

杉木采伐迹地营造阔叶树对不同层次土壤磷组分和有效性的影响

王涛^{1,2} 万晓华^{1,2} 王磊^{1,2} 邹秉章³ 王思荣³ 黄志群^{1,2*}

(¹福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; ²湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; ³福建省上杭白砂国有林场, 福建上杭 364205)

摘要 磷限制是亚热带人工林经营面临的主要问题之一, 研究阔叶树代替针叶树造林对不同土壤层次磷组分和有效性的影响对维持亚热带地区森林生态系统的可持续发展具有重要意义。以1993年春天在二代杉木林采伐迹地上同时营造的阔叶树米老排人工林和针叶树杉木人工林为对象, 研究0~100 cm不同土层土壤理化性质、磷组分及其有效性的变化。结果表明: 两种林分下土壤有机磷含量均随土层加深而显著下降; 与杉木林相比, 米老排林0~10和10~20 cm土层有效磷含量显著增加, 分别增加35.7%和86.2%, 易分解态磷和中等易分解态磷均随土层加深而显著降低, 表层(0~20 cm)土壤易分解态磷和中等易分解态磷含量显著增加, 80~100 cm土层难分解态磷含量显著降低, 下降13.6%, 20~80 cm土层游离态铁含量显著降低。冗余分析表明, 可溶性有机碳和游离态铁是土壤磷组分变化的关键影响因子。在杉木采伐迹地上营造阔叶树改变了磷在土壤剖面上的分布格局, 有利于提高磷的有效性。

关键词 Hedley 磷分级; 阔叶树; 磷有效性; 有机磷; 铁铝氧化物

Effects of broadleaved tree plantation on soil phosphorus fractions and availability in different soil layers in a logged *Cunninghamia lanceolata* woodland. WANG Tao^{1,2}, WAN Xiaohua^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, ZOU Bing-zhang³, WANG Si-rong³, HUANG Zhi-qun^{1,2*} (¹*School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*; ²*Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China*; ³*Fujian Shanghang Baisha Forestry Farm, Shanghang 364205, Fujian, China*).

Abstract: Phosphorus (P) limitation is one of the major issues for the management of subtropical plantations. Understanding the effects of tree species transition from conifer to broadleaved trees on soil P fraction and availability in different soil layers are of great significance for the sustainable development of subtropical forests. We compared changes in soil chemical properties, P fraction and availability across 0–100 cm soil profile between *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations, which were initially reforested from *C. lanceolata* plantation in the spring of 1993. The results showed that soil organic P content in both plantations decreased significantly with soil depth. Compared with *C. lanceolata*, the *M. laosensis* plantation significantly increased soil available P content by 35.7% and 86.2% in the 0–10 and 10–20 cm, respectively. The contents of soil labile P and moderately labile P decreased significantly with soil depth in both plantations. The contents of labile P and moderately labile P were significantly higher in the surface soil (0–20 cm), while the non-labile P in the 80–100 cm was increased by 13.6%, and the free iron content in the 20–80 cm significantly decreased. Results of redundancy analysis showed that dissolved organic carbon and free iron were the most important factors influencing P fraction in those plantations. Tree species transition from *C. lanceolata* to *M. laosensis* could change the pattern of soil P fraction in soil pro-

本文由国家自然科学基金项目(31570604, 31600495)、国家杰出青年基金项目(31232212)、福建省自然科学基金项目(2018J01714)和福建省林业科技项目([2018]26)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31570604, 31600495), the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (31232212), the Fujian Natural Science Foundation (2018J01714), and the Fujian Forestry Science and Technology Foundation ([2018]26).

2019-11-26 Received, 2020-02-20 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhiqunhuang@hotmail.com

file, and greatly enhance soil P availability.

Key words: Hedley phosphorus fraction; broadleaved tree; phosphorus availability; organic phosphorus; iron-aluminum oxide.

为满足社会经济发展需要,大面积的天然阔叶林被速生针叶人工林所取代,造林树种的转换对生态系统生产力和稳定性产生了负面影响。与针叶树相比,阔叶树种具有更复杂的根系系统和更稳定的生态系统服务功能^[1-2]。在我国南方地区,针叶树人工林比例高达 90% 以上,其中杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林占我国东南各省森林总面积的 60%~80%^[3]。杉木多代连栽会导致林地生产力下降、土壤肥力降低,进而降低生态系统稳定性^[4-5]。

有研究表明,磷(P)的有效性已成为人工林连栽生产力下降的重要因素^[6]。磷是陆地生态系统中不可缺少的植物营养元素^[7]。通过对不同形态土壤磷组分的评估,可以了解植物和微生物对磷的可利用程度^[8]。Yang 等^[9]研究发现,天然次生林转变成落叶松人工林降低了表层土壤微生物生物量磷和 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$,而没有降低磷的有效性。曾晓敏等^[10]研究发现,米楮(*Castanopsis carlesii*)林土壤有机磷含量显著高于杉木林,而有效磷含量却显著低于杉木林。在巴拿马森林的凋落物添加和去除试验中,添加凋落物显著增加了表层土壤有机磷含量^[11]。输入的凋落物质量和数量是土壤磷的形态和有效性变化的重要原因^[12-13]。另一方面,细根周转速率和对养分的吸收,能够改变磷在土壤剖面上的垂直分布,磷在土壤中通常具有表聚性并随着土壤深度增加而降低^[14]。Achat 等^[15]对法国东南部森林研究发现,30~120 cm 的土层提供了 29%~59% 的有效磷。为了应对表层土壤中磷缺乏的情况,树木可能会通过根系从底层土壤获取更多的养分。而以往的研究多集中在表层土壤,忽略了底层土壤。另外,对相同立地环境条件下,树种转换对于底层土壤磷的形态和有效性影响的野外原位试验也鲜有报道。

