

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150098

重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤团聚体有机碳和黑碳的影响

任清胜 辛颖 赵雨森

(东北林业大学林学院)

摘要:为了揭示重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤团聚体有机碳(SOC)和黑碳(BC)的影响,本文选取大兴安岭落叶松天然林重度火烧迹地为研究对象,并以未火烧落叶松天然林为对照,进行相关研究。结果表明:1)重度火烧明显增加表层土壤有机碳和黑碳含量。和对照样地相比,重度火烧迹地0~5 cm层全土有机碳增加了41.56%,黑碳增加了123.69%,黑碳含量增加显著($P < 0.05$)。2)重度火烧明显增加了0~5 cm层的>5 mm和<0.25 mm团聚体比例,降低了0.25~5 mm团聚体比例。3)对照样地相比,重度火烧显著提高了0~5 cm土层内的>5 mm和<0.053 mm团聚体有机碳含量($P < 0.05$),增幅达177.6%和127.27%。而0.25~2 mm团聚体有机碳含量在3个土层内较对照均有不同程度的降低。2种林地类型各粒径团聚体有机碳含量表现为随粒径增大而增加,随土层深度的增加而降低的趋势。4)团聚体中黑碳含量的分布规律与有机碳相似。重度火烧迹地0~5 cm层的>5 mm、2~5 mm、0.053~0.25 mm、<0.053 mm团聚体黑碳含量分别增加了4.92、4.19、1.06、0.44 g/kg,与对照之间的差异均达显著水平($P < 0.05$);2种林地土壤团聚体BC/SOC比值在0.05~0.41之间,且重度火烧显著增加了BC/SOC比值($P < 0.05$)。相关分析表明,各粒径团聚体有机碳和黑碳含量显著线性相关。

关键词:重度火烧;大兴安岭;团聚体;有机碳;黑碳

中图分类号:S714.5; S791.222 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)02-0029-08

REN Qing-sheng; XIN Ying; ZHAO Yu-sen. **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* (2016) **38**(2) 29-36 [Ch, 25 ref.] School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

The objective of this study was to reveal the changes of organic carbon (SOC) and black carbon (BC) in soil aggregates after severe burning. With unburned natural *Larix gmelinii* forest as contrast, we selected severely burned area of natural *L. gmelinii* forest in Great Xing'an Mountains as research object. The effect of severe burning on organic carbon and black carbon in soil aggregates was studied. The results showed that: 1) After severe burning, the contents of organic carbon and black carbon of surface soil significantly increased. Compared with contrast sample plot, soil organic carbon content in 0-5 cm soil layer increased by 41.56%, and black carbon content significantly increased by 123.69% ($P < 0.05$). 2) Severe burning significantly increased the percentages of aggregates smaller than 0.25 mm and larger than 5 mm ($P < 0.05$), but the percentages of 0.25-5 mm all decreased in 0-5 cm soil layer. 3) Compared with contrast sample plot, severe burning significantly increased the organic carbon content of aggregates smaller than 0.053 mm and larger than 5 mm by 127.27% and 177.6% ($P < 0.05$), respectively. Organic carbon content of 0.25-2 mm aggregates in three soil layers was lower than contrast sample plot to varying degrees. The content of soil organic carbon in aggregates increased

收稿日期:2015-03-30 修回日期:2015-06-02

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD08B02)。

第一作者:任清胜。主要研究方向:水土保持与荒漠化防治。Email:15104589675@163.com 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路26号东北林业大学林学院。

责任作者:赵雨森,教授,博士生导师。主要研究方向:水土保持与荒漠化防治。Email:zhaoy1957@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

with the increase of particle size in the two kinds of forest, and showed a trend of decreasing with the increase of soil depth. 4) The characteristics of distribution of black carbon in aggregates were similar to organic carbon. After severe burning, black carbon of aggregates >5 mm, $2-5$ mm, $0.053-0.25$ mm and <0.053 mm increased by 4.92, 4.19, 1.06 and 0.44 g/kg in 0-5 cm soil layer, which was significantly different with contrast sample plot ($P < 0.05$). 5) The BC/SOC ratio ranged from 0.05 to 0.41 in two kinds of forest, and severe burning significantly increased BC/SOC ratio ($P < 0.05$). A significant correlation was found between organic carbon and black carbon contents in aggregates of each size class.

