应用生态学报 2017年10月 第28卷 第10期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Oct. 2017, **28**(10): 3111-3118 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201710.014

大兴安岭中段森林土壤的黑碳含量及其在不同粒级中的分布

徐嘉晖 高 雷 崔晓阳*
(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要 土壤黑碳由于具有生物化学惰性被视为土壤稳定碳库的主要成分.本文量化了大兴安岭中段森林土壤黑碳,分析了黑碳在各粒级内的分布,并探讨了黑碳的稳定机制及其在土壤碳库中的重要性.结果表明: 土壤黑碳表聚现象明显,表层黑碳占总剖面(64 cm)的68.7%,随着土层加深黑碳含量显著降低,但黑碳占有机碳的比例却呈现上升趋势.气候条件影响大兴安岭地区土壤黑碳的分布,相对寒冷和湿润的气候条件提高了土壤固持黑碳的潜力;土壤黑碳在各粒级内所占比例表现为黏粒>粉粒>细砂>粗砂,尽管黏粒中黑碳含量最高,并随土层深度增加而升高,但黏粒中黑碳占有机碳的比例却无明显变化,黑碳/有机碳的升高主要源于细砂与粉粒中黑碳的增加;黑碳的生物化学惰性是表层黑碳的主要稳定机制,而深层的黑碳除了其自身抗性外,黏粒矿物的化学保护发挥着重要作用;黑碳不仅作为稳定碳库的主要成分,在颗粒有机碳组分中仍占相当大的比例,因此黑碳的存在提高了土壤稳定性碳储量与碳汇能力.

关键词 森林土壤; 黑碳; 有机碳; 土壤类型; 迁移; 稳定机制

Black carbon content and distribution in different particle size fractions of forest soils in the middle part of Great Xing' an Mountains, China. XU Jia-hui, GAO Lei, CUI Xiao-yang* (*College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin* 150040, *China*).

Abstract: Soil black carbon (BC) is considered to be the main component of passive C pool because of its inherent biochemical recalcitrance. In this paper, soil BC in the middle part of Great Xing'an Mountains was quantified, the distribution of BC in different particle size fractions was analyzed, and BC stabilization mechanism and its important role in soil C pool were discussed. The results showed that BC expressed obvious accumulation in surface soil, accounting for about 68.7% in the whole horizon (64 cm), and then decreased with the increasing soil depth, however, BC/OC showed an opposite pattern. Climate conditions redistributed BC in study area, and the soil under cooler and moister conditions would sequester more BC. BC proportion in different particle size fractions was in the order of clay>silt>fine sand>coarse sand. Although BC content in clay was the highest and was enhanced with increasing soil depth, BC/OC in clay did not show a marked change. Thus, the rise of BC/OC was attributed to the preservation of BC particles in the fine sand and silt fractions. Biochemical recalcitrance was the main stabilization mechanism for surface BC, and with the increasing soil depth, the chemical protection from clay mineral gradually played a predominant role. BC not only was the essential component of soil stable carbon pool, but also took up a sizable proportion in particulate organic carbon pool. Therefore, the storage of soil stable carbon and the potential of soil carbon sequestration would be enhanced owing to the existence of BC.

Key words: forest soil; black carbon; organic carbon; soil type; migration; stabilization mechanism.

本文由国家"十三五"重点研发计划项目(2016YFA0600803)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFA0600803).
2016-12-22 Received, 2017-06-12 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: c_xiaoyang@126.com

黑碳(black carbon,BC)是生物质与化石燃料不完全燃烧的产物,普遍存在于土壤与沉积物中[1-2].黑碳具有高度的惰性和耐分解性,作为土壤惰性碳库的主要成分,在土壤碳循环中占有十分重要的地位,被视为大气 CO_2 的重要碳汇[2-3].由于黑碳具有超强的吸附力,从而可吸附有机污染物与重金属以降低土壤污染[1],并且可吸附营养盐以增强土壤肥力[4].此外,黑碳可能是全球碳收支中遗失碳汇的重要组成部分,并被用来指示历史火事件,因此受到了广泛关注[3-5].

