

# 火烧对大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳组分的影响

张茂增, 辛颖, 赵雨森

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 以大兴安岭轻度火烧迹地为研究对象, 通过对比研究, 探讨火烧对樟子松天然林土壤有机碳组分的影响。结果表明: 轻度火烧改变了樟子松天然林土壤有机碳的组成和含量。轻度火烧使樟子松天然林 0—5 cm 土层土壤有机碳、易氧化碳和颗粒有机碳含量分别下降了 8.52 g/kg, 1.36 g/kg 和 5.85 g/kg; 5—10 cm 土层分别下降了 4.78 g/kg, 0.19 g/kg 和 2.98 g/kg, 与对照样地差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。轻度火烧使樟子松天然林表层土壤黑碳含量显著增加, 0—5 cm 土层黑碳含量较对照样地增加了 9.95 g/kg, 与对照样地差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。火烧迹地 0—5 cm 和 5—10 cm 土层 BC/SOC 分别增加了 25.4% 和 6.12%, ROC/SOC 分别减小了 1.49% 和 0.65%, 与对照样地差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。轻度火烧对樟子松天然林土壤 POC/SOC 影响不大。回归分析表明, 火烧迹地和对对照样地土壤有机碳各组分与有机碳之间都呈极显著的线性关系 ( $P < 0.01$ )。

**关键词:** 大兴安岭; 土壤有机碳; 黑碳; 易氧化碳; 颗粒有机碳

**中图分类号:** S714.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2016)05-0322-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.053

## Impact of Burning on Soil Organic Carbon Fractions in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Natural Forest of Great Xing'an Mountains

ZHANG Maozeng, XIN Ying, ZHAO Yusen

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040)

**Abstract:** Taking the mild burned area of Great Xing'an Mountains as research objects, the impact of burning on the soil organic carbon fractions in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest was investigated through a comparative study. The results showed that the mild burning changed the composition and content of the soil organic carbon of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest. After mild burning, the content of soil organic carbon, readily oxidizable carbon and particulate organic carbon decreased by 8.52 g/kg, 1.36 g/kg and 5.85 g/kg respectively at 0—5 cm soil layer, which decreased by 4.78 g/kg, 0.19 g/kg and 2.98 g/kg respectively at 5—10 cm soil layer. The difference reached a significant level between burned and unburned natural forest ( $P < 0.05$ ). The black carbon content at soil surface significantly increased after mild burning. The black carbon content of burned area at 0—5 cm soil layer increased by 9.95 g/kg, and the difference reached a significant level with unburned natural forest ( $P < 0.05$ ). In 0—5 cm and 5—10 cm soil layer, the proportion of black carbon to soil organic carbon in burned area increased by 25.4% and 6.12% respectively, the proportion of readily oxidizable organic carbon to soil organic carbon decreased by 1.49% and 0.65% respectively, the difference between burned area and unburned natural forest reached a significant level ( $P < 0.05$ ). Mild burning had little effect on the proportion of particulate organic carbon to soil organic carbon. Regression analysis showed that the soil organic carbon displayed an extremely significant linear correlation with soil organic carbon fractions both mild burned and unburned natural forest ( $P < 0.01$ ).

**Keywords:** Great Xing'an mountains; soil organic carbon; black carbon; readily oxidizable carbon; particulate organic carbon

土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 是土壤碳库的容量指标, 是由不同分解速率的碳组成的复合体。陆地生态系统碳库中有 2/3 贮存在土壤有机碳中, 而土壤碳储量的 73% 存在于森林土壤中<sup>[1]</sup>。森

林有机碳库发生微小的变化都可引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的显著变化。大兴安岭林区是我国寒温带针叶林的唯一分布区, 也是我国极为重要的碳贮库, 对维持区域生态平衡、保障国家和东北亚生态安全具有不可或

收稿日期: 2016-05-07

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2011BAD08B02)

第一作者: 张茂增 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: zhangmz\_nefu@163.com

通信作者: 赵雨森 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: zhaoy1957@163.com

缺的作用。同时,大兴安岭林区也是我国林火高发区。林火是大兴安岭林区重要的干扰因子,通过直接燃烧损失、有机质高温变性、继发性侵蚀作用以及改变碳的输入输出等过程而改变土壤的碳库<sup>[2]</sup>;然而目前关于火后土壤有机碳含量变化没有统一的结论,火烧可引起有机碳含量升高、降低或是维持不变。所以研究火烧对大兴安岭森林土壤有机碳组分的影响,对于该地区森林有机碳库研究具有重要意义。

