DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.05.020

郑威, 李晨曦, 谭玲, 等. 南亚热带桉树人工林与典型乡土树种人工林土壤磷组分及磷吸附特性比较. 土壤, 2020, 52(5): 1017–1024.

南亚热带桉树人工林与典型乡土树种人工林土壤磷组分及磷吸附特性比较①

郑 威[1], 李晨曦[1], 谭 玲[1], 明安刚[2], 何友均[3], 覃 林[4*]

(1 广西大学林学院, 南宁 530004; 2 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600; 3 中国林业科学研究院林业科技信息研究所, 北京 100091; 4 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004)

摘 要: 土壤磷是制约南亚热带人工林生产力的关键因子, 但至今对该地区不同树种人工林土壤磷组分及吸附特征知之甚少。本文研究了位于广西凭祥市的中国林业科学研究院热带林业实验中心的外来速生桉树人工林和典型乡土树种(马尾松、红椎)人工林不同土壤层次中(0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm)磷组分含量及吸附性能。结果表明, 3 种林分土壤有机磷是全磷的主要形态, 其含量(91.51 ~ 257.45 mg/kg)占全磷的 46.25% ~ 71.58%。桉树林土壤全磷、有机磷和无机磷含量明显低于马尾松林和红椎林。同时, 桉树人工林土壤活性有机磷含量显著高于 2 种乡土树种人工林, 而其土壤磷酸铝盐、磷酸铁盐、闭蓄态磷和磷酸钙盐含量均低于 2 种乡土树种人工林。另外, 桉树林土壤潜在最大磷吸附量低于 2 种乡土树种人工林, 而土壤磷吸附饱和度却高于 2 种乡土树种人工林。因此, 就土壤磷素供应水平和吸附性能而言, 马尾松和红椎比桉树更适于作为当地的造林树种。

关键词: 土壤磷组分; 磷吸附特征; 桉树人工林; 乡土树种人工林; 南亚热带

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Comparison of *Eucalyptus* Plantation and Typical Native Species Plantations in Soil Phosphorus Fractions and Sorption Characteristics in South Subtropical China

ZHENG Wei[1], LI Chenxi[1], TAN Ling[1], MING Angang[2], HE Youjun[3], QIN Lin[4*]

(1 *College of Forestry*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*; 2 *Experimental Centre of Tropical Forestry*, *Chinese Academy of Forestry*, *Pingxiang*, *Guangxi* 532600, *China*; 3 *Research Institute of Forestry Policy and Information*, *Chinese Academy of Forestry*, *Beijing* 100091, *China*; 4 *Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation*, *College of Forestry*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*)

Abstract: Soil phosphorus is considered the key factor for restricting the productivity of plantations in south subtropical China. However, little information is available about the change in soil phosphorus fractions and sorption characteristics of different species plantations in this area. The content of phosphorus fractions and phosphate adsorption properties in different soil layers (0–20, 20–40 and 40–60 cm) were analyzed under exotic fast-growing *eucalyptus* plantation and typical native species (*Pinus massoniana*, *Castanopsis hystrix*) plantations in the Experimental Center of Tropical Forestry of Chinese Academy of Forestry located in Pingxiang City, Guangxi. The results revealed that organic phosphorus (Po) which accounted for 46.25%–71.58% (91.51–257.45 mg/kg) of total phosphorus (TP), was the main form of TP in the three plantation soils. The contents of soil TP, Po and inorganic phosphorus (Pi) in *eucalyptus* plantation were obviously lower than those in *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* plantations. Meanwhile, the content of soil labile organic phosphorus (LO-P) was significantly higher in *eucalyptus* plantation than in the two native species plantations, while the contents of soil Al-P, Fe-P, O-P and Ca-P were lower than in the two native species plantations. In addition, the potential maximum phosphorus adsorption capacity (Q_m) in *eucalyptus* plantation was lower than that in the two native species plantations, while the degree of phosphate saturation (DPS) was higher than in the two native species plantations. Therefore, in terms of soil phosphorus supply and adsorption property, *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* could be superior to *eucalyptus* as the afforestation tree species in this region.

①基金项目: 广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380228)资助。

* 通讯作者(nilniq@gxu.edu.cn)

作者简介: 郑威(1991—), 男, 湖北英山人, 硕士, 主要从事森林土壤生态研究。E-mail: 664558611@qq.com

Key words: Soil phosphorus fraction; Phosphorus sorption characteristics; *Eucalyptus* plantation; Native species plantation; South subtropics

磷是参与植物体的遗传、代谢、调节过程和结构性物质构建的必需大量元素，而土壤磷既是植物生长发育必需磷的主要来源又是影响其生长发育的主要限制因子[1-3]。由于直接测定土壤中不同化学形态的磷较为困难，研究者采用化学分组法将土壤中化学组成相近或分解矿化能力较为接近的一类无机或有机磷化合物划归为相同的组分(称为土壤磷的分级)，并提出了不同磷分级的化学浸提方法[4-5]，以期研究磷在土壤中的转化过程及其与植物有效性的关系[6]。同时，土壤对磷有很强的吸附能力[7-8]，而测定土壤磷吸附等温线是研究土壤磷吸附性能的重要方法[9]，土壤磷吸附特征是控制磷从土壤向水体释放的重要因素[10]。

