

不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征

王心怡, 周 聪, 冯文瀚, 陈金林, 蒋翔鹤

(南京林业大学现代林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要: 土壤团聚体作为土壤结构性状的重要指标, 对土壤孔隙、持水、保水等状况都有重要影响; 土壤团聚体有机碳除了反映土壤固碳状况外, 还与团聚体的稳定性能密切相关, 研究森林土壤团聚体及其有机碳状况, 旨在为合理利用土壤、提高人工林水源涵养功能提供依据。为此, 以福建省洋口国有林场不同林龄杉木人工林(幼龄林、中龄林、成熟林)土壤为研究对象, 通过野外调查、采样和室内分析, 研究不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征。结果表明: 不同林龄杉木人工林对土壤团聚体及其有机碳具有重要影响, 成熟林土壤大团聚体含量、团聚体平均重量直径(MWD)、团聚体有机碳含量及贡献率均分别大于幼龄林、中龄林; 不同林龄的土壤水稳性团聚体均以大团聚体(粒径 >0.25 mm)为主, 占 $59.57\% \sim 80.97\%$, 粒径 <0.053 mm 的仅占 0.80% ; 土壤团聚体有机碳贡献率也以大团聚为主, 其中以 $2 \sim 0.25$ mm 粒级贡献率最高, 达 58.43% ; 另外, 土壤有机碳含量与团聚体 MWD 呈显著正相关, 且具有明显的垂直变化特征, 即随土层加深而下降。因此, 土壤有机碳对团聚体稳定性具有积极作用, 不同林龄土壤团聚体稳定性及有机碳变化规律为成熟林 $>$ 幼龄林 $>$ 中龄林。

关键词: 杉木人工林; 林龄; 团聚体特征; 团聚体有机碳

中图分类号: S157.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0126-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.019

Changes of Soil Aggregates and Its Organic Carbon in Chinese Fir Plantations with Different Forest Ages

WANG Xinyi, ZHOU Cong, FENG Wenhan, CHEN Jinlin, JIANG Xianghe

(Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract: As an important indicator for soil structure, soil aggregates have a huge impact on soil porosity and water holding capacity. Soil aggregate organic carbon can not only reflect soil carbon sequestration capacity, but also be closely related to aggregate stability. Study on soil aggregates and organic carbon distribution characteristics in Chinese Fir plantations can provide theoretical basis for improving soil productivity and water use efficiency. In our research, soil samples were collected from Chinese Fir plantations with different forest ages (6, 11 and 32 years), which was located in Yangkou National Forest Farm, Fujian Province, China. The water-stable soil aggregate composition and organic carbon contents were measured. The results showed that forest age was very important in terms of soil aggregate and its organic carbon. Macro-aggregate contents (> 0.25 mm), MWD, organic carbon contents and its contribution of aggregates in mature forest were higher than that in young and middle forests. Water-stable macro-aggregates were the main part of soil aggregates, which accounting for about $59.57\% \sim 80.97\%$, while the aggregates with the partical size less than 0.053 mm only accounted for 0.80% . In terms of organic carbon contribution, macro-aggregates were the main contributor, and aggregates with the partical size $2 \sim 0.25$ mm accounted for 58.43% . Furthermore, soil aggregate MWD and its carbon content had a typically vertical characteristic, decreasing with soil depth. A strong positive correction was found between aggregate MWD and organic carbon. Hence, organic carbon was beneficial for the stability of soil aggregate, and MWD and organic carbon contents of aggregate showed a trend as mature forest $>$ young forest $>$ middle forest.

