

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201703013

引文格式: 孙筱璐, 唐佐芯, 尤业明, 等. 气候和林分类型对土壤团聚体有机碳的影响 [J]. 广西植物, 2018, 38(3):341–351
SUN XL, TANG ZX, YOU YM, et al. Effects of climate and forest types on soil aggregation organic carbon [J]. Guihaia, 2018, 38(3):341–351

气候和林分类型对土壤团聚体有机碳的影响

孙筱璐¹, 唐佐芯¹, 尤业明^{1,2*}, 曹元帅¹, 赵海雷¹

(1. 北京林业大学 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 广西大学 林学院, 南宁 530004)

摘 要: 该研究选择我国分布于亚热带、暖温带和寒温带的三个样点 8 种林分(包括阔叶林、混交林和针叶林)下表层 0~20 cm 的土壤为研究对象,利用干筛法进行大团聚体和微团聚体分级,测定了各团聚体组分的有机碳量和有机碳百分比,并分析他们与气候、植被和土壤环境变量之间的关系。结果表明:土壤大团聚体和微团聚体有机碳量都受到气候的显著影响,表现为土壤大团聚体和微团聚体有机碳量随年均温的增高而降低,经分析这与低温抑制土壤微生物分解活动有关。土壤团聚体有机碳百分比受到林分类型的影响显著,表现为阔叶林土壤团聚体有机碳百分比高于针叶林,这与林分凋落物的质量有关。此外,土壤 pH 值和土壤质地也影响土壤团聚体有机碳百分比。这表明气温上升和人为干扰导致的林分类型改变都可能引起土壤团聚体有机碳的下降,加剧气候变化。该研究结果有助于了解土壤团聚体有机碳的变异规律,为预测全球变化下土壤有机碳响应提供数据支持。

关键词: 大团聚体, 微团聚体, 土壤有机碳, 气候, 林分类型

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)03-0341-11

Effects of climate and forest types on soil aggregation organic carbon

SUN Xiaolu¹, TANG Zuoxin¹, YOU Yeming^{1,2,*}, CAO Yuanshuai¹, ZHAO Hailei¹

(1. Ministry of Education Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Study on effects of climate and forest types on soil organic carbon (SOC) in aggregation would attribute much to a better understanding of the variation pattern of soil aggregation organic carbon (OC), and provide researchers with data support for better predicting SOC response to global climate change. We sampled 0–20 cm surface soil layers from eight forests (including broad-leaved, mingled and coniferous forests) in three climate zones, subtropical, warm temperate and cool temperate zone. We also classified macro-aggregation and micro-aggregation with dry sieve method, measured their OC contents and percentages, and analyzed the relationship between aggregation OC and environmental variables. The results showed that both macro-aggregation and micro-aggregation OC contents were significantly affected by climate, and the OC contents of both macro-aggregation and micro-aggregation decreased with the increasing mean

收稿日期: 2017–05–19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403205) [Supported by the National Basic Research Program of China (2011CB403205)]。

作者简介: 孙筱璐(1988–), 女, 山东青岛人, 博士, 主要从事森林生态系统土壤碳固持调控机理研究, (E-mail) sun_xiaolu@126.com。

* 通信作者: 尤业明, 博士, 主要从事森林生态系统土壤碳固持调控机理研究, (E-mail) youyeming@163.com。

annual temperature (MAT). We suggested that this results were caused by the inhibited microbial decomposition activity by the low temperature in the higher latitude area. Aggregation OC percentage was significantly affected by forest types: higher in broad-leaved forests and lower in coniferous forests, resulting from different litter qualities and quantities between various forest types. In addition, soil pH and texture could also affect soil aggregation OC. The aforementioned results indicated that temperature rise and forest structure variation by human disturbance might cause soil aggregation OC content decrease, and lead exacerbate global climate change.

Key words: macro-aggregation, micro-aggregation, soil organic carbon, climate, forest types

工业革命以来,森林、草地等植被的破坏及煤炭、石油等化石燃料的使用导致大气中的 CO_2 含量呈指数形式增长,引起全球气候变化。土壤表层拥有15 000亿 t 的碳储量(Stockmann et al, 2013),仅次于海洋的全球第二大碳库,因此土壤碳库的变化对大气中碳浓度的影响要比人类活动大得多(Kirschbaum, 2000; Stockmann et al, 2013)。其中,森林生态系统拥有陆地生态系统中最大的土壤碳库,其碳储量占全球土壤碳储量的39%(刘世荣等, 2011),对吸碳储碳、调节气候、维护生态平衡起着十分重要的作用。森林土壤有机碳的研究对掌握全球土壤碳库的变化规律有着重要意义。

土壤团聚体是一种由土壤有机质和矿物颗粒之间连接形成的土壤结构基本单元(Oades, 1993)。在土壤团聚体的形成过程中,通过矿物互作(即土壤中的有机质通过化学键与矿物表面或金属离子相互作用)可以形成稳定的有机矿物复合体,这些有机矿物复合体可以进一步通过有机质的粘合作用,形成更大的团聚体(Dexter et al, 2008; Malamoud et al, 2009)。土壤团聚体一方面能够稳定土壤结构,减少土壤侵蚀(史奕等, 2002)。另一方面还可以通过自身的结构将土壤有机碳与土壤微生物和酶在空间上隔离开,从而降低土壤有机碳的分解速率,增加土壤有机碳的稳定性和土壤碳储量,提高土壤肥力与质量(Lützow et al, 2006)。土壤团聚体根据其大小可以分为大团聚体(macro-aggregation, 直径大于250 μm)和微团聚体(micro-aggregation, 直径小于250 μm)(Amézketa, 1999)。根据土壤有机碳周转时间的长短可以分为瞬态团聚体(transient aggregation)、暂时团聚体(temporary aggregation)和永久团

聚体(persistent aggregation)(Tisdall & Oades, 1982)。根据水稳性又可以分为水稳态团聚体(water-stable aggregation)和非水稳态团聚体(Carter et al, 2003)。不同级别的团聚体对协调土壤养分的保持与供应、改善孔隙组成有不同的作用。微团聚体通过阳离子共价桥与土壤粘粒相连,具有较低碳氮比,较长周转时间和较高稳定性(Amézketa, 1999; Dexter, 1988; Dexter et al, 2008)。大团聚体通过根系、菌丝、菌根等有机质的作用将土壤中的颗粒性有机碳、微团聚体和沙粒等连接在一起,稳定性较差,对环境变化和管理措施(特别是耕作措施)较敏感(Bossuyt et al, 2002; Six et al, 2000)。