近年来关于人工林土壤磷组分的研究愈发受到关注，比如曹娟等[11-12]对湖南会同不同年龄杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林土壤全磷、有效磷、无机磷组分和有机磷组分进行了研究，刘旭军等[13]探讨了连作对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林表层土壤磷组分的影响。我国南亚热带地区土壤高度风化且具有强酸性，富含铁、铝氧化物且普遍缺磷[14]，导致土壤磷成为该区域森林生产力的主要限制因素[15]；但该区域因水热资源相对丰富而成为外来速生桉树(*Eucalyptus*)的主要种植区。长期以来，众多学者对桉树人工林林地养分循环[16-17]、水分利用与平衡[18]和生物多样性[19-20]以及桉树林对区域水质影响[21-23]等问题进行了研究，而对桉树人工林土壤磷组分状况及吸附特征的研究缺乏关注。

本研究以位于广西凭祥市的中国林业科学研究院热带林业实验中心的桉树、马尾松(*Pinus massoniana*)和红椎(*Castanopsis hystrix*)人工林为对象。其中，马尾松和红椎分别是南亚热带地区的主要乡土针叶造林树种[24]和珍优乡土阔叶造林树种[25]。通过对桉树人工林与 2 种典型乡土树种人工林土壤剖面中磷组分含量及吸附特性的比较分析，探讨不同树种人工林土壤磷组分差异的影响因素，为该地区人工林营建的树种选择及人工林可持续经营管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与林分土壤样品采集

研究区位于广西崇左凭祥市的中国林科院热带林业实验中心伏波试验场(106°51'～106°53'E，22°02'～22°04'N)，属于南亚热带季风型半湿润-湿润气候类型。该地区年均气温为 20.5～21.7 ℃，最冷月(1 月)均温 13.5 ℃，最热月(7 月)均温 27.6 ℃；年均降雨量为 1 200～1 500 mm，干湿季节明显(4—9 月为湿季，10 月至次年 3 月为干季)；地带性土壤为花岗岩发育的山地红壤，土层厚度>80 cm[26]。

2017 年 8 月，在伏波实验场典型选取立地条件相似(海拔：450～550 m，坡度：15°～30°，坡向：南或西南，土壤类型：山地红壤)的桉树人工林和 2 种乡土树种(马尾松和红椎)人工林。其中，桉树人工林(面积约 7 hm^2)为巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)二代萌芽林，2008 年 3 月于杉木人工林皆伐迹地上种植(初植密度 2 500 株/hm^2)，2014 年 11 月皆伐留桩形成萌芽林，现林分平均胸径 5.8 cm，平均树高 7.5 m。马尾松人工林(面积约 1 hm^2)和红椎人工林(面积约 3 hm^2)于 1983 年 2 月在杉木人工林皆伐迹地上种植(初植密度 2 500 株/hm^2)，分别于 1993 年、2003 年和 2008 年进行了 3 次间伐(强度约 30%)；现马尾松林平均胸径和树高分别为 27.5 cm 和 19.7 m；而红椎林形成了复层林，其主林层的平均胸径和树高分别为 24.7 cm 和 18.8 m，次林层的平均胸径和树高分别为 10.2 cm 和 8.5 m。在每种林分的上、中、下坡各设 1 块 20 m × 20 m 样地，并在每块样地内的对角线上随机选取 3 个点，按 0～20、20～40 和 40～60 cm 用土钻(内径 5.0 cm)取土壤，然后将同层土壤混合后用铝盒取样用于测定土壤含水量，剩余混合土壤装入聚乙烯保鲜袋带回实验室。在实验室对混合土壤样品充分混合后按四分法取样，一部分于 4 ℃ 低温保存，用来测定土壤酸性磷酸酶活性；另一部分经自然风干后过 0.25 mm 筛保存，用来测定土壤化学性质和磷组分。

1.2 土壤性质测定

土壤含水量(SM)用烘干法测定。土壤 pH 采用水浸提(水土比为 2.5∶1)，pH 计(Prtavo 907 MULTI pH，德国)测定。土壤有机碳(SOC)含量采用高温催化燃烧法(Multi N/C 3100 TOC/TN，德国)测定；总氮(TN)含量采用 H_2SO_4-$HClO_4$ 消解，然后用 SmartChem200 全自动化学元素分析仪(Alliance，法国)测定；有效磷(Olsen-P)含量采用 $NaHCO_3$-钼锑抗比色法测定[27]。土壤酸性磷酸酶(ACP)活性采用对硝基酚磷酸钠法测定[28]。

