环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2019

Vol.40 No.3

第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第3期 2019年3月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征

王富华[1], 吕盛[1], 黄容[1], 高明[1*], 王子芳[1], 徐畅[2]
(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国烟草总公司重庆市公司, 重庆 400023)

摘要: 以重庆市缙云山的竹林、阔叶林、针叶林和针阔叶混交林这4种亚热带森林植被为研究对象, 分析不同林分下土壤团聚体及团聚体有机碳在0~20、20~40、40~60和60~100 cm土壤剖面上的分布规律. 结果表明, 阔叶林土壤>2 mm粒级团聚体含量、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)及>0.25 mm团聚体含量($R_{0.25}$)均随土层深度的增加而降低, 而其他林分在整个土层中则无明显规律. 在各土层中, 竹林以>2 mm粒级团聚体为主(30.73%~53.08%); 阔叶林和混交林的2~0.25 mm粒级团聚体含量较高, 为36.27%~44.67%和48.69%~52.44%; 针叶林的优势粒径为2~0.25 mm和<0.053 mm. 总体上, 在各土层中, 竹林团聚体的MWD、GMD、$R_{0.25}$值均高于其他林分, 且其分形维数(D)低于其他林分, 可见竹林的土壤团聚体稳定性较好. 随着土层深度的增加, 不同林分(除针叶林外)土壤团聚体有机碳含量逐渐降低, 其中竹林团聚体有机碳含量最高, 显著高于针叶林和混交林. 就不同团聚体粒级而言, 4种林分土壤团聚体有机碳在整个土壤剖面上无明显规律, 但各土层均以2~0.25 mm和<0.053 mm粒级团聚体有机碳含量较高. 不同林分下土壤团聚体有机碳相对贡献率存在显著差异, 其中针叶林中<0.053 mm粒级团聚体有机碳贡献率最高; 竹林的>2 mm粒级团聚体有机碳贡献率高达27.44%~53.47%; 而阔叶林和混交林则以2~0.25 mm粒级团聚体有机碳贡献率最高. 缙云山的4种林分中, 竹林的土壤团聚体稳定性较好, 而针叶林的较差; 在各土层中, 竹林土壤各粒级团聚体有机碳含量最高, 针叶林最低.

关键词: 缙云山; 林分类型; 有机碳; 团聚体; 稳定性
中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1504-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201807097

Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain

WANG Fu-hua[1], LÜ Sheng[1], HUANG Rong[1], GAO Ming[1*], WANG Zi-fang[1], XU Chang[2]
(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Municipal Tobacco Company, Chongqing 400023, China)

Abstract: This study was intended to explore the distribution and stability of soil aggregates and the organic carbon for different forest types and to provide a scientific basis for the efficient management of soil carbon pools in subtropical forest ecosystems. Four subtropical forest types, including bamboo forest, broad-leaf forest, coniferous forest, and a mixed coniferous and broad-leaf forest on Jinyun Mountain (Chongqing Municipality), were selected as research subjects to explore the distribution of soil aggregates and organic carbon in different layers (depths of 0-20, 20-40, 40-60, and 60-100 cm). The results showed: The content of >2 mm aggregates and mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and >0.25 mm aggregate content ($R_{0.25}$) in broad-leaf forests decreased with soil depth, while other forests did not have a similar distribution pattern. In each soil layer, bamboo forest soils were mainly composed of >2 mm fractions of aggregates, which made up 30.73%-53.08% of the total content; The content of 2-0.25 mm particle size aggregates of broad-leaf and mixed forest soils was higher than that for other sizes, and its content ranged from 36.27% to 44.67% and 48.69% to 52.44%, respectively. The 2-0.25 mm and <0.053 mm fractions of aggregates dominated conifer soils. In general, the MWD, GMD, and $R_{0.25}$ of bamboo aggregates were higher than for other stands in each soil layer, and the fractal dimension (D) was lower than for other stands. This indicated that the soil aggregates of bamboo forest have better stability. As the soil layer deepened, the organic carbon content of soil aggregates in forest types, except for coniferous forest, gradually decreased. Among them all, bamboo forest aggregates had the highest organic carbon content, and this was significantly higher than that of coniferous forest and mixed forest. In the whole soil profile, as far as different aggregate size is concerned, there was no obvious regularity about organic carbon in the four forest types soil aggregates; the organic carbon content of the 2-0.25 mm and <0.053 mm fractions of aggregates was high in every soil layer. There was a significant difference in the relative contribution of organic carbon in soil aggregates for different forest stands, among these contributions, the contribution rate of organic carbon in the <0.053 mm fraction of aggregates in the coniferous forest was the highest. The organic carbon contribution rate of the >2 mm fraction of bamboo forest aggregates was as high as 27.44%-53.47%. Broad-leaf forests and mixed forests had the highest contribution to the organic carbon of the 2-0.25 mm fractions of soil aggregates. Among the four forest types on Jinyun Mountain, the soil aggregates in bamboo forest have better stability, but the stability of aggregates in coniferous forests is poor. In each soil layer, the content of bamboo forest organic carbon in the various aggregates was the highest, and that of coniferous forest was the lowest.

