

不同林龄杉木林下套种阔叶树对土壤磷组分的影响

陆宇明^{1,2}, 吴东梅^{1,2}, 许恩兰^{1,2}, 卢胜旭^{1,2},
刘小飞^{1,2}, 刘春华³, 蒋宗垵³, 郭剑芬^{1,2}

(1.福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2.湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室,
福州 350007; 3.福建农林大学莘口教学林场, 福建 三明 365000)

摘要:套种是杉木人工林经营的重要措施,磷是南方森林生态系统中主要限制性养分元素之一,但套种模式对土壤磷素的影响尚不明确。以亚热带杉木人工林表层(0—10 cm)土壤为对象,研究套种林(杉阔套种幼林、杉阔套种成熟林)和杉木幼林土壤理化性质和土壤各形态磷含量差异,分析套种对杉木人工林土壤磷含量的影响。结果表明:(1)不同套种林显著改变土壤总磷、土壤总无机磷、土壤总有机磷、土壤微生物生物量磷(MBP)和土壤酸性磷酸酶活性(APA),大小顺序均为杉阔套种成熟林>杉阔套种幼林>杉木幼林。(2)土壤各磷组分中活性磷含量较低,其中 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 在活性组分中占主导;土壤 NaOH-Po 是中等活性磷的主要组分,杉阔套种成熟林尤为显著;闭蓄态磷(Residual-P)在总磷含量中最高。(3)与杉木幼林相比,杉阔套种成熟林显著增加了树脂提取态磷(Resin-Pi)、碳酸氢钠提取态有机和无机磷($\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)、氢氧化钠提取态有机和无机磷(NaOH-Pi 、 NaOH-Po)、氢氧化钠残留提取态有机磷(NaOHu.s-Po)、盐酸提取态磷(HCl-Pi)和闭蓄态磷(Residual-P)含量;土壤总无机磷、 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 、 HCl-Pi 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 NaOHu.s-Pi 和Residual-P对杉阔套种幼林的响应不敏感。(4)除含水率外不同林龄下杉阔套种林土壤磷形态与土壤理化性质(土壤总碳氮、土壤可溶性有机氮、土壤微生物生物量磷、酸性磷酸酶)呈正相关性($P<0.05$)。冗余分析表明,土壤磷组分的变化主要受MBP调控,且MBP与有机磷组分(NaOHu.s-Po 、 NaOH-Po)和 HCl-Pi 呈显著正相关。总之,套种林的土壤磷素有效性高于杉木幼林,土壤养分状况更佳。

关键词:套种; 杉木; 阔叶树; 磷组分; 微生物生物量磷; 土壤酸性磷酸酶

中图分类号:S750

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0275-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.040

Effects of Chinese Fir Interplanting with Broadleaved Trees on Soil Phosphorus Fractions

LU Yuming^{1,2}, WU Dongmei^{1,2}, XU Enlan^{1,2}, LU Shengxu^{1,2},

LIU Xiaofei^{1,2}, LIU Chunhua³, JIANG Zongkai³, GUO Jianfen^{1,2}

(1.College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2.Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-Geographical Processes, Ministry of Education, Fuzhou 350007;

3.Xinkou Experimental Forest Farm of Fujian Agriculture and Forestry University, Sanming, Fujian 365000)

Abstract: Interplanting is an important measure during the management of *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir) plantation. Phosphorus is one of the main limiting nutrient elements in the forests of southern China, but the effect of interplanting model on soil phosphorus is not clear. In this study, soil phosphorus fractions in surface soil (0—10 cm) were determined in different interplanting forests (young Chinese fir interplanting forest, mature Chinese fir interplanting forest) and young pure Chinese fir plantation. The results showed that: (1) Interplanting forests showed increased soil total phosphorus (including organic and inorganic phosphorus), microbial biomass phosphorus (MBP), and acid phosphatase activity (APA) compared with the Chinese fir plantation. Also, soil phosphorus contents were shown as mature Chinese fir interplanting forest > young Chinese fir interplanting forest > young pure Chinese fir plantation. (2) The contents of active phosphorus fractions were the lowest and $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ dominated within the active components. Soil

收稿日期:2019-07-06

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0600304);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(J1-1253)

第一作者:陆宇明(1993—),女,硕士研究生,主要从事森林碳氮循环研究。E-mail:245806037@qq.com

通信作者:郭剑芬(1977—),女,教授,主要从事森林碳氮循环研究。E-mail:jfguo@fjnu.edu.cn

NaOH—Po was the main component of moderately active phosphorus, especially in the mature Chinese fir interplanting forest. The content of Residual—P was the highest among total phosphorus. (3) The mature Chinese fir interplanting with broadleaves trees showed significantly increased contents of resin extracted phosphorus (Resin—Pi), sodium bicarbonate extracted organic and inorganic phosphorus (NaHCO_3 —Pi, NaHCO_3 —Po), sodium hydroxide extracted organic and inorganic phosphorus (NaOH—Pi, NaOH—Po), sodium hydroxide residual extracted organic phosphorus (NaOHu.s—Po), hydrochloric acid extracted phosphorus (HCl—Pi), and Residual—P. There were no significant differences in soil total inorganic phosphorus, NaHCO_3 —Po, NaHCO_3 —Pi, HCl—Pi, NaOHu.s—Pi, and Residual—P contents between young Chinese fir interplanting forest and pure Chinese fir plantation. (4) There were positive correlations between soil phosphorus fractions and soil physical and chemical properties (such as soil total carbon and nitrogen, dissolved organic nitrogen, microbial biomass phosphorus, acid phosphatase activity) for different interplanting forests except for soil water content ($P < 0.05$). Redundancy analysis (RDA) indicated that the changes in phosphorus fractions were mainly driven by MBP. Moreover, soil organic phosphorus (NaOHu.s—Po, NaOH—Po) and HCl—Pi was positively correlated with MBP. In conclusion, soil phosphorus availability in Chinese fir interplanting forests were higher than that in young pure Chinese fir forest, and soil nutrient status were also better.

