

长白山两种森林类型土壤颗粒有机碳和黑碳分布特征

孙金兵, 高菲, 宋金凤, 崔晓阳*

(东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: [目的]量化长白山原始阔叶红松林和杨桦次生林土壤颗粒有机碳和黑碳含量及分布特征,为研究东北森林土壤有机碳分布和积累提供依据。[方法]采用粒径分组方法测定原始阔叶红松林和杨桦次生林土壤表层(A₁₁)和亚表层(A₁₂)颗粒有机碳(POC)和黑碳(BC)含量,分析其与土壤基本性质(有机质、含水量、pH值、粘粒和团聚体等)的关系。[结果]表明:(1)两种森林类型土壤A₁₁和A₁₂POC含量分别为31.89~88.00、5.25~19.45 g·kg⁻¹, BC含量分别为8.43~22.40、3.39~12.10 g·kg⁻¹,二者随土壤深度增加而显著下降($p < 0.01$)。(2)森林类型显著影响土壤POC和BC,表现为杨桦次生林>原始阔叶红松林。(3)两种森林类型土壤POC与土壤有机质、含水量、水稳性团聚体均显著相关,与pH值、粘粒相关性不显著;BC与土壤pH值、粘粒和团聚体相关性均不显著,与含水量显著相关,与有机质仅在A₁₁显著相关。(4)土壤POC和BC显著相关($p < 0.01$)。[结论]在长白山地区森林类型显著影响土壤POC和BC含量,杨桦次生林土壤POC和BC显著高于原始阔叶红松林,很大程度上与森林的采伐和火烧有关。两种森林类型土壤POC和BC分布格局是土壤物理化学性质综合作用的结果。

关键词:颗粒态有机碳;黑碳;分布特征;土壤基本性质

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1001-1498(2017)02-0222-10

Distributions of Soil Particulate Organic Carbon and Black Carbon of Two Forest Types in Changbai Mountain

SUN Jin-bing, GAO Fei, SONG Jin-feng, CUI Xiao-yang

(Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] To investigate the distribution of soil particulate organic carbon and black carbon in the virgin broad-leaved Korean pine forest and secondary poplar-birch forest in Changbai Mountain. [Method] The content and distribution characteristics of POC and BC in soil were quantified by using particle-size fractionation method. The correlations of POC, BC and soil basic physical and chemical properties (soil organic matter, soil water content, soil pH, water stable aggregates, and so on) were also analyzed. [Result] The results showed that (1) The POC in soil A₁₁ and A₁₂ horizon varied from 31.89~88.00 and 5.25~19.45 g·kg⁻¹, respectively, while the BC in soil A₁₁ and A₁₂ horizon varied from 8.43~22.40 and 3.39~12.10 g·kg⁻¹, respectively, both decreased quickly with soil depth; (2) The soil POC and BC were both affected by forest type, showing that secondary poplar-birch forest > virgin broad-leaved Korean pine forest ($p < 0.01$); (3) Extremely obvious positive correlations were observed between the POC and soil organic matter, soil water content and water stable aggregates ($p < 0.01$), while

收稿日期:2016-05-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAD37B01)和国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403202)资助。

作者简介:孙金兵,女,博士生,主要从事土壤生态学研究。E-mail:63389950@qq.com。

* 通讯作者:崔晓阳,E-mail:c_xiaoyang@126.com

the correlations between the POC and soil pH and clay content were not found; The correlations between the soil BC and soil pH, soil clay content and soil water stable aggregates were not observed, while significantly positive correlation was found between the soil BC and soil water content. [**Conclusion**] In Changbai Mountains, the distributions of soil POC and BC were significantly affected by forest types, the amounts of POC and BC in the secondary poplar-birch forest were greater than that in the virgin broad-leaved Korean pine forest, which could be explained by the deforestation and the forest fire. The distribution of POC and BC in both forests was the comprehensive results of soil basic physical and chemical properties.

Keywords: particulate organic carbon; black carbon; distribution characteristic; soil basic properties

长白山林区是我国重要林区之一,其中的原始阔叶红松林和杨桦次生林作为主要森林类型,在全球变化背景下发挥着巨大的生态效益和经济效益。鉴于森林土壤在全球碳循环中的重要性,对长白山原始阔叶红松林和杨桦次生林土壤有机碳及其组分特征系统研究,对于我国东北森林土壤有机碳稳定性评价具有重要意义。土壤有机碳具有高度的复杂性和异质性,由一系列易分解活性有机碳和难分解惰性有机碳组成^[1-2]。活性有机碳可预见土壤理化性质的改变,对土壤变化有着重要的意义^[3],活性有机碳包括微生物碳、轻组有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳等;惰性有机碳分解慢,周转时间长,相对稳定,该部分有机碳对长期固碳具有重要影响,惰性有机碳包括重组有机碳和黑碳等。

颗粒有机碳(POC > 53 m)是与粉砂结合的土壤有机碳,通常被认为是易被微生物分解的有机碳组分,相对于土壤粘粒,被认为是有机碳中的非保护性部分^[4-5],代表一定比例的活性有机碳库^[4]。POC属于植物残体向土壤腐殖质转化的活性中间产物,可作为有机碳的表征指标^[6],在土壤有机碳积累和循环中起着重要的作用。黑碳(BC),植物残体不完全燃烧的产物,因具有高度芳香化结构,而表现出较高的抗氧化性和抗分解能力,在不同地质载体中可保存上亿年,其周转时间为几千年甚至几万年^[7],因此黑碳是土壤惰性碳库的重要组成部分。目前,国内学者对我国个别城市、森林和农业土壤的颗粒有机碳^[8-9]和黑碳^[10]含量及分布已有部分研究,如不同功能区之间土壤黑碳含量表现出差异性^[11],不同利用方式下土壤颗粒有机碳和黑碳数量的差异^[12]等等,直接针对不同林型下POC和BC分布及与土壤基本性质相互关系研究尚缺乏。本研究以长白山典型林区原始阔叶红松林和杨桦次生林为对象,在区域气候和土壤类型较一致的前提下,采集了

土壤表层和亚表层土壤样品,利用粒径分组方法量化土壤颗粒态有机碳(POC)、黑碳(BC),分析不同林型对土壤POC、BC分布特征,探讨土壤POC和BC与土壤基本性质(有机质、含水量、pH值、粘粒和团聚体等)的关系,以期为我国东北森林土壤有机碳积累和稳定提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域与样品采集