气候对于森林土壤团聚体有机碳的影响主要体现在温度的影响上,温度一方面通过影响土壤有机碳库的碳输入(温度升高,生态系统生产力随之升高,土壤有机碳输入也增多)来影响土壤团聚体的合成(Smith, et al, 2008; 彭新华等, 2004)。另一方面通过影响土壤分解者(真菌、细菌和土壤动物)的活动来影响土壤团聚体形成(Amézketa, 1999)。如向业凤等(2014)在六盘山区阔叶林的研究表明土壤团聚体有机碳含量和密度随着海拔的升高而升高,与温度随海拔升高而降低有关。植被因子对土壤团聚体有机碳也有显著影响,植被来源(含凋落物和根系脱落物)的土壤有机质是土壤中酶促底物的主要供源,随着植被类型的改变,输入土壤植物残体的质和量也随之改变(Smith et al, 2008)。这不仅会通过影响土壤有机碳的化学结构来影响土壤有机矿物复合体和团聚体的形成(Tisdall & Oades, 1982),而且也会通过改变土壤微生物的群落结构,特别是菌根真菌,来影响团

聚体的形成 (Amézqueta, 1999)。如不同生态系统间的研究表明, 森林土壤团聚体有机碳含量一般大于草地, 草地大于农田 (Six et al, 2002b; Schwendenmann & Pendall, 2006; 李娟等, 2013)。土壤类型、温度、水分以及 pH 值等理化特性也能影响土壤团聚体有机碳的形成。如土壤矿物的比表面积、反应位点、土壤酸碱度、土壤矿物类型、粘粒含量、金属离子含量和土壤有机质的化学构象等都会引起土壤团聚体有机碳的变化 (Lützow et al, 2006; Plante et al, 2006; Jones & Singh, 2014)。

综上所述, 许多因子都会对土壤团聚体有机碳产生影响, 但相关机制尚不清楚。我国目前研究中, 针对土壤团聚体有机碳的研究主要集中于农田生态系统, 一般是研究耕作方式、施肥方式等管理措施对土壤团聚体有机碳的影响 (田慎重等, 2013; 王丽等, 2014; 陈晓芬等, 2013; 李鉴霖等, 2014)。而针对其他生态系统, 如森林和草原生态系统土壤团聚体有机碳的研究却还较少。在全球气候变化的背景下, 研究土壤团聚体有机碳在不同气候条件和森林林分类型下的差异, 以此分析气候、植被和土壤等环境因子对土壤团聚体有机碳的影响, 有助于理解土壤团聚体有机碳对气候和环境变化的响应, 为预测未来气候变化的方向提供理论和数据支持。

本研究利用空间序列代替时间序列的方法, 选择位于全国三个主要气候带, 亚热带、暖温带和寒温带 (年均温为 $-0.5 \sim 20.9$ °C) 的三个样点中具有代表性的八种林分类型, 进行土壤团聚体的分组和各个团聚体组分有机碳的测定。通过分析各个环境因子和不同团聚体有机碳组分的关系, 希望解决以下科学问题: (1) 不同纬度和不同林分类型下的表层土壤团聚体有机碳量和百分比有着怎样的差异? (2) 这些差异主要受到哪些因子的影响? (3) 实验结果对预测未来全球气候变化背景下的土壤有机碳响应有哪些启示?

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取的三个样点分别是位于亚热带的

鼎湖山自然保护区 (DH)、位于暖温带的宝天曼自然保护区 (BT) 和位于寒温带的长白山自然保护区 (CB)。在每个样点选择了具有代表性的阔叶林 (broadleaf)、混交林 (mixed) 和针叶林 (conifer) 类群进行研究。因为宝天曼样点没有大面积的针叶林, 所以本研究共在三个样点的八种林分类型中进行土壤取样和团聚体分组。

亚热带的鼎湖山自然保护区样点位于广东省肇庆市 ($112^{\circ}30'39''$ — $112^{\circ}33'41''$ E, $23^{\circ}09'21''$ — $23^{\circ}11'30''$ N) (Zhang et al, 2013), 属南亚热带季风气候, 年均温度 20.8 °C, 年降水量 2103 mm, 土壤类型为砂质岩风化而成的铁铝始成土 (FAO-UNESCO 土壤分类系统) (Zhou et al, 2005)。本研究选取该保护区具有代表性的 3 种林分类型, 分别为季风常绿阔叶林、针阔混交林和马尾松林。季风常绿阔叶林分布在保护区的核心区, 保存较完好, 已有 400 多年的历史, 是南亚热带代表性的林分类型 (莫江明等, 2004); 针阔混交林为人工种植的马尾松 (*Pinus massoniana*) 因一些阔叶树种入侵而自然形成的过渡类型针叶、阔叶混交林, 林龄约为 85 a; 马尾松林为人工种植 (1930 年左右), 种植后常受人为活动干扰 (主要为收割凋落物和林下层), 林龄与混交林的基本一致 (莫江明等, 2004)。

暖温带的宝天曼自然保护区样点位于河南省南阳市内乡县 ($111^{\circ}46'55''$ — $112^{\circ}03'32''$ E, $33^{\circ}35'43''$ — $33^{\circ}20'12''$ N), 属温带季风气候。年平均温度 15.1 °C, 年降水量 900 mm, 土壤类型为砂质岩风化而成的不饱和始成土 (FAO-UNESCO 土壤分类系统) (You et al, 2014, 2016)。本研究选取该保护区具有代表性的两种林分类型, 分别为锐齿栎 (*Quercus aliena*) 林和锐齿栎华山松 (*Pinus armandii*) 混交林。锐齿栎华山松混交林是在 20 世纪 50 年代人工栽植华山松纯林基础上, 自然演变而成 (You et al, 2014, 2016)。

寒温带的长白山自然保护区样点位于吉林省东南部安图县、抚松县和长白县 3 县 ($127^{\circ}33'30''$ — $128^{\circ}16'48''$ E, $41^{\circ}42'45''$ — $42^{\circ}45'18''$ N) (Yang et al, 2010), 属温带大陆性季风气候, 年平均温度 2.1 °C, 年降水量 $600 \sim 900$ mm; 土壤类型

为火山灰烬上发育成的饱和始成土 (FAO-UNESCO 土壤分类系统) (Yang et al, 2010)。本研究选取该保护区具有代表性的三种林分类型, 分别为分布在海拔 500~1 100 m 的红松阔叶林、白桦山杨混交林和分布在 1 100~1 800 m 的云冷杉林。其中白桦山杨混交林在 20 世纪 40 年代的原始红松阔叶林皆伐迹地上形成 (杨丽韞等, 2007)。关于几种林分的更详细信息见表 1。

