

四川盆地西南缘不同林分类型土壤团聚体 稳定性及有机碳组分特征

程欢, 宫渊波, 付雨欣, 刘益君, 程一伦, 董洪君, 胡旭, 樊戢, 车明轩

(四川农业大学林学院, 成都 611130)

摘要: 为探明林分类型差异对土壤水稳性团聚体分布格局及其稳定性、有机碳组分的影响, 测定分析了四川盆地西南缘巨桉人工林、杉木人工林、马尾松次生林土壤水稳性团聚体的分布格局、团聚体平均质量直径、团聚体破坏率、大团聚体比重及有机碳组分含量。结果表明: (1) 3 种林分土壤水稳性团聚体含量均以大团聚体 (>0.25 mm) 为主。不同林分对水稳性团聚体分布格局存在差异, 巨桉人工林集中在 0—20 cm 土层的 >5 , 0.5~0.25 mm 和 20—40 cm 的 ≤ 0.25 mm 粒径; 杉木人工林集中在 0—20 cm 土层的 >5 , 0.5~0.25 mm 和 20—40 cm 土层的 1~0.5, 0.5~0.25 mm 粒径; 马尾松次生林集中在 0—20 cm 的 ≤ 0.25 mm 和 20—40 cm 土层的 >5 mm 粒径。20—40 cm 土层不同林分土壤团聚体稳定性差异显著, 马尾松林的 MWD、 $R_{0.25}$ 、PAD 最高, 根据 Bissonnais 及国际土壤团聚体稳定性分级标准, 3 种林分土壤水稳性团聚体均处于不稳定水平 ($0.4 \leq \text{MWD} < 0.8$)。 (2) HUC 含量马尾松显著高于巨桉, 0—20 cm 土层马尾松的土壤腐殖化程度最高, 20—40 cm 土层杉木最高。 (3) 不同林分团聚体稳定性与 SOC 组分的关系因林分类型的差异不同, 总体上表现为 MWD 与 SOC、FAC、HUC 存在显著相关关系, 土壤 SOC 含量能够促进土壤团聚过程及其稳定性, FAC、HUC 含量的作用较大。总之, 巨桉人工林、杉木人工林、马尾松次生林土壤团聚体稳定性、SOC 组分含量及两者之间的关系存在显著差异, 不同林分其影响机制不同。研究结果为准确评价该区域不同林分所发挥的生态系统功能提供重要依据。

关键词: 林分类型; 土壤团聚体; 有机碳组分

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0109-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.018

Soil Aggregate Stability and Characteristics of Organic Carbon Components in Three Forests of the Southwest Edge of Sichuan Basin

CHENG Huan, GONG Yuanbo, FU Yuxin, LIU Yijun, CHENG Yilun,

DONG Hongjun, HU Xu, FAN Ji, CHE Mingxuan

(College of Forestry Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: In order to research the effect of forest types on the distribution pattern of soil water stable aggregate, its stability, the organic carbon component and their relationships, the distribution pattern of soil water stable aggregate, the average aggregate diameter, percentage of aggregate disruption, macroaggregate proportion and the content of organic carbon component were determined in the *Eucalyptus grandis* plantation, *Cunninghamia lanceolata* plantation and *Pinus massoniana* secondary forest in Southwest Edge of Sichuan Basin, the results showed that: (1) The soil water stable aggregates in the three forests were mainly macroaggregates (>0.25 mm). The water stability of aggregate distribution pattern was different in the three forests, the water stable aggregates of >5 , 0.5~0.25 mm in 0—20 cm soil layer, and <0.25 mm of 20—40 cm soil layer were dominant for *Eucalyptus grandis* plantation, and *Cunninghamia lanceolata* plantation was focused by >5 , 0.5~0.25 mm in 0—20 cm soil layer, and 1~0.5, 0.5~0.25 mm in 20—40 cm soil layer, and ≤ 0.25 mm in 0—20 cm soil layer, and >5 mm in 20—40 cm soil layer for *Pinus massoniana* secondary forest. The difference of soil aggregate stability was significant for different forest types in 20—40

收稿日期: 2018-05-07

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05); 四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室建设项目; 四川农业大学科研兴趣培养计划项目(2018144, 2018143)

第一作者: 程欢(1990—), 女, 新疆昌吉人, 在读博士研究生, 主要从事水土保持和生态修复研究。E-mail: huanhuanhuan0701@163.com