长白山为我国东北主要山脉之一,位于我国吉林省境内,该区域属于受季风影响的温带大陆性气候,其特点是春季干燥多风,夏季短暂多雨,秋季凉爽多雾,冬季漫长严寒,年平均温度3~7℃,降水量丰富,年均600~800 mm,主要集中在夏季,无霜期约110 d。本研究所涉调查区位于长白山北麓天然林区,海拔约为800~850 m。主要地带性植被包括以红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)为主的原始阔叶红松林,以及原生植被破坏后,乔木层除红松外出现大面积的是山杨(*Populus davidiana* Dode.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)等次生林(表1)。土壤类型主要为白浆土(漂白冷凉淋溶土,CST),其成土母质为黄土状粘土和火山玄武岩风化物^[13]。

在研究区中随机选取20块样地(10 m × 10 m),其中原始林、次生林样地各10块。每块样地中部典型部位选择1个主剖面,按照发生层取腐殖质层(A₁)样品。并将其分为两个亚层:表层(A₁₁),聚积过程占优势、同时具有淋溶作用,颜色较深的腐殖质层;亚表层(A₁₂),颜色较浅的腐殖质层。采用原位立方土柱法取样:A₁₁、A₁₂分层后现场标记并记录土层深度,然后按自上而下顺序分别采集横截面为10 cm × 10 cm的立方土柱,土柱取样深度即为土层厚度。

表1 研究区样地的基本情况

Table1 Basic information of study area used in the experiment

林型 Forest types	林龄 Age of forest/a	林层 Story division			干扰 Jamming
		乔木层 Tree layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herbaceous layer	
原始阔叶红松林 Virgin broad-leaved Korean pine forest	200 ~ 300	红松(<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.) 水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>) 蒙古栎(<i>Quercus mongolica</i>)	忍冬(<i>Lonicera japonica</i> Thunb.) 暴马丁香(<i>Syringa reticulata</i>) 早花忍冬(<i>Lonicera praeflorens</i>)	木贼(<i>Hippochaete hiemale</i>) 蕨类(<i>Pteridophyta</i> spp.) 刺五加(<i>Acanthopanax senticosus</i>)	无 Nothing
杨桦次生林 Secondary poplar- birch forest	40 ~ 50	白桦(<i>Betula platyphylla</i> Suk.) 山杨(<i>Populus davidiana</i> Dode.)	山梅花 (<i>Philadelphus incanus</i> Koehne) 瘤枝卫矛(<i>Euonymus verrucosus</i>) 辽东槲木 (<i>Aralia elata</i> (Miq.) Seem)	大叶柴胡 (<i>Bupleurum longiradiatum</i> Turcz.) 木贼(<i>Hippochaete hiemale</i>)	火烧 Fire 放荒 Prescribed burning

1.2 分析方法

土壤湿样品捡去根系,无损风干、称质量(W_1),过2 mm筛。制样后将筛出的2 mm以上石砾合并称质量(W_2),计算石砾含量;土壤密度根据 W_1 和实际取样体积估算。过2 mm筛的土样在容器内充分混匀,取适量分成6份,其中5份用于颗粒态有机碳、土壤基本性质(有机质、含水量、电导率和pH值)的测定,还有1份用玛瑙球磨碎,过100目筛,混匀,分成两份,装入自封袋中。其中一部分直接用CN分析仪测定总有机碳,另一部分用于土壤黑碳分离。

1.2.1 土壤颗粒态有机碳分离

粒径分级属于土壤有机质物理分级,步骤如下:

1)取过2 mm筛土壤或土壤团聚体土样20 g,放入250 mL三角瓶,加入100 mL六偏磷酸钠($50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),先手摇3 min,然后在往复式震荡器($180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)震荡30 min,搅匀后在超声波分散仪中分散5 min。

2)将分散土壤悬液过53 μm 筛,并用蒸馏水反复冲洗至滤液澄清。把所有留在筛子上方的物质,在50℃下48 h后称质量,分离样品在玛瑙研钵中研磨均匀,过0.149 mm筛后,装入半微量样品管备用。

1.2.2 土壤黑碳的分离

土壤黑碳的分离采用HF/HCl处理的重铬酸盐氧化方法^[14]。

1)碳酸盐矿物去除

称取过100目筛的土样1~5 g(因有机质含量而异)于100 mL离心管中,加入25 mL $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl溶液,超声分散10 min,静置过夜;离心,弃去上清液,加25 mL去离子水震荡10 min,离心洗涤1次,弃去上清液。

2)硅酸盐矿物释放

离心管残余物中加入25 mL 10 MHF/1 MHCl,振荡2 h,离心弃去上清液;再加入25 mL 10 mol ·

L^{-1} HF/1 mol · L^{-1} HCl,振荡2 h,静置20 h(其间每4 h摇匀1次),离心弃上清液;加入25 mL蒸馏水,漩涡1 min,如此离心洗涤3次;离心管残余物60℃烘干24 h,称质量。

3)活性有机碳去除

HF处理的烘干样品在玛瑙研钵中研磨混匀并过100目筛,称取0.1~0.3 g于玻璃试管中,加入30 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 和2 mol · L^{-1} H_2SO_4 溶液,超声分散10 min,加盖回流漏斗,恒温水浴中 $55 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 反应60 h,其间每12 h置于超声分散器中分散10 min,并适时补充蒸发损失的水分,监测溶液颜色变化(溶液若出现蓝绿色,表明重铬酸钾不足,此时应增加溶液用量);反应完毕,将试管中物质无损转移到100 mL离心管中,离心弃上清液,加30 mL蒸馏水,漩涡1 min,如此离心洗涤3次;将离心管60℃烘干24 h,称质量,其中剩余物即为BC样品。

干结BC样品在玛瑙研钵中研磨均匀,装入半微量样品管备用。

全土有机碳(OC)、黑碳(BC)、颗粒有机碳(POC)用自动CN分析仪(Heraeus Elementar Vario EL, Hanau)直接测定,单位统一换算成 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土。

1.2.3 土壤基本性质的测定^[15]

有机质:重铬酸钾外加热法;

含水量:差值法;

pH值:电极法;

粘粒:吸管法测定;

水稳性团聚体(>0.25 mm):土壤湿筛法。

1.3 数据处理

利用Microsoft Excel 2010和SPSS 18.0软件对试验数据进行分析处理,采用单因素方差分析法(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用Pearson相关系数评价不同因子间的