森林土壤碳库占全球土壤碳库的 73%,在土壤碳循环中占有重要地位[5].由于天然火灾和人为用火等导致每年森林生态系统都将产生大量的黑碳[6].据统计,全球每年由于树木的不完全燃烧产生约 10~40 Tg 的黑碳[7](1 Tg = 10^9 kg),这部分黑碳的产生缓解了由于毁林导致 CO_2 释放的 2%~18%.Lehmann 等[8]估测森林土壤黑碳在大气-陆地生态系统碳循环中的地位,结果表明,由于黑碳的积极作用使碳排放减少了 18%~25%,这足以说明黑碳对碳汇的贡献.大兴安岭地区是我国面积最大的一个林区,是森林火灾发生的高频区,土壤黑碳储量相当可观,因此量化该区域的土壤黑碳对于准确评估我国寒温带、温带森林生态系统的碳汇功能具有重要理论意义,然而关于黑碳对该地区土壤碳库的重要性还未受到高度重视.目前,关于大兴安岭森林土壤黑碳的研究仅见任清胜等[9]几篇针对火烧强度对棕色针林土表层黑碳的影响,而且关于黑碳在不同粒级中的分布规律研究鲜见报道.本研究所选区域贯穿大兴安岭中段,覆盖了 3 种土壤类型,并分析了黑碳在土壤剖面内的分布及其在不同土壤粒级内所占比例,以探索黑碳在土壤中的稳定机制,旨在为我国寒温带、温带森林土壤碳汇功能的评估及深入开展黑碳的稳定性研究提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区牙克石市东南部(48°36′—48°54′ N,121°8′—122°12′ E),贯穿大兴安岭中段.大兴安岭中段存在明显的焚风效应,气候和降水量均表现为自东南向西北逐渐降低的总趋势,此外本区随地势升高,温度下降,由于水汽的凝结,导致相对湿度增大[10].受地形与气候条件影响,该区域发育成 3 种土壤类型,中脊为棕色针叶林土,东坡与西坡分别为暗棕壤与灰色森林土.中脊海拔均在 1000 m 以上,除兴安落叶松(*Larix gmelinii*)外伴有少量的白桦(*Betula platyphylla*),郁闭度约为 0.35,林下植被相对稀疏.东坡属中山地貌,地势陡峻、起伏明显,具阶梯状断层性质;植被为寒温带针叶林和夏绿阔叶林的过渡类型,乔木以兴安落叶松、白桦、蒙古栎(*Quercus mongolica*)为主,郁闭度约为 0.4 左右,灌木层较发育,主要为兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、大叶蔷薇(*Rosa macrophylla*)等.西坡地势相对平缓,山地起伏不大,地势总体由东南部的主脊向西北逐渐降低;植被属于寒温带针叶林向草原植被的过渡类型,乔木以兴安落叶松、白桦、山杨(*Populus davidiana*)为主,郁闭度可达 0.55 左右,灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、稠李(*Prunus padus*)等,草本植被发达,主要有贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、黄芩(*Scutellaria baicalensis*)、芍药(*Paeonia lactiflora*)等,草被植被的盖度高达 90%.

1.2 样品采集与分析

在上述 3 种土壤类型所属区域内,各设置 6 个 20 m×20 m 样地,在每个样地内按照“S”形选取 3~5 个采样点.采样时先去除表面枯枝落叶,按照土壤发生层分别采取腐殖质层(A)、过渡层(AB)、淀积层(B),将各样地的土样按不同发生层混匀,用四分法留取 1 kg 左右,装入布袋.将采集的土样带回实验室后挑出根系,无损风干,同样利用四分法选取部分土样研磨过 2 mm 筛备用,其余原状土装回布袋保存.样地基本信息见表 1.

不同粒级土壤颗粒的分离与获取参照文献[11-12].具体步骤如下:1)称取 20 g 过 2 mm 筛的土样于 250 mL 烧杯中,按水土比 5∶1 加水 100 mL,用超声波破碎仪(FS-300)在 60 J·mL^{-1}能量下进行第一次超声破碎;2)将第一次超声波处理的悬浮液通过手动湿筛获得 250~2000 μm 的粗砂粒,将筛子上的土样转移至蒸发皿中,在 55 ℃条件下烘干并称量;3)将剩余悬浮液进行第二次超声破碎,能量调整为 440 J·mL^{-1},同样湿筛获得 53~250 μm 的细砂粒,将土样转移,烘干并称量;4)将上一步残留的悬浮液在 800 r·min^{-1}条件下离心 7 min 后,将悬浮液倾倒在收集器中,此离心过程重复 5 次甚至以上,直至将 2~53 μm 的粉粒与<2 μm 的黏粒分离.随后将离心管底部的粉粒转移,烘干并称量;5)将上一步倾倒出的悬浮液在5000 r·min^{-1}条件下

表 1　样地基本信息
Table 1　Basic information of the sampling sites

土壤类型 Soil type	年均降水量 Mean annual precipitation (mm)	年均温 Mean annual temperature (℃)	海拔 Altitude (m)	土壤质地 Soil texture	土层厚度 Soil thickness (cm)				土壤容重 Soil bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)		
					O	A	AB	B	A	AB	B
DB	474	−0.5	738.7	壤质粘土 Loamy clay	4.52	13.26	16.02	32.43	0.97	1.31	1.68
BF	450	−3.2	1157.5	壤质粘土 Loamy clay	9.78	6.87	15.37	21.77	0.92	1.35	1.68
GF	360	−2.9	704.8	粉质壤土 Silty loam	2.85	25.54	24.53	36.31	1.11	1.22	1.44

DB：暗棕壤 Dark brown forest soil；BF：棕色针叶林土 Brown coniferous forest soil；GF：灰色森林土 Grey forest soil. O：凋落物层 Forest floor. A：淋溶层 Eluvial horizon；AB：过渡层 Transition horizon；B：淀积层 Illuvial horizon. 下同 The same below.

离心 18 min，获得黏粒，随后转移，烘干并称量.最后将各粒级颗粒重新研磨过 100 目筛，用于后续有机碳的测定及黑碳的分离.