Key words severe burning; Great Xing'an Mountains; aggregates; organic carbon; black carbon

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,其中贮存的有机碳占整个陆地生态系统碳库的2/3,约为植物碳库的3倍或大气碳库的2倍^[1]。森林土壤有机碳库约为全球土壤有机碳库的39%,其微小的变化都有可能引起大气CO₂浓度显著变化^[2]。土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)作为土壤碳库的重要组成部分,是土壤肥力的重要评价指标,影响着土壤的组成、结构、功能、理化性质。黑碳(Black Carbon, BC)是生物质或化石燃料不完全燃烧所形成的一类特殊产物,普遍分布于大气、土壤、冰雪和水以及沉积物中^[3]。黑碳与火烧过程有着紧密的联系,火烧强度、火烧频率、森林类型等会对土壤黑碳含量产生影响^[4],生物质燃烧有助于形成稳定的有机碳库,进而对生态系统的碳循环产生潜在而长期的影响。火烧过程中将生物体中的碳转化成气态的CO₂和CO,同时也产生大量的黑碳颗粒,它们沉降到海洋或者陆相沉积物中,使碳从生物圈进入地质圈,这一机制被认为对全球碳循环中“失去的碳汇”具有重要贡献^[5]。此外,黑碳具有高度芳香化的结构和生物化学惰性以及对热的稳定性,使得有机碳得以保存,在土壤有机碳固定过程中起着重要作用。

目前,关于有机碳在土壤团聚体中分布的研究多集中在农业土壤中。研究结果也不尽相同,有研究表明有机碳含量随团聚体粒径的增大而增加,并且大团聚体较微团聚体含有更多的初期新形成的有机物质^[6],但是也有研究表明,随着团聚体粒径变小,有机碳含量越高^[7]。国内外对黑碳的研究也多集中在大气气溶胶、海洋沉积物和冰雪等方面^[3-4,8-9],对森林土壤中的有机碳和黑碳研究则相对较少。李恋卿等^[10]的研究结果表明,土壤有机碳主要分布在0.25~2 mm团聚体中。李玮等^[11]研究认为, >5 和2~5 mm粒径团聚体对有机碳贡献最大,1~2和0.25~0.5 mm团聚体对有机碳的贡献率相对较低。在全球气候的大背景下,近年来黑碳越来越受到国内外学者的关注,但是目前有关黑碳在不同粒径土粒中分配规律的研究报道较少。有研究发

现, <50 μm团聚体黑碳浓度最高,但由于该粒径占全土质量分数最低,导致该级黑碳含量最低,而0.25~2 mm团聚体含量较高^[12]。目前重度火烧对团聚体中有机碳和黑碳含量的影响还鲜见报道。本研究以大兴安岭落叶松天然林重度火烧迹地为研究对象,研究重度火烧对各粒径团聚体有机碳和黑碳含量的影响,为揭示土壤有机碳和黑碳对林火的响应和正确评价火干扰对土壤碳库的影响以及火烧迹地的恢复提供科学依据。

1 研究地概况

试验样地位于漠河县阿木尔林业局,该区域位于大兴安岭北坡,地理位置为 $122^{\circ}38'30''\sim 124^{\circ}05'05''E$, $52^{\circ}15'03''\sim 53^{\circ}33'15''N$ 。东邻塔河林业局,南与呼中林业局,内蒙的满归林业局接壤,西与图强林业局毗邻,北以黑龙江主航道为界。地势南高北低,海拔255~1396 m,属寒温带大陆性气候,年平均温度 -4.94 °C,年平均降水量432 mm,年无霜期90~120 d。年日照时数为2630 h,结冰期7个月左右,主风向为西北风。境内森林覆盖率达84.31%,主要土壤类型为棕色针叶林土,基岩以花岗岩为主,并有多种岩类。土层普遍较薄,砾石含量较大。主要乔木树种有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)等。灌木主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)、刺玫(*Rosa davurica*)等。草本主要有菊科(Compositae)、豆科(Leguminosae)、蔷薇科(Rosaceae)、桔梗科(Campanulaceae)的植物。

2 研究方法

2.1 样品采集

以大兴安岭2011年10月发生重度火烧的落叶松天然林为研究对象,并在毗邻选取立地条件基本一致的未火烧落叶松天然林作为对照。样地海拔775 m、阳坡,土壤厚度20 cm,为棕色针叶林土。火

烧时地被物基本烧毁,地表裸露,植被无恢复,火烧面积约5 hm²,为地表火。重度火烧迹地的烧死木比例为81.79%,对照样地烧死木比例为0%。2013年10月在火烧迹地和对照样地中各设置3个20 m × 30 m临时标准样地,每个标准样地中按照S形布设5个取样点,每个取样点按照0~5、5~10、10~20 cm分层取原状土,重度火烧迹地和对照样地的3个土层各15个土壤样品。所取原状土分别置于塑料取样盒中带回实验室。将取回的原状土沿土壤自然结构轻轻剥成直径为10~12 mm的小块,剔除动植物残体和石块,风干备用。

2.2 土壤粒径分组

采用干筛法^[13]将取得的原状土分成>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5、0.053~0.25、<0.053 mm的团聚体。方法如下:取100 g原状风干土样置于套筛(孔径依次为5、2、1、0.5、0.25和0.053 mm)顶部,以30次/min手工震荡5 min,测定各孔径筛子上土样质量,每个样品重复3次,然后分别测定各粒级有机碳和黑碳含量,重复3次。

