

杉木纯林及其混交林土壤团聚体活性有机碳组分特征

樊容源,叶绍明*,张钱春,何雅琴,邓家珍

(广西大学 林学院,广西 南宁 530004)

摘要:为研究杉木纯林及其混交林土壤团聚体活性有机碳组分特征,以广西亚热带地区杉木-米老排、杉木-火力楠混交林及杉木人工纯林土壤为研究对象,分析 0~40 cm 土层不同粒径(>2 、 $1\sim2$ 、 $0.25\sim1$ 、 <0.25 mm)团聚体总有机碳及活性有机碳组分含量、储量、贡献率以及碳库特征指数变化。结果表明,杉木纯林及其混交林土壤团聚体主要以 >2 mm 粒径为主,团聚体占比随粒径减小呈减小趋势;杉木-米老排、杉木-火力楠混交林土壤团聚体总有机碳含量在 $8.57\sim38.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于杉木纯林的 $6.46\sim24.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均随粒径减小而增加,随土层加深而减少;3 种林分活性有机碳组分储量表现为低活性有机碳 $>$ 中活性有机碳 $>$ 高活性有机碳,均随土层深度增加而减小,大团聚体(>0.25 mm)占比较大,其对土壤活性有机碳贡献率高,是土壤有机碳的主要载体;杉木-米老排混交林、杉木-火力楠混交林碳库管理指数整体 $>100\%$,其效应大小为杉木-火力楠混交林 $>$ 杉木-米老排混交林 $>$ 杉木纯林。相关性分析表明,TOC(total organic carbon)、LLOC(low labile organic carbon)及 MWD(Mean weight diameter)、GMD(geometric mean diameter)与 CPMI(carbon pool management index)、CPI(carbon pool index)显著正相关,MLOC、HLOC 与各指标相关性不显著。环境因子及粒径分级对 TOC、LLOC 影响效应一致,MLOC、HLOC 因其高敏性及不稳定性对各影响因子响应程度不高。杉木-米老排、杉木-火力楠混交林在土壤稳定性及活性有机碳保持方面优于杉木人工纯林。

关键词:杉木;混交林;土壤团聚体;活性有机碳组分;碳库特征指数

中图分类号:S791.27

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0020-09

Characteristics of Active Organic Carbon Components in Soil Aggregates of Pure Plantation of *C. lanceolata* and Its Mixed Forest

FAN Rong-yuan, YE Shao-ming*, ZHANG Qian-chun, HE Ya-qin, DENG Jia-zhen

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

Abstract: In order to understand the characteristics of active organic carbon components in soil aggregates of pure and mixed *Cunninghamia lanceolata* plantations, the soils of pure *C. lanceolata* plantation and mixed plantations of *C. lanceolata*-*Mytilaria laosensis* and *C. lanceolata*-*Michelia macclurei* in subtropical regions of Guangxi were selected as the research objects. The content, storage, contribution rate and characteristic index of total organic carbon and active organic carbon in aggregates with different particle sizes (>2 、 $1\sim2$ 、 $0.25\sim1$ 、 <0.25 mm) in 0~40 cm soil layer were analyzed. The results showed that the soil aggregate sizes of both pure and mixed plantations were greater than >2 mm, and the soil aggregate size decreased with the decrease of grain size. The total organic carbon content of soil aggregates in the mixed plantations ranged from $8.57\sim38.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, higher than that of pure plantation ($6.46\sim24.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$); the total organic carbon content increased with the decrease of particle size, but decreased with

收稿日期:2023-02-16 修回日期:2023-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(32260382);中央财政林业科技推广项目(2022TG26 号)。

第一作者:樊容源。研究方向:森林培育。E-mail:1324528915@qq.com

*通信作者:叶绍明,博士生导师,教授。研究方向:森林经营。E-mail:yshaoming@163.com

the depth of soil layer. The stocks of active organic carbon in the three plantations were in the order of low labile organic carbon (LLOC) > moderately labile organic carbon (MLOC) > highly labile organic carbon (HLOC), and all of them decreased with the increase of soil depth. Large aggregates (>0.25 mm) accounted for a large proportion of soil organic carbon and contributed significantly to soil active organic carbon, which served as the main carrier of soil organic carbon. The carbon pool management index of the mixed plantations was greater than 100%, and its effect size was as follows: *C. lanceolata*-*M. macclurei* > *C. lanceolata*-*M. laosensis* > pure *C. lanceolata*. Correlation analysis showed that the total organic carbon (TOC), LLOC, mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) were significantly and positively correlated with CPMI and CPI, while MLOC and HLOC were not significantly correlated with each index. Environmental factors and particle size classification had the same effect on TOC and LLOC, while MLOC and HLOC had low response to each influence factor due to their high sensitivity and instability. In conclusion, from the views soil stability and active organic carbon retention, the mixed plantations are better than pure plantation.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; mixed forest; soil aggregates; active organic carbon component; carbon pool characteristic index

土壤团聚体是由原生颗粒(砂粒、粉粒、黏粒)、胶结物质和孔隙组成的关键功能单元^[1],其大小分布及稳定性常被视为评价土壤肥力的重要指标^[2]。平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)是目前衡量土壤团聚体稳定性的重要指标。土壤团聚体有机碳是团聚体形成的主要胶结物质,作为土壤养分转化的重要载体,影响着土壤养分循环和肥力状况,与土壤团聚体相互作用、相辅相成,共同影响着土壤理化性质^[3]。

土壤团聚体总有机碳(total organic carbon, TOC)中所含的C,具有不同的稳定性^[4]。近年来,Stewart等^[5]和Six等^[6]的有机碳分组方法被许多学者采纳,采用对土壤扰动较小的物理分组将有机碳分为物理、化学和生物化学保护等不同组分,其中物理组分具有较高的活性,被称为活性有机碳组分。Lognini等^[7]根据活性有机碳(labile organic carbon, LOC)组分能被3种不同浓度的KMnO₄(33、167、333 mmol·L⁻¹)氧化,分为低活性有机碳(low labile organic carbon, LLOC)、中活性有机碳(moderately labile organic carbon, MLOC)和高活性有机碳(highly labile organic carbon, HLOC)。土壤活性有机碳组分表征土壤有机碳最初的动态平衡,易分解、矿化。尽管活性有机碳组分占总有机碳的比例很小,但对环境因子高度敏感,与土壤碳素转化密切相关^[8-9]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)作为我国亚热带地区的主要造林树种之一,具有速生高产,经济价值高等特点。长期以来,纯林连续栽培方式导致林分生产力和土壤质量不断降低,严重影响着人工林生态系统的稳定性。将杉木纯林改造为针阔混交

