

不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究

庄正^{1,2}, 张芸^{1,2}, 张颖^{1,2}, 李艳娟^{1,2}, 高文杰^{1,2}, 刘爱琴^{1,2}

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 国家林业局杉木工程技术研究中心, 福州 350002)

摘要: 为研究杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性, 探索杉木人工林土壤结构状况, 以不同发育阶段杉木人工林 0—100 cm 土层为研究对象, 采用干筛法测定土壤团聚体组成, 采用湿筛法测定团聚体稳定性, 结果表明: 在干筛处理下, 各发育阶段杉木人工林土壤团聚体以大团聚体(>0.25 mm)为主, 大团聚体比例皆达 80% 以上, 中龄林和成熟林土壤大团聚体比例在各土层中均高于幼龄林, 且在 0—20 cm 土层差异显著($P < 0.05$); 在各土层中, 不同发育阶段杉木人工林 >5 mm 粒径的土壤团聚体皆占较高比例, 且不同发育阶段对 >5 mm 粒径的土壤团聚体组成比例有显著影响。在湿筛处理下, 各发育阶段水稳性大团聚体(>0.25 mm)比例随土层加深而显著降低, 0—80 cm 各土层内, 中龄林和成熟林土壤水稳性团聚体比例高于幼龄林, 且在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中龄林比幼龄林分别高 41.79% 和 39.06%, 差异显著; 各发育阶段杉木人工林土壤团聚体破坏率(PAD)特征与水稳性大团聚体相反, 平均重量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)随土层加深而显著下降, 其中中龄林和成熟林土壤团聚体 GMD 在 0—100 cm 各土层内均显著高于幼龄林。据此认为, 杉木人工林土壤团聚体稳定性随土层加深而降低, 中龄林和成熟林土壤结构优于幼龄林。

关键词: 人工林; 杉木; 土壤团聚体; 稳定性

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0183-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.030

Study on Distribution Characteristics and Stability of Soil Aggregate in Chinese Fir Plantation at Different Developmental Stages

ZHUANG Zheng^{1,2}, ZHANG Yun^{1,2}, ZHANG Ying^{1,2}, LI Yanjuan^{1,2}, GAO Wenjie^{1,2}, LIU Aiqin^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002;

2. State Forestry Administration Engineering Research Center of Chinese Fir, Fuzhou 350002)

Abstract: In order to investigate the composition and stability of soil aggregates and explore the soil structure of Chinese fir plantation, in this study, 0—100 cm soil layers of Chinese fir plantation in different developmental stages were taken as the object, dry sieving was used to determine composition of soil aggregates and wet sieving was used to determine the stability of aggregates. The results showed that under the dry sieve treatment, the soil aggregates of the Chinese fir plantations were dominated by macroaggregates (>0.25 mm) at each developmental stage, which was above 80%, and the proportion of soil macroaggregates in middle age forest and mature forest was higher than that of young forest in each soil layer, it had significant difference in 0—20 cm soil layers; In each soil layer, for the soil aggregates with clay diameter >5 mm, which had a higher proportion and had a significant effect on the composition of soil aggregates with the different developmental stages of Chinese fir. Under the wet sieve treatment, the proportion of water stable macromolecule (>0.25 mm) was significantly decreased with the increase of soil layer in each developmental stage, for the 0—80 cm soil layers, the proportion of water stable macromolecule of middle age and mature forest was higher than young forest, for the 0—20 cm and 20—40 cm soil layer, the proportion of water stable macromolecule of middle age forest were 41.79% and 39.06% higher than that of the young forest, which had significant difference; The PAD characteristics of soil aggregates displayed an opposite trend as compare to water stable macromolecules in each developmental stage of Chinese fir plantation, MWD and GMD decreased significantly with the increase of soil layer, and the GMD of soil aggregate in middle age forest and mature forest were significantly higher than those of young forest in 0—100 cm soil layers. Therefore, the stability of soil aggregates in Chinese fir plantation decreased with the increase of soil layer, and the soil

收稿日期: 2017-06-06

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0600301); 福建农林大学科技创新专项(KF2015034)

第一作者: 庄正(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林资源与环境研究。E-mail: 345556134@qq.com

通信作者: 刘爱琴(1966—), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事森林土壤研究。E-mail: fjlaq@126.com

structure of middle age forest and mature forest was better than that of young forest.

