

DOI: 10.5846/stxb201706231141

曾晓敏, 高金涛, 范跃新, 袁萍, 鲍勇, 高颖, 赵盼盼, 司友涛, 陈岳民, 杨玉盛. 森林转换后土壤因素影响中亚热带土壤磷的积累. 生态学报, 2018, 38(13): - .

Zeng X M, Gao J T, Fan Y X, Yuan P, Bao Y, Gao Y, Zhao P P, Si Y T, Chen Y M, Yang Y S. Effect of soil factors after forest conversion on the accumulation of phosphorus species in mid-subtropical forests. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

## 森林转换后土壤因素影响中亚热带土壤磷的积累

曾晓敏<sup>1,2</sup>, 高金涛<sup>1,2</sup>, 范跃新<sup>1,2</sup>, 袁萍<sup>1,2</sup>, 鲍勇<sup>1,2</sup>, 高颖<sup>1,2</sup>, 赵盼盼<sup>1,2</sup>, 司友涛<sup>1,2</sup>, 陈岳民<sup>1,2,\*</sup>, 杨玉盛<sup>1,2</sup>

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

**摘要:**磷是植物生长的必需元素之一,是维持亚热带森林生态系统生产力的关键因子。研究森林转换后土壤因素对磷素的影响,对生态系统的稳定和森林经营具有重要意义。本文选取由亚热带常绿阔叶林转换而成的米楮次生林(SF)、米楮人促林(AR)和杉木人工林(CF)为研究对象,测定了土壤理化性质、铁铝氧化物、各形态磷含量以及酸性磷酸酶活性,旨在探究土壤磷对森林转换的响应和驱动土壤磷变化的影响因子。结果显示:米楮人促林土壤的全磷、有机磷和微生物生物量磷显著高于米楮次生林和杉木人工林;冗余分析(RDA)发现,土壤含水量、总氮和无定型铁是影响A层土壤磷的主要因子,而在B层,则是酸性磷酸酶、游离型铁和总氮起主要作用;土壤生物化学属性和微生物特性都会影响着不同形态土壤P的积累,其中土壤中的水分和酸性磷酸酶活性是调控土壤磷的关键因子。研究表明,中亚热带地区天然林转换为人促更新林更有利于森林土壤磷的储存和供应,有助于维持本区域森林生态系统的稳定。本文的研究结果可为中亚热带森林经营提供科学依据。

**关键词:**土壤磷;森林转换;水分;酸性磷酸酶

## Effect of soil factors after forest conversion on the accumulation of phosphorus species in mid-subtropical forests

ZENG Xiaomin<sup>1,2</sup>, GAO Jintao<sup>1,2</sup>, FAN Yuexin<sup>1,2</sup>, YUAN Ping<sup>1,2</sup>, BAO Yong<sup>1,2</sup>, GAO Ying<sup>1,2</sup>, ZHAO Panpan<sup>1,2</sup>, SI Youtao<sup>1,2</sup>, CHEN Yuemin<sup>1,2,\*</sup>, YANG Yusheng<sup>1,2</sup>

1 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

**Abstract:** Phosphorus (P), a macro-nutrient essential for plant growth, is considered the key factor for maintaining the productivity of subtropical forest ecosystems. Understanding the effects of soil factors on the accumulation of phosphorus species after forest conversion is important in developing management practices that sustain and enhance ecosystem functionality. The objectives of the present study were to evaluate the response of soil phosphorus to forest conversion, and elucidate the mechanisms and environmental factors driving changes in soil phosphorus. The study sites included secondary broadleaved forests of *Castanopsis carlesii* (SF), human-assisted naturally regenerated forests of *Castanopsis carlesii* (AR), and plantations of *Cunninghamia lanceolata* (CF), which were converted from natural forests in the mid-subtropical region of China. Basic physicochemical characteristics, including iron and aluminum oxide content, different phosphorus forms, and acid phosphatase activities, were determined. The results revealed that the soil total P and organic and microbial biomass P levels were significantly higher in AR than in SF or CF. A redundancy analysis indicated that the changes in soil

基金项目:国家自然科学基金(31670620);海峡联合基金项目(U1505233);国家自然科学基金(41401346)

收稿日期:2017-06-23; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ymchen@fjnu.edu.cn

phosphorus were mainly driven by soil moisture, total nitrogen, and amorphous Fe oxides (Feo) in the A horizon, and by acid phosphatase, free Fe (Fed), and total nitrogen in the B horizon. The results suggest that soil biochemical properties and microbial characteristics affect the accumulation of different soil P formations, primarily by changing the soil moisture levels and acid phosphatase activity. In summary, human-assisted naturally regenerated forests converted from natural forests were the most conducive to the storage and supply of nutrients and the sustainable development of ecosystem functionality among the management systems studied. The present study might provide a theoretical basis for assessing forest management practices in mid-subtropical forests.

**Key Words:** soil phosphorus; forest conversion; moisture; acid phosphatase

土地利用变化是全球陆地植被变化的重要影响因素,不仅影响土壤养分状况的变化<sup>[1]</sup>,也影响生态系统的稳定和功能<sup>[2]</sup>。森林转换是土地利用变化的一种常见方式<sup>[3]</sup>,其可以改变生态系统植被群落组成,影响凋落物养分归还,引起土壤养分供应能力的改变,并可能通过正反馈作用进一步影响森林生态系统的稳定<sup>[4]</sup>。关于森林转换国内外已经进行了大量的研究,发现森林转化为农业用地和人工林往往会导致土壤碳储量受限<sup>[5]</sup>、土壤氮有效性降低<sup>[6]</sup>、微生物群落结构发生显著变化<sup>[7]</sup>、温室气体排放增加<sup>[8]</sup>。土壤磷素(P)是植物生长最重要的营养元素之一<sup>[9]</sup>,也是热带和亚热带森林生产力的主要限制因素<sup>[10-12]</sup>。研究发现,不合理的森林转换往往会增加土壤磷流失的风险<sup>[1]</sup>。而研究不同形态的土壤磷可以评估磷对植物和微生物的有效性<sup>[13]</sup>,预测森林的健康(生长)状况。因此,了解森林转化后土壤因素对各形态磷的影响,对改善土壤养分状况和保护森林资源极为重要。