林,可增加土壤有机碳及养分储量,有效解决土壤质量退化问题^[10]。目前关于杉木纯林及其混交林对土壤碳动态变化的影响研究已有报道,但多集中于分析全土以及土壤总有机碳含量等方面^[11],而基于团聚体角度揭示土壤团聚体有机碳组分及其储量和贡献率对杉木纯林及其混交林的响应机制鲜见报道。本研究以杉木-米老排(*C. lanceolata*-*Mytilaria laosensis*)、杉木-火力楠(*C. lanceolata*-*Michelia macclurei*)混交林及杉木人工纯林0~20 cm和20~40 cm土壤为研究对象,开展杉木纯林及其混交林土壤有机碳组分含量及其储量在团聚体尺度上的变化特征研究,以期对杉木纯林及其混交林土壤肥力提升、保障土壤健康及促进土壤退化生态系统的恢复和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处中国林业科学研究院广西凭祥热带林业实验中心(21°57′—22°16′N, 106°41′—106°59′E),属于典型亚热带季风气候,年平均气温约20.5℃。干湿季分明,年日照时长1400 h,日照分布与杉木生长旺季基本同步,对其生长有利。雨量充沛,年平均降雨量1350 mm,平均相对湿度82%。地貌类型以低山丘陵为主,成土母岩主要为石灰岩,土壤类型以砖红壤为主,土壤pH为4.8—5.5^[12]。该区域原生性植被为亚热带常绿阔叶林,后陆续被人工林代替。本研究区是杉木人工林的主要种植区,其中,火力楠和米老排是与杉木混交的主要树种。其林下植被自然更新种主要包括粗叶钩子(*Rubus alceaefolius*)、黄毛榕(*Ficus esquiroliana*)、

三丫苦 (*Melicope pteleifolia*)、柚木 (*Tectona grandis*) 等。

1.2 样地设置与样品采集

2020 年 11 月,依据本区域杉木种植历史,在野外实地踏查的基础上,选择成土母质相同,海拔、坡向、坡度、林分密度基本一致的 3 种杉木林分类型,设置典型样地。以杉木-米老排混交林(I)、杉木-火力楠混交林(II)及杉木人工纯林(III)土壤为研究对象。调查树高、胸径等林分状况(表 1)。3 种林分类型均为 1992 年营造,株行距为 2 m×3 m,杉木-米老排混交林和杉木-火力楠混交林混交比例均为 3:1。为了避免“伪重复”,3 种林分采用完全随机

分布设置 15 个 20 m×20 m 样地(3 个林分类型×5 个重复),在每个样地中采用五点取样法设置 5 个 1 m×1 m 样方,采集样方土壤表层凋落物,用环刀法由上至下采集 0~20、20~40 cm 土层原状土样,采样点设在等株行距间,各样地距离设置在 300 m 以上。将各样地中 5 个采样点土壤分层混合均匀为 1 个土样,共 30 个土样(5 样方×2 土层×3 林分),带回室内风干处理。将混合土样沿自然结构分开,过 5 mm 筛除去枯枝落叶及石砾等。风干后一部分用于测定全土基本理化性质(表 1),一部分分离出 >2、1~2、0.25~1、<0.25 mm 粒径团聚体用于后续分析。

表 1 研究样地基本情况

Table 1 Basic characteristics of the three sampling plots

林分类型	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	平均 树高/m	平均 胸径/cm	密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	灌草 盖度 (%)	凋落物 生物量/ (g·m ⁻²)	孔隙度 (%)	容重/ (g·cm ⁻³)	pH
I	730	27	阳坡	16.29	21.03	722/258	0.85	80	455.23	52.65±0.29	1.27±0.01	4.32±0.01
II	725	23	阳坡	13.47	21.30	680/303	0.86	78	504.15	52.87±0.21	1.25±0.01	4.29±0.01
III	728	32	阳坡	16.64	16.92	920	0.85	78	324.10	50.19±0.56	1.32±0.02	4.39±0.01

注: I: 杉木-米老排混交林; II: 杉木-火力楠混交林; III: 杉木纯林; 表中数据为平均值±标准误。下同。

1.3 测定项目与方法

土壤团聚体分级采用最佳水分比例法分级^[13],土壤容重、孔隙度采用环刀法^[14],pH 采用电位法^[15],TOC 含量采用重铬酸钾-外加热法测定^[15];LOC 组分根据 Logninow 等^[7]的分类方法划分,采用 KMnO₄ 氧化法测定,并根据实际操作略有改进,具体方法如下:称取含 15~30 mg 碳的土壤样品于 50 mL 离心管中,加入 333、167、33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 溶液 25 mL,密封振荡 1 h,4 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,取少量上清液稀释 250 倍,将稀释液于 565 nm 波长处比色,根据化学反应 KMnO₄ 中 Mn⁷⁺ 被酸性土壤还原为 Mn²⁺,计算 3 种活性有机碳含量,消耗 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 记为 LLOC、消耗 167 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 记为 MLOC、消耗 33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 记为 HLOC。

1.4 数据分析

土壤团聚体稳定性指标选取平均质量直径(MWD,式中用 M_{WD} 表示)^[18]、几何平均直径(GMD,式中用 G_{MD} 表示)^[19],及土壤团聚体各有机碳组分储量(TOC storage,式中用 $T_{OC\ storage}$ 表示)^[20]及贡献率(CR,式中用 C_R 表示)的计算公式如下

$$M_{WD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{d_i} W_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (1)$$

$$G_{MD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i \ln \overline{d_i}}{\sum_{i=1}^n M_i} \right] \quad (2)$$

$$T_{OC\ storage} = \sum_{i=1}^n (W_i \times T_{OC_i}) \times B_d \times H \times 10 \quad (3)$$

$$C_R = \frac{M_i \times T_{OC_i}}{T_{OC}} \quad (4)$$

式中: $\overline{d_i}$ 为第 i 粒径团聚体直径的平均值(mm); W_i 为第 i 粒径团聚体占总团聚体的百分含量(%); T_{OC_i} 代表第 i 级团聚体中有机碳含量(g·kg⁻¹); B_d 为全土容重(g·cm⁻³); H 为土壤厚度(cm); M_i 为第 i 级团聚体占全土比例(%); T_{OC} 为总有机碳含量(g·kg⁻¹)。

碳库管理指数(CPMI)用于反映不同杉木林分类型土壤质量的变化。以杉木人工纯林土壤为参考,计算 2 种杉木混交林土壤团聚体碳库特征,则杉木纯林的 CA、CPI 及 CPMI 均为 1,下表将不再列出。以杉木纯林土壤碳库活度(A)和总有机碳(TOC)含量的平均值作为参考土壤的 A、TOC,计算 2 种混交林土壤的 CPMI。依据 Silva 等^[21]的计算方式如下

$$\text{碳库活度}(A) = L_{LOC} / (T_{OC} - L_{LOC}) \quad (5)$$

$$\text{碳库活度指数}(C_A) = \text{杉木混交林土壤 } A / \text{杉木纯林土壤 } A \quad (6)$$

$$\text{碳库指数}(C_{PI}) = \text{杉木混交林土壤 } T_{OC} / \text{杉木纯林土壤 } T_{OC} \quad (7)$$

$$\text{碳库管理指数}(C_{PMI}) = C_{PI} \times C_A \times 100\% \quad (8)$$

采用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 对数据进行统计分析。利用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),采用 Pearson 相关性分析土壤团聚体粒级组成及稳定性与土壤有机碳及其组分特征的关系。用 origin 2021 制图,图中数据均为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成及稳定性

