

不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响

黎宏祥 王彬 王玉杰 王云琦

(北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室)

摘要:基于野外调查和室内分析,对人工杉木林、马尾松林、桉树林、毛竹林、天然林5种不同林分下0~20 cm、20~40 cm土层土壤水稳定性团聚体稳定性及各粒级土壤团聚体有机碳分布特征进行研究。结果表明:1)0~20 cm土层,土壤水稳定性团聚体质量百分含量随粒级的减小先下降后上升,主要以0.5~0.25 mm粒级最低;5种林分条件下各土层均以>0.25 mm的大团聚体为主,随土层加深,大团聚体含量减少。2)各林分土壤平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)值变化趋势相似,均呈现为0~20 cm土层大于20~40 cm土层;林分间土壤MWD、GMD值则表现为天然林最大,桉树林最小;分形维数(D)在2个土层均以桉树最大,杉木林最小;3)5种林分各粒级团聚体中有机碳的含量均随土层的加深而减少;0~20 cm土层,各林分有机碳含量随着团聚体粒级减小呈现先增大后减小再增大的趋势,最大值主要出现在5~2 mm粒级,而有机碳贡献率则表现为先减小后增大的趋势。不同林分MWD、GMD差异分析结果表明,天然林土壤结构优于其他4种人工林,团聚体稳定性更高,而桉树林最低。随着土层深度变大,土壤水稳定性团聚体稳定性下降;土壤团聚体有机碳含量表现为天然林最大、桉树林最小。

关键词:不同林分;土壤团聚体;稳定性;有机碳

中图分类号:S714.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)05-0084-08

LI Hong-xiang; WANG Bin; WANG Yu-jie; WANG Yun-qi. **Impact of different forest types on stability and organic carbon of soil aggregates.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(5): 84-91 [Ch, 23 ref.] School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Based on the field survey and laboratory analysis, we studied the soil aggregates stability and soil organic carbon characteristics in two soil layers, i. e., 0~20 cm and 20~40 cm, under five different forest types, namely *Eucalyptus robusta*, *Pinus tabuliformis*, *Cunninghamia lanceolata*, *Phyllostachys heterocycla*, and natural forestland. 1) In the 0~20 cm layer, the mass percentage of soil water stable aggregates under the five different forest types firstly decreased and then increased along with decreasing aggregate size, and particle size 0.5~0.25 mm had the lowest percentage. In both layers, soil aggregates were dominated by particle size >0.25 mm, and the mass percentage of macro-aggregates decreased as the soil went deeper. 2) The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil in different forests had similar variation tendency: it was higher in the 0~20 cm layer than that in the 20~40 cm layer. When comparing the MWD and GMD in the same layer, both of the factors were the highest in natural forestland, while the lowest in *Eucalyptus robusta* forest. However, the fractal dimension (D) of the soil in the *Eucalyptus robusta* forest was the highest, but lowest in the *Cunninghamia lanceolata* forest. 3) The content of organic carbon in soil aggregates of each particle size in five forest types decreased with increasing depth in soil and was distributed mainly in the grain size of 2~5 mm. In 0~20 cm soil layer, with decreasing particle size of soil aggregates, the content of organic carbon firstly increased, then decreased for the particle size of 5~2 mm and finally increased, while

收稿日期: 2015-11-27 修回日期: 2016-01-15

基金项目: 广西水利厅“广西水土保持效应指标体系与生态补偿标准研究”课题(201401005-01-B)。

第一作者: 黎宏祥。主要研究方向: 水土保持效益评价与土壤碳循环。Email: 985656079@qq.com 地址: 100083 北京市清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 王彬,博士,讲师。主要研究方向: 水土保持。Email: wangbin1836@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

contribution ratio of organic carbon firstly decreased, and increased finally. According to variance analysis of MWD and GMD of different forest types and soil layers, soil in natural forest had better structure and its soil water-stable aggregates had better stability than the other four types of plantations, while *Eucalyptus robusta* forest was the lowest. The stability of soil water-stable aggregate decreased with increasing depth in soil. The content of organic carbon in natural forest soil aggregates was the highest, while that in *Eucalyptus robusta* forest was the lowest.

Key words different forest types; soil aggregates; stability; organic carbon

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其质量和数量决定了土壤的肥力和性质^[1],对土壤的持水性、通透性和孔隙性^[2]的影响不容忽视,同时与土壤的抗侵蚀能力密切相关^[1]。特别是水稳定性团聚体的某些定量评价指标,如分形维数(*D*)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)等,已被广泛用于土壤结构和土壤团聚体稳定性的评价。土壤有机物质是影响土壤团聚体的一个重要因素,可以提高土壤团聚体稳定性,以土壤有机碳和土壤团聚体稳定性为研究内容是一个研究热点,受到广大学者的关注^[3]。土壤作为固碳的载体,特别是森林土壤储存、固定的有机碳占到整个森林生态系统碳库的2/3,森林土壤有机碳的微量变化都可以对全球碳平衡产生影响^[4]。许多学者以森林土壤为研究对象,对不同林分土壤团聚体稳定性、团聚体有机碳含量等开展了大量研究。通过对不同区域土壤团聚体和有机碳的研究现状归纳,发现喀斯特地貌区土壤团聚体的相关研究还较薄弱^[5],并且现有的研究中部分结果差异较大。有研究认为喀斯特地区土壤团聚体分布主要以>5 mm粒级为主^[6],<0.25 mm粒级团聚体中有机碳的含量最高^[7];而有研究则表明<0.25 mm粒级土壤团聚体质量百分含量最高^[8],而不同粒级团聚体有机碳含量随着粒级减小而降低,>5 mm粒级团聚体是有机碳的主要载体^[9]。喀斯特地貌区生态系统脆弱,森林覆盖率低,土壤有机碳为其