通信作者: 宫渊波(1957—), 男, 辽宁昌图人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持和生态恢复研究。E-mail: gyb@sicau.edu.cn

cm soil layer, the MWD, $R_{0.25}$, PAD of *Pinus massoniana* secondary forest were highest. According to the Bissonnais and international soil aggregate stability classification standard, the soil aggregates could not reach the stable level ($0.4 \leq \text{MWD} < 0.8$) for the three forests. (2) The content of HUC in the *Pinus massoniana* secondary forest was significantly higher than *Eucalyptus grandis* plantation, and the soil humification degree of *Pinus massoniana* secondary forest was the highest in 0—20 cm soil layer, while *Cunninghamia Lanceolata* plantation was the highest in 20—40 cm. (3) The relationships between aggregate stability and organic carbon components in three forests was different, and a significant correlation was found among MWD, SOC, FAC, and HUC. Soil organic carbon could promote soil agglomeration process and its stability, and FAC, FAC and HUC played the significant roles. In short, the soil aggregate stability, organic carbon contents and their relationships in the *Eucalyptus grandis* plantation, *Cunninghamia Lanceolata* plantation and *Pinus massoniana* secondary forest were significant differences, the influencing mechanisms were different. These results could provide theoretical basis for the accurate evaluation of the ecosystem function of different forest types in this region.

Keywords: different forest types; soil aggregate; soil organic carbon component

土壤团聚体状况是土壤重要的物理性质,能够影响土壤有机碳转化、生物化学及水文过程,决定土壤生产力水平和抗侵蚀能力^[1-2]。土壤团聚体稳定性受多种复杂土壤性质的影响,其中包括土壤有机碳含量及其稳定性、土壤孔隙度、土壤水分入渗、土壤持水性能、土壤紧实度、地表径流等^[3]。Tisdall 等^[4]的团聚体分级理论表明,矿物颗粒和粉粒级团聚体能够被腐殖酸粘合成为微团聚体,稳定的微团聚体在植物根系、微生物菌丝及其分泌的细胞外多糖的缠绕、聚合作用下形成大团聚体。由此可见,地上植被和土壤微生物等生物因素也能够影响土壤团聚体稳定性,而且大团聚体因其稳定的结构能够储存更多的有机质和养分,不易受到雨水侵蚀,从而减少地表径流,实现保水保肥^[5]。因此,研究土壤团聚体稳定性对深入认识土壤团聚体形成过程、土壤养分储存机制及土壤退化进程具有重要意义。

土壤有机碳(SOC)是生态系统植被生产的物质基础,受土地利用、土壤母质、气候、地上植被类型及群落结构的影响,在一定范围内决定土壤肥力水平的高低^[6]。土壤 SOC 由于其数量大、来源广、反应滞后等原因,诸多学者采用土壤 SOC 组分来指示土壤碳库动态变化、土壤质量的短时变化状况及土壤腐殖品质,评价土壤潜在肥力水平^[7-8]。土壤腐殖质中最活跃的是胡敏酸碳(HAC),它较富里酸碳(FAC)的酸度小,呈微酸性,其阳离子交换量较高,对土壤结构的形成起着重要作用;FAC 作为腐殖质中分子量较小、活性较大、氧化程度较高的组分,它既是形成 HAC 的一级物质,又是 HAC 分解的一级产物,在 HAC 的积累和更新中起着重要的作用;胡敏素碳(HUC)是 SOC 和氮的重要组成部分,在碳截获、土壤结构、养分保持、氮素循环、生物地球化学循环等方

面都占有重要地位^[9-10]。因此,土壤 SOC 组分可作为表征土壤质量响应气候和地上植被变化的潜在指标,对准确评价土壤质量意义重大。

四川盆地西南缘属低山丘陵地貌,长期的人为干扰,致使该区林草植被破坏严重,水土流失加剧,生态环境恶化。1999 年四川省作为全国首个“退耕还林”工程试点区域之一,该区人工林面积迅速增加,生态系统逐步恢复,水土流失得到有效遏制。但人工林树种单一、结构不合理、经营技术落后,生态环境仍很脆弱。近年来,诸多学者对该区在退耕还林模式的立地条件、树种配置、景观格局、土壤理化性质等方面进行了广泛研究。但缺乏从 SOC 组分结合团聚体角度的研究。鉴于此,本研究以四川盆地西南缘集约经营 5~10 年的巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林、杉木(*Cunninghamia Lanceolata*)人工林、马尾松(*Pinus massoniana*)次生林为研究对象,通过测定不同粒径土壤团聚体分布格局和 SOC 组分特征,拟解决如下问题:(1)土壤团聚体的分布及其稳定性是否因林分类型和土层深度而异?(2)土壤 SOC 组分如何响应林分类型变化?(3)本研究区紫色土不同林分类型下土壤 SOC 组分与团聚体稳定性的关系如何?可为深入研究土壤 SOC 对团聚体稳定性机制的影响和准确评价该区域不同林分所发挥的土壤碳源/汇功能提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省乐山市夹江县木城镇(103°29'34.8" E, 29°48'7.2" N),地处四川省盆地西南部,川西平原边缘,青衣江下游,是彭山、眉山、夹江缓岗平坝向峨眉山中山区过度地带,属亚热带湿润气候区,夏季长于冬季,分别为 99, 96 d,年平均气温 17

