

长白山典型森林土壤黑碳含量及不同组分中的分布特征

孙金兵, 桑 英, 宋金凤, 崔晓阳*

(东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: [目的]通过实地采样对黑碳进行量化研究。[方法]利用相对密度分组方法探讨了长白山典型森林土壤黑碳含量及在不同有机碳组分中的分布特征。[结果]表明:黑碳(BC)含量在表层(A_{11})、亚表层(A_{12})分别为 $6.39 \sim 16.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.44 \sim 6.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随土壤深度的增加而显著下降($p < 0.01$)。在 A_{11} 、 A_{12} 层中, 轻组有机碳(LFOC)平均含量分别为 $66.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $6.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 轻组黑碳(LFBC)平均含量分别为 $5.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 同时, LFBC/LFOC 在 A_{12} 层($10.02\% \sim 34.89\%$)显著高于 A_{11} 层($6.99\% \sim 14.45\%$) ($p < 0.01$); A_{11} 、 A_{12} 层重组有机碳(HFOC)平均含量分别为 $49.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $36.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 重组黑碳(HFBC)平均含量分别为 $2.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, HFBC/HFOC 在 A_{11} 层($3.36\% \sim 8.08\%$)和 A_{12} 层($3.21\% \sim 7.58\%$)之间没有显著差异($p > 0.05$)。另外, 土壤中 LFBC/LFOC 显著高于 HFBC/HFOC ($p < 0.01$), LFBC/BC 显著高于 HFBC/BC ($p < 0.01$)。[结论]长白山典型森林土壤中黑碳的含量、比例均较高; 土壤表层(A_{11})有机碳、黑碳含量及各组分有机碳、黑碳含量均高于亚表层(A_{12}), 均随着土层加深而显著降低; 轻组、重组有机碳中均含有一定比例的黑碳, 黑碳主要分布在轻组分中; 轻组、重组有机碳与组分中黑碳均显著相关, 轻组中相关系数大于重组。

关键词: 长白山; 森林土壤; 黑碳; 轻组; 重组; 分布特征

中图分类号: S714

文献标识码: A

Content and Distribution of Black Carbon in Typical Forest Soils in Changbaishan Mountains

SUN Jin-bing, SANG Ying, SONG Jin-feng, CUI Xiao-yang

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

Abstract: Black Carbon (BC) is an important component of the soil carbon pool and plays important roles in the long-term carbon sequestration because of its chemical stability. Even though black carbon directly affects the quantity and quality of soil organic carbon in forest soil, systematic few studies were conducted on the content and distribution of black carbon. The content and distribution of black carbon in typical forest soils in Changbaishan Mountains was investigated with relative density method. The results showed that the content of BC in surface soil layer (A_{11}) and sub-surface soil layer (A_{12}) were $6.39 \sim 16.55$ and $1.44 \sim 6.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively and the content decreased with the increase of soil depth ($p < 0.01$). The average content of light-fraction organic carbon (LFOC) in A_{11} and A_{12} was 66.66 and $6.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively; the average content of light-fraction black carbon (LFBC) was $5.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in A_{11} and $1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in A_{12} ; the ratio of LFBC/LFOC in A_{12} ($10.02\% \sim 34.89\%$) was significantly higher than that in A_{11} ($6.99\% \sim 14.45\%$) ($p < 0.01$). The average contents of heavy-fraction

收稿日期: 2015-03-10

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

organic carbon (HFOC) in A_{11} and A_{12} were 49.16 and 36.55 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively; the average content of heavy-fraction black carbon (HFBC) was 2.69 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in A_{11} and 1.44 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in A_{12} ; the ratio of HFBC/HFOC was 3.36%~8.08% in A_{11} and 3.21%~7.58% in A_{12} and the difference was not significant ($p > 0.05$). In addition, the content of LFBC/LFOC was significantly higher than HFBC/HFOC ($p < 0.01$) and LFBC/BC was significantly higher than HFBC/BC ($p < 0.01$), suggesting that BC mainly was distributed in the light fraction. Furthermore, the LFOC and HFOC were significantly correlated with the contents of LFBC and HFBC respectively ($p < 0.01$), and the coefficient of correlation was greater between LFOC and LFBC.