1.3　土壤磷组分测定

土壤中磷素的形态分为有机磷(Po)和无机磷(Pi)。土壤 Po 采用 Bowman-Cole 分级测定法[29]可得到活性有机磷(LO-P)、中等活性有机磷(MLO-P)、中稳性有机磷(MSO-P)和高稳性有机磷(HSO-P)等 4 个组分。土壤 Pi 依据 Zhang-Jackson 分级测定方法[30]可分别得到磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)和磷酸钙盐(Ca-P)等 4 个组分。

1.4　土壤磷吸附性能的测定

参照 Moughli 等[31]方法进行土壤磷的等温吸附试验，采用 Langmuir 方程对磷等温吸附试验结果进行拟合。磷等温吸附 Langmuir 方程为：

$$\frac{C}{Q}=\frac{C}{Q_m}+\frac{1}{kQ_m} \tag{1}$$

式中：Q 表示土壤中磷的吸附量(mg/kg)；C 表示平衡溶液中磷的浓度(mg/L)；Q_m 表示土壤中磷的潜在最大吸附容量(mg/kg)；k 表示土壤与磷的结合能有关的常数(L/mg)。

土壤磷吸附饱和度(DPS)表征土壤胶体上已吸附磷的数量占土壤磷总吸附容量的百分数，计算公式为[32]：

$$\mathrm{DPS}=\frac{P_e}{Q_m+P_e} \tag{2}$$

式中：P_e 为吸附态磷(mg/kg)，可用 Olsen-P 表示。

1.5　数据统计分析

采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验林分类型与土层对土壤基本性质、全磷(TP)、Pi、Po 和各磷组分含量的差异显著性；用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同林分类型和不同土层的土壤基本性质、TP、Pi、Po 和各磷组分含量的差异显著性，若差异显著则用 Duncan 法进行多重比较；运用 Pearson 相关分析探究土壤基本性质与土壤 TP、Pi、Po 和各磷组分含量的关系。上述计算由 IBM SPSS Statistics 24.0 软件完成，绘图由 Origin 9.0 软件完成。

2　结果与分析

2.1　土壤基本性质

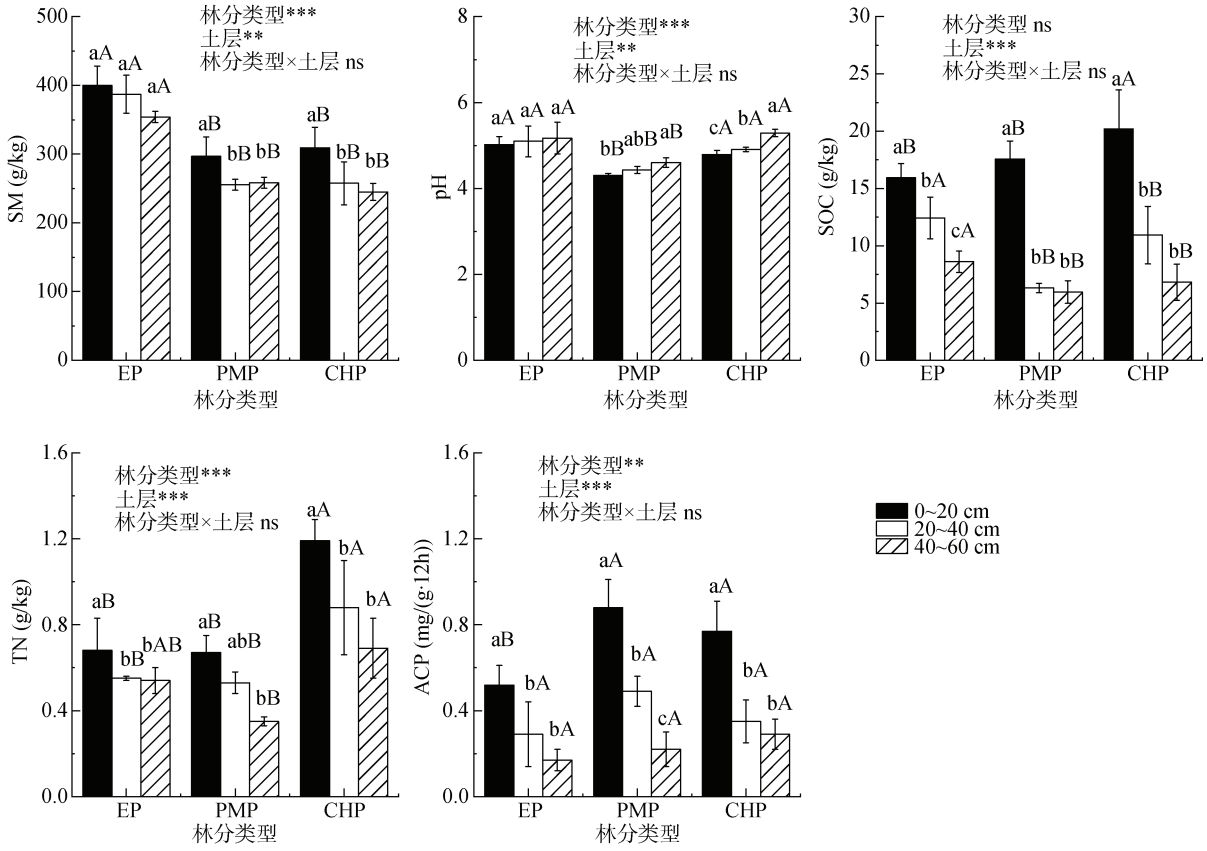
方差分析表明林分类型对土壤含水量(SM)、pH、总氮(TN)含量和酸性磷酸酶(ACP)活性具有极显著影响(P<0.01)，土层对 5 个土壤性质均具有极显著影响，而林分类型×土层对 5 个土壤性质的交互作用均不显著(图 1)。在各土层中，桉树林的 SM 显著高于马尾松林和红椎林(P<0.05)，而 2 种乡土树种林分间差异不显著；桉树林和红椎林的 pH 差异不显著，但均显著高于马尾松林。