当前,森林转换影响土壤磷的研究多集中于热带和温带地区。有研究发现,热带森林转换会导致有效磷大幅减少或增加<sup>[14-15]</sup>。Yang等<sup>[16]</sup>研究表明,温带森林转换对土壤全磷、微生物生物量磷、有机磷和有效磷的影响显著,并影响了酸性磷酸酶活性。许多研究表明,土壤磷受多种环境因子的控制,不仅土壤理化性质、铁铝氧化物等因素会影响到土壤磷的形态及有效性<sup>[17]</sup>,微生物等生物因素也发挥着重要的作用<sup>[15]</sup>。其中,微生物和植物根系分泌的酸性磷酸酶,能够促使有机磷矿化,是控制森林生态系统中土壤磷有效性的重要生物因素之一<sup>[18]</sup>。在中亚热带森林地区,森林转换对土壤磷形态及有效性的影响仍缺乏认识,及其驱动土壤磷变化的主要机制尚不清楚。因此,需要进一步探究驱动土壤P变化的主要影响因子。

近年来,我国南方大面积天然常绿阔叶林被采伐,采用不同的经营方式进行森林再更新,转换成各种次生林、人促更新林和皆伐后经营的人工林等森林类型<sup>[19]</sup>。并且,在该地区,长期的风化淋溶和生物吸收使土壤中P有效性较低,从而使森林生态系统磷素受限的问题始终存在<sup>[7,11]</sup>。因此,本研究选择中亚热带天然林采伐后转换而成的米楮次生林(SF)、米楮人促林(AR)和杉木人工林(CF)为研究对象,比较3种森林类型的磷形态及有效性的差异,分析土壤理化性质、铁铝氧化物和酸性磷酸酶对磷的影响,并探讨了驱动土壤磷变化的主要因素,为中亚热带森林经营提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地基本概况

试验地设在福建省三明市陈大国有林场金丝湾森林公园内的黄坑工区(26°19'N, 117°36'E)。地貌特征以陡峭的低丘陵为主,地势北高南低,山地面积占全境的82%,平均坡度25°—35°,平均海拔为300 m。本区属中亚热带海洋季风气候,年均气温17—19.4℃;多年平均降水量1749 mm;年均相对湿度81%<sup>[19]</sup>。

该试验地主要包括3种典型的森林类型,即米楮次生林、米楮人促林和杉木人工林。3种森林类型的林龄相近,且具有相同的立地条件,在转换之前均为米楮天然林。其中,米楮次生林由米楮天然林经过择伐后,封山育林,再经过自然次生演替形成,林分密度为3788株/hm<sup>2</sup>,平均树高10.8 m,平均胸径12.2 cm,主要树种有米楮(*Castanopsis lanceolata*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa*)等。米楮人促林为采伐时保留林下幼树,采伐后保

留剩余物,并沿水平带平铺堆积残留的枝桠、树梢等以促其腐烂,林分密度为 2158 株/hm<sup>2</sup>,平均树高 13.7 m,平均胸径 16.8 cm,其主要树种有米楮、东南野桐 (*Mallooyus Lianus*) 等,草本层植物由草珊瑚 (*Sarcandra glabra*)、山姜 (*Alpinia japonica*)、扇叶铁线蕨 (*Adiantum flabellulatum*) 等组成。杉木人工林 (*Cunninghamia lanceolata*) 为皆伐后,经火烧、挖穴造林和幼林抚育营造的人工纯林,林冠单层,林分密度为 2858 株/hm<sup>2</sup>,平均树高 18.2 m,平均胸径 15.6 cm,林下植被主要为狗骨柴 (*Tricalysia dubia*)、毛冬青 (*Ilex pubescens*)、新木姜子 (*Neolitsea aurata*) 等。

## 1.2 采样与处理

2016 年 11 月,在米楮次生林、米楮人促林和杉木人工林分别进行随机布点采样。每块样地去除表面凋落物后采集淋溶层(A 层)和淀积层(B 层)的土样。将土样混合均匀并挑出细根和石粒等杂物,通过 2 mm 的土筛。将经过处理后的土样分为两部分,一部分是用来测定微生物量和酶活性的鲜土,4℃低温储存;另一部分为用来测定土壤化学分析和不同形态磷的风干土。

## 1.3 测定方法

土壤有机碳、总氮用碳氮元素分析仪 (Elementar Vario EL III, Elementar, 德国) 测定;土壤矿质氮用 2 mol/L KCl 进行浸提,连续流动分析仪 (Skalar san++, Skalar, 荷兰) 测定滤液中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N<sup>[20]</sup>;土壤含水率的测定采用烘干法;土壤 pH 通过玻璃电极 pH 计 (STARTER 300, OHAUS, 美国) 测定,水土比为 2.5:1;铁铝氧化物参考鲁如坤<sup>[21]</sup> 等的方 法,过 100 目筛土,其中无定型用草酸铵溶液浸提,络合型用焦磷酸钠溶液,而游离型用柠檬酸钠和碳酸氢钠溶液浸提,土与溶液比为 1:10,用 ICP-OES 测定铁铝金属离子浓度。