Key words: Changbaishan Mountains; forest soil; black carbon; light fraction; heavy fraction; distribution character

森林土壤在全球碳平衡中起关键作用,对全球气候变化具有重要影响。由于天然森林火灾和人为用火等原因,每年在森林生态系统中形成了大量的黑碳(Black Carbon, BC)。据统计,全球黑碳形成的速度是 50~200 $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,大量的黑碳主要存留在地球表面^[1],其中有 20% 的碳是由于树木发生不完全燃烧^[2],使部分碳以木炭或焦炭的形式固定下来^[3-4];黑碳的这个形成速度将使因经常毁林产生的净 CO_2 的量减少 2%~18%^[5]。自从 20 世纪 80 年代 Goldberg 的著作《Black Carbon in the Environment》^[6]发表以来,土壤黑碳研究在许多领域得到了迅速发展。研究表明,黑碳与高芳香土壤腐植酸的光谱及化学组成具有很大相似性^[7],其化学性质稳定,不易分解,在长时间尺度上具有稳定土壤有机碳库作用。

长白山阔叶红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)林是我国东北东部山区的地带性森林植被,是温带针阔混交林的典型代表,在森林生态系统碳平衡中占有重要地位^[8-9]。长白山地处火山口,早年由于火山喷发引起的林火,可能形成大量的森林土壤黑碳。因此,量化该区域的土壤黑碳对准确评估森林生态系统碳储量及其稳定性具有重要科学意义。目前,长白山阔叶红松林区的相关研究多集中土壤有机碳特征^[10]、地下生物量与碳贮量^[11]、土壤微生物量碳与土壤有机碳含量^[12]及采伐^[13]、经营方式^[14-15]对生态系统碳密度和收支平衡的影响等,直接针对该区域森林土壤黑碳相关研究尚缺乏。本文选择长白山北坡设置研究样地,通过相对密度分组法,测定了森林土壤各组分碳含量(BC、LFOC、LFBC、LFOC 和 LFBC),研究了组分中黑碳所占比例(LFBC/LFOC、HFBC/HFOC、LFBC/BC、HFBC/BC),分析了各组分有机碳间的相关关系,探讨了森林土壤黑碳的累积机理和分布特征,旨在为我国温带地区森林土壤碳储量的科学估算和森林土壤固碳功能

的定量评估提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域与样品采集

研究区位于长白山北麓(42°24'32"~42°27'14" N, 127°53'40"~127°59'12" E),主要地貌单元为孤立山丘和玄武岩台地,其中以黄土状粘土构成的高阶地为主^[16],海拔约为 800~860 m。该区具明显的季风性大陆山地气候,冬季漫长寒冷,夏季短暂温润,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。地带性植被主要是以红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)为主的针阔混交林(简称红松阔叶林),其乔木层除红松外还有白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、山杨(*Populus davidiana* Dode.)、黄菠萝(*Phellodendron amurense* Rupr.)、沙松(*Abies holophylla* Maxim.)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fischer ex Ledeb.)、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)等,灌木层有毛槭(*Acer hypoleucum* Hayata.)、暴马丁香(*Syringa reticulata* Blume.)、瘤枝卫矛(*Euonymus verrucosus* Scop. var. *chinensis* Maxim.)、早花忍冬(*Lonicera praeflorens* Batalin.)、刺五加(*Acanthopanax senticosus* (Rupr. Maxim.) Harms)等,草本层为蕨类(*Pteridophyta* spp.)、木贼(*Hippochaete hiemale* (L.) Boerner.)、山茄子(*Brachybotrys paridiformis* axim. ex Oliv.)等。土壤类型主要为白浆土(漂白冷凉淋溶土, CST)和暗棕壤(暗沃冷凉淋溶土, CST)。白浆土分布于稍有起伏的高阶地平面上,其成土母质为黄土状粘土和火山玄武岩风化物,质地比较粘重,具有较薄的腐殖质层,其下为淡黄色的白浆层,再下为淀积层^[16];暗棕壤分布在花岗岩山地或高阶地的玄武岩风化物上,成土母质主要为花岗岩、玄武岩的坡积物,成土过程主要为弱酸性淋溶过程和温带湿润森林下腐殖质积累过程^[17]。在

研究区典型红松阔叶林中选取 20 块样地(10 m × 10 m),其中白浆土、暗棕壤样地各 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。