Keywords: interplanting; Chinese fir; broadleaved trees; soil phosphorus fractions; microbial biomass phosphorus; soil acid phosphatase activity

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方湿润亚热带地区最主要的用材树种之一。长时间以来杉木多代纯林经营方式势必会造成树种单一等问题,严重制约着杉木林生态系统功能的正常发挥和可持续经营^[1]。其种植林地土壤一般呈酸性或强酸性且土壤磷素含量低,并且该地区雨量充沛、长期的风化淋溶和生物吸收使土壤磷素有效性亦低^[2]。因此,杉木林科学经营措施的选取对亚热带林地可持续发展十分重要。磷(P)是土壤中主要矿质营养元素之一,在植物生长和生态系统物质循环过程中起重要作用^[3-4]。另外,磷素易与土壤中的 Fe、Al 离子发生共价反应难以被植物吸收,红壤是我国南方地区典型的土壤类型,且南方地区淋溶严重、铁铝含量高,更易造成土壤中磷固定、林地磷素严重缺乏^[5-6]。很多控制试验^[7-8]表明,自然系统多样性较高的群落可增加系统磷素的累积。相关研究^[9-10]发现,与纯林相比,林下套种可改善土壤磷养分状况。近年来不少学者^[11-14]研究发现,较适宜的套种模式能明显提升土壤养分状况。葛乐等^[11]通过对比杉木纯林和杉木套种异龄林土壤养分研究发现,套种复龄林后土壤肥力能够得到良好改善。套种模式建立后体系内各组分相互促进,土壤养分达到不断积累^[12],并且套种林在共生环境中会增加一些限制养分的供应^[13]。通常来讲,套种林土壤养分和供肥能力显著高于纯林^[14]。近年来,杉木套种阔叶树作为提高杉木林生产力的一种经营措施,对其研究逐渐增多,但在杉木幼林和成熟林中进行套种阔叶树种的对比研究相对较少,特别是关于

不同林龄下杉阔套种对杉木林土壤各形态磷素含量的影响还不清楚。因此,本文以杉木幼林和杉阔套种幼林、杉阔套种成熟林作为研究对象,分析杉木幼林和杉阔套种林土壤养分特征及土壤各形态磷素含量差异,以揭示不同林龄下杉阔套种林对土壤磷素有效性的影响,可为亚热带杉木人工林科学经营和可持续发展提供参考。

1 研究区概况与试验设计

1.1 试验地概况

研究地点位于福建省三明市莘口镇格氏栲森林自然保护区(117°27′30″—117°29′26″E, 26°09′39″—26°12′09″N)。三明市格氏栲省级自然保护区系武夷山东伸支脉地带,海拔 250~500 m,属于低山丘陵。此地区属于亚热带季风性气候,具有冬冷夏热,湿润多雨,四季分明等特点。年平均气温约为 19.5℃,年均降水量达 1 700 mm,降水集中于 7—8 月。土壤主要以砂岩发育的山地红壤为主,表层疏松且该试验地土壤类型为红壤。

1.2 试验设计

在保护区内建立不同林龄杉木林下套种阔叶树种及不套种任何树种的杉木幼林(对照)试验示范区,设置 3 种处理,分别是杉阔套种成熟林、杉阔套种幼林和杉木幼林。每种处理设置 5 个(作为重复)大小为 20 m×20 m 的标准样地。其中套种阔叶树的杉木林龄分别为 51 年生和 4 年生,杉木幼林(纯林)的林龄为 4 年生。套种林栽植始于 2014 年 4 月,林下套种树种均为 3 年生阔叶树,即马褂木、乐昌含笑、火

力楠 3 类树种,配置比例为马褂木:乐昌含笑:火力楠为 1:1:1,林分株行距为 2 m×3 m,明穴规格为面宽 40 cm×30 cm,底宽 30 cm×30 cm,深 30 cm。套种种植密度以各阔叶树种生长后能覆盖地表为宜。栽植后当年抚育 1 次(2014 年 8—9 月期间);第 2 年进行第 2 次抚育措施(2015 年 8—9 月),随后每年均抚育 2 次。抚育工序主要包括内容为松土、除草等管理。在采取套种措施前,先清除杉木林地的杂草,对林地进行翻耕、耙碎。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

2018 年 10 月,在标准样地内,先去除土壤表层的枯枝落叶,每个样地内按“S”形选取 5 个点,用土钻取 0—10 cm 的表层土壤,将土壤分别充分混匀后迅速带回实验室。土样过 2 mm 筛后放入自封袋,并放入 4 ℃冷藏箱内保存。新鲜土样分为 2 部分:一部分新鲜土样用于测定土壤含水率、土壤可溶性有机氮(DON)和土壤微生物生物量磷(MBP)含量;另一部分新鲜土样保存于室内自然风干,风干过 100 目筛用来测定土壤全碳(TC)、全氮(TN)和土壤磷各形态含量。