Keywords: plantation; Chinese fir; soil aggregate; stability

我国是木材及木制品加工大国,木材需求量大。据统计,近十年来我国木材消耗总量增加 173%,位居世界第二^[1],在此背景下,人工林的价值显得尤为突出。自上世纪 60 年代以来,人工林逐步取代天然林,成为我国木材的主要来源。第八次全国森林资源清查数据显示,我国人工林面积达 6 933 万 hm²,人工林年均采伐量为 1.55 亿 m³,占森林采伐总量的 46%^[2]。人工林对我国经济的发展起着重要的作用,但随着人工林纯林化、集约化等现象的加剧,水土流失、地力衰退、生物多样性减少等众多问题逐渐显露出来,人工林的生态问题受到广泛关注^[3]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国亚热带主要的造林树种之一,具有生长快、材质好、经济价值高等优点,其造林面积和蓄积量分别占全国人工林的 22.65%和 46.98%,在我国人工林中占用重要地位^[4]。前人研究表明^[5-7],杉木人工林的发展会对林下土壤生态系统产生重要的影响:杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构会发生显著变化,即杉木人工林取代自然林后,土壤细菌多样性指数显著下降,且随连载代数增加而持续降低^[5];不同发育阶段杉木人工林土壤理化性质均有显著差异,土壤肥力呈现出幼龄林>成熟林>中龄林的规律^[6];杉木人工林生态系统碳密度随林龄增加而增加,土壤碳密度随林分发育呈先上升后下降的趋势^[7]。由此可见,杉木人工林的生态环境问题具有较高的研究价值。

土壤团聚体是土壤的重要组成部分,是矿物质通

过有机和无机物质联合并在多种因素共同作用下形成的次生土壤物质^[8]。土壤团聚体数量的多少在一定程度上可以反映土壤的养分状况、持水性和通透性等能力的高低,特别是>0.25 mm 水稳性团聚体的数量,可以反映土壤结构的好坏,是评价土壤肥力和抗蚀能力的重要指标^[9-11]。土壤团聚体的稳定性对土壤养分循环、水分运输、微生物群落等具有重要影响,团聚体稳定性的变化可以从侧面表征土壤的生态特性^[12]。土壤团聚体的稳定性与土地利用方式密切相关,因此,本文以不同发育阶段杉木人工林为研究对象,研究不同发育阶段杉木人工林 0—100 cm 土层土壤团聚体分布特征及其稳定性,旨在探索杉木人工林土壤团聚体的粒径分布、组成和稳定水平,为科学评价杉木人工林土壤结构及土壤生态环境提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于福建省三明市莘口镇福建农林大学莘口教学林场的沙阳工区(26°10'N,117°27'E),该区域为亚热带季风气候,年平均气温为 19.1℃,年平均降雨量为 1 749 mm,成土母岩为花岗岩,土壤为沙质红壤,土层厚度 1 mm 以上。2015 年 1 月在沙阳工区不同发育阶段的杉木人工林(幼龄林、中龄林、成熟林)选择气候、地形、母岩、土壤等立地条件相似的林地设立固定样地,各样地内均为第二代杉木人工林,造林前炼山整地。样地基本情况见表 1,土壤理化性质见表 2。

表 1 样地基本情况

林龄	林分密度/ (株·hm ⁻²)	平均 树高/m	平均 胸径/cm	坡向	坡度/ (°)	海拔/ m
幼龄林	1820±93	4.98±0.03	6.01±0.07	东南	25~35	290~308
中龄林	1109±93	15.77±0.41	16.78±0.29	东南	25~32	185~209
成熟林	1200±63	16.07±0.25	17.08±0.26	西南	28~36	199~233