表 1 三个样点八种林分基本信息表
Table 1 Basic information of eight forests in three study sites of China

变量 Variable	鼎湖山 DH			宝天曼 BT		长白山 CB		
	阔叶林 Broad-leaved forest	混交林 Mingled forest	针叶林 Coniferous forest	阔叶林 Broad-leaved forest	混交林 Mingled forest	阔叶林 Broad-leaved forest	混交林 Mingled forest	针叶林 Coniferous forest
海拔 Altitude (m)	300	150	50	1 400	1 350	750	750	1 100
年均温 MAT (℃)	20.7	20.9	20.9	15.1	15.1	3.6	3.3	-0.5
年降水量 MAP (mm)	1 996	1 990	1 990	855	855	689	689	854
林龄 Age (a)	400	85	85	80	60	45	200	160
针叶树百分比 Conifer percentage (%)	0	40	100	0	50	0	15	100
木质素含量 Lignin content (%)	21.9	23.9	26.8	21.7	22.0	20.8	20.1	28.0
凋落物累积量 Litter biomass (t · hm ⁻²)	8.8	7.3	2.5	6.9	5.2	5.2	4.9	4.5
细根生物量 Fine-root biomass (t · hm ⁻²)	65.9	53.5	50.0	31.4	24.2	28.8	66.0	42.5
有机碳 SOC (g · kg ⁻¹)	56.2	62.1	54.9	59.5	70.1	90.4	104.2	73.0
总氮 TN (g · kg ⁻¹)	1.9	1.0	0.9	1.7	2.6	6.5	8.5	3.8
pH	4.2	3.8	4.0	4.6	4.6	5.5	5.3	4.6
沙粒 Sand (%)	27.6	29.2	44.7	24.0	6.0	7.3	6.1	45.1
粘粒 Clay (%)	13.7	10.9	8.4	13.0	10.9	6.4	10.6	11.4

1.2 样地布设、土样采集和土样处理

本研究于 2013 年 5—6 月进行了样地布设和土壤取样。样地布设方面, 每个研究样点的每种林分类型布设 5 个样地, 每个样地规格为 20 m × 20 m 样地规格, 共计布设样地 40 个; 样品采集方面, 每个样地采用“S”型取样法, 选取 24 个点, 利用 3 cm 直径土钻按照 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层进行取样; 土样处理方面, 对同一样地、同一土层土样进行混合, 风干后过 2 mm 孔径土壤筛, 并手工去除大的根系和石头。

1.3 团聚体分组及其有机碳含量的测定

本研究中土部分森林土壤粘性较大, 利用 Six et al (2002a) 改良的森林土壤团聚体的湿筛法进行分组时, 不同样品间对团聚体的破坏程度很难统一, 无法准确地分离团聚体。因此, 本研究均采用传统干筛法进行团聚体分组。同时, 为了区分团

聚体有机碳和轻组有机碳 (LFC), 使本研究的团聚体有机碳组分能够更好地代表物理隔离的有机碳组分, 进一步用湿筛法分离各粒径中沙粒和轻组组分, 并测定这些组分的有机碳含量, 以便在计算团聚体有机碳量时去除这部分有机碳的影响。

具体步骤: 取风干土样 25 g 置于 250 μm 孔径的土壤筛中, 加盖土壤筛盖, 避免土样逸出, 上下摇晃土壤筛直至无土样筛出为止, 这一过程一般持续 20~60 min, 土壤筛内剩余土样为干筛大于 250 μm 组分; 收集这部分组分, 烘干称重 (W₁); 将上一步筛出的土样用同样的方法过 53 μm 孔径土壤筛, 土壤筛内剩余土样为干筛 53~250 μm 组分; 收集该组分, 烘干称重 (W₂), 取部分测定含水量; 收集 53 μm 土壤筛筛出的土样, 烘干称重 (W₅₃)。同时, 取 25 g 风干土样, 用 10 mL 0.5 mol · L⁻¹ NaOH 溶液进行分散, 用湿筛法分别过

250 μm 和 53 μm 土壤筛、收集留在土壤筛上的沙粒(Sand)和轻组(LF)组分,称重并测定大于 250 μm 和 53~250 μm 筛上的沙粒碳含量(SandC)和组分干重(W_3 和 W_4)以及轻组碳含量(LFC)和组分干重(W_5 和 W_6)。

由于团聚体有机碳含量不能表征土壤有机碳在团聚中的分配情况,因此本研究计算了土壤大团聚体和微团聚体有机碳量(即 1 kg 原状土壤中该组分有机碳含量,单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$)和各组分的有机碳占总有机碳含量的百分比,相比较于土壤团聚体有机碳含量,这两个指标能更好地表征不同团聚体中的有机碳分配情况,指示土壤有机碳的物理保护程度。

各组分有机碳量的计算公式如下:

$$\text{Macro OC} = (\text{TOC}_{250} \times W_1 - \text{SandC}_{250} \times W_3 - \text{LFC}_{250} \times W_5) / W_{\text{sample}} \quad (1)$$

式中,Macro OC 表示大团聚体有机碳量; TOC_{250} 表示干筛大于 250 μm 组分的有机碳含量; W_1 表示干筛大于 250 μm 组分的重量; SandC_{250} 表示湿筛大于 250 μm 的沙粒碳含量; W_3 表示湿筛大于 250 μm 沙粒的重量; LFC_{250} 表示湿筛大于 250 μm 的轻组碳含量; W_5 表示湿筛大于 250 μm 轻组的重量。

$$\text{Micro OC} = (\text{TOC}_{53-250} \times W_2 - \text{SandC}_{53-250} \times W_4 - \text{LFC}_{53-250} \times W_6) / W_{\text{sample}} \quad (2)$$

式中,Micro OC 表示微团聚体有机碳量; TOC_{53-250} 表示干筛 53~250 μm 组分的有机碳含量; W_2 表示干筛 53~250 μm 组分的重量; SandC_{53-250} 表示湿筛 53~250 μm 组分的沙粒碳含量; W_4 表示湿筛 53~250 μm 沙粒的重量; LFC_{53-250} 表示湿筛 53~250 μm 组分的轻组碳含量; W_6 表示湿筛 53~250 μm 轻组的重量。

$$\text{Mineral OC} = (\text{TOC}_{53} \times W_{53}) / W_{\text{sample}} \quad (3)$$

式中,Mineral OC 表示小于 53 μm 组分的有机碳量; TOC_{53} 表示干筛小于 53 μm 组分的有机碳含量; W_{53} 表示干筛小于 53 μm 组分的干量; W_{sample} 表示样品总重,即 0.025 kg 风干土的烘干土重。

