

杉木幼林根圈土壤磷酸酶活性、 磷组分及其相互关系

陈 竣 李传涵

摘要 通过对杉木人工林根圈土壤两种磷酸酶活性、8种磷组分及其相互关系研究,结果表明:(1)根圈酸性、中性磷酸酶活性分别比根圈外高1.44、0.66 酚 mg/g(37 , 12 h), R/S 值分别为1.91和2.01;(2)根圈全P、DA-P、Al-P、Fe-P、 H_2SO_4 -P 分别比根圈外高203.45、2.21、3.05、10.93、10.33 mg/kg, R/S 值分别为1.61、4.68、3.61、1.97、2.46, Ca-P 比根圈外低2.34, R/S 值为0.72, I-P 和 O-P 无显著差异;(3)根圈酸性磷酸酶活性与 DA-P 和 H_2SO_4 -P 呈显著正相关, r 值分别为0.584和0.579, 中性磷酸酶活性与全P、I-P 和 O-P 呈显著或极显著正相关, r 值分别为0.594、0.773和0.686。

关键词 杉木 根圈 磷酸酶活性 磷组分

根圈是根系周围受植物根系生长影响的微区,其土壤各种特性不同于原来土壤生态系统,特别是土壤 pH 值^[1]、养分状况^[2,3]、生化活性^[3,4]、微生物特性^[5] 等都存在显著差异,它们对植物吸收养分、水分有重要影响。Tarafdar 和 Junk^[6] 研究表明,三叶草(*Trifolium alexandrinum* Linn.)、麦(*Triticum aestivum* Linn.) 根圈内,全P和有机P严重耗竭,无机P累积。Bhat 等^[2] 在低P土壤上研究指出,根圈磷酸盐化合物含量显著低于根圈外土壤。作者^[3,5] 先前的研究表明,杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 根圈土壤全P、 H_2SO_4 -P 和有机P都高于根圈外土壤;毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.) 和刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.) 根圈土壤有效P也有累积现象。

植物根圈磷酸酶能将土壤有机P分解成无机P,对于植物吸收利用P素营养有重要意义。Sharpley^[7] 认为土壤有机P的矿化率与农作物P素营养和土壤磷酸酶活性有密切关系,而Hedley 等^[8] 表明,尽管油菜(*Brassica campestris* L.) 根圈磷酸酶活性很高,但它只能活化大量的无机P。但目前对林木根圈酶活性的报道还不多。杉木是一个喜P树种,研究其根圈磷酸酶活性、P组分及其相互关系,对于合理利用P肥资源有积极的意义。

1 材料与方 法

试验地为国营地连林场,位于雪峰山西南余脉山地云贵高原向南岭过渡地带湖南省通道县境内,109°42' E, 26°09' N, 属南亚热带气候,年均气温16.3 , 无霜期298 d,年降水量1192~1744 mm。供试样地为1989年造林的杉木纯林,林木生长良好。前茬植被为阔叶杂木林,以白栎(*Quercus fabri* Hance) 和枫香(*Liquidambar formosana* Hance) 为主,林下植被多为大叶苎麻(*Boehmeria grandifolia* Wedd.)、杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch)、五节芒(*Miscant-*

hus floridulus Warb.) 和胡枝子 (*Lepedez a bicolor* Turcz.) 等。林地海拔 350~450 m, 东坡, 坡度 18~25°, 林下土壤为板页岩母质发育的红壤, 土层深厚, 土质疏松, 砾石少。

1991 年 7 月, 在供试区林地中坡沿等高线选择标准地 12 块, 每块面积 15 m × 15 m。在每个样地采用“之”字形路线采集 0~50 cm 土层土样, 混匀后作为根圈外土壤样品; 采集样地 3 株平均木细根(直径 < 2 mm) 上粘附土壤, 混匀后作为根圈土壤样品。土样风干后, 过 0.25 mm 筛的样品供化学分析用, 过 2 mm 筛的样品供酶活性分析用。同时对标准地进行每木检尺, 量测树高、胸径和当年新梢生长量。

