

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.01.002

不同栽植代数杉木人工林土壤 磷素特征研究

张虹, 于姣姐, 李海洋, 张燕林, 潘菲, 周垂帆*, 刘爱琴

(福建农林大学林学院, 人工林可持续经营福建省高校工程研究中心, 福建福州 350002)

摘要: [目的] 研究不同栽植代数杉木林土壤磷素变化规律和形态特征, 确定影响杉木林土壤磷素有效性的因素, 为提高连栽杉木对磷素的利用效率和我国杉木林的可持续经营提供理论依据。[方法] 对土壤全磷、有效磷、不同形态无机磷含量进行测定, 利用 ^{31}P 核磁共振技术(^{31}P -NMR)和扫描电镜-X射线能谱(SEM-EDS)、傅里叶红外光谱(FTIR)、X射线衍射(XRD)技术对土壤磷素形态特征和土壤结构及矿物组成进行分析。[结果] ^{31}P -NMR图谱表明: 连栽导致杉木林土壤正磷酸盐含量下降, 正磷酸单酯含量增加。土壤全磷(TP)、有效磷(AP)、磷酸钙盐(Ca-P)含量随杉木林栽植代数的增加而减少, 闭蓄态磷(O-P)含量则相反; O-P含量在各形态无机磷中占比最大, 磷酸铝盐(Al-P)含量占比最小。SEM-EDS分析发现: 不同栽植代数杉木林土壤胶体颗粒呈片状堆叠; FTIR图谱显示: 其表面官能团结构的差异较小; XRD分析表明: 高岭石和石英的衍射峰强度随栽植代数的增加而减弱。[结论] 不同栽植代数杉木林土壤形态主要以正磷酸盐和正磷酸单酯为主。连栽土壤中全磷、有效磷、磷酸铝盐、磷酸铁盐(Fe-P)向土壤表层聚集分布, 土壤中正磷酸盐(无机磷)含量随杉木林栽植代数的增加而减少, 土壤Al-P含量较少及有效磷、Ca-P、Fe-P向极难溶的O-P转化是导致连栽杉木林土壤有效磷含量低的重要因素。连栽可增大土壤熟化程度、降低土壤矿物质结晶程度。

关键词: 杉木人工林; 磷; 连栽; 土壤胶体颗粒; ^{31}P 核磁共振技术

中图分类号: S714.8; S791.27

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)01-0010-09

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国南方红壤地区重要的速生用材树种之一, 具有生长快、材质好、质量高、用途广、人工栽培历史悠久等特点, 在我国林业生产中占据重要地位^[1]。随着杉木栽植面积的扩大, 人工林取代天然林以及多代连栽, 杉木人工林地力渐渐衰退, 生产力日益下降, 严重威胁杉木人工林的持续经营^[2]。多代连栽导致杉木对磷等养分的利用效率降低, 并使土壤有效磷含量下降, 从而降低生产力^[3]。因此, 土壤有效磷亏缺是导致杉木林地力衰退的重要因素之

一, 已严重限制南方地区林业的可持续发展^[4]; 但目前有关连栽杉木林土壤磷素变化特征的研究相对较少, 尚未系统分析导致连栽杉木林土壤有效磷不足的原因。

磷是植物生长发育过程中至关重要的营养元素, 其中, 有机磷是土壤磷素的重要组成部分, 其在土壤中的移动性比无机磷大, 可分解转化为有效磷, 是植物生长所需有效磷的重要来源, 对植物生长极为有利^[5-6]。土壤胶体颗粒有较大的比表面积, 较强的吸附性能及较多的表面官能团, 是土壤

收稿日期: 2020-08-19 修回日期: 2020-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071746); 福建省自然科学基金项目(2020J01520); 福建林业厅科技推广项目(2020TG20); 福建农林大学林学高峰学科建设项目(71201800727)

* 通讯作者: 周垂帆, E-mail: zhouchuifan@163.com

中最活跃的部分,在磷素循环中起重要作用^[7-8];但目前对连栽杉木林土壤有机磷及胶体颗粒形态特征的研究还较少,这极大阻碍了提高南方杉木连栽土壤磷素有效性的进程。

鉴于此,本文选择不同栽植代数杉木人工林土壤为研究对象,利用³¹P核磁共振技术(³¹P-NMR)研究杉木连栽对土壤磷素形态(有机磷和无机磷)特征的影响;通过测定土壤全磷(TP)、有效磷(AP)和不同形态的无机磷,分析土壤磷素变化规律;同时采用扫描电镜-X射线能谱(SEM-EDS)、傅里叶红外光谱(FTIR)、X射线衍射(XRD)技术分析土壤胶体颗粒,探究在杉木连栽下土壤结构特征、矿物组成的变化,以期确定影响连栽杉木林土壤磷素有效性的因素,为有效提高杉木对南方红壤磷素的利用效率提供科学依据,对提高连栽杉木林生产力具有重要的科学价值,同时可为我国杉木人工林的可持续经营提供实践指导。