℃,年际变化不大,年降水量 1 300 mm,年日照时间 1 100 h,海拔 800 m,土壤类型以紫色土为主,母质为灌口组、蓬莱镇组和遂宁组的泥岩风化物。5~10 年生巨桉林人工纯林、杉木人工林、马尾松次生林,其余还包括湿地松(*Pinus elliotti*)、柏木(*Cupressus funebris*)、苦竹(*Pleioblastus amarus*)、茶(*Camellia sinensis*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、胡桃(*Juglans regia*)、香椿(*Toona sinensis*)等,3 种林分类型林下灌木主要为香叶树(*Lindera communis*)、山莓(*Rubus corchorifolius*)、油茶(*Camellia oleifera*)、木果海桐(*Pittosporum xylocarpum*)、铁仔(*Myrsine africana*)、裂叶榕(*Ficus lacerati folia*)、紫金牛(*Ardisia japonica*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)十大功劳(*Mahonia fortunei*)等灌木植被,优势种不明显,以及铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、长尾复叶耳蕨(*Arachniodes simplicior*)、齿头鳞毛蕨(*Dryopteris labordei*)、十字苔草(*Carex cruvlata*)等草本。

1.2 样品采集

2012 年 6 月开展本研究野外采样工作,在研究区 3 种林分类型各设置 5 个 20 m×20 m 标准样地,在设立的样地内选择能反映林分基本特征,具有代表性的地段,避开树干基部,用环刀多点(5 点)采样,带回室内测定土壤水分物理性质。用塑料盒多点(5 点)采集表层(0—20 cm)、亚表层(20—40 cm)的原状土约 0.5 kg,保持原有结构,带回室内,按其自然结构剥成小土块,除去树根和石块,自然风干,测定土壤团聚体。同时,在该采样点取表层(0—20 cm)、亚表层(20—40 cm)约 0.5 kg 土样,带回实验室测定 SOC 组分含量。土壤 SOC 采用重铬酸钾外加热氧化法测定^[11],土壤颗粒有机碳(POC)含量根据 Cambardella 等^[12]的方法,使用 5 g/L(NaPO₃)₆ 溶液振荡提取,土壤悬液过 53 μm 筛后反复冲洗后收集筛上剩余土样(>53 μm),测定土壤有机碳含量即为土壤 POC 含量。易氧化有机碳(EOC)使用高锰酸钾氧化,根据高锰酸钾溶液氧化后浓度的差值求出 EOC 含量^[13]。根据 Li 等^[7]的方法,使用蒸馏水以及 0.1 mol/L 的 NaOH 和 0.1 mol/L Na₄P₂O₇ 提取水溶性有机碳(DOC);HAC 通过酸化分离提取 FAC 的碱性上清液到 pH 为 1.0 得到,不溶于碱液的残留物质为 HUC;DOC、HAC 和 FAC 再使用重铬酸钾外加热氧化法测定,HUC 为 SOC 与 DOC、HAC、FAC 的差值。

团聚体粒径分布采用湿筛法,并根据结果计算水稳性大团聚体比重($R_{0.25}$)、平均质量直径、团聚体破坏率,计算公式^[14]为:

$$\text{水稳性大团聚体比重}(R_{0.25}) = \frac{W_{>0.25}}{W_t} \times 100\% = (1 - \frac{W_{\leq 0.25}}{W_t}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M_{r>0.25}$ 为 >0.25 mm 粒级的团聚体重量(g); M_t 为所有粒径团聚体总重量(g)

团聚体平均质量直径(MWD):

$$\text{MWD} = \sum \frac{X_i \times W_i}{W_t} \quad (2)$$

$$X_i = r_{i-1} + r_i \quad (3)$$

式中: X_i 为任一粒径范围内团聚体的平均直径(mm); r_i 为第 i 孔径筛的孔径大小,≤0.25 mm 粒径的部分直接用 0.25 mm 来替代平均直径; W_t 为供试土壤总质量(g); W_i 为对应于 X_i 的团聚体质量(g);MWD 为湿筛处理下的土壤团聚体平均质量直径(mm)。

团聚体破坏率(PAD,%)计算公式为:

$$\text{PAD} = \frac{W_d - W_w}{W_d} \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_d 为 ≥0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(g); W_w 为 ≥0.25 mm 水稳性团聚体含量(g)。

根据土壤 MWD 值对土壤团聚体稳定性分级^[15]:(I)极不稳定 $\text{MWD} < 0.4$;(II)不稳定 $0.4 \leq \text{MWD} < 0.8$;(III)稳定 $0.8 \leq \text{MWD} < 1.3$;(IV)较稳定 $1.3 \leq \text{MWD} < 2.0$;(V)极稳定 $\text{MWD} \geq 2.0$ 。