土壤黑碳的分离采用 HF/HCl 处理的重铬酸盐氧化方法[13].具体步骤如下：1）碳酸盐矿物去除：称取过 100 目筛的土样 3 g 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；离心弃上清液，加入 30 mL 去离子水，用旋涡混合仪搅拌 1 min，离心洗涤，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（2∶1，V/V），旋涡 1 min，反应 24 h，离心弃上清液；再加入 15 mL 10 mol · L^{-1} HCl，旋涡 1 min，静置 24 h，离心弃上清液；加入 30 mL 蒸馏水，漩涡 1 min，离心洗涤 3 次；离心管残余物 55 ℃ 烘干后重新研磨过 100 目筛；3）活性有机碳去除：称取 0.3 g 上述样品于 50 mL 具塞三角瓶中，加入 30 mL 0.1 mol · L^{-1} $K_2Cr_2O_7$/2 mol · L^{-1} H_2SO_4（1∶1，V/V）溶液，超声 10 min，加盖回流漏斗，55 ℃条件下恒温水浴反应 60 h，期间每 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.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，然后离心洗涤 3 次；将离心管置于 55 ℃ 烘干，得到的剩余物即为黑碳样品.

土壤有机碳与黑碳含量直接用 vario TOC 分析仪测定，单位转换成 g · kg^{-1}.不同粒级有机碳含量及比例为：不同粒级有机碳含量 = 不同粒级土壤颗粒物中有机碳（g · kg^{-1}）×不同粒级颗粒物占土壤的百分比（%）；不同粒级有机碳比例 = 不同粒级土壤有机碳含量（g · kg^{-1}）/土壤总有机碳含量（g · kg^{-1}）×100%.黑碳同上.

1.3　数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析.采用单因素方差分析法（one-way ANOVA）和 Duncan 法进行方差分析和多重比较（α = 0.05），并对有机碳、黑碳和黏粉粒含量进行线性回归分析.利用SigmaPlot 12.5 软件作图，图中数据为平均值±标准差.

2　结果与分析

2.1　土壤有机碳与黑碳的剖面分布

A 层有机碳含量为（76.11±6.77）g · kg^{-1}，约占整个剖面的 70.6%；A 层黑碳含量为（17.51±3.36）g · kg^{-1}，约占整个剖面的 68.7%.随着土壤深度的增加，有机碳与黑碳的含量均显著降低，然而黑碳占有机碳的比例却呈上升趋势（图 1）.3 种土壤类型间，棕色针叶林土壤的 A 层有机碳和黑碳含量均显著高于其他两种土壤类型，随着深度的增加情况却相反，其各土层黑碳占有机碳的比例则一直显著高于另外两种土壤，说明地形和气候因素在土壤有机碳

表 2　不同土层土壤有机碳、黑碳与黏粉粒含量之间的相关关系
Table 2　Correlations among organic carbon, black carbon and silt/clay under different soil horizons

变量 Variable	A		AB		B	
	方程 Equation	R^2	方程 Equation	R^2	方程 Equation	R^2
BC(y)、OC(x)	y=0.63x−30.459	0.83**	y=0.043x+3.668	0.77**	y=0.154x+1.638	0.76*
OC(y)、ST(x)	y=−0.774x+114.26	0.45*	y=0.444x−1.007	0.20	y=0.377x−3.716	0.21
BC(y)、ST(x)	y=−0.937x+63.727	0.15	y=0.038x+6.261	0.12	y=0.033x+2.136	0.04
OC(y)、CY(x)	y=0.978x+50.124	0.58*	y=0.408x+31.21	0.70*	y=0.28x+21.002	0.71*
BC(y)、CY(x)	y=0.423x+6.283	0.23	y=0.036x+5.563	0.46*	y=0.041x+4.792	0.36*

*P<0.05；**P<0.01. BC：黑碳 Black carbon；OC：有机碳 Organic carbon；ST：粉粒 Silt；CY：黏粒 Clay.

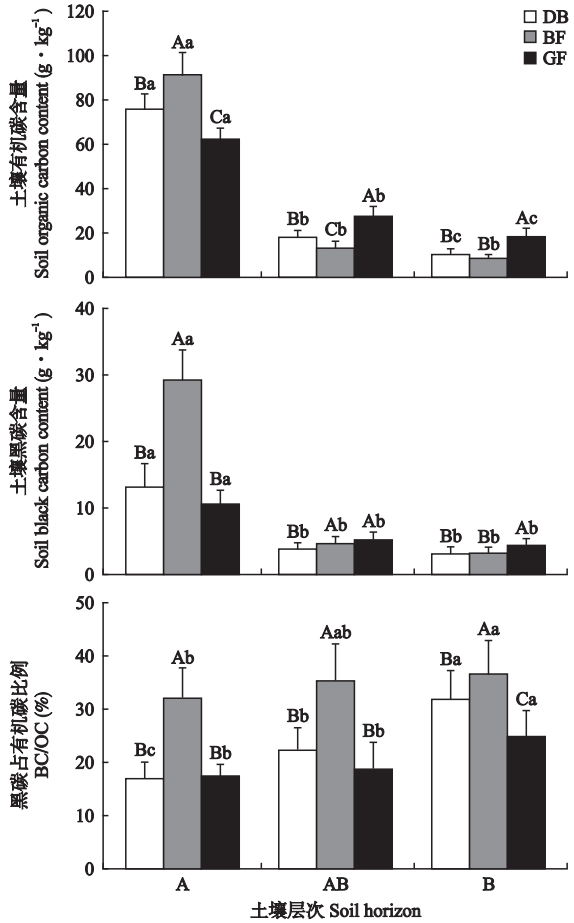


图 1 不同土层土壤有机碳与黑碳含量的变化

Fig.1 Change of soil organic carbon and black carbon content under different soil horizons.