1 研究区概况

研究区位于福建省南平市延平区王台镇,是主要杉木林区之一。该地区属中亚热带季风气候,年均气温19.3℃^[9];年均降水量1699 mm,降水主要发生在3—8月;年均蒸发量1413 mm;相对湿度83%。研究区海拔为150~250 m,坡度约30°。该地土壤为红壤,由花岗岩发育而成^[10]。样地的土壤质地从砂质黏土到黏壤土不等。

2 研究方法

2.1 样地设置及样品采集

在研究区中选择11个不同代数和年龄的杉木人工林分进行研究,不同代数和年龄分别为:第1代12、21、40、97年生的林分,记为1-12、1-21、1-40、1-97;第2代1、12、21、31年生的林分,记为2-1、2-12、2-21、2-31;第3代12、21年生的林分,记为3-12、3-21;第4代10年生的林分,记为4-10。每个杉木林分种植地的自然条件(海拔、坡向、坡度、植被类型等)较接近,在每个林分中随机选择5个20 m×20 m的样地,在每个样地对角线上挖3个土壤剖面。将土壤剖面划分为0~20、20~40、40~60 cm土层采集土样。将3个剖面的土样混合后储存在自封袋中,共收集11个林分的165个土样。去除土样中混杂的石

块和树根等杂物,自然风干后分别制备过2、0.149 mm筛的土样供分析使用。

2.2 测定项目与方法

土壤磷素的³¹P-NMR分析参考McLaren等^[11]的方法,对0~20 cm土层的土样进行测试样品制备,随后用核磁共振仪(Bruker 300 Ultrashield,德国)进行测定。NMR参数设置为:90°脉冲,0.68 s采集时间,4.32 s脉冲延迟,12 Hz旋转,20℃,2200次扫描(3 h),无质子解耦^[12]。

土壤全磷测定采用过0.149 mm筛的土样0.1 g, HF-HClO₄加热消解后用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, PekinElmer OPTIMA 8000, 美国)测定磷浓度;土壤有效磷用NH₄F-HCl浸提法测定^[13]。土壤无机磷形态采用分级方法测定^[14]。

参考邢莹莹^[15]的研究方法制备土壤胶体颗粒样品。选取1-12、2-12、3-12和4-10的杉木人工林0~20 cm土层的土壤胶体颗粒,参考金熠^[16]的研究方法,对其进行SEM-EDS、FTIR及XRD分析。

2.3 数据处理与统计分析

采用Mestrenova软件对核磁共振数据进行分析;采用SPSS 19.0软件进行单、双因素方差分析和多重比较,用Duncan法进行差异性分析,以 $P < 0.05$ 表示处理间差异显著;通过MDI Jade 5.0软件处理XRD数据,并利用PDF标准比对卡确定衍射峰处的晶体矿物类型;采用Origin 8.5作图,图中数据均为平均值±标准误差;采用Pearson相关系数分析各指标间的相关性。

3 结果与分析

3.1 土壤磷素的³¹P-NMR图谱分析

由图1可见:在不同栽植代数杉木林土壤中检测出了4种形态的磷,即正磷酸盐、焦磷酸盐、正磷酸单酯及正磷酸二酯;正磷酸盐和焦磷酸盐为无机磷,正磷酸单酯和正磷酸二酯为有机磷,其中,正磷酸盐类化合物位于化学位移(δ)6~7处;正磷酸单酯类化合物位于 $\delta = 3\sim 6$ 处;正磷酸二酯类化合物位于 $\delta = 0\sim -2$ 处;而焦磷酸盐类化合物位于 $\delta = -4\sim -5$ 处。结合表1可知:杉木林土壤磷素形态主要是正磷酸盐,其次是正磷酸单酯,焦磷酸盐及正磷酸二酯较少。随着杉木林栽植代数的增加,土壤中正磷酸盐的相对含量在整体上呈下降趋势,4-10比1-12下降了14.01%;然而,土壤中正

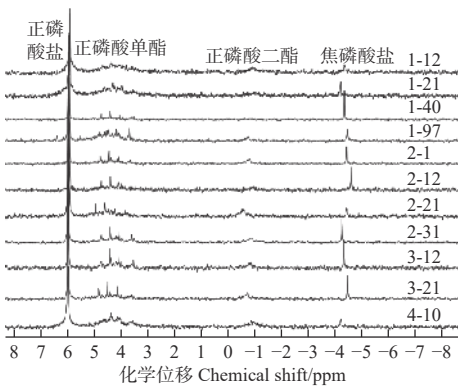


图 1 不同栽植代数杉木林土壤磷素形态特征的 ³¹P-NMR 图谱

Fig. 1 Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectra for the characteristics of phosphorus forms in *C. lanceolata* plantation soils with different planting rotations