相关关系,并利用 SigmaPlot(12.0)软件作图。

2 结果与分析

2.1 颗粒有机碳和黑碳总体数量特征及与土壤有机碳比例

土壤 POC 含量在 A_{11} 、 A_{12} 层分别为 $31.89 \sim 88.00$ 、 $5.25 \sim 19.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随深度的增加而显著下降($p < 0.01$)。 A_{11} 、 A_{12} 层 BC 含量分别为 8.43

~ 22.40 、 $3.39 \sim 12.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体趋势为随土层深度显著降低($p < 0.01$)。 A_{11} 、 A_{12} 层 POC/OC 比例分别为 0.39 、 0.20 , 有随土层深度而显著下降($p < 0.01$); BC/OC 比例分别为 0.10 、 0.13 , 有随土层深度而增加的趋势, 差异达到显著水平($p < 0.01$)。另外, 土壤 POC、BC 含量及 POC/OC、BC/OC 的变异系数表现为 A_{11} 层 $< A_{12}$ 层, 而 BC/OC 的变异系数在两不同土层间差异大(表 2)。

表 2 土壤颗粒有机碳和黑碳含量及土壤有机碳比例($n = 20$)

Table 2 Soil organic carbon ratios and POC and BC contents ($n = 20$)

指标 Indicators	土壤层次 Soil horizon	范围 Range/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值 Mean/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of Variance/%
POC	A_{11}	31.89~88.00	57.45 ^a	16.84	29.32
	A_{12}	5.25~19.45	11.96 ^b	4.11	34.39
BC	A_{11}	8.43~22.40	14.54 ^a	4.13	28.40
	A_{12}	3.39~12.10	7.53 ^b	2.45	32.56
POC/OC	A_{11}	0.27~0.50	0.39 ^a	0.07	16.95
	A_{12}	0.11~0.26	0.20 ^b	0.04	21.80
BC/OC	A_{11}	0.07~0.13	0.10 ^a	0.02	19.65
	A_{12}	0.07~0.24	0.13 ^b	0.05	38.95

注:不同土层间平均值的差异,字母不同代表 $p = 0.01$ 显著水平

2.2 林型对颗粒有机碳和黑碳的影响

A_{11} 、 A_{12} 层杨桦次生林土壤 POC 范围分别为 $44.67 \sim 88.00$ 、 $7.18 \sim 19.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中位值分别为 67.19 、 $15.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 原始阔叶红松林 POC 范围分别为 $31.89 \sim 65.23$ 、 $5.25 \sim 13.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中位值分别为 46.70 、 $9.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1A)。杨桦次生林表层土壤 POC 均高于原始林(图 1A)。在 A_{11} 、 A_{12} 层, 土壤 POC 次生林比原始林分别高 23.02 、 $5.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($p < 0.01$, 图 1)。

杨桦次生林中 A_{11} 、 A_{12} 层土壤 BC 范围分别为 $12.03 \sim 22.41$ 、 $5.02 \sim 12.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中位值分别为 15.80 、 $7.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 原始阔叶红松林中 A_{11} 、 A_{12} 层土壤 BC 范围分别为 $8.43 \sim 17.87$ 、 $3.39 \sim 17.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 中位值分别为 11.97 、 $6.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 两种林型下, 总体趋势均为随土层深度显著降低($p < 0.01$)。杨桦次生林表层土壤黑碳含量均高于原始阔叶红松林(图 1)。在 A_{11} 、 A_{12} 层, 土壤 BC 杨桦次生林比原始阔叶红松林分别高 4.27 、 $2.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($p < 0.05$, 图 1B)。

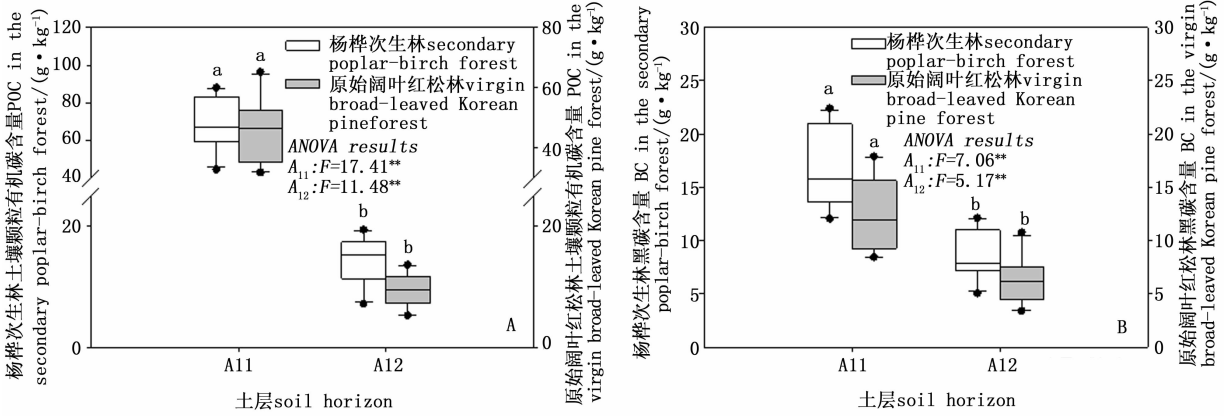
由此可知, 在同一土层, 林型对土壤 POC 和 BC 均具有显著影响($p < 0.05$), 林型是影响土壤有机碳分布的重要因素。另外, 方差分析可知, 杨桦次生林

和原始阔叶红松林土壤 POC 和 BC 均随着土层加深而显著降低, 即 A_{11} 层 $> A_{12}$ 层($p < 0.01$)。

2.3 颗粒有机碳和黑碳与土壤基本性质的关系

2.3.1 有机质 两种林型下, 土壤 POC 和 BC 与有机质存在线性相关关系(图 2)。POC 与有机质相关系数分别为: A_{11} 层 0.860 、 A_{12} 层 0.769 (数据未显示), 表层和亚表层均为显著性正相关($p_1 = 0.000$ 、 $p_2 = 0.000$, 图 2A); BC 含量与有机质的相关系数分别为: A_{11} 层 0.724 、 A_{12} 层 0.339 (数据未显示), 土壤 BC 与有机质的相关性表层达到显著相关($p_1 = 0.000$, 图 2B)、亚表层不显著($p_2 = 0.143$, 图 2B)。相关数据分析可知, 两种林型下, 土壤 POC 与有机质的相关性大于 BC。

