

杉木纯林及其混交林土壤团聚体 有机磷组分分布特征

崔宇鸿, 张钱春, 燕 羽, 蒋晨阳, 樊容源, 叶绍明*

(广西大学 林学院, 南宁 530004)

摘 要: 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 以广西凭祥杉木纯林、杉木-火力楠混交林、杉木-米老排混交林为研究对象, 探讨了不同杉木林分类型土壤团聚体中有机磷组分的分布特征, 从土壤团聚体的角度揭示有机磷组分对不同林分类型的响应特征。结果表明, 除高稳性有机磷主要分布在大粒径团聚体中外, 其余组分有机磷含量均表现为随着粒径减小而增加, 其中 <0.25 mm 粒径团聚体的有机磷含量最高, 而受粒径分布影响, <2 mm 粒径团聚体的有机磷储量最高; <0.25 mm、 >2 mm 粒径团聚体和土壤团聚体稳定指标与各有有机磷组分储量呈极显著正相关, 在保持土壤稳定的基础上, 可通过提高 >2 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体的占比能有效增加土壤有机磷储量; 在 3 种林分类型中, 杉木-火力楠混交林能够有效的提高土壤团聚体稳定性, 提高土壤有机磷含储量。因此, 选择合适的混交树种, 有助于土壤生态环境质量提升及促进森林资源的可持续经营管理。

关键词: 杉木; 林分类型; 土壤团聚体; 有机磷组分

中图分类号: S152; S718.5

文献标志码: A

Distribution Characteristics of Soil Aggregate Organic Phosphorus in Pure and Mixed *Cunninghumia lanceolata*

CUI Yuhong, ZHANG Qianchun, YAN Yu, JIANG Chenyang, FAN Rongyuan, YE Shaoming*

(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: With the method of field investigation and indoor analysis, we studied the distribution characteristics of organic phosphorus components in soil aggregates of different types of *C. lanceolata* stands including pure *C. lanceolata* stands, mixed *C. lanceolata* and *Michelia macclurei* forests, and mixed *C. lanceolata* and *Mytilaria laosensis* in Pingxiang, Guangxi, revealing the response characteristics of organic phosphorus components to different forest types from the perspective of soil aggregates. The results showed that except highly stable organic phosphorus, which was mainly distributed in large particle size aggregates, the content of organic phosphorus in other components increased with the decrease of particle size. The content of organic phosphorus in aggregate with particle size <0.25 mm was the highest, and the storage of organic phosphorus in aggregate with particle size <2 mm was the highest due to the influence of particle size distribution. The stability indexes of 0.25 mm and >2 mm aggregates and soil aggregates were significantly positively correlated with the reserves of various organic phosphorus components. On the basis of maintaining soil stability, the reserves of soil organic phosphorus could be effectively in-

收稿日期: 2022-12-03; 修改稿收到日期: 2023-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260382)

作者简介: 崔宇鸿(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 583665196@qq.com

* 通信作者: 叶绍明, 教授, 博士生导师, 主要从事森林经理学、森林生态学研究。E-mail: yshaoming@163.com

creased by increasing the proportion of >2 mm and <0.25 mm aggregates. Among the three forest types, the mixed forest of *C. lanceolata* and *Michelia macclurei* could effectively improve the stability of soil aggregates and increase soil organic phosphorus reserves. Therefore, the selection of suitable mixed tree species would help to improve the quality of soil ecological environment and promote the sustainable management of forest resources.

Key words: *Cunninghumia lanceolata*; stand type; soil aggregates; organic phosphorus component

磷素是植物生长不可缺少的营养元素,是蛋白质、ATP、DNA、RNA 等生物大分子的关键构成元素,参与植物不同生长阶段的生理生化过程^[1]。植物生长过程中主要从土壤获取磷素,土壤中的磷素依据化学形态特征可分为有机磷和无机磷两种形态^[2]。然而,土壤中绝大部分磷素具有难溶解和难移动等特点,有研究表明,只有少部分溶于土壤溶液的无机磷和少部分能溶于水的有机磷能直接被植物同化利用,因此磷素被认为是限制植物生产力的重要因素之一^[3-4]。土壤磷素很大一部分以有机磷的形式存在,土壤有机磷占土壤总磷的 20%~80%,其活性大小与土壤供磷能力密切相关,有机磷可被磷酸酶、有机酸和土壤微生物矿化成无机磷供植物获取利用,因此有机磷可视作土壤中的潜在有效磷库^[5]。根据 Bowman 和 Cole 提出的土壤有机磷连续浸提分级法,可以将土壤有机磷分为活性有机磷、中度活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷,其中活性有机磷较易发生矿化,最容易被植物吸收利用;中度活性有机磷需要在一定的激发条件引导下才能发生矿化;中稳性有机磷在酸性条件下会溶解,很难发生矿化;高稳性有机磷最难发生矿化^[6]。由于亚热带地区以酸性红壤为主,土壤中富含的 Fe、Al、Ca 等矿物质对磷素具有较高的固定和吸附能力,进一步加深了亚热带森林生态系统的有效磷短缺^[1]。因此,对亚热带地区红壤中的有机磷组分分布特征进行研究,有助于实现土壤磷的可持续循环。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是土壤养分稳定和保护的载体,影响着土壤的物理、化学和生物学特性^[7]。根据形成和稳定机制的不同,将土壤团聚体划分为大团聚体(>0.25 mm)和小团聚体(≤ 0.25 mm)^[8],不同粒径大小的土壤团聚体对磷素的吸附、保持和供应能力存在明显差异,因此,其组成比例会影响 cv 土壤磷素水平的高低^[9]。比如细小颗粒物质含有更多的活性有机磷和易矿化有机磷^[10];在砂姜黑土之中有机磷主要存在于 <0.005 mm 粒径中,不同有机磷组分含量随粒径的减小而增大^[11];在 >2 mm 粒径的团聚体中稳性有机磷和高稳

