的条件下更大范围的土壤中寻找新的磷源,对减少相邻植株间的竞争也将起到积极作用.孙海国等^[4]的研究发现磷高效基因型的小麦根生长角度在低磷环境下升高,以减少相邻植株根系间的竞争,这也是从另一方面证实了这一观点.

当受到磷营养胁迫时,有些植物具有主动适应的机制,通过降低根际 pH 值方式增加对磷的吸收.目前观点认为,引起植物根际 pH 变化的原因主要有:① 阴阳离子吸收不平衡;② 根际呼吸作用产生的 CO₂;③ 根系分泌的有机酸;④ 根分泌 H⁺^[14,18].有研究表明,白羽扇豆在缺磷时会分泌大量柠檬酸,油菜根分泌物中则含有大量苹果酸和柠檬酸^[8,14,15],落叶松虽然根际土中 pH 较非根际土低,但在不同磷处理间根际 pH 差异不明显,显然是其酸化是由呼吸作用引起^[18,19].本次实验发现,在云南松幼苗的根系分泌物中未含有显著含量的有机酸,仅有少数植株内有机酸的含量有随供磷

量变化的趋势.这说明外界的磷供应状况能够影响到云南松的体内代谢环境,并影响其生长,但是并不能诱导云南松向外界分泌有机酸.云南松根际pH值的变化可能是多种因素共同作用的结果.

参考文献:

- [1] 陆文龙,张福锁,曹一平.磷土壤化学行为研究进展[J].天津农业科学,1998,4(4):1-7.
- [2] 马样庆,梁霞.植物高效利用磷机制的研究进展[J].应用生态学报,2004,1(4):712-716.
- [3] 孙海国,张福锁.小麦根系生长对缺磷胁迫的反应[J].植物学报,2000,42(9):913-919.
- [4] 孙海国,张福锁.缺磷胁迫下的小麦根系形态特征研究[J].应用生态学报,2002,13(3):295-299.
- [5] 曹爱琴,缪红,严小龙.低磷土壤条件下菜豆根构型的适应性变化和磷效率[J].土壤学报,2002,39(2):276-281.
- [6] 何蓉,程雪斌,胡秋芬,等.云南12种豆科灌木饲料中主要磷形态分析[J].云南大学学报:自然科学版,2003,25(6):528-530.
- [7] 陆文龙,曹一平,张福锁.低分子量有机酸对土壤无机磷形态转化的影响[J].华北农学报,1999,14(2):84-89.
- [8] 陆文龙,曹一平,张福锁.根分泌的有机酸对土壤磷和微量元素的活化作用[J].应用生态学报,1999,10(3):379-382.
- [9] 李庆逵.中国红壤[M].北京:科学出版社,1983.
- [10] 薛纪如,姜汉桥.云南森林[M].昆明:云南科技出版社,1988.
- [11] 上海植物生理学会.植物生理学试验手册[M].上海:上海科学技术出版社,1985.
- [12] 刘芷宇.根际研究法[M].南京:江苏科学技术出版社,1997.
- [13] SHEN J B, ZHANG F S, HUANG Q, et al. Determination of organic acids in root exudates by high performance liquid chromatography: I. development and assessment of chromatographic conditions [J]. Pedosphere, 1998, 8(2): 97-104.
- [14] 范晓晖,刘芷宇.根际pH环境与磷素利用研究进展[J].土壤通报,1992,23(5):238-240.
- [15] 胡红青,李妍,贺纪正.土壤有机酸与磷素相互作用的研究[J].土壤通报,2001,35(2):233-229.
- [16] 李锋,潘晓华.植物适应缺磷胁迫的根系形态及生理特征研究[J].中国农学通报,2002,18(5):65-70.
- [17] 郭玉春,林文雄,石秋梅,等.低磷胁迫下不同磷效率水稻苗期根系的生理适应性研究[J].应用生态学报,2003,14(1):61-65.
- [18] 白尚斌,张彦东,王政权.落叶松根际pH值与供磷水平及土壤磷有效性的关系[J].林业科学,2001,34(4):129-133.
- [19] 张彦东,白尚斌,王政权,等.落叶松根际土壤磷的有效性研究[J].应用生态学报,2001,12(1):31-34.

Effects of phosphorus supply on seedling morphology and organic acids exudation of *Pinus yunnanensis*

DENG Yun^{1,2}, GUAN Hui-lin³, DAI Kai-jie^{1,4}, ZHOU Wen-jun¹, SHEN You-xin¹

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China;

2. School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China;

3. Academy of Energy and Environment, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;

4. Central South Forestry University, Changsha, 410004, China)

Abstract: Phosphorus is a key element for plant growth. Effects of P supply on seedling growth and organic acid exudation were tested by growing *Pinus yunnanensis* seedlings in culture solutions with different P supply. Quadratic relationships were found between P supply and root biomass, numbers of lateral roots and P content of above-ground and under-ground body of *Pinus yunnanensis* seedlings. The effect was very strong when P supply was low, in contrast turned weak when P supply was high. As the time extension of P shortage, seedlings reduced their root biomass and raised the primary root length to ensure their growth. Phosphorus deficiency causes the internal plant acid environment change and then affect the growth of *Pinus yunnanensis*. However much exudation of organic acids in the root were hardly found. This indicates that the exudation of organic acids is not the major reason for pH change in root rhizosphere.

Key words: *Pinus yunnanensis*; phosphorus grads; morphology; biomass; organic acids