磷酸单酯的相对含量则呈增加趋势，4-10 比 1-12 增加了 16.98%。

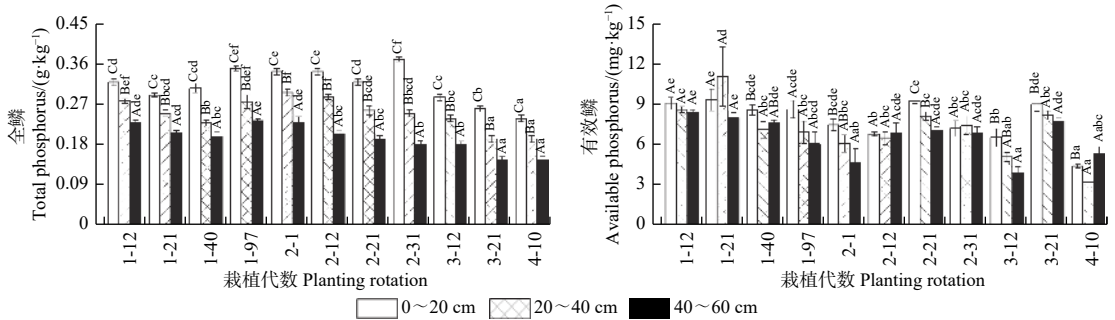
3.2 全磷、有效磷、其他形态无机磷含量比较

图 2 表明：不同栽植代数杉木林土壤中各土层的全磷（TP）含量为 0.15~0.37 g·kg⁻¹，土壤全磷含量偏低；土壤全磷含量均随土层深度的增加而降低，且各土层间差异显著，表明土壤全磷具有向表层聚集的特点；同一土层的全磷含量总体上随栽植代数的增加而降低，说明连栽使土壤总体供磷能力下降。不同栽植代数杉木林土壤中各土层的有效磷（AP）含量为 3.28~11.18 mg·kg⁻¹；随土层深度的增加，土壤有效磷含量总体降低；同一土层的有效磷含量总体上随栽植代数的增加而降低，这可能是由于随杉木栽植代数的增加，杉木因生长发育所吸

表 1 不同栽植代数杉木林土壤的 ³¹P-NMR 图谱中磷素相对含量百分比

Table 1 Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectra for the percentage of phosphorus relative content in *C. lanceolata* plantation soils with different planting rotations

栽植代数 Planting rotation	正磷酸盐 Orthophosphate/%	正磷酸单酯 Monophosphate/%	正磷酸二酯 Orthophosphate diester/%	焦磷酸盐 Pyrophosphate/%
1-12	62.33	23.92	7.31	4.44
1-21	62.21	26.81	3.84	7.14
1-40	61.12	27.18	—	11.70
1-97	51.54	36.26	3.89	8.31
2-1	47.96	34.99	5.48	11.57
2-12	55.95	27.46	7.91	8.68
2-21	53.47	31.85	10.66	4.02
2-31	52.53	29.05	10.54	7.88
3-12	52.03	34.92	5.23	7.82
3-21	49.79	38.06	5.09	7.06
4-10	48.32	40.90	4.90	5.88



注：不同大写字母表示同一栽植代数杉木人工林在不同土层间差异显著（*P* < 0.05）；不同小写字母表示同一土层不同栽植代数杉木人工林间差异显著（*P* < 0.05）。下同。

Notes: The different uppercase letters shows significant differences among the same planting rotation in different soil layers (*P* < 0.05); the different lowercase letters shows significant differences among the same soil layer in different planting rotations (*P* < 0.05). The same below.

图 2 不同栽植代数杉木林土壤全磷、有效磷含量

Fig. 2 Contents of total phosphorus and available phosphorus in *C. lanceolata* plantation soils with different planting rotations

收的磷素增多,导致土壤中有效磷含量降低。

图3表明:不同栽植代数杉木林土壤的磷酸铝盐(Al-P)和磷酸铁盐(Fe-P)含量总体上随土层深度的增加而降低,表明土壤Al-P和Fe-P具有向土壤表层聚集的特点。同一土层的闭蓄态磷(O-P)含量总体上随栽植代数的增加而增加,而磷酸钙盐(Ca-P)含量则呈降低趋势。结合图4可知:在各栽植代数杉木林土壤中,O-P在无机磷中所占比重最大(>47.1%);Ca-P和Fe-P所占比重次

之;Al-P所占比重最小(<5.36%)。Al-P和Fe-P在无机磷中所占比重随土层深度的增加而减小,O-P所占比重增大。同一土层土壤有效磷(AP)、Ca-P和Fe-P在无机磷中所占比重随栽植代数的增加而减小,O-P所占比重增大,而Al-P变化较小。说明随杉木林栽植代数的增加,土壤中易供植物吸收利用的有效磷及较难供植物吸收的Ca-P和Fe-P趋于逐渐向极难溶的O-P转化。