最大的碳库^[10]。石漠化现象无疑对土壤性状和土壤团聚体有机碳会产生较大影响,需要进行深入研究。

本文以广西西北部地区4种主要人工林土壤为研究对象,并以天然林作为对照,研究土壤水稳定性团聚体的分布特征和稳定性,以及5种林分土壤团聚体有机碳特征,以期为该地区不同林分土壤水稳定性团聚体组成稳定性以及碳库评价,造林树种选择,提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区西北部西林县(104°29'~105°36'E, 24°01'~24°44'N, 海拔390.0~1 883.3 m)。属亚热带季风气候,多年平均气温19.1℃,多年平均降雨量为1 084.0~1 101.5 mm,降雨主要集中在5—10月,降雨量占全年高达83.7%。全县森林覆盖率为83.71%,天然林主要以热带干性型落叶阔叶林和常绿针叶林为主,人工林占森林面积13.62%,主要树种有桉树(*Eucalyptus robusta*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)等,为广西主要人工林营造树种。研究林分基本概况见表1。

表1 林分基本概况

Tab. 1 Basic information of different forest types

林分类型 Forest type	海拔 Altitude/m	经纬度 Latitude and longitude	坡向 Slope	郁闭度 Canopy density	枯落物厚度 Litter fall depth/cm	树龄 Age of trees/a	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm
A	1 351	24°35'N, 105°07'E	SE	0.71	2.1	15	13.2	11.20
MWS	1 324	24°35'N, 105°03'E	SE	0.80	3.6	15	8.3	8.12
SM	1 307	24°35'N, 105°04'E	SE	0.87	3.4	14	7.5	10.73
MZ	1 356	24°35'N, 105°03'E	SE	0.75	2.3	15	7.6	6.31
TR	1 548	24°35'N, 105°01'E	SE	0.85	4.7	—	7.1	6.59

注:A. 桉树林;MWS. 马尾松林;SM. 杉木林;MZ. 毛竹林;TR. 天然林;SE. 东南。下同。Notes: A refers to *Eucalyptus robusta* forest, MWS means *Pinus massoniana* forest, SM means *Cunninghamia lanceolata* forest, MZ means *Phyllostachys heterocycle* forest, TR means natural forestland and SE means southeast. The same below.

1.2 土壤样品采集

2015年4—5月,在选取的5种林地内选取3个20 m×20 m的样地,采用5点S型采样法,分0~20 cm和20~40 cm采集原状土样,对应土层5个样点土样采用四分法收集土样。采样前,先去除各采样点表面的枯落物等。土壤样品在实验室自然风干,并将土壤样品中较大粒土团沿其自然裂缝掰开成1 cm³左右的小土团,去除样品中的小石粒、植物残体等有机物质等继续风干,备用。

1.3 研究方法与数据分析

采用常规方法测定土壤密度(环刀法)、有机质(重铬酸钾容量法)、土壤机械组成(激光粒度分析

仪)、土壤全磷(紫外可见分光光度计)、全氮(凯氏定氮法)(表2)。分别采用干筛法、湿筛法^[11]测定风干性团聚体和水稳定性团聚体,湿筛法将频率设置为30次/min,振幅为3 cm,持续30 min。湿筛法条件下获取的6个粒级>5 mm、5~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm、<0.25 mm团聚体烘干后称质量,取出一部分用于团聚体有机碳的测量,有机碳含量采用重铬酸钾氧化法^[11]。

采用最小显著差异法和单因素方差分析法比较不同数据组间差异性。因子间相关关系用Pearson相关系数评价,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