2.3 土壤有机碳和黑碳的测定

黑碳指土壤用0.1 mol/L K₂Cr₂O₇ + 2 mol/L H₂SO₄在55℃下氧化60 h后残余的碳^[14]。测定方法如下:称0.5 g左右过0.149 mm筛土样置于离心管

中,加入0.1 mol/L K₂Cr₂O₇ + 2 mol/L H₂SO₄混合液25 mL,用漩涡混合仪来拌匀试剂和样品,在55℃水浴恒温震荡器中加热60 h。离心、烘干后,得到的剩余物即为黑碳样品。土壤有机碳和黑碳含量用multi N/C 2100分析仪测定,单位为g/kg。

2.4 数据处理

采用Excel2003软件进行数据处理和图表制作,采用SPSS17.0软件进行单因素方差分析。

3 结果与分析

3.1 重度火烧对全土有机碳和黑碳的影响

与对照样地相比,重度火烧迹地的0~5 cm层全土有机碳含量由87.77 g/kg增加到了124.40 g/kg,增加了41.56%,但未达显著水平($P > 0.05$)。黑碳含量由15.66 g/kg增加到了35.03 g/kg,增加了123.69%,差异达到显著水平($P < 0.05$)。5~10和10~20 cm土层全土有机碳含量基本没有变化,黑碳含量分别增加了16.38%和26.93%,差异均未达到显著水平($P > 0.05$)。说明重度火烧使表层土壤的有机碳和黑碳增加。重度火烧迹地和对照样地全土有机碳和黑碳表现出明显的表聚特征,0~5 cm层全土有机碳和黑碳含量显著高于5~10和10~20 cm层($P < 0.05$)(表1)。

表1 重度火烧对全土有机碳和黑碳含量的影响

Tab. 1 Impact of severe burning on soil total organic carbon and black carbon contents

g·kg⁻¹

土层深度 Soil depth/cm	有机碳 SOC		黑碳 BC	
	重度火烧迹地 Severely burned area	对照样地 Contrast sample plot	重度火烧迹地 Severely burned area	对照样地 Contrast sample plot
0~5	124.40 ± 10.47aA	87.88 ± 8.72aA	35.03 ± 2.96bA	15.66 ± 0.64aA
5~10	43.00 ± 3.85aB	42.90 ± 4.35aB	8.88 ± 0.99aB	7.63 ± 0.74aB
10~20	31.18 ± 2.42aB	31.43 ± 3.30aB	5.42 ± 0.52aB	4.27 ± 0.33aB

注:数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同样地同一土层间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示同一样地不同土层间差异显著($P < 0.05$)。Notes: Data is means ± standard deviation. The different lowercase letters mean significant difference in the same soil layer of different sample plots at $P < 0.05$ level, different capital letters mean significant difference in different soil layers of the same sample plot at $P < 0.05$ level.

3.2 重度火烧对团聚体质量分数的影响

图1表明对照样地和重度火烧迹地各级土壤团聚体质量分数总体上呈现随粒径的增大而波动递增的趋势。对照样地3个土层质量分数最大的2~5 mm团聚体,达32.79%~34.34%,明显高于其他级团聚体。质量分数最小的是<0.053 mm团聚体,只占1.70%~5.51%。重度火烧迹地的0~5、5~10 cm土层质量分数最大的是>5 mm级,分别为29.08%和29.80%,10~20 cm土层质量分数最大的是2~5 mm级,为33.56%。重度火烧迹地3个土层质量分数最小的都是<0.053 mm级,占

2.19%~3.53%。薛丽佳等^[12]的研究发现,武夷山地区土壤呈现粒径越大,质量分数越大的规律,与本研究一致。

与对照样地相比,重度火烧迹地的3个土层,>5 mm的团聚体质量分数明显增加,0~5、5~10 cm土层依次增加了93.87%和83.72%,差异达到显著水平($P < 0.05$),10~20 cm增加了37.74%,未达显著水平($P > 0.05$)。而0.25~2 mm级的质量分数有不同程度的降低,0~5、5~10和10~20 cm 3个土层的0.25~2 mm团聚体质量分数依次降低了19.18%~34.91%、17.13%~33.05%和6.23%~

9.55%, 随土层深度的增加, 降低幅度变小。0~5 cm层的0.5~1 mm和0.25~0.5 mm团聚体质量分数降低程度达显著水平($P < 0.05$), 0.053~