1.3 数据处理

利用 Excel 2003 和 SPSS 10.0 软件进行数据处理,采用单因素方差分析(ANOVA)及多重比较进行差异性分析,相关性分析采用 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤团聚体分布及稳定性特征

由图 1 可知,0—20 cm 土层的 >5 mm 粒径水稳性团聚体含量表现为巨桉(36.02%)>杉木(35.85%)>马尾松(30.76%),巨桉和杉木林显著高于马尾松($P < 0.05$);而 5~2,2~1,1~0.5 mm 粒径水稳性团聚体的不同林分间无显著差异($P > 0.05$);0.5~0.25 mm 粒径表现为巨桉(8.85%)>杉木(8.70%)>马尾松(6.2%),杉木和巨桉显著高于马尾松($P < 0.05$)。20—40 cm 土层,>5 mm 粒径的水稳性团聚体含量与 0—20 cm 土层分布格局不一致,表现为马尾松(36.14%)>巨桉(33.18%)>杉木(28.36%),马尾松显著高于杉木($P < 0.05$);而 5~1 mm 粒径 3 种林分之间差异不显著($P > 0.05$);1~0.5,0.5~0.25 mm 粒径表现为杉木(14.02%和 14.36%)>马尾松(10.45%和 16.28%)>巨桉(10.23%和 8.32%),杉木显著高于马尾松和巨桉。≤0.25 mm 表现为马尾松(29.59%)>巨桉(23.56%)>杉木(22.26%),马尾松显著高于杉木和巨桉($P < 0.05$),而 20—40 cm 表现为巨桉(24.41%)>马

尾松(17.14%)>杉木(19.88%),巨桉显著高于杉木和马尾松($P<0.05$)。

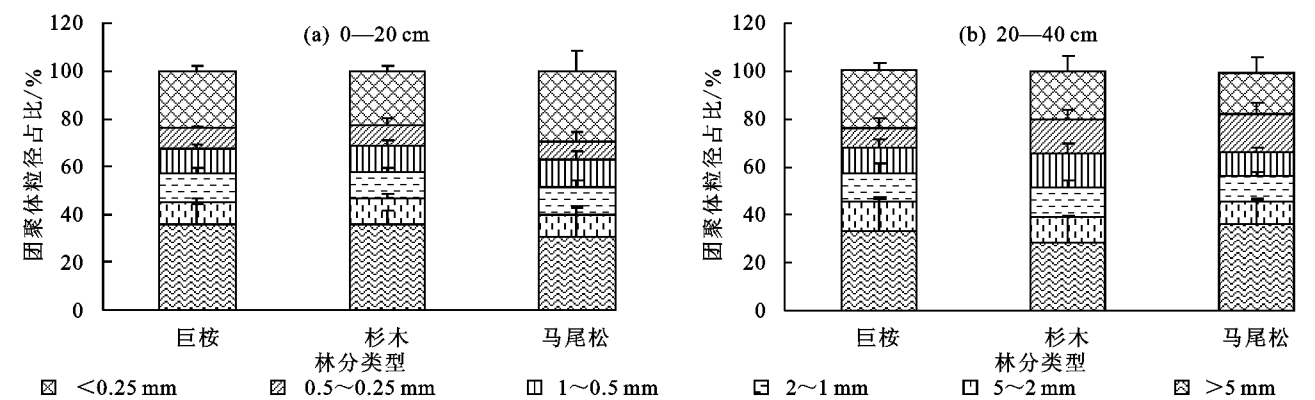


图 1 不同林分土壤团聚体的质量百分含量及其稳定性

由表 1 可知,0—20 cm 土层 MWD 分布格局表现为不同林分类型间无显著差异($P>0.05$),而 20—40 cm 则表现为马尾松(0.77)>杉木(0.65)>巨桉(0.59),马尾松显著高于巨桉($P<0.05$),根据 Bissonais 等^[14]及国际土壤团聚体稳定性分级标准^[14-15],3 种林分的 0—20,20—40 cm 土层的土壤水稳性团聚体稳定性均处于不稳定水平($0.4\leq MWD<0.8$)。 $R_{0.25}$ 不同林分 0—20 cm 表现为杉木显著高于马尾松,20—40 cm 表现为马尾松显著高于杉木,PAD 与 $R_{0.25}$ 不同林分规律相反,不同林分在不同土层均表现出显著差异。