土壤磷的测定参考 Carter 等<sup>[22]</sup> 的方法,其中全磷、有机磷和有效磷分别用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法、灼烧法和 M3 浸提法;土壤微生物生物量磷采用氯仿熏蒸-NaHCO<sub>3</sub> 浸提法<sup>[23]</sup>,再用连续流动分析仪测定磷酸根含量。土壤酸性磷酸酶活性参照 Saiya-Cork 等<sup>[24]</sup> 的方法提取和培养。方法如下:取 1 g 新鲜土壤,用 125 mL 50 mmol/L 的醋酸盐缓冲液 (pH = 5) 提取,用磁力搅拌器搅拌 5 min 使其均质化,用移液器取 200 μL 移于 96 孔微孔板。用伞形酮 (MUB) 作为底物标示。微平板置于暗环境下经过 20℃ 恒温培养 4 h 后,用多功能酶标仪 (SpectraMax M5, Molecular Devices, 美国) 测定其荧光度。

## 1.4 数据处理

用 Excel 2013 和 SPSS 21.0 软件对数据进行处理。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验不同林型和不同土层土壤理化性质、铁铝氧化物和不同形态磷含量的差异显著性;用双因素方差分析 (Two-Way ANOVA) 比较分析林分与土层下土壤理化性质、铁铝氧化物和不同形态磷含量等指标的差异。采用 Canoco Software 5.0 软件,以 4 种不同形态的磷为响应变量,同时以土壤基本理化性质、铁铝氧化物含量和酸性磷酸酶活性为解释变量做冗余分析 (RDA);绘图由 Origin 9.1 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本理化性质

不同森林类型的土壤总氮、铵态氮及含水率等理化特性差异显著 (表 1)。土壤 A 层中,AR 的总氮 (TN) 显著高于 SF 和 CF;土壤碳氮比 (C:N) 呈现 CF>SF>AR;CF 的铵态氮含量最低,而含水率则是 AR>CF>SF。土壤 B 层中,仅有铵态氮和含水率在不同林型中存在显著差异,即 SF 比 AR、CF 的铵态氮明显偏高,而含水率明显偏低,其他性质均无显著差异。方差分析表明林分对土壤总氮、铵态氮和含水率具有极显著影响 ( $P < 0.01$ ),土层对土壤有机碳、总氮、铵态氮、硝态氮和含水率具有极显著影响 ( $P < 0.01$ ),而林分×土层对土壤总氮和铵态氮具有显著的交互作用 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 土壤不同形态铁铝氧化物含量

不同形态的铁铝氧化物中游离型居多 (表 2)。土壤 A 层中,不同森林类型的无定型铁存在显著差异,即 SF>AR>CF,而其他形态的铁铝氧化物在土壤表层变化不显著。在土壤 B 层中,3 种形态的铁铝氧化物在 SF、

AR 和 CF 中均无显著差异。经方差分析可知,林分对络合型铝具有极显著影响( $P<0.01$ ),对无定型铁具有显著影响( $P<0.05$ )。土层对土壤无定型铁和络合型铁铝具有极显著影响( $P<0.01$ )。而林分 $\times$ 土层对土壤 3 种形态铁铝氧化物的交互作用均不显著。

表 1 不同森林类型的土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical characteristic of soils at different forest types

土层 Soil horizon	处理 Treatment	有机碳 SOC /(g/kg)	总氮 Total N /(g/kg)	碳氮比 C:N	铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N /(mg/kg)	硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /(mg/kg)	含水率 Moisture %	pH
A 层	SF	41.69Aa	2.43Ba	17.20ABa	40.78Ba	3.90Aa	27.24Ba	4.72Aa
	AR	45.82Aa	2.89Aa	15.80Ba	49.90Aa	3.34Aa	35.02Aa	4.79Aa
	CF	39.88Aa	2.18Ba	18.33Aa	26.73Ca	2.61Aa	31.21ABa	4.66Aa
B 层	SF	20.80Ab	1.29Ab	16.09Ab	22.75Ab	1.82Ab	19.52Bb	4.64Aa
	AR	19.46Ab	1.23Ab	15.72Aa	16.63ABb	1.85Aa	24.28Ab	4.64Aa
	CF	20.66Ab	1.24Ab	16.60Aa	11.46Bb	1.27Aa	24.08Ab	4.57Aa
Two-way ANOVA	林分	ns	**	ns	***	ns	***	ns
	土层	***	***	ns	***	***	***	ns
	林分 $\times$ 土层	ns	**	ns	**	ns	ns	ns

SF:米楮次生林 Secondary broadleaved forests of *Castanopsis carlesii*; AR: 米楮人促林 Human-assisted naturally regenerated forests of *Castanopsis carlesii*; CF: 杉木人工林 Plantation of *Cunninghamia lanceolata*.不同大写字母表示不同森林类型间差异显著,不同小写字母表示不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。ns, 表示无显著性影响, \*,  $P<0.05$ , \*\*,  $P<0.01$ , \*\*\*,  $P<0.001$ 。

表 2 不同森林类型的土壤铁铝氧化物含量

Table 2 Iron and aluminum oxide content of soils at different forest types

土层 Soil horizon	处理 Treatment	铁 Fe/(g/kg)			铝 Al/(g/kg)		
		无定型 Feo	络合型 Fep	游离型 Fed	无定型 Alo	络合型 Alp	游离型 Ald
A 层	SF	2.05Aa	2.84Aa	10.34Aa	1.05Aa	1.88Aa	3.99Aa
	AR	1.92ABa	3.54Aa	10.37Aa	1.31Aa	2.70Aa	4.00Aa
	CF	1.56Ba	2.87Ab	11.49Aa	1.46Aa	2.84Ab	4.68Aa
B 层	SF	1.73Aa	3.71Aa	9.09Aa	1.13Aa	2.68Aa	3.33Aa
	AR	1.27Ab	4.15Aa	12.00Aa	1.31Aa	3.59Aa	4.98Aa
	CF	1.49Aa	4.46Aa	11.02Aa	1.18Ab	4.06Aa	4.61Aa
Two-way ANOVA	林分	*	ns	ns	ns	**	ns
	土层	**	**	ns	ns	**	ns
	林分 $\times$ 土层	ns	ns	ns	ns	ns	ns