Keywords: Chinese fir plantations; forest age; aggregate characteristic; aggregate-associated organic carbon

收稿日期: 2019-03-10

资助项目: 科技基础性工作专项(2014FY120700); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

第一作者: 王心怡(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤改良利用研究。E-mail: wangxinyi0026@163.com

通信作者: 陈金林(1962—), 男, 教授, 主要从事土壤改良利用研究。E-mail: jlchen@njfu.edu.cn

土壤团聚体是土壤矿物颗粒经凝聚胶结作用形成的多孔结构体^[1],是土壤结构的基本单元,对土壤孔隙类型、孔隙数量有重要影响。土壤团聚体数量和分布状况,不仅直接反映土壤结构性状、水分状况、通气状况,还能在一定程度上反映土壤抗蚀性和稳定性^[2]。土壤团聚体平均重量直径(MWD)是评价团聚体稳定性的重要指标,能够表征土壤结构的好坏^[3]。土壤有机碳作为团聚体有机胶结物质的重要组成部分,是衡量土壤肥力的重要指标,也是影响土壤结构和稳定性的重要因素^[4]。土壤有机碳与团聚体之间关系密切,有机碳通过有机无机胶结作用参与团聚体形成,而团聚体发育形成过程是有机碳固定的重要机制^[5]。有机碳对不同粒级土壤团聚体的吸附与胶结程度不同,探究土壤有机碳在不同粒级团聚体中的分布特征是了解土壤团聚体稳定性的重要手段^[6],因此,研究土壤团聚体及其有机碳变化特征,对提高土壤结构稳定性、水土保持效益具有重要意义。

我国是世界上人工林面积最大的国家,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林作为我国南方的主要造林树种,约占全国人工林面积的 30%^[7],在水土保持方面具有不可忽视的贡献。立地条件改良、水源涵养是人工林经营建设过程中的重要目标之一,且土壤团聚体及有机碳特征与土地利用方式密切相关,因此,人工林土壤团聚体及有机碳特征的研究受到广泛关注。近年来,研究人员^[8-9]一直重视对土壤团聚体和有机碳的研究,并取得一系列成果。但现有研究^[10-11]大多针对不同植被类型、管理方式对人工林土壤团聚体及有机碳的影响,或杉木人工林生物量及出材率,有关不同林龄对杉木人工林团聚体及有机碳特征的研究相对较少。因此,以幼龄林(≤10 年)、中龄林(11~20 年)、成熟林(26~35 年)杉木人工林为研究对象,采用林龄时间序列模拟杉木成熟过程中的龄组演替,研究不同林龄杉木人工林土壤团聚体组成及稳定性,探讨土壤团聚体有机碳含量及贡献率,揭示不同林龄杉木人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响,为合理利用土壤、提高人工林水源涵养

功能提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省南平市顺昌县洋口林场(117°48′—117°56′E,26°46′—26°52′N),为武夷山支脉低山丘陵地貌;属亚热带气候,年均降水量 1 880 mm,无霜期 280 d,相对湿度 82%;年最高气温 40.5 ℃,最低气温 -6.8 ℃,年平均气温 18.5 ℃。土壤主要为花岗岩风化母质上发育而成的山地红壤,土层深厚,土壤质地为壤质黏土,机械组成为砂粒 36.25%,粉粒 30.86%,黏粒 32.89%。

1.2 样地设置与样品采集

2016 年 12 月,在洋口林场选择地形、海拔、坡度、坡向等条件基本一致,长势较为均匀、无病虫害的杉木幼龄林、中龄林、成熟林 3 个龄组的人工林为研究对象,各林龄杉木人工林均为第 2 代杉木纯林,造林前整地,造林密度为 2 m×3 m,种植初期 3 年每年抚育 2 次,后期林间管理方式一致;幼龄林到中龄林时期间伐,中龄林到成熟林时期轻度间伐;林下植被稀少,主要有毛冬青(*Ilex pubescens*)、山茶花(*Camellia japonica* L.)等木本植物,黑莎草(*Gahnia tristis*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)等草本植物,优势种不明显。

在每个林龄样地的中坡设置 3 个 20 m×20 m (长×宽)的标准样区,每个样区选取 3 个典型样点作为重复,去除表层枯落物后挖掘土壤剖面,按 0—20, 20—40,40—60 cm 分层采集原状土样 1 kg 于塑料饭盒中,放入垫有缓冲海绵的运输桶带回实验室供团聚体测定;同时,分层采集环刀样品测定物理指标;另外,分别在每层采集分析样品 1 kg 于布袋中,供土壤基本性状测定,采样均重复 3 次;土样带回实验室后,把塑料盒内原状土样用手轻轻沿其自然缝隙掰开至 10 mm 左右,置于阴凉通风处风干;将布袋分析土样去除石块根系,经风干、磨碎、过筛处理后,装袋备用。各样地基本特征见表 1,样地土壤基本养分背景值见表 2(以 0—20 cm 土层为代表)。