下文土壤水稳定性团聚体简称为团聚体。

表2 不同林分土壤基本理化性状

Tab. 2 Physical and chemical properties of the soil of different forest types

林分类型 Forest type	土层深度 Soil depth/cm	土壤密度 Soil density/ (g·cm ⁻³)	有机质 SOC/ (g·kg ⁻¹)	全P Total P/ (g·kg ⁻¹)	全N Total N/ (g·kg ⁻¹)	土壤机械组成 Soil mechanical composition/%		
						砂粒 Sand particle (2~0.05 mm)	粉粒 Silt particle (0.05~0.002 mm)	黏粒 Clay particle (<0.002 mm)
A	0~20	1.31	31.3	1.91	0.48	73.67	25.81	0.52
	20~40	1.42	24.7	1.11	0.41	69.45	29.86	0.69
MWS	0~20	1.28	36.3	2.01	0.83	66.03	31.12	2.85
	20~40	1.39	28.2	1.46	0.68	59.00	37.37	3.63
SM	0~20	1.13	41.6	2.57	0.75	44.83	50.23	4.94
	20~40	1.25	31.7	1.67	0.87	65.17	32.85	1.98
MZ	0~20	1.07	46.2	2.43	1.05	67.31	30.59	1.10
	20~40	1.15	30.4	1.85	0.93	66.32	31.21	2.47
TR	0~20	1.05	53.9	2.92	1.58	66.29	32.56	1.15
	20~40	1.13	32.1	1.91	1.50	34.84	58.17	6.99

注:土壤机械组成为体积百分数。Note: the data of soil mechanical composition is volume percentage.

1.4 数据分析方法

平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)公式如下^[12]:

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

$$GMD = \exp \left[\sum_{i=1}^n \omega_i \ln x_i \right] \left/ \sum_{i=1}^n \omega_i \right. \quad (2)$$

式中: x_i 为过湿筛后*i*级粒级团聚体的平均直径,mm; ω_i 为过湿筛后*i*级粒级团聚体干质量占过筛前土壤干质量百分比。

采用杨培岭等^[13]推导公式计算分形维数(*D*):

$$\frac{W(\beta < x_i)}{W_0} = \left(\frac{x_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

式中: $W(\beta < x_i)$ 为粒级小于 x_i 的团聚体质量,g; W_0 为过湿筛前土壤样品总质量,g; x_{\max} 为团聚体的最大粒级。

有机碳贡献率,即为不同粒级团聚体有机碳对土壤有机碳总量的贡献率(*P*),公式如下:

$$P = \frac{\omega_i W_0 \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i W_0 \lambda_i} \quad (4)$$

式中: λ_i 为*i*粒级团聚体有机碳含量,g/kg。

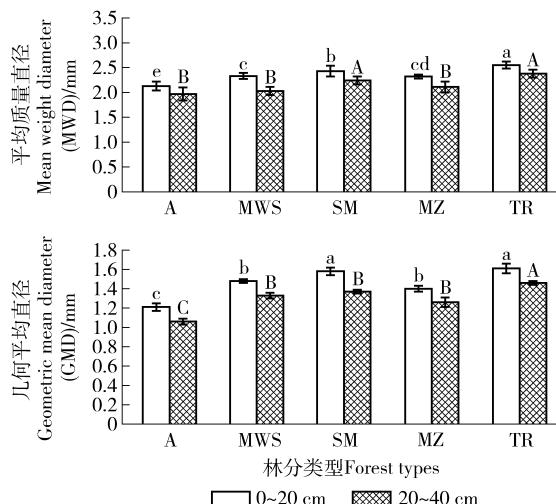
2 结果与讨论

2.1 团聚体稳定性分析

几何平均直径(GMD)和平均质量直径(MWD)是反映土壤团聚体分布的重要指标,已被众多学者应用于团聚体稳定性评价的研究,GMD和MWD值越大,表示土壤具有良好的结构,团聚体稳定性越强^[14~16]。

由图1可知,0~20 cm土层团聚体的MWD值范围为2.13~2.55,20~40 cm土层为1.97~2.38。其中,0~20 cm土层不同林分团聚体差异明显,除马尾松林、毛竹林外其他林分土壤MWD存在显著差异。20~40 cm土层不同林分土壤MWD差异不如0~20 cm土层显著,桉树林、马尾松林、毛竹林3

种林分与杉木林、天然林存在显著差异,其他林分间差异不显著。0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤 GMD 范围分别为:1.21~1.61,1.06~1.46。土壤 GMD 值不同林分间差异性在不同土层表现不尽一致。总体而言,0~20 cm 土层 GMD 差异比 20~40 cm 土层显著,且 0~20 cm 土层土壤 GMD 值大于 20~40 cm 层。由此可见,不同土层土壤 MWD、GMD 因不同林分原因造成的差异在 0~20 cm 土层表现更为明显,在 20~40 cm 土层不同林分间两者差异减小;0~20 cm 土层团聚体结构较好,抗侵蚀能力比 20~40 cm 土层强。5 种林分在不同土层均以天然林 MWD、GMD 最大,桉树林 MWD、GMD 值最小。4 种人工纯林土壤 MWD、GMD 值均比天然林小。说明天然林较其他林分而言更有利于团聚体的稳定,而桉树林较弱。



不同林分同一土层不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。Different letters in the same picture mean significant difference at 0.05 level at the same layer in different forest types.