SF:米楮次生林 Secondary broadleaved forests of *Castanopsis carlesii*; AR: 米楮人促林 Human-assisted naturally regenerated forests of *Castanopsis carlesii*; CF: 杉木人工林 Plantation of *Cunninghamia lanceolata*.不同大写字母表示不同森林类型间差异显著,不同小写字母表示不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。ns, 表示无显著性影响, \*,  $P<0.05$ , \*\*,  $P<0.01$ , \*\*\*,  $P<0.001$ 。

### 2.3 土壤中不同形态磷含量和酸性磷酸酶活性

如图 1,土层对土壤全磷(TP)和有机磷(P<sub>o</sub>)的影响极显著( $P<0.001$ ),A 层显著高于 B 层。林分对其也具有极显著影响( $P<0.01$ )。在土壤 A 层中不同森林类型的土壤磷含量差异较大。其中,米楮人促更新林(AR)的 TP 和 P<sub>o</sub> 含量显著高于米楮次生林(SF)和杉木人工林(CF)。CF 的土壤磷以无机磷为主(占 53%),而 SF 和 AR 以有机磷为主(约占 60%)。在土壤 B 层中,TP 和 P<sub>o</sub> 含量受林型的影响较小,不同森林类型之间的差异均不显著。此外,林分 $\times$ 土层对土壤全磷和有机磷的交互作用也显著( $P<0.05$ )。

土壤有效磷(AVP)反映了土壤磷素的直接供应能力。林分和土层均对有效磷具有极显著影响( $P<0.001$ )。但 SF 的有效磷含量在不同土层中无显著差异,而 AR 和 CF 中 A 层显著高于 B 层。在土壤 A 层中,杉木人工林(CF)的 AVP 含量最高,而在土壤 B 层中差异不显著。

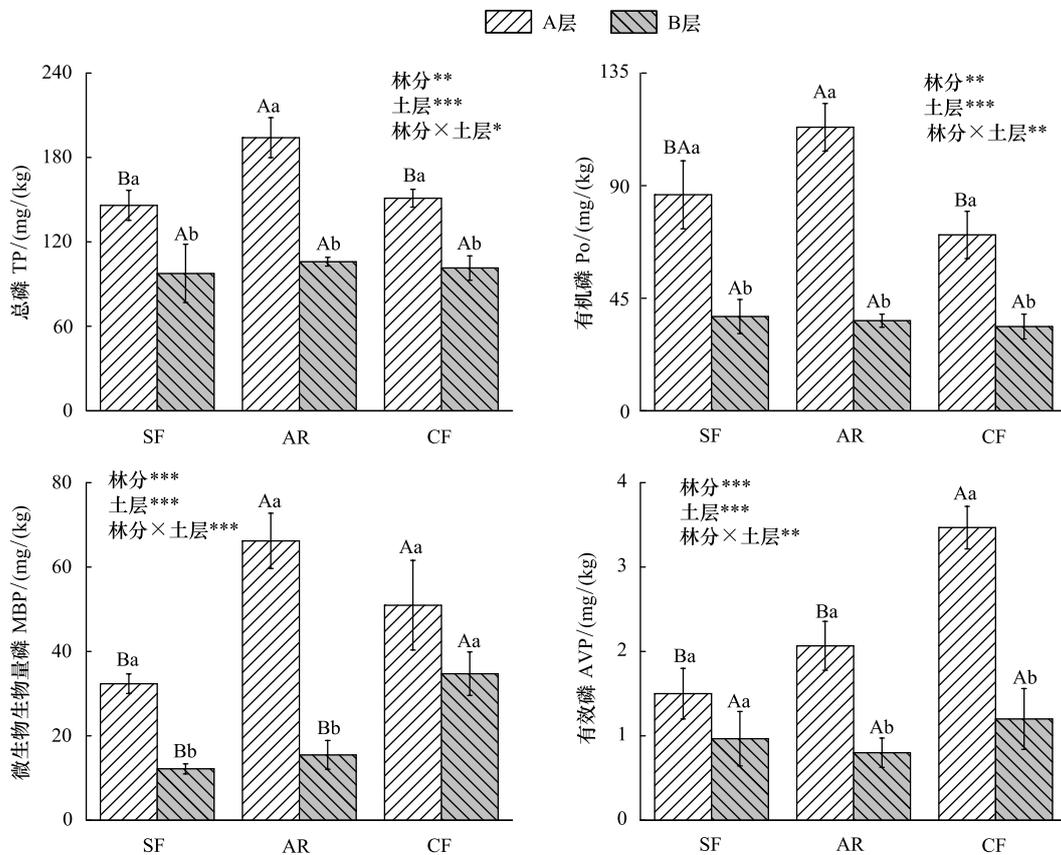


图 1 不同森林类型的各形态土壤磷含量

Fig.1 Phosphorus content of soils at different forest types

SF: 米楮次生林 Secondary broadleaved forests of *Castanopsis carlesii*; AR: 米楮人促林 Human-assisted naturally regenerated forests of *Castanopsis arlesii*; CF: 杉木人工林 Plantation of *Cunninghamia lanceolata*. 不同小写字母表示不同土层间的差异显著, 不同大写字母表示不同森林类型间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差. ns, 表示无显著性影响, \*,  $P < 0.05$ , \*\*,  $P < 0.01$ , \*\*\*,  $P < 0.001$

