

DOI: 10.5846/stxb202102130434

李黄维, 吴小红, 刘婷, 何金松, 王钧, 闫文德. 不同林分土壤磷形态与磷酸酶特征. 生态学报, 2023, 43(3): 1257-1266.

Li H W, Wu X H, Liu T, He J S, Wang J, Yan W D. Characteristics of soil phosphorus fractions and phosphatases activity in different plantations. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1257-1266.

## 不同林分土壤磷形态与磷酸酶特征

李黄维<sup>1,2</sup>, 吴小红<sup>1,2</sup>, 刘 婷<sup>1,2</sup>, 何金松<sup>1,2</sup>, 王 钧<sup>1,2,\*</sup>, 闫文德<sup>1,2</sup>

1 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004

2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

**摘要:**以湖南省平江县国有芦头林场的次生林以及经人工翻垦种植的油茶(*Camellia oleifera*)、黄桃(*Amygdalus persica*)、杨梅(*Myrica rubra*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)四种人工林为研究对象,比较了不同林分土壤理化性质、磷酸酶活性与磷形态特征,分析了三者之间的相关性,探讨了次生林转变为人工林后,土壤磷形态和磷酸酶的变化特征以及驱动土壤磷素形态变化的关键因子。结果表明:(1)次生林土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )含量与磷酸酶活性显著高于其他四种林分。(2)五种林分中土壤残余磷(Residual-P)含量最高,是林地土壤主要的磷素存在形态。林分转变后,黄桃林与杉木林树脂提取态无机磷(Resin-Pi)显著增加,黄桃林与油茶林  $\text{NaHCO}_3$  提取态磷( $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ )含量显著增加,而四种人工林的NaOH提取态有机磷(NaOH-Po)含量均显著降低。可利用磷、中等可利用磷与稳定态磷含量及其占全磷的比例在五种林分中差异显著,其中黄桃林与油茶林可利用磷占全磷比例较高;杨梅林和杉木林中中等可利用磷占总磷比例较高;油茶林与次生林中稳定态磷所占全磷比例较高。(3)相关分析表明土壤中可利用磷与全钾(TK)呈显著正相关,中等可利用磷与硝态氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )呈显著正相关,稳定态磷与SOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均呈显著正相关,磷酸酶活性与SOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著正相关。综上所述,次生林转变为人工林不仅改变了土壤中总磷的含量,而且影响了不同磷形态之间的转化,导致土壤中磷的赋存状况发生改变。

**关键词:** Tiessen 磷分级; 土壤理化性质; 磷形态; 磷酸酶活性

## Characteristics of soil phosphorus fractions and phosphatases activity in different plantations

LI Huangwei<sup>1,2</sup>, WU Xiaohong<sup>1,2</sup>, LIU Ting<sup>1,2</sup>, HE Jinrong<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2,\*</sup>, YAN Wende<sup>1,2</sup>

1 College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory of Applied Technology for Forestry and Ecology in Southern China, Changsha 410004, China

**Abstract:** In order to clarify the differences in soil phosphorus forms and phosphatase activities in different forest types, we investigated the characteristics of soil properties, phosphorus (P) fractions, and phosphatase activities in a secondary forest and four artificial plantations (*Camellia oleifera*, *Amygdalus persica*, *Myrica rubra* and *Cunninghamia lanceolata*) in Lutou National Station for Scientific Observation and Research of Forest Ecosystems, Hunan Province. Correlations among soil properties, phosphorus fractions and phosphatase activities were analyzed, and the influencing factors driving the differences in soil phosphorus forms and phosphatase activities were identified. The results showed that: (1) the contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and the activities of phosphatase in the secondary forest were higher than in the four plantations. (2) the content of residual-P was the highest in the five forest types, and residual-P was the dominant phosphorus form in forest soils. After forest conversion, resin extractable inorganic P (Resin-

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32171761, U21A20187); 中南林业科技大学研究生科技创新基金项目(CX20191006, CX202102023)

**收稿日期:** 2021-02-13; **网络出版日期:** 2022-10-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jwang0829@vip.163.com

Pi) increased significantly in *Amygdalus persica* and *Cunninghamia lanceolata* plantations. The contents of  $\text{NaHCO}_3$  extractable P ( $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ ,  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ ) increased significantly in *Amygdalus persica* and *Camellia oleifera* plantations, whereas the content of NaOH extracted organic P ( $\text{NaOH-Po}$ ) decreased significantly in all plantations. The contents and proportions of easily-available P, moderately-available P and non-available P in soils differed significantly among the five forest types. The proportion of easily-available P in total P was higher in *Amygdalus persica* and *Camellia oleifera* plantations than in other forests, while a higher proportion of moderately-available P in total P was found in *Myrica rubra* plantations and *Cunninghamia lanceolata* plantations. The proportion of non-available P in total P was higher in *Camellia oleifera* and the secondary forest compared with other forests. (3) correlation analysis demonstrated that easily-available P was positively correlated with total potassium (TK), moderately-available P was positively correlated with nitrate nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), non-available P was positively correlated with SOC, TN,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , and phosphatase activity was positively correlated with SOC, TN,  $\text{NH}_4\text{-N}$ . In conclusion, the conversion of secondary forest to plantations not only changed the soil total P contents, but also affected the transformation of phosphorus forms, resulted in the differences of the occurrence of P in soil.

