

杉木人工林土壤磷素形态及其有效性研究*

陈 竣 李贻铨 陈道东 张 瑛 巫流民 纪建书

摘要 对几种主要杉木人工林土壤 P 素形态及其有效性进行研究,结果表明:(1)无机 P 是赤红壤、红壤、黄红壤 P 素的主要形态,其中 O-P 含量最高,Ca-P 和 Fe-P 次之,Al-P 含量最低。Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 在赤红壤中分别占无机 P 的 2.74%、4.70%、84.74% 和 7.81%;在红壤中分别占 2.46%、11.90%、77.24% 和 7.80%;在黄红壤中分别占 2.74%、10.63%、78.04% 和 8.59%。山地黄壤 P 素以有机 P 为主,无机 P 占全 P 的 30.56%,Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 分别占无机 P 的 1.54%、15.67%、78.85% 和 3.94%。(2)在供试土壤区内 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 表现出明显的地带性规律。但在红壤区内,Fe-P、O-P 和 Ca-P 呈现出一定微域内 P 素形态的复杂性和不均一性的变化,Al-P 表现出明显的过渡带土壤特征。(3)在不同 P 素形态中,Fe-P 是杉木人工林土壤有效 P 的一个重要来源。

关键词 杉木、土壤 P 素形态、P 素生物有效性

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 是我国南方最主要的用材树种之一,其林地土壤一般呈酸性或强酸性反应,有机质含量不高,土壤 P 素含量很低,全 P 一般在 0.16 ~ 0.44 g/kg 之间,有效 P 水平极低,大多在 3 mg/kg 以下,甚至难以检测,导致土壤供 P 不足。刘方等^[1]表明在皖南千枚岩发育的准黄壤杉木立地上,Al-P 与杉木生长显著相关,是杉木生长的限制因子。有人认为它是浙江临安杉木土壤的一个重要的 P 源^[2]。对福建南平花岗岩发育的暗红壤研究表明,杉木连栽产量下降与土壤表层 Al-P 和 Ca-P 含量有密切关系^[3,4]。由于土壤 P 素形态在不同地区差异很大,在不同研究条件下的研究结果的可比性差,各种分散的研究材料难以从整体上反应我国杉木人工林土壤 P 素形态、含量、比重及其分布的规律性。在营造杉、松针叶林时,施用 P 肥已经成为培育速生丰产林的一种基本技术措施^[5]。李贻铨等^[6]研究表明,在含 P 量低的黄红壤上施用 P 肥能显著提高杉木的生长量。但对 P 肥在林地土壤转化和作用机理尚不清楚,因此盲目施肥导致 P 肥利用效率降低和在生产上造成经济损失的事例已屡见不鲜。本文主要从土壤 P 素形态的角度,初步说明几种主要立地条件下杉木人工林土壤 P 素状况及其有效性,以期对 P 肥的合理施用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地自然概况

试验地设置在广东、福建、江西、湖南、湖北、安徽、四川等省主要杉木人工林立地上,供试

1995-09-01 收稿。

陈 竣助理研究员,李贻铨、陈道东、张瑛(中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091);巫流民、纪建书(中国林业科学研究院亚热带林业实验中心)。

* 本文为世行贷款国家造林项目“主要树种丰产林施肥技术推广”、‘八五’国家攻关专题“主要工业用材林施肥技术与维护地力措施研究”和中国林业科学研究院院基金项目“杉木幼林土壤磷素形态与磷肥效应”的一部分内容。叶淡元、胡曰利、谢福光、何应同、吴惠仙、蒋建屏、赵本虎等同志提供了部分土壤样品及其土壤基本性质资料,特此致谢。

土壤 pH 值 4.21 ~ 5.50, 除四川叙永山地黄壤外, 有机质含量均在 26.40 ~ 46.53 g/kg 范围内, 供 N、K 水平中等, 全 P 为 0.168 ~ 0.433 g/kg, 速效 P 为 0.66 ~ 3.30 mg/kg, 供 P 水平极低, 其基本概况见表 1。