土壤 pH, 有机质, 全 N, 全 P, 有效 N、P 和 K, 交换性 Ca 和 Mg, 有效 Cu 和 Zn 用常规分析方法^[9,10]; H₂SO₄-P 采用 0.1 mol · L⁻¹ H₂SO₄ 浸提—钼锑抗比色法, Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 采用 Chang 和 Jackson 改进法^[9]。供试土壤基本性质见表 1。酸性、中性磷酸酶活性采用 G. Hoffmann 法^[11]测定, 酶活性单位以酚 mg/g(37, 12 h) 表示。

表 1 供试杉木林地土壤性质

土壤性质	根 圈			根 圈 外		
	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值
pH(H ₂ O)	4.54	4.20	4.76	4.78	4.52	4.92
(KCl)	3.46	3.29	3.65	3.46	3.20	3.59
有机质(g/kg)	41.20	30.20	56.90	15.40	7.70	35.00
全 N(g/kg)	1.16	0.62	1.62	0.59	0.45	0.98
全 P(g/kg)	0.539	0.365	0.845	0.336	0.227	0.467
有效 N(mg/kg)	141.00	67.00	188.00	61.00	32.00	142.00
有效 K(mg/kg)	70.00	37.00	98.00	47.00	34.00	59.00
有效 Cu(mg/kg)	0.98	0.60	1.50	0.69	0.40	1.00
有效 Zn(mg/kg)	2.75	1.40	6.40	1.54	0.90	3.20
交换性 Ca(cmol/kg)	3.21	1.76	5.47	1.89	1.03	3.17
交换性 Mg(cmol/kg)	1.04	0.88	1.22	0.95	0.84	1.20

2 结果与分析

2.1 杉木根圈磷酸酶活性

表 2 表明, 杉木幼林地土壤酸性磷酸酶活性明显高于中性磷酸酶活性, 在根圈内, 前者是后者的 2.39 倍, 在根圈外为 2.61 倍。

表 2 杉木根圈内外土壤酶活性

(单位: 酚 mg/g)

样地号	酸 性 磷 酸 酶			中 性 磷 酸 酶		
	S	R	R/S	S	R	R/S
1	1.26	3.20	2.54	0.52	1.25	2.40
2	1.75	3.42	1.95	0.61	1.59	2.61
3	1.30	3.40	2.62	0.53	1.65	3.11
4	1.56	3.16	2.03	0.50	0.41	0.80
5	1.55	2.64	1.70	0.65	1.04	1.60
6	1.37	2.80	2.04	0.64	1.16	1.81
7	2.48	3.42	1.38	0.88	1.69	1.92
8	1.85	3.43	1.85	0.70	1.69	2.41
9	1.67	3.28	1.95	0.81	1.47	1.82
10	2.43	2.92	1.20	0.83	1.25	1.51
11	1.55	3.11	2.00	0.69	1.45	2.10
12	1.88	3.13	1.67	0.60	1.19	1.98
平均数	1.72	3.16	1.91	0.66	1.32	2.01
$X_R - X_S$	1.44*			0.66**		

注: S、R 分别表示根圈外、内土壤(下同); $X_R - X_S$ 表示根圈内外平均数之差(下同)。

另外,根圈内酸性、中性磷酸酶活性分别比根圈外提高 191%和 201%,它们的 $X_R - X_S$ 值分别为 1.44^{**} 和 0.66^{**} 酚 mg/g,均达到极显著水平。

2.2 杉木根圈内 P 组分

表 3 表明,杉木林地上壤无机 P 占全 P 不到 25%,可见有机 P 是林地土壤全 P 的最主要的组分。根圈各 P 组分所占百分数从大到小依次为 23.9% (I-P)、17.9% (O-P)、4.1% (Fe-P)、3.2% (H₂SO₄-P)、1.1% (Ca-P)、0.8% (Al-P) 和 0.5% (DA-P)。同根圈外 P 组分相比,I-P、Fe-P 和 H₂SO₄-P 分别增加 2.6%、2.0% 和 1.1%; DA-P、Al-P、O-P 和 Ca-P 增加则不足 1%。

表 3 杉木根圈内外土壤 P 组分占全 P 百分数

项 目	根 圈 内 各 P		根 圈 外 各 P	
	组分(mg/kg)	占全 P(%)	组分(mg/kg)	占全 P(%)
全 P	539.12	100.0	335.67	100.0
DA-P	2.82	0.5	0.60	0.1
H ₂ SO ₄ -P	17.33	3.2	7.00	2.1
I-P	129.07	23.9	114.69	21.3
Al-P	4.22	0.8	1.17	0.2
Fe-P	22.20	4.1	11.27	2.1
O-P	96.43	17.9	93.69	17.4
Ca-P	6.14	1.1	8.48	1.6