图 1 不同林分团聚体平均质量直径和几何平均直径

Fig. 1 Soil mean weight diameter and geometric mean diameter under different forest types

根据以上结果可知,天然林团聚体比人工纯林稳定,土壤结构优于人工林,具有较强的抗侵蚀能力。其原因是由于天然林林分立体结构更加复杂,地表枯落物平均厚度大于其他 4 种林分(表 1)以及根系分布比人工林丰富,因此天然林有机质水平由于大量的有机质输入而得以提高,提供了更多的有机胶结物质促进大团聚体合成,提高了大团聚体含量^[3];同时,枯落物能有效的降低降雨对林地表面的击溅,从而防止大团聚体被溅散;天然林土壤密度较其他 4 种人工纯林小(表 2),刘艳等^[12]研究表明土壤密度小,土质疏松,孔隙度较好,从而防止超渗产流对地表进行冲刷逐渐导致大团聚体破坏,而降

低团聚体稳定性;5 种林分郁闭度天然林和杉木林高于其他林分,具有更强的阻止雨滴击溅的能力,因此对大团聚体保护作用高于其他林分。4 种人工纯林中,杉木林团聚体稳定性高于其他 3 种林分,桉树林最低。由表 1 可知,桉树林平均树高较大,且郁闭度在 4 种林分中最小,因此桉树林内土壤受到降雨击溅侵蚀的程度要高于其他 3 种林分。

表 3 不同林分类型土壤团聚体分形维数(D)

Tab. 3 Fractal dimension (D) of water stable aggregates in different forest types

林分类型 Forest type	土层厚度 Soil depth/cm	D	R^2
A	0~20	2.51aA	0.968
	20~40	2.53aA	0.956
MWS	0~20	2.32cA	0.912
	20~40	2.36cA	0.894
SM	0~20	2.29cA	0.883
	20~40	2.35cB	0.964
MZ	0~20	2.41bA	0.909
	20~40	2.46abB	0.895
TR	0~20	2.42bA	0.815
	20~40	2.48aB	0.878

注:不同林分相同土层不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),同一林分不同土层不同大写字母表示差异显著($P < 0.05$)。Notes: different small letters in different forest types mean significant difference at 0.05 level in the same layer, different capital letters in the same forest type mean significant difference at 0.05 level in different layers.

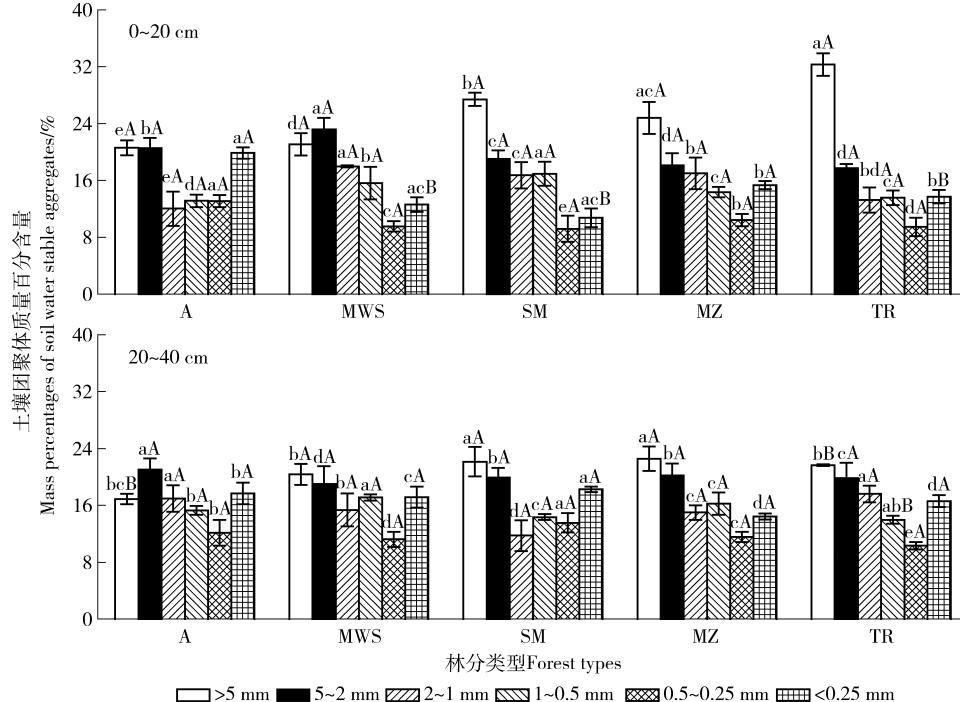
土壤分形维数(D)是反映土壤几何形状的参数,反映团聚体以及水稳定性大团聚体含量对土壤稳定性与结构影响的趋势。 D 和 MWD、GWD 均可作为团聚体稳定性的评价指标,但是 D 不仅可以反映土壤颗粒的大小,同时还能反映土壤质地的均一程度, D 值越高,土壤越紧实,黏粒较多,土壤结构性越差^[17]。5 种林分 0~20 cm 土层 D 值略低于 20~40 cm 土层,且杉木林不同土层 D 值均低于其他 4 种人工林,桉树林要高于其他林分。桉树林、马尾松林 2 个土层 D 值差异不显著,其他 3 种林分差异显著。说明桉树林和马尾松林 2 个土层土壤质地趋于一致,而另外 3 种林分 0~20 cm 土层土壤质地优于 20~40 cm 土层。根据 D 从土壤质地均一程度判断,桉树林土壤结构较差,而杉木林土壤结构最好。由于评价指标的侧重不一致,团聚体稳定性评价结果出现和用 MWD、GWD 不一致现象。从土壤质地的均一程度方面评价,杉木林土壤高于天然林。