1.2 分析方法

土壤湿样品捡去根系,无损风干、称质量(W₁),过 2 mm 筛。制样后将筛出的 2 mm 以上石砾合并称质量(W₂),计算石砾含量;土壤密度根据 W₁ 和实际取样体积估算。过 2 mm 筛的土样在容器内充分混匀,取适量进一步用玛瑙球磨碎,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^[18]。

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 mol · 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 mol · L⁻¹ HF/1 mol · L⁻¹ HCl,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 小时摇匀 1 次),离心弃去上清液;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 mol · L⁻¹ K₂Cr₂O₇ 和 2 mol · L⁻¹ H₂SO₄ 溶液,超声分散 10 min,加盖回流漏斗,恒温水浴中 55℃ ± 1℃ 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。

1.2.2 土壤有机质密度分级 目前有多种土壤有机质分级方法,包括化学分级、物理分级和生物学分级等^[19]。密度分级属于土壤有机质物理分级,即设定一定密度值(1.6~2.0 g · cm⁻³)作为临界密度值,密度小于此值的土壤组分定义为轻组(Light fraction, LF),而大于此临界密度的土壤组分定义为重组(Heavy fraction, HF)^[20],根据其密度划分为结构和功能不同的两个库,然后采用氢氟酸/盐酸处理的重铬酸盐氧化方法分离出 BC^[18],得到 LFBC 和 HFBC。本研究在 Janzen 等^[21]的分离方法基础上加以改进:称取过 2 mm 筛的风干土样 25.0 g 于 100 mL 离心管中,加入 50 mL NaI 重液(密度 1.80 g · cm⁻³),振荡 1 h(200 r · min⁻¹),然后在 4 000 r · min⁻¹ 条件下离心 20 min(如果悬液浑浊则加大离心机的转速或增加离心时间),混合物表面悬浮的轻组有机物包括上清液轻轻倒入装有 0.45 μm 尼龙滤膜的砂芯过滤装置中抽气过滤;重复上述过程 2~3 次,直至没有可见的轻组有机物质,最后用去离子水冲洗轻组有机物至重液被淋洗干净,将收集的轻组用 75 mL 0.01 mol · L⁻¹ 的 CaCl₂ 进行滤洗,再用去离子水滤洗 3~4 次,滤纸上的轻组有机物洗到预先称质量的器皿中,在 60℃ 下烘干 72 h,称质量,这一组分为轻组;上述离心管内沉淀加 50 mL 蒸馏水,震荡 0.5 h(200 r · min⁻¹),然后在 4 000 r · min⁻¹ 条件下离心 20 min,弃去上清液,重复洗涤 3 次,管内沉淀用 95% 乙醇反复洗涤至无色,洗出,烘干、称质量,这一组分为重组;各组分中的黑碳提取过程同 1.2.1。以上组分用玛瑙研钵研磨,过 0.149 mm 筛后备用。

1.2.3 样品中碳的测定 全土有机碳(OC)、全土黑碳(BC)、轻组有机碳(LFOC)、轻组黑碳(LFBC)、重组有机碳(HFOC)、重组黑碳(HFBC)含量分别用自动 CN 分析仪(Heraeus Elementar Vario EL, Hanau)直接测定,单位统一换算成 g · kg⁻¹ 土。

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 全土黑碳含量

土壤 BC 含量在 A₁₁、A₁₂层分别为 6.39~16.55、1.44~6.16 g·kg⁻¹,随深度的增加而显著下降($p < 0.01$)。A₁₁、A₁₂层有机碳含量分别为 70.04~164.33、19.48~82.23 g·kg⁻¹,总体趋势为随土层深度显著降低($p < 0.01$)。A₁₁、A₁₂层 BC/OC 比例分别为 7.94%、8.14%,有随土层深度而增加的趋势,但差异未达显著水平($p > 0.05$)。另外,土壤 BC、OC 含量的变异系数表现为 A₁₁层 < A₁₂层,而 BC/OC 的变异系数在两不同土层间差异不大(表 1)。

表 1 样地土壤有机碳、黑碳有机碳的含量及 BC/OC 比例($n=20$)