2.2 不同林分类型土壤碳组分特征

由表 2 可知,3 种林分 0—20 cm 土层 SOC 含量范围为 21.97~31.11 g/kg,3 种林分的土壤 SOC 含量表现为巨桉(31.11 g/kg)>马尾松(28.45 g/kg)>杉木(21.96 g/kg),巨桉显著高于杉木($P<0.05$);20—40 cm 土层 SOC 含量范围为 17.77~23.39 g/kg,表现为马尾松(23.39 g/kg)>杉木(20.64 g/kg)>巨桉(17.71

g/kg),马尾松显著高于巨桉($P<0.05$)。不同的林分类型 0—20 cm 土层 EOC 含量范围为 4.14~10.19 g/kg,20—40 cm 土层,EOC 含量范围在 4.53~5.21 g/kg,其格局分布格局与土壤 SOC 含量分布格局一致;而 0—20 cm 土层表现为巨桉显著高于杉木($P<0.05$)。由此可知,林分类型对 EOC 的影响主要表现在 0—20 cm 土层。

表 1 不同林分类型土壤水稳性团聚体稳定性指标

土层深度/cm	林分类型	MWD/mm	$R_{0.25}/\%$	PAD/%
0—20	巨桉	0.72±0.05a	76.44±10.03ab	12.65±1.14b
	杉木	0.67±0.13a	77.74±3.55a	9.00±0.59c
	马尾松	0.69±0.09a	70.41±2.11b	17.94±2.21a
20—40	巨桉	0.59±0.2B	75.59±6.01B	16.32±4.33A
	杉木	0.66±0.27AB	80.12±8.98AB	9.82±1.41B
	马尾松	0.78±0.04A	82.86±5.24A	2.52±0.44C

注:小写字母表示 0—20 cm 土层各指标在不同林分类型间的差异;大写字母表示 20—40 cm 土层各指标在不同林分类型间的差异。下同。

表 2 不同林分类型土壤碳组分特征

土层深度/cm	林分类型	SOC/(g·kg ⁻¹)	DOC/(g·kg ⁻¹)	EOC/(g·kg ⁻¹)	HAC/(g·kg ⁻¹)	FAC/(g·kg ⁻¹)	HUC/(g·kg ⁻¹)	HAC/FAC
0—20	巨桉	31.11±3.73a	0.57±0.07a	10.19±2.17a	4.23±0.31a	7.99±0.09a	18.32±2.91a	0.53±0.04a
	杉木	21.97±0.38b	0.55±0.12a	4.14±0.83b	4.10±0.74a	6.84±0.33a	10.48±1.04c	0.60±0.17a
	马尾松	28.45±2.10ab	0.41±0.03a	5.49±1.02b	4.63±0.35a	7.30±0.51a	16.11±6.48b	0.63±0.12a
20—40	巨桉	17.77±5.74B	0.38±0.05A	4.53±0.64A	4.37±0.99A	5.91±0.27A	7.11±1.83B	0.74±0.09AB
	杉木	20.64±1.62AB	0.23±0.02A	4.63±0.95A	4.60±0.17A	5.40±0.73A	10.41±1.96AB	0.85±0.2A
	马尾松	23.39±3.98A	0.31±0.01A	5.21±0.72A	4.12±1.15A	6.76±0.97A	12.20±3.77A	0.61±0.03B

不同林分类型 DOC、HAC、FAC 含量不同土层均无显著差异。3 种林分类型 HUC 含量与 FAC 规律一致,0—20 cm 土层 HUC 含量表现为巨桉和马尾松显著高于杉木($P<0.05$);20—40 cm 土层表现为马尾松(12.20 g/kg)>杉木(10.41 g/kg)>巨桉(7.11 g/kg),其中马尾松显著高于巨桉($P<0.05$)。土壤腐殖质组成中 HAC 与 FAC 比值(HAC/FAC)可以表征土壤腐殖质组成的性质,对土地利用变化的响应较 HAC 含量和

FAC 含量更敏感,是评价土壤腐殖质优劣的重要指标^[16]。0—20 cm 土层 HAC/FAC 3 种林分与 HAC 规律基本一致,表现为马尾松(0.63)>杉木(0.6)>巨桉(0.53),但不同林分间差异不显著;20—40 cm 土层表现为杉木(0.74)>巨桉(0.85)>马尾松(0.61),其中杉木显著高于马尾松($P<0.05$)。综上,0—20 cm 土层马尾松林土壤腐殖质品质最好,而 20—40 cm 土层杉木林土壤腐殖质品质最好。

2.3 土壤 SOC 组分与团聚体稳定性相关性分析

由表 3 可知,从表征土壤团聚体稳定性的 MWD、 $R_{0.25}$ 、PAD 与 SOC 组分的关系来看,巨桉林表现为 MWD 与 FAC、POC 呈显著正相关关系,与 HAC/FAC 呈极显著负相关关系,PAD 与 EOC、MWD 呈显著负相关关系;杉木林表现为 MWD 与 SOC、HUC

呈显著正相关关系,PAD 与 SOC、HUC、MWD 呈显著负相关关系;马尾松林表现为 $R_{0.25}$ 与 MWD 呈显著正相关关系。由此可知,不同林分对土壤团聚体稳定性与 SOC 组分关系的影响不同,但综合 MWD、 $R_{0.25}$ 、PAD 来看,SOC、FAC、HUC、POC 能够较好的表征土壤团聚体稳定性。