Key words: Jinyun Mountain; stand type; organic carbon; aggregates; stability

收稿日期: 2018-07-13; **修订日期**: 2018-08-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)
作者简介: 王富华(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境与质量, E-mail: 2046754536@qq.com
* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

土壤团聚体是由矿物颗粒和有机物在外界干湿交替等物理过程的作用下形成的不同大小的多孔结构体[1]. 土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元，不仅综合了土壤中各种不同形状、大小、孔隙度和水稳性的团聚体，而且是土壤中养分的载体和微生物的生存环境[2]. 土壤有机碳是团聚体的胶结物质，对团粒结构的形成和稳定有重要影响，土壤有机碳含量越高，越有利于土壤团聚体的形成和稳定性的提升[3,4]；同时土壤团聚体为有机碳提供了保护场所，能减缓微生物的分解，且有利于土壤有机碳的稳定和累积[5]，此外，团聚体粒径分组能够减少对有机碳原有结构的破坏. 因此，土壤团聚体的形成、转化与土壤固碳过程密不可分，通过研究团聚体有机碳的分布，对了解森林土壤有机碳的固定和积累有重要意义，同时对调节全球碳平衡和减缓大气中的温室气体浓度上升提供科学依据.

近年来，国内外开展了大量关于团聚体固碳机制的研究，主要集中在不同施肥措施[6]、不同农业管理方式[7]以及不同土地利用方式[8]对土壤团聚体稳定性和有机碳分配的影响. 森林作为陆地生态系统最大的碳库，其团聚体固碳对全球碳循环至关重要. 王小红等[9]研究了格氏栲天然林和转化为人工林后的土壤团聚体有机碳的分布，发现天然林转换成人工林会导致土壤大团聚体数量减少，团聚体稳定性下降，同时表层土壤团聚体有机碳含量减少. 张大鹏等[10]的研究发现，随着退耕年限的增加，2 种竹林均可促进土壤水稳性团聚体的形成，进而改善林地土壤结构的稳定性. 植被类型和土层深度[11,12]也是影响土壤团聚体有机碳分布的重要因素，不同林分类型因其地表凋落物不同，导致其表层土壤有机质的输入和水分、温度等物理性质存在差异，进而影响土壤团聚过程[1]. 以往的研究多集中在植被恢复、不同林龄和人工林对土壤团聚体及其有机碳的影响上，而关于不同林分类型及土层深度对土壤团聚体及其有机碳影响的研究甚少. 即使有研究，但多集中在其他林分类型和地区上，而对缙云山亚热带的阔叶林、针叶林、针阔叶混交林和竹林这 4 种典型天然树林的研究还鲜见报道；且有关土壤团聚体及有机碳在不同土层上的研究多集中在 0 ~ 40 cm 土层中，对更深的土层研究甚少. 因此，本文选取缙云山 4 种林分(阔叶林、针叶林、针阔叶混交林和竹林)为研究对象，分析亚热带典型天然林对土壤团聚体在 0 ~ 100 cm 土层上的分布、稳定性以及团聚体有机碳含量的影响，通过明确林分类型及土层深度对土壤团聚体有机碳分布的影响，以期为森林土壤有机碳库的团聚体保护提供依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

缙云山位于我国重庆市区西北部，东经 106°17′ ~ 106°24′，北纬 29°41′ ~ 29°52′，海拔高度 200 ~ 952.5 m，属典型亚热带季风湿润性气候，四季分明，夏热多雨，冬暖多雾，年平均气温 13.6℃，年平均降雨量 1 143 mm，年平均蒸发量为 777.1 mm. 缙云山土壤类型主要为山地黄壤，并伴有少量紫色土和人为利用的水稻土. 缙云山为国家级自然保护区，素有“小峨眉”之称，区域内自然环境复杂，植被繁茂，植物种类十分丰富，达 249 科，966 属，1 915 种(包括亚种、变种、变型). 2000 年，缙云山自然保护区被批准为国家级自然保护区，以地带性植被——中亚热带湿润常绿阔叶林为主要保护对象. 保护区总面积为7 600 hm^2，植被类型包括针阔混交林(4 299.32 hm^2)；常绿阔叶林(2 507.24 hm^2)；灌木林(59.28 hm^2)；竹林(734.16 hm^2)[13].

1.2　样品采集与测定方法

2016 年 5 月下旬，选择 4 种典型林分：阔叶林、针叶林、针阔叶混交林和竹林. 每种林分类型选择 3 个取样点，在各个样点利用剖面取样法分别在 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 及 60 ~ 100 cm 土层深度取样，用四分法取足够样品. 土样采集后带回实验室，去除其中石块、植物根系及植物残体后，用手将大土块沿土体自然裂隙轻轻掰开，过 10 mm 的筛，用于土壤团聚体的测定. 采样点信息见表 1，0 ~ 20 cm 土层供试土壤基本理化性质见表 2.

表 1　采样点信息

Table 1　Sampling point information

林分	海拔/m	坡向	郁闭度	起源	经度(E)	纬度(N)	主要树种
竹林	580 ~ 590	西北	0.85	天然	106°23′14.77″ ~ 106°23′15.90″	29°49′43.66″ ~ 29°49′44.19″	毛竹
针叶林	428 ~ 461	西北	0.8	天然	106°23′21.85″ ~ 106°23′27.56″	29°49′37.67″ ~ 29°49′37.92″	马尾松、杉木
阔叶林	844 ~ 873	西北	0.9	天然	106°23′49.90″ ~ 106°23′50.66″	29°49′52.35″ ~ 29°49′54.25″	四川大头茶、白毛新木姜子、四川杨桐
混交林	654 ~ 684	西北	0.9	天然	106°23′54.40″ ~ 106°23′54.75″	29°50′32.01″ ~ 29°50′32.47″	四川大头茶、四川杨桐、马尾松

表 2 0 ~ 20 cm 土层土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil layers of 0-20 cm depth

