

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.03.014

杉阔异龄复层林对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响

徐海东^{1,2}, 苑海静^{1,2}, 熊 静¹, 虞木奎¹, 成向荣^{1*}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 研究杉木纯林转化为杉木阔叶树异龄复层混交林(简称杉阔复层林)对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响,为杉木人工林结构优化调控和可持续发展提供理论依据。[方法] 以浙江开化不同树种构建的杉阔复层林和杉木纯林为研究对象,分析 0~20 cm 土层水稳性团聚体(WSA)稳定性以及全土和团聚体有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)和镁(Mg)储量的变化。[结果] (1) 杉阔复层林和杉木纯林 <0.25 mm 水稳性团聚体(WSA_{<0.25 mm}) 占比最高;与杉木纯林相比,复层林均显著增加 >5 mm 水稳性团聚体(WSA_{>5 mm}) 比例,同时也显著提高土壤平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),降低了团聚体分形维数(D)。(2) 杉阔复层林和杉木纯林不同粒径团聚体中 SOC 和 TN 储量变化趋势一致,均为 WSA_{>5 mm}、2~5 mm 粒径水稳性团聚体(WSA_{2~5 mm}) > 0.25~2 mm 粒径水稳性团聚体(WSA_{0.25~2 mm}) > WSA_{<0.25 mm},而不同粒径团聚体中 TP 和 Mg 储量差异较小。(3) 全土和团聚体有机碳及养分储量主要受 >5 mm 粒径团聚体有机碳(SOC_{A>5 mm})、2~5 mm 粒径团聚体总氮(TN_{A2~5 mm}) 含量以及土壤 pH 的影响;团聚体稳定性主要受 WSA_{>5 mm}、土壤 pH 以及 2~5 mm 粒径团聚体有机碳(SOC_{A2~5 mm}) 含量的影响。(4) 复层林不同伴生树种对团聚体组分、稳定性、土壤有机碳及养分储量有重要影响,主成分分析(PCA)发现,杉木纯林引入紫楠(杉木+紫楠)后显著影响全土和团聚体磷镁储量以及 MWD 和 GMD;杉木纯林引入红茴香(杉木+红茴香)后显著影响全土和团聚体碳氮储量。[结论] 杉阔异龄复层林的构建有利于改善杉木纯林土壤理化性质,尤以乔木阔叶树种紫楠和红茴香引入,对杉木纯林土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的改善效果更佳。

关键词: 杉阔异龄复层林; 杉木纯林; 团聚体稳定性; 土壤有机碳; 土壤养分储量

中图分类号: S714.2 S791.27

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)03-0107-09

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国亚热带地区的主要造林树种之一,杉木人工林约占我国人工林面积的 18% 以及世界人工林面积的 5%^[1]。长期以来,杉木人工林采取纯林、短轮伐期和皆伐等经营方式,导致林分生产力和土壤质量不断降低,严重影响人工林生态系统稳定性,将杉木纯林改造为混交林,尤其是构建异龄复层林,被认为是解决当前杉木人工纯林面临的主要问题,以及实现可持续发展的有效途径^[2]。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其组分和稳定性在一定程度上反应了土壤持水性能和养分循环等能力的高低^[3],其中,水稳性团聚体(WSA)组分和稳定性会显著影响土壤结构与功能,团聚体稳定性越强,土壤对抗地表径流和土壤侵蚀的能力越强,有利于降低水土流失,提高土壤肥力^[4]。另外,团聚体良好的固碳作用可以减少 CO₂ 排放,有效缓解温室效应。目前,对团聚体稳定性影响的研究多集中于草地和农田生态系统,而

收稿日期: 2019-08-29 修回日期: 2019-11-27

基金项目: 国家重点研发计划课题“人工林增效与生态服务提升综合集成与示范”(2017YFC0505506); “低效用材林结构优化关键技术与示范”(2017YFC0505502)

* 通讯作者: 成向荣. E-mail: chxr@caf.ac.cn

对森林经营管理方式,如营造异龄复层林对团聚体稳定性影响的研究相对较少^[5-6]。研究异龄复层林土壤团聚体组分、稳定性及土壤碳储量的变化,对改善人工林土壤水土保肥能力和促进土壤碳固持具有重要意义。土壤碳氮磷元素既是维持生态系统养分循环的主要元素,也是表征林地土壤质量和肥力的首要指标^[7]。土壤碳氮磷储量在森林生态系统总碳氮磷储量中占有较大比例,而目前关于杉阔混交林对土壤碳氮磷储量的影响研究存在分歧。有研究报道,杉阔混交林可以增加土壤有机碳及养分储量^[8];但也有研究发现,杉阔混交林对有机碳储量及养分储量无显著影响,甚至会降低有机碳储量^[9]。土壤钙镁元素是植物生长发育必需的中量营养元素,是团聚体形成的良好胶结剂^[10]。在间伐后的杉木人工纯林内引入耐荫树种,构建杉木异龄复层混交林,已成为近年来低质低效杉木人工林结构优化和质量提升的主要措施之一;但现有研究主要集中在同龄混交林,异龄复层混交林在林分结构上与同龄混交林有较大差异,关于杉阔异龄复层林对土壤团聚体有机碳及养分含量和储量的影响鲜见报道。

本文选取浙江省开化县林场杉木纯林内引入的不同阔叶树种构建的杉阔异龄复层林为研究对象,以杉木纯林为对照,测定杉阔异龄复层林全土以及土壤团聚体碳氮磷钙镁含量和不同粒级团聚体组分,探讨构建异龄复层林对土壤全土和团聚体碳氮磷钙镁储量和水稳性团聚体稳定性的影响机制,评价杉阔异龄复层林(以下简称复层林)生态系统土壤稳定性、有机碳及养分储量潜力,并筛选高效的

复层林配置模式,以期对杉木人工林可持续经营、土壤质量提升及构建健康土壤生态系统提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省开化县林场(钱塘江源头重要区域)(29°09'N,118°25'E),试验地属浙西中山丘陵地带,气候属亚热带季风气候,年平均气温16.4℃,年平均降水量1814mm,无霜期252d,年日照总时数1334h,土壤类型主要以红黄壤为主。

