

落叶松根际土壤磷的有效性研究^{*}

张彦东^{* *} (中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223)

白尚斌 王政权 王庆成 (东北林业大学, 哈尔滨 150040)

【摘要】 野外用剥落法采集落叶松(*Larix gmelini*)根际土与非根际土, 分析 P 浓度的变化, 结果表明, 落叶松根际土与非根际土全 P 浓度无明显差异, 但根际土有效 P 却明显高于非根际土. 12 年生时根际土有效 P 增加 12.6%, 40 年生时增加 23.4%, 表明落叶松根际对土壤中的 P 具有活化作用. 落叶松根际土无机 P 各组分与非根际土亦有差异, 表现出根际土 O-P 低于非根际土, A-P、Fe-P、Ca-P 和 NH₄C-P 则高于非根际土的趋势. 落叶松根际土的 pH 低于非根际土, 但落叶松根际并未发生明显酸化. 落叶松根际有效 P 与 pH 变化相关不显著.

关键词 落叶松根际 有效磷 无机磷 土壤 pH

文章编号 1001- 9332(2001) 01- 0031- 04 **中图分类号** S714.8 **文献标识码** A

Soil P availability in larch rhizosphere. ZHANG Yandong (*Xishuangbanna Tropical Botanic Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223*), BAI Shangbin, WANG Zhengquan and WANG Qingcheng (*School of Forest Resource and Environments, Northeast Forestry University, Harbin 150040*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2001, 12(1): 31~ 34.

Soil samples were collected from the rhizosphere and non-rhizosphere of larch(*Larix gmelini*) stand by exfoliation method, and the variation of P concentration was analyzed. The results show that there was no significant difference between total P concentrations in the rhizosphere and the non-rhizosphere soil, while the concentration of available P in rhizosphere soil was significantly higher than that in the non-rhizosphere soil. The concentrations of available P in rhizosphere 12 years old and 40 years old larch rhizosphered by 12.6% and 23.4% respectively, indicating that larch roots had the effect of mobilizing soil phosphorus. The components of inorganic P in rhizospheric soil were different from those in non-rhizospheric soil. The concentration of O-P was lower, and the concentrations of A-P, Fe-P, Ca-P, NH₄C-P were higher in the rhizosphere. The pH of rhizospheric soil was lower than that of non-rhizospheric soil, but no further acidification was observed. There was no close relationship between pH variation and available P concentration in larch rhizosphere.

Key words *Larix gmelini*, Rhizosphere, Available P, Inorganic P, Soil pH.

1 引言

P 在土壤中易被固定, 利用率较低. 为了寻找土壤中 P 活化的有效方法, 目前国际上有关植物根际对土壤 P 的活化问题已成为研究热点^[9]. 该领域的研究在农业上起步较早, 20 世纪 70 年代即开始了作物根际对土壤 P 活化机理的探讨, 到目前为止, 对这方面的研究已较为系统^[8]. 树木根际对土壤 P 也有活化作用^[2,3,5,6], 有关树木根际对土壤 P 活化的研究主要开始于 20 世纪 90 年代, 且比较零散. 如 Gillespie^[3] 在研究刺槐根际酸化对土壤 P 的影响时提出, pH 下降增加了土壤有效 P 的供应. Fox^[2] 曾研究了湿地松根际磷酸酶与有机 P 的转化问题, 认为根际磷酸酶的增加提高了 P 的有效性. 蒋秋怡^[6] 在研究杉木连栽林地土壤特性时, 提出杉木根际土壤有效 P 明显高于非根际土. 由于不同树种其根际的生物化学过程不同, 对土壤 P 的活化机制各异. 因此, 开展不同树种根际与土壤 P 活化的研究, 对寻找高效利用土壤 P 素的方法具有重

要意义. 落叶松是我国主要用材树种, 也曾有人提出落叶松对土壤 P 具有活化作用^[1,10], 并推测落叶松根际 pH 降低可能与根际有效 P 增加有关^[1], 但未做深入研究. 本文在此基础上, 将对落叶松根际土壤 P 的有效性以及与无机 P 组分及 pH 的关系进行探讨.

2 研究地区自然概况与研究方法

2.1 自然概况

研究所用土壤样品采自东北林业大学帽儿山实验林场. 该林场位于长白山北部张广才岭西坡(127°30'~127°34'E, 45°21'~45°25'N), 属中温带湿润气候, 年平均气温 2.8℃, 年均降水量为 723.8mm, ≥10℃积温为 2526℃, 无霜期约 120d. 地貌类型为低山丘陵. 地带性土壤为暗棕壤.