林分类型	pH	全氮 /g·kg^{-1}	全磷 /g·kg^{-1}	全钾 /g·kg^{-1}	碱解氮 /mg·kg^{-1}	有效磷 /mg·kg^{-1}	速效钾 /mg·kg^{-1}
竹林	4.18 ±0.02	1.90 ±0.06	0.15 ±0.01	24.97 ±1.03	206.88 ±2.68	9.76 ±0.46	81.03 ±9.90
针叶林	4.02 ±0.02	0.67 ±0.00	0.10 ±0.01	13.36 ±2.26	36.82 ±0.67	1.69 ±0.19	30.70 ±0.32
阔叶林	4.12 ±0.03	1.73 ±0.00	0.23 ±0.02	18.71 ±2.26	157.67 ±0.33	5.45 ±0.05	54.31 ±1.14
混交林	4.37 ±0.02	0.64 ±0.00	0.13 ±0.00	21.60 ±0.61	52.56 ±1.67	1.41 ±0.00	60.39 ±0.67

土壤团聚体测定方法:参照 Elliott[14] 的湿筛方法. 称取过 10 mm 筛的风干土样 50 g, 置于 2、0.25 和 0.053 mm 的套筛上, 将套筛置于水桶中浸泡 5 min 后, 手动上下振荡 2 min(振幅 3 cm, 频率 30 次·min^{-1}), 按次序收集各级孔筛和桶中土样于铝盒中, 依次分别为 >2、2 ~ 0.25、0.25 ~ 0.053 和 <0.053 mm 粒级团聚体, 倒去上清液在 60℃ 下烘干至恒重, 并称重.

土壤团聚体有机碳测定方法:将上述烘干土样磨细过 0.25 mm 筛, 采用土壤有机碳测定方法测定其团聚体有机碳含量.

土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm 的团聚体含量($R_{0.25}$)和分形维数 D 来描述. 计算公式如下:

$$\mathrm{MWD} = \sum_{i=1}^{n} W_i \overline{X_i} \tag{1}$$

$$\mathrm{GMD} = \exp\left(\sum_{i=1}^{n} W_i \ln \overline{X_i}\right) \tag{2}$$

式中, $\overline{X_i}$为第 i 级团聚体平均直径(本研究各级团聚体平均直径取值分别为大团聚体(6 mm)、较大团聚体(1.125 mm)、微团聚体(0.151 5 mm)、黏粉粒组分(0.026 5 mm), W_i 为第 i 级团聚体的质量.

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{X<0.25}}{M_{\mathrm{T}}} \tag{3}$$

式中, $M_{X<0.25}$为粒径 <0.25 mm 团聚体的重量, M_{T} 为团聚体总重量;

分形维数 D 的计算采用杨培岭等[15] 推导的公式:

$$\frac{M_{r<\overline{X}_i}}{M_{\mathrm{T}}} = \left[\frac{\overline{X}_i}{X_{\max}}\right]^{3-D} \tag{4}$$

式中, $\overline{X_i}$为第 i 级团聚体平均直径, $M_{r<\overline{X}_i}$为粒径小于 X_i 的团聚体的质量分数, M_{T} 为团聚体总重量, $X_{\max}$为团聚体的最大粒径, 本研究中为 10 mm.

1.3 数据分析

数据处理采用 SPSS 21.0 进行统计分析, 采用 LSD 法对各处理的数据进行方差分析和显著性检验, 显著性水平为 0.05, 采用 Excel 2016 软件绘图制表.

2 结果与分析

2.1 不同林分土壤团聚体分布特征

一般将 >0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体, 该部分团聚体含量越高, 越有利于维持土壤结构的稳定性[16]. 不同林分下土壤团聚体分布如表 3 所示, 除阔叶林的 >2 mm 粒级团聚体含量随着土层的加深而降低外, 其他林分的各粒级土壤团聚体含量在整个土壤剖面上没有表现出明显的规律. 在各土层中, 竹林以 >2 mm 粒级团聚体所占质量分数最高, 为 30.73% ~ 53.08%, 显著高于针叶林和混交林, 且竹林的 >2 mm 粒级团聚体含量分别在 40 ~ 60 cm 和 20 ~ 40 cm 土层中表现最高, 而混交林和针叶林的 >2 mm 粒级土壤团聚体均以 0 ~ 20 cm 土层含量最高. 阔叶林和混交林在 0 ~ 100 cm 土层的团聚体组成中均以 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体所占比例最高, 其中混交林为 48.69% ~ 52.44%, 显著高于其他粒级团聚体, 阔叶林为 36.27% ~ 44.67%, 显著高于 <0.25 mm 粒级团聚体含量($P<0.05$), 其中混交林的 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体在各土层中的含量基本一致. 在整个土层中, 针叶林团聚体组成较为复杂, 2 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体含量相近, 均介于 31.46% ~ 36.75%, 其中针叶林的 2 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体含量在 40 ~ 60 cm 和 0 ~ 20 cm 土层表现最高.