3 种林分间土壤有机碳(SOC)含量、TN 含量和 ACP 活性的差异依土层不同而异。在 0 ~ 20 cm 土层中，红椎林的 SOC 和 TN 含量均显著高于桉树林和马尾松林，桉树林的 ACP 活性显著低于马尾松林和红椎林；20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层中，3 种林分间的 ACP 活性无显著差异，桉树林的 SOC 含量显著高于马尾松林和红椎林，但红椎林的 TN 含量最高，而马尾松林的 TN 含量最低。另外，3 种林分的土壤 SM、SOC 含量、TN 含量和 ACP 活性均呈现随土壤深度增加而逐渐减少，而土壤 pH 随土壤深度增加而递增。

2.2　土壤磷组分

3 种人工林土壤 Po 含量(91.51 ~ 257.45 mg/kg)和 Pi 含量(42.64 ~ 220.16 mg/kg)分别占 TP 的 46.25% ~ 71.58%。方差分析可知(表 1)，林分类型和土层均对 Pi、Po 和 TP 含量具有极显著影响；林分类型×土层对土壤 Pi 和 TP 含量的交互作用均达极显著水平(P<0.01)，而对土壤 Po 含量的交互作用仅达显著水平(P<0.05)。在不同土层中，桉树林土壤 TP、Pi 和 Po 含量明显低于马尾松林和红椎林。红椎林土壤 TP、 Pi 和 Po 含量在 0 ~ 20 cm 土层中显著高于马尾松林，而在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层则与马尾松林之间差异不显著。另外，3 种林分土壤 TP、Pi 和 Po 含量均随土壤深度增加而逐渐减少。

3 种林分土壤中，活性有机磷(LO-P)、中等活性有机磷(MLO-P)、中稳性有机磷(MSO-P)和高稳性有机磷(HSO-P)含量分别占 Po 的 1.74% ~ 7.16%、31.86% ~ 69.25%、21.52% ~ 55.43% 和 7.29% ~ 17.42%，说明 MLO-P 和 MSO-P 是土壤 Po 的优势组分。方差分析显示(表 1)，林分类型、土层分别对 4 个有机磷组分含量有显著或极显著影响，而林分类型×土层仅对土壤 MSO-P 含量具有极显著交互作用。桉树林土壤 LO-P 含量显著高于马尾松林和红椎林，而 2 种乡土树种人工间土壤 LO-P 含量差异不显著。红椎林土壤 MSO-P 含量显著高于桉树林和马尾松林，而马尾松林土壤 MLO-P 含量显著高于桉树林和红椎林。在 0 ~ 20 cm 和 40 ~ 60 cm 土层中，3 种林分间土壤 HSO-P 含量差异不显著，而在 20 ~ 40 cm 土层中桉树林土壤 HSO-P 含量显著高于马尾松林和红椎林。另外，3 种人工林土壤各有机磷组分含量均表现随土壤深度增加而递减趋势。



(EP：桉树人工林，PMP：马尾松人工林，CHP：红椎人工林；不同大写字母表示同一土层不同林分类型间差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示同一林分不同土层间差异显著(P<0.05)；**，***分别表示达 P<0.01、P<0.001 显著水平，ns 表示影响不显著(P>0.05)，下同)

图 1 3 种人工林土壤基本性质(n = 3)

Fig.1 Soil basic properties under three plantations

表 1 3 种人工林土壤磷组分(n=3)