2.2 土壤基本理化性质测定

土壤基本理化性质测定参照《土壤农业化学分析方法》^[15]。土壤含水量采用铝盒烘干衡定法测定;土壤 pH 采用便携式 pH 计(STARTER 300,OHAUS,美国)进行测定,水土比值为 2.5:1。土壤全碳和全氮、DON 含量,分别采用 Elementar Vario MAX 碳氮元素分析仪(GmbH,Hanau,Germany)和流动分析仪(Skalar san++,Skalar,荷兰)进行测定。

2.3 土壤微生物量磷和酸性磷酸酶活性测定

土壤微生物生物量磷采用氯仿熏蒸处理,pH 为 8.5 的 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提法^[16],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^[17]方法培养测定。具体方法:取 1 g 鲜土,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 使其达到均质化,用移液器取 200 μL 溶液移于 96 孔微孔板。用伞形酮(MUB)作为底物标示。将微孔板在黑暗环境放置培养箱内经过 20 ℃恒温培养 4 h,使用多功能酶标仪(Spectra Max M5,Molecular Devices,美国)测定荧光度。

2.4 土壤磷组分测定

土壤磷组分采用 1982 年 Hedley 等^[18]提出的磷分级方法,这种方法能根据土壤磷各个组分活性的不同一次性提取,兼顾有机和无机组分,同时结合不同研究情况得到发展^[19-20]:先称取 0.5 g 过 2 mm 筛的风干土于 50 mL 离心管中逐级提取,依次为树脂交换态磷(无机磷)、NaHCO₃ 提取态磷(土壤无机磷和有机磷)、NaOH 溶性磷(土壤无机磷和有机磷)、土壤团聚体内 NaOH 溶性磷(土壤无机磷和有机磷)、稀 HCl 提取态磷,最后将残留土用浓 H₂SO₄+H₂O₂ 在 360 ℃下高温消煮,分别测定土壤磷组分含量。分别得到:(1)土壤活性磷(Resin-Pi、碳酸氢钠提取态无机磷 NaHCO₃-Pi 和碳酸氢钠提取态有机磷 NaHCO₃-Po),即易获取的磷组分。(2)中等活性磷(氢氧化钠提取态无机磷 NaOH-Pi 和氢氧化钠提取态有机磷 NaOH-Po;氢氧化钠残留提取态无机磷 NaOHu.s-Pi、氢氧化钠残留提取态有机磷 NaOHu.s-Po),即较难溶的磷组分,与长期磷转化过程有关。(3)稳定态磷(稀盐酸提取态无机磷 HCl-Pi 和稀盐酸提取态有机磷 HCl-Po),难以被植物利用的磷组分。(4)闭蓄态磷(Residual-P)。上述浸提液使用连续流动分析仪(Skalar,san++,荷兰)测定含量。总磷为 6 种磷组分之和,本研究中由于 HCl-Po 含量过低,未测出有效数值。土壤磷素形态分级浸提方法见表 1。

表 1 土壤磷分级浸提方法

土壤磷素形态	浸提液
树脂交换态磷(Resin-P)	HCO ₃ ⁻ - 饱和的阴离子交换树脂膜
NaHCO ₃ 提取态磷(NaHCO ₃ -Pi、NaHCO ₃ -Po)	0.5 mol/L NaHCO ₃ (pH=8.5)
NaOH 提取态磷(NaOH-Pi、NaOH-Po)	0.1 mol/L NaOH
NaOHu.s 提取态磷(NaOHu.s-Pi、NaOHu.s-Po)	土壤超声后加 0.1 mol/L NaOH
盐酸提取态磷(HCl-Pi、HCl-Po)	1 mol/L HCl
残留磷(Residual-P)	H ₂ SO ₄ +H ₂ O ₂ 360 ℃消煮

2.5 数据处理

数据经过 Excel 软件处理,用 SPSS 22.0 软件进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)进行方差分析和多重比较(α=0.05),检验不同套种处理之间土壤理化性质、土壤微生物量磷、酸性磷酸酶活性和土壤磷组分差异显著性。对土壤磷组分、土壤微生物生物量

磷、酸性磷酸酶活性和土壤基本理化性质等指标进行 Pearson 相关性分析。采用 Canoco 5.0 软件,以不同形态的磷组分作为响应变量,同时以土壤基本理化性质、土壤微生物生物量磷含量和酸性磷酸酶活性为解释变量做冗余分析(RDA)。绘图主要由 Origin 9.1 软件完成,文中图表数据均为平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 土壤基本理化性质

由表 2 可知,不同套种处理土壤含水率没有显著差异。杉阔套种成熟林土壤 pH、土壤 TC、TN、DON 含量均显著高于杉阔套种幼林和杉木幼林($P<0.05$),但杉阔套种幼林和杉木幼林未达到显著性差异。不同套种处理和杉木幼林间土壤 C/N 比值差异显著($P<0.05$)。