2.2 不同林分土壤团聚体稳定性特征

不同林分土壤团聚体稳定性特征如表 4 所示, 随着土层加深, 阔叶林的 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值逐渐降低, 而其他林分则无明显规律, 混交林的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值在 0 ~ 20 cm 土层最高, 而竹林的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层最高, 且各林分 0 ~ 20 cm 土层的 D 值均最低, 但总体上同一林分的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 和 D 值在整个土层中差异不显著, 即各土层的土壤团聚体稳定性不相上下. 在各土层中, 竹林的 $R_{0.25}$值较高, 而针叶林最低, 其在整个土壤剖面上 $R_{0.25}$的平均值仅为 52.58%, 显著低于其他林分; 竹林的 MWD 值比其他林分高, 且显著高于针叶林和混交

林；不同林分下土壤团聚体的 GMD 与 MWD 有相似的分布规律，除 20 ~ 40 cm 土层，竹林在其他各土层的 GMD 值均高于其他林分，且显著高于针叶林和混交林. 竹林土壤团聚体的 D 值在整个土层中为 2.52 ~ 2.64，比其他林分低，表明竹林更有利于提高土壤团聚体稳定性. 而在 0 ~ 20 cm 土层，针叶林的 D 值显著高于其他林分，且在 20 ~ 100 cm 土层也高于其他林分，但不显著，表明针叶林不利于提高土壤团聚体稳定性. 总体上，4 种林分中竹林的团聚体稳定性较高，针叶林较差.

表 3　不同林分下土壤团聚体分布特征[1)]/%

Table 3　Distribution of soil aggregates under different stands/%

土层/cm	林分	团聚体粒径/mm			
		>2	2 ~ 0.25	0.25 ~ 0.053	<0.053
0 ~ 20	竹林	45.45 ± 9.39Aa	25.45 ± 8.98Bb	20.39 ± 5.45Ab	8.71 ± 4.78Bb
	针叶林	19.36 ± 1.91Bbc	32.26 ± 2.53Bab	13.42 ± 1.90ABc	34.96 ± 9.27Aa
	阔叶林	36.96 ± 2.30ABa	38.07 ± 6.30ABa	7.31 ± 1.97Bb	17.67 ± 4.06Bb
	混交林	22.79 ± 5.12ABb	50.08 ± 2.38Aa	17.34 ± 1.90ABb	13.58 ± 0.70Bb
20 ~ 40	竹林	39.12 ± 5.13ABa	28.95 ± 4.54Bab	15.59 ± 5.46Ab	16.34 ± 5.03Bab
	针叶林	16.77 ± 2.58BCb	35.82 ± 5.45Ba	15.94 ± 2.98Ab	31.46 ± 10.14Aab
	阔叶林	36.37 ± 3.71ABCa	36.27 ± 5.14ABa	14.36 ± 7.62Ab	13.01 ± 1.07Bb
	混交林	10.77 ± 7.54Cc	51.33 ± 4.47Aa	26.03 ± 2.68Ab	11.87 ± 1.39Bc
40 ~ 60	竹林	53.08 ± 6.28Aa	20.26 ± 5.86Bb	22.43 ± 5.14Ab	4.24 ± 6.59Cb
	针叶林	17.04 ± 7.30Bb	36.75 ± 5.37ABa	13.41 ± 2.01Ab	32.80 ± 3.48Aa
	阔叶林	15.61 ± 9.26Bb	44.67 ± 1.54Aa	16.90 ± 4.65Ab	22.82 ± 6.20ABb
	混交林	14.40 ± 8.78Bb	48.69 ± 0.42Aa	26.26 ± 1.28Ab	10.65 ± 2.22Cb
60 ~ 100	竹林	30.73 ± 3.89ABa	32.56 ± 4.40ABa	29.73 ± 2.14Aa	6.98 ± 2.17Ca
	针叶林	18.65 ± 9.98BCab	33.66 ± 6.73ABa	14.92 ± 5.54Bb	32.77 ± 2.79Aa
	阔叶林	7.75 ± 0.56Cc	44.39 ± 1.86ABa	22.99 ± 2.68ABb	24.87 ± 1.46Bb
	混交林	16.36 ± 1.59BCb	52.44 ± 8.81Aa	20.94 ± 5.63ABb	10.26 ± 6.50Cb

1) 列中不同大写字母表示同一土层和团聚体粒径下不同林分之间差异显著($P < 0.05$)，行中不同小写字母表示同一土层和林分下不同团聚体粒径之间差异显著($P < 0.05$)

表 4　林分类型对土壤团聚体稳定性的影响[1)]