土壤微生物生物量磷 (MBP) 和酸性磷酸酶活性 (AP) 都反映了土壤中与磷转换相关微生物活动的强弱。林分和土层对两者均有极显著影响 ( $P < 0.001$ )。土壤表层中 MBP 和 AP 在米楮人促更新林最高, 而随着土层的加深两者的含量都降低。在土壤 A 层中, SF 的 MBP 含量显著低于其他两种林型, 而 CF 的酸性磷酸酶活性最低 (图 1 和图 2)。在土壤 B 层中, CF 的 MBP 含量比 SF 和 AR 要高, 而 AP 含量却最低。

#### 2.4 土壤磷与环境因子的相关性

如图 3A 和 3B 所示, 土壤 A 层和 B 层的不同森林样点均进行了较好的聚类, 说明不同森林转换类型均使两个土层中的磷素发生明显变化。RDA 分析第一轴和第二轴分别解释了 A 层变量的 54.3% 和 32.4%, 以及 B 层的 79.4% 和 11.3%。在土壤 A 层中, 土壤含水量、总氮和无定型铁对土壤磷的影响最大。其中, 土壤含水量作用最明显, 其解释了土壤磷变化的 41.1% ( $P = 0.016$ )。在土壤 B 层中, 酸性磷酸酶、游离铁和总氮是土壤磷素变动的最重要影响因子, 其中 AP 的解释度最大, 解释了磷变化的 65.3% ( $P = 0.002$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 森林转换后土壤理化性质的变化

本研究表明, 中亚热带森林转换后, 土壤表层总氮、铵态氮和含水率发生了明显变化 (表 1)。其中, 杉木人工林的铵态氮含量最低, 其他研究也发现类似的结果, 如宋庆妮等<sup>[25]</sup>探讨了森林转换对土壤氮素矿化作用的影响, 发现亚热带天然林转变成人工林时, 土壤氮素有效性会降低, 这可能与叶或根等凋落物的数量和质量

有关<sup>[26]</sup>。与人工林相比,阔叶林(SF或AR)产生的凋落物数量更大,且凋落物中木质素和纤维素等难分解物质的含量更低<sup>[27]</sup>,凋落物的分解速度更快,土壤更容易得到磷素和其他养分的补充。另外,天然林转化成人工林后,一般认为土壤氮矿化作用会减弱<sup>[25]</sup>,进而导致铵态氮含量显著降低。而米楮人促更新林(AR)的总氮含量显著高于其他两种林型,与元晓春等<sup>[28]</sup>在本区域研究结果一致。这可能有两个原因,一方面,米楮人促更新林保留采伐剩余物能够促进微生物充分分解凋落物,将N等养分归还到土壤表层<sup>[29]</sup>;另一方面,有效氮的增加也会影响到总氮的含量。大多研究发现,植被和凋落物持水能力是影响土壤水分含量的主要影响因素<sup>[30]</sup>。本研究中,土壤含水率呈现AR>CF>SF的特征,这可能是因为人促更新林地地表植被丰富、凋落物持水能力强且蒸发较少。

铁铝氧化物是土壤中的重要活性矿物,影响和控制着土壤磷素的吸附-解吸与沉淀、迁移转化等动态过程和生物有效性<sup>[31]</sup>,尤其是游离型铁铝氧化物,是影响红

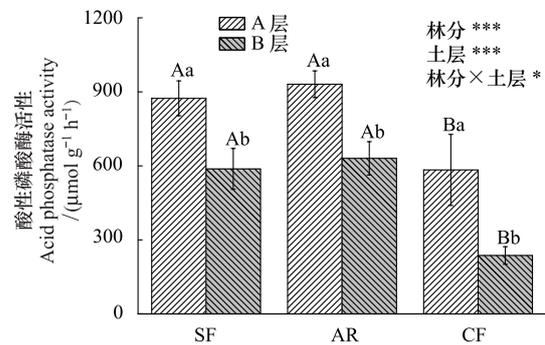


图2 不同森林类型的土壤酸性磷酸酶活性

Fig. 2 Changes in soil acid phosphatase activity at different forest types

SF: 米楮次生林 Secondary broadleaved forests of *Castanopsis carlesii*; AR: 米楮人促林 Human-assisted naturally regenerated forests of *Castanopsis arlesii*; CF: 杉木人工林 Plantation of *Cunninghamia lanceolata*. 不同小写字母表示不同土层间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示不同森林类型间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图中数据为平均值±标准差。ns, 表示无显著性影响, \*,  $P < 0.05$ , \*\*,  $P < 0.01$ , \*\*\*,  $P < 0.001$

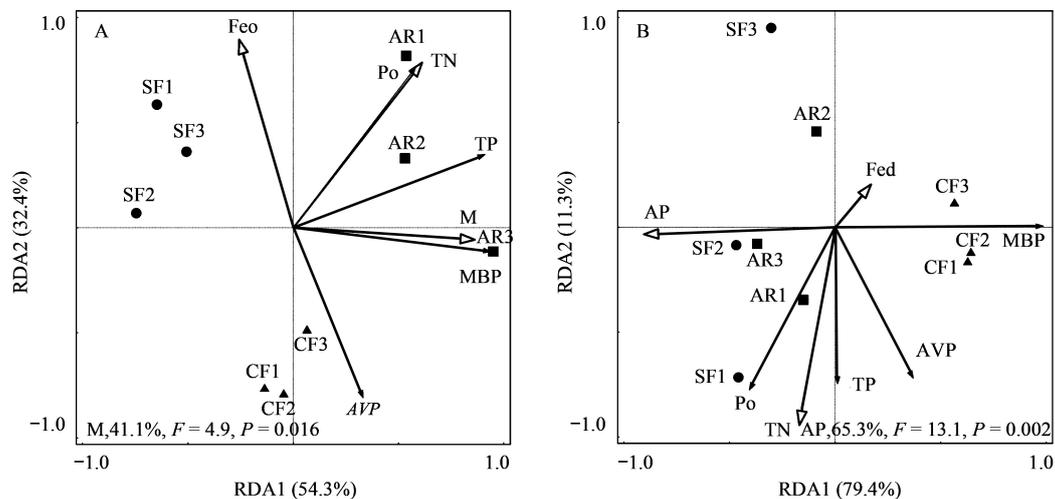


图3 不同森林类型对土壤磷影响的冗余分析图(A: 土壤A层;B: 土壤B层)