各组分有机碳百分比计算公式如下:

$$\text{Macro OC \%} = \text{Macro OC} / \text{TOC} \times 100\% \quad (4)$$

式中,Macro OC % 表示大团聚体有机碳百分

比;Macro OC 表示大团聚体有机碳量。

$$\text{Micro OC \%} = \text{Micro OC} / \text{TOC} \times 100\% \quad (5)$$

式中,Micro OC % 表示微团聚体有机碳百分比;Micro OC 表示微团聚体有机碳量。

$$\text{Mineral OC \%} = \text{Mineral OC} / \text{TOC} \times 100\% \quad (6)$$

式中,Mineral OC % 表示小于 53 μm 组分的有机碳百分比;Mineral OC 表示小于 53 μm 组分的有机碳量;TOC 表示总有机碳量。

1.4 统计分析

利用单因素方差分析对不同样点、不同林分类型、不同土层的土壤大团聚体、微团聚体和小于 53 μm 组分有机碳的差异进行分析,利用最小差异显著法(LSD)对各水平间的差异进行分析。利用多因素方差分析对不同样点、不同林分类型、不同土层对土壤团聚体有机碳量和百分比的交互影响进行分析。对方差不齐的情况,使用非参数检验的方法(Kruskal-Wallis H)进行差异性分析,详见文中标注。利用 Pearson 相关性对各环境变量与土壤不同团聚体组分有机碳量和有机碳百分比的相关性进行分析。以上分析均在统计软件 SPSS 17.0 For Windows (SPSS Inc, Chicago, IL) 中进行,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。统计图表使用 Origin8.2 软件制作。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体有机碳量

土壤大团聚体有机碳量大于微团聚体有机碳量,微团聚体有机碳量大于小于 53 μm 组分有机碳量(图 1)。不同土层的土壤大团聚体和微团聚体有机碳量差异显著(表 2),土壤团聚体有机碳量随土层的加深而下降(图 1)。不同纬度的样点下土壤大团聚体、微团聚体和小于 53 μm 组分有机碳量差异显著,LSD 检测结果显示,长白山样点的土壤大团聚体有机碳量(40.9 ± 4.6) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 显著大于鼎湖山样点(19.0 ± 1.5) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 和宝天曼样点(19.5 ± 1.6) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$,鼎湖山样点的土壤微团聚体有机碳量(5.8 ± 0.3) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 显著小于长白山样点(11.2 ± 1.1) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 和宝天曼样点(11.5 ± 1.1) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$;长白山样点的小于 53 μm 组分有

机碳量(4.2 ± 0.6) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 显著大于鼎湖山样点 (1.9 ± 0.1) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 和宝天曼样点 (1.2 ± 0.1) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ (图 1)。不同林分类型土壤大团聚体和微团聚体有机碳量差异不显著,但小于 $53 \mu\text{m}$ 组分有机碳量差异显著(表 2)。LSD 结果显示,阔叶林小于 $53 \mu\text{m}$ 组分有机碳量 (3.4 ± 0.5) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 显著大于针叶林 (1.6 ± 0.3) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$,混交林处于二者之间 (2.4 ± 0.3) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 。纬度和林分类型对大团聚体和微团聚体有机碳量没有交互作用,但对小于 $53 \mu\text{m}$ 组分有机碳量有显著交互作用(表 2)。纬度与土层对团聚体和小于 $53 \mu\text{m}$ 组分有机碳量都有显著交互作用(表 2)。

不同土层的结果略有差异,0~5 cm 土层的大团聚体、微团聚体和小于 $53 \mu\text{m}$ 组分有机碳量分别在 $10.2 \sim 132.1$ 、 $3.0 \sim 32.9$ 和 $0.4 \sim 12.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 之间,均值为 42.3 、 12.5 和 $2.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$;5~10 cm 土层的大团聚体和微团聚体有机碳量在 $3.9 \sim 91.7$ 、 $0.5 \sim 25.9$ 和 $0.1 \sim 13.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 之间,均值为 24.2 、 8.6 和 $2.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$;10~20 cm 土层的大团聚体和微团聚体有机碳量在 $0.4 \sim 37.2$ 、 $1.4 \sim 15.4$ 和 $0.3 \sim 15.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 之间,均值为 14.7 、 6.3 和 $2.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{soil}$ 。0~5 cm 和 5~10 cm 土层大团聚体和微团聚体有机碳量不同纬度样点之间有显著差异(表 3),变化趋势与总体一致,表现为长白山样点土壤大团聚体有机碳量显著高于鼎湖山和宝天曼样点,鼎湖山样点土壤微团聚体有机碳量显著低于长白山和宝天曼样点(图 1)。不同林分间大团聚体和微团聚体有机碳量无显著差异(表 3),纬度和林分类型对 0~5 cm 土层土壤大团聚体和微团聚体有机碳量没有交互作用,对 5~10 cm 土层微团聚体有机碳量有显著交互作用(表 3)。10~20 cm 土层不同纬度的样点大团聚体有机碳量差异显著(表 3),表现为鼎湖山样点大团聚体有机碳量显著小于长白山样点,而宝天曼样点大团聚体有机碳量与其他两个样点差异不显著(图 1)。不同林分类型大团聚体和微团聚体有机碳量无显著差异(表 3),且纬度和林分类型对土壤大团聚体和微团聚体有机碳量没有交互作用(表 3)。小于 $53 \mu\text{m}$ 组分有机碳量只在 5~10 cm 土层受到纬度、林分类型的显著影响(表