0.25 mm和<0.053 mm团聚体质量分数增加了73.05%和82.35%, 增幅显著($P < 0.05$)。

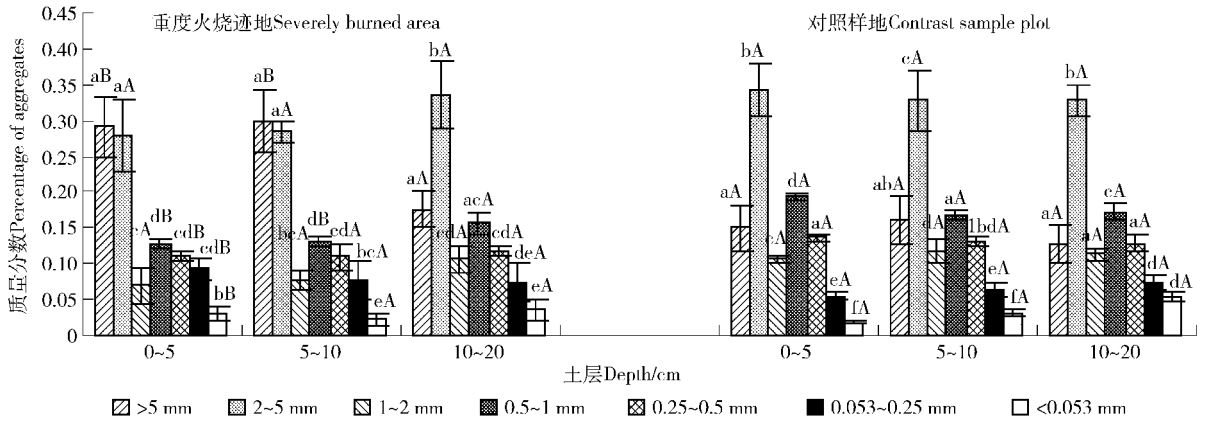


图1 各级团聚体质量分数

Fig. 1 Percentage of aggregates of each particle size class

3.3 重度火烧对团聚体有机碳含量的影响

由表2可知, 有机碳主要存在于表层土壤, 各级团聚体有机碳含量随土层深度增加而降低。火烧迹地0~5 cm层各粒径团聚体有机碳含量是5~10 cm层的1.73~2.54倍, 是10~20 cm层的2.26~3.78倍, 对照样地0~5 cm层各粒径团聚体有机碳含量是5~10 cm层的0.86~2.17倍, 是10~20 cm层的0.61~3.19倍, 除对照样地的>5 mm和<0.053 mm团聚体外, 差异均达显著水平($P < 0.05$)。这可能与表土层中的生物量比较富集, 微生物活动较多, 人为活动频繁, 土壤腐殖质较多有关^[4]。重度火烧迹地和对照样地各粒径团聚体有机碳含量表现为随粒径增大而增加的趋势, >5 mm和1~2 mm团聚体有机碳含量较低, 主要原因是这2个粒径团聚体的质量分数较低。>2 mm团聚体有机碳含量显著高

于<2 mm团聚体有机碳含量, 这是因为较高层次的大团聚体是由较低层次的小团聚体与有机物等胶结而成, 土壤有机碳含量与土壤黏粉粒比例之间呈显著的正相关^[15]。

重度火烧迹地与对照样地相比, 0~5 cm土层>5 mm团聚体有机碳含量由6.07 g/kg增加到16.86 g/kg, 增加了177.76%, 差异达到显著水平($P < 0.05$); 2~5、0.053~0.25 mm团聚体有机碳分别增加了1.97%、41.32%, 未达显著水平($P > 0.05$); <0.053 mm团聚体有机碳含量增加了127.27%, 差异显著($P < 0.05$), 而0.25~2 mm团聚体有机碳含量则有了22.84%~35.24%的降低。5~10和10~20 cm土层>5 mm团聚体有机碳含量分别增加了55.34%和127.44%, 0.25~2 mm团聚体有机碳含量有34.74%~53.50%和27.52%~

表2 各级团聚体有机碳含量

Tab. 2 Soil organic carbon content of aggregates of each particle size class

g·kg⁻¹

土壤类型 Soil type	土层深度 Soil depth/cm	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
重度火烧迹地 Severely burned area	0~5	16.86 ± 1.7aA	23.30 ± 2.26bA	5.06 ± 0.78ceA	10.86 ± 3.31dA	10.91 ± 2.17dA	8.55 ± 0.76cdA	2.00 ± 0.36eA
	5~10	9.74 ± 0.18aA	9.89 ± 0.41aA	1.99 ± 0.10bA	4.52 ± 0.47cA	4.81 ± 0.45cA	4.31 ± 0.43cA	1.04 ± 0.09dA
	10~20	7.46 ± 1.00aA	7.02 ± 0.50aA	1.34 ± 0.19bA	3.36 ± 0.32cA	3.24 ± 0.3cA	2.84 ± 0.20cA	0.67 ± 0.14dA
对照样地 Contrast sample plot	0~5	6.07 ± 0.44aB	22.85 ± 0.24bA	7.41 ± 0.13cB	16.77 ± 1.04dB	14.14 ± 0.72eA	6.05 ± 0.10aA	0.88 ± 0.03fB
	5~10	6.27 ± 1.43aB	13.10 ± 2.10bA	4.28 ± 0.46cB	7.72 ± 1.31aB	7.37 ± 0.79aB	3.82 ± 0.63cA	1.02 ± 0.15dA
	10~20	3.28 ± 0.79aB	9.34 ± 0.92bB	3.01 ± 0.35aB	5.25 ± 0.61cB	4.47 ± 0.37cB	2.70 ± 0.54aA	1.45 ± 0.23dB