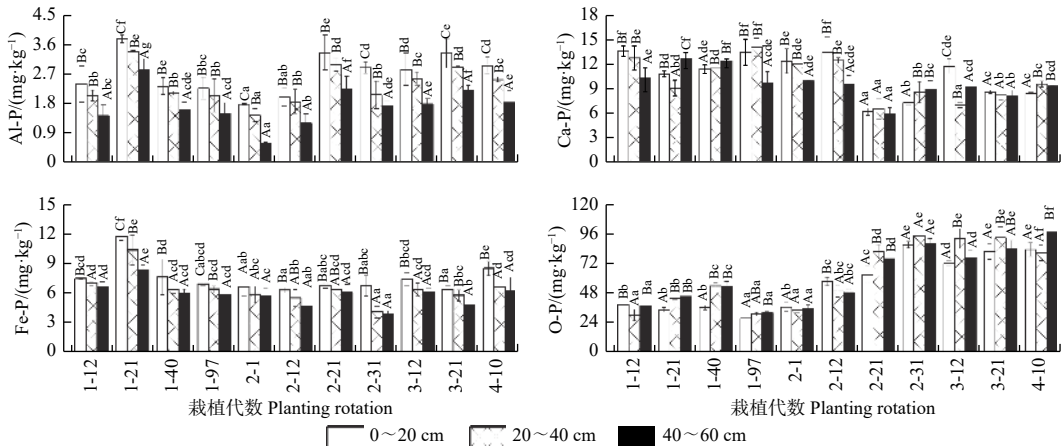


图3 不同栽植代数杉木林土壤各形态无机磷含量

Fig. 3 Contents of inorganic phosphorus in *C. lanceolata* plantation soils with different planting rotations in various forms

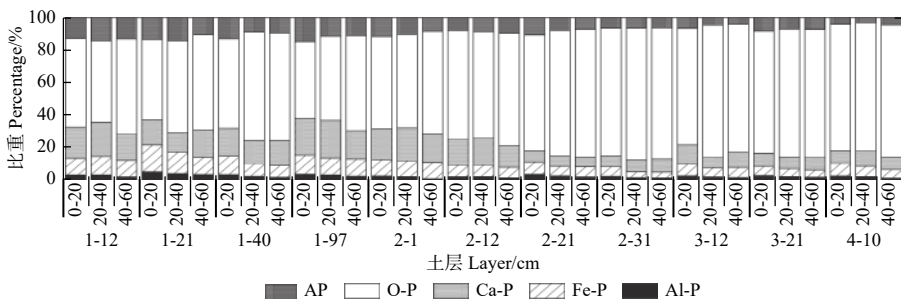


图4 不同栽植代数杉木林土壤有效磷及其他形态无机磷比重

Fig. 4 The specific gravity of available phosphorus and other forms of inorganic phosphorus in *C. lanceolata* plantation soils with different planting rotations

3.3 土壤磷素有效性、土层深度以及不同形态无机磷之间的相关性分析

表2表明:不同栽植代数杉木林土壤中的全磷(TP)、Al-P和Fe-P含量皆与土层深度呈极显著负相关($P<0.01$);有效磷(AP)、Ca-P和O-P含量与土层深度不显著相关,说明不同栽植代数杉木林土壤中的TP、Al-P和Fe-P含量会随土层深度的增加而减少;TP含量与Ca-P含量、AP含量与Al-

P含量均呈显著正相关($P<0.05$)。此外,土壤Al-P含量与Fe-P含量呈极显著正相关($P<0.01$)、与O-P含量呈显著正相关($P<0.05$),而Ca-P含量与O-P含量呈极显著负相关($P<0.01$)。

3.4 土壤胶体颗粒特征分析

图5表明:土壤胶体颗粒大小不一,形状多变、不规则,呈现片状堆叠或片状聚簇成团的形貌,未观察到有分散的球状颗粒存在;土壤胶体颗

表2 不同栽植代数杉木人工林土壤中磷素有效性与土层深度、各形态无机磷之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between phosphorus availability and soil depth, various forms of inorganic phosphorus in Chinese fir plantation soils with different planting rotations

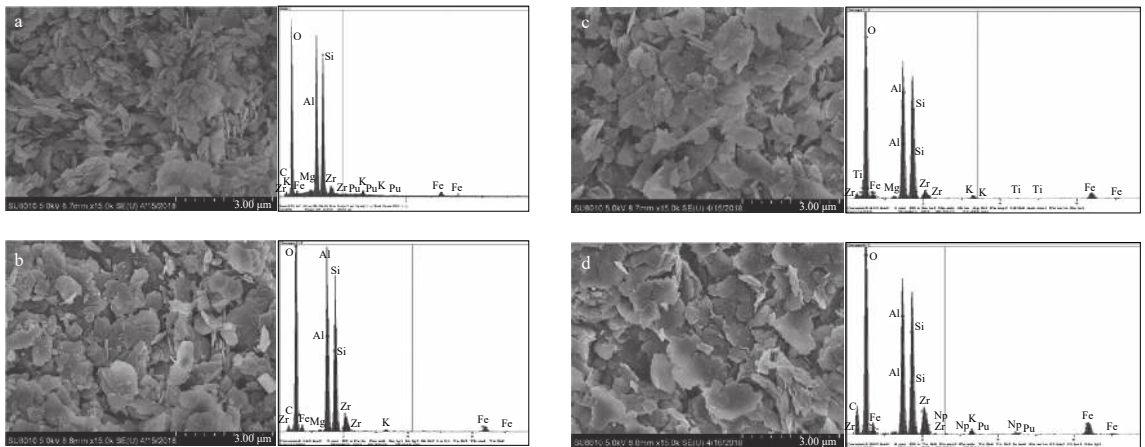
项目 Items	土层深度 Soil depth	TP	AP	Al-P	Fe-P	Ca-P	O-P
土层深度 Soil depth	1						
TP	-0.783**	1					
AP	-0.270	0.325	1				
Al-P	-0.581**	0.219	0.417*	1			
Fe-P	-0.449**	0.324	0.324	0.638**	1		
Ca-P	-0.183	0.346*	0.072	-0.296	0.166	1	
O-P	-0.090	-0.314	-0.239	0.386*	-0.249	-0.731**	1