DB: 暗棕壤 Dark brown forest soil; BF: 棕色针叶林土 Brown coniferous forest soil; GF: 灰色森林土 Grey forest soil. A: 淋溶层 Eluvial horizon; AB: 过渡层 Transition horizon; B: 淀积层 Illuvial horizon. 不同大写字母表示同一土层不同土壤类型间差异显著($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference among different soil types in the same horizon at 0.05 level. 不同小写字母表示同一土壤类型不同土层间差异显著($P<0.05$) Different lowercase letters meant significant difference among various soil horizons in the same soil type at 0.05 level. 下同 The same below.

和黑碳的剖面分布中产生了一定影响.

2.2 土壤有机碳、黑碳与黏粉粒含量之间的相关性

线性回归表明,黑碳与有机碳之间呈显著的正相关(表 2),其中,A 层和 AB 层的相关性达到显著水平.有机碳、黑碳与粉粒的相关性较差,其中,A 层的有机碳、黑碳与粉粒为负相关.有机碳、黑碳与黏粒的相关性达到显著水平,其中,所有土层的有机碳与黏粒之间的确定系数(R^2)均高于黑碳与黏粒之间的 R^2,说明黏粒与有机碳的相关性强于黏粒与黑碳.

2.3 土壤有机碳与黑碳在各粒级内的分布

从图 2 可以看出,3 种土壤类型的有机碳与黑碳在各粒级内的分布情况略有差异,但整体而言,土壤有机碳在不同粒级内所占比例表现为:粉粒>黏粒>细砂>粗砂,而黑碳则为:黏粒>粉粒>细砂>粗砂.粉粒与细砂组分的有机碳随深度增加呈现下降趋势,黏粒组分的有机碳则与之相反,粗砂组分的有机碳无明显变化趋势.细砂组分的黑碳随深度的增加而降低,黏粒组分的黑碳随之升高,而粉粒组分的黑碳先下降后上升,但仍表现为上升趋势,粗砂组分的黑碳无明显变化.棕色针叶林土 A 层和 AB 层的黑碳主要分布在细砂组分(分别为 36.5%和 35%),灰色森林土各土层粉粒组分的黑碳均显著高于其他组分(A、AB、B 层粉粒组分黑碳所占比例分别为 53.3%、57.2%、57.2%).

2.4 各粒级组分内黑碳占有机碳的比例

从图 3 可以看出,3 种土壤各粒级内黑碳占有机碳的比例存在很大差异,暗棕壤的粗砂、粉粒和黏粒组分的黑碳/有机碳平均值分别为 24.8%、17.0%和 28.5%,且均随土层深度的增加而升高,细砂组分的黑碳/有机碳平均值为 34.7%,表现为先上升后下降.棕色针叶林土各粒级的黑碳/有机碳均显著高于暗棕壤,A 层粗砂组分与 AB 层细砂组分的黑碳/有机碳达到 53%以上,B 层粉粒组分的黑碳/有机碳竟高达 60.4%,各粒级黑碳/有机碳随土壤深度的变化相对复杂.灰色森林土粗砂和细砂组分的黑碳/有机碳显著低于暗棕壤,而粉粒和黏粒组分的黑碳/有机碳则显著高于暗棕壤,B 层黏粒组分的黑碳/有机碳(35%)显著高于棕色针叶林土(23.5%).其中,粗砂和细砂组分的黑碳/有机碳随土层深度的增加而逐渐升高,而粉粒和黏粒组分的黑碳/有机碳则表现为先降低后上升.综合 3 种土壤,按照粒级从大到小顺序黑碳/有机碳分别为 29.6%、30.7%、24.7%与 30.6%,粗砂和黏粒组分的黑碳/有机碳随土层变化不明显,粉粒组分的黑碳/有机碳显著增加,细砂组分的黑碳/有机碳先增加后降低,但仍表现为上升趋势.综合所有土壤,黑碳/有机碳的平均值为 28.6%,说明本研究区内黑碳主要来源于生物质燃烧[1].

3 讨 论

3.1 土壤黑碳的垂直迁移

研究区土壤黑碳含量随土层加深呈现下降趋势,这与 Brodowski 等[14]、任清胜等[9]、孙金兵等[13]的研究结果一致.北方森林的火烧主要以地表火为主[15],地表凋落物成为黑碳的主要燃烧前体,黑碳因而富集于表层,此外降水也将大气中的黑碳气溶