供试杉木林分为1996年春季造林,初植密度2500株·hm⁻²,2006年进行1次抚育间伐,目前保留密度1358株·hm⁻²。2011年春季在杉木林下块状种植蚊母树(*Distylium racemosum* Sieb. et Zucc.)、紫楠(*Phoebe shearerii* (Hemsl.) Gamble)、杨桐(*Adinandra millettii* (Hook. et Arn.) Benth. et Hook. f. ex Hance)、红茴香(*Illicium henryi* Diels.)。其中,灌木树种(蚊母、杨桐)栽植密度3000株·hm⁻²,乔木树种(紫楠、红茴香)栽植密度2500株·hm⁻²,各树种栽植面积约0.5hm²。每个区内树种生长势基本一致,2018年5月在上述4个复层林和杉木纯林样地内随机构建3个20m×15m的小样方,样地基本情况见表1。

1.2 样品采集与测定

2018年5月在各林分的临时样方内采集凋落物和土壤样品。在每个样方内,按“S”形设置5个1m×1m的小样方收集地表凋落物,随后将凋落物

表1 样地基本情况

Table 1 Basic overview of the plots studied

处理 Treatments	树种 Tree species	林龄 Stand age/a	树高 Height/m	胸径 Diameter at breast /cm	凋落物生物量 Biomass of litter /(g·m ⁻²)	土壤容重 Bulk density/ (g·m ⁻³)	pH值																																								
杉木+蚊母 <i>C. lanceolata</i> + <i>D. racemosum</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	14.3	21.8	133.0±6.2bc	1.14±0.01c	4.29±0.01c																																								
	蚊母 <i>D. racemosum</i>	7	3.6	1.5				杉木+紫楠 <i>C. lanceolata</i> + <i>Ph. shearerii</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	14.6	20.9	148.9±12.6ab	1.28±0.02b	4.35±0.03ab	紫楠 <i>Ph. shearerii</i>	7	5.5	4.8	杉木+杨桐 <i>C. lanceolata</i> + <i>A. millettii</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	15.1	21.6	150.3±10.7ab	1.27±0.01b	4.38±0.04a	杨桐 <i>A. millettii</i>	7	2.8	2.1	杉木+红茴香 <i>C. lanceolata</i> + <i>I. henryi</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	15.8	22.1	158.3±11.2a	1.16±0.01c	4.30±0.02b	红茴香 <i>I. henryi</i>	7	4.4	3.2	杉木 <i>C. lanceolata</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	13.8
杉木+紫楠 <i>C. lanceolata</i> + <i>Ph. shearerii</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	14.6	20.9	148.9±12.6ab	1.28±0.02b	4.35±0.03ab																																								
	紫楠 <i>Ph. shearerii</i>	7	5.5	4.8				杉木+杨桐 <i>C. lanceolata</i> + <i>A. millettii</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	15.1	21.6	150.3±10.7ab	1.27±0.01b	4.38±0.04a	杨桐 <i>A. millettii</i>	7	2.8	2.1	杉木+红茴香 <i>C. lanceolata</i> + <i>I. henryi</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	15.8	22.1	158.3±11.2a	1.16±0.01c	4.30±0.02b	红茴香 <i>I. henryi</i>	7	4.4	3.2	杉木 <i>C. lanceolata</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	13.8	20.1	115.6±15.1d	1.36±0.02a	4.22±0.02d								
杉木+杨桐 <i>C. lanceolata</i> + <i>A. millettii</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	15.1	21.6	150.3±10.7ab	1.27±0.01b	4.38±0.04a																																								
	杨桐 <i>A. millettii</i>	7	2.8	2.1				杉木+红茴香 <i>C. lanceolata</i> + <i>I. henryi</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	15.8	22.1	158.3±11.2a	1.16±0.01c	4.30±0.02b	红茴香 <i>I. henryi</i>	7	4.4	3.2	杉木 <i>C. lanceolata</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	13.8	20.1	115.6±15.1d	1.36±0.02a	4.22±0.02d																				
杉木+红茴香 <i>C. lanceolata</i> + <i>I. henryi</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	15.8	22.1	158.3±11.2a	1.16±0.01c	4.30±0.02b																																								
	红茴香 <i>I. henryi</i>	7	4.4	3.2				杉木 <i>C. lanceolata</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	13.8	20.1	115.6±15.1d	1.36±0.02a	4.22±0.02d																																
杉木 <i>C. lanceolata</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>	22	13.8	20.1	115.6±15.1d	1.36±0.02a	4.22±0.02d																																								

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level between treatments, the same below.

样方土壤表面的植被小心铲除, 采集 0~20 cm 新鲜表层土。每个样方内收集的凋落物和土壤样品分别混合成一个混合样品, 共计 15 个凋落物样品和 15 个土壤样品, 随后立即将土壤样品用硬质塑料盒运回实验室, 在阴凉处自然风干, 并去除动植物残体等。所取土壤样品分为两部分, 一部分自然风干后测量完整全土(完整表层土)有机碳及养分含量; 另一部分原状土在风干过程中沿其自然结构面掰开并过 8 mm 筛, 继续风干后采用湿筛法进行团聚体粒径分组^[11]: 称取 50 g 风干土样, 在纯水中浸润 10 min, 再用 XDB0601 型土壤团聚体分析仪(北京新地标土壤设备有限公司生产)进行筛分, 筛分需通过一套 3 个筛子(5、2、0.25 mm), 在纯水环境中进行 5 min 湿筛(振幅 3 cm, 频率 30 次·min⁻¹), 得到 >5 mm 粒径水稳性团聚体(WSA_{>5 mm})、2~5 mm 粒径水稳性团聚体(WSA_{2~5 mm})、0.25~2 mm 粒径水稳性团聚体(WSA_{0.25~2 mm})及 <0.25 mm 粒径水稳性团聚体(WSA_{<0.25 mm})。将收集的凋落物在 65℃ 烘箱烘干, 不同粒径团聚体在 4℃ 冰箱冻干, 用于计算凋落物干质量及水稳性团聚体各组分的质量分数, 然后分别测定各粒径团聚体有机碳及养分含量, 土壤容重采用环刀法测定(容积 100 cm³ 环刀)。