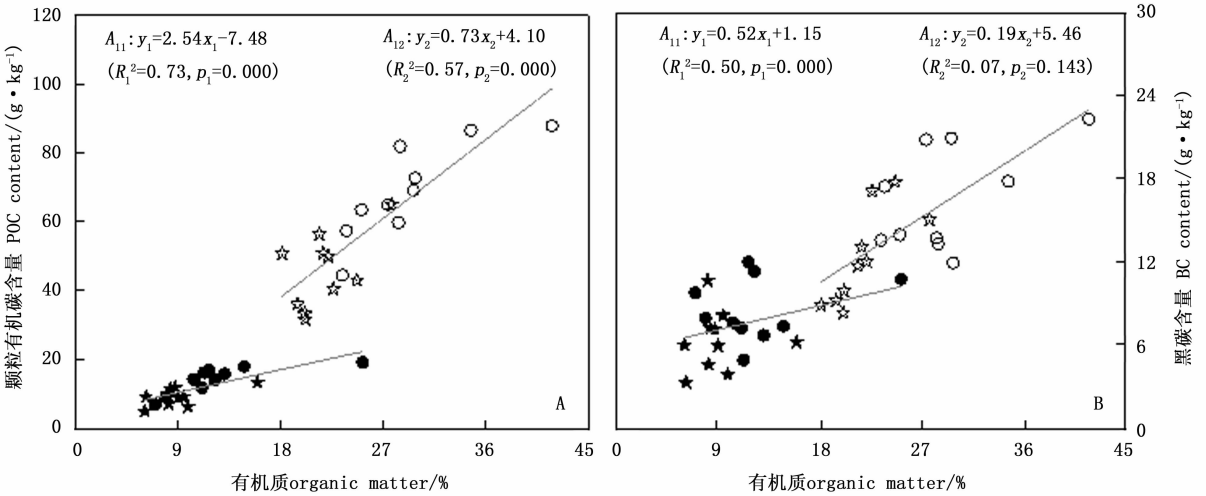
2.3.2 含水量 研究表明, 颗粒有机碳含量、黑碳含量与含水量存在线性正相关关系(图 3)。POC 与含水量之间的相关系数分别为: A_{11} 层 0.821 、 A_{12} 层 0.792 (数据未显示), 表层和亚表层均为显著性正相关($p_1 = 0.000$ 、 $p_2 = 0.000$, 图 3A); BC 与含水量的相关系数分别为: A_{11} 层 0.640 、 A_{12} 层 0.495 (数据未显示), 表层和亚表层均达到显著相关($p_1 = 0.002$ 、 $p_2 = 0.027$, 图 3B)。相关数据分析可知, 两种林型土壤 POC 与含水量的相关性大于 BC。



(图中相同林型不同土层方差分析结果,字母不同代表 $p=0.01$ 显著差异;相同土层原始阔叶红松林与杨桦次生林的比较, F 值标注 * 表示 $p=0.05$ 显著差异, F 值标注 ** 表示 $p=0.01$ 显著差异)

图1 两种林型土壤颗粒有机碳和黑碳含量

Fig. 1 Contents of POC and BC of two forest types



(注:“○”和“☆”分别代表杨桦次生林和原始阔叶红松林 A₁₁层颗粒有机碳含量;“●”和“★”分别代表杨桦次生林、原始阔叶红松林 A₁₂层颗粒有机碳含量)

图2 两种林型土壤颗粒有机碳和黑碳含量与有机质的关系 ($n=20$)

Fig. 2 Relationship between soil POC and BC contents and soil organic matter of two forest types ($n=20$)

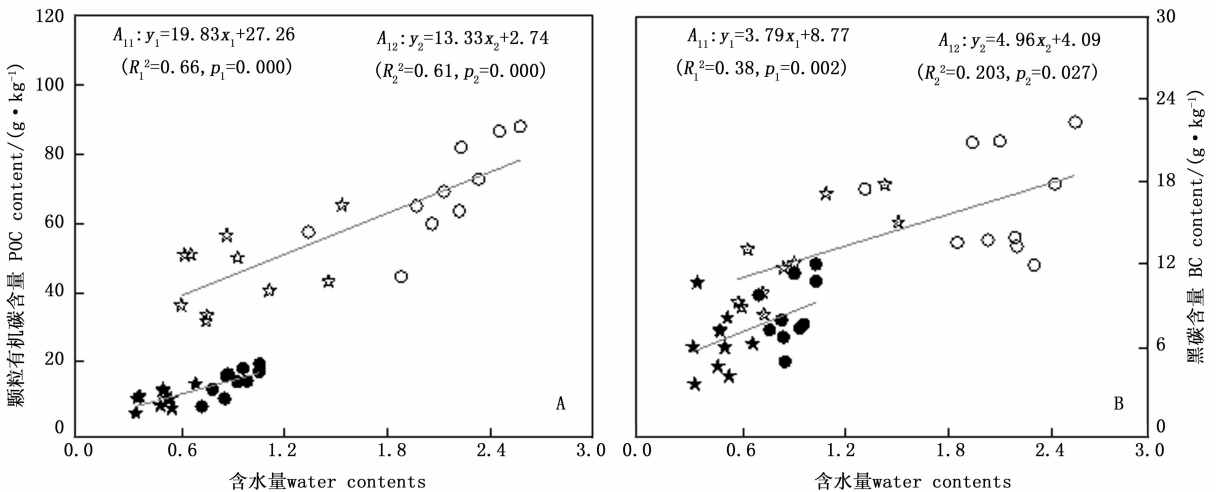


图3 两种林型土壤颗粒有机碳和黑碳含量与含水量的关系 ($n=20$) (注:同上)

Fig. 3 Relationship between soil POC and BC contents and soil water contents of two forest types ($n=20$)

2.3.3 pH值 两种林型下,土壤 POC 与 pH 值之间的相关系数为: A_{11} 层 0.388、 A_{12} 层 0.085(数据未显示),表层和亚表层 BC 与 pH 值均不相关($p_1 = 0.091$ 、 $p_2 = 0.721$,图 4A);土壤 BC 与 pH 值的相

系数分别为: A_{11} 层 0.355、 A_{12} 层 0.071(数据未显示),表层和亚表层 BC 与 pH 值均不相关($p_1 = 0.124$ 、 $p_2 = 0.765$,图 4B)。