将杉木人工林转变为阔叶树人工林,特别是在杉木林采伐迹地上营造阔叶林,以改善土壤肥力,是近些年来我国南方人工林经营管理常见的措施之一^[16]。本研究以二代杉木采伐迹地上营造的 26 年生米老排(*Mytilaria laosensis*)和杉木林为研究对象,比较在营造阔叶树后土壤磷组分和有效性在 0~100 cm 土壤剖面上的变化,旨在评估阔叶树代替针叶树造林对土壤剖面上磷的分布格局以及形态和有

效性的影响,为亚热带地区造林树种的选择提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区地处我国中亚热带山区,位于福建省南平市延平区峡阳国有林场(26°48' N, 117°59' E),海拔 229~246 m,平均坡度 25°~35°。属于中亚热带季风气候,年均温 19.3 °C,年降雨量 1669 mm,年均蒸发量 1370 mm,相对湿度 75.2%。

1.2 试验设计

1992 年 10 月,将 29 年生的二代杉木人工林通过皆伐、炼山后,于 1993 年 4 月,分别种植阔叶树米老排纯林和针叶树杉木纯林。两树种人工林的初植密度均为 2500 株·hm⁻²。样地设计采用随机区组设计,设置 8 个 30 m×20 m 小区,米老排和杉木样地各 4 个重复,相邻杉木和米老排样地中间均设置了一个缓冲带(>10 排树木)。2014 年样地本底调查时,米老排平均树高 17.1 m,平均胸径 16.2 cm,郁闭度为 0.92;杉木平均树高 15.2 m,平均胸径 17.5 cm,郁闭度为 0.74。林下植被主要有狗脊(*Woodwardia japonica*)、苦竹(*Pleioblastus amarus*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、粗叶榕(*Ficus simplicissima*)、福建观音座莲(*Angiopteris fokiensis*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)等^[17]。2018 年 8 月在每个小区内,用土钻(内径为 3.7 cm)沿对角线等距离钻取 12 个点,将钻取的土样分为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 6 个土层,并将相同土层的土样均匀混合为一个样品。在室内将土壤样品去除砂石、根系后,过 2 mm 筛。一部分置于 4 °C 冰箱保存,另一部分在室温下自然风干,过 100 目筛,用以测定土壤磷组分和铁铝氧化物等。土壤基本理化性质见表 1。

1.3 测定项目与方法

土壤总有机磷和有效磷分别采用灼烧法和 NaHCO_3 提取,用连续流动分析仪(Skala San⁺⁺, 荷兰)测定磷酸根含量。土壤可溶性有机碳(DOC)采用 KCl 溶液(2 mol·L⁻¹)浸提,称取 10 g 风干土样于 50 mL 离心管中,加入 40 mL KCl 溶液,振荡后离心,过 0.45 μm 滤膜,浸提液用总有机碳分析仪

表 1 米老排和杉木林的土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soils under *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations

土层 Soil layer (cm)	树种 Tree species	pH	含水率 Water content (%)	有机碳 Organic carbon (g · kg ⁻¹)	总氮 Total nitrogen (g · kg ⁻¹)	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon (mg · kg ⁻¹)
0~10	M	4.46±0.02b	52.05±0.55a	35.01±1.99a	2.03±0.13a	254.50±11.17a
	C	4.62±0.07a	46.41±1.36b	27.20±2.24b	1.71±0.12b	201.89±10.46b
10~20	M	4.42±0.03a	43.17±0.98a	22.65±2.25a	1.40±0.10a	228.90±7.94a
	C	4.50±0.04a	42.59±1.69a	18.88±2.67a	1.23±0.12a	173.48±14.24b
20~40	M	4.41±0.03a	38.02±0.57a	13.78±1.77a	0.98±0.08a	196.17±10.13a
	C	4.49±0.03a	37.75±1.01a	12.55±1.70a	0.95±0.08a	147.88±16.89b
40~60	M	4.47±0.04a	36.69±1.02a	9.28±1.27a	0.83±0.05a	125.89±21.72a
	C	4.58±0.05a	37.05±0.76a	7.40±0.60a	0.72±0.04a	109.01±8.14a
60~80	M	4.54±0.03a	30.67±0.88a	6.93±0.66a	0.71±0.04a	88.21±22.49a
	C	4.61±0.03a	28.47±1.35a	6.18±0.61a	0.71±0.02a	63.37±19.51a
80~100	M	4.59±0.04a	29.42±0.72a	7.08±0.87a	0.72±0.04a	79.64±22.10a
	C	4.62±0.05a	28.87±1.47a	5.23±0.42a	0.67±0.05a	51.69±18.57a

M: 米老排 *Mytilaria laosensis*; C: 杉木 *Cunninghamia lanceolata*. 不同小写字母表示同一土层两树种间差异显著 ($P<0.05$) Different letters meant significant difference between the two species in the same soil layer at 0.05 level. 下同 The same below.