注:表中数据为平均值±标准误差。下同。

表 2 不同发育阶段杉木人工林 0—20 cm 土壤理化性质

林龄	质量	容重/	pH	土壤质地/%		
	含水量/%	(g·cm ³)		砂粒	粉粒	黏粒
幼龄林	34.91±5.24	1.09±0.15	4.25±0.06	44.25±11.10	36.36±3.44	32.71±5.97
中龄林	29.99±3.94	1.39±0.10	4.23±0.09	32.38±3.69	30.86±4.18	36.76±7.07
成熟林	37.97±5.38	1.12±0.12	4.10±0.03	41.86±2.03	40.03±4.72	43.94±3.26

1.2 土样采集

在每个发育阶段的杉木人工林中分别设 3 个 20 m×20 m 固定样地,每个样地沿对角线在上坡、中坡和下坡挖 3 个土壤剖面,用环刀和硬质饭盒在样方中间剖面分别挖取 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的原状土,用于土壤水分—物理性

质性质和团聚体的测定。

1.3 试验方法

土壤团聚体组成用干筛法测定^[13],将风干的土样置于筛组(筛子孔径分别为 5,2,1,0.5,0.25 mm)的最上层,加盖后摇动筛组,直至各筛上的土团不再下漏为止,然后收集各筛上的土样进行称重,用于计算各级别团聚

体占风干土样的百分数。土壤团聚体稳定性用湿筛法测定^[13],根据干筛法测定出来的团聚体比例,称取 50 g 土样置于水稳性团聚体分析仪筛组(筛子孔径分别为 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm)的最上层,浸水上下振动 30 min 后收集留在筛子上的土样,再置于 80 ℃烘箱中烘干并称重,用于计算土壤团聚体水稳性指标。

1.4 数据分析

湿筛处理后土壤团聚体破坏率、平均重量直径和平均几何直径计算公式为:

$$PAD = \frac{DR_{>0.25} - WR_{>0.25}}{DR_{>0.25}} \times 100\%$$

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

$$GWD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^m w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

式中:PAD 为团聚体破坏率(%); $DR_{>0.25}$ 表示>0.25 mm 非水稳定性团聚体含量(%); $WR_{>0.25}$ 表示>0.25 mm 水稳性团聚体含量(%);MWD 为平均重量直径(mm); x_i 为每一组粒径组分的平均直径(mm); w_i 为每一粒径组分大团聚体(>0.25 mm)重量与总团聚体重量的比重;GWD 表示平均几何直径(mm); x_i 和 w_i 意义同上。

采用 SPSS 19.0 和 Excel 软件对数据进行统计分析,通过双因素方差分析方法(Two-way ANOVA)分析不同发育阶段、土层及其交互作用对土壤团聚体稳定性的影响,应用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差法(LSD)进行差异显著性检验,使用 Origin 8.5 软件绘图。

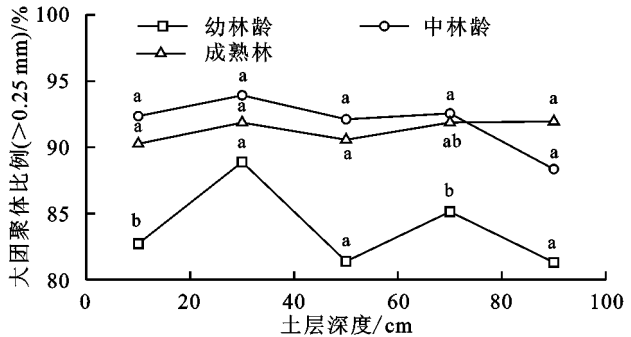
2 结果与分析

2.1 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布与组成

干筛处理下不同发育阶段杉木人工林土壤大团聚体分布特征见图 1。各发育阶段杉木人工林土壤团聚体以大团聚体(>0.25 mm)为主,大团聚体比例皆达 80%以上,微团聚体(<0.25 mm)分布较少,这说明杉木人工林土壤团聚性较强,分散性较弱。中龄林和成熟林土壤大团聚体在不同土层分布比较稳定,且中龄林土壤大团聚体比例在 0—80 cm 土层高于成熟林;幼龄林土壤大团聚体在不同土层分布波动较大,大团聚体比例低于中龄林和成熟林,且在 0—20 cm 土层达显著差异水平。