性的含量高于小团聚体,而活性有机磷和中度活性有机磷的含量在 >2 mm 和 <0.5 mm 粒径中均较高^[12]。同时团聚体的形成和稳定过程十分复杂,除了受自然条件影响外,还受人为活动的严重影响,导致不同地区的土壤团聚体组成比例有明显不同^[13]。有研究表明,桉树或马尾松人工纯林与固氮树种混交种植后土壤团聚体有机磷的含量显著增加^[14]。因此,评估亚热带地区杉木纯林和混交林不同粒径土壤团聚体中有机磷组分的含量和其组成比例的差异,对于系统了解杉木人工林经营过程中有机磷在土壤团聚体中的滞留-释放机制具有重要的现实意义。

杉木(*Cunninghumia lanceolata*)是中国特有的亚热带速生丰产树种,具有生长周期短、材质优良、产量高、繁殖易等特点^[15],在中国亚热带地区有悠久广泛的种植历史。数据统计结果显示,杉木在中国的栽植面积已超 1 000 万 hm^2 ,约占中国人工林总栽植面积的 26.5%和世界人工林总面积的 5%,在中国林业生产和生态建设中具有举足轻重的地位^[16]。

然而,为了追求生产力杉木人工林长期以纯林形式经营并多代连栽,导致林分结构单一、地力衰退、养分循环失调和生产力下降等一系列生态问题,严重影响了杉木人工林的可持续经营^[17]。对此,许多学者对如何提高杉木人工林生产力开展了诸多研究并取得了一系列研究成果,研究发现营造混交林在提高人工林土壤肥力、改善养分循环、丰富林分结构、增加物种多样性和提高生产力等方面均有明显优势^[18]。但目前对于杉木混交林土壤养分的研究多集中于传统的生态化学计量分析或简单的元素测定,并未对土壤团聚体中不同有机磷组分分布特征进行深入探讨,是否能通过各形态有机磷在不同杉木林分类型土壤团聚体中的分布及循环特征反映林分的生长状态仍不明确。因此,本研究以广西壮族自治区凭祥市中国林业科学院热带林业实验中心大青山实验场的杉木-米老排(*Mytilaria laosensis*)混交林、杉木-火力楠(*Michelia macclurei*)混交林以及杉木纯林为研究对象,开展不同混交林分杉木林分类型土壤团聚体的有机磷组分分布及变化特征的

研究,从土壤团聚体的角度揭示有机磷组分对不同林分类型的响应特征。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验场(106°41′—106°59′E,21°57′—22°16′N),属南亚热带季风气候,年平均气温为 20~22℃,最高气温为 40.3℃,最低气温为-1.3℃,每年 10℃以上的积温为 6 000~7 600℃,全年日照时间 1 218~1 620 h。降水充沛,年平均降水量 1 200~1 500 mm,平均相对湿度在 80%以上,降水主要集中在 4—10 月。地形地貌以低山丘陵为主,土壤类型主要为红壤,成土母岩主要为砂岩,研究区域的森林植被主要包括杉木、火力楠

和米老排等。

1.2 样地设置与样品采集

2019 年 6 月,对中国林业科学研究院热带林业中心大青山实验场的杉木纯林及混交林进行全面综合考察,在野外实地调查的基础上,根据不同杉木林分的地质、地貌、地形和施肥情况等条件进行综合考虑,选择成土母质相同、坡向坡度相似、海拔基本一致、地块位置比较集中、施肥管理水平基本一致的杉木纯林(Ⅰ)、杉木-火力楠混交林(Ⅱ)和杉木-米老排混交林(Ⅲ)为采样对象(表 1)。选为采样对象的林分林龄均为 27 年,于 1992 年营造,种植行间距均为 2 m×3 m,郁闭度为 0.85,杉木-火力楠混交林和杉木-米老排混交林的混交比例均为 3:1,在 3 个林分类型种植过程中,均按照近自然林经营原则管理,未受到重大病虫害和自然灾害的影响。

表 1 不同林分类型样地基本情况
Table 1 Basic situation of sample plots of different stand types

林型 Stand type	平均树高 Height/m	平均胸径 Diameter/cm	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	郁闭度 Crown density	凋落物质量 Litter mass/(g/m ²)
Ⅰ	13.64	16.92	阳坡 Sunny-slope	32	728	0.85	340.58
Ⅱ	16.47	21.30	阳坡 Sunny-slope	27	730	0.85	723.66
Ⅲ	16.29	21.03	阳坡 Sunny-slope	23	725	0.85	566.84

注:Ⅰ.杉木纯林;Ⅱ.杉木-火力楠混交林;Ⅲ.杉木-米老排混交林。下同。
Note:Ⅰ. Pure plantation of *C. lanceolata*; Ⅱ. Mixed plantation of *C. lanceolata* and *Michelia macclurei*; Ⅲ. Mixed plantation of *C. lanceolata* and *Mytilaria laosensis*. The same as below.

在每个杉木林分类型按随机原则设置 5 个 30 m×30 m 的标准样方,相邻样方间距离 300 m,共 15 个标准样方。每个样方每按“S”形设置 5 个采样点,取土样前在每个采样点的土壤表面收集 1 m² 的凋落物样品,之后从表层向下在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层采集原状土样,将各个采样点采集的土壤按土层混合,每个林分类型得到 10 份混合土样,共 30 份土样(5 个样方×2 个土层×3 个林分类型)。同时,另用环刀在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层采集原状土样。

为避免土样团聚体结构破坏,将采集好的原状土样装入铝盒带回实验室。在实验室内将每一份混合土样沿其自然结构轻轻分开,过 10 mm 筛除去小石块和动植物残体等,置于室内阴凉通风处风干。风干后的土样一部分用于测定全土基本理化性质(表 2);另一部分依据沙维洛夫干筛法^[19]分离成>2 mm、2~1 mm、1~0.25 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体用于测定各形态有机磷含量。

1.3 测定项目与方法

土壤容重采用环刀法,pH 值采用电位法(水土

比 1:2.5),全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法^[20],有机磷组分采用 Bowman 等^[6]提出的有机磷分级方法进行测定。

1.4 数据处理

土壤团聚体平均重量直径(MWD,mm)和几何平均直径(GMD,mm)的计算公式分别^[21]为:

$$D_{MWD} = \sum_{i=1}^n (x_i \times w_i)$$
 (1)

$$D_{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln d_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$
 (2)

式中: D_{MWD} 为土壤团聚体平均重量直径(mm); D_{GMD} 为几何平均直径(mm); d_i 为第 i 粒径团聚体直径的平均值(mm); w_i 为第 i 粒径团聚体的重量百分含量(%)。