2.2 研究方法

2.2.1 土壤样品采集 野外选择 12 年生和 40 年生两种人工落叶松(*Larix gmelini*) 纯林采集土样. 12 年生林分的林下土壤为

* 教育部优秀青年教师基金资助项目.

* * 通讯联系人.

1999- 04- 12 收稿, 1999- 09- 28 接受.

典型暗棕壤, 40 年生林分的为白浆化暗棕壤. 先在各自林分中设立 0.1hm² 的样地, 然后在样地内按“S”形均匀布设 30 个采样点. 在每点按剥落法收集土样, 将经 5 次抖动后应附在根表的土壤作为根际土, 抖落的土壤作为非根际土. 采样时挖掘深度为 0~ 20cm. 采样时间为 1998 年 7 月下旬.

2.2.2 土壤样品分析 将野外采集的土壤样品经风干处理后进行如下项目测定: 1) 全 P 浓度测定, 采用 H₂SO₄-HClO₄ 为强氧化剂对土壤进行酸溶, 用钼锑抗比色法测定 P; 2) 有效 P 的测定, 以 0.03mmol·L⁻¹NH₄F-0.025mmol·L⁻¹的 HCl 作为浸提剂, 用钼锑抗比色法测定 P; 3) 无机 P 分级测定, 采用张守敬-Jackson 的分级方法进行^[8]; 4) 有机 P 测定, 采用灼烧 0.2mmol·L⁻¹ H₂SO₄ 浸提法^[8]; 5) pH 测定, 采用电位法, 用 PHS-2 型酸度计测水浸 pH. 全 P、无机 P 分级和有机 P 测定将 3 个样点组成一个混合样进行.

3 结果与分析

3.1 落叶松根际土壤 P 的有效性

P 在土壤中易被固定, 移动性较差, 在树木根际常因根系吸收而出现亏缺, 其有效性也随之下落. 对落叶松根际土与非根际土 P 浓度的测定结果表明(表 1), 在 12 年生和 40 年生林分中, 其根际土与非根际土的全 P 浓度相近, 经检验无显著差异(12 年生 |t| = 1.25, t_{0.05} = 2.31, |t| < t_{0.05}, n = 9; 40 年生 |t| = 1.02, t_{0.05} = 2.26, |t| < t_{0.05}, n = 10), 说明全 P 在根际未出现亏缺. 无机 P 浓度在根际略低于非根际, 经检验根际土与非根际土的浓度亦无显著差异(12 年生

|t| = 1.67, t_{0.05} = 2.31, |t| < t_{0.05}, n = 9; 40 年生 |t| = 0.46, t_{0.05} = 2.26, |t| < t_{0.05}, n = 10). 有机 P 浓度在根际土与非根际土之间未表现出明显变化规律.

比较落叶松根际土与非根际土有效 P 的浓度可见, 无论 12 年生还是 40 年生, 其根际土有效 P 浓度均高于非根际土. 在 12 年生时根际土有效 P 浓度增加 12.6%, 在 40 年生时增加 23.4%, 经检验, 差异均显著(12 年生 |t| = 2.37, t_{0.05} = 2.31, |t| > t_{0.05}, n = 9; 40 年生 |t| = 2.43, t_{0.05} = 2.26, |t| > t_{0.05}, n = 10). 有效 P 通常被认为是树木可以吸收利用的 P, 在根际常表现亏缺. 在落叶松根际有效 P 不但没因根系吸收而减少, 反而表现增加, 说明 P 在落叶松根际发生了活化. 可能由于活化作用大于树木对 P 的吸收作用使得有效 P 浓度增加. 曾有人报道过水曲柳与落叶松混交后混交林林地土壤有效 P 的浓度明显增加, 并导致水曲柳增产^[4]. 现在看来落叶松根际对土壤 P 的活化可能是促使混交林林地土壤有效 P 增加的主要原因.

在所研究的土壤中有有机 P 占全 P 的 65.2% ~ 71.2%, 如此高的有机 P 对土壤有效 P 是否产生影响? 从回归分析结果可见, 根际土壤有效 P 与有机 P 浓度相关并不显著(r = 0.3107; r_{0.05} = 0.4520, r < r_{0.05}, n = 19). 非根际土有效 P 与有机 P 浓度之间也无显著相关(r = 0.3199, r_{0.05} = 0.4520, r < r_{0.05}; n = 19). 因此, 落叶松根际土有效 P 并不受有机 P 数量的影响.