干筛处理获得的不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布及组成见表 3。不同发育阶段杉木人工林>5 mm 粒径的土壤团聚体在各土层中皆占较高比例,随着粒径的变小,各级团聚体比例表现出不同程度的降低。不同发育阶段对杉木人工林各土层>5 mm 粒径的土壤团聚体组成比例有显著影响($P<0.05$),且中龄林和成熟林各土层>5 mm 粒径的土壤团聚体比例大于幼龄林,并在 0—20,20—40,60—80 cm 土层达显著

差异水平。不同发育阶段杉木人工林各土层微团聚体(<0.25 mm)比例特征与>5 mm 粒径的土壤团聚体相反,表现为中龄林和成熟林低于幼龄林,且在 0—20 cm 和 60—80 cm 土层差异显著。



注:不同小写字母表示不同发育阶段同一粒径土壤大团聚体比例差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同发育阶段杉木人工林土壤大团聚体(>0.25 mm)分布特征

2.2 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体稳定性

经湿筛处理后,各发育阶段杉木人工林不同土层水稳性大团聚体(>0.25 mm)比例表现出较为明显的差异,水稳性大团聚体比例随土层加深而降低,各发育阶段杉木人工林 0—20, 20—40, 60—80, 80—100 cm 土层之间水稳性大团聚体比例达显著差异水平;在 0—80 cm 各土层内,中龄林和成熟林土壤水稳性团聚体比例高于幼龄林,且在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中龄林比幼龄林分别高 41.79%和 39.06%,差异显著(图 2A)。不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体 PAD 特征与水稳性大团聚体比例相反,团聚体 PAD 随土层加深而上升,在 0—20, 20—40, 60—80, 80—100 cm 土层之间差异显著;在 0—80 cm 各土层内,幼龄林土壤团聚体 PAD 高于中龄林和成熟林,并在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层达显著差异水平(图 2B)。不同发育阶段杉木人工林各土层团聚体 MWD 和 GMD 特征基本一致,表现出随土层加深而下降的趋势,且 0—20 cm 土层团聚体 MWD、GMD 与其他各土层之间差异显著;中龄林和成熟林土壤团聚体 MWD 在 0—60 cm 各土层内总体上显著高于幼龄林,中龄林和成熟林土壤团聚体 GMD 在 0—100 cm 各土层内均显著高于幼龄林(图 2C、图 2D)。