土壤有机磷储量(S_{SP} ,g/m²)的计算公式^[22]为:

$$S_{SP} = \sum (W_i \times P_i) \times \rho \times H \times 10$$
 (3)

式中: W_i 为第 i 粒径团聚体的重量百分含量(%);

P_i 为第 i 粒级团聚体有机磷含量(g/kg); ρ 为土壤容重(g/cm^3); H 为土壤厚度(cm)。

各粒级团聚体对土壤有机磷的贡献率($R, \%$)计算公式^[23]为:

$$R = \frac{S_{\text{SP},i}}{S_{\text{SP}}} \times 100\%$$

(4)

表 2 不同杉木林分类型土壤理化性质

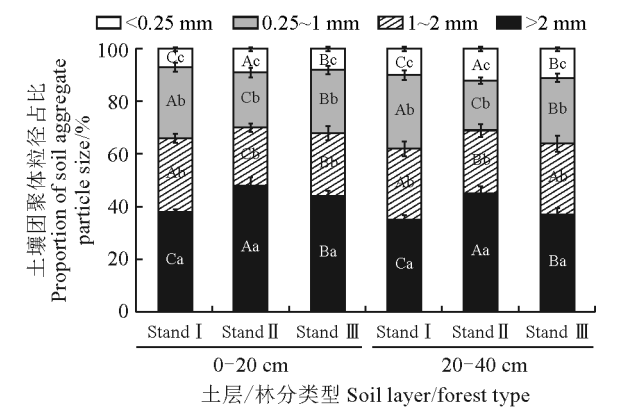
Table 2 Soil physico-chemical characteristics under different stand types of <i>Cunninghamia lanceolata</i>							
土层 Soil layer /cm	林分类型 Stand type	全磷 Total P/(g/kg)	总有机磷 Total organic phosphorus/(g/kg)	占比 Proportion/%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	孔隙度 Total porosity/%	pH
0—20	I	233.34±40.14c	116.69±1.40c	50.01	1.31±0.02a	20.42±0.30b	4.37±0.01a
	II	300.49±38.93a	136.15±1.30a	45.31	1.24±0.01b	53.13±0.22a	4.31±0.01c
	III	261.63±38.86b	131.80±1.80b	50.38	1.26±0.01b	52.38±0.38a	4.33±0.01b
20—40	I	208.18±31.34c	62.69±1.74c	30.11	1.33±0.01a	49.96±0.80b	4.41±0.02a
	II	263.14±21.35a	87.81±0.96a	33.37	1.26±0.01b	52.60±0.19a	4.27±0.01b
	III	243.41±31.07b	73.15±2.00b	30.05	1.27±0.01b	52.92±0.19a	4.30±0.01b

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters meant significant difference at 0.05 level.

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成及稳定性特征

不同杉木林分类型土壤团聚体分布规律如图 1 所示,从图 1 中可知,同一林分同一土层内 >2 mm 粒径团聚体占比显著高于其余粒径团聚体,并且团聚体占比随着粒径减小呈减小趋势。



不同大写字母表示数据在同一土层不同林分类型差异显著($P<0.05$)。不同小写字母表示数据在同一土层不同粒径团聚体间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同杉木林分类型土壤团聚体组成比例
Different capital letters indicate significant difference in data of different stand types in the same soil layer at 0.05 level.

Different lowercase letters indicated that the data were significantly different among aggregates with different particle sizes in the same soil layer at 0.05 level. The same as below.

Fig.1 Composition of soil aggregates in different stand types of *Cunninghamia lanceolata*

式中: $S_{\text{SP},i}$ 为第 i 粒级团聚体有机磷储量(g/m^2); S_{SP} 为全土有机磷储量(g/m^2)。

所有数据均采用 SPSS 27.0 和 Excel 365 进行统计分析,采用单因素方差分析和多重比较法对数据进行差异显著性比较($P<0.05$),图表均采用 Origin 2021 进行制作。图表中数据为平均值±标准差。

而不同的杉木林分类型对土壤团聚体组成也有显著影响,在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,不同林分类型的 >2 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体占比均表现为 $\text{II}>\text{III}>\text{I}$,除了 20—40 cm 土层的 2~1 mm 粒径,其余 2~1 mm 粒径和 1~0.25 mm 粒径团聚体占比均表现为 $\text{I}>\text{III}>\text{II}$ 。

不同杉木林分类型土壤团聚体稳定性指标如表 3 所示,在 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层中,各林分类型土壤 MWD、GWD 均表现为 $\text{II}>\text{III}>\text{I}$ 。

表 3 不同杉木林分类型土壤团聚体稳定性

Table 3 Stability of soil aggregates in the different stand types of <i>Cunninghamia lanceolata</i>			
土层 Soil layer/cm	林分类型 Stand type	MWD	GMD
0—20	I	2.86±0.0068C	1.68±0.0056C
	II	3.35±0.1201A	1.93±0.0111A
	III	3.18±0.0164B	1.83±0.0013B
20—40	I	2.71±0.0125C	1.50±0.0103C
	II	3.21±0.0131A	1.77±0.0161A
	III	2.81±0.0076B	1.55±0.0801B

注:不同大写字母表示数据在同一土层不同林分类型差异显著($P<0.05$)。

Note: Different capital letters indicate significant difference in data of different stand types in the same soil layer at 0.05 level.