表 3 0—40 cm 土层不同林分类型土壤 SOC 组分与团聚体稳定性相关性分析

林分类型	指标	DOC	EOC	HAC	FAC	HUC	HAC/FAC	POC	MWD	$R_{0.25}$	PAD
巨桉	SOC	0.993	0.996	-0.430	0.998*	0.998*	-0.993	0.968	0.982	0.942	-0.988
	DOC		0.977	-0.319	0.983	0.982	-0.971	0.931	0.952	0.976	-0.962
	EOC			-0.512	1.000*	1.000*	-1.000*	0.987	0.995	0.907	-0.998*
	HAC				-0.489	-0.493	0.536	-0.643	-0.594	-0.103	0.567
	FAC					1.000**	-0.999*	0.982	0.996*	0.918	-0.996
	HUC						-0.999*	0.983	0.993	0.916	-0.996
	HAC/FAC							-0.991	-0.998*	-0.895	0.999*
	POC								0.998*	0.828	-0.995
	MWD									0.861	-0.999*
	$R_{0.25}$										-0.878
杉木	SOC	0.793	-0.927	0.309	0.973	0.998*	-0.904	0.886	0.996*	0.698	-0.995*
	DOC		-0.964	-0.334	0.912	0.860	-0.977	0.985	0.729	0.118	-0.678
	EOC			0.071	0.028	-0.965	0.998*	-0.995	-0.885	-0.379	0.850
	HAC				0.082	0.193	0.127	-0.167	0.401	0.896	-0.466
	FAC					0.994	-0.978	0.969	0.946	0.515	-0.920
	HUC						-0.949	0.935	0.996*	0.609	-0.998*
	HAC/FAC							-0.999*	-0.858	-0.326	0.819
	POC								0.836	0.287	-0.795
	MWD									0.766	-0.997*
	$R_{0.25}$										-0.810
马尾松	SOC	0.977	0.703	0.976	0.915	0.988	0.745	0.994	0.205	-0.165	0.845
	DOC		0.839	1.000**	0.980	0.998*	0.585	0.948	0.410	0.050	0.711
	EOC			0.841	0.930	0.806	0.050	0.624	0.840	0.585	0.214
	HAC				0.981	0.998*	0.583	0.948	0.412	0.052	0.709
	FAC					0.967	0.413	0.867	0.582	0.247	0.558
	HUC						0.632	0.965	0.355	-0.009	0.751
	HAC/FAC							0.812	-0.500	-0.781	0.452
	POC								0.099	-0.269	0.897
	MWD									0.997*	-0.351
	$R_{0.25}$										-0.667

注: * 表示在 0.05 水平相关性显著; ** 表示在 0.01 水平相关性显著;DOC 为水溶性有机碳;EOC 为易氧化有机碳(g/kg);HAC 为胡敏酸碳(g/kg);FAC 富里酸碳(g/kg);HUC 胡敏素碳(g/kg);HAC/FAC 为胡敏酸碳与富里酸碳比值;POC 为颗粒有机碳(g/kg);MWD 为水稳性团聚体平均质量直径(mm); $R_{0.25}$ 为直径大于 0.25 mm 团聚体含量(%);PAD 为团聚体破坏率(%)。

3 讨论

3.1 不同林分土壤团聚体分布及稳定性格局

不同林分土壤水稳性团聚体的分布表明,杉木 0—20 cm 土层的 >5, 0.5~0.25 mm, 以及 20—40 cm 土层的 1~0.5, 0.5~0.25 mm 粒径范围水稳性团聚体含量显著较高,巨桉 0—20 cm 土层的 0.5~0.25 mm 显著较高,而马尾松则在 20—40 cm 土层的 >5, 0.5~0.25 mm 粒径范围,由此可见,不同林分水稳性团聚体分布格局不同。主要原因:(1)川西

地区多雨湿润的气候条件下,造成土壤侵蚀以及水土流失严重,表层土壤受降雨及地上植被因素影响较大;(2)充足的水热环境为凋落物分解提供有利条件,在强降雨时,杉木人工林和马尾松次生林地上灌草植被种类多样,结构稳定,其茎叶能够起到蔽护作用^[17],减少雨滴直接击溅对土壤造成的结构破坏;(3)土壤微团聚体能够在植物根系和微生物菌丝的缠绕下形成大团聚体。王晗光等^[18]研究表明,巨桉根系分泌到土壤中的芳香族和烷烃化感物质能够抑制