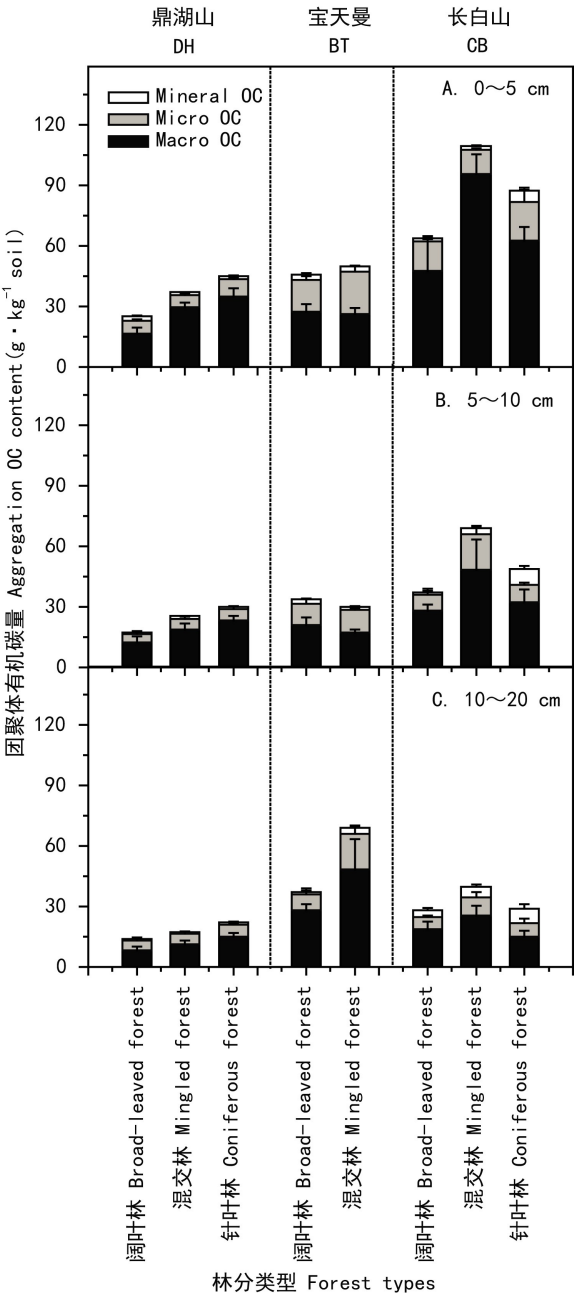


图 1 土壤团聚体有机碳量
Fig. 1 Soil aggregation organic carbon contents

3),变化趋势与总体一致(图 1),在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层该组分有机碳量受到显著的交互影响(表 3)。

2.2 土壤团聚体有机碳百分比

大团聚体有机碳百分比在 0.9%~77.6%之间,均值为 37.3%;微团聚体有机碳百分比在 0.6%~33.4%之间,均值为 13.9%;小于 $53 \mu\text{m}$ 组分有机

表 2 土壤团聚体有机碳量差异显著性检验

Table 2 ANOVA test of soil aggregation organic carbon contents

项目 Item	大团聚体有机碳量 Macros-aggregation OC	微团聚体有机碳量 Micros-aggregation OC	<53 μm 组分有机碳量 Mineral OC (<53 μm)
纬度 Latitude	20.015 (0.000) ***	25.491 (0.000) ***	28.513 (0.000) ***
林分类型 Forest type	1.463 (0.236)	1.776 (0.174)	11.042 (0.026) *
土层 Soil layer	40.889 (0.000) ***	18.482 (0.000) ***	4.496 (0.106)
纬度×林分类型 Latitude×Forest type	2.094 (0.105)	0.689 (0.561)	13.238 (0.000) ***
纬度×土层 Latitude×Soil layer	7.698 (0.000) ***	2.816 (0.030) *	3.769 (0.007) **
林分类型×土层 Forest type×Soil layer	1.039 (0.391)	2.036 (0.096)	0.751 (0.560)
纬度×林分类型×土层 Latitude×Forest type×Soil layer	1.009 (0.425)	1.343 (0.246)	0.346 (0.911)

注：黑体代表使用的非参数检验方法,括号外的值为 F 值或 c^2 ,括号内的值表示 P 值。* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$ 。下同。

Note: **Overstriking** mean the analysis method was Kruskal-Walis H, number outside the bracket is the value of F or c^2 , number inside the bracket is the value of P . * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$, *** indicates $P<0.001$. The same below.

表 3 各土层土壤团聚体有机碳量差异显著性检验

Table 3 ANOVA test of soil aggregation organic carbon contents in different soil layers

项目 Item		土层 Soil layer (cm)		
		0~5	5~10	10~20
大团聚体有机碳量 Macro-aggregation OC	纬度 Latitude	13.906 (0.001) **	8.014 (0.001) **	4.468 (0.018) *
	林分类型 Forest type	0.667 (0.520)	0.868 (0.429)	0.895 (0.417)
	纬度×林分类型 Latitude×Forest type	2.737 (0.062)	1.127 (0.354)	1.867 (0.156)
微团聚体有机碳量 Micro-aggregation OC	纬度 Latitude	20.223 (0.000) ***	13.524 (0.001) **	1.060 (0.357)
	林分类型 Forest type	1.980 (0.154)	3.631 (0.163)	0.378 (0.688)
	纬度×林分类型 Latitude×Forest type	0.264 (0.850)	3.082 (0.042) *	0.627 (0.603)
<53 μm 组分有机碳量 Mineral OC (<53 μm)	纬度 Latitude	2.867 (0.238)	9.168 (0.010) *	0.690 (0.603)
	林分类型 Forest type	1.432 (0.241)	9.497 (0.050) *	4.323 (0.364)
	纬度×林分类型 Latitude×Forest type	6.976 (0.001) **	8.471 (0.000) ***	1.652 (0.196)

碳百分比在0.3%~37.6%之间,均值为 6.9%。不同土层土壤大团聚体和微团聚体有机碳百分比差异均不显著,不同纬度的样点间土壤大团聚体、微团聚体和小于 53 μm 组分有机碳百分比差异均显著(表 4)。LSD 检测结果显示,长白山样点的大团聚体有机碳百分比(44.0 ± 2.8)%显著高于宝天曼样点(30.6 ± 2.2)%和鼎湖山样点(35.9 ± 2.6)%,宝天曼样点的微团聚体有机碳百分比(17.6 ± 1.3)%显著高于长白山样点(13.8 ± 1.2)%和鼎湖山样点(11.5 ± 0.9)%,鼎湖山样点

的小于 53 μm 组分有机碳百分比(5.0 ± 0.4)%显著低于宝天曼样点(8.9 ± 2.3)%和长白山样点(8.9 ± 21.2)%。不同林分类型土壤大团聚体和微团聚体有机碳百分比差异均显著(表 4),LSD 检测结果显示:针叶林大团聚体有机碳百分比(30.2 ± 3.0)%显著低于混交林(40.2 ± 2.5)%和阔叶林(39.3 ± 2.6)%,针叶林土壤微团聚体有机碳百分比(10.9 ± 1.2)%显著低于阔叶林(15.8 ± 1.1)%,混交林微团聚体有机碳百分比(14.0 ± 1.2)%与其他两种林分差异不显著。纬度和林分