2.2 土壤团聚体有机磷组分含量

不同杉木林分类型土壤团聚体有机磷组分含量分布如图 2 所示,在各土层中,各林分类型土壤团聚体有机磷组分含量均表现为 0—20 cm 土层高于 20—40 cm 土层,且除 20—40 cm 土层的活性有机磷和 2 个土层的高稳性有机磷外均随着粒径减小呈增加趋势。不同林分类型活性有机磷含量均表现为林分Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ;中度活性有机磷含量在 0—20 cm 土层中的>2 mm、2~1 mm、1~0.25 mm 粒径表现

为林分Ⅱ显著高于Ⅰ和Ⅲ,在 20—40 cm 土层中的>2 mm、1~0.25 mm 粒径表现为林分Ⅱ显著高于Ⅰ和Ⅲ;中稳性有机磷含量在 0—20 cm 土层中表现为林分Ⅱ和Ⅲ显著高于Ⅰ,在 20—40 cm 土层中表现为林分Ⅱ显著高于Ⅰ和Ⅲ;高稳性有机磷含量在 0—20 cm 土层中除 2~1 mm 和<0.25 mm 粒径外林分Ⅰ均显著低于林分Ⅱ和Ⅲ,在 20—40 cm 土层中除<0.25 mm 粒径外林分Ⅱ均显著高于林分Ⅰ和Ⅲ,且高稳性有机磷主要分布于大粒径团聚体中。

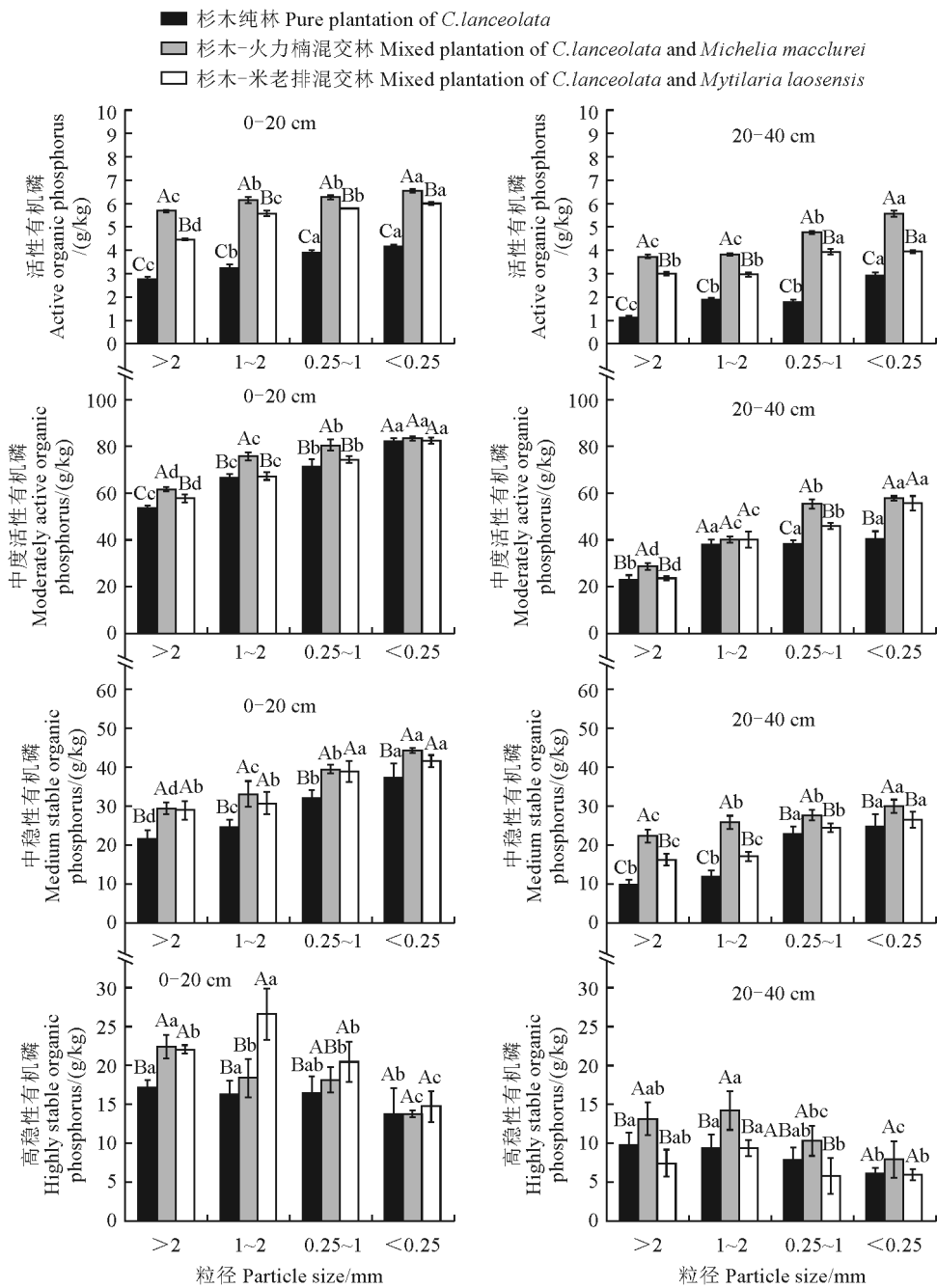


图 2 不同杉木林分类型土壤团聚体有机磷组分含量

Fig. 2 Organic phosphorus content of soil aggregates in different *Cunninghamia lanceolata* stand types