植物种子的萌发、幼苗生长、微生物活动强度等,最终造成对大粒径团聚体形成起促进作用的草本根系及微生物生物量减少。于海艳等^[19]对北京八达岭地区人工林土壤团聚体稳定性及 SOC 特征的研究表明,林分类型对土壤团聚体的影响主要集中在 $>5, 1\sim 0.5\text{ mm}$ 这 2 个粒径范围,这与本研究的结果相同,但不同的是,本研究的 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层 $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 不同林分类型也表现出显著差异,一方面与本研究中的林分类型的不同有关;另一方面,Almajmaie 等^[3]研究表明,土壤类型由于其母质的差异对土壤团聚体产生影响,本研究的土壤类型为紫色土,而于海艳等^[19]的土壤类型为褐土和棕壤,这也可能是造成差异的原因,具体原因还有待于进一步的研究。

不同林分类型对土壤团聚体水稳定性的影响主要集中在 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层,3 种林分类型表现为马尾松林土壤团聚体的水稳定性最高,但均处于不稳定水平($0.4\leq\text{MWD}<0.8$),PAD 与 $R_{0.25}$ 所反映的土壤团聚体稳定性与 MWD 的格局基本一致。苑亚茹等^[20]研究表明, $>0.25\text{ mm}$ 粒径的水稳性团聚体含量越多,团聚体就越稳定,土壤 SOC 含量和碳储量越高,这与本研究的研究结果一致。同时,3 种林分类型结构差异较大,由于杉木人工林和马尾松次生林较复杂的冠层结构,使其产生更多的分解速率较慢、较稳定的凋落物残体,使得凋落物和 SOC 在短期内积累^[21],从而增加团聚体稳定性来保护土壤结构免受降雨侵蚀。除此之外,物种丰富度的增加也能够提高团聚体稳定^[22]。

3.2 不同林分类型土壤 SOC 组分及其影响机制

杉木人工林和马尾松次生林是自然恢复建群林分,群落结构相对巨桉较复杂,草本植物的根系尤其细根部分主要分布在表层土壤,根系的腐解转化快,与刘玲等^[23]的研究结果一致,人工林土壤 SOC 含量相对次生林较低。可见,保护和恢复天然林生态系统,优化人工林林分结构,减少人为干扰和破坏,对森林土壤 SOC 库及养分保持具有重要的意义。本研究结果表明,不同林分类型对 DOC、HAC 和 FAC 影响不显著,可知,最活跃的 HAC 易受环境条件的影响,对不同林分类型的响应较迟缓,而 FAC 作为 HAC 的形成和分解的一级物质,受 HAC 的影响较大,对不同林分类型的响应不敏感。而对 EOC 的影响主要集中在 $0\sim 20\text{ cm}$,表现为巨桉显著高于马尾松和杉木,与 SOC 含量规律一致,由此可知,虽然巨桉林表层土壤 SOC 含量较高,但易转化,SOC 的转化速率较其他林分快,不利于碳储存及土壤大团聚体的稳定

性,该结果同时能够解释本研究前文的表层土壤 MWD 表现为杉木 $>$ 马尾松 $>$ 巨桉,较易转化的 EOC 不利于土壤水稳性团聚体的稳定性。HUC 表现为 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层高于 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层,同时,林分类型对 HUC 的影响存在显著差异,上述研究结果与肖斌^[24]的研究结果一致,HAC/FAC 不同林分之间显著差异,与 HAC 和 FAC 含量相比,HAC/FAC 对不同林分的土壤 SOC 组分的响应更敏感,同时,HAC/FAC 值是土壤腐殖质成分变异的指标之一^[16],本研究 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层马尾松的土壤腐殖化程度最高,而 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层则为杉木最高。

3.3 不同林分类型土壤团聚体与 SOC 组分的关系

国内外诸多学者对土壤团聚体稳定性及 SOC 关系进行了深入研究,Regelink 等^[25]研究表明,粒径较小的水稳性团聚体受 SOC 和 pH 的影响较大。Wen 等^[26]研究表明,土壤质量发挥的积极作用表现为增加大团聚体含量的机制来提高 SOC 的稳定性。上述研究说明,土壤 SOC 在团聚体的形成过程发挥重要作用。土壤团聚体与 SOC 组分的关系方面,Li 等^[7]研究发现,土壤 SOC、DOC、EOC、HAC、FAC、HUC 及大团聚体含量与 MWD 呈显著正相关关系,不同海拔梯度上存在上述关系。本研究巨桉林表现为 MWD 与 FAC、POC 呈显著正相关关系,与 HAC/FAC 呈极显著负相关关系;杉木林表现为 MWD 与 SOC、HUC 呈显著正相关关系;马尾松林表现为 $R_{0.25}$ 与 MWD 呈显著正相关关系,本研究与 Li 等^[7]的研究结果不完全一致的原因:一方面可能是海拔梯度与林分类型条件下对土壤 SOC 对土壤团聚体稳定性机制不同;另一方面 SOC 组分对不同环境条件响应其敏感性不同,以及研究尺度可能对此也有所影响。