表 1 落叶松根际土与非根际土的 P 浓度
Table 1 Soil P concentrations between in the rhizosphere and in non-rhizosphere of *Larix gmelini*

年龄 Age	土壤类型 Soil type	全 P Total P (%)	无机 P Inorganic P (μg·g ⁻¹)	有机 P Organic P (μg·g ⁻¹)	有效 P Available P (μg·g ⁻¹)	有效 P 亏缺率* Available P loss rate (%)
40 年生 40-year-old	根 际 土 Rhizosphere soil	0.143±0.034	475.7±26.1	954.3±35.2	22.7±0.5 ^a	- 23.4
	非根际土 Non-rhizosphere soil	0.138±0.037	480.1±29.7	899.9±37.3	18.4±0.5	-
12 年生 12-year-old	根 际 土 Rhizosphere soil	0.273±0.045	786.1±26.7	1943.9±47.1	18.8±0.8 ^a	- 12.6
	非根际土 Non-rhizosphere soil	0.282±0.014	826.9±27.9	1993.1±47.3	16.7±0.7	-

* 有效 P 亏缺率(A) = [非根际土有效 P 浓度(N) - 根际土有效 P 浓度(R)] / 非根际土有效 P 浓度(N) × 100. A is the available P loss rate; N is the available P concentration in the non-rhizosphere soil; R is the available P concentration A = (N - R) / N × 100.

3.2 根际土 P 有效性与无机 P 各组分的关系

采用张守敬-Jackson 提出的土壤无机 P 分级方法, 将落叶松根际土和非根际土中的无机 P 分离为 NH₄Cl-P、Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 共 5 组, 结果如表 2. 根据测定结果, 在本区地带性土壤暗棕壤上, 土壤无机 P 中以闭蓄态 P(O-P) 浓度最高, 约占无机 P 总量的 40% ~ 55%. 其次为 Fe-P, 约占无机 P 总量的 20% ~ 32%. 再次为 Ca-P, 约占无机 P 总量的 20% 左右. Al-P 浓度相对较低, 约占无机 P 总量的 5% ~ 8%. NH₄Cl-P

在无机 P 中所占比例最小, 不超过 2%. 在落叶松根际 NH₄Cl-P 高于非根际, NH₄Cl-P 是结合态 P, 其有效性最高. 落叶松根际土 NH₄Cl-P 增高可导致根际有效 P 增加.

Al-P 和 Fe-P 在弱酸性条件下有效性较高, 尤其是 Al-P 的有效性要高于 Fe-P. 经测定在落叶松根际 Al-P 和 Fe-P 高于非根际. 既然 Al-P 和 Fe-P 是树木可以利用的 P 源, 在根际因树木的吸收其比例应表现下降. 分析产生这一现象的原因, 可以认为, Al-P 和 Fe-P

表 2 根际土与非根际土无机 P 分级结果*
Table 2 Graduated results of inorganic P in rhizosphere and non-rhizosphere soils($\mu\text{g g}^{-1}$)

年龄 Age	土壤类型 Soil type	NH ₄ Cl-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	无机磷总量 Total inorganic P
40 年生 40-year-old	根 际 土 Rhizosphere soil	9.1 (1.9)	36.6 (7.7)	151.7 (31.9)	186.0 (39.1)	92.3 (19.4)	475.7±26.1
	非根际土 Non-rhizosphere soil	7.2 (1.5)	29.8 (6.2)	143.1 (29.8)	215.0 (44.8)	85.0 (17.7)	480.1±29.7
12 年生 12-year-old	根 际 土 Rhizosphere soil	11.0 (1.4)	45.6 (5.8)	161.9 (20.6)	387.5 (49.3)	180.1 (22.9)	786.1±26.7
	非根际土 Non-rhizosphere soil	8.3 (1.0)	43.0 (5.2)	151.3 (18.3)	447.4 (54.1)	176.9 (21.4)	826.9±27.9

* 括号中数据为各组分 P 占无机 P 总量的百分比。Data in brackets show each constituent phosphorus accounts for percentage of the total inorganic P.