土壤和团聚体碳氮磷钙镁含量分别采用重铬酸钾氧化-外加加热法、Foss 凯氏定氮仪、酸溶-钼锑抗比色法、原子吸收分光光度计法测量^[12], 经过多次实验仅测得钙镁元素中镁元素含量, 鉴于镁元素是重要的营养元素, 本文也予以分析。

1.3 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件对数据进行整理和统计分析, 用 LSD 法进行不同处理间全土有机碳及养分含量和储量、团聚体粒径百分含量、团聚体稳定性指标和同一处理下不同粒径团聚体有机碳及养分含量和储量差异显著性检验($P < 0.05$)。利用 R 语言(v3.5.1)中“mvpart”包进行多元回归树(MRT)分析, 分析环境变量(包括不同粒径水稳性团聚体百分含量、全土和团聚体碳氮磷镁含量以及 pH 等)对全土和团聚体碳氮磷镁储量以及平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)影响的重要性排序。此外, 利用“FactoMineR”包进行主成分分析(PCA), 分析复层林和纯林对全土和团聚体理化性质的影响。图表中数据均以平均值±标准

误表示。

选取 MWD、GMD 和团聚体分形维数(D)作为土壤团聚体稳定性的评价指标, 其计算公式^[13]为:

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

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

$$D = -\lg \left(\frac{M(r < x_i)}{M_t} - \frac{x_i}{x_{\max}} \right) \quad (3)$$

式(1~3)中: x_i 为任一粒径范围内团聚体的平均直径(mm); w_i 为不同土壤粒径团聚体占总团聚体的比例(以小数表示)。 $M(r < x_i)$ 为直径小于 x_i 的团聚体质量(g), M_t 为团聚体总质量(g), x_{\max} 为团聚体的最大直径(mm)。

土壤全土和团聚体碳氮磷镁储量计算公式^[14]如下:

$$SOC_{BS} = SOC_B \times BD \times d \times 0.1$$

$$TN_{BS} = TN_B \times BD \times d \times 0.1$$

$$TP_{BS} = TP_B \times BD \times d \times 0.1$$

$$Mg_{BS} = Mg_B \times BD \times d \times 0.1$$

$$SOC_{AS} = SOC_A \times BD \times d \times w_i \times 0.1$$

$$TN_{AS} = TN_A \times BD \times d \times w_i \times 0.1$$

$$TP_{AS} = TP_A \times BD \times d \times w_i \times 0.1$$

$$Mg_{AS} = Mg_A \times BD \times d \times w_i \times 0.1$$

式中: SOC_{BS} 、 TN_{BS} 、 TP_{BS} 和 Mg_{BS} 分别为全土有机碳、总氮、总磷以及镁储量($t \cdot hm^{-2}$); SOC_B 、 TN_B 、 TP_B 和 Mg_B 分别为全土有机碳、总氮、总磷以及镁含量($g \cdot kg^{-1}$); SOC_{AS} 、 TN_{AS} 、 TP_{AS} 和 Mg_{AS} 分别为团聚体有机碳储量、总氮储量、总磷储量及镁储量($t \cdot hm^{-2}$); SOC_A 、 TN_A 、 TP_A 和 Mg_A 分别为团聚体有机碳、总氮、总磷及镁含量($g \cdot kg^{-1}$); BD 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); d 为土壤厚度(cm); w_i 为不同粒径团聚体占总团聚体的质量比例(以小数表示); 0.1 为单位转换系数。

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体分布及稳定性

杉木复层林和纯林土壤水稳性团聚体的分布模式一致(表 2), 均表现为: $WSA_{<0.25 mm} > WSA_{0.25~2 mm} > (WSA_{2~5 mm}, WSA_{>5 mm})$, 其中,

WSA_{<0.25 mm} 占比最高 (52.8%~59.4%) (表 2)。土壤同一粒级团聚体百分含量在不同杉木复层林之间差异较小, 其中, 杉木+紫楠、杉木+杨桐和杉木+红茴香之间差异不显著 ($P > 0.05$); 但与杉木纯林相比, 杉木复层林 WSA_{<0.25 mm} 均降低, 而 WSA_{2~5mm} 和 WSA_{>5mm} 均增加, 其中, WSA_{>5mm} 增加显著 ($P < 0.05$)。

杉木复层林土壤平均质量直径 (MWD) 与几

何平均直径 (GMD) 均显著大于杉木纯林, 团聚体分形维数 (D) 均显著小于杉木纯林 ($P < 0.05$)。不同杉木复层林之间土壤平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 和团聚体分形维数 (D) 差异均不显著 ($P > 0.05$), 其中, 杉木+紫楠复层林土壤平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 最大, 团聚体分形维数 (D) 最小。

表 2 复层林土壤水稳性团聚体含量及稳定性

Table 2 The contents and stability of water-stable aggregate in uneven-aged mixed and monoculture plantations

处理 Treatment	水稳性团聚体含量 Contents of water-stable aggregate/%				平均质量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/m	团聚体分形维数 D
	WSA _{>5 mm}	WSA _{2~5 mm}	WSA _{0.25~2 mm}	WSA _{<0.25 mm}			
杉木+蚊母 <i>C. lanceolata+D. racemosum</i>	7.8±1.1a	10.0±2.5a	24.3±1.6b	57.9±3.1ab	1.21±0.07a	0.41±0.03a	2.72±0.03b
杉木+紫楠 <i>C. lanceolata+Ph. shearerii</i>	8.6±2.0a	7.7±1.5ab	30.9±0.8a	52.8±2.9b	1.24±0.17a	0.45±0.05a	2.67±0.06b
杉木+杨桐 <i>C. lanceolata+A. millettii</i>	8.4±0.2a	7.4±0.2b	29.3±0.9a	54.8±1.1ab	1.20±0.04a	0.42±0.01a	2.69±0.01b
杉木+红茴香 <i>C. lanceolata+I. henryi</i>	7.7±0.5a	7.1±0.1b	31.3±1.9a	53.9±1.8ab	1.17±0.03a	0.43±0.02a	2.70±0.02b
杉木 <i>C. lanceolata</i>	4.7±1.9b	6.6±0.4b	29.4±1.0a	59.4±1.5a	0.94±0.12b	0.36±0.02b	2.74±0.04a