**Key Words:** Tiessen phosphorus fractionation; soil physical and chemical properties; phosphorus forms; soil phosphatase activity

磷(phosphorus, P)在土壤中以多种形态存在,是植物生长所必须的大量元素之一,也是影响植物生长的主要限制因子<sup>[1]</sup>。我国亚热带地区红壤富含铁铝,土壤中的磷容易被铁、铝等离子固定形成难溶性磷<sup>[2]</sup>,导致土壤中有效磷含量较低,磷素已成为该地区林木生长的重要限制性养分之一<sup>[3]</sup>。土壤磷有效性主要取决于其在土壤中的存在形态,不同形态的磷素可以相互转化,且他们之间的转化与植被类型<sup>[4]</sup>、凋落物输入<sup>[5]</sup>和土地利用方式<sup>[6]</sup>等关系密切。因此,有必要研究亚热带地区不同森林生态系统土壤磷素形态特征,以便更好地了解亚热带地区不同林分生长对土壤磷素形态转化和磷有效性的影响。

土壤磷酸酶与土壤磷素循环关系密切,是土壤中广泛存在的一类水解酶<sup>[7]</sup>。在磷酸酶的催化作用下,微生物可以将土壤中的有机磷矿化为无机磷,从而提高土壤磷的有效性<sup>[8]</sup>。研究发现,土壤磷酸酶活性受土壤有机质、全氮以及有机磷的含量等环境因子的影响<sup>[9]</sup>。除此之外,化肥农药的施用、地被物管理和覆膜等管理措施也会影响土壤磷酸酶活性<sup>[10]</sup>。不同类型森林土壤由于其土壤养分、土壤微生物以及管理措施上存在差异,可能会对磷形态与磷酸酶活性产生影响,进而影响土壤磷的有效性,但目前关于不同林分土壤磷形态与磷酸酶活性等研究较少,需进一步深入研究。

我国有大量的次生林,约占全国森林总面积的 62%<sup>[11]</sup>,因此,次生林对森林生态系统服务功能的维持至关重要。随着我国人口的快速增长,人们对经济林产品和木材需求量的增加,大量次生林转变为人工林<sup>[12]</sup>。次生林转变为人工林导致生物多样性丧失<sup>[13]</sup>、土壤养分流失<sup>[14]</sup>和生态系统退化<sup>[15]</sup>等生态环境问题的出现。近年来,有关林分变化对土壤结构、碳氮养分和土壤微生物群落等的影响已有较多研究<sup>[16]</sup>,但对次生林转变为人工林后土壤磷形态以及磷酸酶活性特征变化了解有限。因此,本文以次生林以及由次生林转变而来的油茶林、黄桃林、杨梅林和杉木林为研究对象,对比不同林分土壤理化性质、磷形态和磷酸酶活性差异,分析三者之间的相关性,探讨次生林转变为人工林后,土壤磷形态和磷酸酶活性的变化特征以及驱动土壤磷素形态变化的关键因子,以期亚热带森林生态系统可持续性管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于湖南省平江县国有芦头林场,海拔 124—1969m,属于亚热带季风气候。该地区年平均气温 9.6—15.8℃,年均降水量 1969mm,全年无霜期为 186—245d<sup>[17]</sup>。试验区原有次生林主要为常绿阔叶林,主要树种有甜槠(*Castanopsis eyrei*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)和木荷(*Schima*

*superba*)等。2013年,该地区大面积的次生林经人工开垦改造为油茶、黄桃、杨梅和杉木四种人工林地。人工林种植以后,油茶林每年5月份施用 $163\text{kg}/\text{hm}^2$ 硫酸钾复合肥( $\text{N}:\text{P}:\text{K}=1:1:2$ );黄桃林与杨梅林每年10月份施用 $4356\text{kg}/\text{hm}^2$ 有机肥,其中黄桃林在每年7月增施硫酸钾复合肥,施肥量为 $545\text{kg}/\text{hm}^2$ ;杉木林无人工管理措施,次生林无人工干扰<sup>[18]</sup>。

## 1.2 样地设置与样品采集

2018年,在立地条件基本一致的次生林、黄桃林、油茶林、杨梅林和杉木林内各设置3个 $10\text{m}\times 10\text{m}$ 样地。在每个样地中,去除地表凋落物后随机选择5个样点采集0—20cm表层土壤,混合均匀后去除石砾和根系等杂物,迅速带回实验室。然后将土壤样品分为两部分,一部分放置于阴凉干燥处风干用于土壤理化性质与磷形态的测定;另一部分样品保存于 $4^\circ\text{C}$ 冰箱中,用于测定酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性。

## 1.3 土壤样品分析方法

土壤pH采用玻璃电极pH计测定( FE20 Mettler-Toledo, 美国 ),水土比为2.5:1;土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾加热法测定,土壤全氮(total nitrogen, TN)采用凯式定氮法进行测定;土壤全磷(total phosphorus, TP)采用钼锑抗比色法进行测定;土壤全钾(total potassium, TK)采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP, Optima 3000 PerkinElmer, 美国)进行测定;土壤硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )含量采用 $2\text{mol}/\text{L}$  KCl浸提后,通过流动分析仪(Skalar san++, Skalar, 荷兰)进行测定<sup>[19]</sup>。土壤中磷形态含量采用Tiessen提出的改良Hedley磷素分级方法<sup>[20]</sup>,分别提取出树脂提取态无机磷(Resin-Pi)、碳酸氢钠提取态磷( $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ )、氢氧化钠提取态磷( $\text{NaOH-Pi}$ 、 $\text{NaOH-Po}$ )、HCl提取态无机磷(HCl-Pi)以及残余磷(Residual-P),提取后采用钼锑抗比色法进行测定。将逐级提取的不同形态磷的有效性分为三类:(1)可利用磷(Easily-available P, EAP),即Resin-Pi与 $\text{NaHCO}_3$ 提取态磷,其中Resin-Pi与 $\text{NaCO}_3\text{-Pi}$ 是可以直接被植物所吸收利用的磷形态, $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 是容易被转化为植物可直接吸收利用的磷形态;(2)中等可利用磷(Moderately-available P, MAP),即 $\text{NaOH-Pi}$ 与 $\text{NaOH-Po}$ ,被土壤中的铝、铁之间的共价键所吸附,参与了长期的磷转化;(3)稳定态磷(Non-available P, NAP),即HCl-Pi与Residual-P,相对不溶,与土壤中的钙有关,难以被植物所利用。采用对硝基苯磷酸二钠法(PNP)在 $\text{pH}=6.5$ 下测定不同林分土壤酸性磷酸酶活性(ACP),在 $\text{pH}=11$ 下测定土壤碱性磷酸酶活性(ALP)<sup>[21]</sup>。