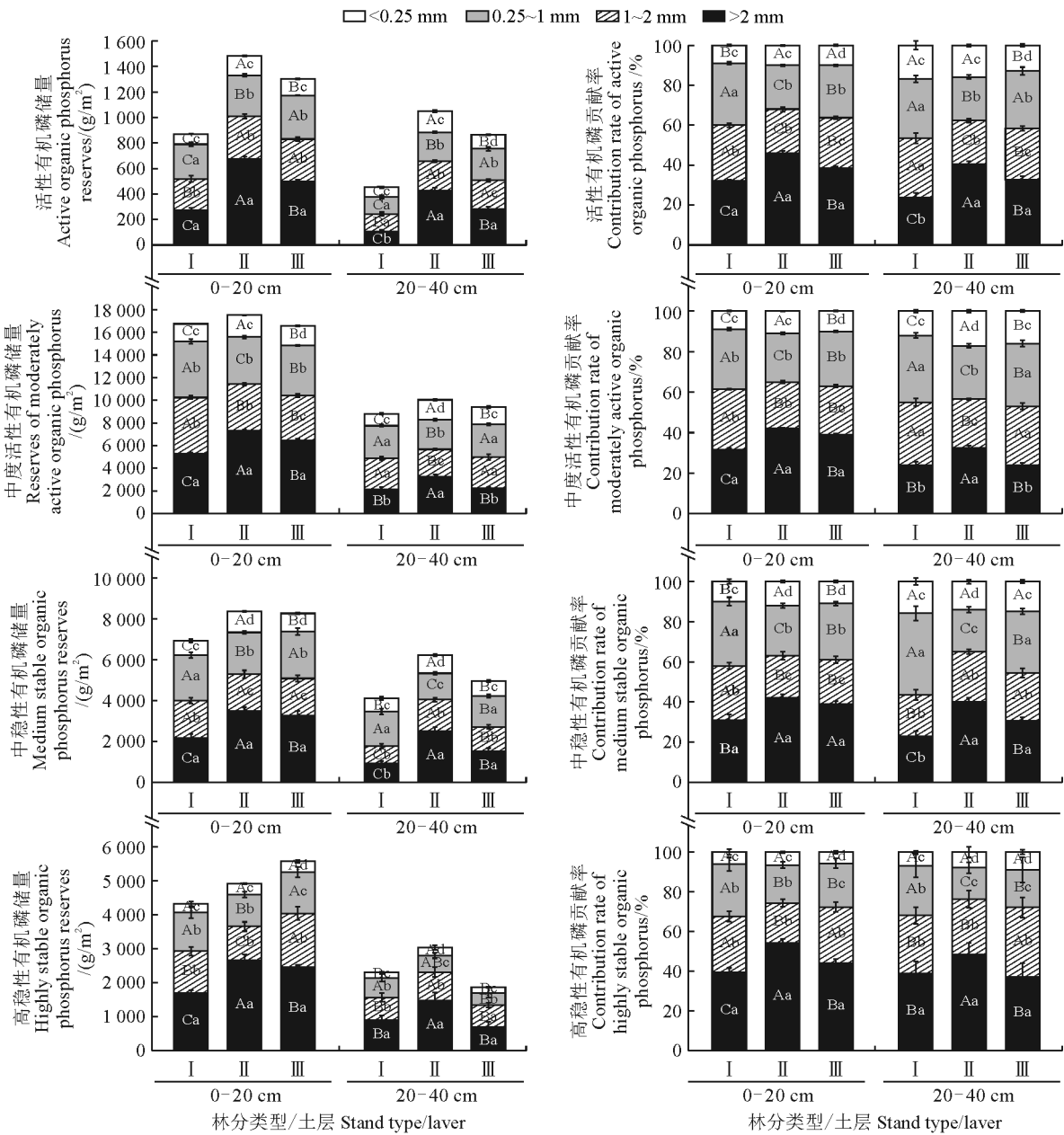


图 3 不同杉木林分类型土壤团聚体有机磷组分储量及贡献率
Fig. 3 Organic phosphorus reserves of soil aggregates and contribution in different *Cunninghamia lanceolata* stand types

2.3 土壤团聚体有机磷组分储量及贡献率

不同杉木林分类型土壤团聚体有机磷组分储量及贡献率分布如图 3 所示,在各土层中,不同林分类型土壤有机磷组分储量除 0-20 cm 土层的高稳性有机磷外,均表现为林分 II>III>I,且同一林分有机磷组分储量表现为 0-20 cm 土层高于 20-40 cm。在 0-20 cm 土层,同一林分内>2 mm 粒径团聚体的各组分有机磷储量和贡献率均高于其他粒径,而在 20-40 cm 土层,只有林分 II 内>2 mm 粒径团聚体的各组分有机磷储量和贡献率均高于其他粒

径,林分 I、III 内各组分有机磷主要分布在>2 mm、2~1 mm 和 1~0.25 mm 粒径。同时在 0-20 cm 和 20-40 cm 土层中,各林分<0.25 mm 粒径团聚体的各组分有机磷储量和贡献率均小于其他粒径。

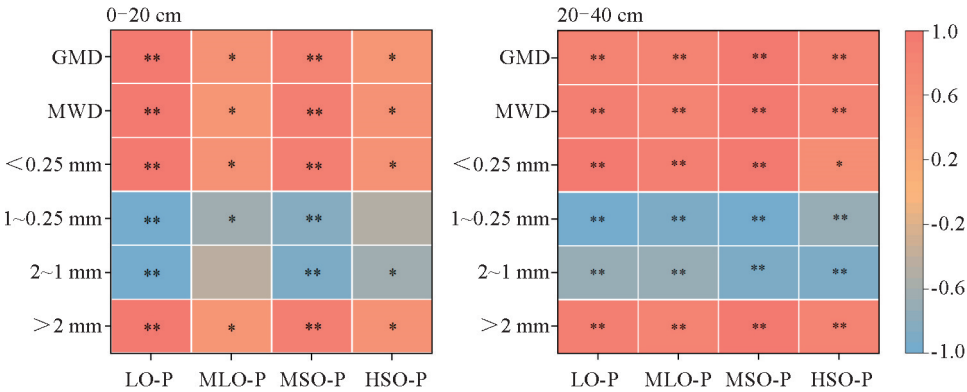
2.4 土壤团聚体特征与有机磷组分储量的关系

不同杉木林分类型土壤团聚体特征与有机磷组分储量的相关性分析结果如图 4 所示,在 0-20 cm 土层中,活性有机磷和中稳定性有机磷储量与>2 mm 粒径团聚体、<0.25 mm 粒径团聚体、MWD 和 GMD 呈极显著正相关,其余呈极显著负相关;中度

活性有机磷和高稳性有机磷储量与>2 mm 粒径团聚体、<0.25 mm 粒径团聚体、MWD 和 GMD 呈显著正相关,其中中度活性有机磷与 1~0.25 mm 粒径团聚体呈显著负相关,高稳性有机磷与 2~1 mm 粒径团聚体呈显著负相关。20~40 cm 土层整体相关性趋势与 0~20 cm 土层一致,但整体显著性更明显,除了高稳性有机磷与<0.25 mm 粒径团聚体呈显著正相关外,其余皆为极显著相关。

不同杉木林分类型土壤团聚体特征与有机磷组分储量的冗余分析结果如图 5 所示,其结果与相关性分析(图 4)相似。在 0~20 cm 土层和 20~40 cm

土层中,第一主轴和第二主轴分别解释变量的 62.22%和 94.78%、18.53%和 0.8%,土壤环境因子分别解释了 80.75%和 95.59%的总特征值,说明其对土壤团聚体稳定性及粒径分布有显著影响。其中>2 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体与有机磷各组分储量呈显著正相关性,而 2~1 mm 和 1~0.25 mm 与有机磷各组分储量呈显著负相关性。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中,2~1 mm 和 1~0.25 mm 粒径团聚体都是影响土壤团聚体特征的主要因子,其分别解释了土壤团聚体特征变化的 56.5%、17%和 2.6%、91%。