表 1 供试杉木人工林试验地自然概况

样号	采样地点	(°)E	(°)N	地貌	海拔	年降水量	年均温度	相对湿度
					(m)	(mm)	()	(%)
1	广东阳春	111 56	22 26	丘陵	200	-	-	-
2	广东始兴	114 09	24 28	低山	320 ~ 490	1 495	19.6	80
3	广东仁化	114 40	25 07	低山	180 ~ 200	1 665	19.6	79
4	福建泰宁	117 20	27 09	丘陵	390	1 395	17.3	85
5	福建顺昌	117 56	26 56	丘陵	330 ~ 360	1 395	18.9	85
6	湖北咸宁	114 40	29 15	丘陵	70	1 600	17.0	79
7	湖南桃源	118 19	28 37	丘陵	300 ~ 500	1 247	16.8	79
8	安徽东至	117 01	29 45	丘陵	120 ~ 180	1 531	16.1	80
9	江西分宜	114 35	27 30	丘陵	225 ~ 250	1 434	17.4	80
10	江西分宜	114 35	27 30	丘陵	225 ~ 250	1 434	17.4	80
11	四川叙永	105 27	28 02	低中山	950 ~ 970	1 490	13.3	-

1.2 供试土壤

在以上主要立地类型杉木人工林样地中, 随机确定 10 个样点, 采集 0 ~ 20 cm 土层的土壤混合样品, 作为土壤 P 素形态分析之用。供试土壤基本性质列于表 2。

表 2 供试杉木人工林地土壤基本性质

样号	母岩	土壤	pH		有机质	全 N	全 P	全 K	速效 N	速效 P	速效 K
			(H ₂ O)	(KCl)							
1	千枚岩	赤红壤	4.94	3.68	31.10	1.27	0.227	7.38	88.00	0.66	50.30
2	粉质砂板岩	红壤	4.88	3.86	32.93	1.32	0.190	11.08	112.56	2.69	76.13
3	粉砂质板岩	红壤	4.52	3.68	37.30	1.48	0.168	13.13	137.97	2.81	56.50
4	花岗岩	红壤	5.55	4.28	26.50	1.13	0.232	5.88	125.55	3.30	101.60
5	花岗岩	红壤	4.82	3.83	31.51	1.28	0.321	11.77	168.09	2.98	52.00
6	Q2	红壤	4.73	3.91	26.40	0.94	0.279	12.45	97.70	1.00	45.0
7	板页岩	红壤	5.20	-	40.80	2.10	0.306	14.36	-	-	-
8	千枚岩	红壤	4.50	4.01	34.80	1.27	0.310	12.29	81.40	2.10	152.00
9	花岗岩	黄红壤	4.45	3.95	46.53	1.74	0.433	13.53	222.50	2.25	64.37
10	板页岩	黄红壤	4.63	3.70	30.43	1.28	0.213	8.48	160.36	1.37	46.10
11	紫红色泥砂岩	山地黄壤	4.21	3.61	120.1	4.45	0.585	6.56	35.10	1.96	211.40

注: 全 P 分析结果可能因高温处理损失而偏低。

1.3 土壤分析

土壤基本分析采用常规分析方法^[7]。pH 值用酸度计法, 有机质用油浴加热——重铬酸钾容量法, 全 N 用混合盐消化——扩散法, 全 P 用 NaOH 熔融——钼锑抗比色法, 全 K 用 NaOH 熔融——火焰光度计法, 速效 N 用碱解扩散法, 速效 P 用双酸法, 速效 K 用 1 mol/L NH₄OAc 浸提——火焰光度计法。土壤无机 P 形态分级采用 Chang 和 Jackson 改进法^[8,9], 首先用 0.05 mol/L NH₄F 浸提, 测定 Al-P (磷酸铝盐); 之后用 0.1 mol/L NaOH 溶液浸提, 测定 Fe-P (磷酸铁盐); 此后用 0.3 mol/L 柠檬酸钠和连二亚硫酸钠溶液浸提 O-P (闭蓄态磷); 最后再用 1.0 mol/L H₂SO₄ 溶液, 测定 Ca-P (磷酸钙盐)。

2 结果与分析

2.1 杉木人工林土壤 P 素形态、含量及其比重

由表3可以看出, 赤红壤、红壤和黄红壤无机 P 含量都很高, 分别为164.46 mg/kg、176.3 mg/kg 和200.07 mg/kg, 三种土壤的四种无机 P 素形态以 O-P 为最高(分别为139.37 mg/kg, 143.29 mg/kg 和157.13 mg/kg), 其次为 Ca-P(分别为12.85 mg/kg、16.41 mg/kg 和16.18 mg/kg) 和 Fe-P(7.73 mg/kg, 22.61 mg/kg 和20.83 mg/kg), Al-P 最低(分别是4.51 mg/kg、4.68 mg/kg 和5.95 mg/kg)。山地黄壤无机 P 为180.82 mg/kg, 但同有机 P 的404.18 mg/kg 相比还是较低, 其四种无机 P 素形态以 O-P 为最高, 为142.58 mg/kg, 其次为 Fe-P 和 Ca-P, 分别为28.33 mg/kg 和7.13 mg/kg, Al-P 最低, 为2.78 mg/kg。