(SHIMADZU TOC-VCPH/CPN analyzer, 日本岛津)测定。

铁铝氧化物的提取参照鲁如坤^[18]的方法,无定型铁(amorphous Fe, Feo)和无定型铝(amorphous Al, Alo)用 0.2 mol · L⁻¹草酸铵溶液(NH₄-oxalate, pH 3)浸提;络合态铁(organic-bound Fe, Fep)和络合态铝(organic-bound Al, Alp)用 0.1 mol · L⁻¹焦磷酸钠(Na₂P₂O₇)溶液提取;游离态铁(free Fe, Fed)和游离态铝(free Al, Ald)用连二亚硫酸盐-柠檬酸盐-碳酸氢盐(dithionite-citrate-bicarbonate, DCB)溶液浸提。浸提液用 ICP-OES (Optima 8000, PerkinElmer, USA)测定。

土壤磷组分采用改进后的 Hedley 连续浸提法提取,将土壤磷组分分为 6 个部分,即树脂磷(Resin-P)、碳酸氢钠提取态磷(NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po, Pi 指无机磷, Po 指有机磷,下同)、氢氧化钠提取态磷(NaOH-Pi 和 NaOH-Po)、氢氧化钠超声提取态磷(NaOHus-Pi 和 NaOHus-Po)、盐酸提取态磷(HCl-Pi 和 HCl-Po)和残余态磷(residual-P),由于 HCl-Pi 含量太低,在本研究中无法测定出来。称取 0.5 g 过 100 目筛的风干土,逐级采用:1)去离子水和阴离子树脂膜;2)0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃(pH = 8.5);3)0.1 mol · L⁻¹ NaOH;4)0.1 mol · L⁻¹ NaOH 并超声;5)1 mol · L⁻¹ HCl 作为提取剂,依次浸提出土壤中的各级磷组分。第 2、3、4 步过滤后的浸提液分为两部分,一部分添加浓硫酸,测定无机磷含量;另一部分添加浓硫酸和过硫酸钾,测定总磷含量,然后用总磷减去无机磷(Pi),计算得出本次浸提的有机磷(Po);将第 5 步 HCl 浸提后的土壤加入浓硫酸和浓

硝酸进行消煮,测得残余态磷(residual-P)。根据 Maranguit 等^[19]的方法对不同形态磷的有效性划分出:1)易分解态磷(liable P),即最容易被植物和微生物利用的磷组分,包括 Resin-Pi、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po;2)中等易分解态磷(moderately liable P),在土壤中易与铁铝氧化物等结合,经过解吸、矿化后才能够被植物和微生物吸收利用,包括 NaOH-Pi 和 NaOH-Po;3)难分解态磷(non-liable P),难以被植物吸收利用,包括 NaOHus-Pi、NaOHus-Po、HCl-Po 和 Residual-P。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析。所有数据在分析之前进行正态分布检验,采用 *t* 检验法检验不同树种相同土层的理化性质、铁铝氧化物和不同形态磷含量的差异显著性($\alpha=0.05$)。用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验树种和土层对铁铝氧化物的影响。用 Spearman 法对土壤磷组分和铁铝氧化物进行相关性分析。利用 Origin 2018 软件作图。采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(RDA)。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 土壤有机磷和有效磷的变化

由图 1 可以看出,两种林分下,土壤有机磷均随土壤深度增加呈下降趋势,米老排林 0~100 cm 土层范围内有机磷含量为 83.63~184.75 mg · kg⁻¹,杉木林有机磷含量为 65.75~148.22 mg · kg⁻¹。与杉木林相比,营造米老排林后,各土层有机磷含量呈增

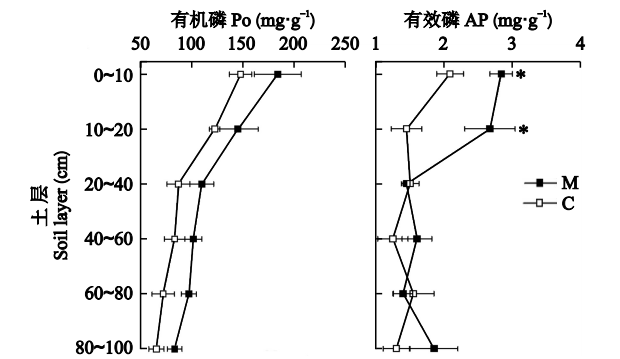


图1 米老排林和杉木林0~100 cm 土壤有机磷(Po)和有效磷(AP)含量

Fig.1 Total organic phosphorus (Po) and available phosphorus (AP) contents at a soil depth of 0–100 cm under *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations.

* $P<0.05$. M: 米老排 *Mytilaria laosensis*; C: 杉木 *Cunninghamia lanceolata*. 下同 The same below.

加趋势,但差异不显著;营造米老排显著增加了0~10和10~20 cm 土层的有效磷含量,分别增加

35.7%和 86.2%,其余土层无显著差异。

2.2 土壤磷组分变化

由图 2 和图 3 可以看出,与杉木林相比,米老排显著提高了 0~10 和 20~40 cm 土层土壤的易分解态磷含量 (Resin-P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi/Po}$),其中 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 是易分解态磷的主要组成部分,与易分解态磷增加趋势一致。米老排林显著提高了 0~20 和 40~60 cm 土层土壤中等易分解态磷含量 (NaOH-Pi 和 NaOH-Po),并且 2 种林分下均以 NaOH-Po 为主。0~20 cm 土层 NaOH-Pi ,以及 0~10 和 40~60 cm 土层 NaOH-Po 含量均显著增加。米老排林下难分解态磷含量在土壤剖面上无显著变化,而杉木林下则呈增加趋势;与杉木林相比,营造米老排显著降低了 80~100 cm 土层残余态磷含量。