表 4 表明,根圈内 P 组分同根圈外有显著差异。全 P、DA-P、Al-P、Fe-P 和 H₂SO₄-P 含量极显著高于根圈外土壤,I-P 和 O-P 略高于根圈外土壤,而 Ca-P 含量则显著低于根圈外土壤。

表 4 杉木根圈内外土壤 P 组分差异

样地号	土壤	全 P	DA-P	I-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	H ₂ SO ₄ -P
1	S	325.12	0.323	145.37	1.24	6.52	127.68	9.93	5.45
	R	402.36	2.415	155.85	3.55	21.99	124.04	6.27	19.15
2	S	380.54	0.323	137.85	1.02	6.58	120.40	9.85	9.70
	R	552.48	3.385	142.07	7.65	22.12	105.12	7.18	36.20
3	S	327.38	0.259	108.93	0.89	5.92	92.53	9.59	6.20
	R	564.01	3.127	128.03	5.39	20.76	97.51	4.36	16.05
4	S	288.90	0.453	84.18	1.25	4.46	69.17	9.30	7.80
	R	365.27	2.803	83.01	3.90	20.46	54.11	4.54	20.60
5	S	260.53	0.474	87.75	1.25	9.68	67.62	9.20	5.40
	R	508.41	2.695	120.22	4.41	19.23	91.11	4.54	14.55
6	S	226.93	0.126	105.83	1.24	5.21	90.48	8.89	4.30
	R	430.73	1.121	131.15	1.25	11.14	112.96	5.80	6.25
7	S	308.53	1.013	110.43	0.45	11.69	94.66	3.63	6.85
	R	474.37	3.019	125.53	3.68	23.78	92.74	5.33	16.10
8	S	302.86	0.604	120.63	1.78	16.77	95.46	6.62	6.25
	R	660.27	4.313	122.36	3.99	27.11	85.53	5.73	18.80
9	S	433.35	0.518	111.45	0.68	15.85	86.34	8.58	5.40
	R	563.83	3.127	131.88	6.19	28.83	91.24	5.62	16.60
10	S	466.95	1.617	120.94	1.55	16.10	93.56	7.73	11.20
	R	623.62	2.911	121.35	5.20	26.90	81.37	7.88	16.15
11	S	392.32	0.755	126.05	2.35	20.41	92.21	11.08	8.05
	R	844.87	2.846	151.15	1.99	22.43	118.14	8.59	14.35
12	S	314.64	0.690	116.89	0.34	14.05	94.12	7.38	7.35
	R	479.17	1.941	136.18	3.40	21.69	103.26	7.83	13.10
X_S		335.67	0.60	114.69	1.17	11.27	93.69	8.48	7.00
X_R		539.12	2.81	129.07	4.22	22.20	96.43	6.14	17.33
$X_R - X_S$		203.45 ^{**}	2.21 ^{**}	14.38	3.05 ^{**}	10.93 ^{**}	2.74	-2.34 [*]	10.33 ^{**}
R/S		1.61	4.68	1.13	3.61	1.97	1.03	0.72	2.48

2.3 杉木根圈磷酸酶活性与 P 组分的关系

从表 5 可以看出, 酸性、中性磷酸酶活性同 P 组分, 特别是 DA-P 关系密切, 但这种关系在根圈内外有显著的差异。在根圈内, 酸性磷酸酶活性与 DA-P 和 H_2SO_4 -P 显著相关, 中性磷酸酶活性与全 P、I-P 和 O-P 呈显著正相关; 在根圈外, 酸性磷酸酶活性与 DA-P 呈极显著正相关, 与 Ca-P 呈极显著负相关, 中性磷酸酶活性与 DA-P、Fe-P 分别呈显著、极显著正相关。

表 5 杉木根圈内外土壤磷酸酶活性与 P 组分的相关性

项 目	酸 性 磷 酸 酶		中 性 磷 酸 酶	
	S	R	S	R
全 P	0.381	0.133	0.454	0.594*
DA-P	0.856**	0.584*	0.696*	0.240
I-P	0.037	0.106	0.162	0.773**
Al-P	-0.293	0.428	0.064	0.137
Fe-P	0.570	0.525	0.804**	0.266
O-P	-0.036	-0.022	0.041	0.686*
Ca-P	-0.738**	0.001	-0.428	0.304
H_2SO_4 -P	0.537	0.579*	0.150	0.017