注: *表示双侧显著相关($P < 0.05$), **表示双侧极显著相关($P < 0.01$)。

Notes: * Indicates a significant bilateral correlation ($P < 0.05$), **Indicating bilateral extremely significant correlation ($P < 0.01$).

粒中主要存在 C、O、Si 等非金属元素, 其元素峰值为 $O > Si > C$, 可能是因为土壤胶体颗粒中含有较多硅酸盐矿物质; K、Al、Fe、Mg、Zr 是土壤

胶体颗粒中主要存在的金属元素, 其中, Al 元素峰值最高, 这与多水高岭石、白云母等矿物晶体中的金属元素相像。



注: a~d 分别表示 1-12、2-12、3-12、4-10 的杉木人工林土壤胶体颗粒扫描电镜和能谱分析图。

Notes: a to d represent the SEM images and the EDS analysis of soil colloidal particles in Chinese fir plantation of 1-12, 2-12, 3-12 and 4-10, respectively.

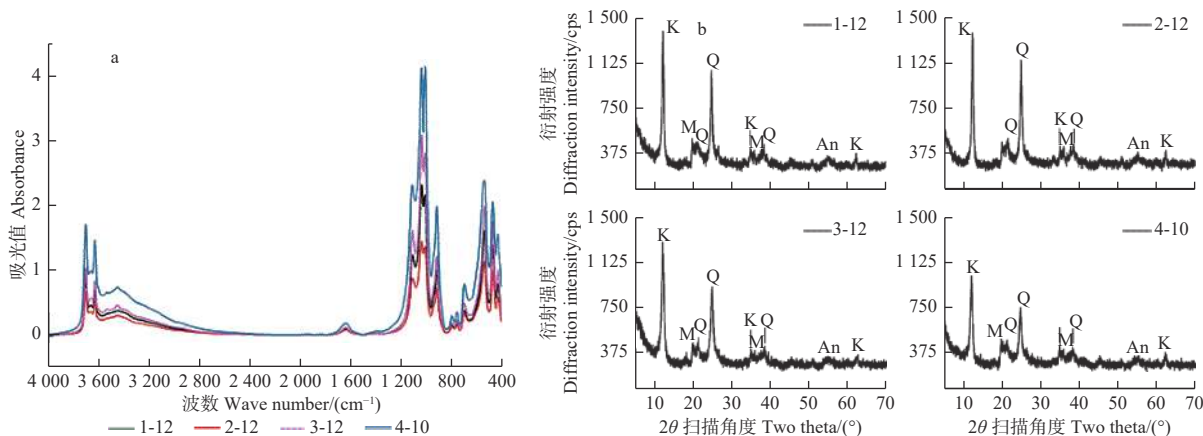
图5 不同栽植代数杉木人工林 0~20 cm 土层土壤胶体颗粒扫描电镜和能谱分析

Fig. 5 The SEM images and the EDS analysis of soil colloidal particles in 0~20 cm *C. lanceolata* plantation soils with different planting rotations

图 6a 表明: 土壤胶体颗粒傅里叶红外光谱 (FTIR) 吸收峰的强度有不同程度的改变, 但其所对应的峰形基本无变化, 说明连栽未改变杉木林土壤的基本组成成分, 但对各组分含量有影响; 波数为 $4\ 000 \sim 1\ 300\ \text{cm}^{-1}$ 的中高频区内吸收峰较少, 而波数为 $1\ 300 \sim 400\ \text{cm}^{-1}$ 的低频区内吸收峰较多; $1\ 200 \sim 970\ \text{cm}^{-1}$ 内具有最强的吸收峰, 这与碳水化合物的 C-O 伸缩振动和无机化合物中的硅酸盐及硫酸盐等的 Si-O-Si 伸缩振动有关, 说明土壤胶体颗粒中可能含有大量硅酸盐矿物; 波数

914 、 754 、 696 、 538 、 $471\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰表明土壤胶体颗粒中含有无机矿物晶体, 其中, $470\ \text{cm}^{-1}$ 附近的峰是由 Si-O-Si 弯曲振动引起的, 为 SiO_2 (石英)。FTIR 图 (图 6a) 中各波数对应的官能团峰值总体上随栽植代数的增加而增高, 表明土壤胶体颗粒中各组成成分的含量随杉木林栽植代数的增加而增多。

X 射线衍射 (XRD) 图谱 (图 6b) 表明: 12.3° 、 34.9° 、 62.3° 附近的衍射峰表征为高岭石, 19.9° 、 35.9° 附近的衍射峰表征为白云母, 21.3° 、 24.9° 、



注: 图 6b 每个峰上的字母为判读的矿物缩写。Q: 石英; M: 白云母; K: 高岭石; An: 羟云母。

Notes: the letters on each peak in Figure 6b are the abbreviations of interpreted mineral. Q: Quartz; M: Muscovite; K: kaolinite; An: hydroxymica.