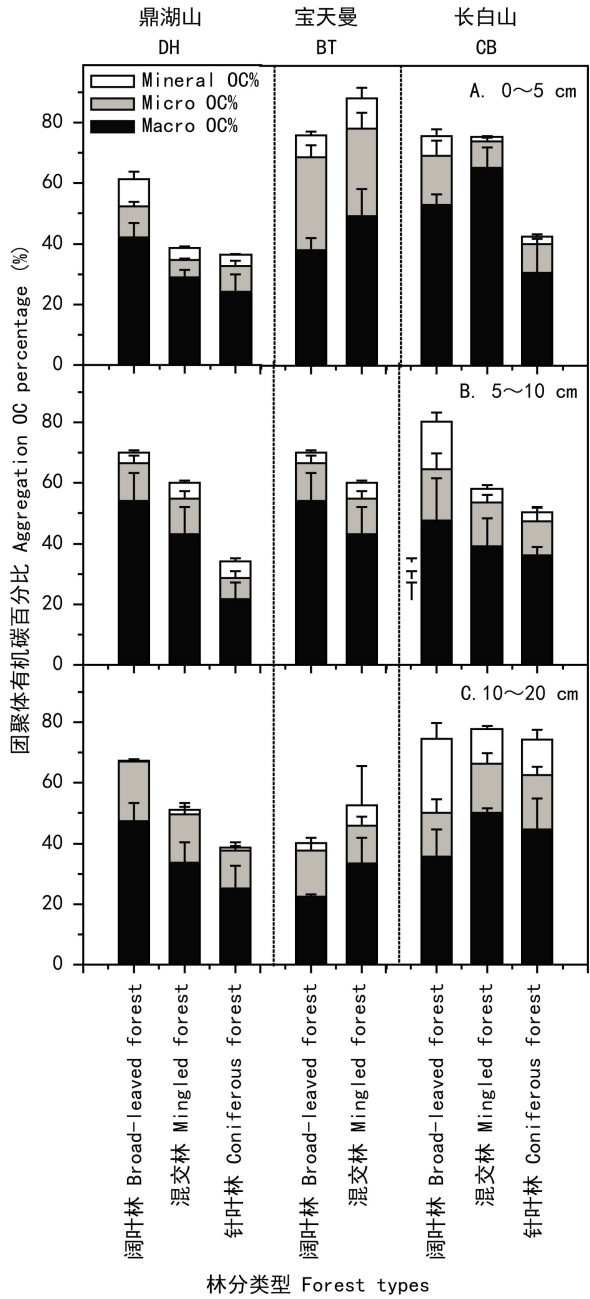


图 2 土壤团聚体有机碳百分比

Fig. 2 Soil aggregation organic carbon percentage

类型对土壤大团聚体有机碳百分比有显著交互影响,纬度和土层对土壤微团聚体和小于 53 μm 组分有机碳百分比有显著交互影响(表 4)。

2.3 土壤团聚体有机碳影响因子的研究

表 5 显示,土壤大团聚有机碳量与年均温、林分针叶树百分比、林分平均木质素含量、凋落物累积量和沙粒含量呈显著负相关,与细根生物量、土

壤 pH 值和土壤粘粒含量显著正相关。土壤微团聚有机碳量与年均温、年降水量、林分针叶树百分比、林分平均木质素含量、凋落物累积量和沙粒含量显著负相关,与土壤 pH 值和土壤粘粒含量显著呈正相关。土壤大团聚有机碳百分比与年均温、年降水量、林分平均木质素含量和沙粒含量显著负相关,与细根生物量、土壤 pH 值和土壤粘粒含量显著正相关。土壤微团聚有机碳百分比仅与年降水量、林分针叶树百分比、林分平均木质素含量、凋落物累积量和细跟生物量显著负相关。

3 讨论与结论

本研究所选择的试验样点均位于中国湿润和半湿润地区,水分条件较好(赵俊芳等,2010),所选择的林分属于试验样点中具有代表性的林分类型,因此研究结果能较好的表征气温升高对森林表层土壤团聚体有机碳含量的影响。研究结果表明,土壤大团聚体和微团聚体的有机碳量和有机碳百分比受气候影响明显,与年均温显著负相关。这与全球土壤有机碳变化规律一致,即土壤有机碳量随纬度升高而降低(Stockmann et al,2013)。分析认为,温度随纬度升高而降低,高纬度地区的低温抑制了森林土壤微生物的活动,减少了微生物对土壤有机碳的分解,降低了土壤有机碳输出,增加土壤有机碳储量(Smith et al,2008;Stockmann et al,2013)。作为团聚体形成的重要粘合剂,土壤有机碳的增加会促进有机矿物复合体和土壤团聚体的形成,土壤团聚体有机碳量也随之增加(Prescott et al,2000;史奕等,2002)。因此,低温能促进土壤团聚体的形成,增加土壤有机碳在团聚体中的积累。

土壤大团聚体有机碳百分比与年均温显著负相关,这一现象可能与土壤碳饱和理论有关(Stewart et al,2007,2008)。该理论认为,土壤中不同存在形式的有机碳有着不同的饱和上限;随着土壤有机碳输入的增加,微团聚体有机碳首先达到饱和,然后才是大团聚体有机碳的增加(Dexter et al,2008;Malamoud et al,2009)。高纬度森林土壤有机碳量普遍较高(Guo & Gifford,2002),

表 4 土壤团聚体有机碳百分比差异显著性检验
Table 4 ANOVA test of soil aggregation organic carbon percentage

项目 Item	大团聚体有机碳百分比 Macro-aggregation OC percentage	微团聚体有机碳百分比 Micro-aggregation OC percentage	<53 μm 组分有机碳百分比 Mineral OC (<53 μm) percentage
纬度 Latitude	6.057(0.003) **	6.742(0.002) ***	4.823(0.010) *
林分类型 Forest type	3.540(0.032) *	4.130(0.019) *	0.373(0.564)
土层 Soil layer	0.185(0.831) **	1.765(0.176)	14.461(0.000) ***
纬度 × 林分类型 Latitude × Forest type	3.987(0.010) *	0.689(0.561)	13.238(0.000) ***
纬度 × 土层 Latitude × Soil layer	1.184(0.323)	2.626(0.040) *	2.887(0.027) *
林分类型 × 土层 Forest type × Soil layer	0.473(0.756)	0.342(0.849)	0.462(0.764)
纬度 × 林分类型 × 土层 Latitude × Forest type × Soil layer	0.438(0.852)	0.733(0.624)	0.590(0.738)

表 5 团聚体土壤有机碳量和百分比与环境变量的相关性分析
Table 5 Correlation analysis of soil aggregate organic carbon content and percentage with environmental variables