表 1 供试样地的基本特征

龄组	林龄/ a	平均 树高/m	平均 胸径/cm	坡度/ (°)	坡向 (方位角)/(°)	郁闭度	林分密度/ (10 ³ 株·hm ⁻²)	年凋落物量/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
幼龄林	6	8	12	20	158	0.57	1.66±0.10a	2.37±0.32b
中龄林	11	13	17	22	185	0.73	0.82±0.09b	2.76±0.21b
成熟林	32	25	26	19	172	0.85	0.66±0.06b	3.83±0.48a

注:数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示不同龄组间差异性显著($p<0.05$)。

1.3 测定项目与方法

土壤各项理化指标参照《土壤农业化学分析方法》^[12]进行测定。土壤容重采用环刀法,pH 采用电位法(土:水为 1:2.5),土壤有机碳(TOC)采用重铬酸钾外

加热—硫酸亚铁滴定法,土壤全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法,速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度计法测定。

土壤团聚体分级采用改进后的 Elliot 方法湿筛^[13]。按照干筛法测定出来的团聚体比例,称取 100 g

土样于水稳性团聚体分析仪的套筛中,筛子孔径由大到小依次为 2,0.25,0.053 mm。将筛缓慢放于湿筛仪桶内,水面保持低于最上方筛边缘,浸润 10 min。在纯水条件

下进行湿筛(振幅 3 cm,频率 30 次/min),收集各粒径筛内土样,于 60 ℃下烘干、称量,称重后的各粒径团聚体磨细过筛,用于测定有机碳含量。

表 2 不同林龄杉木人工林土壤基本养分背景值

林龄	容重/ (g·cm ⁻³)	全碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比 (TOC/TN)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)
幼龄林	1.04	13.38	1.34	9.99	45.00	5.21
中龄林	1.06	11.32	1.11	10.20	113.00	5.14
成熟林	1.09	18.46	1.85	9.98	151.00	4.97

1.4 数据处理

采用 Excel 2016、SPSS 20.0 软件进行数据处理和方差分析。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)计算公式^[14]为:
$$MWD=\sum_n X_i W_i$$

式中: n 为粒径分组的组数; X_i 为该粒径团聚体平均直径(mm); W_i 为该粒径团聚体质量占土壤样品质量的百分数(%)。

团聚体中有机碳贡献率(%)=(该级团聚体中有机碳含量×该级团聚体含量(g/kg))/该层土壤有机碳含量(g/kg)×100%

2 结果与分析

2.1 不同林龄杉木人工林土壤团聚体组成特征

湿筛法获得的不同林龄杉木人工林土壤团聚体分布和组成见表 3。不同林龄同一土层中,粒径>2 mm 的团聚体在 3 个土层中,均随林龄增加呈先减少

后增加趋势,且各林龄之间均有显著差异;粒径 0.25~0.053 mm 的团聚体规律与之相反,为先增后减。同一林龄不同土层中,幼龄林和中龄林粒径>2 mm 的团聚体含量,均随土层深度增加,呈先减少后增加的趋势。

粒径>0.25 mm 的团聚体是土壤大团聚体,是土壤团粒结构的重要组成部分,其含量越高,土壤结构稳定性越好^[1]。由表 3 可知,不同林龄杉木人工林土壤团聚体均以大团聚体(>0.25 mm)为主,占整个团聚体含量的 59.57%~80.97%。同一土层不同林龄中,大团聚体含量随着林龄增加呈先降低后增加趋势。各土层成熟林大团聚体含量与中龄林相比,分别显著增加了 15.34%,21.40%,10.19%。同一林龄不同土层中,幼龄林、中龄林土壤大团聚体含量随着土层加深呈先降低后增加趋势,成熟林土壤大团聚体含量随土层加深呈先升高后降低趋势,但无显著差异。