2.2 全土碳氮磷镁储量分布

本文碳氮磷镁含量和储量分布趋势较一致, 因此仅阐述有机碳及养分储量的分布。从图 1 可以看出: 杉木复层林有机碳 (SOC) 和总氮 (TN) 储量均显著高于杉木纯林 ($P < 0.05$), 杉木复层林土壤有机碳 (SOC) 增加了 39.4%~104.3%, 总氮 (TN) 储量分别增加了 3.2%~36.1%, 杉木+杨桐和杉木+红茴香复层林土壤有机碳 (SOC) 显著高于其它配置模式; 杉木+紫楠复层林土壤总磷 (TP) 储量显著高于杉木纯林 (增加 28.1%); 杉木+紫楠复层林土壤镁 (Mg) 储量显著高于杉木纯林 ($P < 0.05$), 而其余复层林土壤镁 (Mg) 储量与杉木纯林没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.3 团聚体碳氮磷镁储量分布

杉木复层林土壤水稳性团聚体内碳氮磷镁储量总体高于杉木纯林 (图 2)。杉木复层林土壤不同粒径团聚体内有机碳 (SOC)、总氮 (TN) 储量大小均为 (WSA_{>5 mm}、WSA_{2~5 mm}) > WSA_{0.25~2 mm} > WSA_{<0.25 mm} ($P < 0.05$), 杉木复层林土壤同一粒级团聚体内有机碳 (SOC)、总氮 (TN) 储量分布一致, 整体表现为: 杉木+红茴香、杉木+杨桐 > 杉木+紫楠 > 杉木+蚊母 > 杉木。不同粒级团聚体中总磷 (TP)、镁 (Mg) 储量整体差异较小。杉木+杨桐复层林 WSA_{>5 mm} 中总磷 (TP) 储量显著

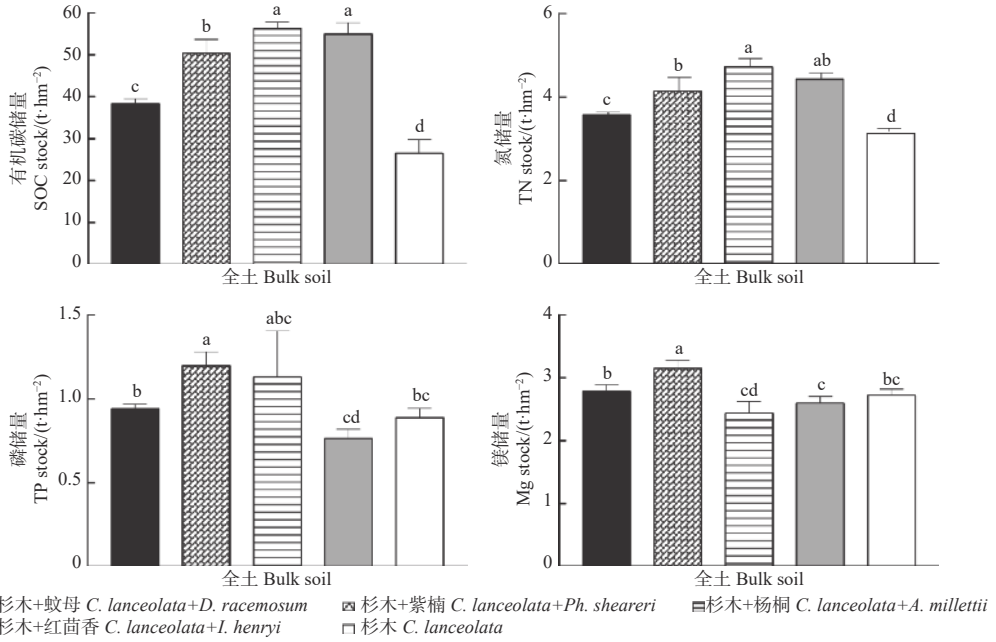
高于其它复层林 ($P < 0.05$), 杉木+紫楠复层林 WSA_{2~5 mm} 和 WSA_{0.25~2 mm} 中总磷 (TP) 储量均高于杉木纯林及其它复层林。除 WSA_{2~5 mm} 外, 仅杉木+紫楠复层林土壤镁 (Mg) 储量显著高于杉木纯林及其它复层林 ($P < 0.05$)。

2.4 土壤理化因子对碳氮磷镁储量及团聚体稳定性的影响

多元回归树 (MRT) 分析发现, >5 mm 粒径团聚体有机碳 (SOC_{A>5 mm}) 含量作为划分土壤碳氮磷镁储量的第 1 个分支节点, 其解释率高达 72.90%, 其次是 2~5 mm 粒径团聚体总氮 (TN_{A2~5 mm}) 含量, 解释率为 12.94%, pH 的解释率为 8.30% (图 3A)。WSA_{>5 mm}、pH 和 2~5 mm 粒径团聚体有机碳 (SOC_{A2~5 mm}) 含量分别是划分土壤平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 和团聚体分形维数 (D) 的前 3 个重要分支节点 (图 3B), 解释率分别为 57.53%、18.29% 和 5.68%, 总体上 MRT 拟合效果较好, 图 3A 和图 3B 中总解释率分别为 94.14% 和 81.50%。