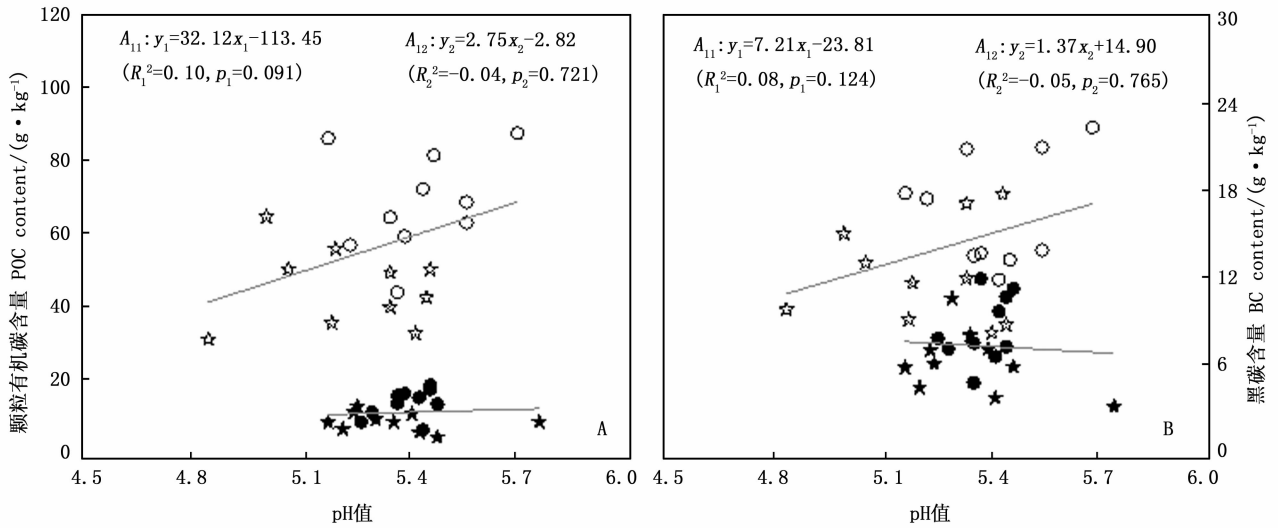


图4 两种林型土壤颗粒有机碳和黑碳含量与 pH 值的关系($n=20$)(注:同上)

Fig.4 Relationship between soil POC and BC contents and soil pH value of two forest types ($n=20$)

2.3.4 粘粒 土壤 POC 与粘粒之间的相关系数为: A_{11} 层 0.361、 A_{12} 层 0.038(数据未显示),表层和亚表层土壤 POC 与粘粒均不相关($p_1 = 0.117$ 、 $p_2 = 0.873$,图 5A);土壤 BC 与粘粒的相关系数分别为:

A_{11} 层 0.429、 A_{12} 层 0.138(数据未显示),表层和亚表层 BC 与粘粒相关性均不显著($p_1 = 0.059$ 、 $p_2 = 0.561$,图 5B)。可见,两种林型土壤 POC 和 BC 与粘粒均不相关($p > 0.05$,图 5)

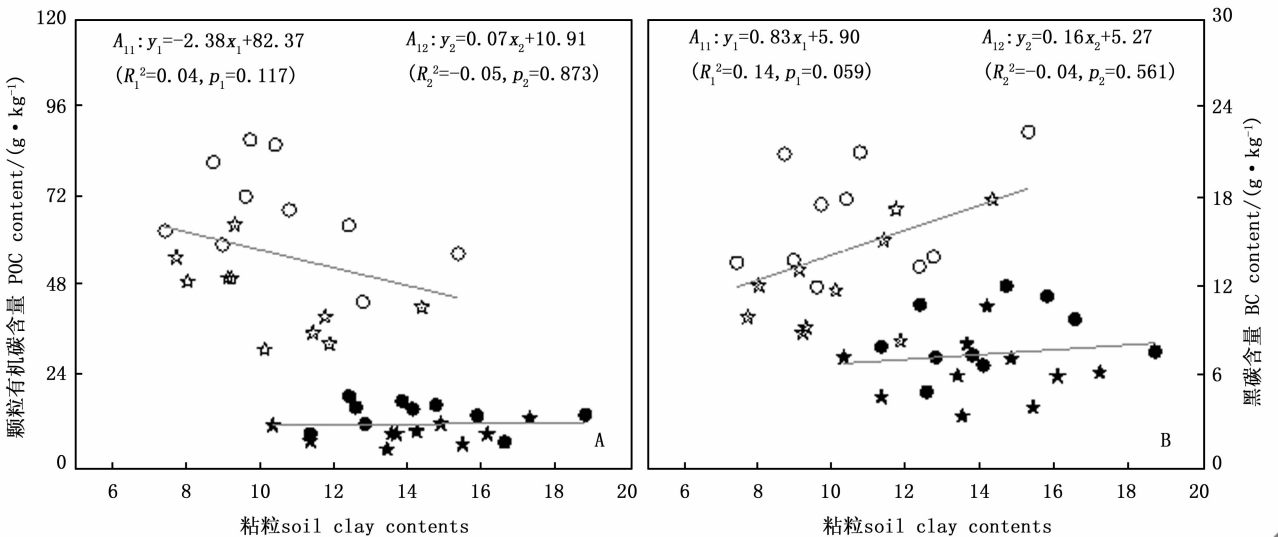


图5 两种林型土壤颗粒有机碳含量和黑碳含量与粘粒的关系($n=20$)(注:同上)

Fig.5 Relationship between soil POC and BC contents and soil clay contents of two forest types ($n=20$)

2.3.5 水稳性团聚体 两种林型下,土壤 POC 与水稳性团聚体相关系数分别为: A_{11} 层 0.698、 A_{12} 层

0.700(数据未显示),表层和亚表层均为显著性正相关($p_1 = 0.000$ 、 $p_2 = 0.000$,图 6A);土壤 BC 含量

与有机质的相关系数分别为： A_{11} 层0.232、 A_{12} 层0.369(数据未显示)，土壤BC与水稳性团聚体均不相关($p_1 = 0.324$, $p_2 = 0.110$, 图6B)。综上可知, 两