>2 mm 表示>2 mm 粒径团聚体占比;2~1 mm 表示 2~1 mm 粒径团聚体占比;1~0.25 mm 表示 1~0.25 mm 粒径团聚体占比;<0.25 mm 表示<0.25 mm 粒径团聚体占比;MWD. 土壤团聚体平均重量直径;GMD. 土壤团聚体平均几何直径; LO-P. 活性有机磷储量;MLO-P. 中度活性有机磷储量;MSO-P. 中稳性有机磷储量;HSO-P. 高稳性有机磷储量。下同。

图 4 不同杉木林分类型土壤团聚体特征与有机磷组分储量的相关性分析

>2 mm refers to the proportion of aggregates with particle size >2 mm; 2~1 mm refers to the proportion of aggregates with 2~1 mm particle size; 1~0.25 mm refers to the proportion of aggregates with 1~0.25 mm particle size; <0.25 mm refers to the proportion of aggregates with particle size <0.25 mm; MWD. The average weight diameter of soil aggregates. GMD. The average geometric diameter of soil aggregates; Active organophosphorus refers to its reserves; MLO-P. Moderately active organophosphorus refers to its reserves; MSO-P. Medium stable organophosphorus refers to its reserves; HSO-P. High stability organophosphorus refers to its reserves. The same as below.

Fig. 4 Correlation analysis of soil aggregate characteristics and organophosphorus component reserves in different *Cunninghamia lanceolata* stand types

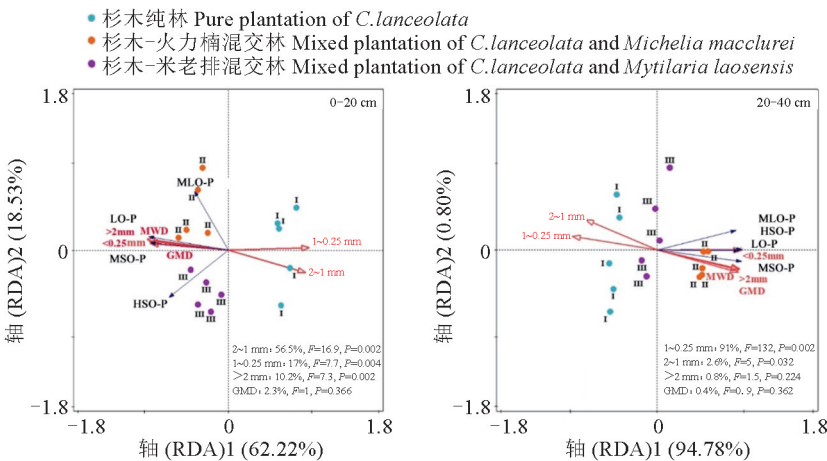


图 5 不同杉木林分类型土壤团聚体特征与有机磷组分储量的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil aggregate characteristics and organophosphorus component reserves in different *Cunninghamia lanceolata* types

3 讨论

3.1 土壤团聚体组成与稳定性特征

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其组成比例与稳定性是评价土壤结构的重要指标,稳定的土壤结构能提高土壤肥力和抗侵蚀能力^[24],其中土壤团聚体平均重量直径(MWD)、土壤团聚体平均几何直径(GMD)是评价土壤团聚体稳定性的常用指标,MWD、GMD 越高,土壤团聚体稳定性就越高^[25],而土壤颗粒在持久性有机胶结物质的作用下能形成 $<0.25\text{ mm}$ 的微团聚体,其具有良好的抗机械破坏性和调节土壤水热调节能力,之后在暂时性有机胶结物质的作用下逐步形成 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体,因此团聚体的比例同样能反映不同林分类型土壤结构的稳定性^[26]。在本研究中,3种杉木林分类型土壤均以粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体为主, $<0.25\text{ mm}$ 的微团聚体分布较少,说明3种林分类型的土壤团聚性较强、分散性较弱,但这种现象随着土层加深呈现出相反趋势。0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层的 $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体和 $<0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体占比表现为林分Ⅱ $>$ Ⅲ $>$ Ⅰ,同时 MWD、GMD 也表现为林分Ⅱ $>$ Ⅲ $>$ Ⅰ,说明营造杉木-火力楠和杉木-米老排混交林会对土壤团聚体的分布格局和稳定性产生明显影响,混交林的土壤团聚体结构相比纯林更为稳定。这是因为杉木混交林的凋落物数量显著高于杉木纯林,大量凋落物的分解增加了土壤活性有机质的积累,有机质的胶结作用能够促进大团聚体的形成,提高团聚体稳定性,同时大量凋落物能够减少表层土壤大团聚体受到雨水和地表径流的冲刷,保护大团聚体的稳定^[27]。

3.2 土壤团聚体中有机磷组分分布特征

土壤磷与团聚体的形成及稳定紧密相关^[25],而有机磷是土壤磷库的重要组成部分,有研究表明有机磷能够代表表层土壤中超过 50% 的全磷,尤其是在森林生态系统当中^[28]。在本研究中,各土层中林分Ⅰ土壤容重皆显著高于林分Ⅱ、Ⅲ,这是由于速生树种在生长过程中会导致林下土壤更为紧实,而混交林土壤中交错的根系能很好的疏松土壤,这导致土壤容重更小,混交林疏松多孔的土壤更利于养分的储存^[29]。有机磷在土壤中主要分布在较小粒径的团聚体中,除高稳性有机磷外,其余有机磷组分含量与粒径大小成反比, $<2\text{ mm}$ 粒径团聚体的含量显著高于 $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体中的含量。这是由于相较于大粒径团聚体,小粒径团聚体拥有更多与有机