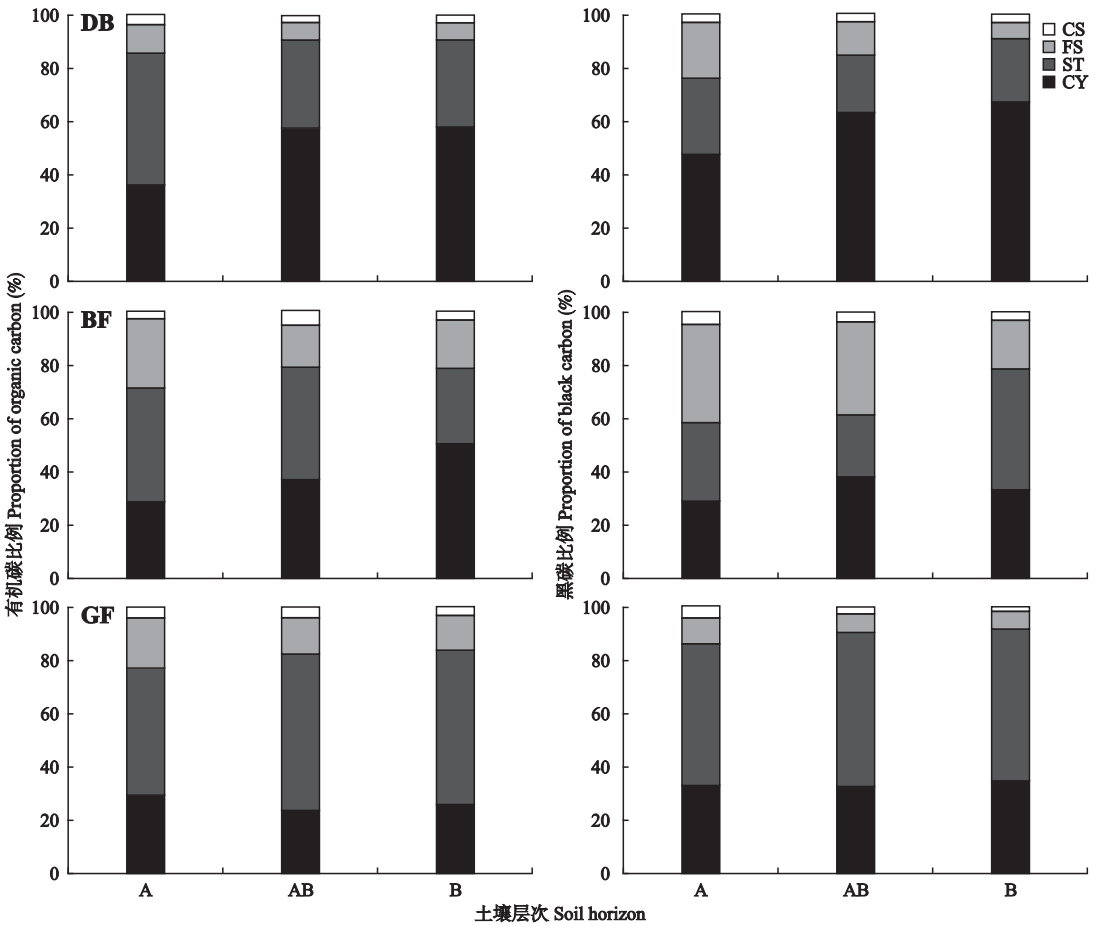


图 2　不同粒级中土壤有机碳和黑碳的比例

Fig.2　Proportion of soil organic carbon and black carbon in different particle size fractions.

CS：粗砂粒 Coarse sand；FS：细砂粒 Fine sand；ST：粉粒 Silt；CY：黏粒 Clay. 下同 The same below.

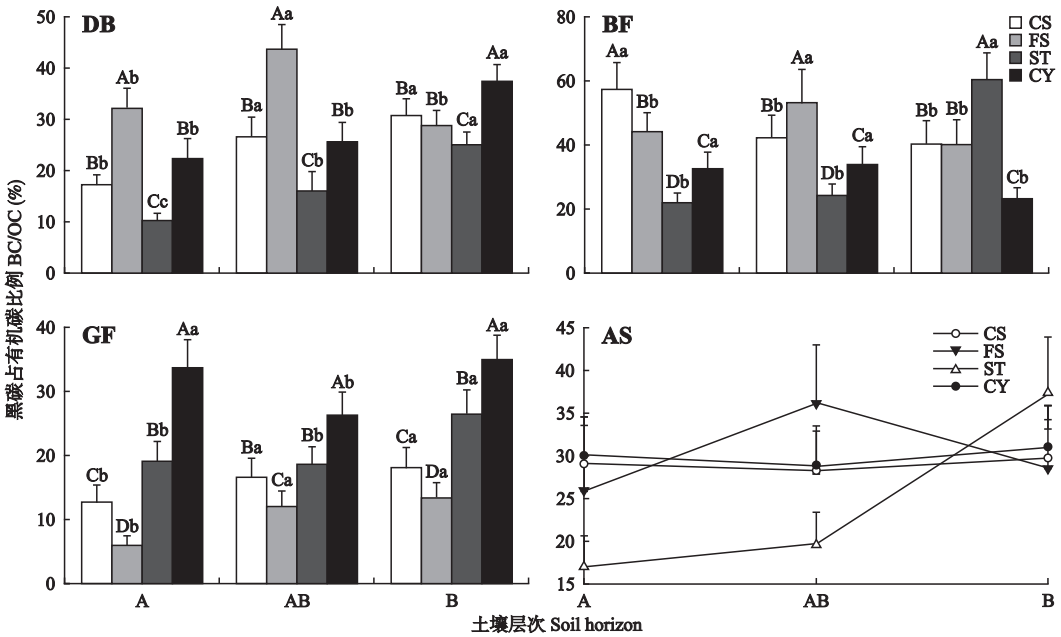


图 3　不同粒级内黑碳占有机碳的比例

Fig.3　BC/OC in different particle size fractions.

AS：3 种土壤的平均值 Average value of three soils.

胶带到土表[16],综合导致表层土壤黑碳含量较高,本研究区 A 层黑碳占整个剖面的比例高达 68.7%.