由表 2 可知,杉木纯林及其混交林土壤团聚体分布随粒径的减小呈减小趋势,3 种林分类型土壤团聚体组成主要以 $>2\text{ mm}$ 粒径为主。 $>2\text{ mm}$ 粒径的团聚体含量随土层加深呈减小趋势, $<0.25\text{ mm}$ 粒径随土层加深呈增加趋势。由图 1 可知,2 种混交林土壤团聚体 MWD、GMD 均高于杉木纯林且杉木-火力楠混交林 $>$ 杉木-米老排混交林 $>$ 杉木纯林。随土层加深 MWD、GMD 值减小,说明团

聚体稳定性受到土层深度影响。

2.2 土壤团聚体总有机碳及活性有机碳组分含量

由表 3 可知,3 种林分类型土壤团聚体 TOC 含量随团聚体粒径减小而增加,大部分存在于 $0\sim20\text{ cm}$ 土层中,并随土层深度增加而下降。其中,杉木-火力楠混交林 TOC 含量显著高于其他林分($P<0.05$),杉木纯林团聚体 TOC 含量分布较均匀,2 土层间土壤团聚体 TOC 及 LLOC 含量均表现为杉木-火力楠混交林 $>$ 杉木-米老排混交林 $>$ 杉木纯林。杉木纯林团聚体 LLOC 含量随粒径减小呈先下降再增加的趋势,且在 2 土层间差异不显著($P>0.05$)。MLOC 含量在各粒径中差异不显著($P>0.05$),稳定在 $3.86\sim5.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,HLOC 含量随粒径减小无明显规律可循,说明 MLOC、HLOC 受其高活性及环境影响较大,但杉木-火力楠混交林 HLOC 含量在各粒径分布较均匀,说明团聚体良好的稳定性有利于 HLOC 存在。ROC 含量与 TOC 含量趋势相似,整体上随粒径减小而增加。

表 2 杉木纯林及其混交林土壤团聚体组成

Table 2 Soil aggregates composition of *C. lanceolata* pure forest and its mixed forest

土层深度/cm	林分类型	土壤团聚体组成(%)			
		$>2\text{ mm}$	$1\sim2\text{ mm}$	$0.25\sim1\text{ mm}$	$<0.25\text{ mm}$
0~20	I	44.43 \pm 0.15bA	23.56 \pm 0.13bB	23.51 \pm 0.05bB	8.49 \pm 0.05bC
	II	47.93 \pm 0.12aA	21.84 \pm 0.20cB	20.90 \pm 0.13cC	9.34 \pm 0.05aD
	III	37.65 \pm 0.06cA	28.60 \pm 0.06aB	26.57 \pm 0.04aC	7.18 \pm 0.03cD
20~40	I	37.21 \pm 0.22bA	27.21 \pm 0.17aB	24.78 \pm 0.11bC	10.80 \pm 0.07bD
	II	45.34 \pm 0.10aA	23.78 \pm 0.13bB	18.92 \pm 0.09cC	11.96 \pm 0.12aD
	III	35.22 \pm 0.10cA	27.05 \pm 0.07aC	27.56 \pm 0.08aB	9.77 \pm 0.07cD

注:不同小写字母表示数据在同一粒径团聚体不同杉木林分类型间达显著差异水平($P<0.05$),不同大写字母表示数据在同一林分不同粒径团聚体间差异显著($P<0.05$)。下同。

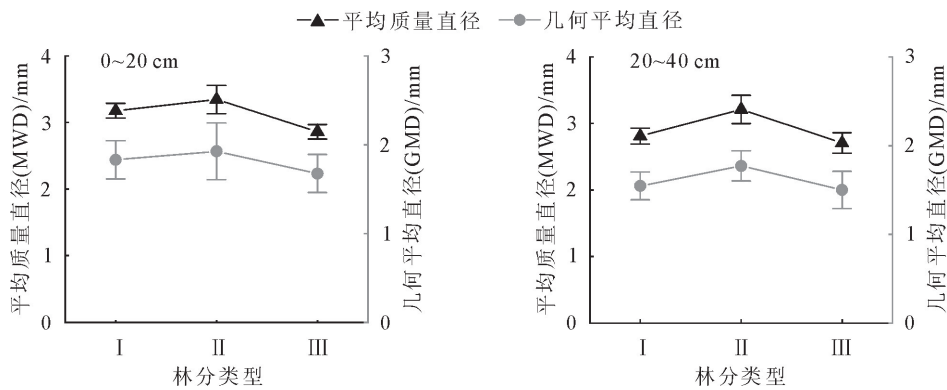


图 1 杉木纯林及其混交林土壤团聚体稳定性

Fig. 1 Stability of soil aggregates in *C. lanceolata* pure forest and its mixed forest

2.3 土壤团聚体各有机碳组分储量及其贡献率

由图 2 可知,3 种林分类型土壤团聚体各有机碳组分储量存在差异,除 MLOC 及 HLOC 外,TOC、LOC、LLOC 各粒径储量均表现为杉木-火力楠混交林 $>$ 杉木-米老排混交林 $>$ 杉木纯林。 $0\sim20$

cm 土层有机碳组分储量显著高于 $20\sim40\text{ cm}$ 土层($P<0.05$),其中 TOC 储量在土层间差异较大,随土层加深,3 种林分类型 TOC 储量分别减少了 59.07%、48.56%、60.07%。总体上团聚体各有机碳组分储量均在 $>2\text{ mm}$ 粒径含量较高,随活性增

加各有机碳组分储量减少,MLOC、HLOC 储量在不同粒径表现不同的规律。 $>0.25\text{ mm}$ 粒径对有机碳组分的贡献率显著高于 $<0.25\text{ mm}$,除 HLOC 外,TOC、LOC、LLOC 及 MLOC 贡献率以 $>2\text{ mm}$

粒径最高,达 $29.72\%\sim 68.07\%$ 。从土层来看,杉木纯林及其混交林 $>0.25\text{ mm}$ 有机碳组分贡献率随土层加深而降低,而 $<0.25\text{ mm}$ 粒径有机碳组分贡献率随土层加深而增加(图 3)。

表 3 杉木纯林及其混交林土壤团聚体有机碳及活性有机碳组分含量

Table 3 Soil aggregate organic carbon and active organic carbon in *C. lanceolata* pure forest and its mixed forest $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