图 6 不同栽植代数杉木人工林 0~20 cm 土层土壤胶体颗粒傅里叶红外光谱图 (a) 和 X 射线衍射图谱 (b)

Fig. 6 The FTIR spectra (a) and XRD spectra (b) of soil colloidal particles in 0-20 cm *C. lanceolata* plantation soils with different planting rotations

38.4°附近的衍射峰表征为石英 (SiO₂), 55.1°附近的衍射峰表征为羟云母。各个栽植代数杉木林土壤的矿物成分基本一致, 均含有大量的高岭石和石英, 其次为白云母及少量的羟云母。12.3° (高岭石) 和 24.9° (石英) 附近的衍射峰强度总体上随栽植代数的增加而减弱, 表明随栽植代数的增加, 杉木林土壤中的高岭石和石英成分减少。此外, 观察到各个栽植代数杉木林土壤的 XRD 图谱在低衍射角 (5~7°) 处有扩散带, 说明各个栽植代数的杉木林土壤中均存在弱结晶矿物。

4 讨论

4.1 不同栽植代数杉木林土壤磷素的³¹P-NMR 图谱分析

本研究通过³¹P-NMR 技术在不同栽植代数杉木林土壤中检测出的无机磷主要有正磷酸盐和焦磷酸盐, 有机磷主要为正磷酸单酯及正磷酸二酯, 各个栽植代数土壤中的无机磷均以正磷酸盐为主, 这与黄彬彬^[17]对不同母岩杉木林土壤³¹P-NMR 的研究结果一致。有研究发现, 棕壤和黑土中正磷酸盐和正磷酸单酯的含量相似^[18]。本研究表明, 正磷酸单酯含量较正磷酸盐含量少, 但正磷酸单酯的相对含量整体上随着杉木林栽植代数的增加而逐渐增多, 正磷酸盐则相反, 可能是因为正磷酸单酯与土壤中无定形金属氧化物结合量随着栽植代数的增加而增加, 从而减少了被酶催化水解的含量^[19]。另外, 随杉木生长其所吸收的土壤养分逐渐增多, 可导致土

壤正磷酸盐减少, 而林地凋落物随杉木林的更替而增加, 有机磷以凋落物的形式向土壤渗透, 从而增加了土壤正磷酸单酯含量, 这与林开森等^[20]的研究结果相似。

4.2 不同栽植代数杉木林土壤磷素特征

《中国土壤》^[21]中全磷、有效磷的含量分级标准显示, 本研究土壤全磷含量处于低水平, 表明各个栽植代数杉木林土壤磷素供应不足, 这与曹娟等^[22]的研究结果一致; 土壤有效磷含量处于低至中等水平, 可能与酸性土壤对磷素的固定有关。土壤全磷、有效磷、Al-P、Fe-P 含量总体上随土层深度的增加而降低, 可能是由于杉木凋落物在土壤表层分解, 导致养分和磷素聚集分布在土壤表层; 但张晶^[23]对碱性土壤研究表明, 土壤 Al-P、Fe-P 含量与土层深度无明显关系, 这可能与研究土壤的不同性质有关。随栽植代数的增加, 各土层土壤全磷、有效磷、Ca-P 含量减少, 而 O-P 含量增多, 可能是由于连栽导致土壤磷素发生迁移、淋溶和固定, 使全磷、有效磷含量逐渐减少。土壤 O-P 的形成或存在和土壤钙沉积相关, 土壤中形成 Ca-P 的羟基磷灰石会随 O-P 的增多而相对减少^[23]。相关性分析显示, 土壤 Ca-P 与 O-P 呈极显著负相关, 说明在一定条件下 Ca-P 与 O-P 之间存在明显的转化关系; 土壤有效磷与 Al-P 呈显著正相关, 表明 Al-P 是土壤的有效磷源, 这与夏丽丹等^[24]的研究结果相似。土壤磷素有效性与无机磷形态及含量密切相关, Ca-P 是土壤无机态磷存在的主要形

态,其含量越高,表明土壤风化程度越小^[25]。本研究表明,在各土壤中,O-P在不同形态无机磷中所占的比重最大,Ca-P和Fe-P次之,而Al-P最小。Holmboe等^[26]研究表明,土壤O-P在酸性土壤无机磷中所占比重可达80%以上,而在石灰性土壤中仅占10%~25%,这与本研究结果相似。Ca-P在土壤持磷方面起重要作用,是土壤有效磷的主要来源^[27]。本研究中,土壤Ca-P所占比重随栽植代数的增加而减小,说明随土壤风化程度的增大,Ca-P趋于逐渐向极难溶的O-P转化。