种林型下, 土壤POC与水稳性团聚体的相关性大于土壤BC。

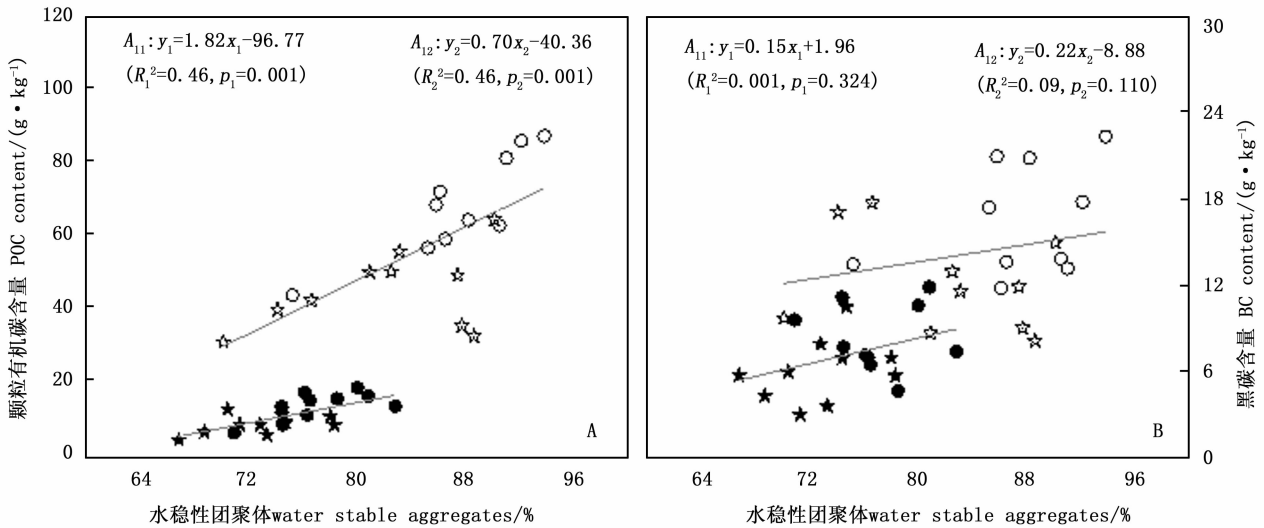


图6 两种林型土壤颗粒有机碳和黑碳含量与水稳性团聚体的关系($n=20$)(注:同上)

Fig. 6 Relationship between soil POC and BC contents and water stable aggregates of two forest types ($n=20$)

2.4 土壤颗粒有机碳与黑碳关系

两种林型下, 颗粒有机碳含量与黑碳含量存在线性相关关系(图7)。 A_{11} 和 A_{12} 层相比较, 两种林型下土壤BC与POC间的相关系数 A_{11} 层0.571(p_1

< 0.01 , 图7A) $> A_{12}$ 层0.488($p_2 < 0.05$, 图7B); 混合统计($A_{11} + A_{12}$)得出, 土壤BC与POC之间的相关系数为0.812($p < 0.000$, 图7C), 可见A层土壤颗粒有机碳和黑碳存在显著相关。

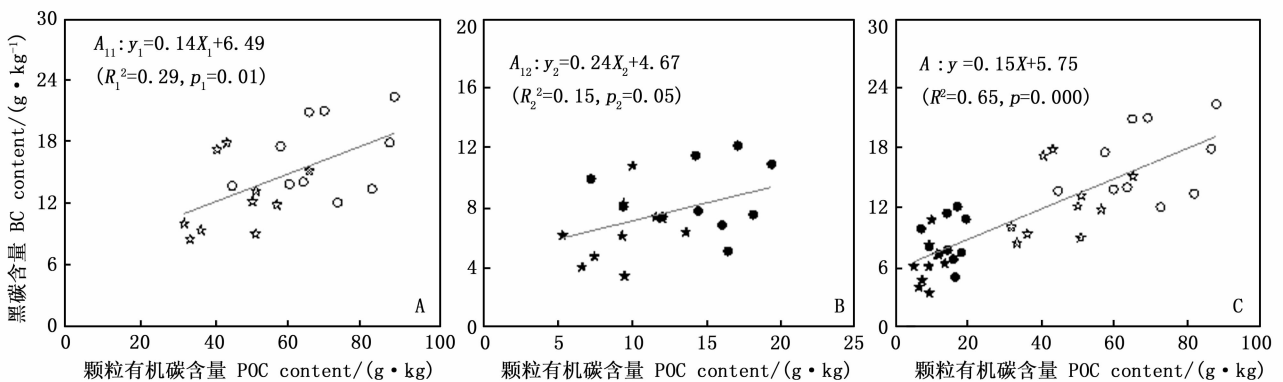


图7 两种林型土壤颗粒有机碳含量与黑碳含量的关系($n=20$)(注:同上)

Fig. 7 Relationship between soil POC contents and BC contents of two forest types ($n=20$)

3 讨论

3.1 两种林型土壤颗粒有机碳含量、黑碳含量及其分布特征

研究区域内, 两种林型 A_{11} 层、 A_{12} 层土壤POC含量为57.45和11.96 g·kg⁻¹, 均表现为随土层加深而

逐渐递减, 这与其他研究结果一致^[16-17]。土壤POC含量高于其他区域研究结果^[18-19], 主要与研究区森林凋落物和植物根系有关, 有机物质输入量高, 各组分有机碳含量必然增加; 其次, 颗粒有机碳属于活性有机碳, 虽然稳定性较低, 但天然林区受外界干扰较小, 使该区域POC尚处于不敏感期, 一旦周围环境改

变,如土地利用发生变化,必然导致颗粒有机碳含量下降^[20]。总体来看,两种林型下土壤 BC 在本区域中含量也很高,A₁₁层、A₁₂层土壤 BC 达 14.54、7.53 g·kg⁻¹,高于我国其他区域的研究结果^[21-22]。这应该与近代的火山喷发有关,火山爆发可以改变成土母质、地形、水文等自然条件,研究表明火山灰与浮石形成疏松的成土母质^[23],间接地对土壤有机质产生持续性的影响,最主要的原因火山可以引发森林火灾,而林火是黑碳产生的必要条件,森林植被发生不完全燃烧产生大量的黑碳颗粒。同样,黑碳同有机碳一样具有表层富集,自上而下明显降低^[24],这与 Rumpel^[25]、刘兆云^[10]等研究结果一致。