3.2 土壤微生物生物量磷和酸性磷酸酶活性

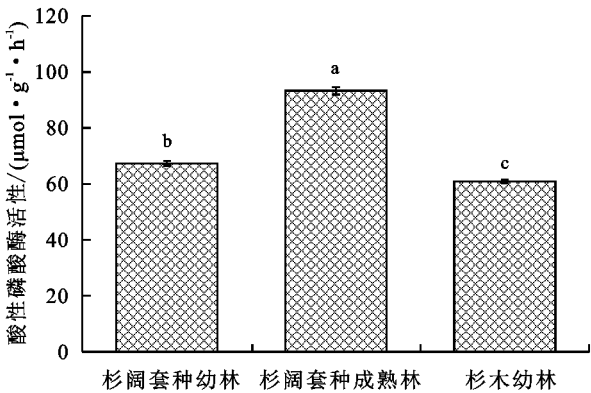
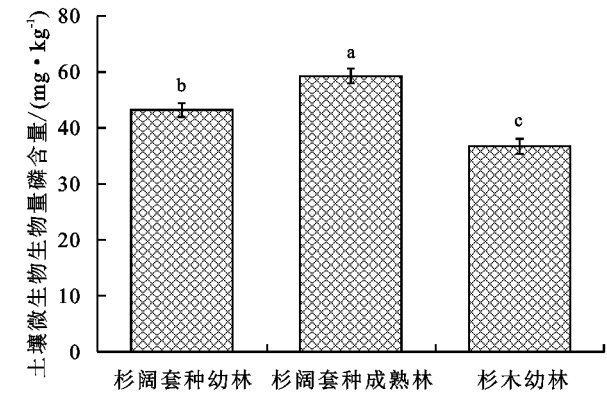
由图 1 可知,与杉木幼林相比,杉阔套种成熟林和杉阔套种幼林显著增加了土壤微生物生物量磷含量,分别提高了 13.35% 和 6.67% ($P<0.05$)。杉阔套种成熟林土壤酸性磷酸酶活性最高,约为杉木幼林的 1.53 倍;杉木幼林土壤酸性磷酸酶活性最低,为 60.81 mg/kg

($P<0.05$)。可见,杉阔套种成熟林对提高土壤微生物生物磷含量和酸性磷酸酶活性的效果最佳。

表 2 不同套种处理土壤理化性质

指标	杉阔套种幼林	杉阔套种成熟林	杉木幼林
pH	4.31±0.03b	4.60±0.07a	4.18±0.03b
含水量	1.01±0.11a	0.85±0.06a	0.87±0.14a
总碳 TC/(g·kg ⁻¹)	12.93±0.70b	19.84±0.08a	11.62±0.55b
总氮 TN/(g·kg ⁻¹)	1.23±0.06b	1.51±0.01a	1.15±0.03b
碳氮比 C/N	10.68±0.17b	13.31±0.14a	9.36±0.10c
可溶性有机氮 DON/(mg·kg ⁻¹)	13.12±0.93b	17.65±1.37a	12.96±0.44b

注:表中数据为平均值±标准差($n=5$);同一行不同小写字母表示不同套作处理间差异显著性($P<0.05$);TC 为总碳;TN 为总氮;DON 为可溶性有机氮。下同。



注:表中数据为平均值±标准差($n=5$);同柱上方不同小写字母表示不同套种处理间差异显著性($P<0.05$)。下同。

图 1 不同套种处理对土壤 MBP 和 APA 的影响

3.3 土壤总磷、总无机磷、总有机磷含量和磷组分含量

由图 2 可知,杉木林 0—10 cm 土壤总磷含量范围为 124.70~167.18 mg/kg,杉阔套种成熟林和杉阔套种幼林土壤总磷含量显著高于杉木幼林($P<0.05$)。

杉阔套种幼林、杉阔套种成熟林、杉木幼林土壤总无机磷含量分别为 98.02,109.12,84.40 mg/kg,不同处理间差异显著($P<0.05$)。土壤有机磷含量范围为 39.81~58.05 mg/kg,杉阔套种成熟林和杉阔套种幼林土壤总有机磷含量显著高于杉木幼林($P<0.05$)。

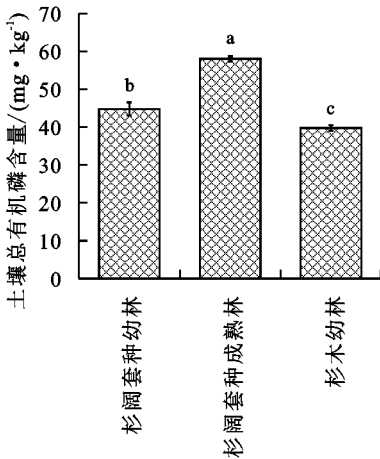
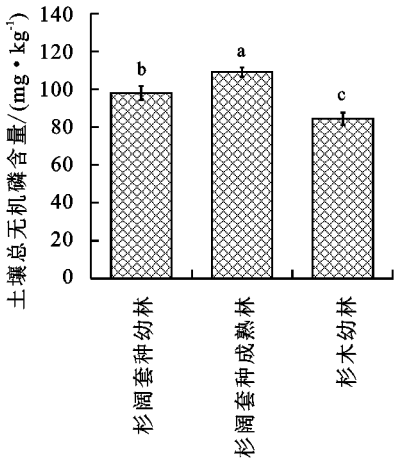
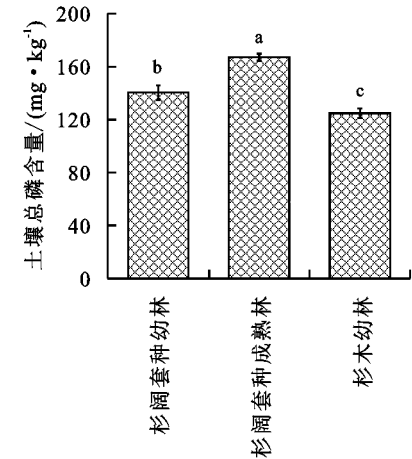