项目 Item	大团聚体有机碳量 Macro-aggregation OC	微团聚体有机碳量 Micro-aggregation OC	大团聚体有机碳百分比 Macro-aggregation OC percentage	微团聚体有机碳百分比 Micro-aggregation OC percentage
年均温 MAT	-0.434 **	-0.332 **	-0.218 **	—
年降水量 MAP	-0.330 **	-0.437 **	—	-0.244 **
针叶树百分比 Conifer percentage	—	-0.203 *	-0.266 **	-0.234 *
木质素含量 Lignin content	-0.246 **	-0.260 **	-0.293 **	-0.252 **
凋落物累积量 Litter cumulant	—	-0.242 **	-0.236 *	-0.297 **
细根生物量 Fineroot biomass	0.207 *	—	0.228 *	-0.245 **
pH	0.451 **	0.397 **	0.272 **	—
沙粒 Sand	-0.298 **	-0.230 *	-0.281 **	—
粘粒 Clay	0.209 *	0.205 *	0.204 *	—

注：数字表示两个变量的相关系数，— 表示两个变量相关性不显著；*，** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关。
Note: Number in this table is the correlation coefficient of the two variables; — means no significant relationship between the two variables;
*，** mean the significant levels ($P<0.05$ ， $P<0.01$)，respectively.

土壤微团聚体有机碳已经基本达到了饱和,因而更多的有机碳会积累在大团聚体中,其百分比也随之增高。

本研究中,阔叶林的大团聚体和微团聚体有机碳百分比比较高而针叶林较低,且团聚体有机碳百分比与林分的凋落物质和量有关,(团聚体百分比与林分的针叶树百分比、木质素含量和凋落物累积量成显著负相关)。不同森林生态系统的研究也表明,凋落物“质”和“量”的差异会引起土壤团聚体有机碳差异;如马瑞萍等(2014)在黄土高原的生态系统研究表明,不同林分类型下土壤团

聚体有机碳含量不同,表现为辽东柞群落>人工刺槐群落>狼牙刺群落,而 Gentile 的培养实验表明长期的凋落物“培质”的改变对土壤团聚体有机碳没有影响,但“量”的改变会影响团聚体有机碳(Gentile et al,2011)。分析认为,由于针叶林凋落物的“量”较少,相同时间内凋落物分解所产生的土壤有机碳输入也较少;且相比于阔叶林,针叶林凋落物通常含有更多难分解化合物,如木质素、木栓、蜡质和角质等,“质”也较差(Derenne & Largeau,2001;Quideau et al,2001),低质量的有机碳分解较慢,产生作为团聚体形成粘合剂的小分

子可溶性有机质也较少 (Cotrufo et al, 2013)。这些导致了针叶林较少的土壤团聚体形成和较低的团聚体有机碳量。

此外,细根生物量与大团聚体有机碳量和百分比为显著正相关;这是因为根系分泌物和菌根是大团聚形成的重要粘合剂 (Amézqueta, 1999)。土壤团聚体有机碳含量与土壤 pH 值和粘粒含量为显著正相关。土壤粘粒具有较高的比表面积和较多的反应位点,粘粒含量的增加可以提高土壤矿物与有机质的结合能力,促进土壤团聚体形成 (Lützow et al, 2006; Plante et al, 2006; Jones & Singh, 2014)。Carter et al (2003) 的研究表明,只有当粘粒和粉粒中的土壤有机碳含量达到饱和后,土壤有机碳才会进入团聚体中。随着 pH 值的降低,土壤中带正电的金属离子可以通过配位体交换与带负电的土壤有机质官能团(如羟基和羧基)形成配位体共价键,从而促进团聚体的形成 (Jones & Singh, 2014; Saidy et al, 2012)。

本研究结果表明,温度上升极有可能会造成土壤团聚体有机碳量下降,这一方面会减少土壤有机碳的保护,增加微生物对土壤有机碳的分解,将土壤有机碳以二氧化碳的形式排放到大气中,从而产生正反馈效应,进一步加剧气候变暖 (Smith et al, 2008; Stockmann et al, 2013);另一方面土壤团聚体有机碳的减少也会破坏土壤结构,导致水土流失 (史奕等, 2002)。本研究结果表明阔叶林的土壤团聚体有机碳百分比高于针叶林,但目前国内许多营林作业都是将阔叶林改成单一树种的针叶林来提高林木产量 (陈幸良等, 2014),这也有可能会导致土壤团聚体有机碳的减少,加剧气候变化和水土流失。

参考文献:

- BOSSUYT H, SIX J, HENDRIX PF, 2002. Aggregate-protected carbon in no-tillage and conventional tillage agroecosystems using Carbon-14 labeled plant residue [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 66(6):1965-1973.
- CARTER MR, ANGERS DA, GREGORICH EG, et al, 2003. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions [J]. *Can J Soil Sci*, 83(1):11-23.
- CHEN XF, LI ZP, LIU M, et al, 2013. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China [J]. *Sci Agric Sin*, 46(5):950-960. [陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等, 2013. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响 [J]. *中国农业科学*, 46(5):950-960]
- CHEN XL, JU Q, LIN KL, 2014. Development status, issues and countermeasures of China's plantation [J]. *World For Res*, 27(6):54-59. [陈幸良, 巨茜, 林昆仑, 2014. 中国人工林发展现状、问题与对策 [J]. *世界林业研究*, 27(6):54-59.]
- COTRUFO MF, WALLENSTEIN MD, BOOT CM, et al, 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. *Glob Change Biol*, 19(4):988-995.
- DERENNE S, LARGEAU C, 2001. A review of some important families of refractory macromolecules: composition, origin, and fate in soils and sediments [J]. *Soil Sci*, 166(11):833-847.
- DEXTER AR, 1988. Advances in characterization of soil structure [J]. *Soil Till Res*, 11(3-4):199-238.
- DEXTER AR, RICHARD G, ARROUAYS D, et al, 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties [J]. *Geoderma*, 144(3-4):620-627.
- GENTILE R, VANLAUWE B, SIX J, 2011. Litter quality impacts short-but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions [J]. *Ecol Appl*, 21(3):695-703.
- GUO LB, GIFFORD RM, 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis [J]. *Glob Change Biol*, 8(4):345-360.
- JONES E, SINGH B, 2014. Organo-mineral interactions in contrasting soils under natural vegetation [J]. *Front Environ Sci Eng*, 2(2):2.
- KIRSCHBAUM MUF, 2000. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? [J]. *Biogeochemistry*, 48(1):21-51.
- LI J, LIAO HK, LONG J, et al, 2013. Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in karst mountain areas [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(7):2147-2156. [李娟, 廖洪凯, 龙健, 等, 2013. 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*, 33(7):2147-2156.]
- LI JL, JIANG CS, HAO QJ, 2014. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain [J]. *Chin J Environ Sci*, 35(12):4695-4704. [李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊, 2014. 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*, 35(12):4695-4704]
- LIU SY, WANG H, LUAN JW, 2011. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(19):5437-5448. [刘世荣, 王晖, 栾军伟, 2011. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 [J]. *生态学报*, 31(19):5437-5448.]
- MA RP, AN SS, DANG YH, et al, 2014. Soil organic carbon and enzyme activities in aggregates under different plant communities in the hill-gully region of the Loess Plateau [J]. *Acta Pedol Sin*, 51(1):104-113. [马瑞萍, 安韶山,