Table 4　Effect of stand type on soil aggregate stability

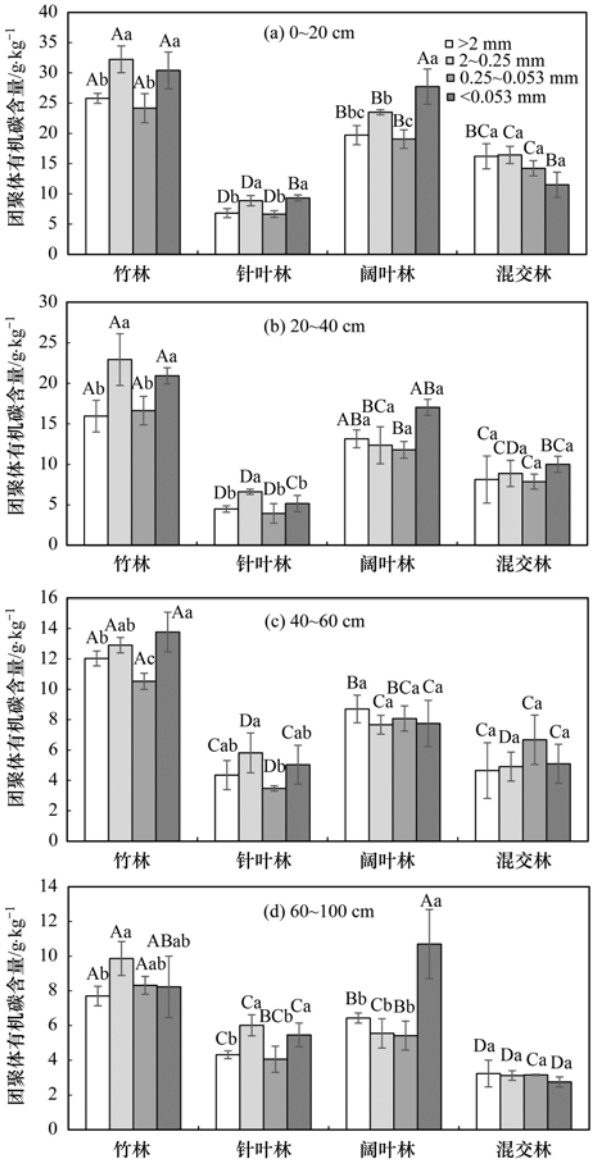
项目	林分	土层/cm			
		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 100
$R_{0.25}$/%	竹林	70.90 ± 17.19Aa	68.08 ± 6.20ABa	73.34 ± 9.01Aa	63.29 ± 5.31Aa
	针叶林	51.63 ± 9.42Ba	52.59 ± 4.37Ba	53.79 ± 5.47Ba	52.31 ± 4.19Ba
	阔叶林	75.03 ± 6.03Aa	72.63 ± 8.67Ca	60.28 ± 6.32Ca	52.14 ± 2.41Ca
	混交林	72.87 ± 5.71Aa	62.10 ± 8.14Aba	63.09 ± 6.54Aa	68.80 ± 3.23Aba
MWD/mm	竹林	3.05 ± 0.62Aa	2.70 ± 0.69Aa	3.45 ± 0.67Aa	2.26 ± 1.06ABa
	针叶林	1.55 ± 0.68Ca	1.44 ± 0.74Ba	1.47 ± 0.31Ba	1.53 ± 0.64BCa
	阔叶林	2.66 ± 0.66Aa	2.62 ± 0.75Aa	1.47 ± 0.56Ba	1.00 ± 0.05Ca
	混交林	1.96 ± 0.20BCa	1.27 ± 0.16Ba	1.45 ± 0.60Ba	1.61 ± 0.33Ba
GMD/mm	竹林	1.27 ± 0.19Aa	0.98 ± 0.13ABa	1.54 ± 0.49Aa	0.89 ± 0.03ABa
	针叶林	0.35 ± 0.08Ba	0.37 ± 0.04Ba	0.34 ± 0.01Ba	0.39 ± 0.04Ba
	阔叶林	1.12 ± 0.18ABa	1.16 ± 0.38ABa	0.61 ± 0.06Ba	0.32 ± 0.04Ba
	混交林	0.71 ± 0.12Ba	0.52 ± 0.08Ba	0.60 ± 0.02Ba	0.66 ± 0.07Ba
D	竹林	2.52 ± 0.12Ba	2.64 ± 0.17Ba	2.55 ± 0.10Ba	2.52 ± 0.04Ca
	针叶林	2.79 ± 0.05Aa	2.81 ± 0.07Aa	2.80 ± 0.01Aa	2.78 ± 0.08Aa
	阔叶林	2.64 ± 0.09Ba	2.66 ± 0.06ABa	2.77 ± 0.02ABa	2.73 ± 0.02Aa
	混交林	2.59 ± 0.05Ba	2.63 ± 0.04Ba	2.61 ± 0.04Ba	2.57 ± 0.01BCa

1) 行中不同小写字母表示同一林分不同土层之间差异显著($P < 0.05$)，列中不同大写字母表示同一土层不同林分之间差异显著($P < 0.05$)

2.3　不同林分土壤团聚体有机碳分布特征

不同林分土壤团聚体有机碳分布如图 1 所示. 4 种林分各粒级土壤团聚体有机碳含量均表现为 0 ~ 20 cm 土层最高，除针叶林外，其他林分各粒级土壤团聚体有机碳含量均随着土层增加而降低，而针叶林在 0 ~ 60 cm 土层中，各粒级土壤团聚体有机碳含量也随土层的增加而降低. 在 0 ~ 20 cm 土层中，除混交林，各林分均表现出随着团聚体粒径

的减小，土壤团聚体有机碳含量呈先增加后减少再增加的趋势，但在其他土层中却没有表现出一定的规律性. 在 0 ~ 20 cm 土层中，竹林各粒级土壤团聚体有机碳含量最高，为 24.18 ~ 32.23 $g \cdot kg^{-1}$，显著高于其他林分，而针叶林的最低，为 6.65 ~ 9.31 $g \cdot kg^{-1}$；在 20 ~ 60 cm 土层中，同样是竹林各粒级土壤团聚体有机碳含量最高，而针叶林各粒级土壤团聚体有机碳含量相对较低；而在 60 ~ 100 cm 土层中，各粒级土壤团聚体有机碳含量表现为竹林和阔叶林相对较高，混交林最低. 不同粒径间团聚体有机碳含量无明显规律，但大多以 2 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量较高.



图中大写字母表示同一土层中每一粒径团聚体有机碳在不同林分间的差异性($P < 0.05$)，小写字母表示同一土层同一林分下不同粒径土壤团聚体有机碳间的差异($P < 0.05$)

图 1 不同林分下土壤剖面团聚体有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content in soil aggregates under different stands

2.4 不同林分土壤团聚体有机碳相对贡献率

不同林分下土壤团聚体有机碳相对贡献率变化如图 2 所示，在整个土层中，竹林土壤团聚体有机碳总体上在 >2 mm 粒级上分布最高，竹林 >2 mm 粒级团聚体有机碳贡献率为 27.44% ~ 53.47%；阔叶林和混交林以 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率最高，在 0 ~ 100 cm 土层中，阔叶林 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率为 35.89% ~ 43.26%，混交林为 44.63% ~ 53.03%；而针叶林则以 2 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率最高. 而在同一林分的不同土层之间，团聚体有机碳的相对贡献率未表现出明显规律.