在根际的升高是O-P下降所致。由表2可知,在落叶松根际土中,O-P占无机P总量的比例分别为39.1%和49.3%,均低于其相应非根际土的44.8%和54.1%。O-P是被铁铝水化氧化物胶膜“包蔽”的磷酸铁盐和磷酸铝盐,通常这部分磷酸盐树木无法利用,处于无效状态。在落叶松根际O-P降低,Fe-P和Al-P比例升高,说明此时部分O-P的铁铝氧化物胶膜被破坏。Fe-P和Al-P放出,从而提高了Fe-P和Al-P的比例。落叶松根际对O-P的活化可能主要是根分泌物的作用,这一活化作用直接导致根际P有效性增加。Ca-P在落叶松根际也表现出高于非根际的趋势。这可能由于Ca²⁺在根际出现富集。过剩的Ca²⁺与磷酸根结合形成沉淀之故。

当用0.03mmol·L⁻¹NH₄F-0.025mmol·L⁻¹HCl作为浸提剂测定有效P时,由于浸提剂中的F⁻与Fe和Al络合能力较强,故测得的有效P主要是Al-P和Fe-P(也包括部分Ca-P)中的P。在落叶松根际由于这3部分磷酸盐均表现出增加,同时松结合态的NH₄Cl-P也表现增加,所以导致根际有效P浓度提高。对有效P与土壤各无机P组分进行相关分析表明(表3),土壤有效P与各无机P组分的复相关达显著水平(F_{非根际}=3.5714,F_{根际}=4.0820;F_{0.05}=3.02,F_{0.01}=4.86,n=19)。根际土和非根际土有效P浓度均与NH₄Cl-P及Al-P相关显著(r_{0.05}=0.5139,r_{0.01}=0.6811,r>r_{0.05},n=19),与Fe-P和Ca-P未达到显著相关。有效P与O-P呈负相关,且相关不显著。

表 3 有效 P 与各组分无机 P 的相关系数
Table 3 Correlation coefficient of available P and each constituent of inorganic P

土壤类型 Soil type	NH ₄ Cl-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	复相关系数 Multiple correlation coefficient
根际土 Rhizosphere soil	0.5721*	0.5412*	0.4063	-0.4184	0.3901	0.7816*
非根际土 Non-rhizosphere soil	0.5353*	0.5262*	0.4006	-0.4055	0.3798	0.7607*

3.3 根际土 P 有效性与 pH 的关系

在树木根际,pH 的变化也将对 P 的有效性产生

一定影响。在通常 pH 范围内,P 的有效性随 pH 的下降而提高。这主要是 pH 降低导致磷酸钙盐溶解度增加。在所研究的两组林分中,落叶松根际土的 pH 均出现下降的趋势(图1)。40 年生时,根际土 pH 低于非根际土 0.09。12 年生时,根际土 pH 低于非根际土 0.13。经回归分析,在落叶松根际,pH 与有效 P 浓度之间相关不显著(r=-0.0023,r_{0.05}=0.1889,r<r_{0.05},n=108)。因此,在落叶松根际虽然 pH 有所降低,但并没有出现明显的酸化现象,P 有效性与根际酸化无显著相关。落叶松根际 pH 下降可能是由于根分泌有机酸所致。这种原因引起的酸化程度是有限的^[7]。

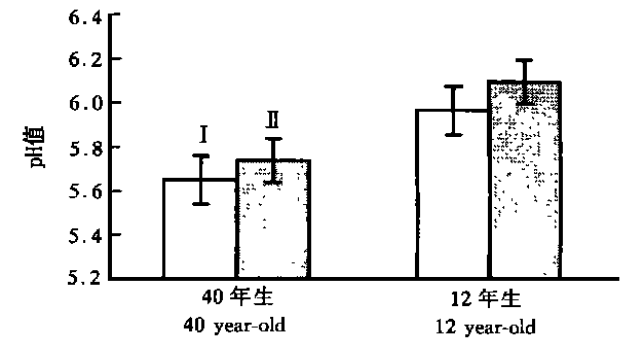


图 1 落叶松根际土与非根际土 pH
Fig. 1 Soil pH in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Larix gmdini*. I. 根际土 Rhizosphere soil, II. 非根际土 Non-rhizosphere soil.

4 讨 论

全 P 在落叶松根际未出现亏缺的原因,一是较小的全 P 亏缺常被 P 的测定所掩盖(全 P 浓度较高,测定时系统误差的引入),二是在一定程度上也受取样方法的影响。由于剥落法是应用于野外的方法,精度相对较低,在取样过程中常因根毛等的混入导致根际土 P 增高。同时又由于 P 在土壤中移动性较差。其亏缺范围较小,用剥落法取样时,也会将 P 亏缺范围以外的土壤混入。已有研究表明,在粘质土壤上 P 的亏缺范围仅为离根面 1mm 左右,只相当于根毛的长度^[9]。

通常情况下有效 P 在根际易出现亏缺,而本次测得落叶松根际土有效 P 浓度明显高于非根际土,表现

出富集. 这一现象仅用上述取样方法难以解释. 看来在落叶松根际 P 确实发生了较强的活化, 并且这一活化过程起了主导作用, 从而掩盖了根际有效 P 亏缺现象. 在落叶松根际如果没有 P 活化作用, 其根际土 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Ca-P 、 Al-P 和 Fe-P 浓度不会增加, 而 O-P 也不会出现降低的趋势. 即使取样时因方法问题将非根际土混入, 最大可能会出现根际土与非根际土有效 P 持平. 另据蒋秋怡^[6]对杉木根际土有效 P 的测定, 也表现出与落叶松相似的规律.