指标	土层厚度/cm	林分类型	总有机碳及活性有机碳组分含量				
			全土	$>2\text{ mm}$	$1\sim 2\text{ mm}$	$0.25\sim 1\text{ mm}$	$<0.25\text{ mm}$
TOC	0~20	I	$23.30\pm 2.27\text{ bBC}$	$21.42\pm 2.13\text{ bC}$	$24.77\pm 2.76\text{ bB}$	$29.02\pm 3.70\text{ bA}$	$30.88\pm 2.81\text{ bA}$
		II	$33.18\pm 2.76\text{ aB}$	$31.82\pm 2.14\text{ aBC}$	$32.85\pm 3.73\text{ aB}$	$35.07\pm 2.45\text{ aAB}$	$38.37\pm 2.30\text{ aA}$
		III	$20.77\pm 1.23\text{ bBC}$	$19.81\pm 0.86\text{ bC}$	$20.11\pm 1.63\text{ cC}$	$22.58\pm 1.89\text{ cB}$	$24.33\pm 2.16\text{ cA}$
	20~40	I	$10.32\pm 1.35\text{ bB}$	$8.57\pm 1.87\text{ bCD}$	$9.22\pm 1.76\text{ bC}$	$12.28\pm 1.54\text{ bAB}$	$13.25\pm 2.20\text{ bA}$
		II	$17.12\pm 2.76\text{ aB}$	$14.38\pm 2.90\text{ aD}$	$15.49\pm 2.49\text{ aC}$	$22.41\pm 1.23\text{ aA}$	$22.75\pm 3.02\text{ aA}$
		III	$7.13\pm 2.31\text{ cC}$	$6.46\pm 2.90\text{ bD}$	$7.25\pm 2.49\text{ bC}$	$7.71\pm 3.29\text{ cB}$	$8.76\pm 3.02\text{ bcA}$
LOC	0~20	I	$14.14\pm 1.11\text{ bB}$	$13.95\pm 1.19\text{ bBC}$	$13.64\pm 1.91\text{ bC}$	$14.97\pm 0.34\text{ bAB}$	$16.42\pm 2.23\text{ aA}$
		II	$16.24\pm 1.56\text{ aB}$	$15.07\pm 2.63\text{ aBC}$	$16.14\pm 1.56\text{ aB}$	$18.02\pm 1.73\text{ aA}$	$18.79\pm 1.22\text{ aA}$
		III	$14.68\pm 0.87\text{ bB}$	$13.83\pm 0.51\text{ bC}$	$14.21\pm 1.16\text{ aBC}$	$16.04\pm 1.43\text{ aA}$	$16.98\pm 0.67\text{ aA}$
	20~40	I	$9.32\pm 0.78\text{ bBC}$	$8.27\pm 0.69\text{ bC}$	$9.14\pm 0.77\text{ bBC}$	$10.18\pm 0.50\text{ bB}$	$12.12\pm 0.95\text{ bA}$
		II	$13.88\pm 0.89\text{ aB}$	$13.47\pm 0.72\text{ aB}$	$14.65\pm 1.39\text{ aAB}$	$15.37\pm 0.87\text{ aA}$	$15.89\pm 1.20\text{ aA}$
		III	$8.11\pm 1.05\text{ bBC}$	$7.60\pm 1.65\text{ bC}$	$8.41\pm 1.08\text{ bB}$	$8.95\pm 0.47\text{ cB}$	$10.02\pm 0.49\text{ cA}$
LLOC	0~20	I	$7.33\pm 0.45\text{ aC}$	$9.43\pm 0.83\text{ aB}$	$8.79\pm 1.12\text{ bBC}$	$10.63\pm 0.36\text{ aA}$	$10.68\pm 1.20\text{ bA}$
		II	$8.73\pm 0.65\text{ aC}$	$9.71\pm 0.92\text{ aB}$	$10.75\pm 0.84\text{ aAB}$	$11.68\pm 0.56\text{ aA}$	$11.99\pm 0.28\text{ aA}$
		III	$6.47\pm 0.48\text{ bCD}$	$8.03\pm 0.46\text{ bB}$	$7.73\pm 1.15\text{ cC}$	$7.57\pm 1.17\text{ bC}$	$10.82\pm 0.70\text{ bA}$
	20~40	I	$3.59\pm 0.68\text{ bC}$	$3.73\pm 0.82\text{ cC}$	$4.80\pm 0.39\text{ cB}$	$4.86\pm 0.44\text{ cB}$	$6.96\pm 0.73\text{ bA}$
		II	$9.11\pm 0.56\text{ aC}$	$9.64\pm 0.54\text{ aB}$	$10.13\pm 0.49\text{ aAB}$	$10.35\pm 1.37\text{ aA}$	$10.56\pm 1.12\text{ aA}$
		III	$3.45\pm 0.54\text{ bD}$	$8.03\pm 0.46\text{ bB}$	$7.73\pm 1.15\text{ bBC}$	$7.57\pm 1.17\text{ bBC}$	$10.82\pm 0.70\text{ aA}$
MLOC	0~20	I	$3.71\pm 0.82\text{ aC}$	$3.86\pm 0.77\text{ aBC}$	$4.09\pm 1.03\text{ aB}$	$2.27\pm 0.12\text{ cD}$	$4.64\pm 0.85\text{ aA}$
		II	$4.52\pm 1.87\text{ aAB}$	$4.31\pm 1.64\text{ aB}$	$4.21\pm 1.01\text{ aB}$	$4.96\pm 0.93\text{ bA}$	$5.41\pm 0.91\text{ aA}$
		III	$4.65\pm 0.62\text{ aB}$	$3.93\pm 0.20\text{ aC}$	$4.37\pm 0.61\text{ aB}$	$7.53\pm 0.32\text{ aA}$	$3.97\pm 0.16\text{ bBC}$
	20~40	I	$3.75\pm 1.62\text{ aAB}$	$3.72\pm 0.47\text{ aB}$	$3.87\pm 0.37\text{ aAB}$	$4.01\pm 0.34\text{ aA}$	$4.30\pm 0.29\text{ aA}$
		II	$3.45\pm 0.52\text{ aB}$	$3.16\pm 0.49\text{ aC}$	$3.39\pm 0.74\text{ aBC}$	$3.88\pm 0.55\text{ aA}$	$4.03\pm 0.52\text{ aA}$
		III	$3.89\pm 0.78\text{ aAB}$	$3.87\pm 0.27\text{ aB}$	$3.91\pm 0.54\text{ aAB}$	$4.01\pm 0.32\text{ aA}$	$4.08\pm 0.42\text{ aA}$
HLOC	0~20	I	$0.88\pm 0.08\text{ cB}$	$0.66\pm 0.02\text{ cCD}$	$0.76\pm 0.09\text{ bC}$	$2.08\pm 0.23\text{ aA}$	$1.10\pm 0.31\text{ cB}$
		II	$1.20\pm 0.15\text{ bAB}$	$1.05\pm 0.27\text{ bB}$	$1.18\pm 0.27\text{ bAB}$	$1.38\pm 0.45\text{ bA}$	$1.39\pm 0.56\text{ bA}$
		III	$1.71\pm 0.27\text{ aB}$	$1.86\pm 0.20\text{ aB}$	$2.11\pm 0.37\text{ aA}$	$0.94\pm 0.17\text{ bC}$	$2.18\pm 0.08\text{ aA}$
	20~40	I	$1.00\pm 0.05\text{ aB}$	$0.82\pm 0.07\text{ aC}$	$0.47\pm 0.12\text{ cD}$	$1.32\pm 0.15\text{ aA}$	$0.86\pm 0.21\text{ bBC}$
		II	$1.07\pm 0.37\text{ aAB}$	$0.67\pm 0.22\text{ aC}$	$1.13\pm 0.23\text{ aAB}$	$1.14\pm 0.34\text{ aAB}$	$1.30\pm 0.12\text{ aA}$
		III	$0.78\pm 0.10\text{ bB}$	$0.17\pm 0.06\text{ bD}$	$0.87\pm 0.15\text{ bB}$	$0.48\pm 0.08\text{ bC}$	$1.54\pm 0.27\text{ aA}$
ROC	0~20	I	$8.35\pm 2.77\text{ bD}$	$7.47\pm 2.48\text{ bC}$	$11.13\pm 3.28\text{ bB}$	$14.05\pm 3.61\text{ bA}$	$14.46\pm 2.56\text{ bA}$
		II	$18.28\pm 3.26\text{ aB}$	$16.75\pm 3.01\text{ aBC}$	$16.71\pm 4.30\text{ aC}$	$17.05\pm 3.09\text{ aB}$	$19.58\pm 2.51\text{ aA}$
		III	$7.46\pm 2.16\text{ bA}$	$5.99\pm 1.19\text{ bC}$	$5.91\pm 1.99\text{ cC}$	$6.53\pm 1.84\text{ cB}$	$7.35\pm 1.88\text{ cA}$
	20~40	I	$1.78\pm 0.38\text{ aC}$	$1.75\pm 0.32\text{ bC}$	$1.59\pm 0.33\text{ bD}$	$2.10\pm 0.38\text{ bB}$	$2.24\pm 0.23\text{ bA}$
		II	$2.15\pm 0.23\text{ aC}$	$2.03\pm 0.42\text{ aC}$	$2.50\pm 0.57\text{ aC}$	$7.05\pm 0.93\text{ aA}$	$6.86\pm 1.10\text{ aAB}$
		III	$1.61\pm 0.28\text{ bA}$	$1.58\pm 0.37\text{ cB}$	$1.60\pm 0.38\text{ bB}$	$1.76\pm 0.57\text{ cA}$	$1.26\pm 0.45\text{ cC}$