2.3 不同土层、发育阶段及其交互作用与杉木人工林土壤团聚体稳定性的关系

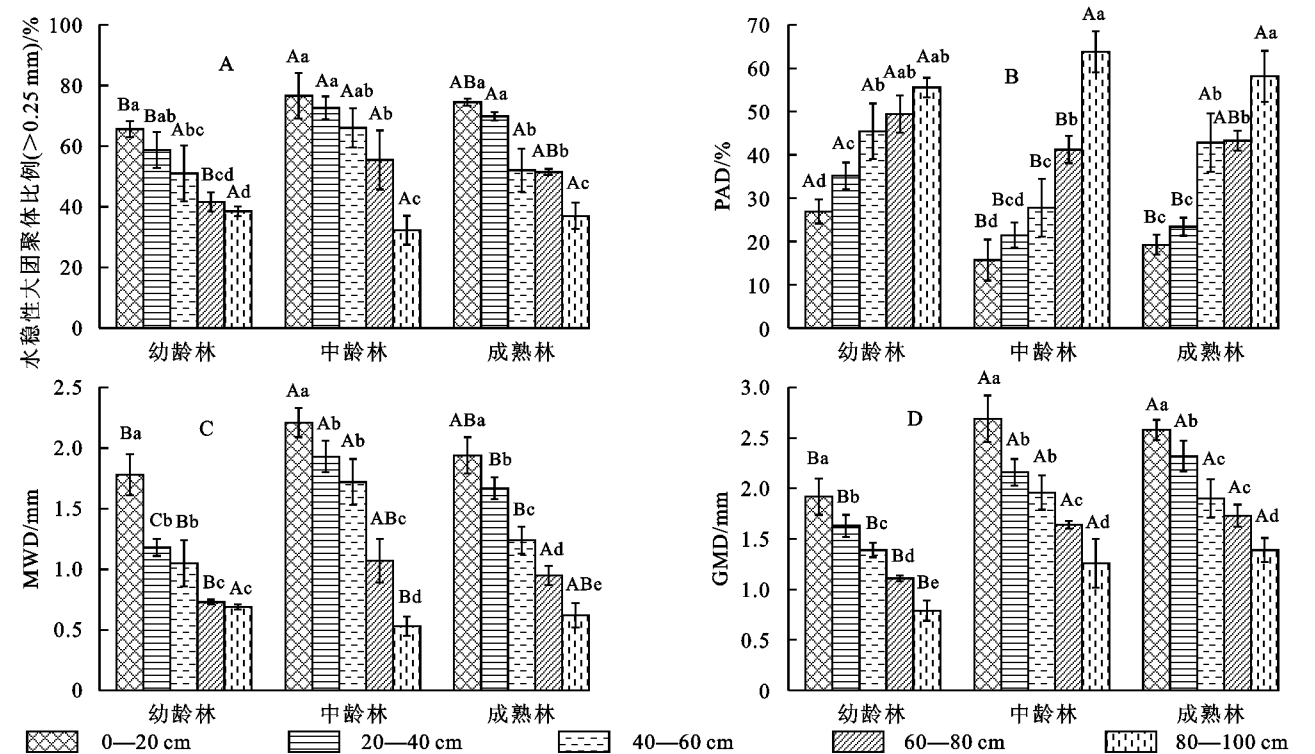
通过双因素方差分析研究土层、发育阶段及其交互作用对杉木人工林土壤团聚体稳定性的影响,由表 4 可知,土层和发育阶段对杉木人工林土壤水稳性大团聚体比例、PAD、MWD 以及 GMD 均有显著影响($P<0.05$),且土层和发育阶段的交互作用对水稳性大团聚体比例、PAD 和 MWD 有显著影响($P<0.05$)。从影响程度来看,土层、发育阶段及其交互作用对 MWD 的影响程度

相同,而水稳性大团聚体比例、PAD、GMD 受土层和发育阶段单因素的影响大于它们的交互作用。

表 3 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布及组成

土层深度/cm	发育阶段	各级团聚体比例/%					
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0—20	幼龄林	23.60±3.60b	22.39±3.00a	10.30±0.71a	15.73±1.77a	10.69±3.64a	17.29±2.00a
	中龄林	43.25±9.18a	22.53±0.57a	11.57±4.30a	9.15±4.84b	5.85±1.63a	7.66±1.02b
	成熟林	51.81±8.40a	17.41±3.88a	7.03±0.63a	6.86±1.97b	7.15±2.47a	9.76±3.15b
	P	0.021	NS	NS	0.032	NS	0.039
20—40	幼龄林	33.00±4.47b	19.36±3.39a	10.44±2.14a	11.25±2.51a	14.83±6.84a	11.12±3.25a
	中龄林	39.57±6.75a	20.11±3.86a	10.64±1.01a	14.21±4.81a	9.39±4.52a	6.10±0.26b
	成熟林	50.22±4.94a	20.61±2.51a	8.60±1.83a	6.93±1.43b	5.50±1.10a	8.15±2.54ab
	P	0.025	NS	NS	NS	NS	NS
40—60	幼龄林	27.49±13.75b	20.45±7.47a	9.39±2.89ab	10.11±1.74a	13.94±9.10a	18.62±12.49a
	中龄林	33.79±2.52ab	22.75±3.54a	12.68±0.54a	13.33±1.12a	9.56±1.94a	7.90±0.33a
	成熟林	53.84±5.12a	19.72±3.57a	6.09±2.01b	5.80±1.45b	5.12±0.62a	9.42±2.20a
	P	0.042	NS	NS	0.007	NS	NS
60—80	幼龄林	32.19±6.37b	21.50±2.17a	9.58±2.06a	10.79±1.34a	11.07±2.57a	14.86±2.70a
	中龄林	47.05±5.48a	21.43±0.48a	8.48±1.61a	9.12±2.15a	6.47±1.28b	7.49±0.01b
	成熟林	50.30±6.54a	20.03±2.51a	8.83±2.15a	6.84±2.24a	5.87±1.46b	8.14±2.62b
	P	0.037	NS	NS	NS	0.045	0.027
80—100	幼龄林	27.53±11.53b	23.14±4.22a	8.83±1.55ab	7.71±2.59a	14.09±3.29a	18.70±11.35a
	中龄林	31.84±3.65b	22.36±1.00a	11.74±2.83a	12.19±0.40a	10.21±2.16ab	11.66±3.83a
	成熟林	52.31±5.18a	21.07±2.16a	6.72±1.81b	6.81±2.56a	5.03±1.97b	8.07±1.58a
	P	0.030	NS	NS	NS	0.022	NS