综上,连栽杉木林土壤有效磷含量低、地力衰退的原因可能有:(1)土壤磷素向土壤表层聚集分布,磷素养分易随水土的流失而减少;(2)Al-P是土壤的有效磷源,土壤中Al-P含量较少,导致有效磷含量较低;(3)连栽土壤中有有效磷、Ca-P、Fe-P趋于向极难溶的O-P转化。

4.3 不同栽植代数杉木林土壤胶体颗粒特征

扫描电镜下,不同栽植代数杉木林土壤胶体颗粒呈现片状堆叠或成团的形貌;能谱分析显示,土壤中O、Al、Si元素含量较高,而C、K、Mg、Fe、Zr等元素含量较少(图5),表明土壤中包含有机物及较多硅酸盐矿物质。不同栽植代数杉木林土壤胶体颗粒的FTIR图谱大致相同(图6a),这与王旭刚等^[28]对玄武岩赤红壤的研究结果大致相同。FTIR图谱的吸收峰表明土壤中含有硅酸盐、硫酸盐、碳水化合物及有机化合物等。此外,FTIR图谱(图6a)中各波数对应的官能团峰值随栽植代数的增加而增大,说明连栽使土壤各组成成分的含量逐渐增多。

XRD图谱(图6b)表明,随栽植代数的增加,杉木林土壤中的高岭石和石英成分减少。王旭刚等^[28]发现,玄武岩赤红壤不同剖面土壤矿物组成主要有高岭石和石英等;还发现表层土壤的矿物质结晶程度比深层土差,可能是由于人为活动,导致表层土熟化程度较高。本研究发现,随栽植代数的增加,表层土中晶体矿物(高岭石和石英)的衍射峰强度减弱,推测连栽使土壤熟化程度增大,导致土壤矿物质结晶程度较低。许欢等^[29]对广东赤红壤区农业旱地进行研究,表明熟化程度较高土壤的速效磷含量较高。硅酸盐矿物质大多数带负电荷,对磷酸根的吸附能力较差,故其对土壤磷素的吸附固定无较大影响^[30];高岭石属层状硅酸盐矿物,带负电荷,对磷酸根的吸附能力较差,而石英

属稳定矿物,不易风化^[31],故这些物质的变化是否会影响土壤有效磷含量还需进一步研究确定。目前,关于连栽林业地土壤熟化程度及矿物质结晶程度对土壤有效磷是否有影响的研究鲜有报道,在今后的试验中可对此进行相关研究,为探究连栽地土壤磷素有效性降低的原因提供新的研究思路。

5 结论

不同栽植代数杉木林土壤中共存在正磷酸盐、焦磷酸盐、正磷酸单酯及正磷酸二酯4种形态的磷,主要以正磷酸盐和正磷酸单酯为主;随杉木林栽植代数的增加,土壤正磷酸盐含量总体下降,正磷酸单酯含量则总体增加。土壤全磷、有效磷、Ca-P含量随栽植代数的增加而减少,而O-P含量则增多;O-P在无机磷中所占比重最大,Al-P所占比重最小。导致连栽杉木林土壤有效磷含量低的因素为:土壤全磷、有效磷、Al-P、Fe-P向土壤表层聚集分布;土壤中正磷酸盐(无机磷)含量随杉木林栽植代数的增加而减少,且Al-P含量较少;连栽土壤中有有效磷、Ca-P和Fe-P趋于向极难溶的O-P转化。不同栽植代数杉木林土壤胶体颗粒主要呈片状堆叠,矿物组成大致相同;连栽可增加土壤各组成成分含量,降低土壤矿物质结晶程度。

参考文献:

- [1] 于姣姣,李莹,殷丹阳,等.杉木对低磷胁迫的响应和生理适应机制[J].林业科学研究,2017,30(4):566-575.
- [2] 赵均嵘.杉木林生态系统转换对土壤磷形态的影响及其机制[D].福州:福建农林大学,2012.
- [3] 周玉泉,康文星,陈日升,等.不同栽植代数杉木林养分吸收、积累和利用效率的比较[J].生态学报,2018,38(11):3868-3878.
- [4] 韦宜慧,陈嘉琪,董玉红,等.杉木人工林土壤溶磷细菌筛选及培养条件优化[J].林业科学研究,2020,33(4):83-91.
- [5] 陈隆升,陈永忠,彭邵锋,等.油茶对低磷胁迫的生理生化效应研究[J].林业科学研究,2010,23(5):782-786.
- [6] Sun H Y, Wu Y H, Yu D, et al. Altitudinal gradient of microbial biomass phosphorus and its relationship with microbial biomass carbon, nitrogen, and rhizosphere soil phosphorus on the eastern slope of Gongga Mountain, SW China[J]. PloS One, 2013, 8(9): 1123-1126.
- [7] 保琦蓓.有机肥释放的水分散性胶体的性质特征及其对土壤重金属迁移活化的研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [8] 刘瑾.农田土壤水分散性胶体磷的赋存形态、活化机制及阻控技术研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [9] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, et al. Carbon mineralization of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) soils under different temperat-