土壤有机碳包括黑碳(Black Carbon, BC)、易氧化碳(Readily Oxidizable Carbon, ROC)、颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)等组分<sup>[3]</sup>。其中黑碳是生物质或化石燃料不完全燃烧形成的含有C、O、H、N、S等元素极为稳定的连续统一体<sup>[4-5]</sup>,具有很高的惰性,是土壤惰性碳库的重要组成部分。土壤易氧化碳是土壤中易被氧化且活性较高的有机碳<sup>[6-7]</sup>,对土壤质量和环境有高度的敏感性。土壤颗粒有机碳指与砂粒结合并在有机质分解转化中相对较慢、腐殖质化程度较低、活性较高的有机碳<sup>[8]</sup>,在土壤中周转速度较快,是土壤有机碳变化的敏感指标之一。目前,火烧对森林生态系统土壤有机碳影响的研究,主要集中在土壤总有机碳含量变化方面,关于火烧对土壤有机碳组分及其含量变化影响方面的研究相对较少。本文以大兴安岭地区受到轻度火烧的樟子松天然林为研究对象,研究轻度火烧对森林土壤有机碳组分及其含量的影响,为火烧对大兴安岭森林生态系统土壤碳库影响研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于大兴安岭阿木尔林业局,地处大兴安岭北坡,地理坐标为122°38′30″—124°05′05″E, 52°15′03″—53°33′15″N,是额尔古纳河流域,黑龙江上游。该地区属寒温带大陆性气候,具有明显的山地气候特点,昼夜温差较大。春季干旱,易发生森林火灾,夏季短暂,降水较为集中,冬季漫长而严寒。年平均温度为-2~-4℃,多年平均降水量432.0 mm,年日照时数2 630 h,无霜期93 d左右,主风向为西北风。土壤以棕色针叶林土为主,此外还有沼泽土和泥炭土等。地带性植被类型为寒温带针叶林,主要乔木树种有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)等;灌木主要有杜香(*Ledum palustre* var. *dilatatum*)、兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum* L.)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea* L.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、刺玫(*Rosa davurica* Pall.)等;草本主要有鹿蹄草(*Pyrola calliantha*)、小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、蚊子草

(*Filipendula palmata*)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 研究地点位于大兴安岭阿木尔林业局红旗林场105小班,海拔为600 m,坡向东南,坡度25°,为樟子松天然林。2012年6月发生轻度火烧,烧死木比例为9%,调查时间为2014年8月下旬。在火烧迹地内选择具有代表性的地段,设置3个20 m×20 m的标准样地<sup>[9]</sup>,同时选取毗邻的立地条件基本一致未发生火烧的樟子松天然林作为对照。每一取样点按0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm, 15—20 cm分层采集土样,除去石砾和根系等杂质带回实验室,自然风干后分别过2 mm, 0.5 mm, 0.149 mm土壤筛待用。

1.2.2 土壤有机碳各组分含量的测定 土壤有机碳的测定:取过0.149 mm孔径土壤筛风干样品,用自动碳氮分析仪(Elementar vario EL III)测定有机碳含量。

黑碳的测定<sup>[10]</sup>:取已过0.149 mm孔径土壤筛的待测土样,称取0.5 g左右放于离心管中,加入25 mL 0.1 mol/L  $K_2Cr_2O_7$  + 2 mol/L  $H_2SO_4$  混合液,用漩涡混合仪来拌匀后置于55℃水浴恒温振荡器中加热氧化60 h。反应完毕后离心、水洗、烘干,得到的剩余物即为黑碳样品。用自动碳氮分析仪测定黑碳含量,单位为g/kg。

易氧化碳的测定<sup>[11]</sup>:称取含有15~30 mg有机碳的风干土壤样品置于塑料瓶中,加33 mmol/L高锰酸钾液25 mL,密封瓶口,转速250 r/min振荡1 h, 3 000 r/min离心5 min,上清液用去离子水稀释后在565 nm分光光度计上比色,根据高锰酸钾的消耗量,求出土壤易氧化碳含量。

颗粒有机碳的测定<sup>[12]</sup>:称取20.00 g过2 mm孔径土壤筛的待测土样置于150 mL三角瓶中,加入5 g/L六偏磷酸钠溶液100 mL,先手摇15 min,再用振荡器以180 r/min振荡18 h。把土壤悬液过53 μm孔径土壤筛,反复用蒸馏水冲洗直到获得澄清溶液(黏粒和粉粒完全除去),剩余的粗粒组分在60℃下烘干至恒重,计算其占整个土壤样品的百分比。将烘干样品中的有机碳含量换算为单位质量土壤样品的对应组分有机碳含量即为POC含量。

1.2.3 数据处理 使用Microsoft Excel2003软件进行数据处理和图表制作,采用SPSS18.0软件进行单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 轻度火烧对土壤有机碳组分含量的影响

轻度火烧使大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳含量减少,0—10 cm层土壤有机碳含量下降显著。轻度

火烧迹地 0—5 cm 和 5—10 cm 层土壤有机碳含量分别为(50.94±4.90) g/kg 和(38.99±2.61) g/kg,与对照样地相比土壤有机碳含量分别减少了 8.52 g/kg 和 4.78 g/kg(表 1)。火烧前后樟子松天然林 0—5 cm 和 5—10 cm 层土壤有机碳含量之间的差异分别达到了显著水平( $P<0.05$ );火烧前后樟子松天然林 10—15 cm 和 15—20 cm 层土壤有机碳含量差异不显著( $P>0.05$ )。樟子松天然林土壤有机碳含量在火烧前后均随土层深入而降低,表聚性特征显著,地表凋落物是森林土壤有机碳的主要来源。对照样地不同土层间土壤有机碳含量差异达到显著水平( $P<0.05$ );轻度火烧后 0—5 cm 层土壤有机碳含量与其他土层间差异达到显著水平( $P<0.05$ ),而 5—10 cm 与 10—15 cm,10—15 cm 与 15—20 cm 层之间差异不显著( $P>0.05$ )。