## 1.4 数据处理与分析

采用单因素方差分析(one-way-ANOVA)比较不同林分土壤理化性质、磷酸酶活性、磷形态和磷有效性的差异显著性,并利用GraphPad Prism 8.0软件制图。采用SPSS 27.0对土壤理化性质、磷酸酶活性、磷形态和磷有效性进行相关性分析,本研究中显著性水平设为 $P<0.05$ 。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同林分土壤理化性质特征

如图1所示,五种林分中次生林pH最低,黄桃林pH最高,次生林转变为人工林后pH升高,但差异未达显著性水平。次生林SOC含量显著高于其他四种林分( $P<0.05$ )。土壤TN含量表现为次生林最高( $2.60\text{g}/\text{kg}$ ),油茶林仅为次生林的30.77%。TK含量在黄桃林最高( $3.61\text{mg}/\text{kg}$ ),显著高于其他四种林分( $P<0.05$ ),次生林最低( $3.05\text{mg}/\text{kg}$ )。  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量次生林最高为 $19.03\text{mg}/\text{kg}$ ,显著高于其他四种林分( $P<0.05$ ),杨梅林最低( $7.09\text{mg}/\text{kg}$ ),仅为次生林的37.25%。土壤中 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量表现为杨梅林>次生林>黄桃林>杉木林>油茶林。

## 2.2 不同林分土壤磷酸酶活性特征

不同林分土壤磷酸酶活性特征如图2所示,次生林土壤ACP活性最高( $90.36\mu\text{mol PNP g}^{-1}\text{ h}^{-1}$ ),分别比杉木林、油茶林、杨梅林和黄桃林高90.05%,92.43%,95.01%和97.40%,且次生林和人工林土壤ACP活性差异显著( $P<0.05$ )。四种人工林土壤ALP活性均显著低于次生林( $P<0.05$ ),油茶林、杉木林、杨梅林和黄桃林

土壤 ALP 活性分别比次生林低 43.71%,61.12%,64.23%和 68.34%,黄桃林、杨梅林和杉木林土壤 ALP 活性差异不显著( $P>0.05$ )。

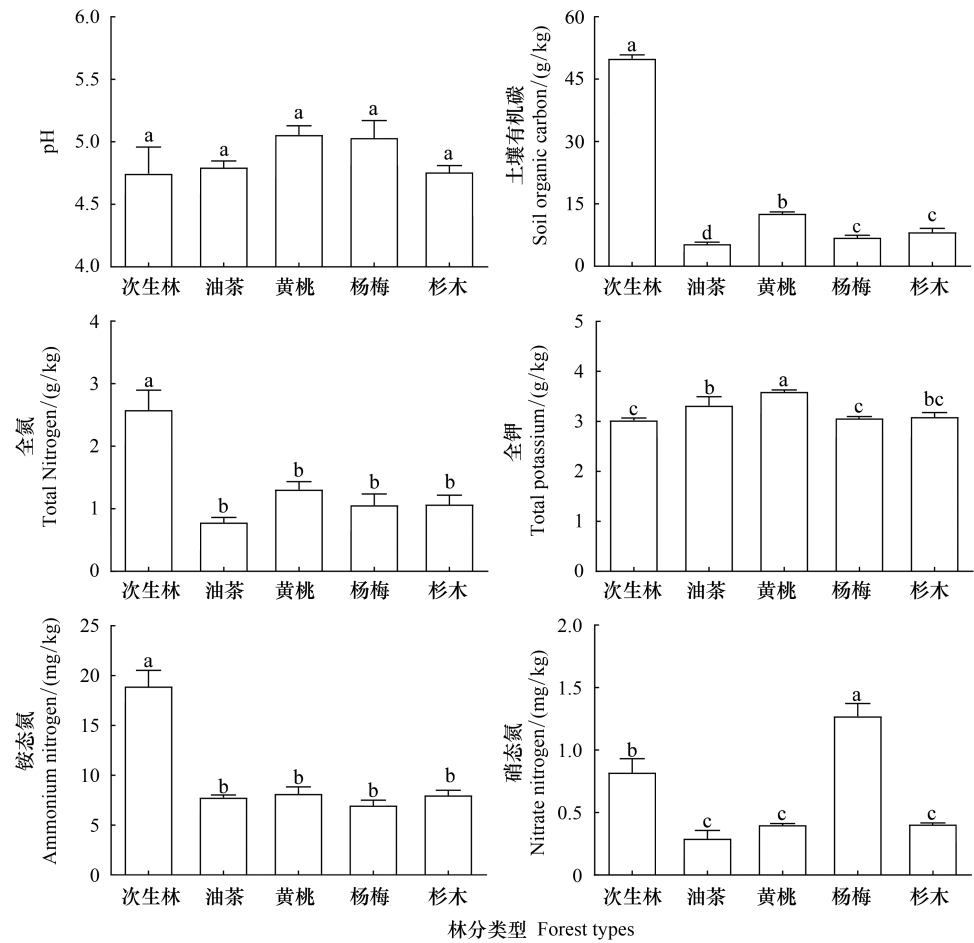


图 1 不同林分土壤理化性质

Fig.1 Soil properties in five forest types

不同小写字母表示不同林分间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ( $n = 3$ )

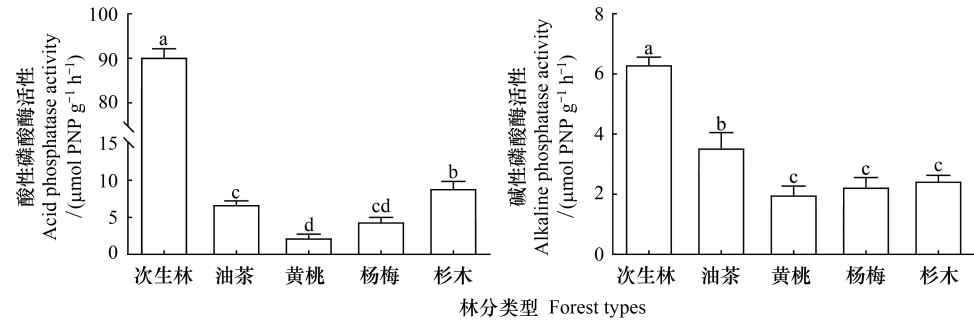


图 2 不同林分土壤酸性磷酸酶与碱性磷酸酶活性

Fig.2 Soil acid phosphatase and alkaline phosphatase activity in five forest types