2.3 铁铝氧化物的变化

两种林分下,不同形态的铁铝氧化物均以游离态铁铝为主 (表2)。在杉木林下,游离态铁随土壤

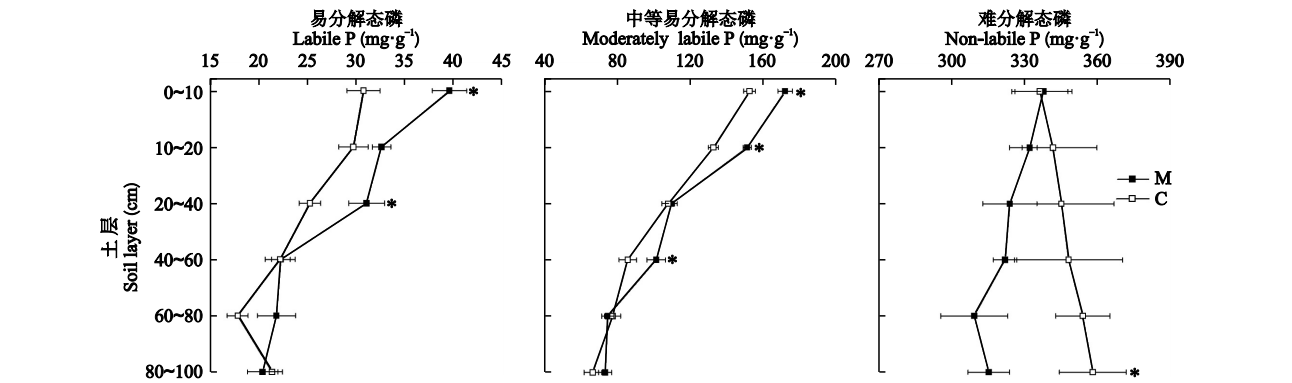


图2 米老排和杉木 0~100 cm 土壤磷有效性变化

Fig.2 Change of phosphorus availability at a soil depth of 0–100 cm under *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations.

表 2 米老排和杉木林土壤铁铝氧化物含量

Table 2 Iron and aluminum oxide contents of soils under *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations

树种 Tree species	土层 Soil layer (cm)	Feo ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Fep ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Fed ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Alo ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Alp ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ald ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
M	0~10	1.09±0.02Aa	8.15±0.26ABa	38.11±1.23ABa	2.17±0.11Aa	7.33±0.22Ba	7.43±0.48ABa
	10~20	0.75±0.07Ba	9.35±0.45Aa	33.38±4.85ABa	1.76±0.06Ba	8.88±0.27Aa	8.14±0.50Aa
	20~40	0.57±0.08Ca	7.18±0.51Ba	27.72±4.92Ba	1.49±0.05Ca	3.69±0.48Ca	5.49±0.48Ca
	40~60	0.32±0.02Da	2.77±0.72Ca	31.33±3.58ABa	1.10±0.03Da	2.42±0.41Da	5.84±0.39BCa
	60~80	0.18±0.02Ea	1.13±0.17Da	34.10±4.69ABa	0.87±0.03Ea	1.61±0.13Da	6.28±0.86BCa
	80~100	0.20±0.03DEa	1.17±0.27Da	40.69±3.60Aa	0.87±0.05Ea	1.61±0.19Da	7.58±0.89ABa
C	0~10	0.79±0.07Ab	8.32±0.08Aa	38.35±0.79Ba	1.51±0.08Ab	7.19±0.29Aa	7.71±0.24Aa
	10~20	0.74±0.13Aa	8.08±0.26Aa	40.70±1.21ABa	1.31±0.13ABb	7.35±0.51Aa	7.61±0.26Aa
	20~40	0.25±0.04Bb	6.29±0.49Ba	43.88±0.93Ab	1.16±0.10Bb	4.85±0.64Ba	7.92±0.35Ab
	40~60	0.20±0.03Ba	2.73±0.34Ca	43.74±2.75Ab	0.89±0.04Ca	2.00±0.38Ca	7.55±0.50Ab
	60~80	0.21±0.01Ba	1.34±0.57Da	43.11±1.99Ab	0.84±0.02Ca	1.71±0.47Ca	7.57±0.37Aa
	80~100	0.17±0.01Ba	0.89±0.10Da	43.91±0.67Aa	0.79±0.01Ca	1.26±0.07Ca	7.41±0.29Aa

Feo: 无定型铁 Amorphous Fe; Fep: 络合态铁 Organic-bound Fe; Fed: 游离态铁 Free Fe; Alo: 无定型铝 Amorphous Al; Alp: 络合态铝 Organic-bound Al; Ald: 游离态铝 Free Al. 下同 The same below. 不同大写字母表示同一树种不同土层间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference among different soil layers for the same tree species at 0.05 level.