Table 1 Soil phosphorus fractions among three plantations

土层 (cm)	林分类型	LO-P (mg/kg)	MLO-P (mg/kg)	MSO-P (mg/kg)	HSO-P (mg/kg)	Al-P (mg/kg)	Fe-P (mg/kg)	O-P (mg/kg)	Ca-P (mg/kg)	Po (mg/kg)	Pi (mg/kg)	TP (mg/kg)
0 ~ 20	EP	12.32 aA	81.33 aB	52.98 aB	25.43 aA	42.69 aC	13.44 aA	6.20 aB	5.90 aA	172.07 aB	68.22 aC	240.29 aC
	PMP	5.33 aB	128.50 aA	40.95 aB	15.47 aA	83.63 aB	58.01 aB	15.92 aA	7.22 aA	190.25 aB	164.77 aB	355.03 aB
	CHP	6.72 aB	82.01 aB	142.71 aA	26.01 aA	126.99 aA	69.80 aB	15.81 aA	7.57 aA	257.45 aA	220.16 aA	477.61 aA
20 ~ 40	EP	9.08 aA	68.29 abAB	34.88 aB	18.78 bA	39.19 aB	11.42 aA	4.55 aB	3.39 bA	131.03 bA	58.55 abB	189.58 bB
	PMP	4.10 abB	103.42 aA	40.52 aB	12.44 abB	77.87 aA	53.75 aB	12.37 bA	6.61 aB	160.49 abA	150.62 aA	311.10 abA
	CHP	3.79 bB	63.69 aB	80.80 aA	13.30 bB	76.53 bA	63.89 aC	12.69 aA	6.25 aB	161.59 bA	159.36 bA	320.95 bA
40 ~ 60	EP	5.36 bA	44.51bB	25.79 aB	15.94 bA	31.95 aB	5.45 bA	2.28 bB	2.97 bA	91.51 bB	42.64 bB	134.15 cB
	PMP	2.28 bB	90.99 aA	28.54 aB	9.57 bA	65.61 aA	29.45 bB	10.38 bA	4.06 bA	131.39 bA	109.50 bA	240.90 bA
	CHP	1.94 bB	59.58 aB	31.04 bA	11.40 bA	51.23 cA	53.06 aC	10.67 aA	5.85 aB	103.97 cAB	120.81 cA	224.78 cA
双因素方差分析	林分类型	***	***	***	*	***	***	***	***	**	***	***
	土层	***	**	***	**	***	**	***	***	***	***	***
	林分类型×土层	ns	ns	***	ns	***	ns	ns	ns	*	**	**

注：表中 *、**、*** 分别表示达 P<0.05、P<0.01、P<0.001 显著水平，ns：P>0.05。

3 种林分土壤磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)和磷酸钙盐(Ca-P)含量分别占 Pi 的 42.40% ~ 74.93%、12.77% ~ 43.92%、5.34% ~ 9.66% 和 3.44% ~ 8.64%，表明 Al-P 和 Fe-P 是土壤 Pi 的优势组分。方差分析表明(表 1)，林分类型、土层分别对 4 个无机磷组分含量具有极显著影响，而林分类型×土层仅对 Al-P 含量具有极显著的交互作用。桉树林各土层中 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 含量均小于马尾

松林和红椎林。在 0 ~ 20 cm 土层中，红椎林土壤 Al-P 含量显著高于马尾松林，而其土壤 Fe-P、O-P 和 Ca-P 含量均与马尾林无显著差异；20 ~ 40 cm 土层，除了红椎林土壤 Fe-P 含量显著高于马尾松林外，其他无机磷组分含量在 2 种乡土树种人工林分间差异不显著；40 ~ 60 cm 土层，仅有红椎林土壤 Fe-P 和 Ca-P 含量显著高于马尾松林。此外，3 种人工林分土壤各无机磷组分含量均表现随土壤深度增加而逐渐减少规律。

2.3　土壤磷组分与土壤基本性质的相关性

Pearson 相关分析表明(表 2)，3 种林分土壤磷组分与土壤基本性质的相关性因土层而异。在 0 ~ 20 cm 土层中，SM 与 LO-P 含量显著正相关(P<0.05)，而与 Al-P、Fe-P、O-P 和 Pi 含量显著负相关；pH 与 LO-P 含量极显著正相关(P<0.01)，而与 Fe-P 和 O-P 含量显著负相关；TN 含量与 MSO-P、Al-P、Pi、Po 和 TP 含量具有显著的正相关关系；ACP 活性与 LO-P 含量极显著负相关，而与 Fe-P、O-P、Ca-P 和 Pi 含量显著正相关；SOC 含量对土壤各磷组分含量的影响未达显著性。在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层，主要表现为 SM 与土壤 LO-P 含量极显著正相关，而与 4 个无机磷组分、Pi 和 TP 含量显著负相关。此外，在 20 ~ 40 cm 土层，TN 含量与 MSO-P 含量极显著正相关(P<0.01)。

表 2　3 种人工林土壤磷组分与土壤性质的 Pearson 相关系数(n = 9)

Table 2　Pearson correlation coefficients between soil properties and the contents of phosphorus fractions in three plantations (n = 9)