2.4 不同林分类型土壤团聚体碳库特征

碳库活度(A)、碳库活度指数(CA)、碳库管理指数(CPMI)及碳库指数(CPI)相关联,CPI 和 CPMI 是土壤碳库变化的量化依据。由表 4 可知,林分类型 I、II 的 CPI 均大于 1 且 20~40 cm 土层 CPI

显著高于 0~20 cm 土层($P<0.05$),说明杉木 2 种混交林较杉木纯林都不同程度提高了土壤碳库水平。2 种混交林的 CPMI 均随土壤深度的增加而降低,总体上,2 种混交林土壤 CPMI、CPI 和 TOC、LLOC 含量分布特征相同,且 0~20 cm 土层最高。

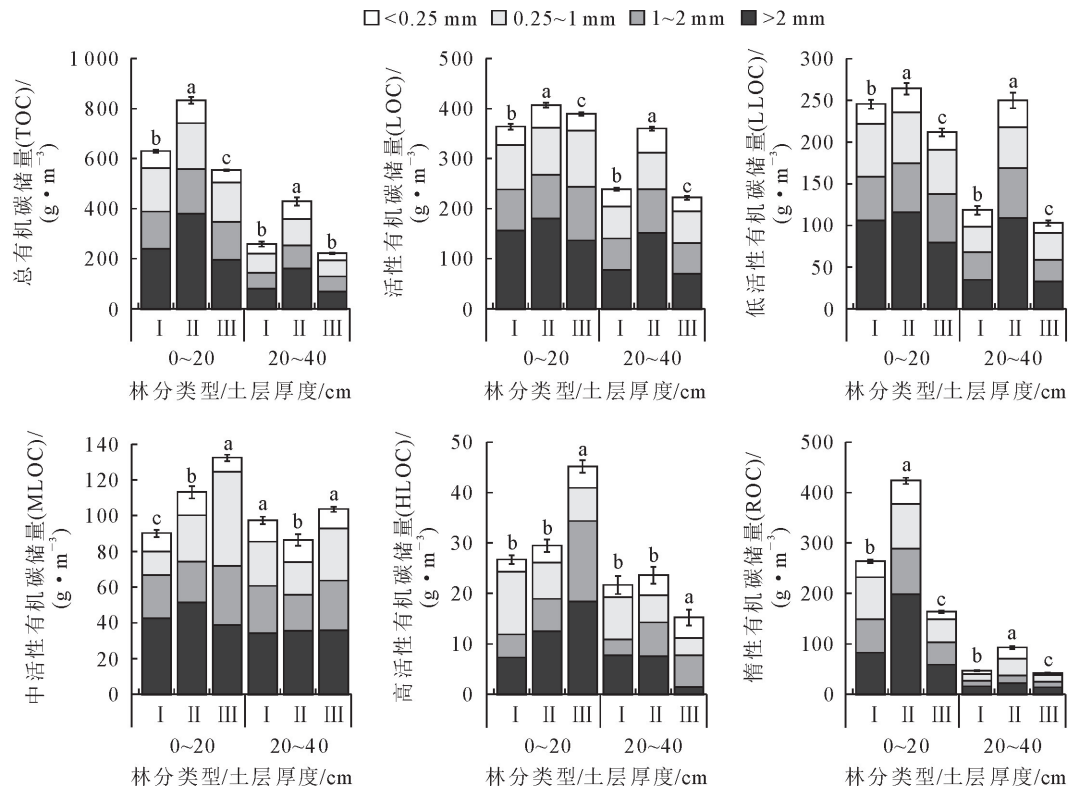


图 2 杉木纯林及其混交林总有机碳及活性有机碳组分储量

Fig. 2 Storage of total organic carbon and active organic carbon in pure plantation of *C. lanceolata* pure forest and its mixed forest