不同小写字母表示不同林分间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ( $n = 3$ ); PNP: 对硝基苯磷酸二钠法

2.3 不同林分土壤磷形态特征

2.3.1 不同林分土壤磷形态含量

不同林分土壤磷形态含量如图 3 所示, 土壤中 Resin-Pi 含量表现为杉木林>黄桃林>油茶林>次生林>杨

梅林,且杉木林显著高于其他四种林分( $P<0.05$ );黄桃林土壤中  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  含量最高,为  $25.36\text{mg/kg}$ ,显著高于其他四种林分( $P<0.05$ ),但次生林、杨梅林和杉木林  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  含量差异不显著;油茶林土壤中  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  含量最高为  $20.78\text{mg/kg}$ ,且与其他林分差异显著( $P<0.05$ )。杨梅林土壤中  $\text{NaOH-Pi}$  含量显著高于其他林分,含量为  $43.89\text{mg/kg}$ 。次生林土壤  $\text{NaOH-Po}$  含量显著高于其他林分( $P<0.05$ ),但  $\text{NaOH-Po}$  含量在油茶林、杨梅林和杉木林中无显著差异。土壤  $\text{HCl-Pi}$  含量在五种林分之间没有显著差异。次生林和黄桃林中土壤  $\text{Residual-P}$  含量显著高于油茶林、杨梅林和杉木林( $P<0.05$ )。

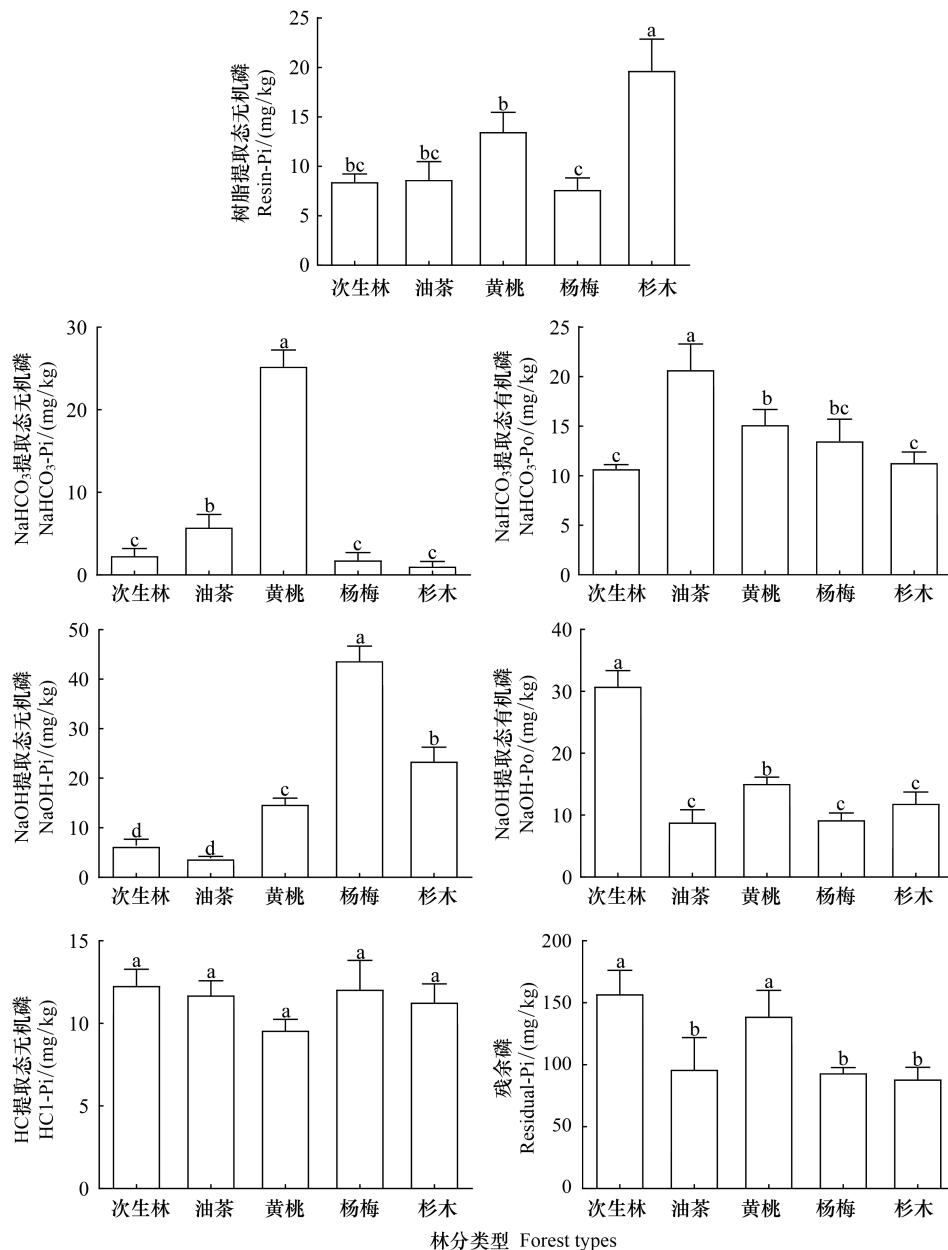


图3 不同林分土壤磷形态特征

Fig.3 Soil phosphorus forms in five forest types

不同小写字母表示不同林分间差异显著 ( $P<0.05$ ), 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ( $n=3$ )