2.1 团聚体分布与数量

0~20 cm 土层,5 种林分团聚体含量随着其粒

级的减小整体上呈现先减小后增加的趋势(图2)。5种林分中,各粒级团聚体的组成比例存在较大差异。桉树林、杉木林、毛竹林和天然林均以 $>5\text{ mm}$ 的团聚体含量最高, $5\sim2\text{ mm}$ 粒级含量次之。马尾松林以 $5\sim2\text{ mm}$ 粒级含量最高, $>5\text{ mm}$ 粒级含量略低于 $5\sim2\text{ mm}$ 粒级。5种林分均以 $0.5\sim0.25\text{ mm}$ 粒级含量最低,其中杉木林最低为9.19%。天然林 $>5\text{ mm}$ 含量最高,为32.30%,分别为桉树林、马尾

松林、杉木林、毛竹林的1.57、1.53、1.18、1.30倍,与4种林分存在显著差异。20~40 cm土层,5种林分 $>5\text{ mm}$ 粒级含量均有所下降,<0.25 mm微团聚体含量增加。其中,天然林 $>5\text{ mm}$ 粒级含量较0~20 cm土层下降达10.64%,而杉木林<0.25 mm微团聚体含量增加10.02%。5种林分2个土层土壤均以 $>0.25\text{ mm}$ 粒级为主,20~40 cm土层,大团聚体数量有所减少。



不同林分相同土层同一粒级不同小写字母表示存在显著差异, $P < 0.05$ 。同一林分不同大写字母表示不同土层相同粒级存在显著差异, $P < 0.05$ 。下同。Different small letters in the same particle size in the different forest types mean significant difference at 0.05 level in the same layer. Different capital letters in the same forest type mean significant difference at 0.05 level in different layers. The same below.

图2 不同林分2个土层团聚体分布

Fig. 2 Percentage of mass of soil water stable aggregates under different forest types in two layers

对不同土层深度而言,相同林分条件下不同粒级团聚体百分含量差异不大。桉树林、马尾松林、杉木林3种林分在2个土层团聚体含量存在显著差异的粒级分别为: $>5\text{ mm}$ 、 $<0.25\text{ mm}$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 。天然林2个土层间团聚体含量在 $>5\text{ mm}$ 、 $1\sim0.5\text{ mm}$ 、 $<0.25\text{ mm}$ 3个粒级存在显著差异,而毛竹林各粒级团聚体不同土层间不存在显著差异。结果表明,5种林分中天然林2个土层间差异比其他林分大,其原因可能是天然林表层土壤相对于其他林分而言受到的侵蚀破坏程度较低,较好的保存了土壤的原有形态。团聚体百分含量随粒径减小呈现先减小后上升的趋势其原因与团聚体有机碳关系密切,研究^[18]表明土壤有机碳是团聚体重要的胶结剂,可以提高土壤大团聚体的数量,有利于大团聚体的形成。而不同粒级团聚体有机碳含量不同,湿筛

条件下团聚体破碎程度不尽一致。下文在团聚体有机碳章节结合其内容对此进行分析。

整体而言,各林分团聚体差异不如0~20 cm土层显著,并且相同林分不同粒级间团聚体差异0~20 cm土层比20~40 cm土层大(桉树林除外)。由此可见,林分对0~20 cm土层团聚体影响比20~40 cm土层大。下文在团聚体有机碳的分布特征章节将其内容对团聚体的质量百分含量规律进行分析。

由表4可知,GMD分别与MWD、有机质、 $>5\text{ mm}$ 粒级团聚体呈极显著正相关关系;与D、 $0.5\sim0.25\text{ mm}$ 、 $<0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体呈显著负相关关系;MWD分别与有机碳和 $>5\text{ mm}$ 团聚体呈极显著正相关关系,与 $0.5\sim0.25\text{ mm}$ 呈负相关关系。有机碳含量越高, $>5\text{ mm}$ 粒级团聚体含量越多,土

表 4 团聚体及其相关参数间相关性

Tab. 4 Correlation between parameters of water stable aggregation

	GMD	MWD	D	SOC	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
GMD	1									
MWD	0.927 **	1								
D	-0.667 *	-0.420	1							
SOC	0.859 **	0.922 **	-0.321	1						
>5 mm	0.814 **	0.840 **	-0.370	0.907 **	1					
5~2 mm	-0.360	-0.356	0.038	-0.585	-0.661 *	1				
2~1 mm	0.112	0.069	-0.119	0.076	-0.196	0.255	1			
1~0.5 mm	0.001	-0.299	-0.517	-0.278	-0.162	0.125	0.431	1		
0.5~0.25 mm	-0.750 *	-0.683 *	0.441	-0.711 *	-0.584	0.183	-0.633 *	-0.274	1	
<0.25 mm	-0.700 *	-0.611	0.623	-0.583	-0.589	0.063	-0.494	-0.476	0.864 **	1

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。Notes: * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$.