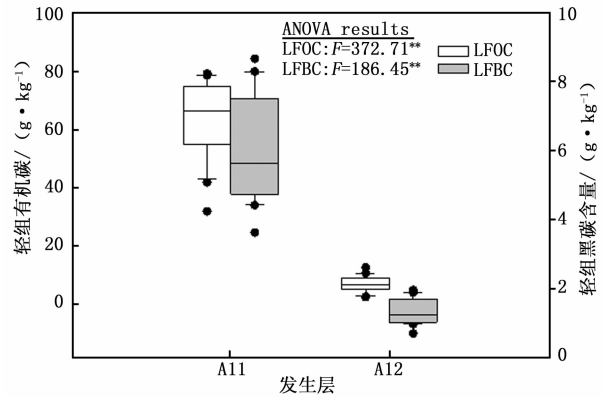
指标	土壤层次	范围/(g·kg ⁻¹)	平均值/(g·kg ⁻¹)	标准差/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%
黑碳含量 (BC)	A ₁₁	6.39~16.55	10.25 ^{a2}	2.34	22.84
	A ₁₂	1.44~6.16	3.97 ^{b2}	1.40	35.29
有机碳含量 (OC)	A ₁₁	70.04~164.33	131.27 ^{a2}	25.93	19.75
	A ₁₂	19.48~82.23	49.71 ^{b2}	17.53	35.26
BC/OC	A ₁₁	5.95~14.09	7.94 ^{a1}	1.78	22.46
	A ₁₂	4.92~12.07	8.14 ^{a1}	1.77	21.76

注:不同土层间平均值的差异,后缀为 1 的小写字母不同代表 $p=0.05$ 显著水平,后缀为 2 的小写字母不同代表 $p=0.01$ 显著水平。

2.2 密度组分中黑碳含量

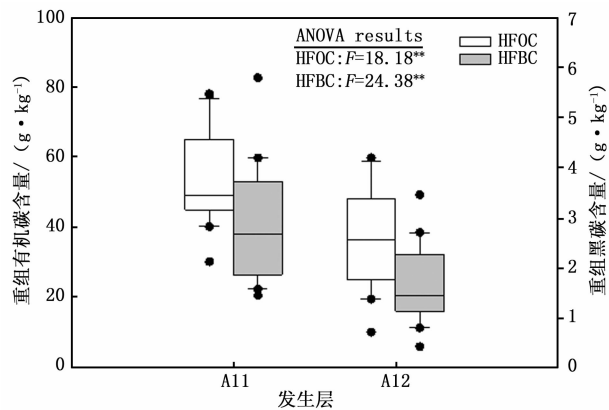
2.2.1 LFOC 和 LFBC 的含量 A₁₁、A₁₂层土壤轻组黑碳(LFBC)含量范围分别为 8.69~3.62、1.94~0.68 g·kg⁻¹,中位值分别为 5.63、1.21 g·kg⁻¹;轻组有机碳(LFOC)含量范围分别为 79.43~32.01、12.73~2.57 g·kg⁻¹,中位值分别为 66.66、6.65 g·kg⁻¹(图 1)。方差分析可知,土壤轻组有机碳、轻组黑碳的含量均随着土层加深而显著降低($p < 0.01$)。

2.2.2 HFOC 和 HFBC 的含量 土壤重组黑碳(HFBC)含量范围,在 A₁₁、A₁₂层分别为 5.80~1.45、3.46~0.43 g·kg⁻¹,其中位值分别为 2.69、1.44 g·kg⁻¹。土壤重组有机碳(HFOC)含量范围,在 A₁₁、A₁₂层分别为 78.31~30.35、59.98~10.20 g·kg⁻¹,其中位值分别为 49.16、36.55 g·kg⁻¹。方差分析表明,土壤重组有机碳、重组黑碳的含量均随着土层加深而显著降低,即 A₁₁层 > A₁₂层($p < 0.01$)。



(图中不同土层方差分析结果:F值标注*表示 $p < 0.05$,**表示 $p < 0.01$)

图 1 土壤轻组有机碳和轻组黑碳的含量



(图中不同土层方差分析结果:F值标注*表示 $p < 0.05$,**表示 $p < 0.01$)