### 2.3.2 不同林分土壤磷有效性特征

由图4可知,从不同有效性磷含量来看,五种林分均以NAP含量最高。土壤EAP含量在五种林分中差

异显著 ( $P<0.05$ ), 呈现黄桃林>油茶林>杉木林>杨梅林>次生林的变化趋势; 土壤 MAP 含量在杨梅林最高, 油茶林最低, 且次生林、杉木林和黄桃林中土壤 MAP 含量差异不显著。土壤 NAP 含量在次生林最高, 显著高于油茶林、杨梅林和杉木林 ( $P<0.05$ ), 但与黄桃林差异不显著。

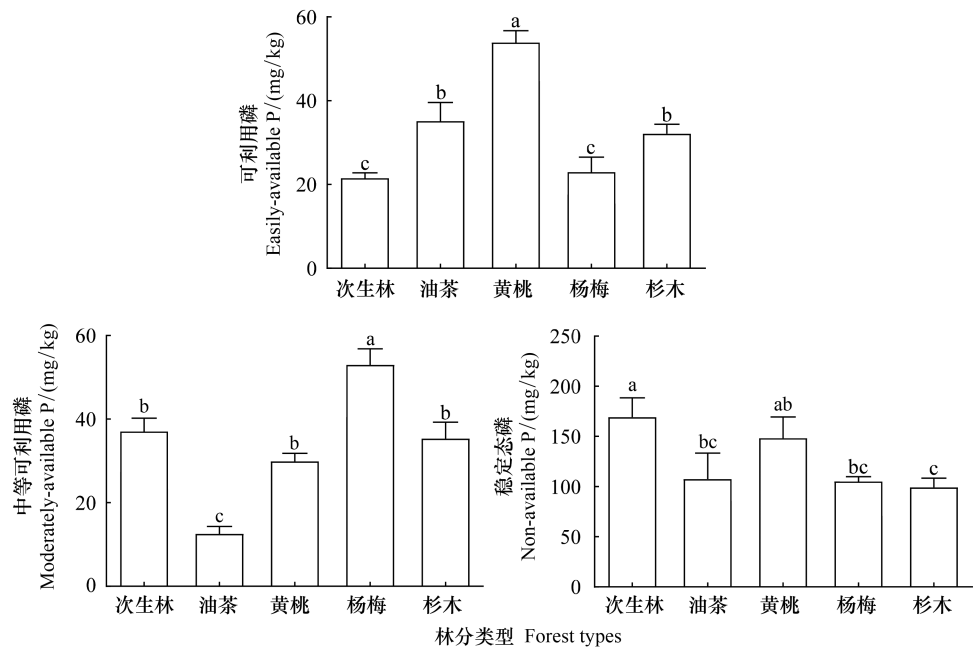


图 4 不同林分中可利用磷、中等可利用磷与稳定态磷含量

Fig.4 Contents of easily-available phosphorus, moderately-available phosphorus, and non-available phosphorus in five forest types

不同小写字母表示不同林分间差异显著 ( $P<0.05$ ), 图中数据为平均值±标准差 ( $n=3$ )

五种林分中, 土壤 TP 含量为黄桃林>次生林>杨梅林>杉木林>油茶林, 其中黄桃林与次生林 TP 含量显著高于杨梅、杉木和油茶三种林分 ( $P<0.05$ )。不同有效性磷占 TP 的比例因林分类型而异, 土壤 EAP 占比表现为黄桃林 (23.18%)>油茶林 (22.58%)>杉木林 (19.33%)>杨梅林 (12.67%)>次生林 (9.67%); 土壤 MAP 占比在杨梅林最高, 为 29.13%, 而油茶林中最低, 仅为 8.19%; 不同林分土壤 NAP 占比在次生林 (74.23%) 和油茶林 (69.24%) 较高, 而杨梅林最低 (图 5)。

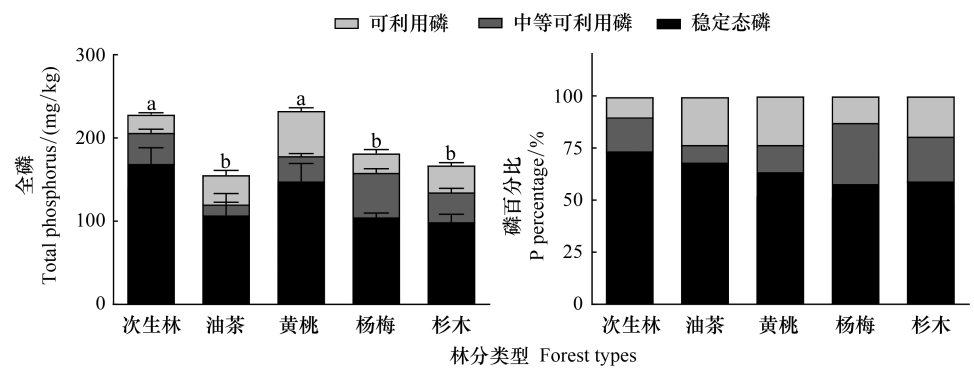


图 5 不同林分可利用磷、中等可利用磷和稳定态磷在全磷中的占比

Fig.5 Proportion of easily-available phosphorus, moderately-available phosphorus and non-available phosphorus in total phosphorus in five forest types

不同小写字母表示不同林分间差异显著 ( $P<0.05$ ), 图中数据为平均值±标准差 ( $n=3$ )

## 2.4 磷形态和磷酸酶活性与土壤理化性质的相关性分析

相关分析表明(表1), Resin-Pi 与土壤理化性质的相关性未达到显著性水平;  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$  与全磷和全钾呈显著正相关( $P<0.05$ );  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  与全氮呈显著负相关( $P<0.05$ );  $\text{NaOH-Pi}$  和 MAP 均与硝态氮呈显著正相关( $P<0.05$ );  $\text{NaOH-Po}$ 、Residual-P 和 NAP 均与有机碳、全氮、全磷和铵态氮呈显著正相关( $P<0.05$ );  $\text{HCl-Pi}$  与全钾呈显著负相关( $P<0.05$ ); EAP 与全钾呈显著正相关( $P<0.01$ ), 与硝态氮呈显著负相关; ACP 和 ALP 与有机碳、全氮、铵态氮均显著正相关( $P<0.01$ )。