- ure and humidity conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 66-71.
- [10] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Dissolved organic carbon and nitrogen in precipitation, throughfall and stemflow from *Schima superba* and *Cunninghamia lanceolata* plantations in subtropical China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(1): 19-22.
- [11] McLaren T I, Simpson R J, McLaughlin M J, *et al.* An assessment of various measures of soil phosphorus and the net accumulation of phosphorus in fertilized soils under pasture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(4): 543-554.
- [12] Liu J, Yang J J, Liang X Q, *et al.* Molecular speciation of phosphorus present in readily dispersible colloids from agricultural soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(1): 47-53.
- [13] 中华人民共和国林业行业性标准. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [15] 邢莹莹. 重度盐碱地改良后土壤胶体变化及营造杨树生长后效[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [16] 金熠. 增施猪粪及猪粪生物炭对稻田土壤磷素迁移转化的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [17] 黄彬彬. 不同母岩和林龄杉木人工林土壤磷素形态特征研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [18] 张广娜, 陈振华, 陈利军, 等. 东北地区三种典型土壤磷组分的³¹P核磁共振研究及其与土壤磷酸酶活性的关系[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 617-623.
- [19] Celi L, Barberis E, Turner B L, *et al.* Abiotic reactions of inositol phosphates in soil[M]. Wallingford, UK: CAB International, 2007.
- [20] 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.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [22] 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.
- [23] 张晶. 北京野鸭湖湿地土壤中磷的形态分布和转化行为研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [24] 夏丽丹, 曹升, 张虹, 等. 不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(5): 1101-1111.
- [25] Linquist B A, Ruark M D, Hill J E. Soil order and management practices control soilphosphorus fractions in managed wetland ecosystem Nutrient cycle agroecosystem[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90(1): 51-62.
- [26] Holmboe N, Kristensen E, Andersen F Ø. Anoxic decomposition in sediments from a tropical mangrove forest and the temperate Wadden Sea: Implications of N and P addition experiments[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 53(2): 125-140.
- [27] Chen H J. Phosphatase activity and P fractions in soils of an 18-year old Chinese fir plantation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 178(3): 301-310.
- [28] 王旭刚, 孙丽蓉. 土壤剖面胶体中铁氧化物及其厌氧还原特征研究[J]. *河南农业科学*, 2009, 38(3): 38-42.
- [29] 许欢, 周波, 张池, 等. 赤红壤地区不同熟化程度旱地理化特性及酶活性差异研究[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(9): 79-82.
- [30] 刘泉利. 氧化镧改性硅酸盐矿物的表征及其除磷机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [31] 王小波, 王艳, 卢树昌, 等. 改性高岭土对水体中氮磷去除效果的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(9): 1784-1788.

Characteristics of Soil Phosphorus in *Cunninghamia lanceolata* Plantations with Different Planting Rotations

ZHANG Hong, YU Jiao-da, LI Hai-yang, ZHANG Yan-lin, PAN Fei, ZHOU Chui-fan, LIU Ai-qin

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian Provincial Colleges and University Engineering Research Center of Plantation Sustainable Management, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: [Objective] To study the changes of soil phosphorus and morphological characteristics in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different planting rotations and to determine the factors affecting soil phosphorus availability of *C. lanceolata* plantation. [Method] The contents of total P, available P and inorganic P in the soil were determined, and the characteristics of phosphorus form, structure and mineral composition in soil were analyzed by using ^{31}P -NMR, SEM-EDS, FTIR and XRD. [Result] The results of ^{31}P -NMR analysis showed that the content of orthophosphate decreased, and the content of orthophosphoric monoester increased in *C. lanceolata* plantation after successive planting. The contents of total P, available P and Ca-P in soil decreased with the increase of planting rotations, which was opposite in the contents of O-P. The O-P content took the largest proportion among all forms of inorganic phosphorus, while the Al-P content took the smallest proportion. The SEM-EDS analysis showed that the soil colloid particles were stacked in sheets. The FTIR spectra showed that there was little difference in the surface functional group structure. The XRD analysis showed that the diffraction peak intensity of kaolinite and quartz decreased with the increase of planting rotation. [Conclusion] The soil morphology of *C. lanceolata* plantations with different planting rotations is mainly dominated by orthophosphate and orthophosphoric monoester. The total P, available P, Al-P and Fe-P will accumulate and distribute to the soil surface layer with the successive planting. The content of orthophosphate in the soil will decrease with the increase of planting rotations. Less content of Al-P in soil and the conversion of available P, Ca-P, Fe-P to the extremely insoluble O-P are important factor leading to low content of available phosphorus in the soil of successive planted *C. lanceolata* plantation. Successive plantation will increase the degree of soil maturation and decrease the degree of soil mineral crystallization.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata* plantation; phosphorus; successive planting; soil colloidal particles; ^{31}P -NMR

(责任编辑: 徐玉秀)