Fig. 3 Correlations of soil phosphorus to soil properties as determined by redundancy analysis (RDA) (A: the A horizon; B: the B horizon)

SF1, 2, 3: 米楮次生林 Secondary broadleaved forests of *Castanopsis carlesii*; AR1, 2, 3: 米楮人促林 Human-assisted naturally regenerated forests of *Castanopsis arlesii*; CF1, 2, 3: 杉木人工林 Plantation of *Cunninghamia lanceolata*. RDA 图右下角表示环境因子对土壤磷变化的相应解释比例

壤固磷能力的关键因素<sup>[32]</sup>。本研究中,不同形态的铁铝氧化物中以游离型居多(表2),这与王小红等<sup>[33]</sup>的结果一致。而无定型铁以米楮次生林含量最高,这可能是因为人为干扰加剧了土壤的淋溶作用,促进了铁铝氧化物的转化。

### 3.2 森林转换后土壤磷和酸性磷酸酶的变化

土壤全磷是土壤质量的重要指标,它代表着土壤磷的总储量<sup>[34]</sup>。本研究中米楮人促林的全磷含量明显大于其他两种林型(图1)。研究发现,土壤磷主要来源于成土母质和动植物残体的分解、养分归还<sup>[35]</sup>。相比次生林和人工林,米楮人促林(AR)的养分归还和氮含量明显偏高。尤其是土壤中存在氮磷耦合关系,氮输入

可能会加剧 P 限制作用,为保持稳定的 N:P 比来促进植物对土壤 P 的吸收和利用,微生物会加快分解养分,从而增加 P 来缓解磷限制<sup>[36]</sup>。

有机磷(P<sub>o</sub>)是植物体内重要的磷素来源<sup>[37]</sup>。前期研究发现,P<sub>o</sub>与土壤微生物量、土壤有机物密切相关<sup>[38]</sup>。Brandtberg 等研究发现大面积倒木后山地山毛榉土壤有机磷增加,认为是枯枝落叶层的有机磷转移到土壤中从而提高土壤有机磷含量<sup>[39]</sup>。在本研究中,米楮人促林有机磷含量最高,而杉木人工林最低(图 1)。这可能与森林转换或经营方式改变有关,人促更新保留了采伐物且凋落物量大,而有机碳和总氮含量也会进一步影响到有机磷的积累。

土壤有效磷主要来源于有机磷的矿化,短期的 P 迁移、转化和贮存与植物和微生物密切相关<sup>[40]</sup>。本研究发现,米楮人促林的有效磷含量显著低于杉木人工林,这与有机磷的变化趋势不一致(图 1)。但也有研究表明,外源氮的输入有利于提高磷酸酶活性和促进有机磷矿化,然而土壤有效磷却无显著增加<sup>[41]</sup>。造成这种结果的原因可能是与氮输入有关,之前的研究发现常绿阔叶林土壤氮素供给量大于植被吸收量,而杉木林土壤氮素供应不能满足植被需求<sup>[25]</sup>。米楮人促林一般处于磷限制状态,这将促进土壤微生物或植物根系释放出更多的磷酸酶以促进有机磷矿化,而产生的有效磷通过生物固持和吸收等多种方式被植物所利用<sup>[42]</sup>。因此,土壤有效磷只能反映土壤短期的供磷能力<sup>[28]</sup>。

微生物生物量磷是土壤有机磷的重要组成部分,影响着土壤磷的有效性,是评价土壤环境变化的重要指标<sup>[18]</sup>,更能反映土壤磷素养分供应水平。有研究发现,有机物输入的数量和质量、土壤的 pH 及人类活动等均会影响 MBP 的变化<sup>[43]</sup>。在本研究中,相比米楮人促林和杉木人工林,米楮次生林(SF)的 MBP 含量较低(图 1)。这可能是由于米楮次生林的供植物和微生物直接利用的有效磷含量偏低,出现养分竞争,固持在微生物体内的磷也随之降低<sup>[15]</sup>。而 AR>CF,这主要是由于土壤 A 层中水分差异所致。

土壤酸性磷酸酶在土壤 P 的循环中起重要的作用<sup>[18]</sup>,其活性的高低可以反映土壤 P 的基本状况<sup>[44]</sup>。本研究中杉木人工林的酸性磷酸酶活性显著低于其他两种林型(图 2),Chen 等<sup>[45]</sup>也证实了造林会导致土壤酸性磷酸酶活性降低。其原因是酸性磷酸酶蛋白由 C、N 等基本元素构成<sup>[46]</sup>,米楮次生林和米楮人促林的有机碳和总氮含量较高,这在一定程度上促进了酸性磷酸酶的合成;也有可能是杉木人工林受到 P 限制程度低于人促林和次生林,所以微生物不需要分泌更多的酸性磷酸酶来获取有效 P 供植物利用<sup>[44]</sup>。