图 2 不同套种处理土壤总磷(TP)、总无机磷(TPi)、总有机磷(TPo)含量

由表 3 可知,不同林龄杉木林下套种阔叶树后改变了亚热带杉木林表层土壤不同形态磷组分的含量,但不同形态土壤磷组分的含量对 2 种套种处理的响应不同(表 3、图 2)。与杉木幼林相比,杉阔套种成熟林显著增加

了土壤 Resin-P、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po、NaOH-Po、NaOH_u-s-Pi、NaOH_u-s-Po、HCl-Pi、Residual-P 的含量($P<0.05$),但对 NaOH-Pi 的影响不显著;杉阔套种幼林显著增加了土壤 NaOH-Po 的含量($P<0.05$),

为 15.60 mg/kg,但对土壤 Resin-P、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po、NaOH-Pi、NaOHu.s-Pi、NaOH-Po、NaOHu.s-Po、Residual-P 含量的影响不显著。

杉木林表层土壤磷组分中,活性磷含量较低,其

中土壤 NaHCO₃-Po 在活性组分中占主导;土壤 NaOH-Po 含量是中等活性磷的主要组分,在杉阔套种成熟林尤为显著。闭蓄态磷(Residual-P)含量在总磷含量中最高。

表 3 不同套种处理土壤磷组分含量 单位:mg/kg

磷活性	土壤磷组分	杉阔套种幼林	杉阔套种成熟林	杉木幼林
活性磷	Resin-P	0.24±0.03b	0.36±0.02a	0.20±0.04b
	NaHCO ₃ -Pi	0.49±0.06ab	0.57±0.51a	0.36±0.04b
	NaHCO ₃ -Po	1.91±0.24b	3.12±0.21a	1.70±0.49b
中等活性磷	NaOH-Pi	15.60±0.68a	16.66±0.37a	15.17±0.41a
	NaOH-Po	31.13±0.70b	36.58±1.30a	26.63±0.31c
	NaOHu.s-Pi	6.06±0.31ab	6.73±0.50a	5.31±0.29b
稳定态磷	NaOHu.s-Po	11.54±1.04b	18.35±0.75a	11.48±0.53b
	HCl-Pi	14.36±1.79ab	20.50±1.33a	11.40±0.66b
闭蓄态磷	Residual-P	56.00±5.89ab	64.31±3.09a	47.17±6.03b

注:Resin-P 为饱和 HCO₃-交换树脂提取态磷;NaHCO₃-Pi 为碳酸氢钠提取态无机磷;NaHCO₃-Po 为碳酸氢钠提取态有机磷;NaOH-Pi 为氢氧化钠提取态无机磷;NaOH-Po 为氢氧化钠提取态有机磷;NaOHu.s-Pi 为氢氧化钠残留提取态无机磷;NaOHu.s-Po 为氢氧化钠残留提取态有机磷;HCl-Pi 为浓盐酸提取态无机磷;Residual-P 为闭蓄态磷。下同。

3.4 土壤磷组分与土壤理化性质的相关性

相关分析(表 4)表明,除含水率外不同林龄下杉阔套种林表层土壤磷形态与土壤理化性质呈显著相关。土壤 pH、TC、TN、DON、MBP 和 APA 与 Resin-P 呈极显著正相关。土壤 NaHCO₃-Pi 与土壤 pH、MBP 和 APA 呈显著正相关。土壤 NaHCO₃-Po 与土壤 TC、MBP 和 APA 呈显著正相关。土壤 NaOH-Pi 与土壤 MBP 呈显著正相关。土壤 NaOH-Po 与土壤 pH、TC、TN、DON、MBP 和 AP 呈极显著正相关。土壤 NaOHu.s-Pi 与土壤 TC、TN、MBP 和 APA 有显著正相关。土壤 NaOHu.s-Po 与土壤 pH、TC、TN、DON、MBP 和

APA 呈极显著正相关。土壤 HCl-Pi 与土壤 pH、TC、TN、DON、MBP 和 APA 呈极显著正相关。土壤 Residual-P 与土壤 TC、TN、MBP 和 APA 呈显著正相关,并与土壤 DON 呈极显著正相关。冗余分析表明,土壤磷组分与土壤 MBP、APA 含量显著相关。RDA 分析结果显示,土壤环境因子解释了土壤磷组分变异的 55.28%。第 1 标准轴(RD1)和第 2 标准轴(RD2)分别解释土壤磷组分变量的 49.95%和 5.33%(图 3)。其中,土壤 MBP 的作用最明显,其解释了土壤磷组分变化的 78.4%(P=0.002),且与有机磷(NaOHu.s-Po 和 NaOH-Po)、HCl-Pi 呈显著正相关。

表 4 土壤理化性质、土壤微生物生物量磷、酸性磷酸酶与土壤磷形态的 Pearson 相关分析

土壤磷组分	pH	含水率	TC	TN	DON	MBP	APA
Resin-P	0.674**	-0.028	0.785**	0.695**	0.646**	0.677**	0.655**
NaHCO ₃ -Pi	0.518*	-0.253	0.491	0.485	0.084	0.631*	0.602*
NaHCO ₃ -Po	0.364	-0.095	0.529*	0.472	0.483	0.630*	0.599*
NaOH-Pi	0.381	-0.027	0.542*	0.484	0.486	0.517*	0.459
NaOH-Po	0.857**	-0.068	0.834**	0.783**	0.772**	0.906**	0.932**
NaOHu.s-Pi	0.251	0.053	0.580*	0.637*	0.264	0.567*	0.579*
NaOHu.s-Po	0.705**	-0.221	0.887**	0.826**	0.591*	0.805**	0.731**
HCl-Pi	0.650**	0.147	0.835**	0.862**	0.434	0.790**	0.735**
Residual-P	0.387	0.210	0.570*	0.558*	0.693**	0.527*	0.608*
MBP	0.882**	-0.067	0.905**	0.857**	0.657**	—	0.965**