3 讨论

3.1 不同林分土壤团聚体的形成和分布

土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元，其形成过程是一系列复杂的生物、物理和化学反应的综合[17]，其组成和分布对协调土壤养分释放和土壤固碳作用有重要意义. 本研究在 0 ~ 20 cm 土层中，不同林分下土壤 >2 mm 粒级团聚体分布表现为竹林含量最高，而针叶林最低，其中竹林土壤 >2 mm粒级团聚体含量显著高于针叶林. 这可能是由于竹林地表凋落物丰富，生物量大，易于分解，外源有机质的输入提高了表层土壤有机碳含量，促进了土壤中较小粒径团粒结构胶结形成大团聚体；而针叶林土壤真菌生物量很低，使得土壤中缺少真菌菌丝，而真菌菌丝的缠绕作用对土壤团聚体的形成至关重要[18]. 因此，针叶林土壤中 >2 mm 粒级团聚体含量很低. 李鉴霖等[19]研究了不同土地利用方式下土壤团聚体分布，发现阔叶林土壤以 >2 mm 粒级团聚体为主. 本研究中，阔叶林土壤以 >0.25 mm粒级团聚体为主，且阔叶林在整个土层的团聚体组成中均以 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体所占比例最高. 这可能是由于本研究所选取的阔叶林植被生长旺盛，其较厚的凋落物层可以有效减缓降雨对表层土壤的冲蚀，减少了对表层土壤 >0.25 mm 粒级团聚体的冲击破坏，同时丰富的植被可以降低地表雨水产生的超渗径流，保护土壤团粒结构不被破坏[9]. 另一方面，植物根系分布和根系分泌物不同也会造成土壤团聚体分布和稳定性的差异. 植物根系所分泌的高分子黏质也是土壤团聚过程中重要的胶结物质，可以有效胶结土壤颗粒、矿物和微团聚体，促进大团聚体的形成[20]. 阔叶林由于植物根系分布广，根系分泌的高分子黏质较多，因此提高了土壤大团聚体含量.

土壤团聚体的平均重量直径(MWD)和平均几

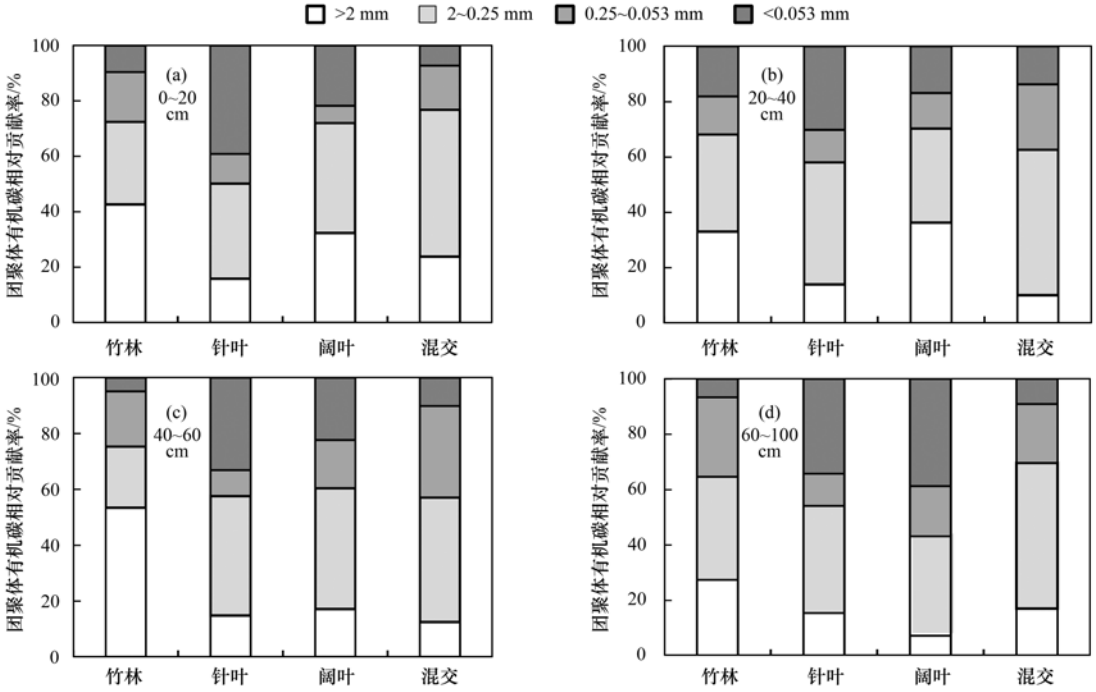


图 2　不同林分下土壤剖面团聚体有机碳相对贡献率

Fig. 2　Relative contribution rate of different types of organic carbon in soil aggregates