表 3 不同林龄杉木人工林土壤团聚体组成

土层 深度/cm	林龄	团聚体组成/%				
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	>0.25 mm
0—20	幼龄林	33.01±0.65Ab	37.58±0.32Bb	14.91±0.30ABb	14.50±0.11Ba	70.59±0.34Ab
	中龄林	19.79±0.37Ac	43.27±0.25Ba	31.61±0.45Aa	5.33±0.32Ab	63.06±0.15Bb
	成熟林	40.39±1.02Aa	38.01±0.58Bb	16.39±0.61Ab	5.21±0.12Ab	78.40±0.59Aa
20—40	幼龄林	31.00±0.79Ab	35.00±0.73Bb	12.09±0.16Bc	21.91±0.09Aa	66.00±0.06Bab
	中龄林	17.86±0.21Ac	41.71±0.27Bb	35.16±0.08Aa	5.27±0.03Ab	59.57±0.07Bb
	成熟林	25.26±0.13Ba	55.71±0.54Ab	18.23±0.63Ab	0.80±0.07Bc	80.97±0.67Aa
40—60	幼龄林	35.36±0.11Ab	45.31±0.08Ab	18.43±0.02Ab	0.90±0.07Ca	80.67±0.05Aa
	中龄林	21.16±0.18Ac	47.17±0.25Ab	31.25±0.18Aa	0.97±0.13Ba	68.33±0.26Ba
	成熟林	24.31±0.46Ba	54.21±0.37Aa	20.20±0.49Ab	1.28±0.34Ba	78.52±0.83Aa

注:数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示相同土层不同林龄土壤团聚体间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示相同林龄不同土层土壤团聚体间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 不同林龄杉木人工林土壤团聚体稳定性特征

团聚体平均重量直径(MWD)是反映土壤团聚体粒径分布状况的常用指标,能够有效地表征土壤水稳性团聚体稳定性状况,其值越大,表示土壤团聚体稳定性越强^[3]。不同林龄杉木人工林各土层团聚体 MWD 见图 1。不同林龄土壤在团聚体稳定性方面规律一致:同一土层内,随着林龄增加,团聚体 MWD 呈先下降后上升趋势,具体表现为成熟林>幼龄林>

中龄林,成熟林与幼龄林间差异显著。同一林龄内,随土层深度增加,团聚体 MWD 降低。幼龄林与成熟林下层土壤 MWD 相比上层土壤,分别降低 15.46%和 23.35%,达显著差异。

2.3 不同林龄杉木人工林土壤团聚体有机碳含量分布

土壤有机碳含量是表征土壤养分状况的重要指标,森林土壤中团聚体有机碳的分布与变化特征是评估人工林对土壤质量影响的重要方面^[8]。不同林龄

杉木人工林土壤团聚体有机碳含量,含量变化范围为2.66~26.13 g/kg(图2)。团聚体有机碳含量呈明显的垂直分布趋势,即随土层深度增加逐渐递减。同一土层中,不同林龄同一粒径土壤团聚体有机碳含量,随林龄增长表现出先降低后增加的趋势,具体表现为成熟林>幼龄林>中龄林。同一林龄不同粒级土壤团聚体有机碳含量随粒级的减小,呈先减小再增大的趋势。整体上,各林龄粒径<0.053 mm的团聚体有机碳含量最高,范围为4.30~26.13 g/kg;0.25~0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量最低,在中龄林土