黑碳/有机碳却随土层加深而增加,说明部分表层土壤黑碳沿剖面进行垂直迁移[3,17-19]. Leifeld 等[17]在瑞士泥炭沼泽土的研究表明,由于该土壤孔隙度较高(92%),黑碳在垂直方向的迁移速度可达每年 0.63~1.16 cm;Major 等[18]在热带沙质氧化土的研究发现,人为添加到表层 10 cm 的黑碳在两年内约有 0.5%迁移到 15~30 cm 土层.首先,生物质燃烧产生的黑碳热稳定性较低,官能团偏多而芳香结构相对偏少,因而容易发生生物化学降解,产生羧基和酚基,从而增强了黑碳的水溶性,促使其以溶解性有机质的形式向下迁移[19];其次,冻融循环进程可能加速了北方森林土壤黑碳的垂直迁移.冻融循环粉碎了黑碳颗粒,由此为黑碳的氧化提供了更大的表面积,促进了黑碳小颗粒的淋溶.东坡降水量较高,因此暗棕壤中黑碳的垂直迁移可能更多地以溶解性黑碳的形式向下转移或者随着淋溶移动;再次,土壤动物的生物扰动作用也将促进黑碳的迁移[18],西坡灰色森林土的发育过程既有一般森林土壤的淋溶淀积过程,又存在草原土壤的高度腐殖化过程,有机质含量极高,土壤肥沃,土壤动物活动频发,生物干扰作用显著;此外,树木倒根引起土层的混合及微地形的变化可能导致表层黑碳埋藏到下层土壤[2].随着时间的推移,黑碳逐渐迁移到干扰程度较低的下层土壤,随后在深层土壤中固持上千年[18].由图 1 可知,暗棕壤、棕色针叶林土和灰色森林土黑碳/有机碳的增幅(A 层到 B 层)分别为 14.8%、4.5%和 7.6%,说明黑碳在暗棕壤中的迁移潜力高于其他两种土壤.

除了黑碳的垂直迁移外,黑碳/有机碳随土层的增加可以解释为:1)表层的黑碳更易被火烧氧化[20].2)表层黑碳占有机碳的比例容易被大量的新鲜有机碳所稀释,而新鲜有机碳输入对深层年久黑碳的稀释作用较弱.3)在有机质的降解过程中,黑碳由于其自身的生物化学惰性而被选择性富集[21],同时深层土壤微生物活性差,降低了黑碳被降解的可能性.4)深层黑碳与土壤矿物的络合作用在一定程度上防止了黑碳的降解[13].在本研究中,尽管黏粒组分的黑碳含量较高并且随土层加深而增加(图 2),然而其中黑碳/有机碳却随土层变化不明显(图 3),因此黑碳/有机碳的升高主要体现在细砂和粉粒组分黑碳的增加,这与 Brodowski 等[14]的结论相吻合.原因可能是稍大黑碳颗粒(位于细砂或粉粒组分内)与微小矿物颗粒的吸附或者小的黑碳颗粒吸附于细砂和粉粒矿物颗粒表面.由于大兴安岭地区独特的气候条件,形成的黑碳颗粒较大,部分肉眼可见,因此笔者认为前一种可能性更大.5)埋藏作用的贡献.大兴安岭林区火烧历史久远,黑碳周转周期又长,因此不排除在漫长地质时期内,部分深层黑碳源于表层黑碳受地形因素作用被埋藏在深层土壤中,尤其在坡积作用明显的中、下坡位.

3.2 气候对土壤黑碳的影响

本研究中,棕色针叶林土黑碳含量最高,暗棕壤和灰色森林土则整体差异不显著,这与 Glaser 等[11]得出的结论一致:相对寒冷和湿润的气候条件提高了土壤固持黑碳的能力.基于气候条件对凋落物分解的影响[22],棕色针叶林土凋落物厚度显著高于其他两种土壤类型(表 1),同时相对较高的湿度限制了凋落物的完全燃烧,提高了黑碳的输入,同样也可以解释 A 层暗棕壤黑碳高于灰色森林土.相对低温又限制了黑碳的降解,综合导致其较高的黑碳含量.此外,降水带来的黑碳气溶胶沉降也发挥了一定作用[16].由于较厚的凋落物层稀释了降水的淋溶,低温与贫瘠的环境条件又在一定程度上抑制了生物扰动作用,导致 AB 层黑碳含量显著下降.尽管暗棕壤地表凋落物厚度显著高于灰色森林土,但二者黑碳含量的差异并不显著,这归因于东坡相对高温促进了黑碳的降解[23]以及西坡较高火烧频率提高了黑碳的输入[20].尽管西坡年均温度低,但受焚风效应影响,春、冬季极其干燥,加上大量草本植被的枯萎增加了火烧的可能性.西坡草本植被发达,地下根系年均周转量大,输入了大量的有机质,再加上较高的火烧频率,尽管黑碳的迁移潜力低于暗棕壤,但仍导致深层黑碳含量高于其他两种土壤.

3.3 土壤黑碳的稳定机制

为探究土壤黑碳的稳定机制,首先对不同粒级内黑碳进行分析.本研究按照土壤发生层采样,是为了探寻黑碳的积累是否与土壤发生过程相联系,以便更准确地分析土壤矿物对黑碳稳定的贡献.