2.5 复层林和纯林对土壤理化性质的影响

经主成分分析 (PCA), 图 4A 前 2 个主成分的解釋率高达 78.3%, 全土和团聚体中相应元素储量相关性紧密, 杉木复层林与纯林之间土壤有机碳及养分储量差异较大, 土壤碳氮储量与磷镁储量差

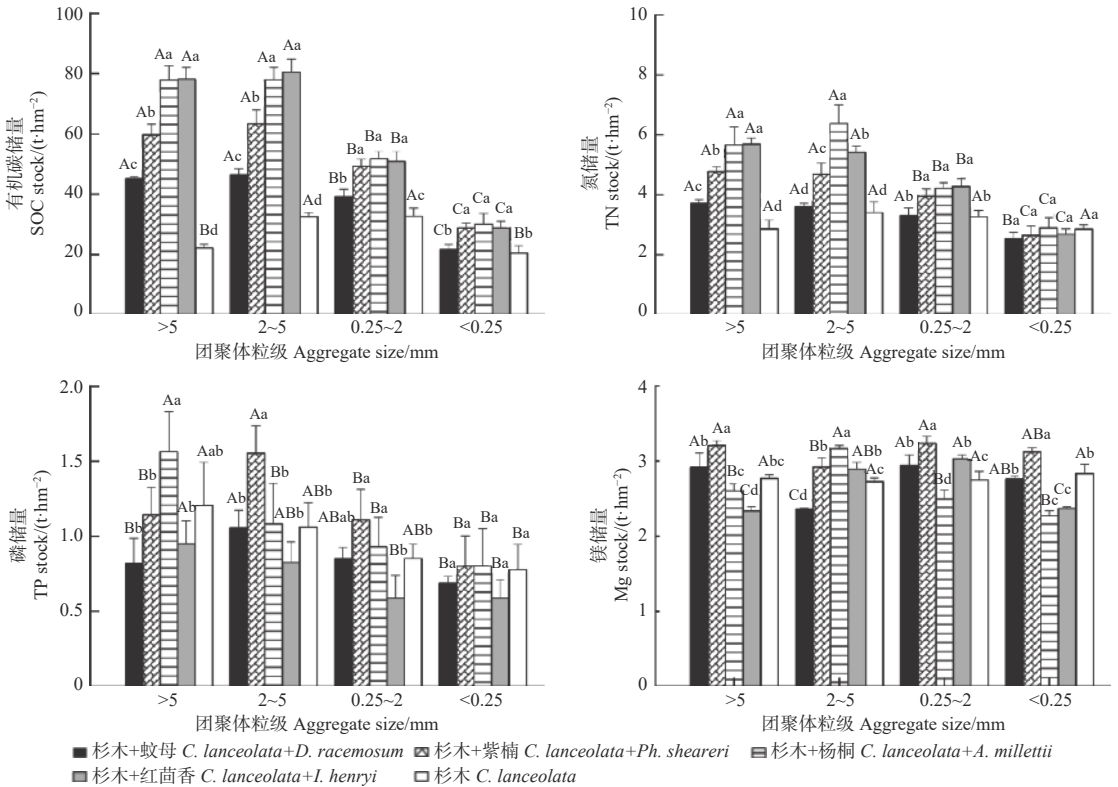


注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference at 0.05 level between treatments.

图1 全土碳氮磷镁储量分布

Fig. 1 The stocks of SOC, TN, TP and Mg in bulk soil



注: 不同大写字母表示不同粒径同一处理间差异显著, 不同小写字母表示不同处理同一粒径间差异显著。

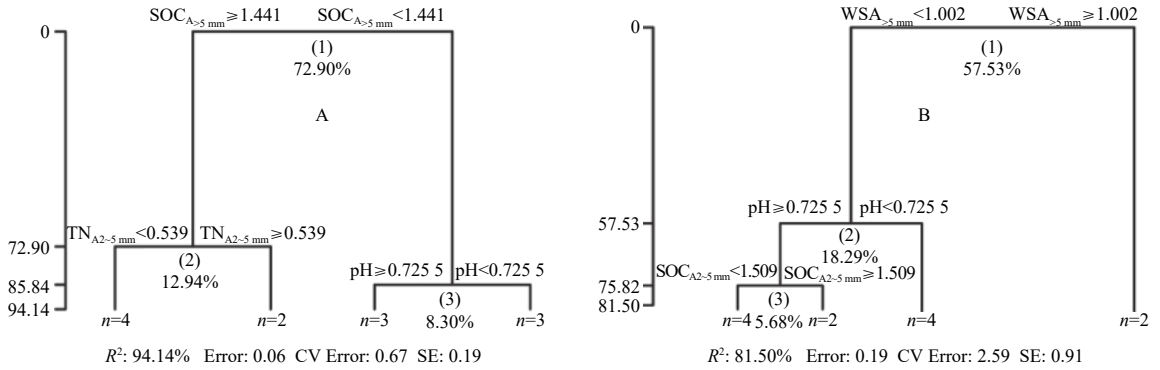
Notes: Different capital letters indicated significant difference between the different particle sizes at the same treatments, different capital letters indicated significant difference between the same particle sizes at the different treatments at 0.05 level.

图2 水稳性团聚体碳氮磷镁储量分布

Fig. 2 The stocks of SOC, TN, TP and Mg in water stable aggregates

异也较大，复层林对土壤有机碳及养分储量影响较大，其中，土壤碳氮储量集中分布在杉木+红茴香复层林样地，土壤磷镁储量主要分布在杉木+紫楠复层林样地；图4B前2个主成分的解釋率达到71.3%，不同粒径团聚体百分含量显著分离，土壤

平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 和 $WSA_{>5\text{ mm}}$ 具有较强的正相关， pH 、平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 以及 $WSA_{>5\text{ mm}}$ 集中分布在杉木+紫楠复层林样地。