壤 GMD、MWD 越大。说明提高土壤 >5 mm 粒级团聚体含量有利于提高土壤结构稳定性, 抗侵蚀能力。

2.3 团聚体中有机碳分布特征

2.3.1 团聚体有机碳含量

5 种林分各粒级团聚体中有机碳的含量随着土层的变浅而增加(图 3), 这与卢凌霄等^[19]在喀斯特地区对 3 种原生树种团聚体和有机碳的研究以及李鉴霖等^[15], 王勇等^[20]的研究结果类似。就 0~20 cm 土层而言, 相同林分各粒级团聚体有机碳含量各异, 部分存在显著差异, 各林分有机碳含量随着团聚体粒级减小呈现先增大后减小再增大的趋势。其中, 5 种林分中 5~2 mm 粒级有机碳含量最高, 榕树林和马尾松林最低值出现在 >5 mm 粒级团聚体, 其余 3 种林分最低值均出现在 0.5~0.25 mm 粒级团聚体。对比各林分 2 个土层团聚体有机碳含量,

20~40 cm 土层较上一土层降幅最大为毛竹林, 达 34.3%, 最小为马尾松林, 为 21.9%。2 个土层团聚体有机碳含量均为天然林 > 人工林, 其原因是因积累在天然林土壤表层的植物残体较多, 地表枯落物分解增加了土壤中的有机质, 可以维持大量的微生物存活所需要能量。从而增强微生物活性, 促使更多真菌胞外多糖胶结和菌丝物理缠绕而形成微粒有机质^[21], 微粒有机质不仅对团聚体稳定起直接作用, 而稳定的团聚体形态有益于增加团聚体有机碳的积累, 二者相互促进^[22]。这些因素是 5 种林分 0~20 cm 土层有机碳含量明显高于 20~40 cm 土层的主要原因。此外, 有机碳作为团聚体重要的胶结剂, 团聚体有机碳含量差异也会对在湿筛条件下不同粒级团聚体百分含量产生影响。段正锋等^[23]在岩溶地区团聚体稳定性和有机碳研究表明, 团聚体

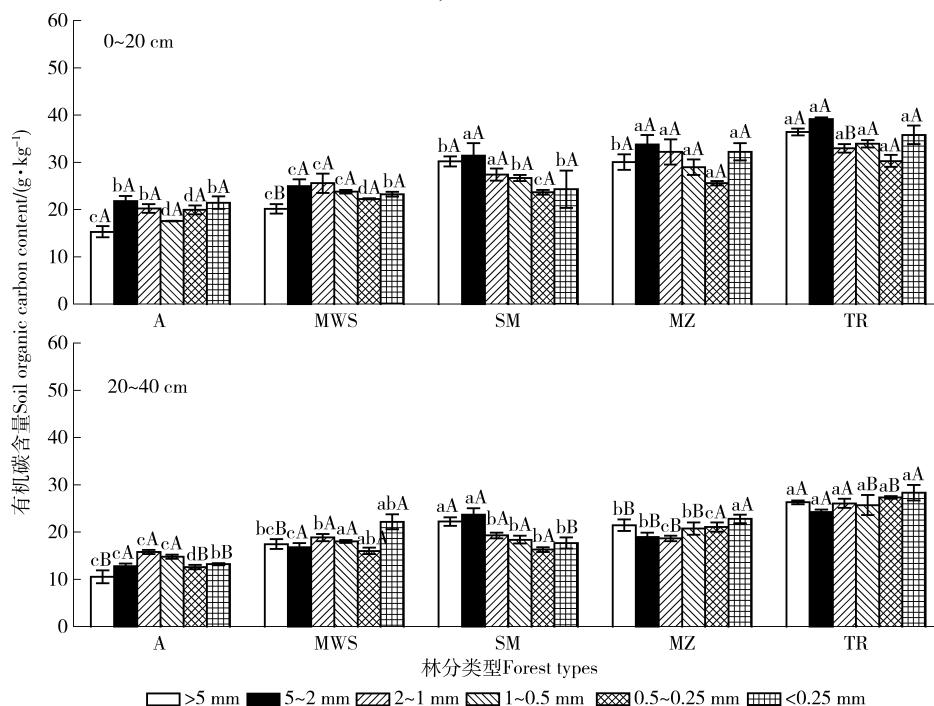


图 3 不同林分 2 个土层不同粒级土壤团聚体有机碳含量

Fig. 3 Organic carbon content of soil aggregates of different aggregate sizes in two layers in different forest types

稳定性和有机碳关系密切,且不同粒级团聚体湿筛条件时保存几率不同。本文团聚体有机碳含量主要以0.5~0.25 mm粒级最低(图3),团聚体百分含量最低值出现在0.5~0.25 mm粒级(图2)可能与其有机碳含量最低相关,并且<0.25 mm粒级团聚体含量增加(湿筛法要求<0.25 mm粒级风干性团聚体不加入套筛中,和湿筛后获取的<0.25 mm粒级团聚体求和后得到)因此整体上呈现先下降后上升的趋势。