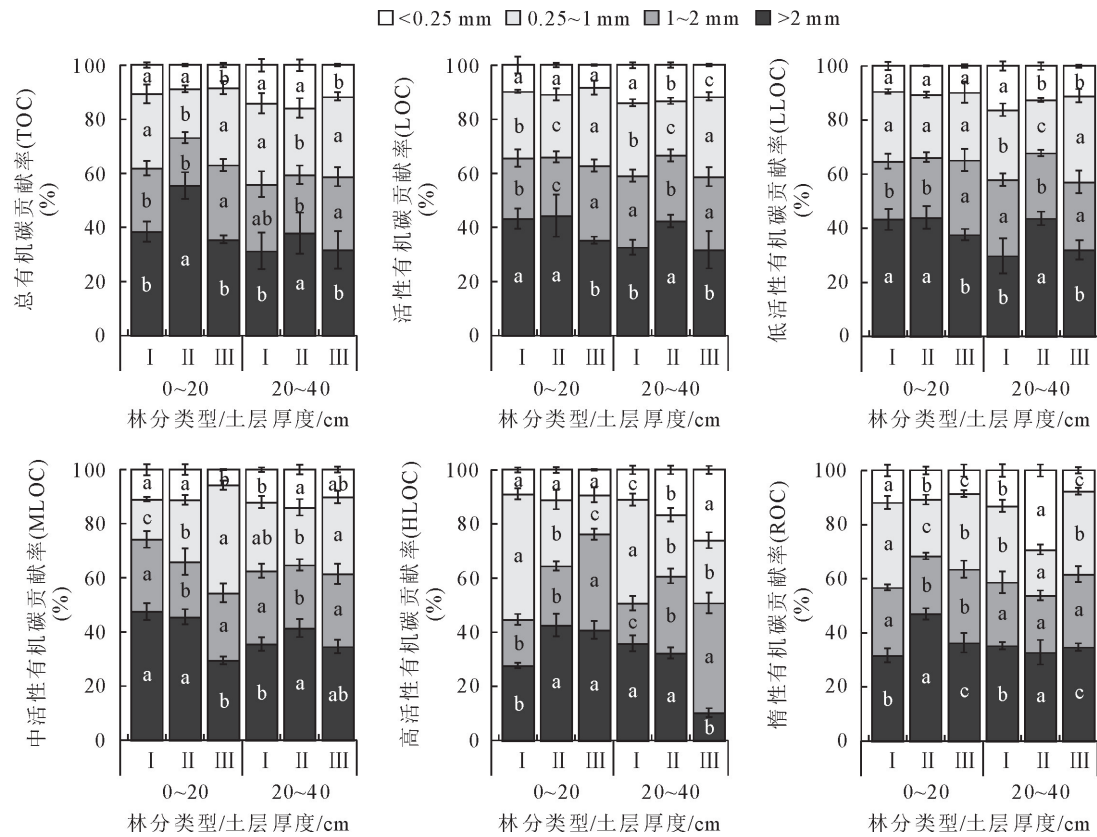


图 3 杉木纯林及其混交林总有机碳及活性有机碳组分贡献率

Fig. 3 Contribution rates of total organic carbon and active organic carbon in pure plantation of *C. lanceolata* pure forest and its mixed forest

表 4 杉木纯林及其混交林碳库特征

Table 4 Carbon pool characteristics in pure plantation of *C. lanceolata* pure forest and its mixed forest

指标	土层 厚度/cm	林分 类型	粒径/mm			
			>2	1~2	0.25~1	<0.25
碳库活度(A)	0~20	I	0.83±0.25aA	0.56±0.13a	0.60±0.15a	0.40±0.18c
		II	0.44±0.06b	0.50±0.10b	0.51±0.08b	0.46±0.06b
		III	0.69±0.09a	0.64±0.17a	0.52±0.15b	0.81±0.11a
	20~40	I	0.67±0.31b	1.23±0.48b	0.68±0.16b	1.35±0.91a
		II	2.77±1.54a	2.37±0.36a	0.94±0.39a	0.99±0.52a
		III	0.87±0.29b	0.76±0.12c	1.00±0.11a	0.79±0.09a
碳库活度指数(CA)	0~20	I	1.20±0.37a	0.88±0.20a	1.16±0.29a	0.49±0.22a
		II	0.64±0.09b	0.78±0.16a	0.97±0.15a	0.57±0.07a
	20~40	I	0.77±0.36b	1.61±0.63b	0.68±0.16b	1.71±1.15a
		II	3.18±1.77a	3.12±1.79a	0.94±0.39a	1.26±0.66b
碳库指数(CPI)	0~20	I	1.08±0.11b	1.23±0.14b	1.29±0.16b	1.27±0.12b
		II	1.61±0.16a	1.63±0.19a	1.55±0.11a	1.58±0.09a
	20~40	I	1.01±0.22b	1.00±0.19b	1.24±0.15b	1.23±0.20b
		II	1.70±0.34a	1.69±0.27a	2.25±0.33a	2.10±0.28a
碳库管理指数(CPMI)	0~20	I	78.18	162.13	83.63	209.81
		II	540.33	527.19	212.19	264.74
	20~40	I	129.39	108.61	148.94	61.96
		II	103.41	127.16	151.39	89.34

2.5 土壤团聚体稳定性与活性有机碳组分含量及其储量相关性

由表 5 可知,MWD、GWD 与 TOC、LLOC 存在显著正相关关系($P<0.05$),表明团聚体稳定性是有机碳及低活性有机碳的固存基础。TOC、LLOC 与>2 mm 粒径呈显著正相关($P<0.05$),与其他粒径呈显著负相关($P<0.05$),表明>2 mm 粒径储存较高含量的 TOC、LLOC,而<2 mm 粒径团聚体有机质较为缺乏。表征土壤碳库特征的 CPI、CPMI

和 TOC、LLOC 与各环境因子的相关性相似,如容重与 TOC、LLOC 和 CPI、CPMI 均显著负相关($P<0.05$)、pH 和孔隙度与 TOC、LLOC 和 CPI、CPMI 均无显著相关($P>0.05$),说明碳库特征指数可大体表征 TOC、LLOC 对环境因子的相关性。<0.25 mm 粒径团聚体与活性有机碳组分呈负相关关系($P<0.05$),但与各碳库特征指数却表现为正相关($P<0.05$),这将在讨论部分进行讨论。

表 5 团聚体有机碳及其活性组分与环境因子及粒径的相关性

Table 5 Correlation analysis of aggregate organic carbon and its active components with environmental factors and particle size

指标	TOC	LOC	LLOC	MLOC	HLOC	ROC	A	AI	CPI	CPMI
容重/(g·cm ⁻³)	-0.783	-0.874**	-0.841*	0.174	-0.406	-0.652	0.377	0.353	-0.882**	-0.818*
pH	-0.143	-0.231	-0.314	0.371	0.029	-0.178	-0.429	-0.464	-0.312	-0.286
孔隙度(%)	0.486	0.452	0.429	0.086	0.200	0.411	-0.143	-0.116	0.696	0.754
>2 mm	0.829*	0.833*	0.829*	-0.086	0.600	0.632	-0.371	-0.319	0.841*	0.893**
1~2 mm	-0.600	-0.365	-0.714	0.371	-0.086	-0.521	0.486	0.551	-0.725	-0.319
0.25~1 mm	-0.543	-0.432	-0.714	0.429	-0.257	-0.498	-0.029	-0.058	-0.986**	-0.812*
<0.25 mm	-0.543	-0.313	-0.314	-0.600	-0.714	-0.339	0.771	0.696	0.464	0.754
MWD	0.848**	0.829*	0.829*	-0.086	0.600	0.731	-0.371	-0.319	0.841*	0.893**
GWD	0.943**	0.943**	0.943**	-0.029	0.657	0.841*	-0.600	-0.551	0.725	0.819*

注: ** 相关系数在 0.01 水平显著,* 相关系数在 0.05 水平显著。

3 结论与讨论

3.1 结论

3 种杉木林分类型土壤团聚体组成主要以>2 mm 粒径为主,活性有机碳组分 MWD、GWD 与

TOC、LLOC 存在正相关关系。土壤团聚体有机碳及活性有机碳组分含量/储量表现为杉木-火力楠>杉木-米老排>杉木纯林,2 种混交林土壤团聚体活性有机碳分布处于比较合理的结构状态,碳汇效应较高。大粒径团聚体活性有机碳贡献率占总贡献率