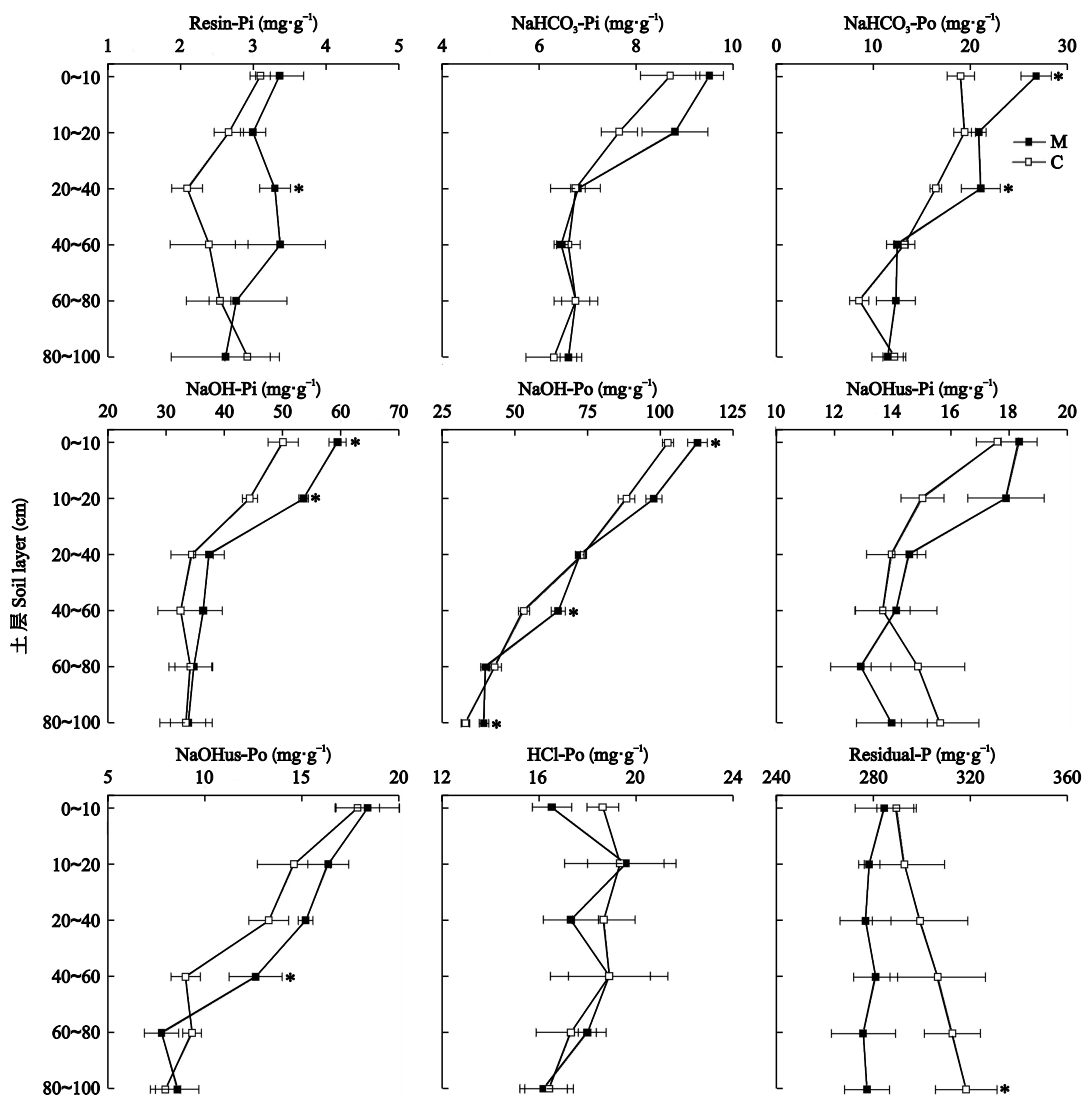


图 3 米老排林和杉木林 0~100 cm 土壤磷组分含量
Fig.3 Phosphorus fraction contents at soil depth of 0~100 cm under *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata* plantations.

深度增加呈上升趋势,但在米老排林下,呈先降低后增加的趋势,并且在 20~80 cm 土层显著低于杉木林。游离态铝也呈现类似的趋势,并且在 20~60 cm 土层,米老排显著降低了游离态铝的含量。营造米老排林显著增加了 0~10 和 20~40 cm 土层无定型铁含量以及 0~40 cm 土层无定型铝含量,其余土层

间差异不显著。
2.4 铁铝氧化物与磷组分的关系
由表 3 可以看出,游离态铁与易分解态磷组分和中等易分解态磷组分以及 NaOHus-PO 呈显著负相关,而与 Residual-P 呈显著正相关;游离态铝也与 NaHCO₃-Pi和NaHCO₃-PO呈显著负相关;无定型铁

表 3 土壤磷组分与铁铝氧化物的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between P fractions and iron-aluminum oxides in the soils

	Resin-P	NaHCO ₃ -Pi	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Pi	NaOH-Po	NaOHus-Pi	NaOHus-Po	HCl-Po	Residual-P
Feo	0.193	0.433 **	0.420 **	0.511 **	0.598 **	0.319 *	0.510 **	0.136	-0.229
Alo	0.259	0.575 **	0.449 **	0.605 **	0.663 **	0.387 **	0.583 **	0.181	-0.261
Fep	0.230	0.376 **	0.217	0.432 **	0.449 **	0.309 *	0.374 **	0.285 *	-0.179
Alp	0.191	0.349 *	0.281	0.447 **	0.457 **	0.314 *	0.376 **	0.207	-0.235
Fed	-0.356 *	-0.444 **	-0.577 **	-0.393 **	-0.586 **	-0.196	-0.649 **	-0.174	0.344 *
Ald	-0.182	-0.332 *	-0.294 *	0.072	-0.204	0.161	-0.297 *	0.114	0.242

* P<0.05; ** P<0.01.

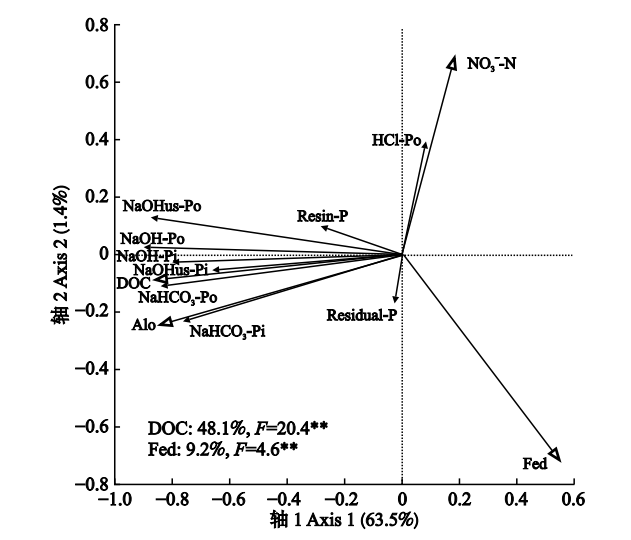


图 4 杉木采伐迹地营造米老排土壤磷组分的冗余分析
Fig.4 Redundancy analysis (RDA) of soil phosphorus fractions at *Mytilaria laosensis* forest in logged *Cunninghamia lanceolata* woodland.
 DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; Fed: 游离态铁 Free Fe; Alo: 无定型铝 Amorphous Al.