图 2 土壤重组有机碳和重组黑碳的含量

2.3 黑碳在不同密度组分中的分布特征

2.3.1 密度组分中黑碳所占比例 LFBC/LFOC 为 A₁₁层 6.99%~14.45%, A₁₂层 10.02%~34.89%,随土层加深而增高($p < 0.01$);其变异系数 A₁₁层(19.04) < A₁₂(29.52)层,可见下层的变化幅度较大(表 2)。HFBC/HFOC 为 A₁₁层 3.36%~8.08%, A₁₂层 3.21%~7.58%,呈随土层加深而降低的趋势,但差异未达显著水平($p > 0.05$);其变异系数 A₁₁层(26.32)与 A₁₂层(25.90)接近(表 2)。另外,LFBC/BC 为 A₁₁层 40.89%~71.00%, A₁₂层 20.70%~53.76%,随土层加深而显著降低($p < 0.01$);其变异系数 A₁₁层(13.11) < A₁₂层(21.46),即下层的变异幅度较大。HFBC/BC 为 A₁₁层 14.59%~38.66%, A₁₂层 26.42%~56.19%,随土层加深而显著增高($p < 0.01$);但其变异系数 A₁₁层(32.93) > A₁₂层(20.57),即上层变异程度较高。

A₁₁层中 LFBC/LFOC(9.47%) > HFBC/HFOC(5.27%), A₁₂层 LFBC/LFOC(20.13%) > HFBC/HFOC

HFBC(4.56%),均达到显著差异($p < 0.01$)(表2)。由此可见,轻组、重组分有机碳中均含有一定比例的黑碳,其中轻组分中黑碳占有更高的比例。从轻组、重组分中黑碳占全土黑碳的百分比来看(表2),在 A_{11} 层中 $LFBC/BC(58.72\%) > HFBC/BC$

(28.03%), A_{12} 层 $LFBC/BC(33.34\%) < HFBC/BC(41.74\%)$;而整个腐殖质层($A_{11} + A_{12}$)混合统计, $LFBC/BC(46.36\%) > HFBC/BC(34.71\%)$ ($p < 0.01$),进一步表明黑碳主要分布在轻组组分中。

表2 样地土壤 LFBC/LFOC 和 HFBC/HFOC 及 LFBC/BC 和 HFBC/BC 的比例

指标	土壤层次	范围/%	平均值/%	标准差/%	变异系数/%
LFBC/LFOC	A_{11}	6.99 ~ 14.45	9.47 ^{b2, A2}	1.80	19.04
	A_{12}	10.02 ~ 34.89	20.13 ^{a2, A2}	5.94	29.52
HFBC/HFOC	A_{11}	3.36 ~ 8.08	5.27 ^{a1, B2}	1.39	26.32
	A_{12}	3.21 ~ 7.58	4.56 ^{a1, B2}	1.18	25.90
LFBC/BC	A_{11}	40.89 ~ 71.00	58.72 ^{a2, A2}	7.70	13.11
	A_{12}	20.70 ~ 53.76	33.34 ^{b2, A1}	7.16	21.46
HFBC/BC	A_{11}	14.59 ~ 38.66	28.03 ^{b2, B2}	9.23	32.93
	A_{12}	26.42 ~ 56.19	41.74 ^{a2, A1}	8.59	20.57

注:不同土层间各指标平均值的差异,后缀为1的小写字母不同代表 $p=0.05$ 显著水平,后缀为2的小写字母不同代表 $p=0.01$ 显著水平;相同土层 LFBC/LFOC 与 HFBC/HFOC 的比较,或 LFBC/BC 与 HFBC/BC 的比较,后缀为1的大写字母不同代表 $p=0.05$ 显著差异,后缀为2的大写字母不同代表 $p=0.01$ 显著差异。

2.3.2 各组分有机碳、黑碳间的相关性 轻组、重组中黑碳含量与轻组、重组有机碳含量存在显著的正相关关系(图3)。 A_{11} 和 A_{12} 层相比较,轻组组分中 LFBC 与 LFOC 间的相关系数 A_{11} 层 0.728($p < 0.01$,图3a) $> A_{12}$ 层 0.659($p < 0.01$,图3c);重组组分中 HFBC 与 LFOC 的相关系数与轻组相反, A_{11} 层 0.802($p < 0.01$,图2b) $< A_{12}$ 层 0.824($p < 0.01$,图3d)。而混合统计($A_{11} + A_{12}$)得出,轻组组

分中 LFBC 与 LFOC 之间的相关系数为 0.959($p < 0.01$,图3e),重组组分中 HFOC 与 HFBC 的相关系数为 0.856($p < 0.01$,图3f),可见 A 层轻组组分中黑碳与有机碳的相关性大于重组组分。