壤下层仅为2.66 g/kg。

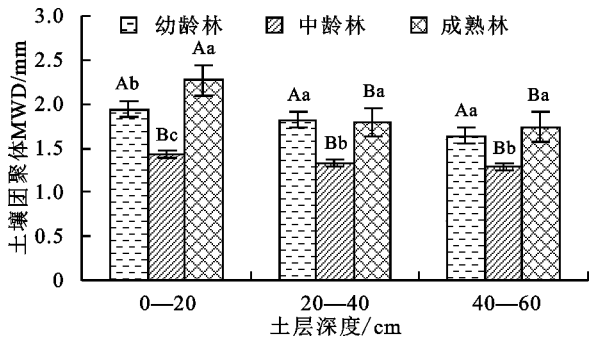
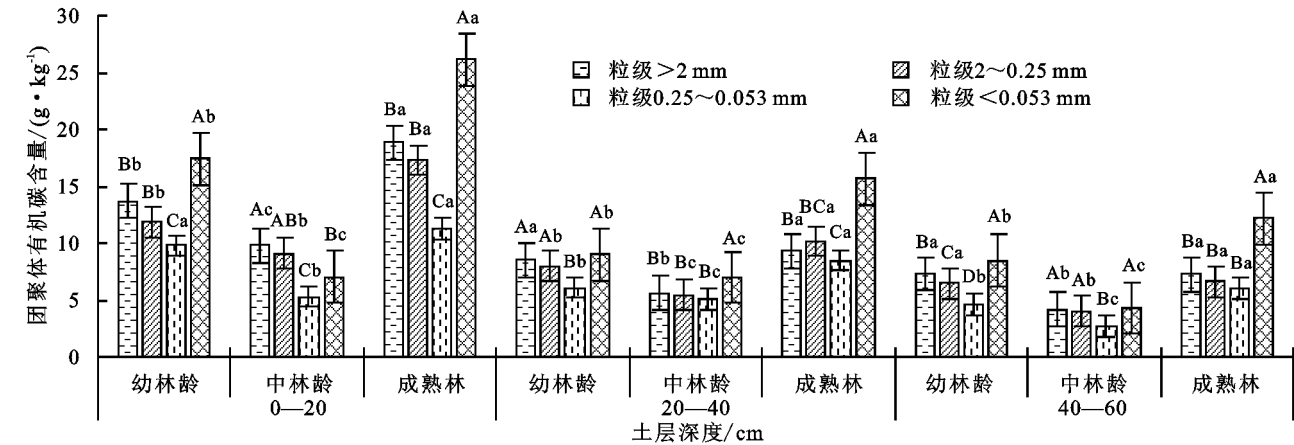


图1 不同林龄杉木人工林土壤团聚体 MWD



注:小写字母不同表示相同土层、相同粒级、不同林龄团聚体间差异显著($p<0.05$);大写字母不同者表示相同土层、相同林龄、不同粒级团聚体间差异显著($p<0.05$)。下同。

图2 不同林龄杉木人工林土壤团聚体有机碳含量

2.4 不同林龄杉木人工林土壤团聚体有机碳贡献率

团聚体有机碳贡献率是对不同粒径团聚体有机碳含量及团聚体比例进行综合计算^[15],以总结不同林龄杉木人工林各粒级团聚体对土壤有机碳的贡献状况。不同林龄杉木人工林土壤团聚体贡献率为1.15%~58.43%(图3)。不同林龄同粒级团聚体有机碳贡献率存在不同规律:在各土层中,粒径>2, <0.053 mm的团聚体有机碳贡献率随林龄增加呈先下降再上升的趋势;而0.25~0.053 mm粒级的规律与之相反,随林龄增加整体呈先上升再下降趋势。大团聚体(>0.25 mm)有机碳贡献率表现为成熟林大

于幼龄林和中龄林。

同林龄不同粒级团聚体有机碳贡献率变化存在不同规律,幼龄林土壤上层和土壤中层团聚体有机碳贡献率随粒径减小大体呈先下降再上升趋势。中龄林在各层土壤中,团聚体有机碳贡献率随粒级减小呈先上升后下降趋势。各林龄粒径>2,2~0.25 mm水稳性团聚体有机碳对土壤有机碳贡献率占较大份额,分别为18.48%~43.70%和32.44%~58.42%。除上层和中层幼龄林土壤外,粒径<0.053 mm团聚体有机碳对土壤有机碳贡献率最小,最小仅为1.15%。