*, ** 分别表示在 0.05、0.01 水平下的显著性。

为了进一步阐明磷酸酶活性和 P 组分在土壤生态系统中的复杂关系, 对这两组指标进行了多元逐步回归分析, 结果列于表 6 中。结果表明, 根圈酸性磷酸酶活性与 DA-P 关系最为密切, 且呈线性关系, R 为 0.584*。中性磷酸酶活性与 I-P、DA-P 和 H_2SO_4 -P 呈密切的线性关系, R 为 0.893**, 其中与 I-P 关系最为密切, R_{03} 为 0.875**, 其次是 DA-P, R_{02} 为 0.699*, 与 H_2SO_4 -P 呈负相关, 但未达到显著水平。在根圈外酸性磷酸酶活性与 DA-P、Ca-P 和 H_2SO_4 -P 呈极显著的线性关系, R 为 0.950**, 其中与 DA-P 呈极显著正相关, 与 Ca-P 呈极显著负相关; 中性磷酸酶活性只与 Fe-P 呈极显著正相关, R 为 0.804**。

表 6 杉木根圈内外土壤磷酸酶活性和 P 组分的逐步回归方程

土壤	逐 步 回 归 方 程	R	R_{0x}
R	$APA = 1.00018 + 0.14861X_2$	0.584*	$R_{02} = 0.692^*$
S	$APA = 1.03473 + 0.16679X_2$ $- 0.37429X_7 + 0.20360X_8$	0.950**	$R_{07} = -0.795^*$ $R_{08} = 0.564$
R	$NPA = -8.97629 + 0.84620X_2$ $+ 1.98494X_3 - 0.44876X_8$	0.893**	$R_{02} = 0.699^*$ $R_{03} = 0.875^*$
S	$NPA = -1.11173 + 0.30776X_5$	0.804**	$R_{08} = -0.551$

注: (1) $X_1 \sim X_8$ 分别代表全 P、DA-P、I-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P 和 H_2SO_4 -P; (2) *, ** 分别表示在 0.05、0.01 水平下的显著性; (3) R 、 R_{0x} 分别表示复相关系数和偏相关系数; APA、NPA 分别表示酸性和中性磷酸酶活性。

3 讨 论

很显然, 杉木根圈土壤磷酸酶活性极显著高于根圈外土壤。由于它主要来源于植物和土壤微生物的分泌物^[4,12], 根圈内根系和微生物活性的增加可能是导致磷酸酶活性提高的一个原因。另外, 磷酸酶是一个诱导酶^[4], 林地土壤低 P 水平可能刺激了根系和微生物分泌产生磷酸酶, Silberbush 等^[13] 也表明, 植物根系分泌磷酸酶的强度在一定程度上受植物对 P 需求的影

响。

磷酸酶被土壤无机—有机复合体吸附着^[4,14], 根圈有机质增加^[3] 导致土壤复合胶体大量吸附磷酸酶, 许多研究表明磷酸酶活性与有机质呈极显著相关关系即可证明这一点^[15-17]。

研究表明, Mg^{2+} 能够提高磷酸酶活性^[18], 交换性 Mg 与磷酸酶活性有显著正相关关系^[15-17], 杉木根圈交换性 Mg 的提高可能也是磷酸酶活性提高的一个原因。

由于根圈磷酸酶活性的提高(表 2), 大量的无机 P, 包括 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P, 从有机物中释放出来, 累积在根圈中。Bhat 等^[2] 认为, 有机态 P 加速分解成无机 P 释放于根圈, 也会引起无机 P 累积。

酸性磷酸酶活性与 DA-P、Ca-P 和 H_2SO_4 -P 之间以及中性磷酸酶活性与 DA-P、I-P 及 H_2SO_4 -P 之间的显著或极显著的相关关系表明, 磷酸酶活性是评价土壤 P 素状况的一个有用指标^[19]。