颗粒态有机碳占土壤总有机碳的比例较高,范围在 0.11~0.50 之间,随土层增加显著降低($p < 0.01$)。这是因为本研究中的颗粒态有机质主要是正在腐解的植物残体和微生物,且这些物质主要分布在土壤表层,随着土壤深度的增加植物残体、根系及微生物均会降低。黑碳占土壤总有机碳的比例范围在 0.07~0.24 之间,随土层增加而增加。由此可知 POC/OC 和 BC/OC 随土层变化趋势截然不同,这可能有以下两方面原因:其一,表层土壤有机碳的大量积累对 BC 起到了“稀释”作用^[26],而对 POC 起到了“浓缩”作用;其二,向下迁移的过程部分 POC 被分解掉。可见,POC 对土壤有机碳的贡献与土壤深度成反比;BC 对土壤有机碳的贡献与土壤深度成正比。

在气候、成土母质和地形等因素基本一致条件下,凋落物是土壤有机碳的主要补充,进入土壤的植物枯枝落叶多少和分解速率是由地上植被决定的。不同森林类型的树种组成不同,直接导致凋落物的种类、产量和质量不同^[27],同时也间接地影响土壤微生物活动的微环境^[28],而颗粒有机碳由正在腐解的植物残体和微生物体构成^[29],因此森林类型必然影响土壤 POC 含量和分布。本研究两种林型土壤颗粒态有机碳结果为,杨桦次生林各层土壤 POC 含量高于原始阔叶红松林。一方面长白山杨桦次生林林分结构完整、环境较稳定,地表植被丰富,林下凋落物多于原始阔叶红松林;另一方面可能是由于长白山原始阔叶红松林以红松为优势树种,而过熟林(>200 a)样地的优势树已达到该立地类型树种的平均预期寿命,林分生物量不再增加,甚至有所下降^[30]。表层 POC 含量受母质影响较小,主要由进入土壤枯枝落叶多少决定,当进入土壤的生物残

体越多时,形成的颗粒态有机质也越多^[31],两种林型 POC 含量 A₁₁层、A₁₂层均达到显著差异($p < 0.05$)。本研究区两杨桦次生林土壤 BC 显著高于原始阔叶红松林($p < 0.01$,图 1B)。这是因为黑碳的增加依赖于系统中底物碳的输入^[32],杨桦次生林较原始阔叶红松林郁闭度高,凋落物层厚,根系积累多,火烧后焦化的植物残体量大,进而产生土壤黑碳相对较多。

3.2 土壤颗粒有机碳和黑碳与土壤基本性质的关系

土壤性质通过直接和间接作用共同影响土壤有机碳含量及其变化特征^[33]。研究区域内森林凋落物层较厚,分解后回归土壤的有机碳也较丰富,易于有机质积累。土壤有机质是植物生长和微生物生命活动的物质和能量来源,调控着土壤物理、化学和生物学性质。本研究中 POC 与有机质显著正相关($p < 0.01$)。这是因为有机质作为有机胶结物质,可改善土壤结构,易于土壤团粒结构和颗粒有机质的形成。另外,土壤微生物与有机质显著正相关,其数量、活性和群落结构随着有机质含量增加而增加,直接影响颗粒态有机碳构成(腐解的植物残体和微生物体)。结果表明,在 A₁₁层 BC 与有机质关系显著正相关($p < 0.01$)。这可能是因为森林枯落物层火烧后变脆或炭化,易呈细碎颗粒状与表层土壤混合,从而增加土壤有机质含量^[34],同时植物残体不完全燃烧时又会形成土壤黑碳。在 A₁₂层 BC 与有机质不相关,这可能与与黑碳的降解和迁移方式等有关。

本研究中表层和亚表层的 POC 均随含水量增加而增加,二者具有显著正相关($p < 0.01$),这与张文敏^[35]、陆昕^[36]不同碳组分与含水量关系研究结果一致。土壤颗粒有机碳和黑碳分布受植物分布影响较大,而植物分布受光、温、水分等条件限制。在同一气候区、相同海拔的地方,水分是植物分布的重要限制因子^[37-38]。可见,土壤水分对 POC 和 BC 影响更为直接。另外,土壤湿度、温度可以通过影响根系和微生物分解速度间接影响土壤有机碳含量。土壤湿度大不利于有机质的矿化,部分区域还存在季节性积水,产生有机质的泥炭化现象,因而有利于颗粒有机质的形成^[6]。两种林型下 A₁₁层和 A₁₂层中 BC 与含水量均为线性显著正相关($p < 0.05$),这是因为各种强度林火所致有机残体颗粒物和炭化颗粒物混入,包括植被死有机残体颗粒物和炭化颗粒物、枯落物层细碎化和炭化颗粒物、半腐烂死细根混入

等,这需要有后期的水分机械淋移作用。可见,含水量对黑碳的影响极为重要。基于水分对 POC 和 BC 的重要影响,在今后研究工作需要考虑动态变化等综合因素。

土壤 pH 通过影响微生物的活性、水解作用等影响土壤碳氮的固定和累积能力,它是影响土壤有机碳和全氮空间分布的环境因子之一^[39]。本研究中,POC 与 pH 值相关性不显著($p > 0.05$),这主要由研究区土壤性质决定,该区域内土壤均呈弱酸性,pH 值数据变化不明显,在这样的区间仅能体现变化趋势,未到达显著影响。而对于研究区域 BC,一般认为,火烧后产生黑碳的土壤中,pH 值会增加,这是由于林火残留灰分中含有的大量可溶性碱性金属氧化物^[40],能很快合成碳酸盐,中和土壤的酸性,导致火烧后土壤 pH 值升高^[41],二者应具备正相关关系,但由于黑碳形成受诸多因素影响,所以与 pH 值相关性不显著($p > 0.05$)。

一般认为粘粒具有较大的比表面积和电荷密度,能够强烈吸附土壤有机物质,并能与腐殖质形成有机-无机复合体,降低微生物对土壤有机质的分解^[42]。本研究中 POC 和 BC 与粘粒含量相关性均不显著。粘粒主要是吸附和固定有机质,而 POC、BC 均不以粘粒为结合态存在,二者与粘粒之间无显著相关。

土壤团聚体形成作用是土壤碳蓄积的重要机制,本研究中,表层和亚表层的 POC 均随团聚体增加而增加,二者具有显著正相关($p < 0.01$)。这是因为土壤中游离颗粒有机碳被胶结剂包裹形成团聚体,团聚体形成后内部孔隙降低,有机碳与矿物颗粒的接触更紧密^[43],即团聚体有利于 POC 的形成。研究区域的 BC 与团聚体之间相关性不显著,一方面本实验没有把团聚体按粒径组分划分^[44];另一方面由于土壤自身生物学和理化性质的复杂性,及它们在团聚过程中的强烈交互作用^[45],所以探讨二者的关系需要考虑综合因素系统研究。