### 3.3 土壤磷变化的关键驱动因子

森林转换后,土壤理化性质、铁铝氧化物和酸性磷酸酶等土壤因素会发生显著改变,从而影响到土壤中不同形态磷的积累。本研究中,不同森林土壤 P 变化的驱动因子因土层而异。在 A 层,水分与 MBP、AVP 具有正相关关系(图 3A),是影响土壤磷的主要因子。根据周星梅<sup>[30]</sup>等研究结果,在土壤水分不足条件下,微生物活性会受到抑制,甚至引起微生物死亡,从而导致微生物中的磷释放到土壤中。所以,在土壤水分高的条件下,米楮人促林的 MBP 显著增加。同时,土壤水分的增加通常能够提高微生物活性,加速有机磷矿化<sup>[12]</sup>,并且水分增加有利于磷素的扩散,增加土壤磷的溶解量<sup>[47]</sup>,从而增加植物可利用的有效磷。森林转换改变土壤水分状况,米楮人促林的含水率显著高于杉木人工林。因此,本研究表明水分驱动 A 层土壤微生物生物量磷和有效磷的变化。

在 B 层土壤,酸性磷酸酶活性是驱动土壤磷变化的主要因子(图 3B),这可能与 B 层土壤 P 含量较低有关。通常认为土壤酸性磷酸酶活性与土壤有效磷存在负相关关系<sup>[40]</sup>。在土壤有效磷较低时,酸性磷酸酶活性增强有助于有机磷的矿化,从而提高有效磷含量。此外,酶活性的增强促使磷在微生物细胞内固持,导致微生物与植物的养分竞争加剧,也可能使得植物有效磷含量降低<sup>[15]</sup>。所以,森林转换通过改变土壤磷酸酶活性来影响土壤有机磷的转化和养分竞争,进而影响有效磷的含量。而磷酸酶活性提高,有机磷含量增加,这可能是由于细根周转和微生物代谢较快,可以不断补充被矿化掉的有机磷<sup>[48]</sup>,加上深层土壤矿化速率不高,故有机磷含量仍然保持较高水平。所以,在物质循环和能量流动较差的 B 层,酸性磷酸酶是驱动土壤有效磷和有机磷变化的关键因子。

## 4 结论

本研究中米楮人促林土壤的全磷、有机磷和微生物生物量磷含量显著高于米楮次生林和杉木人工林,能够为植物生长提供较为充足的磷素养分。此外,土壤含水量、总氮和无定型铁是影响 A 层土壤磷的主要因子,而在 B 层酸性磷酸酶、游离型铁和总氮对土壤磷起主要作用。森林转换主要通过改变土壤中的水分和酸性磷酸酶来影响森林生态系统的磷,从而影响土壤 P 循环。因此,森林转换为米楮更新林更有利于土壤磷的储存和转换,从而增加对植物的养分供应,并间接影响亚热带的森林生产力,最终有利于森林生态系统动态和环境可持续性。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Troitinho F, Gil-Sotres F, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S. Effect of land use on some soil properties related to the risk of loss of soil phosphorus. *Land Degradation and Development*, 2008, 19(1): 21-35.
- [ 2 ] Emiru N, Gebrekidan H. Effect of land use changes and soil depth on soil organic matter, total nitrogen and available phosphorus contents of soils in Senbat watershed, western Ethiopia. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 2015, 8(3): 206-212.
- [ 3 ] 张睿, 白杨, 刘娟, 姜培坤, 周国模, 吴家森, 童志鹏, 李永夫. 亚热带天然阔叶林转换为杉木人工林对土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 2946-2952.
- [ 4 ] Pabst H, Kühnel A, Kuzyakov Y. Effect of land-use and elevation on microbial biomass and water extractable carbon in soils of Mt. Kilimanjaro ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 2013, 67(67): 10-19.
- [ 5 ] Chen G S, Yang Y S, Yang Z J, Xie J S, Guo J F, Gao R, Yin Y F, Robinson D. Accelerated soil carbon turnover under tree plantations limits soil carbon storage. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19693.
- [ 6 ] Allen K, Corre M D, Tjoa A, Veldkamp E. Soil nitrogen-cycling responses to conversion of lowland forests to oil palm and rubber plantations in Sumatra, Indonesia. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0133325.
- [ 7 ] Guo J F, Yang Z J, Lin C F, Liu X F, Chen G S, Yang Y S. Conversion of a natural evergreen broadleaved forest into coniferous plantations in a subtropical area: effects on composition of soil microbial communities and soil respiration. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(6): 799-809.
- [ 8 ] Hassler E, Corre M D, Tjoa A, Damris M, Utami S R, Veldkamp E. Soil fertility controls soil-atmosphere carbon dioxide and methane fluxes in a tropical landscape converted from lowland forest to rubber and oil palm plantations. *Biogeosciences Discussions*, 2015, 12(12): 9163-9207.
- [ 9 ] Vincent A G, Schleucher J, Gröbner G, Vestergren J, Persson P, Jansson M, Giesler R. Changes in organic phosphorus composition in boreal forest humus soils: the role of iron and aluminium. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1/3): 485-499.
- [ 10 ] Ågren G I, Wetterstedt J Å M, Billberger M F K. Nutrient limitation on terrestrial plant growth—modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. *New Phytologist*, 2012, 194(4): 953-960.
- [ 11 ] Gnankambary Z, Ilstedt U, Nyberg G, Hien V, Malmer A. Nitrogen and phosphorus limitation of soil microbial respiration in two tropical agroforestry parklands in the South-Sudanese zone of Burkina Faso: the effects of tree canopy and fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 350-359.
- [ 12 ] Hu B, Yang B, Pang X Y, Bao W K, Tian G L. Responses of soil phosphorus fractions to gap size in a reforested spruce forest. *Geoderma*, 2016, 279: 61-69.
- [ 13 ] Zhang H Z, Shi L L, Wen D Z, Yu K L. Soil potential labile but not occluded phosphorus forms increase with forest succession. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(1): 41-51.
- [ 14 ] Moreira A, Moraes L A C, Zaninetti R A, Canizella B T. Phosphorus dynamics in the conversion of a secondary forest into a rubber tree plantation in the amazon rainforest. *Soil Science*, 2013, 178(11): 618-625.
- [ 15 ] Wang J C, Ren C Q, Cheng H T, Zou Y K, Bughio M A, Li Q F. Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: consequences for soil phosphorus forms and microbial community. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 769-778.
- [ 16 ] Yang K, Zhu J J, Yan Q L, Sun O J. Changes in soil P chemistry as affected by conversion of natural secondary forests to larch plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(3): 422-428.
- [ 17 ] Cherubin M R, Franco A L C, Cerri C E P, Karlen D L, Pavinato P S, Rodrigues M, Davies C A, Cerri C C. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. *Geoderma*, 2016, 265: 27-38.
- [ 18 ] Katsalirou E, Deng S P, Gerakis A, Nofziger D L. Long-term management effects on soil P, microbial biomass P, and phosphatase activities in prairie soils. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 76: 61-69.
- [ 19 ] 胥超, 林成芳, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 陈仕东, 谢锦升, 杨玉盛. 森林转换对地表径流可溶性有机碳输出浓度和通量的影响. *生态学报*, 2017, 37(1): 84-92.
- [ 20 ] Huang Z Q, Wan X H, He Z M, Yu Z P, Wang M H, Hu Z H, Yang Y S. Soil microbial biomass, community composition and soil nitrogen