注: 数据为平均值 ± 标准差。不同小写字母表示同一地点同一土层, 不同粒径间差异显著($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一土层同一粒径, 不同地点间差异显著($P < 0.05$)。表3同此。Notes: Data is means ± standard deviation. The different lowercase letters mean significant difference in different particle size classes in the same soil layer of the same plot at $P < 0.05$ level, and different capital letters mean significant difference in the same particle size class of the sample soil layer in different plots at $P < 0.05$ level. The same for Tab. 3.

55.48%的降低,差异都达到了显著水平($P < 0.05$);0.053~0.25 mm 团聚体有机碳分别增加了12.83%、5.19%。说明重度火烧主要增加表层土壤的>2 mm 和<0.25 mm 团聚体的有机碳含量。

3.4 重度火烧对团聚体黑碳含量的影响

由表3可知,黑碳的分布规律与有机碳相似,各级团聚体黑碳含量随粒径增大呈增加趋势,并表现

出明显的表聚特征。重度火烧迹地,0~5 cm 土层各级团聚体黑碳含量是5~10 cm 土层的2.89~3.94倍,是10~20 cm 土层的5.05~7.44倍。对照样地0~5 cm 土层各级团聚体黑碳含量是5~10 cm 土层的1.10~3.83倍,是10~20 cm 土层的1.57~7.98倍,差异均达显著水平($P < 0.05$)。这样的垂直分布与尹云锋等^[3]的研究一致。

表3 各级团聚体黑碳含量

Tab.3 Black carbon content of aggregates of each particle size class

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

土壤类型 Soil type	土层深度 Soil depth/cm	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
重度火烧迹地 Severely burned area	0~5	5.98 ± 0.25aA	8.90 ± 0.84bA	2.01 ± 0.45cdA	3.63 ± 0.56acA	3.15 ± 0.31adA	2.02 ± 0.19cdA	0.55 ± 0.09dA
	5~10	1.56 ± 0.51aA	2.36 ± 0.03bA	0.51 ± 0.09cA	0.94 ± 0.09deA	1.04 ± 0.08eA	0.66 ± 0.09cdA	0.19 ± 0.02fA
	10~20	1.00 ± 0.38aA	1.25 ± 0.10aA	0.27 ± 0.04bcA	0.54 ± 0.04dA	0.51 ± 0.18bdA	0.40 ± 0.09bdA	0.08 ± 0.01cA
对照样地 Contrast sample plot	0~5	1.06 ± 0.08aB	4.71 ± 0.14bB	1.73 ± 0.44cA	3.83 ± 0.14dA	2.65 ± 0.21eA	0.96 ± 0.07aB	0.11 ± 0.01fB
	5~10	0.74 ± 0.13aA	1.52 ± 0.05bB	0.55 ± 0.01cA	1.00 ± 0.09dA	0.91 ± 0.05dA	0.45 ± 0.01eB	0.10 ± 0.01fB
	10~20	0.32 ± 0.07acA	0.97 ± 0.11bA	0.25 ± 0.01acA	0.48 ± 0.01dA	0.34 ± 0.02aA	0.23 ± 0.09cA	0.07 ± 0.03eA

同对照样地相比,重度火迹地0~5 cm 土层的>5.2~5.053~0.25、<0.053 mm 团聚体黑碳含量分别增加了4.92、4.19、1.06、0.44 g/kg,差异均达显著水平($P < 0.05$),其余粒径团聚体变化不显著($P > 0.05$)。5~10 cm 土层的>5 mm 和2~5 mm 团聚体黑碳含量分别增加了0.82、0.84 g/kg,其余粒径团聚体黑碳含量变化小于0.21 g/kg。10~20 cm 土层的>5 mm 增加了0.68 g/kg,其余粒径团聚体黑碳含量增加量小于0.28 g/kg,差异均不显著($P > 0.05$)。