土层(cm)	指标	LO-P	MLO-P	MSO-P	HSO-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Po	Pi	TP
0 ~ 20	SM	0.754*	–0.453	–0.267	0.466	–0.673*	–0.766*	–0.890**	–0.525	–0.445	–0.754*	–0.666
	pH	0.841**	–0.618	0.033	0.468	–0.490	–0.744*	–0.833**	–0.280	–0.263	–0.634	–0.513
	SOC	–0.055	0.044	0.324	–0.179	0.391	0.468	–0.022	–0.035	0.345	0.399	0.399
	TN	–0.184	–0.399	0.944**	0.293	0.864**	0.603	0.423	0.458	0.797*	0.758*	0.820**
	ACP	–0.847**	0.417	0.152	–0.269	0.568	0.725*	0.824**	0.705*	0.323	0.678*	0.567
20 ~ 40	SM	0.889**	–0.246	–0.515	0.917**	–0.918**	–0.926**	–0.810**	–0.907**	–0.501	–0.938**	–0.863**
	pH	0.479	–0.562	0.107	0.485	–0.518	–0.449	–0.428	–0.548	–0.360	–0.492	–0.486
	SOC	0.324	–0.321	0.195	0.580	-0.474	–0.328	–0.114	–0.538	–0.032	–0.386	–0.294
	TN	–0.330	–0.317	0.841**	–0.162	0.270	0.464	0.521	0.183	0.390	0.392	0.424
	ACP	–0.446	0.538	–0.078	–0.429	0.647	0.471	0.584	0.459	0.374	0.568	0.547
40 ~ 60	SM	0.907**	–0.583	–0.402	0.494	–0.718*	–0.795*	–0.950**	–0.751*	–0.541	–0.903**	–0.872**
	pH	0.350	–0.552	0.251	0.495	–0.485	0.132	–0.269	0.199	–0.389	–0.154	–0.267
	SOC	0.685*	–0.301	–0.465	0.610	–0.634	–0.440	–0.788*	–0.363	–0.247	–0.628	–0.555
	TN	–0.141	–0.454	0.003	0.029	–0.392	0.477	–0.056	0.586	0.489	0.125	–0.104
	ACP	–0.371	0.407	0.134	0.074	0.144	0.610	0.094	0.430	0.455	0.442	0.503

注：*，**分别表示相关性达 P<0.05，P<0.01 显著水平。

2.4　土壤对磷的吸附作用

从表 3 可看出，采用 Langmuir 方程拟合不同林分土壤磷吸附等温曲线的决定系数为 0.77 ~ 0.95，表征 Langmuir 方程能很好地拟合不同林分土壤对磷的吸附特征。3 种人工林分土壤潜在最大磷吸附量(Q_m)为 564.97 ~ 1313.48 mg/kg，土壤对磷的吸附结合能(k)为 4.54 ~ 8.63 L/mg，且 Q_m 与 k 值具有一致变化关系。同时，桉树人工林各土层 Q_m 和 k 值均小于马尾松和红椎人工林。

土壤磷饱和度(DPS)表征土壤已吸附磷素的多少，反映了土壤磷素吸持能力。3 种林分土壤 DPS 为 1.08% ~ 2.38%，并表现随土壤深度增加而逐渐下降趋势。桉树人工林土壤 DPS 在各土层均高于马尾松和红椎人工林。

表 3　3 种人工林土壤磷等温吸附 Langmuir 方程和磷饱和度

Table 3　Langmuir equation of soil phosphate isothermal adsorption and DPS values in three plantations

林分类型	土层 (cm)	Langmuir 方程			DPS (%)
		R^2	Q_m(mg/kg)	k(L/mg)	
EP	0 ~ 20	0.95	1030.93	5.89	2.38
	20 ~ 40	0.94	892.86	4.62	2.25
	40 ~ 60	0.78	564.97	4.54	1.50
PMP	0 ~ 20	0.77	1220.26	6.06	2.05
	20 ~ 40	0.88	973.87	4.73	1.68
	40 ~ 60	0.92	995.10	6.75	1.08
CHP	0 ~ 20	0.90	1313.48	8.63	2.13
	20 ~ 40	0.92	978.33	8.17	1.81
	40 ~ 60	0.86	895.54	6.34	1.33

3 讨论

3.1 桉树人工林与 2 种乡土树种人工林土壤磷组分特征及其影响因素

土壤有机磷(Po)大部分以有机物质的形态存在于土壤中，因此有机质含量高的土壤中可以发现 Po 含量也较丰富，而在磷含量较低或者固持严重的土壤中，有机质中的 Po 矿化是土壤有效磷的主要来源[33]。本研究中 3 种人工林土壤 Po 是磷库的主要形态，与曾晓敏等[34]关于我国亚热带地区不同森林植被类型(常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林)土壤磷素研究结果一致，说明土壤 Po 在南亚热带地区人工林土壤磷素供应中具有重要作用。另外，本研究的 3 种人工林土壤 Po 的组分主要是中等活性有机磷(MLO-P)，其次为中稳性有机磷(MSO-P)和高稳性有机磷(HSO-P)，而活性有机磷(LO-P)含量最低(表 1)，这与他人的研究结果略有不同。陈立新[35]发现在落叶松(*Larix gmelinii*)林地土壤 Po 组分中，MSO-P 的相对含量最大，其次为 MLO-P 和 HSO-P，而 LO-P 含量最低；耿玉清等[36]研究表明北京八达岭地区 9 种人工林土壤 Po 组分中，以 MLO-P 为主，其次为 LO-P，而 HSO-P 的比例最低。至于为何不同树种人工林土壤 Po 各组分间比例关系不具一致性还有待深入探究。