植物根际对土壤 P 的活化是一个非常复杂的过程, 受根际 pH、根分泌物及微生物等多方面因素的影响^[11]. 在落叶松根际 pH 虽略有下降, 但并未明显酸化, 而且根际 pH 与有效 P 之间亦无显著相关. 因此, pH 与根际 P 活化关系不大. 从根际 O-P 下降以及其他形态无机 P 增加这一趋势上看, 落叶松根际对 P 的活化可能是根分泌物参与的过程. 其机制还有待进一步研究.

参考文献

- 1 Cui X-Y(崔晓阳), Chai Y-X(柴一薪), Wang Y-H(王义弘). 1994. Distribution characteristics of available phosphorus in soil of the young Larch and Ash stands. In: Cui X-Y(崔晓阳) and Wang Q-W(王清文) eds. New Studies on Forest Management and Forest Resource Exploitation in Northeast China. Harbin: Heilongjiang Scientific and Technological Press. 209~ 213(in Chinese)
- 2 Fox T.R. 1991. Rhizosphere phosphatase activity and phosphatase hydrolyzable organic phosphorus in two forested spodosols. *Soil Biol Biochem*, **24**(6): 579~ 583
- 3 Gillespie A.R., Pope P.E. 1991. Rhizosphere acidification increases phosphorus recovery of black locust II. Model predictions and measured recovery. *Soil Sci Amer J*, **54**: 537~ 541
- 4 Guo Q-X(国庆喜), Chen N-Q(陈乃全), Sun K-Q(孙克勤). 1991. The seasonal variation in nutrient contents of soil and tree leaves of manchurian Ash-dahurian Larch mixed plantation. *J Northeast For Univ* (东北林业大学学报), **19**(Specific issue): 213~ 220(in Chinese)
- 5 Jiang P-K(姜培坤), Xu Q-F(徐秋芳), Qian X-B(钱新标) et al. 1995. Studies on soil phosphorus of rhizosphere under Chinese fir and Chinese Sassafras. *J Zhejiang For Coll* (浙江林学院学报), **12**(3): 242~ 246(in Chinese)
- 6 Jiang Q-Y(蒋秋怡), Ye Z-H(叶仲节), Qian X-B(钱新标) et al. 1990. Studies on soil characteristics in the root zone of chinese fir. *J Zhejiang For Coll* (浙江林学院学报), **7**(2): 122~ 126(in Chinese)
- 7 Lu J-L(吕家珑), Zhang Y-P(张一平), Ma A-Sh(马爱生) et al. 1999. Dynamic of pH and phosphorus of wheat rhizosphere in calcareous soil. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), **5**(1): 32~ 39(in Chinese)
- 8 Soil Association of China Agrochemistry Branch(中国土壤学会农业化学专业委员会). 1983. Method of Analysis in Soil and Agrochemistry. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 9 Wang Q-R(王庆仁), Li J-Y(李继云), Li Z-H(李振声). 1998. Dynamics and prospect on studies of high acquisition of soil unavailable phosphorus by plants. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), **4**(2): 107~ 116(in Chinese)
- 10 Zhang Y-D(张彦东), Yu X-J(于兴君), Yang W-H(杨文化). 1997. The nutrition characteristics of rhizosphere soil and wood soil in Ash and Larch mixture plantation. In: Shen G-F(沈国舫) and Zhai M-P(翟明普) eds. Researches on Mixed Forest Plantations. Beijing: China Forestry Press. 145~ 149(in Chinese)
- 11 Zhang F-Sh(张福锁), Cao Y-P(曹一平). 1992. Rhizosphere dynamics and plant nutrition. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **29**(3): 239~ 250(in Chinese)

作者简介 张彦东,男,1963年4月生,博士,副教授,主要研究领域为森林培育及林地营养管理,发表论文30余篇. E-mail: zhyd@public.km.yn.cn