3.5 重度火烧对各级团聚体 BC/SOC 比值的影响

BC/SOC 的比值可以反映黑碳的来源,土壤中的 BC/SOC 比值在0.05~0.45^[3],与本研究结果一致。表4中 BC/SOC 比值表现为随土层深度增加而降低的趋势,随粒径增大而波动增加。对照样地全土黑碳和有机碳的比值在0.14~0.18之间,各级团聚体 BC/SOC 比值在0.05~0.23之间。重度火烧迹地全土黑碳和有机碳的比值在0.17~0.28之间,各粒级 BC/SOC 比值在0.13~0.41之间。经过重度火烧 BC/SOC 比值明显增大,0~5、5~10、10~20 cm 土层各级团聚体 BC/SOC 比值分别增加了56.52%~115.38%、33.33%~100%、40%~160%,差异显著($P < 0.05$),与 Dai 等^[16]的研究结果一致,他认为经过不同火烧后 BC/SOC 的比值有所增加,其变化程度与地被可燃物载量有关,同时也

受火烧温度和燃烧程度等的影响。大兴安岭地属高寒区,枯落物分解慢,积累量大,重度火烧形成了大量黑碳颗粒,黑碳颗粒和有机碳随时间同土壤物质发生了混合作用,并向垂直方向迁移;同时重度火烧使有机碳和黑碳重新分配,各土层损失和新产生的量都不一样,黑碳具有较高的稳定性,不易被氧化分解,更容易被保留在土壤中,从而使 BC/SOC 的比值在垂直方向发生不同程度的升高。

3.6 各级土壤团聚体有机碳和黑碳的关系

通过对各粒径团聚体有机碳和黑碳含量相关性分析(表5),表明重度火烧迹地和对照样地落叶松天然林各级团聚体土壤有机碳(y)和黑碳(x)之间,以及全土有机碳(y)和黑碳(x)之间,都具有显著的线性相关性($R^2 > 0.9$)。重度火烧迹地有机碳和黑碳相关性为0.934~0.984,对照样地有机碳和黑碳相关性为0.919~0.979。这种显著相关性说明,黑碳在土壤有机碳固定过程中起着重要作用。有机碳和黑碳之间的良好相关性可能是因为存在特殊的积累机制:黑碳具有高度芳香化的结构和生物化学惰性以及对热的稳定性,使得有机碳得以保存,另外,黑碳表面具有多孔结构和酚羟基、羧基等含氧官能团,能够吸附有机物和黏土矿物,能够固定有机物^[17]。此外还可能与有机碳和黑碳的来源以及有机碳和黑碳的无机降解、化学降解、微生物降解^[18]有关,使得有机碳和黑碳之间保持一定的比例关系。

表4 各级团聚体 BC/SOC 比值

Tab.4 BC/SOC ratio of aggregates

土壤类型 Soil type	土层深度 Soil depth/cm	全土 BC/SOC Total soil BC/SOC	> 5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.053 ~ 0.25 mm	< 0.053 mm
重度火烧迹地 Severely burned area	0 ~ 5	0.28 ± 0.02A	0.37 ± 0.07abA	0.38 ± 0.08aA	0.41 ± 0.07aA	0.36 ± 0.05abA	0.30 ± 0.08bcA	0.24 ± 0.05cA	0.28 ± 0.12cA
	5 ~ 10	0.21 ± 0.02B	0.16 ± 0.05aB	0.24 ± 0.01bcB	0.26 ± 0.04cB	0.21 ± 0.03dB	0.22 ± 0.03bdB	0.16 ± 0.02aB	0.18 ± 0.03eB
	10 ~ 20	0.17 ± 0.01B	0.14 ± 0.04abB	0.18 ± 0.02dB	0.21 ± 0.04cC	0.16 ± 0.02adB	0.16 ± 0.05adC	0.14 ± 0.03aeB	0.13 ± 0.03bcC
对照样地 Contrast sample plot	0 ~ 5	0.16 ± 0.02A	0.18 ± 0.02aA	0.21 ± 0.01bA	0.23 ± 0.05cA	0.23 ± 0.02cA	0.19 ± 0.01abA	0.15 ± 0.01dA	0.13 ± 0.01eA
	5 ~ 10	0.18 ± 0.03A	0.12 ± 0.04aA	0.12 ± 0.02aA	0.13 ± 0.01aB	0.13 ± 0.02aB	0.13 ± 0.017aB	0.12 ± 0.02aB	0.09 ± 0.02bB
	10 ~ 20	0.14 ± 0.02A	0.10 ± 0.03abA	0.11 ± 0.02bA	0.08 ± 0.01cdC	0.09 ± 0.01abcB	0.08 ± 0.01dC	0.09 ± 0.01adB	0.05 ± 0.02eC

注: 数据为平均值 ± 标准差。不同小写字母表示同一地同一土层, 不同粒径间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一地同一粒径, 不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: Data is means ± standard deviation. The different lowercase letters mean significant difference in different particle size classes of same soil layer in the same plot at $P < 0.05$ level, and different capital letters mean significant difference in the same particle size class of different soil layers in the same plot at $P < 0.05$ level.