POC 和 BC 与土壤基本性质中的有机质和水稳定性团聚体相关性不一致,其可能原因分别为:一是火烧后黑碳和有机碳富集在表层,黑碳和有机碳主要是通过土壤动物、水等作用淋溶至下层,黑碳和有机碳淋溶下层的量不成比例,导致黑碳和有机质在下层不相关;二是本研究中团聚体是 $> 0.25 \text{ mm}$ 的水稳性大团聚体,这些团聚体内部可能含有黑碳,但由于黑碳密度较小,质量较轻,黑碳质量在水稳定大

团聚体质量中甚至可能忽略不计,所以导致黑碳质量与水稳性团聚体质量不相关。

3.3 土壤颗粒有机碳和黑碳的关系

土壤黑碳与颗粒有机碳存在显著正相关关系。通常认为,BC 具有高度芳香性,是土壤惰性碳库的重要组成部分^[46];而 POC 主要由未分解或半分解的动植物和根系残体组成,是土壤活性碳库的一部分^[47]。然而,本研究中土壤 POC 和 BC 显著正相关,可能是因为分离的颗粒有机碳主要是粒径 $> 53 \mu\text{m}$ 的颗粒,其中可能包含了大量黑碳颗粒。可见,在东北森林土壤中颗粒有机碳组分中不完全是活性有机碳,下一步研究将进一步分离颗粒有机碳中的黑碳。

4 结 论

(1)在长白山地区林型显著影响土壤 POC 和 BC,杨桦次生林土壤 POC 和 BC 显著高于原始阔叶红松林,这很可能与杨桦次生林遭受的采伐和火烧有关。

(2)两种林型土壤 A_{11} 层颗粒有机碳和黑碳含量均高于 A_{12} 层。

(3)原始阔叶红松林和杨桦次生林土壤 POC 和 BC 分布格局是土壤基本理化性质综合作用的结果。

(4)土壤 POC 和 BC 存在显著正相关关系,初步认为可能与颗粒有机碳中含有较多黑碳有关,具体原因还有待于进一步验证。

参 考 文 献:

- [1] 赵 鑫,宇万太,李建东,等. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 22032-22209.
- [2] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [3] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [4] 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.
- [5] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(5): 1382-1386.
- [6] 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4):662-665.
- [7] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al.* Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4):

- 539-546.
- [8] 周彩云, 魏宗强, 颜 晓, 等. 不同施肥处理对水稻土颗粒有机碳与磷的影响[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(2): 20-27.
- [9] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [10] 刘兆云, 章明奎. 林地土壤中黑碳的出现及分布特点[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(3): 341-345.
- [11] 何 跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 177-182.
- [12] 张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 662-665.
- [13] 李昌华. 长白山露水河施业区的土壤条件及其与林型分布和林木生长的关系[J]. 林业科学, 1963, 8(2): 93-104.
- [14] Lim B, Cachier H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays[J]. Chemical Geology, 1996, 131(1): 143-154.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [16] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1675-1681.
- [17] 刘 伟, 程积民, 高 阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 68-75.
- [18] 张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 662-665.
- [19] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [20] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳, 氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1703-1711.
- [21] 薛丽佳, 高 人, 杨玉盛, 等. 武夷山土壤有机碳和黑碳的分配规律研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(3): 399-403.
- [22] 刘兆云, 章明奎. 林地土壤中黑碳的出现及分布特点[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(3): 341-345.
- [23] 靳英华, 许嘉巍, 梁 宇, 等. 火山干扰下的长白山植被分布规律[J]. 地理科学, 2013, 33(2): 203-208.
- [24] 于小玲, 佟小刚, 杨学云, 等. 长期施肥对(土娄)土黑碳积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1404-1411.
- [25] Rumpel C, Alexis M, Chabbi A, *et al.* Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture[J]. Geoderma, 2006, 130(1): 35-46.
- [26] 孙金兵, 桑 英, 宋金凤, 等. 长白山典型森林土壤黑碳含量及不同组分中的分布特征[J]. 林业科学研究, 2016, 29(1): 34-40.
- [27] 杨万勤, 邓仁菊, 张 健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 28(12): 2889-2895.
- [28] Wynn J G, Bird M I, Vellen L, *et al.* Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20: GB1007: doi:10.1029/2005GB002576.
- [29] Tissen H, Stewart J W B. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter. II. Cultivation effects on organic matter composition in size fraction[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47: 509-514.
- [30] 胡 嵩, 张 颖, 史荣久, 等. 长白山原始红松林次生演替过程中土壤微生物生物量和酶活性变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 366-372.
- [31] 王 阳, 章明奎. 不同类型林地土壤颗粒态有机碳和黑碳的分布特征[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 37(2): 193-202.
- [32] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015(9): 2800-2809.
- [33] 安晓娟, 李 萍, 戴 伟, 等. 亚热带几种林分类型土壤有机碳变化特征及与土壤性质的关系[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22): 53-58.
- [34] 崔晓阳, 郝敬梅, 赵山山, 等. 大兴安岭北部试验林火影响下土壤有机碳含量的时空变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 195-200.
- [35] 张文敏, 吴 明, 王 蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1351-1360.
- [36] 陆 昕, 孙 龙, 胡海清. 森林土壤活性有机碳影响因素[J]. 森林工程, 2013(1): 9-14.
- [37] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
- [38] 王 滨, 钱晓刚, 彭 熙. 花江峡谷不同植被类型下土壤水分时空分布特征[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 139-141.
- [39] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 等. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 363-370.
- [40] 田 昆. 火烧迹地土壤磷含量变化的研究[J]. 西南林学院学报, 1997, 17(1): 21-25.
- [41] 张玉红, 孙铭隆, 刘 彤. 林火对大兴安岭典型植被土壤理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(6): 41-44.
- [42] 解宏图, 郑立臣, 何红波, 等. 东北黑土有机碳、全氮空间分布特征[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1058-1061.
- [43] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 等. 土壤团聚体固碳研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 74-80.
- [44] Skjemstad J O, Reicosky D C, Wilts A R, *et al.* Charcoal carbon in US agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(4): 1249-1255.
- [45] Blanco-Canqui H, La I R. Mechanism of C sequestration in soil aggregates[J]. Critical Review in Plant Science, 2004, 23: 481-504.
- [46] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al.* Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 539-546.
- [47] 彭新华, 张 斌, 赵其国. 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, 2004, 41(4): 618-623.