铝和络合态铁铝均与中等易分解态磷组分以及 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 呈显著正相关。

2.5 土壤磷组分的影响因素

以土壤磷组分作为响应变量,土壤理化性质和铁铝氧化物作为环境解释变量,进行冗余分析(RDA),结果发现,DOC 和 Fed 是影响土壤磷素变化的主要因子,第 1 轴和第 2 轴分别解释变量的 63.5%和 1.4%(图 4)。其中 DOC 解释度最高,解释了土壤磷变化的 48.1%,并与 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 、 NaOH-Po 、 NaOH-Pi 和 NaOHus-Pi 呈显著正相关。Fed 与 Resin-P 等磷组分呈显著负相关。

3 讨 论

3.1 造林树种转换对磷组分的影响

对于高度风化的热带和亚热带土壤,有机磷的周转是维持土壤磷素供应的基础^[20-21]。在杉木采伐迹地上营造阔叶树米老排并未显著改变总有机磷在土壤剖面上的分布格局。研究表明,米老排年凋落物量是杉木的 2.2 倍,枯枝落叶层生物量是杉木的 1.6 倍,并且米老排凋落物 C : N 值低,分解速率快,提高了土壤有机质含量^[22-23],有利于有机磷的积累。Maranguit 等^[19]对橡胶林的研究发现,凋落物的积累使得表层土壤中有机磷显著增加。但在本研究中,米老排林土壤各层有机磷含量均呈增加的趋势,但未达到显著水平。原因可能是米老排林土壤

有机磷矿化速率高于杉木林。Huang 等^[24]和万晓华等^[17]对本试验样地研究都发现,米老排林有机碳、微生物生物量碳和土壤呼吸速率高于杉木林。土壤有机质、微生物活性和底物质量等能够影响有机磷的矿化速率,有机碳的积累也能提高有机磷的矿化速率^[25-26]。

易分解态磷易被植物矿化利用,是直接有效磷源,中等易分解态磷与磷的长期循环有关,是有效磷的重要补充^[20]。本研究中,易分解态和中等易分解态磷均是以有机磷($\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和 NaOH-Po)为主,与曾晓敏等^[27]研究结果一致。2 种林分下 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 含量是 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 的 2~3 倍, NaOH-Po 含量是 NaOH-Pi 的 1~2 倍。在土壤有效磷含量有限的情况下,有机磷参与了土壤磷的长期转换和循环^[28]。在高度风化且磷有效性低的土壤中, NaOH-Po 是有效磷的重要来源,微生物能够将这部分有机磷转化为植物可利用的形态,进而增加磷的有效性^[29-30]。营造米老排后,0~10 和 20~40 cm 土层的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 含量以及 0~10、20~40 和 80~100 cm 土层的 NaOH-Po 含量显著增加,并且 NaOH-Po 是土壤有机磷的最主要组成部分。Fan 等^[20]对模拟氮沉降的米楮阔叶林的研究也发现, NaOH-Po 的周转是维持亚热带磷有效性的重要因素。本研究中,难分解态磷以残余态磷为主,难以被植物利用,必须通过解吸、矿化和风化等过程才能转换为较易被植物吸收利用的形态^[19]。虽然难分解态磷在短时间内难以被利用,但随着森林演替,可能是热带亚热带磷限制土壤中有有效磷的潜在来源^[8]。Costa 等^[7]把巴西桉树林土壤有效磷的增加归因于残余态磷中无机磷的解吸或者有机磷的矿化。经过 26 年的生长,与杉木林相比,米老排林显著降低了 80~100 cm 土层的残余态磷含量,与 Zhang 等^[8]研究结果一致。

3.2 影响土壤磷有效性的因子

本研究发现,可溶性有机碳的变化是土壤磷组分变化的主要影响因子,这与贾淑娴等^[31]研究结果一致。土壤有机碳含量的增加可为土壤微生物提供更多能源,使参与土壤有机磷矿化的酸性磷酸酶活性提高,从而提高了有效磷含量^[32]。Hou 等^[33]对亚热带不同演替阶段的森林研究发现,阔叶林有机碳的积累高于针叶林,显著增加了表层土壤磷的有效性。因此,土壤中碳和磷的循环可能是紧密耦合的,微生物对碳获取的同时能够影响土壤磷的吸收和供应,并影响土壤磷组分^[34]。当 DOC 含量增加时,微生物也能够迅速固定相当数量的磷^[35]。有研

究也认为,碳的有效性决定了微生物对磷的吸收^[15,36]。不过也有研究认为,土壤有机碳的积累会使土壤磷有效性降低,这是由于有机质会封存部分有机磷^[37]。因此,需要进一步研究土壤碳组分和磷组分之间的关系,以阐明土壤有机碳积累与土壤磷有效性之间的关系,这对于理解陆地生态系统土壤有机碳的积累对于磷限制的影响具有重要意义。