表5 有机碳和黑碳的线性关系

Tab.5 Linear correlation between organic carbon and black carbon

粒度 Particle size class	重度火烧迹地 Severely burned area		对照样地 Contrast sample plot	
	线性回归方程 Equation of linear regression	R^2	线性回归方程 Equation of linear regression	R^2
全土有机碳和黑碳 Total soil BC and SOC	$y = 3.068x + 15.748$	0.969**	$y = 5.228x + 6.042$	0.919**
> 5 mm	$y = 2.122x + 5.913$	0.934**	$y = 4.234x + 1.586$	0.953**
2 ~ 5 mm	$y = 2.039x + 4.900$	0.984**	$y = 3.411x + 6.913$	0.939**
1 ~ 2 mm	$y = 2.045x + 0.895$	0.940**	$y = 3.624x + 2.192$	0.964**
0.5 ~ 1 mm	$y = 2.421x + 2.128$	0.977**	$y = 3.356x + 3.971$	0.967**
0.25 ~ 0.5 mm	$y = 2.905x + 1.772$	0.981**	$y = 4.098x + 3.335$	0.979**
0.053 ~ 0.25 mm	$y = 2.973x + 1.949$	0.942**	$y = 4.504x + 1.731$	0.932**
< 0.053 mm	$y = 2.735x + 0.491$	0.975**	$y = -14.318x + 2.506$	0.950**

注: * 表示相关性达到 0.05 的显著水平; ** 表示相关性达到 0.01 的极显著水平。Notes: * means correlation is significant at 0.05 level, ** means correlation is extremely significant at 0.01 level.

4 结论与讨论

重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤有机碳和黑碳产生了影响, 明显增加了落叶松天然林 0 ~ 5 cm 土层有机碳和黑碳含量。赵彬等^[19]研究发现重度火烧后土壤有机碳含量显著增大, 而尹云锋等^[3]在研究杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林时发现杉木人工林皆伐火烧后表层土壤有机碳含量略微下降。导致这种截然不同的结论与研究地域、火烧类型、火烧频率、火烧强度、立地条件、可燃物数量和质量以及火烧时的气候条件等因素有关^[20]; 这些因素会影响火烧过程, 一方面火烧过程中会使土壤中的有机碳因燃烧和高温挥发而损失, 另一方面火烧后焦化的植物残体又补充了土壤有机碳和黑碳。大兴安岭地属高寒区, 枯落物分解慢, 积累量大, 重度火烧过程中, 损失部分有机碳和黑碳的同时又形成

了大量黑碳颗粒和有机碳, 最终使表层土壤有机碳和黑碳含量增加。土壤中存在大量黑碳可以使土壤肥力提高^[21], 重度火烧增加了土壤黑碳, 对提高土壤肥力有积极意义。

卢凌霄等^[22]在研究林地土壤不同粒径土粒中有机碳在全土中的分布时发现, 尽管 > 2 mm 粒径土粒中的有机碳浓度不是最大的, 但是这种粒径的土壤颗粒质量占总质量的近一半以上, 使得该粒径有机碳含量在全土中所占比例较高。徐江兵等^[23]研究发现 > 0.25 mm 的大团聚体有机碳含量明显高于 0.053 ~ 0.25 mm 的微团聚体有机碳含量。薛丽佳等^[12]在研究武夷山不同类型土壤时发现, < 0.05 mm 粒径土粒的黑碳浓度最高, 但是由于该粒径占全土的质量分数最小, 导致该粒径黑碳含量最低, 他还认为外源新碳容易进入粒径较大的土粒。邱敬^[21]研究发现, 不同粒径土粒中黑碳浓度随粒径减

小而增大,黑碳含量随粒径增大而增加。本研究结果表明,较大粒径团聚体中有机碳和黑碳含量更高,与上述研究结果一致。

有研究表明,黑碳主要产生于火烧,在黑碳的积累影响因素里,火烧的影响比潜在的微生物分解和光化学反应等因素更加重要^[24]。本研究表明,表土层 >2 mm 和 <0.25 mm 团聚体有机碳和黑碳含量因重度火烧产生的变化更为明显,可能是因为该级团聚体质量分数的增加以及较小粒级有利于有机碳和黑碳的积累^[21]。BC/SOC 的比值可以反映土壤中黑碳的来源,比值在 0.5 左右,表明来源于化石燃料的燃烧,比值在 0.1 左右表明来源于生物质的燃烧^[25]。但是由于目前国际上对土壤黑碳的分离和测定法尚不统一,不同方法同一样品的数值可能会有差异^[16]。本研究黑碳主要来源于生物质燃烧,BC/SOC 的比值在 0.05 ~ 0.41 之间。