从表3可以看出, 千枚岩母岩发育的赤红壤 P 素主要以无机 P 的比重为最大, 占全 P 的72.45%, O-P 是无机 P 的主要组成部分, 占无机 P 的84.74%, 其次为 Ca-P 和 Fe-P, 分别占7.81%和4.71%, Al-P 比重最低, 占无机 P 的2.74%。

表3 杉木人工林土壤 P 素形态及其含量

样号	母岩	土壤	全 P (g/kg)	无机 P (mg/kg)				占无机 P 的百分数(%)				
				无机 P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P
1	千枚岩	赤红壤	0.227	164.46	4.51	7.73	139.37	12.85	2.74	4.70	84.74	7.81
2	粉质砂板岩	红壤	0.190	160.01	4.24	14.64	127.10	14.03	2.65	9.15	79.43	8.77
3	粉砂质板岩	红壤	0.168	150.83	3.21	19.20	116.04	12.38	2.13	12.73	76.93	8.21
4	花岗岩	红壤	0.232	141.29	1.56	9.42	123.06	7.25	1.10	6.67	87.10	5.13
5	花岗岩	红壤	0.321	189.32	5.81	28.63	140.28	14.59	3.07	15.12	74.10	7.71
6	Q2	红壤	0.279	208.33	1.44	20.63	145.12	13.70	0.69	9.90	69.66	6.58
7	板页岩	红壤	0.306	207.01	4.45	33.60	138.66	30.30	2.15	16.23	66.98	14.64
8	千枚岩	红壤	0.310	179.59	12.03	32.15	112.76	22.65	6.70	17.90	62.79	12.61
9	花岗岩	黄红壤	0.433	236.62	9.45	22.25	191.14	13.78	3.99	9.40	80.78	5.82
10	板页岩	黄红壤	0.213	163.52	2.44	19.40	123.12	18.57	1.49	11.86	75.29	11.36
11	紫红色泥砂岩	山地黄壤	0.585	180.82	2.78	28.33	142.58	7.13	1.54	15.67	78.85	3.94

在五种不同母岩的红壤中, 土壤 P 素主要以无机 P 含量为最高, 平均占全 P 的73.20%。O-P 是无机 P 的主要组分, 占无机 P 77.24%, 其次为 Fe-P 和 Ca-P, 分别占11.90%和7.80%, Al-P 比重最低, 仅占2.46%。广东始兴和仁化粉质砂板岩红壤 O-P 和 Ca-P 比重与分布大致相同, 分别占无机 P 的百分数为: 始兴红壤为79.43%和8.77%; 仁化红壤76.93%和8.21%, Al-P 比重则稍有差异。福建泰宁和顺昌花岗岩红壤无机 P 占全 P 的百分数相差不多, 分别为60.90%和58.98%, 但 Al-P, Fe-P, O-P 和 Ca-P 的分布有些差异, 分别占无机 P 的百分数: 前者为1.10%, 6.67%, 87.10%和5.13%; 后者为3.07%, 15.12%, 74.10%和7.71%。第四纪红色粘土发育的红壤无机 P 组分主要为 O-P, 占无机 P 的69.66%, 其次为 Fe-P 和 Ca-P 分别为9.90%和6.58%, Al-P 比重很低, 为0.69%。板页岩红壤 O-P 是无机 P 的主要组分, 其次为 Fe-P 和 Ca-P, 所占无机 P 比重大致相当, Al-P 比重最低。安徽东至千枚岩红壤地处红壤区北缘, 系红壤向黄壤过渡地带, 无机 P 占全 P 的90.19%, 其中 O-P 比重最大, 为无机 P 的62.79%, 其次为 Fe-P 和 Ca-P, 分别占17.90%和12.61%, Al-P 含量和比重稍低, 为6.70%, 但明显高于其它土壤类型, 表现出 Al-P 最明显的过渡带土壤的特征, 这与李庆逵等^[10]的研究

结果一致。

江西分宜两种不同母岩的黄红壤 P 素形态与分布不尽相同。花岗岩立地土壤无机 P 所占全 P 比重比板页岩立地低 18.26%，前者 Fe-P 和 Ca-P 在无机 P 中所占比重分别比后者低 2.46%、5.54%，而 Al-P 和 O-P 比后者高出 2.50% 和 5.49%。它们的无机 P 组成主要是 O-P，其次为 Fe-P 和 Ca-P，Al-P 最低。