另外,混合统计中,轻组分中黑碳点据集群特征明显,可以很清楚的分出 A_{11} 和 A_{12} 层为两组集群数值(图3e);而重组分中, A_{11} 和 A_{12} 层数据值没有清晰的分界(图3f)。

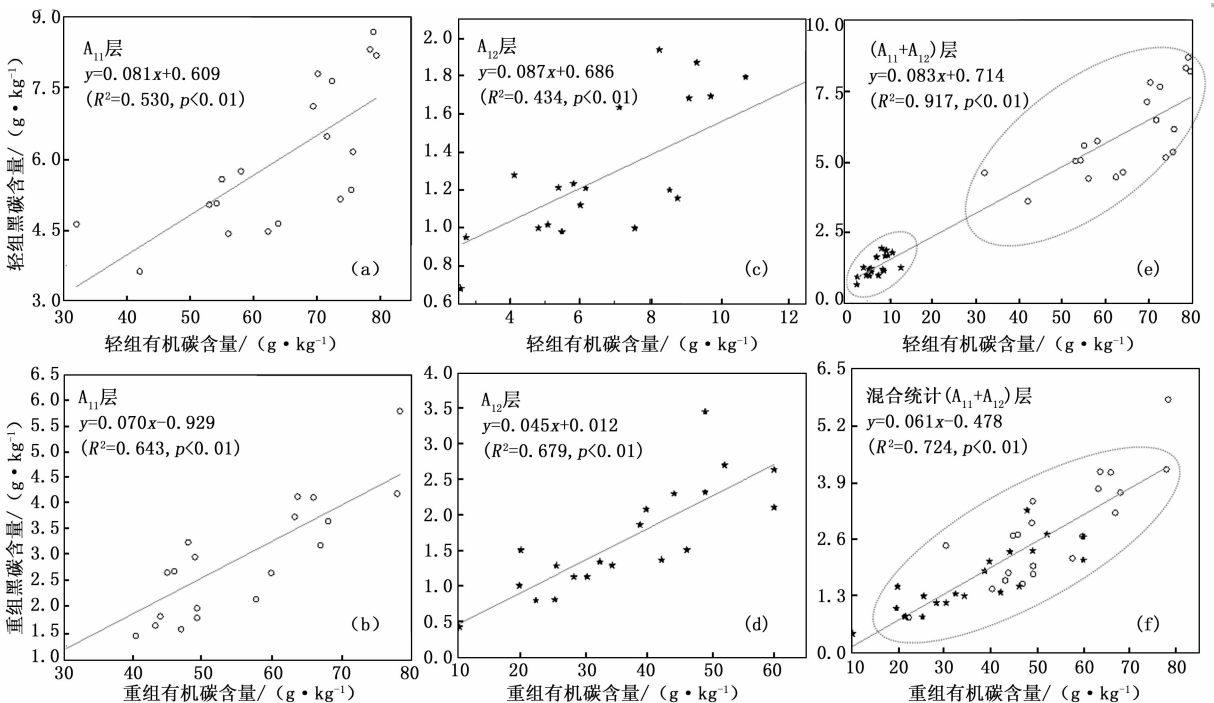


图3 不同土壤组分中有机碳与黑碳之间的相关性

3 讨论

总体来看,研究区 A 层土壤中均含有较高量的黑碳,可能与近代火山活动导致的林火有一定关系。BC 呈现随土层加深而递减的趋势,这与 Rumpel^[22]、于小玲^[23]、刘兆云^[24] 等研究结果一致。有研究表明,浅层有机碳的积累可增加黑碳的积累^[23],黑碳同有机碳一样具有表层富集,自上而下明显降低^[23]。Lynch 发现,加拿大森林土壤中 0~10 cm 土层的黑碳积累量可占整个土壤的 70% 以上^[25]。另外,黑碳占总有机碳的比例随土层深度增加而递增,这可能有几方面原因:其一,表层土壤有机碳的大量积累对黑碳起到了“稀释”作用;其二,向下迁移的黑碳和非黑碳成分在下层土壤中的稳定性不同,在长期成土过程中,前者的平均存留率可能远高于后者;其三,黑碳和非黑碳成分向下迁移的程度不同,前者可能大于后者。研究表明,黑碳与高芳香土壤腐植酸的化学组成及性质十分相似^[7],而且森林土壤随着土层加深,其烷基碳和芳香碳的比例增加^[26],提示黑碳随土层深度减少的程度低于总有机碳随土层深度减少的程。Hammes 研究了俄罗斯草原土壤整个剖面上黑碳的相对浓度(即 BC/OC),发现最大黑碳浓度是在表层以下出现,即 30~50 cm 处黑碳占有有机碳的最大比例约为 10%^[27]。另有文献报道,表层黑碳占有有机碳的比例为 11.9%~13.1%,而在 87~114 cm 处则增加到 35%±7%,最高增加至 50%^[28]。有数据表明,黑碳在垂直方向上迁移速度达每年 0.63~1.16 cm^[29];对热带氧化土的研究发现,添加混合到 0.1 m 深的黑碳在 2 a 内有 0.45% 移动到 0.15~0.3 m 深度之间,有 0.02% 移动到 0.3 m 深度以下,并认为土壤水分流动和土壤动物扰动是黑碳向深层土壤迁移的动力^[30]。可见,黑碳对土壤有机碳的贡献与土壤深度成正比^[31]。此外,样地中 BC、OC 含量及 BC/OC 比例,3 个指标变幅均较大(表 1),可能是因为森林火灾是黑碳产生的诱因,而其发生具有不确定性;其次,因黑碳本身的理化性质特殊,使其受侵蚀、搬运以及沉积等诸多因素的影响也具有不确定性,所以各指标在不同土层的变幅均较大。