表1 土壤理化性质、磷酸酶与土壤磷形态的相关分析

Table 1 Pearson correlation analysis among soil properties, phosphatase activities and soil phosphorus forms

| 土壤磷形态与磷酸酶<br>Soil phosphorus forms and<br>phosphatase activities             | 土壤理化性质 Soil properties |                                 |                         |                           |                          |                            |                             |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                                                                              | pH                     | 土壤有机碳<br>Soil organic<br>carbon | 全氮<br>Total<br>nitrogen | 全磷<br>Total<br>phosphorus | 全钾<br>Total<br>potassium | 硝态氮<br>Nitrate<br>nitrogen | 铵态氮<br>Ammonium<br>nitrogen |
| 树脂提取态无机磷<br>Resin extractable inorganic phosphorus                           | -0.14                  | -0.272                          | -0.199                  | -0.058                    | 0.062                    | -0.491                     | -0.261                      |
| $\text{NaHCO}_3$ 提取态无机磷<br>$\text{NaHCO}_3$ extractable inorganic phosphorus | 0.395                  | -0.144                          | -0.084                  | 0.516 *                   | 0.819 **                 | -0.38                      | -0.205                      |
| $\text{NaHCO}_3$ 提取态有机磷<br>$\text{NaHCO}_3$ extractable organic phosphorus   | 0.047                  | -0.506                          | -0.540 *                | -0.368                    | 0.44                     | -0.398                     | -0.433                      |
| NaOH 提取态无机磷<br>NaOH extracted inorganic phosphorus                           | 0.337                  | -0.417                          | -0.265                  | -0.153                    | -0.266                   | 0.649 **                   | -0.445                      |
| NaOH 提取态有机磷<br>NaOH extracted organic phosphorus                             | -0.214                 | 0.975 **                        | 0.946 **                | 0.648 **                  | -0.236                   | 0.146                      | 0.918 **                    |
| HCl 提取态无机磷<br>HCl extracted inorganic phosphorus                             | -0.004                 | 0.256                           | 0.37                    | -0.274                    | -0.527 *                 | 0.42                       | 0.285                       |
| 残余磷<br>Residual phosphorus                                                   | -0.115                 | 0.732 **                        | 0.692 **                | 0.921 **                  | 0.225                    | 0.078                      | 0.659 **                    |
| 可利用磷<br>Easily-available phosphorus                                          | 0.265                  | -0.385                          | -0.32                   | 0.258                     | 0.803 **                 | -0.622 *                   | -0.404                      |
| 中等可利用磷<br>Moderately-available phosphorus                                    | 0.226                  | 0.184                           | 0.332                   | 0.258                     | -0.443                   | 0.802 **                   | 0.117                       |
| 稳定态磷<br>Non-available phosphorus                                             | -0.116                 | 0.749 **                        | 0.713 **                | 0.916 **                  | 0.205                    | 0.097                      | 0.676 **                    |
| 酸性磷酸酶<br>Acid phosphatase activity                                           | -0.318                 | 0.981 **                        | 0.895 **                | 0.444                     | -0.426                   | 0.221                      | 0.963 **                    |
| 碱性磷酸酶<br>Alkaline phosphatase activity                                       | -0.362                 | 0.861 **                        | 0.790 **                | 0.298                     | -0.317                   | 0.097                      | 0.874 **                    |

\* 表示相关系数  $P<0.05$ ; \*\* 表示相关系数  $P<0.01$

## 3 讨论

### 3.1 林分转变对土壤理化性质的影响

人工林土壤 pH 与次生林相比有所升高,这是由于在林分转变过程中人为砍伐、翻垦和人工林施肥等措施导致土壤中可交换阳离子增加<sup>[22]</sup>。SOC 是反映土壤肥力丰缺状况的重要指标<sup>[23]</sup>。次生林转变为人工林后,土壤 SOC 含量下降了 75%—90%。导致土壤 SOC 下降的因素有两方面:一方面是凋落物的影响,相比于人工林,次生林表层土壤凋落物量更大,通过地表凋落物输入土壤的有机物更多,次生林转变为人工林的过程中,由于去除了林下植被和凋落物,从而导致次生林中通过凋落物输入到土壤的 SOC 减少<sup>[24]</sup>;另一方面是由于次生林土壤中细根生物量较大,周转较快,土壤微生物代谢相对旺盛,归还至土壤中的 SOC 含量相对较高<sup>[25]</sup>。土壤氮素来源于凋落物的分解、生物量的积累,具有明显的表聚性。人工林中的除草、翻垦、凋落物去除等管理措施会加剧水土流失,造成氮素的流失<sup>[26]</sup>,因此林分转变后土壤中的 TN 含量迅速下降,最大降幅达 70%。人工林土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量低于次生林,这与向升华<sup>[27]</sup>研究一致,表明土壤表层的速效氮含量

与林分类型和林龄密切相关。在四种人工林中,黄桃林除了施用有机肥外,还会额外增施复合肥,有机肥和无机肥的联合使用使得黄桃林土壤中 SOC、TN、TK 的含量高于油茶林、杨梅林和杉木林<sup>[28]</sup>。在次生林转变为人工林过程中引起的植物多样性减少,会造成土壤养分流失,因此为了使人工林土壤养分保持良性循环,建议在人工林地合理补充肥料。

### 3.2 林分转变对土壤磷酸酶活性的影响

酸性磷酸酶和碱性磷酸酶均可促进土壤有机磷的水解,使其转化为能被植物和微生物直接吸收利用的磷素形态<sup>[29]</sup>。杨文娜等<sup>[30]</sup>的研究表明,分泌磷酸酶是植物和微生物在低磷胁迫下增加有效磷供给的重要方式,而当土壤中存在较高含量的可利用磷时,植物根系会直接利用这一部分磷,减少磷酸酶的分泌,造成磷酸酶活性下降<sup>[31]</sup>。林分转变后,四种人工林土壤 ACP 与 ALP 活性均显著下降,这可能是因为人工林施肥等措施增加了土壤可利用磷含量,缓解了人工林植物和微生物的磷胁迫<sup>[32]</sup>,使得人工林中磷酸酶分泌减少,土壤磷酸酶活性下降。