土壤酸性磷酸酶(ACP)活性的高低直接影响着土壤有机磷分解转化及其生物有效性[37]。本研究中，桉树人工林各土层中 ACP 活性均低于马尾松人工林和红椎人工林(图 1)，表征桉树人工林土壤中涉及磷循环的生物活动作用强度低于 2 种乡土树种人工林，而谭宏伟等[37]研究也表明南亚热带地区桉树人工林土壤 ACP 活性低于马尾松人工林；同时，尽管桉树林土壤 LO-P 含量高于 2 种乡土树种人工林，但 LO-P 含量占土壤 Po 的比例极小。因此，依据桉树速生特点，在桉树人工林培育过程中相较于 2 种乡土树种人工林而言，可能需要更加多的磷肥施用量，才能有效预防桉树人工林土壤肥力衰退。

土壤无机磷(Pi)组分中的 Al-P 和 Fe-P 是强烈吸附在铝铁化合物上的磷酸盐，是土壤中可溶性 Pi 的重要来源，而 Ca-P 和 O-P 则是比较难溶性的 Pi 组分[38-39]。本研究中，3 种人工林各土层的 Al-P 和 Fe-P 均是 Pi 的优势组分(表 1)，这是因为在酸性土壤中活性铁、铝的含量较高，对 P 的吸附固持和沉积作用较强[40]。桉树人工林土壤 Al-P 和 Fe-P 含量显著小于马尾松和红椎人工林(表 1)，其原因是桉树林 SM 显著高于这 2 种乡土树种人工林(图 1)，因为 3 种林分各土层的 Al-P 和 Fe-P 含量均与 SM 呈显著负相关(表 2)。土壤 SM 可通过影响 pH 而对 Al-P 和 Fe-P 含量产生作用，比如随着 pH 增加，OH^- 离子会与吸附在吸附剂(如 Fe 和 Al 化合物)上的 P 竞争，从而通过释放 P 来减少 P 的固定[41]，导致 Al-P 和 Fe-P 含量下降。

3.2 桉树人工林与 2 种乡土树种人工林土壤磷吸附特性

本研究采用 Langmuir 方程能很好地拟合 3 种人工林土壤对磷的等温吸附特征，并且 3 种人工林土壤潜在最大磷吸附量(Q_m)(564.97 ~ 1 313.48 mg/kg)(表 3)，与 Campos 等[42]关于热带土壤 Q_m(60 ~ 5 500 mg/kg)的研究结果相似。土壤中磷的吸附和储存在很大程度上受非晶铁、铝等离子的制约[42-43]，而土壤对磷的结合能参数 k 值与土壤铁、铝氧化物含量显著正相关[44-45]，导致 3 种人工林土壤 Q_m 与 k 值呈正相关关系。

桉树人工林土壤磷吸附饱和度(DPS)高于马尾松和红椎人工林，可能原因是桉树林土壤 Q_m 值低于 2 种乡土树种人工林。土壤 DPS 越高，土壤中易解吸的磷数量就越大，磷被植物吸收的可能性越高，但同时磷流失的风险也越高。因此，相对于 2 种乡土树种人工林而言，桉树林土壤具有较高的磷流失风险。

4 结论

本研究中 3 种人工林土壤 Po 含量占 TP 的比例较高，是土壤有效磷库的重要来源，其优势组分是 MLO-P 和 MSO-P。Al-P 和 Fe-P 是土壤 Pi 的优势组分。桉树人工林土壤 Po 和 Pi 含量明显低于马尾松人工林和红椎人工林，表明桉树林的磷供应能力低于 2 种乡土树种人工林。桉树人工林土壤 DPS 高于 2 种乡土树种人工林，说明桉树林土壤磷流失风险高于 2 种乡土树种人工。因此，就土壤磷素供应水平和吸附性能来说，乡土树种马尾松和红椎比外来桉树更适于作为当地的造林树种。

参考文献：

[1] Gilbert N. Environment: The disappearing nutrient[J]. Nature, 2009, 461(7265): 716–718.

[2] Cordell D, White S. Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security[J]. Sustainability, 2011, 3(10): 2027–2049.

[3] Obersteiner M, Peñuelas J, Ciais P, et al. The phosphorus trilemma[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(11): 897–898.