长白山典型森林土壤中轻组、重组有机碳含量均较高,可能是因为红松阔叶林郁闭度高,凋落物层厚,且下木盖度和地被植物盖度大,分解后回归土壤的有机碳也较丰富;同时,相应的水热条件易于有机质积累,因此其各组分中有机碳含量也高。重组、轻组有机碳及二者中提取的黑碳均具有表聚特征(A₁₁

层 > A₁₂层),同样是因为 A₁₁ 层土壤中的生物量比较富集,是凋落物分解、腐殖化作用以及微生物分解活动的主要区域,土壤有机质丰富,因而土壤各组分碳储量均高于 A₁₂层^[32]。

本研究中黑碳在轻组、重组中均占有一定的比例,而且黑碳在轻组中所占比例显著高于重组。这可能是因为黑碳在土壤主要以微观或宏观的木炭颗粒形式存在^[33]。有研究者利用电子扫描显微法鉴定出森林土壤轻组(< 1.65 g·m⁻³)中存在大量木炭^[34]。在非洲南部热带草原土壤黑碳形成过程中,火烧后土壤中依然存在着超过 90% 的木炭^[35];在德国黑钙土中,木炭占土壤有机碳的比例达 45%^[36]。一般认为,木炭不能在土壤中持久存在,因为木炭较轻很容易被风和水侵蚀,或是悬浮在土壤溶液中并被水带走;而事实上通过对土壤剖面的分析发现,木炭在整个土壤剖面中都有分布(即黑碳在土壤中容易移动),木炭碎片可直接随粉粒沉积、或是通过生物扰动、冻融包裹等作用进入土层中,极细小的木炭碎片和黏粒一起迁移到下层土壤^[4]。Glaser 等利用苯多环羟酸(BPCAs)方法研究了亚马逊黑土中黑碳在不同密度组分中的分配,结果发现黑碳大多存在于轻组分中(< 2.0 g·cm⁻³)^[37];Brodowski 等也采用苯多环羟酸方法研究了德国土壤中的黑碳对土壤腐殖质的贡献,结果表明 BC 也主要存在于轻组分中(< 2.0 g·cm⁻³)^[38],这与本研究结果相似。

此外,本文土壤轻组、重组有机碳与各组分中黑碳存在显著正相关关系。通常认为,重组有机碳是惰性的,属于土壤碳中的保护性碳组分^[39];本研究的 HFBC 是由 HFOC 中提取获得,应该属于难氧化的、化学性质及其稳定的惰性碳。轻组有机碳被认为是主要由植物残体分解后形成的一种过渡性有机碳,即通常所谓活性碳库的一部分^[40];然而,主要存在于轻组分中的黑碳,尤其 LFBC 与 LFOC 间的正相关关系,将使我们重新认识轻组有机碳的稳定性。