- cycling in relation to tree species in subtropical China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 68-75.
- [21] 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.
- [22] Carter M R, Gregorich E G. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Florida: CRC Press, 1993.
- [23] Brookes P C, Powelson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [24] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [25] 宋庆妮, 杨清培, 余定坤, 方楷, 赵广东, 俞社保. 赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响. *生态学报*, 2013, 33(22): 7309-7318.
- [26] Breulmann M, Schulz E, Weißhuhn K, Buscot F. Impact of the plant community composition on labile soil organic carbon, soil microbial activity and community structure in semi-natural grassland ecosystems of different productivity. *Plant and Soil*, 2012, 352(1/2): 253-265.
- [27] 吴鹏, 王襄平, 张新平, 朱彪, 周海城, 方精云. 东北地区森林凋落叶分解速率与气候、林型、林分光照的关系. *生态学报*, 2016, 36(8): 2223-2232.
- [28] 元晓春, 林伟盛, 蒲晓婷, 杨智榕, 郑蔚, 陈岳民, 杨玉盛. 更新方式对亚热带森林土壤溶液可溶性有机质数量及化学结构的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1845-1852.
- [29] 任卫岭, 郭剑芬, 吴波波, 万菁娟, 纪淑蓉, 刘小飞. 米楮天然更新次生林皆伐地采伐剩余物叶分解及其化学组成变化. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1077-1082.
- [30] 周星梅, 潘开文, 王进闯. 岷江上游本地种油松和外来种辐射松造林对土壤磷的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6630-6637.
- [31] Planavsky N J, Rouxel O J, Bekker A, Lalonde S V, Konhauser K O, Reinhard C T, Lyons T W. The evolution of the marine phosphate reservoir. *Nature*, 2010, 467(7319): 1088-1090.
- [32] 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.
- [33] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 林伟盛, 杨玉盛, 刘志江, 赵本嘉, 苏瑞兰. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2016, 36(9): 2588-2596.
- [34] 张铁钢, 李占斌, 李鹏, 徐国策, 刘晓君, 王添. 土石山区小流域土壤磷素的空间分布特征与有效性. *环境科学学报*, 2016, 36(5): 1810-1815.
- [35] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils; a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [36] Zhang N Y, Guo R, Song P, Guo J X, Gao Y Z. Effects of warming and nitrogen deposition on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in Songnen Meadow Steppe, northeastern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 96-104.
- [37] Turrión M B, López O, Lafuente F, Mulas R, Ruipérez C, Puyo A. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. *Science of the Total Environment*, 2007, 378(1/2): 195-198.
- [38] Stutter M I, Shand C A, George T S, Blackwell M S A, Dixon L, Bol R, MacKay R L, Richardson A E, Condon L M, Haygarth P M. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma*, 2015, 257-258: 29-39.
- [39] Brandtberg P O, Davis M R, Clinton P W, Condon L M, Allen R B. Forms of soil phosphorus affected by stand development of mountain beech (*Nothofagus*) forests in New Zealand. *Geoderma*, 2010, 157(3/4): 228-233.
- [40] 李银, 曾曙才, 黄文娟. 模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 631-636.
- [41] Mirabello M J, Yavitt J B, Garcia M, Harms K E, Turner B L, Wright S J. Soil phosphorus responses to chronic nutrient fertilisation and seasonal drought in a humid lowland forest, Panama. *Soil Research*, 2013, 51(3): 215-221.
- [42] Chen H J. Phosphatase activity and P fractions in soils of an 18-year-old Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. *Forest Ecology and Management*, 2003, 178(3): 301-310.
- [43] Heuck C, Weig A, Spohn M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85: 119-129.
- [44] 郑棉海, 黄娟, 陈浩, 王晖, 莫江明. 氮、磷添加对不同林型土壤磷酸酶活性的影响. *生态学报*, 2015, 35(20): 6703-6710.
- [45] Chen C R, Condon L M, Xu Z H. Impacts of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial processes: a review. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 396-409.
- [46] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2012, 193(3): 696-704.
- [47] 何园球, 李成亮, 刘晓利, 吴大付, 姜灿烂, 王艳玲, 陈平帮. 水分和施磷量对筒育水耕人为土中磷素形态的影响. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1081-1086.
- [48] Chen C R, Condon L M, Davis M R, Sherlock R R. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1/3): 539-557.