注:不同小写字母表示不同发育阶段同一粒径土壤团聚体组成差异显著($P<0.05$);NS表示不同发育阶段对团聚体组成无显著影响。



注:图柱上不同大写字母表示相同土层不同发育阶段团聚体稳定性指标差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同发育阶段不同土层团聚体稳定性指标差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体稳定性

3 讨论

土壤团聚体的形成是一个复杂的物理、化学及生物作用的过程,在此过程中受土地利用方式、土地管理方法、气候条件、土壤质地等多种因素的影响^[14]。由于造林前的炼山整地措施,杉木人工林土壤结构受到破坏,土壤淋溶作用加强,土壤有机质暴露在外会加快分解,减少了团聚体的胶结物质,人为干扰同时

还会影响土壤中的无机胶结物质,不利于大团聚体的形成与稳定^[15]。在本研究中,中龄林和成熟林大团聚体比例及 MWD、GMD 皆高于幼龄林,与前人研究结果基本一致^[16-17]。一方面可能是因为中龄林和成熟林种植时间早,土壤生态恢复时间长,土壤结构趋于稳定,而幼龄林土壤生态恢复时间短,所以其大团聚体比例和稳定性都较低;另一方面可能是由于不同

龄林之间林下土壤有机质含量差异所致。王连晓等^[16]对不同发育阶段橡胶林土壤团聚体的分布特征和稳定性进行研究,发现 20 年橡胶林土壤大团聚含量及其体稳定性高于 10 年,说明随着龄林的增加,其土壤结构的稳定性会得到提高,这与本文的结果相同,但不同的是,30 年橡胶林的土壤大团聚体及其稳定性反而低于 20 年,王连晓等^[16]认为这可能是由于 30a 橡胶林长期受到割胶、踩踏等原因造成;李玮等^[17]对不同植茶年限土壤团聚体的碳氮磷含量的研究表明,长期植茶有利于土壤有机碳、全氮和全磷的积累,土壤 C/P 和 N/P 均在植茶 50 年后达到最大值,这说明种植年限的增加有利于团聚体胶结物质的积累,从而有利于大团聚体的形成与稳定;Ma 等^[18]也认为,不同龄林对地上部分有机质的输入影响较大,杉木中龄林和成熟林凋落物量高于幼龄林,对土壤有机质归还量大。由此可见,杉木中龄林和成熟林对土壤颗粒的团聚作用优于幼龄林。

表 4 土层、发育阶段及其交互作用的双因素方差分析

项目	影响因素	d. f.	F	P
水稳性大团聚体比例 (>0.25 mm)	土层	4	63.51	<0.001
	发育阶段	2	11.72	<0.001
	土层×发育阶段	8	2.67	0.024
	土层	4	109.69	<0.001
PAD	发育阶段	2	14.58	<0.001
	土层×发育阶段	8	4.88	0.010
	土层	4	167.19	<0.001
MWD	发育阶段	2	39.83	<0.001
	土层×发育阶段	8	6.84	<0.001
	土层	4	101.40	<0.001
GMD	发育阶段	2	86.10	<0.001
	土层×发育阶段	8	0.79	0.616