4 结论

(1)长白山典型森林土壤中黑碳的含量、比例均较高,在生态系统碳固存中具有重要意义。

(2)土壤表层(A₁₁)有机碳、黑碳含量及各组分有机碳、黑碳含量均高于亚表层(A₁₂),均随着土层加深而显著降低。

(3)轻组、重组有机碳中均含有一定比例的黑碳,其在 LFOC 所占比例显著高于 HFOC,黑碳主要分布在轻组分中;轻组、重组有机碳与组分中黑碳均显著相关,轻组中相关系数大于重组。

参考文献:

- [1] Kuhlbusch T A J, Crutzen P J. Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide [J]. *Biomass Burning and Global Change*, 1996, 1: 160–169.
- [2] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles [J]. *Science*, 1990, 250(4988): 1669–1678.
- [3] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. *Nature*, 1998, 393(6682): 249–252.
- [4] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777–793.
- [5] 张旭东,梁超,诸葛玉平,等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349–355.
- [6] Goldberg E D. *Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution* [M]. John Wiley, New York, 1985.
- [7] Haumaier L, Zech W. Black carbon—possible source of highly aromatic components of soil humic acids [J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 23(3): 191–196.
- [8] 杨弘,裴铁璠,关德新,等. 长白山阔叶红松林土壤水分动态研究[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 587–591.
- [9] 于振良,王庆礼. 长白山阔叶红松林带内杨桦林动态模拟[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(5): 455–458.
- [10] 汲常萍,王慧梅,王文杰,等. 长白山阔叶红松林表层矿质土壤不同组分中有机碳及氮库特征研究[J]. *植物研究*, 2014, 34(3): 372–379.
- [11] 杨丽韞,罗天祥,吴松涛. 长白山原始阔叶红松林不同演替阶段地下生物量与碳、氮贮量的比较[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1195–1199.
- [12] 胡高,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): 366–366.
- [13] 齐麟,于大炮,周旺明,等. 采伐对长白山阔叶对红松林生态系统碳密度的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(10): 3065–3073.
- [14] 吴志军,苏东凯,牛丽君,等. 阔叶红松林森林资源可持续利用方案[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 24–30.
- [15] 韩阳瑞. 透光抚育对长白山中期“栽针保阔红松林碳收支的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2296–2307.
- [16] 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.
- [17] 徐媛媛. 长白山阔叶红松林土壤无机氮空间异质性[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1627–1634.
- [18] 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.
- [19] 李维福,解宏图,郑立臣. 土壤有机质分组方法研究进展[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2008, 24(3): 338–343.
- [20] Greenland D J, Ford G W. Separation of partially humified organic materials from soils by ultrasonic dispersion [C]//8th International Congress of Soil Science, Bucharest. 1964, 2: 137–147.
- [21] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799–1806.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Lynch J A, Clark J S, Stocks B J. Charcoal production, dispersal, and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(8): 1642–1656.
- [26] Ussiri D A N, Johnson C E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods [J]. *Geoderma*, 2003, 111(1): 123–149.
- [27] Hammes K, Torn M S, Lapenas A G, et al. Centennial black carbon turnover observed in a Russian steppe soil [J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(5): 1339–1350.
- [28] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils [J]. *Geoderma*, 2007, 139(1): 220–228.
- [29] Leifeld J, Fenner S, Müller M. Mobility of black carbon in drained peatland soils [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2007, 4(2): 871–891.
- [30] Major J, Lehmann J, Rondon M, et al. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1366–1379.
- [31] Dai X, Boutton T W, Glaser B, et al. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1879–1881.
- [32] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1217–1225.
- [33] 商素云. 亚热带不同林分土壤有机碳组分及其结构特征研究[D]. 浙江农林大学, 2012.
- [34] Spycher G, Sollins P, Rose S. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: vertical distribution and seasonal patterns [J]. *Soil Science*, 1983, 135(2): 79–87.
- [35] Kuhlbusch T A J, Andreae M O, Cachier H, et al. Black carbon formation by savanna fires: Measurements and implications for the global carbon cycle [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 1996, 101(D19): 23651–23665.
- [36] Schmidt M W I, Skjemstad J O, Gehrt E, et al. Charred organic carbon in German chernozemic soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(2): 351–365.
- [37] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7): 669–678.
- [38] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils [J]. *Geoderma*, 2007, 139(1): 220–228.
- [39] Garten Jr C T, Post III W M, Hanson P J, et al. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 45(2): 115–145.
- [40] Cambardella C A, Elliott E T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions [J]. *Geoderma*, 1993, 56(1): 449–457.