的80%以上,是土壤有机碳的主要载体。2种杉木混交林CPI均大于1,CPMI总体大于100%。环境因子及粒径分级对TOC、LLOC影响效应一致,MLOC、HLOC因其高敏性及不稳定性对各影响因子响应程度不高,CPI、CPMI可作为表征大团聚体TOC、LLOC的指数。杉木混交林土壤团聚体稳定性及活性有机碳组分含量/储量优于杉木纯林,有利于保持土壤肥力。

3.2 讨论

3.2.1 杉木纯林及其混交林对团聚体组成及稳定性的影响 研究区3种杉木林分类型土壤均以大粒径团聚体(>0.25 mm)为主,微团聚体含量(<0.25 mm)分布较少,均表现为杉木-火力楠混交林 $>$ 杉木-米老排混交林 $>$ 杉木纯林,说明混交林土壤相较于纯林更加稳定,原因可能是火力楠与米老排凋落物生物量大^[17],且比针叶易分解,有机质积累使胶结作用加强。此外,混交林枝叶繁密,较大叶面积减少了雨滴机械打击^[22],减缓了有机质淋溶,同时混交林根系复杂,可分泌高分子胶结物质^[23],对土壤的穿插与分割也促进大团聚体形成^[24]。有研究表明,亚热带针阔混交林中0~20 cm土层大团聚体含量高于微团聚体^[25],本研究结果与其基本一致。这可能是因为凋落物有机质主要集中在土壤表层^[26],有利于大粒径团聚体保持,微团聚体由较易沉积的铁铝氧化物胶结而更多存在于较深层土壤。

本研究发现,TOC含量在团聚体中均表现为杉木-火力楠混交林 $>$ 杉木-米老排混交林 $>$ 杉木纯林,且随粒径减小含量增加,这是因为针阔混交林凋落物归还速度较快,封存在微团聚体内有机质含量较高^[28]。LOC组分总体趋势与TOC一致,表明两者在碳周转及土壤养分转化等过程具有密切的关系^[29]。但不同的是,杉木纯林在20~40 cm土层LLOC含量显著高于杉木-米老排混交林,其原因可能是杉木纯林团聚体有机质含量较少,团聚体总有机碳趋于活化以供微生物及细根利用碳源,这种现象在MLOC及HLOC中都有所体现,但由于活性有机碳组分趋于敏感,在更高活性有机碳组分中并不稳定。相反,杉木-火力楠混交林在TOC及LOC中较为稳定,这一现象表明更高活性有机碳稳定性需要总有机碳作为后续储备,因此杉木混交林在TOC及LOC上的表现优于杉木纯林。2种混交林碳库指数均大于1,碳库管理指数总体大于100%,杉木-火力楠混交林在20~40 cm土层达到了杉木纯林的5.4倍,原因可能是混交林为土壤提供了大量直接有机碳源及根分泌物等,提高了土壤中碳转化酶和微生物的数量和活度,促进了有机碳库的周转^[30]。

环境因子及粒径分级对TOC、LLOC影响效应一致,MLOC、HLOC因其高敏性及不稳定性对各影响因子响应程度不高,CPI、CPMI同TOC、LLOC相似,对环境因子、团聚体分布及其稳定性也存在相同效应(除 <0.25 mm外),说明土壤不同粒径团聚体对有机碳库影响显著,CPI、CPMI可作为表征TOC、LLOC的指数,这与田慎重等^[31]的研究结果一致。在本研究中,CPI、CPMI与TOC、LLOC在 <0.25 mm粒径团聚体中呈负相关关系,这可能是由于杉木纯林作为参考土壤,在 <0.25 mm粒径LLOC含量较大团聚体高,杉木纯林TOC趋于活化以供微生物及细根利用碳源,导致CPI、CPMI指数与TOC、LLOC相关性出现偏差,且微团聚体主要由铁铝矿物胶结,受多因素影响而出现差异,推断CPI、CPMI指数可能不适用于微团聚体及更小粒径团聚体表征碳库特征,但还需要进一步研究。本研究中,MWD、GWD与TOC、LLOC含量显著正相关,说明土壤团聚体有机碳不仅促进了团聚体的形成,也能够促进其自身稳定性^[32],促进土壤有机碳的有效固定^[33]。有机碳在土壤中主要以活性高的颗粒态有机碳蓄积^[34],基于团聚体稳定性的杉木纯林及其混交林土壤团聚体有机碳及活性有机碳组分含量对研究土壤团聚体碳素转化及对土壤碳汇功能的促进具有重要作用。本研究对杉木纯林及其混交林土壤团聚体活性有机碳组分特征仅仅是初步探讨,希望能够为杉木伴生树种多样性提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李文娟,蔡延江,朱同彬,等.土壤团聚体氧化亚氮排放及其微生物学机制研究进展[J].土壤学报,2021,58(5):132-144.
LI W J, CAI Y J, ZHU T B, *et al.* Release of nitrous oxide from soil aggregates and its microbial mechanism[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1132-1144. (in Chinese)
- [2] 胡琛,贺云龙,崔鸿侠,等.神农架4种典型人工林对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(12):125-133.
HU C, HE Y L, CUI H X, *et al.* Effects of four typical plantations on the distribution and stability of soil aggregates in Shennongjia[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2020, 40(12): 125-133. (in Chinese)
- [3] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
LU J W, LI Z B. Advance in soil aggregate study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85. (in Chinese)
- [4] 张国,曹志平,胡婵娟.土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J].应用生态学报,2011,22(7):1921-1930.
ZHANG G, CAO Z P, HU C J. Soil organic carbon fractionation methods and their applications in farm land ecosystem research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7):