注:*表示 P<0.05; **表示 P<0.01;APA 为酸性磷酸酶活性;MBP 为微生物生物量磷。

4 讨论

4.1 不同套种处理对土壤理化性质的影响

与杉木幼林相比,套种林可增加林内树种多样性,改善林地养分肥力,能够改善林内整体生态环境^[21]。本研究杉阔套种林土壤全碳、全氮、全磷含量高于杉木幼林(表 2、图 2),说明套种阔叶树增加了杉木林土壤覆盖度,减少养分流失量,极大改善土壤养

分条件,且套种成熟林比套种幼龄林效果更佳,这可能一方面由于幼林生长需消耗较多的氮、磷元素,导致含量低于成熟林;另一方面随杉木林生长,部分凋落物在地表分解,因此营养元素在土壤表面聚集,随林龄的增加积累越多。其他相关研究^[22-23]也发现类似结果。詹学齐^[22]研究马尾松套种阔叶树发现,套种后形成的针阔林土壤有机质、全氮、全钾、速效磷含

量均显著高于马尾松纯林。王东雪等^[23]对 2 年生油茶林采取套种研究表明,套种模式不仅未因林分间竞争而阻碍油茶幼林的生长,反而促进土壤有机质、全氮、有效磷含量增加。因此,杉阔套种林养分归还速度快有助于提高林地土壤肥力。

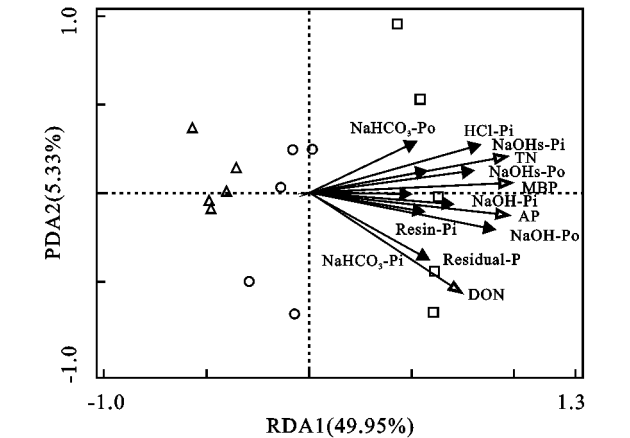


图 3 不同套种处理下土壤磷组分差异的冗余分析

4.2 不同套种处理对土壤微生物量磷和酸性磷酸酶活性的影响

土壤微生物生物量主要通过反映微生物活性强度和调控土壤中物质、养分元素分配状况,在森林生态系统磷循环过程中发挥着重要作用^[24]。有研究^[25]证实,土壤磷素有效性受土壤理化性质影响外,还受到土壤磷酸酶活性以及土壤微生物数量有关。本研究冗余分析表明 MBP 是影响土壤磷的主要驱动因子(图 3)。根据万福绪等^[26]研究表明,杉桐套种后形成的混交林土壤有机质积累显著高于纯林,土壤微生物生物量增加。本研究中土壤 TC、TN、DON 与 MBP 具有极显著正相关关系(表 4)。这说明碳、氮和有机质是土壤微生物所需养分和能量的主要来源,并且杉阔套种成熟林和杉阔套种幼林土壤 TC、TN 和土壤 DON 含量高于杉木幼林,由此推断套种林土壤 MBP 高于幼林原因即套种阔叶树可增加林分树种多样性,优化了林分土壤养分状况。杉阔套种林土壤 MBP 含量显著高于杉木幼林,从而会影响到土壤中不同形态的磷素累积。

土壤微生物可通过分泌酸性磷酸酶来降解土壤中被固定和吸附的无机磷,水解土壤中的有机磷^[27]。陈莉莉等^[28]在研究中证实,混作林林分结构得到改善,林内树种多样性和土壤环境改变,土壤碳、氮、磷养分得到补充,土壤微生物数量和活性增加,从而增强土壤酸性磷酸酶活性;有研究^[29]发现,土壤酸性磷酸酶与土壤氮的有效性呈正相关;相关研究^[30]认为,酸性磷酸酶活性随林龄增加而增加且成熟林土壤中较高有机质和全氮含量可提供大量酶促底物,较好的理化性质为酶活性创造了良好环境。本研究中不同

林龄杉阔套种林土壤酸性磷酸酶活性对比证实,2 种杉阔套种林显著提高了土壤酸性磷酸酶活性,且以套种成熟林最高。这说明成熟林中土壤可溶性有机氮含量较高、积累的腐殖层存量较多,土壤 MBP 和土壤 APA 呈极显著正相关(表 4),土壤微生物数量增多,促进微生物分解从而酶活性升高;而杉阔套种幼林酸性磷酸酶活性较低,可能是由于套种处理的幼林处于迅速生长阶段腐殖层积累较少。