### 3.3 林分转变对土壤磷形态特征的影响

林分变化影响着土壤磷素循环及其赋存形态。本研究中,油茶林、杨梅林与杉木林土壤 TP 含量均显著低于次生林,这可能是由于人工林中地上植被和凋落物量的减少导致归还到土壤中的养分减少<sup>[4,6]</sup>,从而使得人工林土壤 TP 含量低于次生林。黄桃林由于施用了复合肥,增加了土壤中磷素的投入<sup>[28]</sup>,因而黄桃林 TP 含量与次生林并无显著差异。尽管杨梅林也施用了复合肥,但是由于杨梅是固氮植物,固氮植物根系附着的根瘤菌能够以氮固磷,促进其对磷素的吸收<sup>[33]</sup>,致使杨梅林中施用有机肥对土壤 TP 的补充作用弱于黄桃林。Resin-Pi 是被土壤胶体吸附的无机磷组分,是可以直接被植物利用的磷形态。相比次生林,人工林土壤中 Resin-Pi 含量更高,这与刘旭军等<sup>[34]</sup>的研究结果一致,可能是因为人工林比次生林植被矮、生物量更低,植物对土壤中 Resin-Pi 的吸收相对较少,因而人工林土壤 Resin-Pi 含量高于次生林。NaHCO<sub>3</sub>-Pi 主要是吸附在土壤颗粒表面的易溶态无机磷组分,黄桃林与油茶林 NaHCO<sub>3</sub>-Pi 含量显著高于其他三种林分,可能是由于这两种林分施加了复合肥(N:P:K=1:1:2),从而导致具有较高的 NaHCO<sub>3</sub>-Pi 含量<sup>[35]</sup>。NaHCO<sub>3</sub>-Po 在微生物作用下可以被矿化分解为无机态磷,该组分在人工林中含量高于次生林,一方面可能是由于人工林 ACP 和 ALP 活性低于次生林,有机磷的分解矿化弱于次生林,另一方面可能与人工林(尤其是油茶林、黄桃林和杨梅林)施用了无机肥和有机肥有关,已有研究表明,施肥是提升土壤 NaHCO<sub>3</sub>-Po 含量的重要因素<sup>[36]</sup>。土壤 NaOH-Po 主要由腐殖酸、褐菌素等有机磷组组成,同时腐殖酸也是 SOC 的组成部分,人工林中由于地表凋落物的大量减少<sup>[37]</sup>及 SOC 含量的降低,导致了四种人工林中 NaOH-Po 含量的显著降低。

相比次生林,人工林土壤 EAP 含量及其在 TP 中的占比更高。有研究认为 SOC 是影响可利用磷的重要因子,SOC 含量高的土壤具有更高的 EAP 含量<sup>[38]</sup>。在本研究中,尽管次生林土壤中 SOC 含量明显高于其他四种林分,但 EAP 含量却最低,这可能是受到了施肥的影响,人工林在经营过程中输入的肥料增加了土壤中 EAP 含量。MAP 比 EAP 稳定,但可以在短时间内转化为活性磷供植物和微生物利用<sup>[39]</sup>。由于 MAP 的含量与植被类型有关<sup>[40]</sup>,本研究中五种林分的 MAP 含量不一,没有明显的变化规律。次生林转变为人工林后,NAP 的含量及其在 TP 中的占比均有所下降。NAP 代表土壤中长期尺度上能转化有效态磷的磷组分,从长期来看 NAP 含量的下降将不利于人工林的生长<sup>[41]</sup>。综上所述,林分转变不仅改变了土壤 SOC 和 TN 含量,同样也对土壤磷形态及其有效性产生了影响,因此需要通过更合理的林业管理方式来减缓或阻止土壤中潜在磷素的流失。

## 4 结论

(1) 次生林 SOC、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量与磷酸酶活性显著高于( $P<0.05$ )其他四种林分。

(2) 五种林分中 Residual-P 含量最高,表明 Residual-P 是林地土壤中主要的磷素存在形态。林分转变后,四种人工林的 NaOH-Po 含量显著降低,而黄桃林与杉木林 Resin-Pi 显著增加,黄桃林与油茶林 NaHCO<sub>3</sub>-Pi 与

NaHCO<sub>3</sub>-Po 含量显著增加。五种林分之间 EAP、MAP 与 NAP 含量及其占 TP 的比例差异显著,其中黄桃林与油茶林 EAP 占 TP 的比例较高;杨梅林和杉木林 MAP 占 TP 的比例较高;油茶林与次生林中 NAP 所占 TP 的比例较高。

(3) 相关分析表明土壤中 EAP 与 TK 呈显著正相关,MAP 与 NH<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 呈显著正相关,NAP 与 SOC、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 均呈显著正相关,磷酸酶活性与 SOC、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 显著正相关。

本文研究表明次生林转变为人工林后,可利用磷含量增加,稳定态磷含量降低,这说明人工林通过引入施肥、除草、翻垦等管理措施后在短期内能提高土壤中可利用磷的含量,但从长远来看,林分转变所带来的土壤肥力降低、植被多样性减少,以及不合理的施肥制度和管理措施,可能会造成稳定态磷的降低,进而会导致土壤潜在磷库减少并影响到土壤的长期磷循环过程,造成亚热带地区土壤磷的积累量减少。