何平均直径(GMD)可以反映土壤团聚体分布及稳定性的状况，也表示了土壤结构的稳定性，MWD 和 GMD 值越大，表明土壤大团聚体含量越高，土壤团聚程度越高，土壤结构更加稳定[21]. 本研究中，在 0 ~ 20 cm 土层，竹林和阔叶林的 MWD 值显著高于其他林分，竹林的 GMD 值显著高于针叶林和混交林，表明在 0 ~ 20 cm 土层中，竹林土壤团聚体稳定性高于其他林分. 刘艳等[12]的研究表明，同一林分中，随土层的加深，土壤水稳性大团聚体含量和稳定性均呈下降趋势. 本研究得出，随着土层加深，阔叶林的 > 2 mm 粒级团聚体含量和 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值逐渐减低，而混交林和针叶林的 > 2 mm 粒级团聚体均在 0 ~ 20 cm 土层中含量最高. 这可能是由于阔叶林、混交林和针叶林土壤地表枯落物较多，有机质含量较高，因而促进了大团聚体的形成，下层土壤的有机质含量相对较低，土壤大团聚体形成量则较少，因此，表层土壤水稳性大团聚体含量和稳定性均高于下层土壤. 但本研究中除阔叶林外，同一林分的水稳性大团聚体含量和稳定性在整个土层中并没有表现出一定的规律性，如竹林的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值也分别在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层最高，这与竹林的土壤水稳性大团聚体含量在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层表现最高一致. 这可能是因为在竹林的下层土壤中，土壤中氧化反应也可以加剧土壤团聚作用，提高大团聚体含量；另一方面，下层土壤大团聚体含量和稳定性的提高可能与其含有的黏土矿物和铁铝氧化物有关，有研究表明，土壤颗粒团聚过程与土壤有机质和黏土矿物等相关，当土壤有机质含量较高时，有机质在团聚过程中占主导地位，反之则是黏土矿物和铁铝氧化物[22]. 土壤团聚体的分形维数(D)也是反映土壤团聚体稳定性的一个重要指标，在整个土层中，竹林土壤团聚体分形维数为 2.52 ~ 2.64，低于其他林分，表明竹林更有利于提高土壤团聚体的稳定性，因此，本研究中竹林土壤团聚体稳定性高于其他林分. 但周纯亮等[23]研究了中亚热带 4 种林分下土壤团聚体的分布特征，发现毛竹林土壤团聚体稳定性低于其他 3 种林分；吕文星等[24]关于四面山 4 种不同林地土壤团聚体稳定性的研究也发现毛竹林土壤团聚体稳定性低于阔叶林，本研究与其结果相反，其原因可能是本研究中竹林地表凋落物丰富，生物量大，同时较其他林分的地表枯枝落叶更易分解，土壤有机碳含量较高，在有机碳的胶结作用下促进了大团聚体的形成，同时本研究所选取的样地受人为干扰较弱，大团聚体得到较好地保护.

3.2　不同林分土壤团聚体有机碳的含量和分配

在整个土层中，不同林分下土壤各粒径团聚体有机碳含量表现为随着土层加深而减少的趋势. 这与黄晓强等[25]的研究结果相同，这可能是因为地表积累的动植物残体在微生物的分解下作为外源有机碳源进入土壤，促进了土壤表层中的微粒有机质胶结进入团聚体内部，而随着土壤加深这种促进作用逐渐减弱. 而本研究中，不同林分团聚体有机碳

含量主要分布在 2 ~ 0.25 mm 和 < 0.053 mm 粒级中，这与谢锦升等[26]和李娟等[27]的研究结果相似. 这可能是由于森林土壤拥有良好的水热条件，其土壤动物和微生物活性较强，且大团聚体中一般较其他粒级团聚体含有较多的菌丝，而处于分解状态的菌丝可以提高大团聚中有机碳的浓度[28]，因此 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体中的有机碳含量较高. 此外，< 0.053 mm 粒级团聚体中分布较多的 < 0.2 μm 孔径孔隙，其孔隙小于细菌所能通过的限度(3 μm)，使该粒级有利于胡敏酸的形成和积累[29]，从而增加了 < 0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量.

通过比较不同粒级团聚体有机碳的分配比例，可以了解土壤中有机碳在团聚体中的分布和土壤固碳能力，进而揭示土壤有机碳的保护机制. 本研究中，不同林分下土壤团聚体有机碳以 < 0.053 mm 粒级团聚体分布较高，但除针叶林和 60 ~ 100 cm 土层的阔叶林外，< 0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率均低于 > 0.25 mm 粒级的贡献率，而除针叶林外，其他 3 种林分的 > 2 mm 粒级团聚体有机碳贡献率较高，与其团聚体分布相一致. 聂富育等[30]通过对四川盆地 4 种人工林土壤团聚体有机碳的研究也得出了相同的结论. 团聚体有机碳贡献率实际上是由团聚体比例和团聚体有机碳含量共同决定的. 虽然 < 0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量相对较高，但该粒级团聚体含量所占的比例较少，其有机碳贡献率不一定高. 不同林分之间，竹林的 > 2 mm 粒级团聚体有机碳贡献率高于其他林分，而针叶林土壤团聚体有机碳贡献则以 < 0.053 mm 粒级最高. 在土壤结构中，大团聚体是维持其稳定性的基础，同时也是有机碳的主要储存场所，土壤大团聚体的周转与有机碳的固定密切相关[31]. 因此，本研究中不同林分下竹林的土壤固碳能力较强，而针叶林则较弱.

4 结论

(1) 阔叶林 > 2 mm 粒级的团聚体含量和 MWD、GMD 及 $R_{0.25}$ 均随土层的加深而降低，而其他林分在整个土层中则无明显规律. 在整个土层中，> 2 mm 粒级团聚体是竹林的优势粒径，所占质量分数为 30.73% ~ 53.08%；阔叶林和混交林的团聚体组成中优势粒径为 2 ~ 0.25 mm. 相比其他林分，竹林团聚体的 MWD、GMD、$R_{0.25}$ 值较高，分形维数最低，表明竹林有稳定的土壤团粒结构，能够加强对土壤有机碳的物理保护，提高土壤团聚体固碳机制.