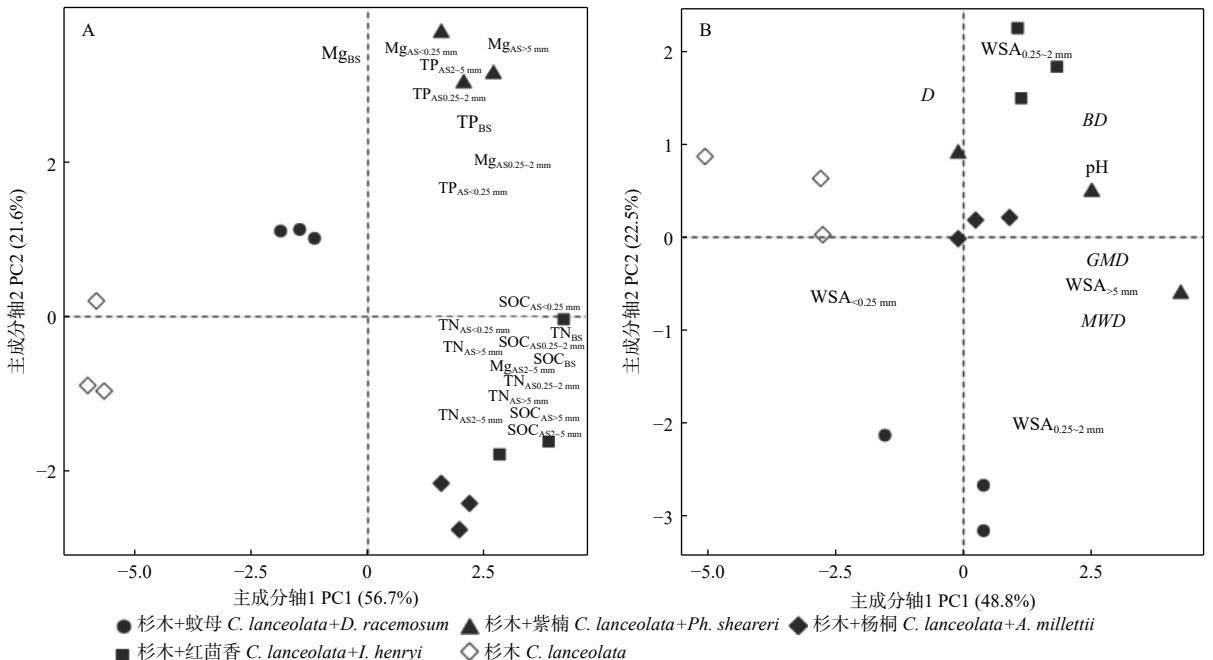


注：A:全土和团聚体碳氮磷镁储量；B:土壤团聚体稳定性指数。

Notes: A: The SOC, TN, TP and Mg stocks in bulk soil and soil aggregates; B: The index of soil aggregate stability.

图3 全土和团聚体碳氮磷镁储量及团聚体稳定性与环境因子的多元回归树分析

Fig. 3 Multivariate regression tree analysis of the SOC, TN, TP and Mg stocks in bulk soil and soil aggregates, soil aggregate stability index and environmental factors.



注：A: 土壤全土和团聚体有机碳及养分储量的主成分分析；B: 团聚体稳定性指数、粒径含量及环境因子的主成分分析； $SOC_{AS>5\text{ mm}}$ 、 $SOC_{AS2-5\text{ mm}}$ 、 $SOC_{AS0.25-2\text{ mm}}$ 和 $SOC_{AS<0.25\text{ mm}}$ 分别表示 $>5\text{ mm}$ 、 $2\sim 5\text{ mm}$ 、 $0.25\sim 2\text{ mm}$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体有机碳储量，其余指标以此类推。

Notes: A: Principal component analysis of soil organic carbon and nutrient stocks in bulk soil and aggregates; B: Principal component analysis of aggregate stability index, particle size and environmental factors; $SOC_{AS>5\text{ mm}}$, $SOC_{AS2-5\text{ mm}}$, $SOC_{AS0.25-2\text{ m}}$ and $SOC_{AS<0.25\text{ mm}}$ represent $>5\text{ mm}$ aggregates of organic carbon stocks, $2\sim 5\text{ mm}$ of organic carbon stocks, $0.25\sim 2\text{ mm}$ of organic carbon stocks and $<0.25\text{ mm}$ of organic carbon stocks, respectively, the rest of the indicators and so on.

图4 复层林和纯林全土及团聚体理化性质的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of soil and soil aggregates physical and chemical properties in uneven-aged mixed and monoculture plantations

3 讨论

水稳性团聚体粒级占分配在土壤养分循环中具有重要作用, 而团聚体粒级分布的影响因素主要包括物理因素(土壤类型、雨水侵蚀等)和化学因素(养分输入、有机胶体)^[15]。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^[34]。本研究发现, 0~20 cm 土层微团聚体含量高于大团聚体, 这可能与土壤类型有关^[16], 本研究区土壤以黄红壤为主, 而前者以紫色土为主。试验区杉木复层林土壤的大团聚体高于杉木纯林, 这可能与杉阔混交林增加了地表凋落物质量有关。本研究发现, 杉木复层林凋落物生物量显著高于杉木纯林, 凋落物生物量的增加可以有效降低雨水以及地表径流对表层土壤的侵蚀, 从而减少对大团聚体的破坏^[17]。此外, 土壤平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)越大表示团聚体的稳定性越强, 而团聚体分形维数(D)却相反^[18]。作者研究发现, 杉木复层林土壤平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均大于杉木纯林, 团聚体分形维数(D)则相反。通过多元回归(MRT)分析发现, 团聚体稳定性指数最重要的影响因素是>5 mm 粒径水稳性团聚体($WSA_{>5\text{ mm}}$), 这与谢贤健等^[19]的研究结果类似, 即土壤团聚体组成中大粒径的比例越高, 对团聚体稳定性影响越大。有研究报道, pH 的降低会导致土壤团聚作用降低, 尤其影响大团聚的形成^[19], 本文也发现, pH 显著影响团聚体稳定性, 因为复层林构建提高了土壤 pH 值, 这在一定程度上增加了大团聚体含量, 间接地提高了团聚体稳定性。此外, 复层林凋落物的增加会导致土壤中有有机质的大量输入, 有机质也可促进土壤颗粒之间的胶结作用, 最终提高团聚体整体稳定性^[20]。作者发现, 2~5 mm 粒径团聚体有机碳($SOC_{A_{2-5\text{ mm}}}$)含量对团聚体稳定性起着重要作用, 说明大团聚体碳含量可能比全土碳含量更能指示团聚体稳定性。