4.3 不同套种处理对土壤总磷、总无机磷、总有机磷的影响

有机磷是土壤磷库重要部分,但很难被植物吸收,必须通过微生物或植物根系分泌的磷酸酶水解为无机态磷才可被利用。本研究中,杉阔套种后土壤总有机磷含量显著高于杉木幼林,其中以中等活性有机磷为主,这与郑威^[31]在研究亚热带红椎套种马尾松土壤磷形态结果一致,套种林稳定性有机磷含量相比于纯林明显增加。同时,套种阔叶树可以降低杉木林土壤养分的争夺^[32]。林开森等^[33]研究发现,随森林演替变化,有机磷可能通过凋落物方式进入土壤,促进土壤有机磷上升。本研究中,套种阔叶树后林地凋落物种类和数量增加,枯枝落叶养分归还也可能是杉阔套种林土壤有机磷含量高于杉木幼林的原因,并且杉阔套种成熟林比套种幼林能达到更好效果,这可能由于成熟林枯枝落叶数量和有机质含量普遍高于幼林。这也与曹娟等^[34]研究的结果相似,土壤有效磷含量以幼龄林土壤最低。有研究^[35-36]还发现,有机质对土壤有机磷含量能产生很大影响,由于大部分有机磷主要以有机质的形态存在于土壤中,因此有机质含量较高的土壤一般情况下有机磷的含量也较高。可见套种阔叶树增加了林下树种多样性,地表凋落物分解直接补充土壤磷等养分。杉阔套种林闭蓄态磷得到活化,而被转化为可利用的有效磷,促进林地养分良性循环。

4.4 不同套种处理对土壤磷组分的影响

Hedley 分级体系中,Resin-P 指土壤固相无机磷,NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po 指吸附在土壤表面的无机磷和有机磷被当作植物和微生物可利用的活性磷。本研究中,杉阔套种成熟林显著提高了杉木林表层土壤活性磷含量。一方面由于杉阔套种成熟林后土壤 TC、TN 和 DON 含量显著增加(表 2),土壤 TC、TN 和 DON 与土壤 Resin-P 呈极显著相关(表 4),因此土壤 Resin-P 含量显著提高;另一方面,土壤微生物通过分泌酸性磷酸酶可催化有机磷分解^[37],释放部分活性较低的无机磷和有机磷。本研究中套种林为土壤微生物提供了较好的理化环境、较高的可溶性有机碳含量。一般研究^[38]认为,有机质

和理化性质良好的土壤活性磷含量也较高;Slazak等^[39]研究还发现,随着林分年龄增加,土壤中易溶性有机磷(NaHCO_3-Po)增加,成熟林分土壤有效磷含量显著高于幼龄林。本研究中,杉阔套种成熟林土壤 NaHCO_3-Po 含量显著高于杉阔套种幼林也证实了这一点。套种阔叶树后提高了土壤微生物生物量磷(图 1),从而提高土壤活性磷的含量。同时,土壤微生物可分泌的酸性磷酸酶能够促进土壤有机磷分解,从而增加土壤磷素的有效性。此外,土壤酸性磷酸酶与 $\text{Resin}-\text{Pi}$ 呈极显著正相关(表 4),不同林龄下杉阔套种林显著提高了杉木林土壤酸性磷酸酶活性(图 1),从而提高土壤活性磷含量。

$\text{NaOH}-\text{Pi}$ 和 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 、 $\text{NaOHu.s}-\text{Pi}$ 和 $\text{NaOHu.s}-\text{Po}$ 为中等活性磷,是植物吸收的潜在磷源^[40]。本研究中杉阔套种成熟林显著提高了 $\text{NaOH}-\text{Po}$ 、 $\text{NaOHu.s}-\text{Po}$ 和 $\text{NaOHu.s}-\text{Pi}$ 含量,这可能一方面由于杉阔套种成熟林土壤微 MBP 含量升高,土壤微生物发挥矿化作用,以满足植物生长和土壤微生物对土壤磷素需求,酸性磷酸酶分泌增多,有机磷矿化作用增强,促进部分中等活性磷转化为活性磷供植物利用需求;另一方面是杉阔套种后凋落物增加,补充套种林分土壤有机质含量,一定程度上缓解土壤磷素供应不足状况。

稳定态磷植物利用的磷库,但要通过一定的过程转化为土壤可直接利用的磷。有研究^[41]证实,闭蓄态磷很难被植物利用,但可通过解吸、矿化等过程转换为有机态磷组分。本研究中杉阔套种成熟林显著提高了 $\text{HCl}-\text{Pi}$ 和闭蓄态磷,主要归因于套种林增加了林内树种密度,改变林地养分和土壤环境,进而影响土壤磷素状况。另外,稳定态磷和闭蓄态磷含量均在杉阔套种成熟林中最高,这可能由于成熟林比幼林土壤有机质较高,有机质分泌大量腐殖酸,将较难分解的稳定态和闭蓄态磷组转化为活性组分,提高土壤磷有效性和循环能力。

5 结论

(1)杉阔套种成熟林显著提高了土壤碳氮磷的含量,其中土壤全碳含量分别是杉阔套种幼林和杉木幼林的 1.53,1.71 倍;土壤全氮含量分别提高 1.23,1.31 倍;土壤全磷含量分别提高 1.19,1.34 倍,杉阔套种成熟林更有利于改善土壤养分、提高土壤肥力。

(2)与杉木幼林相比,杉阔套种成熟林和杉阔套种幼林显著提高土壤微生物生物量磷含量,分别提高了 13.35%和6.67%。杉阔套种成熟林土壤酸性磷酸酶活性最高,分别是杉阔套种幼林和杉木幼林的 1.39,1.53 倍。杉阔套种成熟林主要通过增加土壤微生物生物量和增强土壤酸性磷酸酶活性来矿化有机