(2) 除针叶林外，其它林分土壤团聚体有机碳含量均随着土层加深而降低，其中竹林土壤团聚体有机碳含量显著高于针叶林和混交林($P < 0.05$)；而在同一土层中，不同林分下团聚体有机碳主要分布在 2 ~ 0.25 mm 和 < 0.053 mm 粒级. 同一林分的不同粒级团聚体有机碳贡献率差异比较明显，不同林分下土壤团聚体有机碳相对贡献率也存在着显著差异，其中竹林 > 2 mm 粒级团聚体有机碳贡献率较高，为 27.44% ~ 53.47%，表明竹林的土壤团聚体固碳能力较强.

参考文献：

[1] 于法展，张茜，张忠启，等. 庐山不同森林植被对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究，2016，**23**(6)：15-19.
Yu F Z, Zhang Q, Zhang Z Q, *et al*. Effects of different types of forest vegetation on the distribution of soil aggregate and its organic carbon in Lushan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, **23**(6): 15-19.

[2] Yin Y, Liang C H, Pei Z J. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China[J]. Catena, 2015, **133**: 412-419.

[3] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 2000, **51**(4): 595-605.

[4] 刘中良，宇万太，周桦，等. 不同有机厩肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 土壤学报，2011，**48**(6)：1149-1157.
Liu Z L, Yu W T, Zhou H, *et al*. Effect of application rate of barnyard manure on organic carbon fraction of soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, **48**(6): 1149-1157.

[5] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil[J]. Geoderma, 2004, **120**(3-4): 273-282.

[6] 潘艳斌，朱巧红，彭新华. 有机物料对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报，2017，**31**(2)：209-214.
Pan Y B, Zhu Q H, Peng X H. Effects of organic materials on soil aggregation stability in red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(2): 209-214.

[7] 田慎重，王瑜，张玉凤，等. 旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. 农业工程学报，2017，**33**(24)：133-140.
Tian S Z, Wang Y, Zhang Y F, *et al*. Rotary tillage and deep loose and straw return increase farmland soil aggregate carbon pool[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(24): 133-140.

[8] 祁迎春，王益权，刘军，等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报，2011，**27**(1)：340-347.
Qi Y C, Wang Y Q, Liu J, *et al*. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, **27**(1): 340-347.

[9] 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)：177-182，189.
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, 189.

[10] 张大鹏, 范少辉, 蔡春菊, 等. 川南不同退耕还竹林土壤团聚特征比较[J]. 林业科学, 2013, **49**(1): 27-32.
Zhang D P, Fan S H, Cai C J, *et al*. Soil aggregates of returning farmland to different bamboo forests in southern Sichuan Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, **49**(1): 27-32.

[11] 王棣, 耿增超, 佘雕, 等. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J]. 生态学报, 2015, **35**(16): 5421-5429.
Wang D, Geng Z C, She D, *et al*. Soil organic carbon storage and vertical distribution of carbon and nitrogen across different forest types in the Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(16): 5421-5429.

[12] 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.
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] 刘勇. 重庆缙云山森林生态系统服务功能及其价值评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.

[14] 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.

[15] 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. Fractal features of soils characterized by grain weight distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, **38**(20): 1896-1899.

[16] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, Malo D D. Aggregate sizes and stability in cultivated south dakota prairie ustolls and usterts[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, **68**(4): 1360-1365.

[17] 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.

[18] 字洪标, 向泽宇, 王根绪, 等. 青海不同林分土壤微生物群落结构(PLFA)[J]. 林业科学, 2017, **53**(3): 21-32.
Zi H B, Xiang Z Y, Wang G X, *et al*. Profile of soil microbial community under different stand types in Qinghai Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, **53**(3): 21-32.

[19] 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.

[20] 毛艳玲, 杨玉盛, 刑世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(4): 132-137.
Mao Y L, Yang Y S, Xing S H, *et al*. Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, **22**(4): 132-137.

[21] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2114-2120.
Li J Z, Dai K, Zhang L M, *et al*. Effects of biochar application on soil organic carbon distribution and soil aggregate composition of red soils in Yunnan tobacco planting area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2114-2120.

[22] 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.

[23] 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.
Zhou C L, Wu M. Distribution of soil aggregates and SOC of aggregates under four forest types in mid-subtropics[J]. Soils, 2011, **43**(3): 406-410.

[24] 吕文星, 张洪江, 王伟, 等. 重庆四面山不同林地土壤团聚体特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 192-197, 202.
Lü W X, Zhang H J, Wang W, *et al*. Characteristics of soil aggregates in different forestlands in Simian Mountains, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(4): 192-197, 202.

[25] 黄晓强, 信忠保, 赵云杰, 等. 北京山区典型人工林土壤团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(1): 236-243.
Huang X Q, Xin Z B, Zhao Y J, *et al*. Soil aggregate composition and distribution characteristics of soil organic carbon of typical plantations in Mountainous Area of Beijing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(1): 236-243.

[26] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 702-709.
Xie J S, Yang Y S, Chen G S, *et al*. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(2): 702-709.

[27] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(7): 2147-2156.
Li J, Liao H K, Long J, *et al*. Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(7): 2147-2156.

[28] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(14): 2099-2103.

[29] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(6): 2642-2650.
Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(6): 2642-2650.

[30] 聂富育, 杨万勤, 杨开军, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤团聚体及有机碳特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23**(3): 542-547.
Nie F Y, Yang W Q, Yang K J, *et al*. Soil aggregates and organic carbon in four plantations on the western edge of the Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, **23**(3): 542-547.

[31] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, **28**(4-5): 665-676.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2019

CONTENTS