土壤碳、氮、磷和镁储量主要取决于这 4 种元素输入和输出, 而地表凋落物是碳、氮、磷和镁元素的主要来源^[21]。杉阔混合凋落物促进了混交林中杉木凋落物的分解速率, 使得更多有机质输入到土壤, 而杉木纯林凋落物难以分解, 养分归还量低于混交林^[22], 这可能是本文杉木复层林土壤碳氮储量显著高于杉木纯林的主要原因。基于 MRT 分析发现, 全土和团聚体碳氮磷镁储量主要受>5 mm 粒

径团聚体有机碳($SOC_{A_{>5\text{ mm}}}$)含量的影响, 而 2~5 mm 粒径团聚体总氮($TN_{A_{2-5\text{ mm}}}$)含量对土壤有机碳及养分储量也有重要影响, 说明相比磷镁元素以及其余粒径团聚体, 大团聚体碳氮含量对土壤碳氮磷镁储量影响更大, 而团聚体对土壤碳氮的保护作用是土壤碳氮稳定的重要机制, 团聚体的包裹可减少碳氮与胞外酶的接触, 并限制微生物与底物的接触^[23], 相应的大颗粒团聚体可以固持更多碳氮, 这有利于减少有机碳氮矿化及温室气体的大量排放。本研究发现, 杉阔复层林团聚体碳氮储量显著高于纯林, 并且>5 mm ($WSA_{>5\text{ mm}}$)、2~5 mm 粒径水稳性团聚体($WSA_{2-5\text{ mm}}$)有机碳(SOC)和总氮(TN)储量高于其它粒级, 说明杉阔异龄混交可以固持更多碳氮, 并提高土壤碳氮的稳定性。土壤磷元素是影响亚热带地区森林生态系统生产力的重要限制因子^[24], 范静^[25]研究发现, 亚热带地区(福建和湖南)杉阔混交林和杉木纯林非根际土壤总磷(TP)含量无显著差异。本研究发现, 复层林(除杉木+紫楠外)总磷(TP)储量与杉木纯林差异不显著, 这可能与该地区普遍缺磷有关^[24]。土壤镁(Mg)是植物必需的中量营养元素, 本研究发现, 杉木+紫楠复层林土壤镁(Mg)储量高于杉木纯林, 这在一定程度上也可能会促进团聚体稳定性; 但张昌顺^[26]研究表明, 杉竹混交林土壤镁(Mg)含量显著低于杉木纯林和毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz.)纯林, 这些不同的结果可能与树种类型和土壤差异有关。

杉木复层林不同混交树种对林地全土以及团聚体碳和养分储量产生的影响不同, 乔木阔叶树种较灌木树种对土壤理化性质的影响更大, 其中, 杉木+红茴香复层林显著影响土壤碳氮储量, 杉木+紫楠复层林对土壤磷镁储量以及平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)稳定性指数的影响较大。于海艳等^[27]调查发现, 油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、元宝枫(*Acer truncatum* Bunge)以及华山松(*P. armandii* Franch.)纯林土壤团聚体稳定性高于侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)+刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)混交林, 而本研究则得出相反结论, 因为本研究选择的阔叶树种凋落物生物量都较大, 尤其乔木阔叶树种紫楠和红茴香凋落物生物量更高, 凋落物有机质的输入及林木之间复杂根系的穿插都有利于团聚体稳定性的提高, 而侧柏、刺槐的叶和根生物量较

小,对雨水侵蚀的阻挡作用较弱,从而不利于表层团聚体稳定性的提高。白秀梅等^[28]研究发现,灌木林土壤平均质量直径(*MWD*)高于乔木阔叶树种;而本研究发现,乔木阔叶树种与杉木混交后土壤稳定性普遍高于灌木与乔木混交林分,说明针叶与乔阔混交协同促进作用可能强于针叶与灌阔混交。此外,徐芷君等^[29]研究表明,马尾松(*P. massoniana* Lamb.)+木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)混交林能显著提高土壤有机碳储量,而湿地松(*P. elliotii* Englem.)+木荷混交林却无显著影响,2种混交模式均对土壤碳储量具有显著影响,但对磷储量却无显著影响。本研究发现,杉木+红茴香复层林能显著影响土壤碳氮储量,对土壤磷镁储量影响较小,而杉木+紫楠复层林显著影响磷镁储量,但对碳氮储量影响较弱,这可能与不同树种的功能特性和复层林树种间关系有关,还有待进一步深入研究。

4 结 论

与杉木纯林相比,杉阔复层林对土壤团聚体组成的整体分布无影响,但显著增加 $>5\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体($\text{WSA}_{>5\text{ mm}}$)百分含量,提高了土壤团聚体稳定性。多元回归树(MRT)分析发现, $\text{WSA}_{>5\text{ mm}}$ 含量、pH值以及 $2\sim 5\text{ mm}$ 粒径团聚体有机碳($\text{SOC}_{\text{A}2\sim 5\text{ mm}}$)含量是影响复层林团聚体稳定性的重要因素。土壤 $>5\text{ mm}$ 粒径团聚体有机碳($\text{SOC}_{\text{A}>5\text{ mm}}$)、 $2\sim 5\text{ mm}$ 粒径团聚体总氮($\text{TN}_{\text{A}2\sim 5\text{ mm}}$)含量和pH值是影响复层林土壤有机碳及养分储量的重要因素。复层林混交树种组成对土壤团聚体稳定性以及有机碳和养分储量有显著影响,尤其杉木林下引入乔木阔叶树种(杉木+紫楠和杉木+红茴香)构建的复层林,更有利于土壤有机碳和养分积累以及提高土壤团聚体稳定性。