[4] Chen C R, Condron L M, Davis M R, et al. Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil[J]. Plant and Soil, 2000, 220(1): 151–163.
[5] Comerford N B, McLeod M, Skinner M F. Phosphorus form and bioavailability in the pine rotation following fertilization: P fertilization influences P form and potential bioavailability to pine in the subsequent rotation[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169(3): 203–211.
[6] Zhang H Z, Shi L L, Wen D Z, et al. Soil potential labile but not occluded phosphorus forms increase with forest succession[J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(1): 41–51.
[7] Masuda K, Boyd C E. Phosphorus fractions in soil and water of aquaculture ponds built on clayey ultisols at auburn, Alabama[J]. Journal of The World Aquaculture Society, 1994, 25(3): 379–395.
[8] Uddin R, Baloch P A, Iqbal S, et al. Phosphorus sorption characteristics of four soil series[J]. Journal of Animal and Plant Sciences, 2014, 24(5): 1547–1553.
[9] Nair P S, Logan T J, Sharpley A N, et al. Interlaboratory comparison of a standardized phosphorus adsorption procedure[J]. Journal of Environmental Quality, 1984, 13(4): 591–595.
[10] Yan X, Wei Z Q, Hong Q Q, et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources[J]. Geoderma, 2017, 295: 80–85.
[11] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同不同年龄杉木人工林土壤磷素特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6519–6527.
[12] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 不同年龄杉木人工林土壤有机磷的形态特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 681–687.
[13] 刘旭军, 韩海荣, 程小琴, 等. 连作对华北落叶松人工林土壤磷形态的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 47–51.
[14] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 763–768.
[15] Hu B, Yang B, Pang X Y, et al. Responses of soil phosphorus fractions to gap size in a reforested spruce forest[J]. Geoderma, 2016, 279: 61–69.
[16] Garay I, Pellens R, Kindel A, et al. Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of Eucalyptus grandis and Acacia mangium in Brazil: a contribution to the study of sustainable land use[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 27(2): 177–187.
[17] 薛立, 吴敏, 徐燕, 等. 几个典型华南人工林土壤的养分状况和微生物特性研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 1017–1023.
[18] Le Maitre D C, van Wilgen B W, Gelderblom C M, et al. Invasive alien trees and water resources in South Africa: case studies of the costs and benefits of management[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 160(1): 143–159.
[19] Kantvilas G, Jarman S J. Lichens and bryophytes on Eucalyptus obliqua in Tasmania: management implications in production forests[J]. Biological Conservation, 2004, 117(4): 359–373.
[20] 温远光, 刘世荣, 陈放. 连栽对桉树人工林下物种多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1667–1671.
[21] 宋贤冲, 唐健, 覃其云, 等. 广西桉树造林区水体监测与评价[J]. 广西林业科学, 2011, 40(4): 274–276, 291.
[22] 杨凤根, 赵燕容, 郭晋川, 等. 广西速生桉树种植区水库水化学特征及其氮来源研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(10): 6–10.
[23] 杨钙仁, 于婧睿, 苏晓琳, 等. 桉树人工林黑水发生环境及其对鱼类的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 445–450.
[24] Zeng W S, Zhang H R, Tang S Z. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales—A case study for Masson pine (Pinus massoniana) in Southern China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(7): 1547–1554.
[25] He Y J, Qin L, Li Z Y, et al. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 295: 193–198.
[26] 覃林, 何友均, 李智勇, 等. 南亚热带红椎马尾松纯林及其混交林生物量和生产力分配格局[J]. 林业科学, 2011, 47(12): 17–21.
[27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
[28] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
[29] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125(2): 95–101.
[30] Chang S, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Science, 1957, 84(2): 133–144.
[31] Moughli L, Westfall D G, Boukhial A. Use of adsorption and buffer capacity in soil testing for phosphorus[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1993, 24: 1959–1974.
[32] Pautler M C, Sims J T. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus, and phosphorus saturation in Delaware soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 765–773.
[33] Maranguit D, Guillaume T, Kuzyakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils[J]. Catena, 2017, 149: 385–393.
[34] 曾晓敏, 高金涛, 范跃新, 等. 中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4879–4887.
[35] 陈立新. 落叶松土壤有机磷形态与林木生长量的关系[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2157–2161.
[36] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 139–143.

[37] 谭宏伟, 杨尚东, 吴俊, 等. 红壤区桉树人工林与不同林分土壤微生物活性及细菌多样性的比较[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 575–584.
[38] 常龙飞, 王晓龙, 聂小飞, 等. 巢湖低丘山区典型植被覆盖类型土壤磷形态分异特征[J]. 土壤, 2013, 45(4): 633–640.
[39] Margenot A J, Sommer R, Mukalama J, et al. Biological P cycling is influenced by the form of P fertilizer in an Oxisol[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(8): 899–909.
[40] 陈立新. 落叶松人工林土壤酸度变化与无机磷形态的关系[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(4): 108–114.
[41] Ribeiro D C, Martins G, Nogueira R, et al. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal)[J]. Chemosphere, 2008, 70(7): 1256–1263.
[42] de Campos M, Antonangelo J A, Alleoni L R F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 156: 110–118.
[43] Yan X, Wang D J, Zhang H L, et al. Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 175: 47–53.
[44] Wang Q R, Li Y C. Phosphorus adsorption and desorption behavior on sediments of different origins[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(6): 1159–1173.
[45] Dong L M, Yang Z F, Liu X H. Phosphorus fractions, sorption characteristics, and its release in the sediments of Baiyangdian Lake, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 179(1): 335–345.