4 结论

(1)不同林分类型土壤水稳性团聚体含量均以大团聚体($>0.25\text{ mm}$)为主。巨桉对水稳性团聚体的分布起促进作用的集中在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层的 $>5, 0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 和 $20\sim 40\text{ cm}$ 的 $\leq 0.25\text{ mm}$ 粒径范围;杉木集中在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层的 $>5, 0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 和 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层的 $1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 粒径范围;马尾松则集中在 $0\sim 20\text{ cm}$ 的 $\leq 0.25\text{ mm}$ 和 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层的 $>5\text{ mm}$ 粒径范围。

(2)林分类型的差异对土壤团聚体稳定性影响在 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层更敏感。不同林分类型表现为马尾松林土壤团聚体的水稳定性最高。3 种林分土壤水稳性团聚体稳定性均处于不稳定水平($0.4\leq\text{MWD}<0.8$)。

(3)不同林分类型对 SOC 组分的影响主要表现

在 HUC 含量,马尾松显著高于巨桉。HAC/FAC 结果表明 0—20 cm 土层马尾松的土壤腐殖化程度最高,而 20—40 cm 土层则为杉木最高。

(4)本研究紫色土区不同林分类型团聚体稳定性与 SOC 组分的关系因林分类型的差异不同,MWD 与 SOC、FAC、HUC 存在显著相关关系,MWD 与 $R_{0.25}$ 存在显著正相关关系,与 PAD 呈显著负相关关系,说明较高的土壤 SOC 含量能够促进土壤团聚过程及团聚体的稳定性,尤其以 FAC、HUC 含量对土壤团聚体的影响较大。

参考文献:

- [1] Deleegn Y T, Purahong W, Blazevec A, et al. Changes in land use alter soil quality and aggregate stability in the highlands of northern Ethiopia [J]. Scientific Reports, 2017, 7:e13602.
- [2] Schweizer S A, Fischer H, Häring V, et al. Soil structure breakdown following land use change from forest to maize in Northwest Vietnam [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 10-17.
- [3] Almajmaie A, Hardie M, Doyle R, et al. Influence of soil properties on the aggregate stability of cultivated sandy clay loams [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 800-809.
- [4] Tisdall J, Oades J. Organic matter and water-stable aggregates in soil [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33: 141-163.
- [5] Zhao D, Xu M X, Liu G B, et al. Quantification of soil aggregate microstructure on abandoned cropland during vegetative succession using synchrotron radiation-based micro-computed tomography [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 239-246.
- [6] 陈小梅,闫俊华,林媚珍,等. 南亚热带森林植被恢复演替中土壤有机碳组分及其稳定性[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 86-93.
- [7] Li C L, Cao Z Y, Chang J J, et al. Elevational gradient affect functional fractions of soil organic carbon and aggregates stability in a Tibetan alpine meadow [J]. Cate-na, 2017, 156: 139-148.
- [8] Hu Y G, Wang Z G, Wang Q, et al. Climate change affects soil labile organic carbon fractions in a Tibetan alpine meadow [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(2): 1-14.
- [9] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等. 杉木人工林土壤有机质研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1743-1749.
- [10] 窦森,肖彦春,张晋京. 土壤胡敏素各组分数量及结构特征初步研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 934-940.
- [11] 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.
- [12] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.
- [13] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 393-406.
- [14] Bissonnais Y L, Prieto I, Roumet C, et al. Soil aggregate stability in mediterranean and tropical agro-eco-systems: Effect of plant roots and soil characteristics [J]. Plant and Soil, 2018, 424(1/2): 303-317.
- [15] International Organization for Standardization. Soil quality-measurement of the stability of soil aggregates subjected to the action of water[S]. Geneva: Standard 10930, 2012.
- [16] 张春霞,郝明德,谢佰承. 不同化肥用量对土壤碳库的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 861-864.
- [17] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control [J]. Soil Science, 1996, 163(1): 83-85.
- [18] 王晗光,张健,杨婉身,等. 巨桉根系和根系土壤化感物质的研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2006, 29(3): 368-371.
- [19] 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.
- [20] 苑亚茹,韩晓增,李禄军,等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 96-99.
- [21] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. Nature, 2011, 478(7367): 49-56.
- [22] Fischer C, Tischer J, Roscher C, et al. Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties [J]. Plant and Soil, 2015, 397(1): 1-16.
- [23] 刘玲,王海燕,戴伟,等. 长白山东部 4 种林分类型土壤有机碳及养分特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 79-85.
- [24] 肖斌. 不同连栽代次桉树人工林土壤有机碳演变特征[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [25] Regelink I C, Stoof C R, Rousseva S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties [J]. Geoderma, 2015, 247: 24-37.
- [26] Wen D, He N P, Zhang J J. Dynamics of soil organic carbon and aggregate stability with grazing exclusion in the inner Mongolian grasslands [J]. PLoS One, 2016, 11(1): e146757.