山地黄壤 P 素主要以有机 P 的比重为最大，无机 P 仅占 30.91%。无机 P 主要是 O-P，占无机 P 78.85%，其次为 Fe-P 和 Ca-P，分别占 15.67% 和 3.94%，Al-P 比重最低，占 1.54%。

从土壤类型来看，无机 P 中，各种 P 素所占比重顺序为：对于 O-P，赤红壤(84.74%)，山地黄壤(78.85%)，黄红壤(78.04%)，红壤(77.24%)；对于 Fe-P，是山地黄壤(15.67%)，红壤(11.90%)，黄红壤(10.67%)，赤红壤(4.70%)；对于 Ca-P，是黄红壤(8.59%)，红壤(7.80%) 和赤红壤(7.81%)，山地黄壤(3.94%)；对于 Al-P，则是赤红壤(2.74%) 和黄红壤(2.74%)，红壤(2.46%)，山地黄壤(1.54%)，表现出明显的地带性，蒋柏藩等^[11]的研究也表明了这一点。但在红壤区内 O-P，Fe-P 和 Ca-P 的这种地带性规律并不明显，表现出一定区域内土壤 P 素形态的复杂性和不均一性变化的规律，Al-P 则是地处红壤最北缘的安徽东至千枚岩红壤为最高 12.03 mg/kg，占全 P 的 6.70%，表现出明显的过渡带土壤的特征。

2.2 不同土壤 P 素形态之间的相互关系

相关分析(表4)表明，土壤全 P 与无机 P 的相关系数 $r = 0.4688^*$ ，可见，对于以上几种土壤来说，它的多寡影响着全 P 量，是土壤全 P 的主要来源之一。土壤无机 P 与 O-P、Ca-P 的相关系数 r 为 0.8398^{***} 、 0.5606^{**} ，可以看出 O-P 和 Ca-P 是无机 P 的主要贡献者。O-P 与 Al-P、Ca-P 达到极显著相关水平，表明它们是 O-P 的主要来源。

表4 杉木人工林土壤几种主要 P 素形态间的相关系数

项 目	全 P	无机 P	速效 P	Al-P	Fe-P	O-P
无机 P	0.4688*					
速效 P	-0.0255	0.0331				
Al-P	0.2442	0.2845	0.0804			
Fe-P	0.3678	0.3017	0.3197	0.3968		
O-P	0.4191	0.8398***	-0.1093	0.5841***	0.2423	
Ca-P	-0.0387	0.5606**	0.2987	0.3131	0.4924*	0.5029**

注：*，**，*** 分别表示在 0.1，0.05，0.01 水平上显著。

由上表可以看出，土壤全 P、无机 P、Al-P、Fe-P、O-P 与速效 P 的相关系数都未达到显著水平，无疑，它们对速效 P 是有贡献的。为此采用多元线性回归方法分析它们之间的关系。方程如下： $Y = 2.0670 + 0.5633X_1 + 0.0132X_2 + 0.1425X_3 + 0.0121X_4 - 0.0294X_5$ 。

复相关系数 $R = 0.5168$ 。(Y, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 分别表示有效 P, 全 P, 无机 P, Al-P, Fe-P 和 O-P)。但从多元逐步回归分析的结果： $Y = 1.4251 + 0.0454X_4$ 来看，只有 Fe-P 才是有效 P 的重要来源，这与 S J Zhang 等^[12]的研究结论一致。

3 结论与讨论

(1) 几种主要杉木人工林地土壤，供试土壤除山地黄壤外，无机 P 为全 P 的主要组分，O-P 在无机 P 中所占比重最高，其次是 Fe-P 和 Ca-P，Al-P 比重最低；山地黄壤全 P 以有机 P 为