参 考 文 献:

- [1] Huang W J, Liu J X, Wang Y P, *et al.* Increasing phosphorus limitation along three successional forests in southern China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 364(1-2): 181-191.
- [2] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(1): 1-14.
- [3] Li B, Ge T, Xiao H, *et al.* Phosphorus content as a function of soil aggregate size and paddy cultivation in highly weathered soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(8): 7494-7503.
- [4] Roldan A, Carrasco L, Caravaca F. Stability of desiccated rhizosphere soil aggregates of mycorrhizal *Juniperus oxycedrus* grown in a desertified soil amended with a composted organic residue[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2722-2730.
- [5] 田慎重,王 瑜,李 娜,等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7116-7124.
- [6] Naveed M, Herath L, Moldrup P, *et al.* Spatial variability of microbial richness and diversity and relationships with soil organic carbon, texture and structure across an agricultural field[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 103: 44-55.
- [7] Belay-Tedla A, Zhou X, Su B, *et al.* Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 110-116.
- [8] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feed-backs[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [9] 杨玉盛,林 鹏,郭剑芬,等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解[J]. *生态学报*, 2002, 23(7): 1278-1289.
- [10] 蒋 静,周运超,杜光平. 石灰岩发育的乔木林下土壤团聚体形成的影响因素[J]. *中国水土保持*, 2011, 352(7): 47-50.
- [11] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] Meng C, Niu J, Li X, *et al.* Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(9): 2357-2370.
- [14] Zhong Z, Han X, Xu Y, *et al.* Effects of land use change on organic carbon dynamics associated with soil aggregate fractions on the Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(9): 1070-1082.
- [15] 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.
- [16] 万晓华,黄志群,何宗明,等. 阔叶和杉木人工林对土壤碳库的影响比较[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 345-350.
- [17] 王冬雪. 闽北山地针阔混交林培育效果研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [18] Liu Z, Chen X, Jing Y, *et al.* Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. *Catena*, 2014, 123(1): 45-51.
- [19] 谢贤健,张 继. 巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 175-179.
- [20] 刘广深,许中坚,徐冬梅. 酸沉降对土壤团聚体及土壤可蚀性的影响[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(4): 70-74.
- [21] 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): 4002-4018.
- [22] 黄 宇,冯宗炜,汪思龙,等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统C、N贮量[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3146-3154.

- [23] Gelaw A M, Singh B R, Lal R. Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia[J]. Land Degradation and Development, 2013, 26(7): 690-700.
- [24] 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.
- [25] 范 静. 林分结构对杉木人工林土壤磷功能组分与营养器官氮磷化学计量比的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- [26] 张昌顺. 闽北不同类型毛竹林生态功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [27] 于海艳, 宫汝宁, 周 娅, 等. 北京八达岭地区4种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 162-166.
- [28] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 79-84.
- [29] 徐芷君, 刘苑秋, 方向民, 等. 亚热带2种针叶林土壤碳氮磷储量及化学计量比对混交响应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 167-172.

Effects of Uneven-aged *Cunninghamia lanceolata* and Evergreen Broadleaved Mixed Plantations on Soil Aggregate Stability and Soil Organic Carbon and Nutrients Stocks

XU Hai-dong^{1,2}, YUAN Hai-jing^{1,2}, XIONG Jing¹, YU Mu-kui¹, CHENG Xiang-rong¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To study the effect of uneven-aged mixed plantations (*Cunninghamia lanceolata* + evergreen broadleaved tree species) on soil aggregates stability, organic carbon and nutrient storage, so as to provide references for optimizing the plantation structure and improving the sustainable forest management. [Method] This study investigated the uneven-aged mixed and the monoculture *C. lanceolata* plantations in Kaihua County of Zhejiang Province, and analyzed the stability of water-stable aggregates (WSA) and the changes of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and magnesium (Mg) stocks in 0~20 cm soil layer. [Result] (1) The proportion of water-stable micro-aggregates (size<0.25 mm, WSA_{<0.25 mm}) was the highest in the uneven-aged mixed and monoculture plantations. Compared with the monoculture plantation, the >5 mm aggregates proportions (WSA_{>5 mm}), the soil mean weight diameter (*MWD*) and geometric mean diameter (*GMD*) significantly increased in the uneven-aged mixed plantations, but the soil fractal dimension (*D*) reduced. (2) The changes of SOC and TN stocks in different aggregate size of the uneven-aged mixed and the monoculture plantations were similar: WSA_{>5 mm}, WSA_{2~5 mm}> WSA_{0.25~2 mm}> WSA_{<0.25 mm}. The stocks of TP and Mg less varied in different aggregate sizes. (3) The stability of aggregate was mainly affected by WSA_{>5 mm} and SOC_{>5 mm} contents, pH, SOC_{2~5 m}, bulk soil and soil aggregates organic carbon and nutrient stocks were mainly affected by SOC_{A>5 mm}, 2~5 mm nitrogen contents (TN_{A2~5 mm}) and pH. (4) Tree species composition in the uneven-aged mixed plantations greatly affected on aggregate composition and stability, SOC and nutrient stocks. The results of principal component analysis (PCA) showed that *C. lanceolata*+*Phoebe sheareri* significantly affected TP and Mg stocks in bulk soil and soil aggregates, and also affected *MWD* and *GMD*; *C. lanceolata*+*Illicium henryi* significantly affected SOC and TN stocks in bulk soil and soil aggregates. [Conclusion] In general, the establishment of uneven-aged *C. lanceolata* and broadleaved evergreen mixed plantations is beneficial to improve the soil physical and chemical properties of monoculture plantation, especially the introduced tree species of *Ph. sheareri* and *I. henryi* greatly enhance soil aggregate stability, soil organic carbon stocks and nutrient stocks of monoculture plantations.

Keywords: uneven-aged mixed *Cunninghamia lanceolata* plantation; monoculture *Cunninghamia lanceolata* plantation; stability of water-stable aggregates; soil organic carbon; soil nutrient stocks