磷结合的位点,在质量相同的情况下,粒径越小的土壤团聚体对有机磷的吸附能力越强^[30]。同时土壤中的黏粒矿物多包含在小粒径团聚体中,增强了小粒径团聚体对有机磷的吸附能力^[31]。文倩等^[32]的研究结果表明活性有机磷随粒径的减小其相对含量增加,与本研究结果相似,同时活性有机磷和中度活性有机磷与土壤速效磷和有效磷的关系密切^[10],因此, $<2\text{ mm}$ 粒径团聚体中吸附与保持的磷有效性更高,更利于植物利用吸收。

同时在本研究中,0—20 cm 土层土壤团聚体有机磷组分含量显著高于 20—40 cm 土层,且绝大部分情况下林分Ⅱ、Ⅲ显著高于Ⅰ,说明混交能有效的提高土壤团聚体有机磷含量。这是由于土壤养分一部分来源于凋落物分解,而混交林中凋落物生物量更多,且火力楠、米老排林下表层土壤细根生物量大,枯死细根的营养归还量大,凋落物和细根分解向土壤归还了大量的养分^[33]。土壤中的磷一部分来源于成土母质,同一块研究区域的成土母质和水热条件变化不大,但是混交林中更丰富的凋落物使土壤表层的有机质及微生物活性增加,促进了磷素的转换,并削弱雨水和地表径流的影响,减少磷素的流失,使土壤整体磷素含量增加^[27]。

因为土壤磷素储量的分布特征与不同粒径土壤团聚体的有机磷含量以及土壤团聚体的组成比例密切相关^[34],所以在本研究中,除 0—20 cm 土层的高稳性有机磷外,各土层有机磷组分储量皆表现为林分Ⅱ $>$ Ⅲ $>$ Ⅰ,且 0—20 cm 土层显著高于 20—40 cm 土层。虽然 $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体的有机磷含量在 4 个粒径中最低,但是由于其粒径占比远远高于其他粒径,导致在林分Ⅱ中, $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体对土壤有机磷各组分的贡献率皆最高,而在林分Ⅰ、Ⅲ中, $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体只在 0—20 cm 土层表现出最高的贡献率,在 20—40 cm 土层,各有机磷组分贡献率主要在 $>2\text{ mm}$ 、 $2\sim 1\text{ mm}$ 、 $1\sim 0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体中达到最高。说明在杉木-火力楠混交林中, $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体是保存有机磷组分的主要载体,在杉木纯林和杉木-米老排混交林中, $>0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体才是有机磷组分的主要载体。

3.3 土壤团聚体分布特征与有机磷组分储量间的关系

研究结果(图 4)显示,在 0—20 cm 土层中 $>2\text{ mm}$ 、 $<0.25\text{ mm}$ 粒径土壤团聚体与活性有机磷和中稳性有机磷呈极显著正相关,与中度活性有机磷和高稳性有机磷呈显著正相关,而 $2\sim 1\text{ mm}$ 粒径团聚体

与活性有机磷和中稳性有机磷呈极显著负相关,与中度活性有机磷呈显著负相关,1~0.25 mm 粒径团聚体与活性有机磷和中稳性有机磷呈极显著负相关,与高稳性有机磷呈显著负相关,与 Kurmi 等^[35]的研究结果一致。20—40 cm 土层的整体相关性趋势与 0—20 cm 土层相同,显著性更明显,除了高稳性有机磷与<0.25 mm 粒径团聚体呈显著正相关外,其余皆为极显著相关。结果表明土壤中>2 mm、<0.25 mm 粒径团聚体的占比越高,土壤有机磷组分的储量就越高,这是由于微团聚体的有机磷组分含量在各个粒径中最高,提高其占比能直接提高全土储量,同时微团聚体在有机质的胶结作用下形成大团聚体,大团聚体的形成过程中将有机质与外界隔离,提供物理保护,减少了有机磷的损失,间接提高全土储量^[24]。因此,如果土壤中较小粒径团聚体占比较大,本身其有机磷含量较低,土壤结构稳定性又较低,有机磷没有足够的保护,全土有机磷储量会大大减少。

冗余分析的结果表明,在 0—20 cm 土层,活性有机磷和中度活性有机磷是影响土壤稳定性的主要因素,而在 20—40 cm 土层,中稳性有机磷和高稳性

有机磷是影响土壤稳定性的主要因素。可能是因为在 0—20 cm 土层,凋落物的分解、动物和人类的活动对土壤造成的影响更大,活性有机磷和中度活性有机磷得到较多补充,活性有机磷与稳性有机磷储量差距较大,而在 20—40 cm 土层,土壤环境相对稳定,各组分有机磷储量差距相对较小。

4 结 论

研究结果表明,相较于纯林,杉木混交林林下的土壤全磷含量更高,土壤结构更为稳定,各有机磷组分含储量也更高。此外,在团聚体尺度上,3 个林分土壤有机磷含量随粒径的减少而增加,同时>2 mm、<0.25 mm 粒径团聚体占比与各有机磷组分储量呈正显著相关,土壤稳定性指标与各有机磷组分储量也表现此规律。因此,在保持土壤稳定的基础上,可通过适当提高>2 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体的占比以提高土壤有机磷储量。本研究结果表明,选择合适的阔叶树种与杉木混交,例如营造杉木-火力楠混交林,能更好地改善土壤团聚体稳定性,并提高土壤有机磷的储量。

参考文献:

- [1] 张增可, 吴雅华, 黄柳菁, 等. 海岛森林不同演替阶段土壤和植物的碳、氮、磷化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(5): 925-934.
ZHANG Z K, WU Y H, HUANG L J, *et al.* C, N and P stoichiometry of soil and plant in different forest successional stages in island[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(5): 925-934.
- [2] 董 雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 科尔沁沙地 4 种典型灌木灌丛下土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(1): 164-172.
DONG X, HAO Y G, XIN Z M, *et al.* Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of four typical shrubs in horqin sandy land[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(1): 164-172.
- [3] BERGKEMPER F, KUBLIK S, LANG F, *et al.* Novel oligonucleotide primers reveal a high diversity of microbes which drive phosphorous turnover in soil[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2016, **125**: 91-97.
- [4] 康扬眉, 马凯博, 黄菊莹, 等. 氮磷供给对荒漠草原土壤和白草 C:N:P 化学计量特征的影响[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(8): 1 507-1 516.
KANG Y M, MA K B, HUANG J Y, *et al.* Effects of N and P supply on the C:N:P stoichiometry in both soil and a desert steppe species *Pennisetum centrasiaticum*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(8): 1 507-1 516.
- [5] JAROSCH K A, KANDELER E, FROSSARD E, *et al.* Is the enzymatic hydrolysis of soil organic phosphorus compounds limited by enzyme or substrate availability? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **139**: 107 628.
- [6] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, **125**(2): 95-101.
- [7] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, *et al.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79**(1): 7-31.
- [8] ALAGÖZ Z, YILMAZ E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **103**(2): 419-424.
- [9] 齐 瑞, 刘锦乾, 李 波, 等. 青藏高原东缘亚高山针叶林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(12): 2 140-2 147.
- [10] QI R, LIU J Q, LI B, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of subalpine coniferous forests on the eastern edge of qinghai-tibet plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(12): 2 140-2 147.
- [11] RUBAEK G H, GUGGENBERGER G, ZECH W, *et al.* Organic phosphorus in soil size separates characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**(5): 1 123-1 132.
- [12] 孙 华, 熊德祥. 鲁南砂姜黑土及其有机无机复合体的有机磷研究[J]. 土壤通报, 1998, **29**(2): 61-64.
- [13] SUN H, XIONG D X. Study on organic phosphorus of Shajiang black soil and its organic-inorganic complex in southern Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, **29**(2): 61-64.

[12] 俞月凤, 卢凌霄, 杜 虎, 等. 不同类型森林石灰土的团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(5): 1 011-1 019.
YU Y F, LU L X, DU H, *et al.* Distribution of organic carbon and aggregation of calcareous soil in different forest types[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, **33**(5): 1 011-1 019.

[13] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, **36**(3): 415-421.
WANG Q K, WANG S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, **36**(3): 415-421.

[14] 徐浩成. 固氮树种对南亚热带人工林土壤团聚体有机磷组分及其转化的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2021.

[15] TANG L L, WANG S Q. Dynamics of soil aggregate-related C-N-P stoichiometric characteristics with stand age and soil depth in Chinese fir plantations[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, **33**(8): 1 290-1 306.

[16] HUANG Z Q, HE Z M, WAN X H, *et al.* Harvest residue management effects on tree growth and ecosystem carbon in a Chinese fir plantation in subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2013, **364**(1): 303-314.

[17] 张 喆, 黄永珍, 张 超, 等. 不同林龄杉木人工林土壤团聚体磷素分布特征[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(4): 939-948.
ZHANG Z, HUANG Y Z, ZHANG C, *et al.* Distribution of phosphorus fractions in soil aggregates in Chinese fir plantations with different stand ages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(4): 939-948.

[18] 王 凯, 雷 虹, 石 亮, 等. 沙地樟子松带状混交林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(9): 2 883-2 891.
WANG K, LEI H, SHI L, *et al.* Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* belt-mixed forests[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(9): 2 883-2 891.

[19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 378-380.

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[21] EYNARD A, SCHUMACHER T E, LINDSTROM M J, *et al.* Effects of aggregate structure and organic C on wettability of Ustolls[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, **88**(1/2): 205-216.

[22] EYNARD A, SCHUMACHER T E, LINDSTROM M J, *et al.* Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, **81**(2): 253-263.

[23] 杨 华, 龙 健, 李兆君, 等. 土地利用方式对红枫湖入湖流域土壤团聚体磷含量及其形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2 214-2 220.
YANG H, LONG J, LI Z J, *et al.* Effects of land use types on phosphorus forms and their contents in soil aggregates in watershed of Hongfeng Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(11): 2 214-2 220.

[24] MUSTAFA A, XU M G, ALI SHAH S A, *et al.* Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of Southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **270**: 110 894.

[25] WANG S Q, HUANG Y Z, YE S M. Distribution of organic carbon and nutrients in soil aggregates under different stand types of *Cunninghamia lanceolata* in southern Guangxi of China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, **67**(4): 427-438.

[26] AN S S, MENTLER A, MAYER H, *et al.* Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *CATENA*, 2010, **81**(3): 226-233.

[27] GIUMBELLI L D, LOSS A, SANTOS VENTURA B, *et al.* Aggregation index, carbon, nitrogen, and natural abundance of ¹³C and ¹⁵N in soil aggregates and bulk soil cultivated with onion under crop successions and rotations[J]. *Soil Research*, 2020, **58**(7): 622-635.

[28] ACHAT D L, BAKKER M R, SAUR E, *et al.* Quantifying gross mineralisation of P in dead soil organic matter: Testing an isotopic dilution method[J]. *Geoderma*, 2010, **158**(3/4): 163-172.

[29] 黄永珍, 王晟强, 叶绍明. 杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(9): 2 857-2 865.
HUANG Y Z, WANG S Q, YE S M. Effects of *Cunninghamia lanceolata* stand types on the changes of aggregate-related organic carbon and nutrients in surface soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(9): 2 857-2 865.

[30] PATHAN S I, ARFAIOLI P, CECCHERINI M T, *et al.* Physical protection of extracellular and intracellular DNA in soil aggregates against simulated natural oxidative processes[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, **165**: 104 002.

[31] ADESODUN J K, ADEYEMI E F, OYEGOKE C O. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **92**(1/2): 190-197.

[32] 张钱春, 王晟强, 黄永珍, 等. 不同杉木林分类型土壤团聚体生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(6): 1 028-1 035.
ZHANG Q C, WANG S Q, HUANG Y Z, *et al.* Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus within soil aggregates of four plantations in different *Cunninghamia lanceolata* stand types[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(6): 1 028-1 035.

[33] 李 宪, 廖良宁, 杨海鹏, 等. 杉木与米老排人工混交林群落木本植物空间格局研究[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(10): 1 842-1 850.
LI X, LIAO L N, YANG H P, *et al.* Spatial pattern of woody plants in artificial mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Mytilaria laosensis*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(10): 1 842-1 850.

[34] TAMURA M, SUSEELA V, SIMPSON M, *et al.* Plant litter chemistry alters the content and composition of organic carbon associated with soil mineral and aggregate fractions in invaded ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(10): 4 002-4 018.

[35] KURMI B, NATH A J, LAL R, *et al.* Water stable aggregates and the associated active and recalcitrant carbon in soil under rubber plantation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**: 135 498.

(编辑:潘新社)