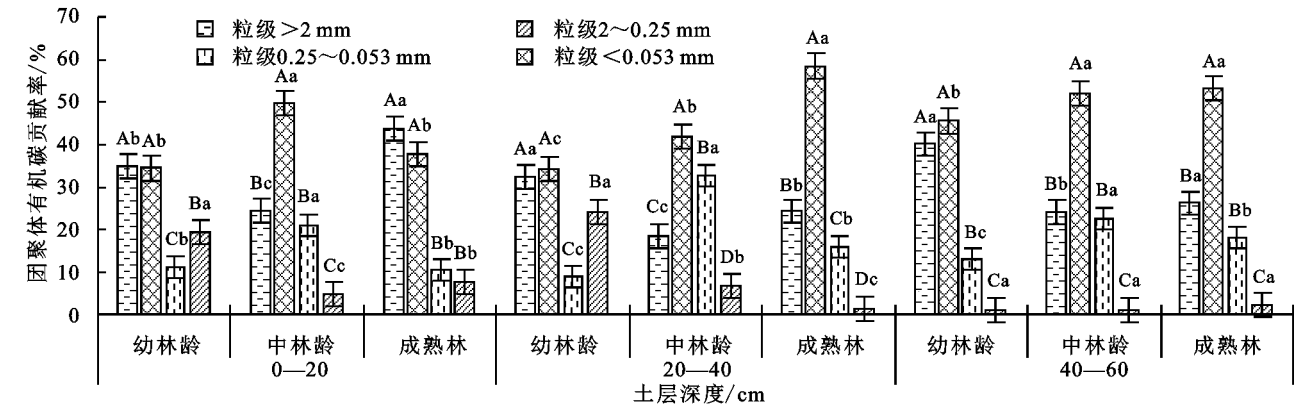


图3 不同林龄杉木人工林土壤团聚体有机碳贡献率

2.5 土壤团聚体稳定性与有机碳含量的关系

土壤有机碳是土壤团聚体形成和稳定的重要因素,而有机碳固定的最主要途径之一就发生在土壤不同粒径颗粒胶结团聚的过程中^[6]。由图 4 可知,不同林龄杉木人工林土壤水稳性团聚体平均质量直径(MWD)与土壤有机碳(TOC)含量的关系为: $Y=11.37x-9.6882$, $R^2=0.6482$,说明 MWD 与土壤有机碳含量呈正相关关系。随着杉木的生长,成熟林中土壤有机碳含

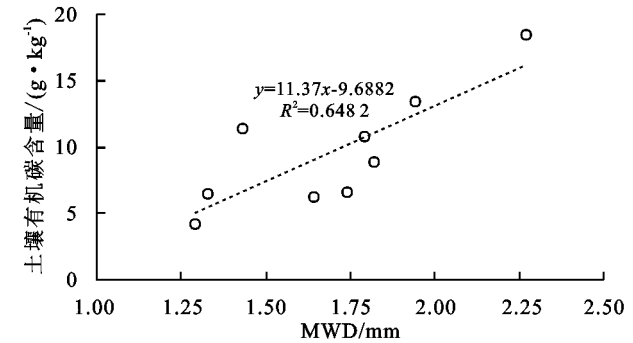


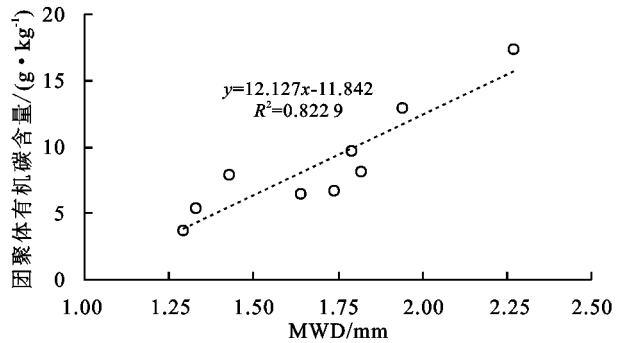
图 4 土壤团聚体平均重量直径(MWD)与土壤有机碳及团聚体有机碳的相关关系

3 讨论

土壤团聚体特征对土壤结构和土壤养分供应有一定影响。本研究结果表明,不同林龄人工林土壤团聚体均以粒径>0.25 mm 大团聚体为主,且成熟林水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量相较于幼龄林和中龄林有不同程度增加。大团聚体(>0.25 mm)含量越高,土壤结构越好、抗蚀能力越强,成熟林大团聚体含量更高说明成熟林土壤团聚性强,结构稳定。有研究^[16]表明,大团聚体含量随种植年限的增加逐渐递增,而在本研究中大团聚体含量在不同林龄间呈中龄林<幼龄林<成熟林的变化趋势,中龄林土壤大团聚体处于较低水平,可能原因:一是不同发育阶段林分密度、郁闭度不同和凋落物量不同,植物根系及微生物活性不同,中龄林土壤 C/N 较大,可能导致微生物活性降低;二是炼山整地的造林方式造成上一代凋落物和采伐剩余物归还土壤较少,加之杉木作为速生树种,有机碳在幼龄林到中龄林的生长阶段消耗巨大,土壤有机碳的差异,有机碳与团聚体之间相辅相成、相互影响,导致团聚体含量差异。