表层粉粒组分的有机碳比例高达 46.2%(图 2),但有机碳与粉粒的负相关(表 2)表明,粉粒矿物对表层有机碳的保护作用不明显.有机碳与黏粒呈显著正相关,但黏粒组分的有机碳所占比例却较低.因此,尽管黏土矿物的化学保护作为有机碳最重要的稳定机制[24],然而对表层有机碳的保护却较低.表层黑碳情况类似,粉粒和黏粒组分的黑碳所占比例分别为 36.8%和 36.7%,但黑碳与粉粒、黏粒的相

关性均不显著.Brodowski 等[25]结合电子扫描显微镜与 X 射线能量散布分析仪证明,尽管表层黑碳主要分布在黏、粉粒组分内,但基本可以视为游离的,并不与矿物颗粒结合[26].而表层黑碳的周转周期依旧可达成百上千年[27],从而说明黑碳的生物化学惰性为表层黑碳的主要稳定机制[3].

随着土层的加深,黏粒组分的有机碳增加(图 2),并且有机碳与黏粒也表现出显著正相关(表 2),说明黏粒矿物对有机碳的化学保护增强,而粉粒矿物的化学保护依旧不显著.黑碳情况与之类似,除了其自身抗性外,黏粒矿物的化学保护逐渐起重要作用[9,13].微小的黑碳颗粒与黏粒矿物的紧密吸附使得其出现在粉粒组分[25],增加了粉粒组分黑碳的同时降低了黑碳与粉粒的相关性.类似地,粗砂组分的黑碳表面也吸附着黏粉矿物与金属氧化物颗粒[25],虽然降低了黑碳与黏粒的相关性但证明黏粒矿物对黑碳的化学保护体现在所有粒级内.这支持了**3.1** 中黑碳/有机碳的增加主要是由于第一种可能性所引起的推测.本研究中,暗棕壤黏粒含量显著高于其他两种土壤,从而说明暗棕壤对黑碳的固持能力更强.此外,黑碳的降解产生了更多的官能团,增加了与黏粒矿物的吸附,从而黑碳伴随黏粒一起向下淋溶淀积.棕色针叶林土区域气候干冷,风化程度低,黏土矿物少,这也解释了黑碳在棕色针叶林土中迁移潜力最低,从而导致下层黑碳含量低于其他两种土壤.暗棕壤黏粒组分内黑碳/有机碳的升高(图 3)说明其较高的黏粒含量在一定程度上促进了黑碳的迁移.

3.4　黑碳在土壤碳库中的积极作用

基于土壤有机碳物理分离手段,将与砂粒(53~2000 μm)结合的有机碳称为颗粒有机碳(particulate organic carbon,POC),与土壤细颗粒组分(<53 μm)结合的有机碳称为矿质结合态有机碳(mineral-associated organic carbon,MOC),前者被认为是活性有机碳,后者则是有机碳的最终分解产物,属于稳定性有机碳[28].由于黑碳具有生物化学惰性,被认为是土壤稳定碳库的重要组成部分.本研究区内矿质结合态黑碳(mineral-associated black carbon,MBC)占 MOC 的比例为 24.7%,说明了黑碳在稳定碳库中的重要性.此外,土壤腐殖质也被认为具有内在稳定性,同样是土壤稳定碳库的重要成分[1].Poirier 等[29]利用高分辨率透射电子显微镜对森林土壤中的胡敏素结构进行研究时发现了黑碳成分.Haumaier等[30]研究发现,黑碳氧化后的芳香-羧酸物质与土壤中高芳香性的腐殖酸在光谱特征和化学组成上有显著的相似性.说明黑碳极有可能是土壤腐殖质的来源之一[29-31],由此进一步提升了黑碳在土壤稳定碳库中的地位.

黑碳的多孔结构与降解过程增加的羧基等官能团促使其参与微团聚体的形成[25,32],物理闭蓄其自身的同时,也提高了对其他有机质的物理保护.黑碳与有机碳的显著正相关说明,黑碳在有机碳固持过程中发挥了重要作用[33].在黑碳测定方法中有学者选择热化学氧化法,在处理过程中可能会炭化有机质产生人为黑碳[11],相关性将会更加显著.本研究采用的化学氧化法并不会产生此类人为黑碳.此外,本研究发现,颗粒态黑碳(particulate black carbon,PBC)占 POC 的比例达到 30.9%,说明黑碳在颗粒有机碳组分中也占有相当大的比例,并且这部分黑碳的周转周期仍旧很长.综上所述,黑碳不仅作为土壤稳定碳库的重要组成,也提高了其他有机碳组分的稳定性.因此,黑碳不仅促进了土壤的碳汇能力,也提高了土壤稳定性碳储量.

4　结　　论

火烧作为大兴安岭林区主要的外部干扰之一,使土壤黑碳储量相当可观.综合分析 3 种土壤类型表明,寒冷和湿润的气候条件提高了土壤固持黑碳的能力.黑碳主要分布在土壤表层,但表层黑碳沿剖面逐渐向下迁移,随之由于黏粒矿物的增加,提高了黑碳的稳定性.由于黑碳固有的生物化学惰性以及作为土壤腐殖质的可能来源,说明了黑碳在土壤稳定碳库中的重要性.此外,黑碳参与形成微团聚体,并在颗粒有机碳组分中占有一定比例.因此,黑碳的存在不仅提高了土壤的碳汇能力,土壤稳定性碳储量也将超出预期.