磷,促进杉木林表层土壤有机磷向无机磷转化,提高土壤磷素有效性。

(3)不同套种处理下土壤理化性质、土壤微生物生物量磷、酸性磷酸酶与土壤磷形态具有较好相关性,其中土壤 MBP 是影响该地区土壤磷含量变化的关键因子。杉阔套种模式提高了杉木林土壤活性磷、中等活性磷、稳定态磷和闭蓄态磷含量,并随着杉木林的林龄增加而提高。因此,杉阔套种模式可作为一种提高土壤养分肥力和杉木林生产力的有效经营措施。

参考文献:

- [1] 杨玉盛,何宗明,陈光水等.杉木多代连栽后土壤肥力变化[J].生态环境学报,2001,10(1):33-38.
- [2] Turner B L, Engelbrecht B M J. Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests [J]. Biogeochemistry, 2011,103(1/3):297-315.
- [3] Yan Y P, Liu F, Li W, et al. Sorption and desorption characteristics of organic phosphates of different structures on aluminium (oxyhydr) oxides [J]. European Journal of Soil Science, 2014,65(2):308-317.
- [4] Garcia-Oliva F, Merino A, Fonturbel M T, et al. Severe wildfire hinders renewal of soil P pools by thermal mineralization of organic P in forest soil: Analysis by sequential extraction and, ^{31}P NMR spectroscopy [J]. Geoderma, 2018,309:32-40.
- [5] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [6] 张鑫,谷会岩,陈祥伟.择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷形态及有效性的影响[J].应用生态学报,2018,29(2):441-448.
- [7] Karanika E D, Alifragis D A, Mamolos A P, et al. Differentiation between responses of primary productivity and phosphorus exploitation to species richness [J]. Plant and Soil, 2007,297(1/2):69-81.
- [8] Oelmann Y, Kreutziger Y, Temperton V M, et al. Nitrogen and phosphorus budgets in experimental grasslands of variable diversity [J]. Journal of Environment Quality, 2007,36(2):396-407.
- [9] Mei P P, Gui L G, Wang P, et al. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil [J]. Field Crops Research, 2012,130(11):19-27.
- [10] Xia H Y, Wang Z G, Zhao J H, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems [J]. Field Crops Research, 2013,154(3):53-64.
- [11] 葛乐,虞木奎,成向荣,等.杉木林下套种不同树种对土壤改良效应初探[J].土壤通报,2011,42(4):948-952.
- [12] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Water [J]. Field Crops Re-

- search, 1993, 34(3):303-317.
- [13] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30(8):1-67.
- [14] Zhang W P, Liu G C, Sun J H, et al. Temporal dynamics of nutrient uptake by neighboring plant species: Evidence from intercropping [J]. *Functional Ecology*, 2017, 31:469-479.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学出版社, 1999:296-338.
- [16] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1982, 14(4):319-329.
- [17] 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 [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9):1309-1315.
- [18] Hedley M J, Stewart J W, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 970-976.
- [19] Tiecher T, Santos D R, Calegari A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124(4):57-67.
- [20] 余定坤. 基于 Hedley 分级技术的毛竹林磷素利用特征研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
- [21] 田大伦, 项文化, 闫文德. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征[J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2207-2210.
- [22] 詹学齐. 马尾松公益林林冠下套种阔叶树后林分生态功能评价研究[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(3):71-77.
- [23] 王东雪, 曾雯珺, 杨菊华等. 油茶新造林套种花生试验初报[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(4):157-159.
- [24] Kong C H, Chen L C, Xu X H, et al. Allelochemicals and Activities in a Replanted Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) Tree Ecosystem[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(24):11734-11739.
- [25] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61:69-75.
- [26] 万福绪, 杨东. 苏北海堤杉木杨树混交林林木生长及土壤肥力研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(2):43-46.
- [27] Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612:522-537.
- [28] 陈莉莉, 王得祥, 于飞, 等. 松栎混交林土壤微生物数量与土壤酶活性及土壤养分关系的研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1):77-84.
- [29] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2012, 193(3):696-704.
- [30] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2):445-451.
- [31] 郑威. 亚热带红椎马尾松纯林及其混交林土壤磷形态分布特征与流失风险评价[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [32] 王纪杰, 王炳南, 李宝福, 等. 不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化[J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(1):8-14.
- [33] 林开森, 郭剑芬, 杨智杰, 等. 不同林龄人促天然更新林土壤磷素形态及有效性分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(9):6-11.
- [34] 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.
- [35] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤有机磷研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11):2189-2194.
- [36] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤有机磷组成及有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):167-171.
- [37] Heuck, C, Spohn M. Carbon, nitrogen and phosphorus net mineralization in organic horizons of temperate forests: Stoichiometry and relations to organic matter quality [J]. *Biogeochemistry*, 2016, 131(1/2):229-242.
- [38] Schrijver A D, Vesterdal L, Hansen K, et al. Four decades of post-agricultural forest development have caused major redistributions of soil phosphorus fractions [J]. *Oecologia*, 2012, 169(1):221-234.
- [39] Slazak A, Freese D, Matos E D, et al. Soil organic phosphorus fraction in pine-oak forest stands in North-eastern Germany [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4):156-162.
- [40] Reed S C, Townsend A R, Taylor P G, et al. Phosphorus cycling in tropical forests growing on highly weathered soils[J]. *Soil Biology*, 2011, 26:339-369.
- [41] Maranguit D, Guillaume T, Kuzyakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils [J]. *Catena*, 2017, 149:385-393.