平均重量直径(MWD)可以表征团聚体稳定性,本研究结果表明,随着林龄增加,成熟林土壤团聚体 MWD 高于幼龄林和中龄林,且团聚体 MWD 随土壤深度增加而降低,这与前人^[17]研究结果相似。前人^[18]研究表明,有机胶结物质是决定土壤团聚体稳定性的关键,有机质作为团聚体形成的重要胶结物质,能增加团聚体之间的联结力,人工林凋落物和根系大多分布于土壤表层,且受微生物量、土壤动物影响更大,土壤表层大量凋落物的分解转化对有机碳的

量增加,能够促进土壤团聚体平均重量直径增加,土壤稳定性提高。不同人工林土壤团聚体 MWD 与土壤团聚体有机碳含量的关系为: $Y=12.127x-11.842$, $R^2=0.8229$,说明 MWD 与土壤团聚体有机碳含量呈正相关关系。不同林龄杉木人工林土壤团聚体 MWD 与团聚体有机碳含量变化趋势一致,即成熟林>幼龄林>中龄林。



补充,能够促进土壤团聚体的形成并增强其稳定性。

土壤有机碳与团聚体形成与稳定过程密切相关。本研究结果表明,不同林龄杉木人工林有机碳含量随土层深度增加逐渐递减;同粒径不同林龄的团聚体有机碳含量表现出幼龄林向中龄林发育过程中降低减少、中龄林向成熟林发育过程中又逐渐增加的趋势,该结果与前人^[19-20]研究基本一致。有机碳呈明显的垂直分布特征的主要原因:首先,土壤表层是凋落物集中分布的区域,凋落物分解过程能够极大丰度土壤表层有机碳含量;其次,杉木的根系较深、侧根发达,根幅较宽,因此对运移至下层有机碳有一定的拦截作用^[21]。幼龄林到中龄林阶段,土壤有机碳含量下降,主要原因可以从其“来源”和“去向”2 个维度进行分析:首先,土壤有机碳处于凋落物分解补充碳库和植物吸收等形式损失碳库的动态平衡,从幼龄林到中龄林阶段,补充其来源的凋落物并未显著增加(表 2),而这个阶段杉木仍需要从土壤中获取大量的营养元素来维持自身的生长,对养分需求量大,从而导致有机碳的消耗大于积累,有机碳出现盈亏;其次,已有研究^[21-22]表明,有机碳与土壤氮素之间存在紧密关系,氮素的相对缺乏会导致土壤碳矿化的加强,在本研究中,中龄林较低的氮素含量可能导致碳矿化速率维持在较高水平,从而加剧原本固持在土壤中有机碳以矿化形式损失。中龄林到成熟林阶段,土壤有机碳含量增加,主要原因可能为:首先,林间地表凋落物显著增加(表 2),林下生态系统逐渐完善,加速凋落物的分解速率,输入土壤有机碳的含量也随之增加;其次,随着林龄增长至成熟期,杉木成熟林郁闭度提高,林冠对降雨输入的截留能力显著加强,成熟林能够截留更