参 考 文 献

- 1 Nye P H. Changes of pH across the rhizosphere induced by roots. *Plant and Soil*, 1981, 61: 7 ~ 26.
- 2 Bhat K K S, Nye P H, Baldwin J P. The concentration distance profile in the rhizosphere of roots with root hairs in a low P soil. *Plant and Soil*, 1976, 44: 63 ~ 72.
- 3 陈 竣, 李传涵. 杉木根际与非根际土壤酶活性比较. *林业科学*, 1994, 30(2): 170 ~ 175.
- 4 McLaren A D, Peterson G H. *Soil Biochemistry*. Dekker, New York: Dekker, 1967.
- 5 Li C H, Wang C R, Zhao P. A study on the mechanism of high-yield mixed forests of chinese white poplar and black locust. *Proc. of the First international Symposium on forest soils*. Barbin: Northeast Forestry University Press, 1990, 254.
- 6 Tarafar J C, Jungk A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biol. Fertil. Soil*, 1987, 3: 199 ~ 204.
- 7 Sharpley A N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. A m. J.*, 1985, 49: 905 ~ 911.
- 8 Hedley M J, White R E, Nye P H. Plant-induced changes in the rhizosphere of rape seedlings: Changes in L value, soil phosphate fractions and phosphatase activity. *New Phytol*, 1982, 91: 45 ~ 56.
- 9 李西开. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. 1 ~ 194.
- 10 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- 11 郑洪元. 土壤动态生物化学研究法. 北京: 科学出版社, 1982. 173 ~ 265.
- 12 Tarafar J C, Claasson N. Organic Phosphorus compound as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatase produced by plant roots and microorganism. *Biol. Fertil. Soil*, 1988, 5: 308 ~ 312.
- 13 Silberbush M, Shomer-Han A, Waisel Y. Root surface phosphatase activity in ecotypes of *Aeglops peregrina*. *Physiol. Plant*, 1981, 53: 501 ~ 504.
- 14 McLaren A D. Soils as a system of humus and clay immobilized enzyme. *Chemica Scripta*, 1975, 8: 97 ~ 99.
- 15 陈 竣, 李传涵. 杉木幼林地土壤酶活性和土壤肥力. *林业科学研究*, 1993, 6(3): 321 ~ 326.
- 16 Harrison A F. Relationship between intensity of phosphatase activity and physico-chemical properties in the woodland soils. *Soil Biol. Biochem*, 1983, 15(1): 93 ~ 99.
- 17 Harrison A F. *Soil Organic Phosphorus*. CAB international, Wallingford, Oxon AX 108DE, United Kingdom, 1990. 93 ~ 99.
- 18 Dixon M, Webb E C. *Enzymes*. London: Longman, 1966.
- 19 Kramer M. Phosphatase activity as an indicator of biologically useful phosphorus in soil. *Natur Wissenchaften*, 1957, 44: 13.

Soil Phosphatase Activity, P Fractions and Their Relationships in the Rhizosphere of Chinese Fir Juvenile Plantation

Chen Hongjun Li Chuanhan

Abstract Acid and neutral phosphatase activity (APA and NPA), 8 P fractions and their relationships in the rhizosphere of Chinese fir were studied. APA was higher than NPA in soils of the plantations. APA and NPA in the rhizosphere were increased by 1.44, 0.66 phenol mg/g (37 °C, 12 h) compared with those in the bulk. Their R/S values were 1.91 and 2.01, respectively. The contents of total P, DA-P, Al-P, Fe-P and H_2SO_4 -P were significantly higher in the rhizosphere than in the bulk. Their $X_R - X_S$ values were 203.45, 2.21, 3.05, 10.93 and 10.33 mg/kg, and their R/S values were 1.61, 4.68, 3.61, 1.97 and 2.48, respectively. Ca-P was markedly lower in the rhizosphere than in the bulk. Its $X_R - X_S$ value was -2.34 and its R/S value was 0.72. There were no significant difference in I-P and O-P between rhizosphere and bulk soils. In the rhizosphere, APA was related to DA-P and H_2SO_4 -P ($r = 0.584$ and 0.579 , respectively), and NPA was positively related to total P, I-P and O-P ($r = 0.594$, 0.773 and 0.686 , respectively).

Key words *Cunninghamia lanceolata* rhizosphere phosphatase activity P-fractions

Chen Hongjun, Assistant Professor (The Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091); Li Chuanhan (Department of Soil Science, Central China Agricultural University).