#### 参考文献 (References):

- [1] 田沐雨,郭静,武国慧,汪景宽. 全球气候变化对草地土壤磷循环的影响研究进展. 土壤通报, 2020, 51(4): 996-1002.
- [2] 李杰,石元亮,陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况. 土壤通报, 2011, 42(3): 763-768.
- [3] 赵琼,曾德慧. 林木生长氮磷限制的诊断方法研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(1): 122-128.
- [4] 肖华翠,李靖雯,夏允,杨柳明,林燕语,范跃新. 中亚热带不同母质发育森林土壤磷组分特征及其影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(1): 16-22.
- [5] 张磊,贾淑娟,李啸灵,陆宇明,林伟盛,郭剑芬. 亚热带米槠天然林凋落物和根系输入变化对土壤磷组分的影响. 生态学报, 2022, 42(2): 656-666.
- [6] 钱前,章润阳,刘坤平,梁月明,张伟,潘复静. 喀斯特不同土地利用方式和生态恢复模式的土壤磷素特征. 生态学杂志, 1-10.
- [7] 朱芸芸,李敏,曲博,赵墩,滕泽栋. 湿地植物根际土壤磷酸酶活性变化规律研究. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 106-112.
- [8] 乌力吉,李响,赵萌莉,白永飞. 放牧对草地生态系统磷循环调控机制的研究进展与展望. 科学通报, 2020, 65(23): 2469-2482.
- [9] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究. 安徽技术师范学院学报, 2001, 15(4): 5-8.
- [10] 马晓霞,王莲莲,黎青慧,李花,张树兰,孙本华,杨学云. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5502-5511.
- [11] Zhu J J, Mao Z H, Hu L L, Zhang J X. Plant diversity of secondary forests in response to anthropogenic disturbance levels in montane regions of northeastern China. Journal of Forest Research, 2007, 12(6): 403-416.
- [12] Guillaume T, Damris M, Kuzyakov Y. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by  $\delta^{13}C$ . Global Change Biology, 2015, 21(9): 3548-3560.
- [13] Xiao H F, Tian Y H, Zhou H P, Ai X S, Yang X D, Schaefer D A. Intensive rubber cultivation degrades soil nematode communities in Xishuangbanna, southwest China. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 76: 161-169.
- [14] 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.
- [15] Liu T, Wu X H, Li H W, Alharbi H, Wang J, Dang P, Chen X Y, Kuzyakov Y, Yan W D. Soil organic matter, nitrogen and pH driven change in bacterial community following forest conversion. Forest Ecology and Management, 2020, 477: 118473.
- [16] 曹升,胡华英,张虹,周垂帆,刘博. 我国南方人工林土壤有效磷匮乏原因及对策分析. 世界林业研究, 2019, 32(3): 78-84.
- [17] 和晓风,林辉,孙华,严恩萍. 芦头林场森林景观格局随地形分异特征研究. 中南林业调查规划, 2016, 35(1): 46-52.
- [18] 李黄维. 不同林分土壤磷形态与磷转化微生物特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-101.
- [20] Tiessen H, Stewart J W B, Cole C V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(4): 853-858.
- [21] Tabatabai M A, Bremner J M. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. Soil Biology and Biochemistry, 1969, 1(4): 301-307.
- [22] Tripathi B M, Edwards D P, Mendes L W, Kim M, Dong K, Kim H, Adams J M. The impact of tropical forest logging and oil palm agriculture on the soil microbiome. Molecular ecology, 2016, 25(10): 2244-2257.
- [23] 郭晓朦. 不同坡长扰动地表下紫色土坡面土壤理化性质的时空分布特征[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [24] 康冰,刘世荣,蔡道雄,卢立华,何日明,高妍夏,迪玮峙. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.

- [25] 翟翠红. 红壤侵蚀地植被恢复对土壤有机碳库的影响及有机碳归还特征[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
- [26] 陈刚亮, 李建华, 杨长明. 崇明岛不同土地利用类型河岸带土壤反硝化酶活性特征. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2926-2932.
- [27] 向升华, 高人, 马红亮, 刘乐中. 不同年龄杉木人工林土壤无机氮比较研究. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(1): 24-30.
- [28] Jangid K, Williams M A, Franzluebbers A J, Sanderlin J S, Reeves J H, Jenkins M B, Endale D M, Coleman D C, Whitman W B. Relative impacts of land-use, management intensity and fertilization upon soil microbial community structure in agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(11): 2843-2853.
- [29] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨. 土壤通报, 1986, (3): 138-141.
- [30] 杨文娜, 余砾, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明. 化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响. 环境科学, 2022, 43(1): 540-549.
- [31] 曾晓敏, 范跃新, 林开森, 袁萍, 赵盼盼, 陈怡然, 徐建国, 陈岳民. 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.
- [32] 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.
- [33] 李洋, 石柯, 朱长伟, 姜桂英, 罗澜, 孟威威, 申凤敏, 刘芳, 魏芳芳, 刘世亮. 不同轮作模式对黄淮平原潮土区土壤养分及作物产量的影响. 水土保持学报, 2022, 36(2): 312-321.
- [34] 刘旭军, 田慧霞, 程小琴, 刘莉, 韩海荣. 凋落物处理对不同林龄华北落叶松针阔混交林土壤磷组分的影响. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3024-3032.
- [35] 林继雄, 林葆, 艾卫. 磷肥后效与利用率的定位试验. 土壤肥料, 1995, (6): 1-5.
- [36] 吴文丽, 洪坚平, 孟会生, 冀刚. 连续施用解磷菌肥对复垦土壤磷酸酶和 Hedley 磷形态的影响. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 59-64.
- [37] 何洁. 常绿阔叶林改造为板栗林对土壤养分库和碳库的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [38] De Schrijver A, Vesterdal L, Hansen K, De Frenne P, Augusto L, Achat D L, Staelens J, Baeten L, De Keersmaecker L, De Neve S, Verheyen K. Four decades of post-agricultural forest development have caused major redistributions of soil phosphorus fractions. *Oecologia*, 2012, 169(1): 221-234.
- [39] 彭建勤, 林成芳, 洪慧滨, 林伟盛, 熊德成, 杨智榕, 杨玉盛. 中亚热带森林更新方式对土壤磷素的影响. 生态学报, 2016, 36(24): 8015-8024.
- [40] 吴荣贵, 林葆, Tiessen H. 农牧交错带土壤磷素动态研究. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 131-138.
- [41] Maranguit D, Guillaume T, Kuzyakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *CATENA*, 2017, 149: 385-393.