参考文献

[1] Wang Q (汪　青). A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(1): 293-310 (in Chinese)

[2] Preston CM, Schmidt MWI. Black (pyrogenic) carbon: A synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. *Biogeosciences*, 2006, **3**: 397-420

[3] Forbes MS, Raison RJ, Skjemstad JO. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2006, **370**: 190-206

[4] Borchard N, Ladd B, Eschemann S, *et al*. Black carbon and soil properties at historical charcoal production sites in Germany. *Geoderma*, 2014, **232-234**: 236-242

[5] Kuhlbusch TAJ. Black carbon and the carbon cycle. *Science*, 1998, **280**: 1903-1904
[6] Soucémarianadin LN, Quideau SA, Mackenzie MD, *et al*. Total and pyrogenic carbon stocks in black spruce forest floors from eastern Canada. *Organic Geochemistry*, 2015, **82**: 1-11
[7] Schmidt MWI, Noack AG. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**: 777-793
[8] Lehmann J, Skjmstad J, Sohi S, *et al*. Australian climate-carbon cycle feedback reduced by soil black carbon. *Nature Geoscience*, 2008, **1**: 832-835
[9] Ren Q-S (任清胜), Xin Y (辛 颖), Zhao Y-S (赵雨森). Impact of severe burning on organic carbon and black carbon in soil aggregates in natural *Larix gmelinii* forest of Great Xing'an Mountains. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2016, **38**(2): 29-36 (in Chinese)
[10] Xi B-Z (席宝珠). Effect of Fohn in Daxinganling Mountain on Temperature of Western Region in Northeast China. PhD Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2006 (in Chinese)
[11] Glaser B, Amelung W. Pyrogenic carbon in native grassland soils along a climosequence in North America. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**: 33-41
[12] Liao H-K (廖洪凯), Long J (龙 健). Variation of soil organic carbon under different vegetation types in Karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(9): 2253-2258 (in Chinese)
[13] Sun J-B (孙金兵), Sang Y (桑 英), Song J-F (宋金凤), *et al*. Content and distribution of black carbon in typical forest soils in Changbaishan Mountains. *Forest Research* (林业科学研究), 2016, **29**(1): 34-40 (in Chinese)
[14] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, *et al*. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. *Geoderma*, 2007, **139**: 220-228
[15] Kharuk VI, Dvinskaya ML, Ranson KJ. The spatiotemporal pattern of fires in the northern taiga larch forests of Central Siberia. *Russian Journal of Ecology*, 2005, **36**: 302-311
[16] Wang H-Q (王洪强). Investigations on Observation of Black Carbon Characteristics and Scavenging of Atmospheric Aerosols in Shanghai. PhD Thesis. Shanghai: Donghua University, 2015 (in Chinese)
[17] Leifeld J, Fenner S, Müller M. Mobility of black carbon in drained peat land soils. *Biogeosciences*, 2007, **4**: 425-432
[18] Major J, Lehmannn J, Rondon M, *et al*. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1366-1379
[19] Guggenberger G, Rodionov A, Shibistova O, *et al*. Storage and mobility of black carbon in permafrost soils of the forest tundra ecotone in Northern Siberia. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 1367-1381
[20] Czimczik CI, Schmidt MWI, Schulze ED. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests. *European Journal of Soil Science*, 2005, **56**: 417-428
[21] Knicker H. Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in soil environments. *Quaternary International*, 2011, **243**: 251-263
[22] Guo J-F (郭剑芬), Yang Y-S (杨玉盛), Chen G-S (陈光水), *et al*. A review on litter decomposition in forest ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学研究), 2006, **42**(4): 93-100 (in Chinese)
[23] Nguyen TH, Brown RA, Ball WP. An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, wood char, and sediment. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**: 217-234
[24] Von Lützow MV, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, *et al*. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions: A review. *European Journal of Soil Science*, 2006, **57**: 426-445
[25] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, *et al*. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Geoderma*, 2005, **128**: 116-129
[26] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al*. Aggregate-occluded black carbon in soil. *European Journal of Soil Science*, 2006, **57**: 539-546
[27] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al*. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**: 6069-6078
[28] Christensen BT. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**: 345-353
[29] Poirier N, Derenne S, Rouzaud JN, *et al*. Chemical structure and sources of the macromolecular, resistant, organic fraction isolated from a forest soil (Lacadée, south-west France). *Organic Geochemistry*, 2000, **31**: 813-827
[30] Haumaier L, Zech W. Black carbon-possible source of highly aromatic components of soil humic acids. *Organic Geochemistry*, 1995, **23**: 191-196
[31] Kaal J, Martínez-Cortizas A, Buurman P, *et al*. 8000yr of black carbon accumulation in a colluvial soil from NW Spain. *Quaternary Research*, 2008, **69**: 56-61
[32] Liang BQ, Lehmann J, Sohi SP, *et al*. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**: 206-213
[33] Edmondson JL, Stott I, Potter J, *et al*. Black carbon contribution to organic carbon stocks in urban soil. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**: 8339-8346

作者简介 徐嘉晖, 男, 1995 年生, 硕士研究生. 主要从事森林土壤碳循环研究. E-mail: 897475390@qq.com

责任编辑 杨 弘

徐嘉晖, 高雷, 崔晓阳. 大兴安岭中段森林土壤的黑碳含量及其在不同粒级中的分布. 应用生态学报, 2017, **28**(10): 3111-3118
Xu J-H, Gao L, Cui X-Y. Black carbon content and distribution in different particle size fractions of forest soils in the middle part of Great Xing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(10): 3111-3118 (in Chinese)