- 党廷辉, 等, 2014. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究 [J]. 土壤学报, 51(1): 104–113.]
- MALAMOU K, MCBRATNEY AB, MINASNY B, et al, 2009. Modelling how carbon affects soil structure [J]. *Geoderma*, 149: 19–26.
- MO JM, XUE JH, FANG YT, 2004. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 24(7): 1413–1420. [莫江明, 薛璟花, 方运霆, 2004. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应 [J]. 生态学报, 24(7): 1413–1420.]
- OADES JM, 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure [J]. *Geoderma*, 56(1–4): 377–400.
- PENG XH, ZHANG B, ZHAO QG, 2004. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability [J]. *Acta Pedol Sin*, 41(4): 618–623 [彭新华, 张斌, 赵其国, 2004. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展 [J]. 土壤学报, 41(4): 618–623.]
- PLANTE AF, CONANT RT, STEWART CE, et al, 2006. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 70(1): 287–296.
- PRESCOTT CE, ZABEK LM, STALEY CL, et al, 2000. Decomposition of broadleaf and needle litter in forests of British Columbia: influences of litter type, forest type, and litter mixtures [J]. *Can J For Res*, 30(11): 1742–1750.
- QUIDEAU SA, CHADWICK OA, BENESI A, et al, 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition [J]. *Geoderma*, 104: 41–60.
- SAIDY AR, SMERNIK RJ, BALDOCK JA, et al, 2012. Effects of clay mineralogy and hydrous iron oxides on labile organic carbon stabilization [J]. *Geoderma*, 173(2): 104–110.
- SCHWENDENMANN L, PENDALL E, 2006. Effects of forest conversion into grassland on soil aggregate structure and carbon storage in Panama: evidence from soil carbon fractionation and stable isotopes [J]. *Plant Soil*, 288(1–2): 217–232.
- SHI Y, CHEN X, SHEN SM, 2002. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models [J]. *Chin J Appl Ecol*, 13(11): 1495–1498. [史奕, 陈欣, 沈善敏, 2002. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型 [J]. 应用生态学报, 13(11): 1495–1498.]
- SIX J, CALLEWAERT P, LENDERS S, et al, 2002a. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 66: 1981–1987.
- SIX J, ELLIOTT ET, PAUSTIAN K, 2000. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biol Biochem*, 32(14): 2099–2103.
- SIX J, FELLER C, DENEK K, et al, 2002b. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage [J]. *Agronomie*, 22: 755–775.
- SMITH P, FANG C, DAWSON JJC, et al, 2008. Impact of global warming on soil organic carbon [J]. *Advan Agron*, 97(7): 1–43.
- STEWART CE, PAUSTIAN K, CONANT RT, et al, 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation [J]. *Biogeochemistry*, 86(1): 19–31.
- STEWART CE, PLANTE AF, PAUSTIAN K, et al, 2008. Soil Carbon saturation: linking concept and measurable carbon pools [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 72(2): 379–392.
- STOCKMANN U, ADAMS MA, CRAWFORD JW, et al, 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 164(4): 80–99.
- TIAN SZ, WANG Y, LI N, et al, 2013. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(22): 7116–7124. [田慎重, 王瑜, 李娜, 等, 2013. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响 [J]. 生态学报, 33(22): 7116–7124.]
- WANG L, LI J, LI J, et al, 2014. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland [J]. *Chin J Appl Ecol*, 25(3): 759–768. [王丽, 李军, 李娟, 等, 2014. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响 [J]. 应用生态学报, 25(3): 759–768.]
- WANG M, LI Q R, XIAO DM, et al, 2004. Effects of soil temperature and soil water content on soil respiration in three forest types in Changbai Mountain [J]. *J For Res*, 15(2): 113–118.
- XIANG YF, LUO CD, HUANG LQ, et al, 2014. Soil organic carbon distribution in Liupan Mountain forests [J]. *Shaanxi J Agric Sci*, 60(5): 61–65. [向业凤, 罗承德, 黄琳奇, 等, 2014. 六盘山林区土壤有机碳分布特征 [J]. 陕西农业科学, 60(5): 61–65.]
- YANG LY, WU ST, ZHANG LB, 2010. Fine root biomass dynamics and carbon storage along a successional gradient in Changbai Mountains, China [J]. *Forestry*, 83(4): 379–387.
- YANG LY, LUO TX, WU ST, 2007. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 27(9): 3609–3617. [杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛, 2007. 长白山原始阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林及其次生林细根生物量与垂直分布特征 [J]. 生态学报, 27(9): 3609–3617.]
- YING L, HAN SJ, LU L, 2009. Seasonal changes of soil respiration in *Betula platyphylla* forest in Changbai Mountain, China [J]. *J For Res*, 20(4): 367–371.
- YOU YM, WANG J, HUANG XM, et al, 2014. Relating microbial community structure to functioning in forest soil organic carbon transformation and turnover [J]. *Ecol Evol*, 4(5): 633–647.
- YOU YM, WANG J, SUN XL, et al, 2016. Differential controls on soil carbon density and mineralization among contrasting forest types in a temperate forest ecosystem [J]. *Sci Rep*, 6: 22411.
- ZHANG Q, HAN R, HUANG Z, et al, 2013. Linking vegetation structure and bird organization: response of mixed-species bird flocks to forest succession in subtropical China [J]. *Biodivers Conserv*, 22(9): 1965–1989.
- ZHAO JF, GUO JP, XU JW, et al, 2010. Trends of Chinese dry-wet condition based on wetness index [J]. *Trans CSAE*, 26(8): 18–24 [赵俊芳, 郭建平, 徐精文, 等, 2010. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势 [J]. 农业工程学报, 26(8): 18–24.]
- ZHOU CY, ZHOU GY, ZHANG DQ, et al, 2005. CO₂ efflux from different forest soils and impact factors in Dinghu Mountain, China [J]. *Sci Chin*, 48: 198–206.