2.3.2 不同粒级土壤团聚体中有机碳分布

0~20 cm土层在不同林分贡献率呈现先减小后增大的规律,除桉树林外,贡献率最大值出现在>5 mm粒级团聚体,最小值出现在0.5~0.25 mm,桉树林有机碳贡献率最大值出现在1~0.5 mm(图4)。其原因为较小粒级团聚体单位有机碳含量较高,但是其百分含量与较大粒级团聚体相比较低,因

此小团聚体有机碳总量所占比例依然比大团聚体低,较大值出现在大团聚体。桉树林1~0.5 mm粒级团聚体含量最低,且该粒级团聚体的有机碳单位含量较低,最小值出现在1~0.5 mm粒级。20~40 cm土层,5种林分不同粒级团聚体有机碳贡献率规律不如0~20 cm土层明显,5种林分贡献率最小值均出现在0.5~0.25 mm。根据团聚体的分布,2个土层大部分林分0.5~0.25 mm含量最低(图2),有机碳含量与较其他粒级团聚体相比处在较低水平(图3),因此团聚体有机碳贡献率最低。>5 mm团聚体有机碳贡献率最高与其百分比含量以及有机碳含量较高有关。根据表4团聚体及其相关参数间的相关性可知,提高该粒级团聚体含量有利于土壤有机碳含量的提高,这与其对土壤有机碳贡献率最高的结果吻合。

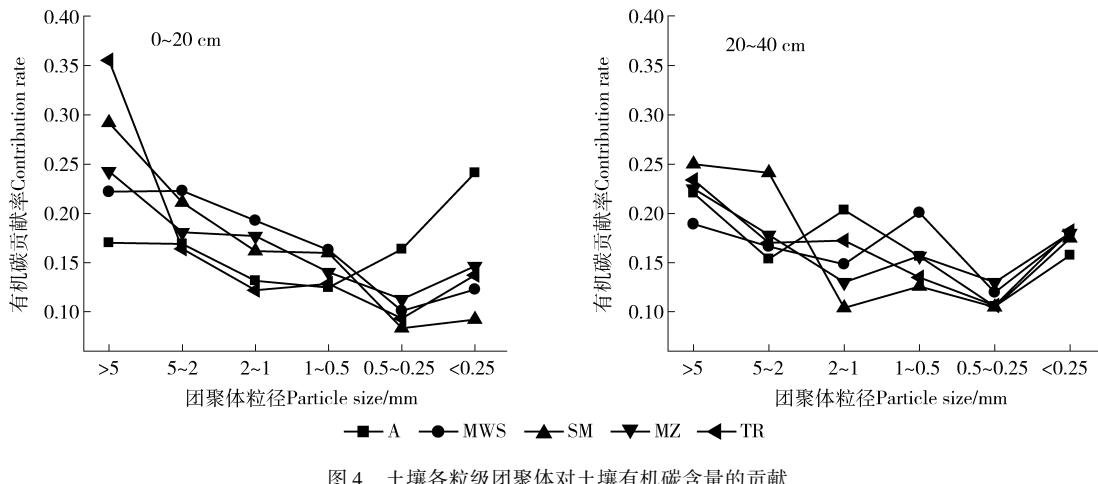


图4 土壤各粒级团聚体对土壤有机碳含量的贡献

Tab. 4 Contribution of aggregates with different sizes to soil organic carbon content

3 结 论

1)5种林分不同土层团聚体均以>0.25 mm粒级为主,不同林分间存在较大差异。0~20 cm土层,5种林分团聚体含量随着其粒级的增大整体上呈现先减小后增加的趋势,5种林分各粒级团聚体均以0.5~0.25 mm粒级百分含量最低。不同土层,相同林分相同粒级团聚体百分含量差异较小,差异最大林分为天然林。

2)各林分GMD和MWD值,0~20 cm土层均大于20~40 cm土层。不同土层GMD和MWD值均为天然林最大,桉树林最小。5种林分0~20 cm土层D值略低于20~40 cm土层,且桉树林2个土层D值均低于其他4种人工林,桉树林要高于其他林分。说明杉木林土壤结构性最好,桉林最差。

3)天然林土壤团聚体有机碳在2个土层均高于4种人工林,5种林分各粒级团聚体中有机碳的

含量随着土层的变浅而增加。0~20 cm土层,5种林分中5~2 mm粒级团聚体有机碳含量最高,有机碳含量随着团聚体粒级减小呈现先增大后减小在增大的趋势,而有机碳贡献率则表现为先减小后增大的规律,4种林分(桉树林除外)贡献率最大值出现在>5 mm粒级团聚体,最小值出现在0.5~0.25 mm,桉树林有机碳贡献率最大值出现在1~0.5 mm。20~40 cm土层,土壤各粒级团聚体有机碳分布特点比较复杂,5种林分土壤团聚体有机碳贡献率最小值均出现在0.5~0.25 mm粒级团聚体。