多的降雨,从而降低随降雨流失的碳含量^[21,23-24]。有机碳贡献率能全面客观反映不同林龄对土壤团聚体有机碳的影响^[15],研究表明,不同林龄人工林土壤大团聚体有机碳对土壤总有机碳贡献率最大,占 60.30% 以上;粒径<0.053 mm 团聚体贡献率最小,最小为 1.15%。可能是因为新增的碳先出现在大团聚体中,从而提高大团聚体中有机碳贡献率,说明大团聚体有较强的供碳能力。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)与土壤有机碳及团聚体有机碳均呈显著正相关。在土壤有机碳形成过程中,微团聚体通过有机物质胶结形成大团聚体,随着大团聚体的形成,平均重量直径增大,土壤结构逐渐趋于稳定^[25]。成熟林土壤中水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量、团聚体平均重量直径(MWD)、团聚体有机碳含量及其有机碳贡献率,均大于幼龄林和中龄林。说明延长杉木种植年限,采用合理的管理方式,可增加土壤有机碳含量,提高团聚体稳定性,从而提高人工林水源涵养功能。

4 结论

(1)不同林龄杉木人工林对土壤团聚体及其有机碳具有重要影响,成熟林土壤大团聚体含量、团聚体平均重量直径(MWD)、团聚体有机碳含量及贡献率均分别大于幼龄林、中龄林。林龄增长有利于土壤大团聚体形成,增加土壤结构的稳定性。

(2)不同林龄杉木人工林土壤均以大团聚体(粒径>0.25 mm)为主,且团聚体 MWD 具有明显的垂直变化特征,随土层加深而下降,即土壤团聚体稳定性随土层加深逐渐降低。

(3)不同林龄土壤团聚体有机碳含量随土层加深而下降。土壤团聚体有机碳贡献率以大团聚体为主,其中 0.25~0.053 mm 粒级团聚体贡献率最高。土壤团聚体平均重量直径与有机碳呈显著正相关,土壤有机碳增加对提高团聚体稳定性具有积极作用。

参考文献:

[1] 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.

[2] 陈山,杨峰,林杉,等.土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):211-216.

[3] 陈明霞,朱鹤健.漳州平原变性土粒径分布分形维数特征[J].科技导报,2010,28(23):86-90.

[4] 吴其聪,张丛志,张佳宝,等.不同施肥及秸秆还田对潮土有机质及其组分的影响[J].土壤,2015,47(6):1034-1039.

[5] 李金彪,刘广明,陈金林,等.不同物料掺拌对滨海重度盐土的改良效果研究[J].土壤通报,2017,48(6):14-18.

[6] 窦森,李凯,关松.土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.

[7] 国家林业局.中国森林资源报告:第八次全国森林资源

清查[M].北京:中国林业出版社,2014:1-40.

[8] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010,30(4):1035-1041.

[9] Wu Q C, Zhang C Z, Yu Z H, et al. Effects of elevated CO₂ and nitrogen addition on organic carbon and aggregates in soil planted with different rice cultivars [J]. Plant and Soil,2018,432(1/2):245-258.

[10] Six J, Paustian K, Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool [J]. Soil Biology Biochemistry,2014,68(1):4-9.

[11] 温小荣,孟雪,刘俊,等.基于不同立地质量的杉林生物量遥感估测[J].林业科学研究,2016,29(14):494-499.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,1999:14-114.

[13] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter [J]. Agriculture Ecosystems & Environment,1991,34(1/4):407-419.

[14] Bavel C H M V. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal,1950,14(C):20-23.

[15] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, et al. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation [J]. Soil Biology & Biochemistry,2011,43(3):657-666.

[16] 刘艳,查同刚,王伊琨,等.北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报,2013,24(3):607-613.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 王纪杰,鲍爽,梁关峰,等.不同林龄桉树人工林土壤有机碳的变化[J].四川林业科技,2015,36(4):92-95.

[20] 周纯亮,吴明.中亚热带四种森林土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].土壤,2011,43(3):406-410.

[21] 刘宝,吴文峰,何盛强,等.不同林龄闽楠林土壤呼吸与碳储量研究[J].森林与环境学报,2018,38(4):49-56.

[22] 王肖楠,耿玉清,余新晓.栓皮栎林与油松林土壤有机碳及其组分的研究[J].土壤通报,2012,43(3):604-609.

[23] 曹小玉,李际平.不同龄组杉木人工林土壤有机碳贮量及分布特征[J].中南林业科技大学学报(自然科学版),2014,34(7):104-107.

[24] 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.

[25] 郑子成,何淑勤,王永东,等.不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J].水土保持学报,2010,24(3):170-174.