土壤团聚体的稳定性很大程度上决定于胶结物质类型和它们之间的联结力,土壤有机碳是团聚体形成与稳定过程中重要的胶结剂之一^[19-20]。土壤有机碳主要通过可溶性有机质在土壤剖面做垂直水分运动,然后逐渐被各层土壤矿质吸附累积^[21],也就是说通常情况下有机碳随土层加深而降低,继而影响土壤团聚体的分布与稳定,因此土层与土壤团聚体稳定性之间的关系密不可分。本研究发现,不同发育阶段杉木人工林各土层团聚体稳定性指标差异较大,水稳性大团聚体比例、MWD 和 GMD 随土层加深而降低,PAD 反之,这与多数研究结果相同^[20-23],究其原因,可能是由于表层土壤有机质含量丰富,土壤团聚作用强,但随着土层加深,有机碳等胶结物质逐渐被铁铝氧化物、黏土矿物所吸附,团聚体胶结剂的减少直接影响了土壤团聚体的形成与稳定。Opera^[22]对不同土地利用方式下的土壤微团聚体水稳性的研究表明,土壤有机质、钙离子和镁离子对土壤微团聚体的稳定性具有显著影响;李江涛等^[20]研究认为,可溶性有机碳(DOC)和热水提取态有机碳

(HWOC)作为团聚体稳定稳定性胶结剂,在人为扰动土壤团聚体形成和稳定过程中发挥重要作用,分别与团聚体稳定性指数之间呈显著或极显著相关关系;张芸等^[23]研究发现,杉木人工林土壤可溶性有机质(DOC、TDN)和团聚体稳定性随土层加深而显著下降,土壤团聚体稳定性与活性有机碳组分、总碳、总氮等呈显著正相关,这也印证了本观点。

有机物质主要通过铁铝氧化物与黏粒及黏土矿物结合促进土壤有机-无机复合和土壤颗粒团聚^[24-25],一般认为,在土壤有机质较高且铁铝氧化物、黏土矿物含量较低的情况下,有机质的团聚作用占主导地位,反之,则主要靠黏粒的团聚力及铁铝氧化物的胶结作用。此外,土壤微生物如真菌、放线菌可以通过菌丝缠绕分散的土壤颗粒或依靠自身代谢产物(多糖和其他有机物)对土壤颗粒进行胶结从而促进团聚体的形成与稳定^[26];Ca²⁺、Mg²⁺、Fe³⁺、Al³⁺等阳离子通过形成阳离子桥键连接黏粒和有机、无机化合物,有利于土壤团聚体的稳定^[27]。总之,影响杉木人工林土壤团聚体分布及稳定的因素众多,各因素以及各因素之间相互作用对杉木人工林土壤团聚体的影响有待于进一步研究和探索。

4 结论

(1)各发育阶段杉木人工林土壤团聚体以大团聚体(>0.25 mm)为主,大团聚体比例皆达 80%以上,微团聚体(<0.25 mm)比例不足 20%,故各发育阶段杉木人工林土壤团聚性较强,分散性较弱。

(2)随着土层的加深,各发育阶段杉木人工林水稳性大团聚体(>0.25 mm)比例、土壤团聚体 MWD、GMD 显著下降,PAD 显著上升,说明土层越深,土壤团聚体稳定性越低。

(3)与杉木人工林幼龄林相比,中龄林和成熟林更有利于土壤大团聚体的形成,团聚体稳定性更高,土壤结构更好,其最高大团聚体比例分别可达 93.92%和 91.94%,最高水稳性大团聚体比例分别可达 76.67%和 74.53%。

(4)不同发育阶段和土层深度均对杉木人工林土壤团聚体稳定性有显著影响,除 GMD 外,不同发育阶段和土层深度的交互作用对水稳性大团聚体比例、PAD 及 MWD 影响显著。

参考文献:

[1] 孙奇,齐英杰. 浅析我国木材需求及消耗现状[J]. 林业科技,2015,40(2):60-62.