铁铝氧化物对磷具有很强的吸附性,抑制有机磷矿化,降低土壤磷的有效性^[38]。本研究中,铁铝氧化物以游离态铁铝为主,与曾晓敏等^[10]研究结果一致。王艳玲等^[39]研究发现,增加土壤有机质能够减少土壤游离态铁铝氧化物含量,显著降低红壤的磷吸持指数。米老排较高的凋落物数量和质量归还会增加土壤有机质含量,有机质分解使部分游离态氧化铁分解成水溶性铁,再经过水解产生无定型铁,而且有机质可以抑制游离态铁的形成^[40],进而降低了土壤剖面上游离态铁铝含量。游离态铁的减少有助于磷的解吸和矿化,从而增加磷的有效性^[41]。本研究中,游离态铁与 Resin-P 呈显著负相关,说明营造阔叶树米老排可以使土壤氧化铁活化,降低土壤剖面上游离态铁的含量,减少对磷的固持。另一方面,土壤有机质一般在铁-铝化学键的作用下与土壤矿物质形成有机络合物,从而提高土壤对磷的保留能力,而有机质的矿化分解产生的有机阴离子则会与磷酸根竞争铁铝氧化物的吸附位点,能够降低土壤中游离态铁铝对磷的吸附固定^[42]。米老排降低了底层土壤游离态铁铝氧化物含量,提高了磷的迁移,可能是底层 Residual-P 减少的原因^[43]。Bueis 等^[44]认为,土壤中磷的有效性与无定型铁铝和络合态铁铝对 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi/Po}$ 以及 NaOH-Pi/Po 的吸附作用有关。本研究也表明,营造米老排提高了上层土壤无定型铁铝含量,并与 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi/Po}$ 以及 NaOH-Pi/Po 呈显著正相关。无定型铁铝具有较高的比表面积,有利于磷的解吸^[45]。

参考文献

- [1] Gharu AD, Tarafdar JC. Efficiency of phosphatases in mobilization of native phosphorus fractions under different vegetation. *Agricultural Research*, 2016, **5**: 335–345
- [2] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响. *应用生态学报*, 2016, **27**(4): 1031–1038 [Xiao H-Y, Liu B, Yu Z-P, *et al.* Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(4): 1031–1038]
- [3] Bi J, Blanco JA, Seely B, *et al.* Yield decline in Chinese-fir plantations: A simulation investigation with implications for model complexity. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, **37**: 1615–1630
- [4] Wei X, Blanco JA, Jiang H, *et al.* Effects of nitrogen deposition on carbon sequestration in Chinese fir forest ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2012, **416**: 351–361
- [5] 王清奎, 范冰, 徐广标. 亚热带地区阔叶林与杉木林土壤活性有机质比较. *应用生态学报*, 2009, **20**(7): 1536–1542 [Wang Q-K, Fan B, Xu G-B. Soil active organic matter in broadleaved forest and Chinese fir plantation in subtropical region of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(7): 1536–1542]
- [6] Wu PF, Ma XQ, Tigabu M, *et al.* Root morphological plasticity and biomass production of two Chinese fir clones with high phosphorus efficiency under low phosphorus stress. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, **41**: 228–234
- [7] Costa MG, Gama-Rodrigues AC, Gonçalves JL, *et al.* Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under *Eucalyptus* plantations, Brazil. *Forests*, 2016, **7**: doi: 3390/f7010015
- [8] Zhang HX, Shi LL, Wen DZ, *et al.* Soil potential labile but not occluded phosphorus forms increase with forest succession. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, **52**: 41–51
- [9] Yang K, Zhu JJ, Yan QL, *et al.* Changes in soil P chemistry as affected by conversion of natural secondary forests to larch plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, **260**: 422–428
- [10] 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. *生态学报*, 2018, **38**(13): 4879–4887 [Zeng X-M, Gao J-T, Fan Y-X, *et al.* Effect of soil factors after forest conversion on the accumulation of phosphorus species in mid-subtropical forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(13): 4879–4887]
- [11] Vincent AG, Turner BL, Tanner EVJ. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science*, 2010, **61**: 48–57
- [12] Sardans J, Penuelas J. Tree growth changes with climate and forest type are associated with relative allocation of nutrients, especially phosphorus, to leaves and wood. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, **22**: 494–507
- [13] Redel Y, Rubio R, Godoy R, *et al.* Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. *Geoderma*, 2008, **145**: 216–221
- [14] Jobbagy EG, Jackson RB. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 2001, **53**: 51–77
- [15] Achat DL, Augusto L, Bakker MR, *et al.* Microbial processes controlling P availability in forest spodosols as affected by soil depth and soil properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, **44**: 39–48