主,无机 P 只占全 P 的30.91%, O-P 是无机 P 最主要的组分,其次为 Fe-P 和 Ca-P, Al-P 的贡献最小。

(2) 从土壤类型来看,无机 P 中,各种 P 素所占比重顺序为:对于 O-P,赤红壤(84.74%),山地黄壤(78.85%),黄红壤(78.04%),红壤(77.24%);对于 Fe-P,是山地黄壤(15.67%),红壤(11.90%),黄红壤(10.67%),赤红壤(4.70%);对于 Ca-P,是黄红壤(8.59%),红壤(7.80%)和赤红壤(7.81%),山地黄壤(3.94%);对于 Al-P,则是赤红壤(2.74%)和黄红壤(2.74%),红壤(2.46%),山地黄壤(1.54%),表现出明显的地带性,蒋柏藩等^[11]的研究也表明了这一点。但在红壤区内 O-P, Fe-P 和 Ca-P 的这种地带性规律并不明显,表现出一定区域内土壤 P 素形态的复杂性和不均一性变化的规律; Al-P 则是地处红壤最北缘的安徽东至千枚岩红壤为最高12.03 mg/kg,占全 P 的6.70%,表现出明显的过渡带土壤的特征。

(3) 在不同 P 素形态中, Fe-P 可能是杉木人工林土壤有效 P 的一个重要来源。土壤 P 素生物有效性的研究一直是土壤学家十分关注的热点^[13]。特别是对于热带森林土壤,因温度高,森林土壤中丰富的有机 P 的矿化速度也快,因此有机 P 是该地区的一种不可忽略的 P 资源^[4]。

参 考 文 献

- 1 刘方,罗汝英,蒋建屏,等. 杉林土壤中各类磷化合物的数量和效应. 南京林业大学学报, 1991, 15(4): 7~12.
- 2 姜培坤,徐秋芳,钱新标,等. 杉木樟树根际土壤磷素研究. 浙江林学院学报, 1995, 12(3): 242~246.
- 3 周学金,罗汝英,叶镜中. 杉林连栽对土壤养分的影响及其反馈. 南京林业大学学报, 1991, 15(3): 44~49.
- 4 Ding Y X, Chen J L. Effect of continuous plantation of Chinese fir on soil fertility. *Pedosphere*, 1995, 5(1): 57~66.
- 5 李贻铨. 林木施肥是短轮伐期工业用材林的基础技术措施. 林业科学研究, 1992, 5(2): 214~218.
- 6 杉木施肥试验课题协作组. 杉木幼林施肥效应研究. 见: 盛炜彤主编. 人工林地力衰退研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 198~211.
- 7 李西开. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. 1~243.
- 8 Zhang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 1957, 84: 133~144.
- 9 Peterson G W, Gorey R B. A modified Chang and Jackson procedure for routine fraction of inorganic soil phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1960, 30(5): 563~565.
- 10 李庆远. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1985. 145~158.
- 11 蒋柏藩,鲁如坤,李庆远. 中国土壤磷素养分潜力概图及其说明. 土壤学报, 1979, 16(1): 17~21.
- 12 Zhang S J, Jackson M L. Soil phosphorus of some representative soils. *J. Soil Sci.*, 1958, 9: 109~119.
- 13 Harrison A F. *Soil organic phosphorus*. CAB international, Wallingford, 1990.
- 14 周鸣铮. 土壤肥力测定与配方施肥. 北京: 北京农业出版社, 1988. 194~195.

P Fractions in Soils and Their Availability in Chinese Fir Plantations in South China

Chen Hongjun Li Yiquan Chen Daodong
Zhang Ying Wu Liuming Ji Jianshu

Abstract P fractions and their availability in soils of Chinese fir plantations in South China were studied. I-P (inorganic P) was a major component of total P and it accounted for 72.48% in lateritic soil, 73.20% in red soil, and 63.77% in yellow red soil. Al-P, Fe-P, O-P, and Ca-P accounted for 2.74%, 4.70%, 84.74% and 7.81% in lateritic soil, 2.46%, 11.90%, 77.24%, and 7.81% of inorganic P in red soil, 2.74%, 10.63%, 78.04% and 8.59% in yellow red soil, respectively. Organic P in mountain yellow soil was a major composition of P, and I-P only accounted for 30.56% of total P. Al-P, Fe-P, O-P, and Ca-P in inorganic P accounted for 1.54%, 15.67%, 78.85% and 3.94%, respectively. The distributions of Al-P, O-P, Fe-P and Ca-P in the four kinds of soils mentioned above had an obvious zonality and Al-P appeared the characteristic of transitional soil, while those of O-P, Fe-P and Ca-P in the red soil region showed the complicated characteristic and no homogeneity of P fractions. The regression analysis indicated that there was a significant relationship between Fe-P and available P.

Key words *Cunninghamia lanceolata*, soil P fractions, P availability

Chen Hongjun, Assistant Professor, Li Yiquan, Chen Daodong, Zhang Ying (The Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091); Wu Liuming, Ji Jianshu (The Experimental Center of Subtropical Forestry, CAF).