[2] 徐济德. 我国第八次森林资源清查结果及分析[J]. 林业经济,2014(3):6-8.

[3] 李明军,杜明凤,聂朝俊. 马尾松人工林地力维护研究进展[J]. 世界林业研究,2014,27(5):31-36.

[4] 郝杰,阮少宁,林思祖,等. Fe⁺与 Ti⁺离子注入对杉木种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报,

- 2014, 34(1):36-39.
- [5] 刘丽, 徐明恺, 汪思龙, 等. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化[J]. 生态学报, 2013, 33(15):4692-4706.
- [6] 李惠通, 张芸, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析[J]. 林业科学研究, 2017, 30(2):322-328.
- [7] 梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4):896-902.
- [8] 任镇江, 罗友进, 魏朝富. 农田土壤团聚体研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2):1101-1105.
- [9] Lal R. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century[J]. Soil Science, 2000, 165(3):191-207.
- [10] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2):141-145.
- [11] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68(1):A4-A9.
- [12] 陈山. 不同利用方式土壤团聚体稳定性及其与有机质和铁铝氧化物的关系[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [13] 国家林业局发布. 中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社, 1999:91-94.
- [14] Wallace B M, Krzic M, Newman R F, et al. Soil aggregate dynamics and plant community response after biosolids application in a semiarid grassland[J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(5):1663-1671.
- [15] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(9):2588-2596.
- [16] 王连晓, 史正涛, 刘新有, 等. 不同林龄橡胶林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8):1381-1388.
- [17] 李玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):9-16.
- [18] Ma X Q, Liu C J, Hannu I, et al. Biomass, litter fall and the nutrient fluxes in Chinese fir stands of different age in subtropical China[J]. Journal of Forestry Research, 2002, 13(3):165-170.
- [19] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4):1360-1365.
- [20] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):233-238.
- [21] Nebbioso A, Piccolo A. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): A critical review[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 405(1):109-124.
- [22] Opera C C. Soil micro aggregates stability under different land use types in south eastern Nigeria[J]. Catena, 2009, 79(2):103-112.
- [23] 张芸, 李惠通, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤有机质特征及团聚体稳定性[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8):2029-2037.
- [24] Denef K, Six J, Merckx R, et al. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy[J]. Plant and Soil, 2002, 246(2):185-200.
- [25] Chan K Y, Heenan D P. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(6):1841-1844.
- [26] 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.
- [27] Amezketa E. Soil aggregate stability: A review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2/3):83-151.
- (上接第 89 页)
- [12] 马星, 郑江坤, 王文武, 等. 不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2):17-21.
- [13] 黄鑫, 蒲晓君, 郑江坤, 等. 不同植物篱对紫色土区坡耕地表层土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4):173-177.
- [14] 常松果, 胡雪琴, 史冬梅, 等. 不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5):34-40.
- [15] 刘金祥, 张莹. 香根草在我国的研究简史及应用进程[J]. 草原与草坪, 2012, 32(5):70-76.
- [16] 代数, 蒋光毅, 陈正发, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤土旱坡地产流产沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):1-5.
- [17] 周萍, 文安邦, 张信宝, 等. 坡耕地植物篱在水土保持中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(4):108-113.
- [18] 卜崇峰, 蔡强国, 袁再健. 三峡库区等高植物篱的控蚀效益及其机制[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4):14-18.
- [19] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2):400-407.
- [20] 林超文, 涂仕华, 黄晶晶, 等. 植物篱对紫色土区坡耕地水土流失及土壤肥力的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(6):2191-2197.
- [21] Cullum R F, Wilson G V, Mogregor K C, et al. Run-off and soil loss from ultra-narrow row cotton plots with and without stiff-grass hedge[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1):56-63.
- [22] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):85-90.
- [23] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2):124-132.