参 考 文 献

- [1] JENKINSON D S, WILD A. Model estimates of CO₂ emission from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351: 304-306.
- [2] 田松岩,刘延坤,沃晓棠,等. 小兴安岭 3 种原始红松林的土壤有机碳研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(5): 33-38.
TIAN S Y, LIU Y K, WO X T, et al. Organic carbon of soil in three original *Pinus koraiensis* forests in Xiao Xing'an Mountains of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36 (5): 33-38.
- [3] 尹云锋,杨玉盛,高人. 皆伐火烧对杉木人工林土壤有机碳和黑碳的影响 [J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 353-355.
YIN Y F, YANG Y S, GAO R. Effects of slash burning on soil organic carbon and black carbon in Chinese fir plantation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 353-355.
- [4] 张颖妮. 过火后森林土壤黑碳的分布格局特征研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
ZHANG Y N. A study on distribution pattern of burned forest soil black carbon [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [5] 曹军骥,占长林. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义 [J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(2): 177-187.
CAO J J, ZHAN C L. Research significance and role of black carbon in the global climate and environmental systems [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2): 177-187.
- [6] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [7] 王欣欣,符建荣,邹平,等. 长期植稻年限序列水稻土壤团聚体有机碳分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 719-724.
WANG X X, FU J R, ZOU P, et al. Distribution characteristic of aggregates organic carbon in a paddy soil chronosequence [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 719-724.
- [8] SCHLEICHER N, NORRA S, FRICKER M, et al. Spatio-temporal variations of black carbon concentrations in the Megacity Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 392-401.
- [9] ZHOU X, GAO J, WANG T, et al. Measurement of black carbon aerosols near two Chinese megacities and the implications for improving emission inventories [J]. *Atmos Environ*, 2009, 43(25): 3918-3924.
- [10] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化 [J]. *土壤通报*, 2000, 31(5): 193-196.
LI L Q, PAN G X, ZHANG X H. Changes in organic carbon storage in aggregates of the surface horizon in a degraded Paleudt upon vegetation recovery [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(5): 193-196.
- [11] 李玮,郑子成,李延轩,等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 3626-3636.
LI W, ZHENG Z C, LI Y X, et al. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in different tea plantation age [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 3626-3636.
- [12] 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.
XUE L J, GAO R, YANG Y S, et al. Distribution pattern of organic carbon and black carbon from different soils in Wuyi Mountains [J]. *Forest Research*, 2011, 24(3): 399-403.
- [13] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1973-1979.
ZHOU H, LÜ Y Z, YANG Z C, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei plain, China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [14] AIKEN G R, MCKNIGHT D M, WERSHAW R L. Humic substances in soils, sediment and water: geochemistry, isolation and characterization [M]. New York: John Wiley & Sons, 1985: 329-370.
- [15] 吴庆标,王效科,张德平,等. 呼伦贝尔草原土壤黏粉粒组分对有机碳和全氮含量的影响 [J]. *生态环境*, 2004, 13(4): 630-632.
WU Q B, WANG X K, ZHANG D P, et al. Effects of clay-silt fractions of soil on SOC and TN in Hulunbeir grassland [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 630-632.
- [16] DAI X, BOUTTON TW, GLASER B, et al. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 1879-1881.
- [17] 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.
- [18] GOLDBERG E D. Black carbon in the environment: properties and distribution [M]. New York: John Wiley & Sons, 1985: 1-7.
- [19] 赵彬,孙龙,胡海清,等. 兴安落叶松林火后对土壤养分和土壤微生物生物量的影响 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 450-459.
ZHAO B, SUN L, HU H Q, et al. Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of *Larix gmelinii* forest in autumn [J]. *Journal*

- of Natural Resources, 2011, 26(3): 450-459.
- [20] YANG Y S, GUO J, CHEN G, et al. Carbon and nitrogen pools in Chinese fir and evergreen broadleaved forests and changes associated with felling and burning in mid-subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 216(1): 216-226.
- [21] 邱敬. 福州市不同功能区土壤有机碳和黑碳对比研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2009.
- QIU J. Comparison of soil organic carbon and black carbon from different urban function zones in Fuzhou city[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2009.
- [22] 卢凌霄, 宋同清, 彭晚霞, 等. 喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1167-1174.
- LU L X, SONG T Q, PENG W X, et al. Profile distribution of soil aggregates organic carbon in primary forests in Karst cluster-peak depression region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1167-1174.
- [23] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 675-682.
- XU J B, LI C L, HE Y Q, et al. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 675-682.
- [24] OHLSON M, TRYTERUD E. Interpretation of the charcoal record in forest soil: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal[J]. Holocene, 2000, 10: 519-529.
- [25] 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): 177-181.
- HE Y, ZHANG G L. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing[L]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 177-181.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑 孙向阳)