参 考 文 献

- [1] 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 & Tillage Research, 2004, 79(1): 7~31
- [2] BARTHES B, ROOSE E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47(2): 133~149.
- [3] 王小红,杨智杰,刘小飞,等.天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2014,28

- (6):177-182.
- WANG X H, YANG Z J, LIU X F, et al. Effects of natural forest converted to plantations on soil organic carbon distribution and stability of aggregates in middle-subtropics of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6):177-182.
- [4] 李斌,方晰,李岩,等,湖南省森林土壤有机碳密度及碳库储量动态[J]. *生态学报*,2015,35(13):4265-4278.
- LI B, FANG X, LI Y, et al. Dynamic properties of soil organic carbon in Hunan's forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (13):4265-4278.
- [5] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等.峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学报*,2014,25 (3):671-678.
- TAN Q J, SONG T Q, PENG W X, et al. Stability and organic carbon characteristics of soil aggregates under different ecosystems in karst canyon region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014,25(3):671-678.
- [6] 唐夫凯,崔明,周金星,等.岩溶峡谷区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J]. *中国水土保持科学*,2014,12(4):1-7.
- TANG F K, CUI M, ZHOU J X, et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in different forestlands returned from farmlands in karst gorge area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014,12(4):1-7.
- [7] 黄宗胜,符裕红,喻理飞.喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化[J]. *土壤学报*,2013,50(2):84-92.
- HUANG Z S, FU Y H, YU L F, et al. Characteristic evolution of soil organic carbon pool with the process of natural restoration of karst forest vegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013,50 (2): 84-92.
- [8] 胡乐宁,苏以荣,何寻阳.桂西北喀斯特地区典型土壤在不同筛分强度下团聚体的稳定性[J]. *水土保持通报*,2014, 34 (3):236-241.
- HU L N, SU Y R, HE X Y. Soil aggregates stability at different sieving strength for typical soils in karst region of northwest Guangxi province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(3):236-241.
- [9] 罗友进,魏朝富,李渝,等.土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. *生态学报*,2011,31 (1): 257-266.
- LUO Y J, WEI C F, LI Y, et al. Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (1): 257-266.
- [10] 廖洪凯,龙健,李娟,等.花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)种植对喀斯特山区土壤水稳定性团聚体分布及有机碳周转的影响[J]. *生态学杂志*,2015,34(1):106-113.
- LIAO H K, LONG J, LI J, et al. Effects of Chinese prickly ash plantation on soil water-stable aggregate distribution and organic carbon turnover in karst mountain area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015,34(1):106-113.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil physical and chemical analysis* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [12] 刘艳,查同刚,王伊琨,等.北京地区栓皮栎和马尾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.
- LIU Y, ZHA T G, WANG Y K, et al. Soil aggregate stability and soil organic carbon characteristics in *Quercus variabilis* and *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3):607-613.
- [13] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*,1993,38(20):1896-1899.
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C, et al. Using weight distribution of soil particle size to express soil fractal features [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [14] 李丛蓄,周际海,袁颖红,等.改良剂对旱地红壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*,2015,29(3):112-116.
- LI C L, ZHOU J H, YUAN Y H, et al. Effects of soil amendments on distribution of water stable aggregates and organic carbon in upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):112-116.
- [15] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35 (12): 4695-4704.
- LI J L, JIANG C S, HAO Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun mountain [J]. *Environmental Science*, 2014,35(12):4695-4704.
- [16] ZHANG B, HORN R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 99(1): 123-145.
- [17] 黄冠华,詹卫华.土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4):490-497.
- HUANG G H, ZHAN W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4):490-497.
- [18] BRONICA C J, LAL R. Soil structure and management: a review [J]. *Geoderma*, 2005, 124(1):3-22.
- [19] 卢凌霄,宋同清,彭晚霞,等.喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布[J]. *应用生态学报*,2012,23(5):1167-1174.
- LU L X, SONG T Q, PENG W X, et al. Profile distribution of soil aggregates organic carbon in primary forests in karst cluster-peak depression region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5):1167-1174.
- [20] 王勇,姬强,刘帅,等.耕作措施对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *农业环境科学学报*,2012,31(7):1365-1373.
- WANG Y, JI Q, LIU S, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012,31(7):1365-1373.
- [21] CAMBERDELLA C A, ELLIOTTE T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3):777-783.
- [22] PUGET P, CHENU C. Total and young organic matter distributions in silty cultivated[J]. *European Journal of Soil Science*, 1995, 46: 449-459.
- [23] 段正锋,傅瓦利,甄晓君,等.岩溶区土壤有机碳和团聚体的关系研究:以重庆市中梁山岩溶槽谷为例[J]. *中国岩溶*, 2009,28(1):75-79.
- DUAN Z F, FU W L, ZHEN X J, et al. Correlation between soil organic carbon and water-stable aggregate in karst area: a case study in Zhongliangshan karst valley, Chongqing [J]. *Carologica Sinica*, 2009, 28(1):75-79.