- [16] Xu JC. China's new forests aren't as green as they seem. *Nature*, 2011, **477**: 370
- [17] 万晓华, 黄志群, 何宗明, 等. 阔叶和杉木人工林对土壤碳氮库的影响比较. *应用生态学报*, 2013, **24** (2): 345-350 [Wan X-H, Huang Z-Q, He Z-M, *et al.* Effects of broadleaf plantation and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation on soil carbon and nitrogen pools. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24** (2): 345-350]
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000 [Lu R-K. Soil and Agrochemistry Analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000]
- [19] Maranguit D, Guillaume T, Kuzyakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena*, 2017, **149**: 385-393
- [20] Fan YX, Lin F, Yang LM, *et al.* Decreased soil organic P fraction associated with ectomycorrhizal fungal activity to meet increased P demand under N application in a subtropical forest ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, **54**: 149-161
- [21] 曾晓敏, 范跃新, 林开森, 等. 亚热带不同植被类型土壤磷组分特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2018, **29**(7): 2156-2162 [Zeng X-M, Fan Y-X, Lin K-M, *et al.* Characteristics of soil phosphorus fractions of different vegetation types in subtropical forests and their driving factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2156-2162]
- [22] Yu ZP, Huang ZQ, Wang MH, *et al.* Nitrogen addition enhances home-field advantage during litter decomposition in subtropical forest plantations. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, **90**: 188-196
- [23] 万晓华, 黄志群, 何宗明, 等. 杉木采伐迹地造林树种转变对土壤可溶性有机质的影响. *应用生态学报*, 2014, **25**(1): 12-18 [Wan X-H, Huang Z-Q, He Z-M, *et al.* Effects of tree species transfer on soil dissolved organic matter pools in a reforested Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) woodland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(1): 12-18]
- [24] Huang ZQ, Yu ZP, Wang MH. Environmental controls and the influence of tree species on temporal variation in soil respiration in subtropical China. *Plant and Soil*, 2014, **382**: 75-87
- [25] Achat DL, Bakker MR, Zeller B, *et al.* Long-term organic phosphorus mineralization in Spodosols under forests and its relation to carbon and nitrogen mineralization. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, **42**: 1479-1490
- [26] 姜一, 步凡, 张超, 等. 土壤有机磷矿化研究进展. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2014, **38**(3): 160-166 [Jiang Y, Bu F, Zhang C, *et al.* Research advances on soil organic phosphorus mineralization. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science*, 2014, **38**(3): 160-166]
- [27] 曾晓敏, 范跃新, 林开森, 等. 亚热带不同海拔黄山松林土壤磷组分及微生物特征. *生态学报*, 2018, **38** (18): 6570-6579 [Zeng X-M, Fan Y-X, Lin K-M, *et al.* Characteristics of soil phosphorus fractions and microbial communities in *Pinus taiwanensis* Hayata forests at different altitudes in a subtropical region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(18): 6570-6579]
- [28] Maharjan M, Maranguit D, Kuzyakov Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use. *European Journal of Soil Biology*, 2018, **87**: 17-24
- [29] Slazak A, Freese D, Matos EDS, *et al.* Soil organic phosphorus fraction in pine-oak forest stands in North-eastern Germany. *Geoderma*, 2010, **158**: 156-162
- [30] Gama-Rodrigues AC, Sales MVS, Silva PSD, *et al.* An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry*, 2014, **118**: 453-469
- [31] 贾淑娴, 吴传敬, 刘小飞, 等. 采伐剩余物的处理方式对杉木幼林土壤磷组分及其有效性的影响. *应用生态学报*, 2019, **30**(11): 3662-3670 [Jia S-X, Wu C-J, Liu X-F, *et al.* Effects of harvest residue treatments on soil phosphorus fractions and availability in a young Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(11): 3662-3670]
- [32] Allison SD, Vitousek PM. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, **37**: 937-944
- [33] Hou EQ, Chen CR, Wen DZ, *et al.* Relationships of phosphorus fractions to organic carbon content in surface soils in mature subtropical forests, Dinghushan, China. *Soil Research*, 2014, **52**: 55-63
- [34] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, **61**: 69-75
- [35] Bunemann EK, Bossio DA, Smithson PC, *et al.* Microbial community composition and substrate use in a highly weathered soil as affected by crop rotation and P fertilization. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**: 889-901
- [36] Heuck C, Spohn M. Carbon, nitrogen and phosphorus net mineralization in organic horizons of temperate forests: Stoichiometry and relations to organic matter quality. *Biogeochemistry*, 2016, **131**: 1-14
- [37] Huang WJ, Zhou GY, Liu JX. Nitrogen and phosphorus status and their influence on aboveground production under increasing nitrogen deposition in three successional forests. *Acta Oecologica*, 2012, **44**: 20-27
- [38] Vincent AG, Schleucher J, Grobner G, *et al.* Changes in organic phosphorus composition in boreal forest humus soils: The role of iron and aluminium. *Biogeochemistry*, 2012, **108**: 485-499
- [39] 王艳玲, 章永辉, 何园球. 红壤基质组分对磷吸附指数的影响. *土壤学报*, 2012, **49**(3): 552-559 [Wang Y-L, Zhang Y-H, He Y-Q. Effect of soil matrix components on phosphate sorption index in red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, **49**(3): 552-559]
- [40] 程月琴, 杨林章, 孔荔玺, 等. 植稻年限对土壤铁锰氧化物的影响. *土壤*, 2008, **40**(5): 784-791 [Cheng Y-Q, Yang L-Z, Kong L-X, *et al.* Influences of rice-

planting duration on iron and manganese oxides in paddy soils. *Soils*, 2008, **40**(5): 784–791]

[41] Fan YX, Zhong XJ, Lin F, *et al.* Responses of soil phosphorus fractions after nitrogen addition in a subtropical forest ecosystem: Insights from decreased Fe and Al oxides and increased plant roots. *Geoderma*, 2019, **337**: 246–255

[42] Cavalcante H, Araujo F, Noyma NP, *et al.* Phosphorus fractionation in sediments of tropical semiarid reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2018, **619**: 1022–1029

[43] Cui H, Ou Y, Wang LX, *et al.* Change in the distribution of phosphorus fractions in aggregates under different land uses: A case in Sanjiang Plain, Northeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**: 212

[44] Bueis T, Bravo F, Pando V, *et al.* Phosphorus availa-

bility in relation to soil properties and forest productivity in *Pinus sylvestris* L. plantations. *Annals of Forest Science*, 2019, **76**: 97

[45] 王改改, 傅瓦利, 魏朝富, 等. 消落带土壤铁的形态变化及其对有效磷的影响. 土壤通报, 2008, **39**(1): 66–70 [Wang G-G, Fu W-L, Wei C-F, *et al.* Iron transformation and phosphorus availability in a drawdown area of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(1): 66–70]

作者简介 王 涛, 男, 1994 年生, 硕士研究生。主要从事森林生态学研究。E-mail: wangtao5168@126.com

责任编辑 孙 菊

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