- 1921-1930. (in Chinese)
- [5] STEWART C E, PLANTE A F, PAUSTIN K R T, *et al.* Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(2): 379-392.
- [6] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [7] LOGINOW W, WISNIEWSKI W, GONETS S, *et al.* Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. Polish Journal of Soil Science, 1987, 20(1): 47-52.
- [8] UPENDRA M S, ZACHARY N S, ERMSON Z N, *et al.* Soil carbon and nitrogen sequestration as affected by long-term tillage, cropping systems, and nitrogen fertilizer sources[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 127(3): 234-240.
- [9] JENKINSON, RAYNER J H. The turnover of soil organic matter in some of the rothamsted classic experiments[J]. Soil Science, 1977, 123: 128-305.
- [10] ADESODUN J K, ADEYEMI E F, OYEGROKE 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: 190-197.
- [11] 汪思龙, 廖利平, 邓仕坚, 等. 杉楠混交与人工杉木林自养机制的恢复[J]. 应用生态学报, 2000(1): 34-37.
- WANG S L, LIAO L P, DENG S J, *et al.* Mixing of *Cunninghamia lanceolata* with *Michelia macclurei* and restoration of self-sustaining mechanism in *G. lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000(1): 34-37. (in Chinese)
- [12] 孙冬婧, 温远光, 罗应华, 等. 近自然化改造对杉木人工林物种多样性的影响[J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 202-208.
- SUN D J, WEN Y G, LUO Y H, *et al.* Effect of close-to-nature management on species diversity in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Forest Research, 2015, 28(2): 202-208. (in Chinese)
- [13] BACH E M, HOFMOCKEL K S. Soil aggregate isolation method affects measures of intra-aggregate extracellular enzyme activity[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 69: 54-62.
- [14] OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52: 1-8.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 354.
- [16] 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): 2857-2865.
- 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): 2857-2865. (in Chinese)
- [17] 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): 1028-1035.
- 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): 1028-1035. (in Chinese)
- [18] CASTROF C. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 65(1): 45-51.
- [19] 惠超, 杨卫君, 宋世龙, 等. 生物炭施用对麦田土壤团聚体机械稳定性及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 349-355.
- HUI C, YANG W J, SONG S L, *et al.* Effects of biochar application on mechanical stability of Soil aggregates and yield of spring wheat[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 349-355. (in Chinese)
- [20] 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: 253-263.
- [21] SILVA F D, AMADO T J C, FERREIRA A O, *et al.* Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop-lives tock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 190: 60-69.
- [22] 肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 827-835.
- XIAO H, LIU G, ZHAO J F, *et al.* Characteristics of mechanical impact and slaking effect of rain drops on soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 827-835. (in Chinese)
- [23] 刘海威, 张少康, 焦峰. 黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 31-39.
- LIU H W, ZHANG S K, JIAO F. Relationships between community characteristics and soil nutrients and moisture in abandoned hill country grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(10): 31-39. (in Chinese)
- [24] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347.
- QI Y C, WANG Y Q, LIU J, *et al.* Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 340-347. (in Chinese)
- [25] 曾晓敏, 范跃新, 林开森, 等. 亚热带不同植被类型土壤磷组分特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2156-2162.
- ZENG X M, FAN Y X, LIN K M, *et al.* Characteristics of soil phosphorus fractions of different vegetation types in subtropical forests and their driving factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2156-2162. (in Chinese)
- [26] 喻林华, 方晰, 项文化, 等. 亚热带4种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2016, 52(10): 10-21.
- YU L H, FANG X, XIANG W H, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in litter and soil of four types of subtropical stand[J]. Scientia Sylvae Sinicae, 2016, 52(10): 10-21. (in Chinese)

- [29] HUI Y, HONGWEI Z, BO Z, *et al.* Stoichiometry of C:N:P in the roots of *Alhagi sparsifolia* is more sensitive to soil nutrients than aboveground organs[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12(1): 698961-698961.
- [30] 程雯, 喻阳华, 熊康宁, 等. 喀斯特高原峡谷优势种叶片功能性状分析[J]. *广西植物*, 2019, 39(8): 1039-1049.
- XHENG W, YU Y H, XIONG K N, *et al.* Leaf functional traits of dominant species in Karst plateau-canyon areas[J]. *Guihaia*, 2019, 39(8): 1039-1049. (in Chinese)
- [31] 王青天. 福建柏与马尾松混交造林模式的环境效应与生长分析[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(3): 126-130.
- WANG Q T. Environmental effects and growth analysis of the mixed forest plantations of *Fokienia hodginsii* and *Pinus massoniana* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(3): 126-130. (in Chinese)
- [32] 胡靛达, 李远发, 周海菊, 等. 细叶云南松混交林土壤微生物群落功能特性及与林分结构关系的研究[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 16-23.
- HU L D, LI Y F, ZHOU H J, *et al.* Relationships between soil microbial community function and stand structure of *Pinus yunnanensis* var. *tenuifolia* mixed forests[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3): 16-23. (in Chinese)
- [33] 杨瑞, 刘帅, 王紫泉, 等. 秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 1037-1046.
- YANG R, LIU S, WANG Z Q, *et al.* Relationships between the soil Enzyme activity and soil nutrients in forest soils typical of the Qinling Mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 1037-1046. (in Chinese)
- [34] 张社奇, 王国栋, 田鹏, 等. 黄土高原刺槐林地土壤微生物的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2004(6): 128-131.
- ZHANG S Q, WANG G D, TIAN P, *et al.* Distributive feature of soil microorganism of *Robinia pseudoacacia* L. plantation forestland in Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004(6): 128-131. (in Chinese)
- [35] 郁国梁, 王军强, 马紫荆, 等. 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因子[J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(5): 9-18.
- YU G L, WANG J Q, MA Z J, *et al.* Seasonal dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of leaves of dominant plants in the lakeside wetland of Bosten Lake and their influencing factors[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2022, 31(5): 9-18. (in Chinese)
- [36] 刘润红, 白金连, 包含, 等. 桂林岩溶石山青冈群落主要木本植物功能性状变异与关联[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 828-841.
- LIU R H, BAI J L, BAO H, *et al.* Variation and correlation in functional traits of main woody plants in the *Cyclobalanopsis glauca* community in the Karst hills of Guilin, Southwest China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(8): 828-841. (in Chinese)
- [37] ZIACO E, LIANG E. New perspectives on sub-seasonal xylem anatomical responses to climatic variability[J]. *Trees*, 2019, 33(4): 973-975.
- (上接第28页)
- [27] 徐道炜, 刘金福, 何中声, 等. 毛竹向杉木林扩张对土壤活性有机碳及碳库管理指数影响[J]. *西部林业科学*, 2019, 48(5): 22-28, 36.
- XU D W, LIU J F, HE Z S, *et al.* Effect of phyllostachys edulis to *Cunninghamia lanceolata* forest on soil active organic carbon and carbon management index[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, 48(5): 22-28, 36. (in Chinese)
- [28] 葛露露, 何宗明, 林宇, 等. 滨海沙地不同树种人工林生物量及凋落物碳氮养分归还[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 39-46.
- GE L L, HE Z M, LIN Y, *et al.* Biomass and litter carbon and nitrogen return of different plantations in the sandy coastal plain area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 39-46. (in Chinese)
- [29] 张淑香, 张文菊, 徐明岗. 土壤活性有机碳的影响因素与综合分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1178-1179.
- ZHANG S X, ZHANG W J, XU M G, *et al.* Influencing factors and comprehensive analysis of soil active organic carbon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(6): 1178-1179. (in Chinese)
- [30] GE T D, WU X H, CHEN X J, *et al.* Microbial phototrophic fixation of atmospheric CO₂ in China subtropical upland and paddy soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 113(1): 70-78.
- [31] 田慎重, 王瑜, 张玉凤, 等. 旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 133-140.
- TIAN S Z, WANG Y, ZHANG Y F, *et al.* Residue returning with subsoiling replacing rotary tillage improving aggregate and associated carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(24): 133-140. (in Chinese)
- [32] 王迪, 吴新亮, 蔡崇法, 等. 长期培肥下红壤有机碳组成与团聚体稳定性的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(1): 61-70.
- WANG D, WU X L, CAI C F, *et al.* Composition of organic carbon and their relationship with aggregate stability in red soil under different fertilizer application[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(1): 61-70. (in Chinese)
- [33] CATES A M, RUARK M D, HEDTCKE J L, *et al.* Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 371-380.
- [34] 王小沁, 陈玉雯, 孙辉, 等. 川西高山树线交错带海拔梯度上土壤有机碳稳定性特征[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 1-7.
- WANG X Q, CHEN Y W, SUN H, *et al.* Stabilization of soil organic carbon in alpine treeline ecotone along altitudinal gradient in the west of Sichuan Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 1-7. (in Chinese)