轻度火烧使大兴安岭樟子松天然林土壤黑碳含量升高。已有研究表明,土壤黑碳主要分布在 0—30 cm 土层内,表层含量最高。轻度火烧迹地 and 对照样地 0—5 cm 层土壤黑碳含量最高,分别为(21.29±1.92) g/kg 和(11.34±1.33) g/kg。与对照样地相比,轻度火烧迹地 0—5 cm 层土壤黑碳含量增加了 9.95 g/kg,是对照样地的 1.88 倍,两者之间的差异达到显著水平( $P<0.05$ ),这与大兴安岭是高寒区,枯落物积累较多,轻度火烧使大量生物质不完全燃烧形成了较多黑碳有关。对照样地和轻度火烧迹地其余土层间黑碳含量差异未达到显著水平( $P>0.05$ )。黑碳含量随土层深度增加而递减,与土壤有机碳变化规律一致。火烧前后樟子松天然林 0—5 cm 土层黑碳含量与 5—10 cm,10—15 cm,15—20 cm 层之间的

差异达到显著水平( $P<0.05$ ),5—10 cm,10—15 cm 与 15—20 cm 土层之间的黑碳含量差异未达到显著水平( $P>0.05$ )。

易氧化碳通常采用 333 mmol/L  $\text{KMnO}_4$  氧化提取土壤中的不稳定组分,但对不同地区、不同种植管理等土壤易氧化碳的变化不敏感,且过高估测了土壤易氧化碳<sup>[13]</sup>,因此本文采用  $\text{KMnO}_4$  浓度为 33 mmol/L。轻度火烧使樟子松天然林土壤易氧化碳含量降低。与对照样地相比,轻度火烧迹地 0—5 cm 和 5—10 cm 层土壤易氧化碳含量分别降低了 1.36 g/kg 和 0.49 g/kg;10—15 cm,15—20 cm 层易氧化碳含量未产生显著差异。土壤易氧化碳含量在剖面垂直分布上表现为随着土层深度增加而递减,与土壤有机碳、黑碳变化规律一致。轻度火烧迹地不同土层间易氧化碳含量差异达到显著水平( $P<0.05$ ),而对照样地中 0—5 cm,5—10 cm,10—15 cm 土层和 0—5 cm,5—10 cm,15—20 cm 土层差异达到显著水平( $P<0.05$ ),10—15 cm 和 15—20 cm 土层间差异性不显著( $P>0.05$ )。火烧前后樟子松天然林在 0—5 cm 土层和 5—10 cm 土层范围内,易氧化碳含量差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

轻度火烧后樟子松天然林土壤颗粒有机碳含量较对照样地降低。与对照样地相比,轻度火烧迹地 0—5 cm 和 5—10 cm 层颗粒有机碳含量分别减少了 5.85 g/kg 和 2.98 g/kg,且两者差异性达到显著水平( $P<0.05$ )。轻度火烧迹地和对照样地颗粒有机碳含量随土层深度增加而降低,与土壤有机碳、黑碳、易氧化碳的变化规律一致。统计结果表明,火烧前后樟子松天然林不同土层间差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。

表 1 轻度火烧对土壤有机碳各组分含量的影响 g/kg

样地类型	土层深度/cm	土壤有机碳	黑碳	易氧化碳	颗粒有机碳
轻度火烧迹地	0—5	50.94±4.90aA	21.29±1.92aA	2.51±0.19aA	30.26±2.65aA
	5—10	38.99±2.61aB	9.05±0.86aB	2.06±0.18aB	16.74±1.64aB
	10—15	34.25±3.26aBC	8.50±0.84aB	1.61±0.11aC	13.81±1.07aC
	15—20	29.92±2.17aC	6.62±0.63aB	1.30±0.12aD	9.84±0.91aD
对照样地	0—5	59.46±3.57bA	11.34±1.33bA	3.87±0.38bA	36.11±1.18bA
	5—10	43.77±4.26bB	7.99±0.72aB	2.55±0.23bB	19.72±1.91bB
	10—15	33.47±3.39aC	7.94±0.77aB	1.60±0.12aC	12.99±1.21aC
	15—20	28.35±2.16aD	6.60±0.62aB	1.32±0.11aC	9.49±0.21aD

注:表中数值为“平均值±标准差”,小写字母表示不同样地同一土层间差异显著,大写字母表示同样地不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

2.2 轻度火烧对土壤有机碳组分比例的影响

轻度火烧迹地 BC/SOC 比例的范围是 21.82%~44.31%,对照样地 BC/SOC 比例的范围是 18.10%~23.41%。轻度火烧引起樟子松天然林表层土壤有机碳减少和黑碳含量增加,导致了黑碳占土壤有机碳比例增加。轻度火烧迹地 0—5 cm 土层 BC/SOC 比例最高为 44.31%,较对照样地增加了 25.4%,是对照样地的 2.34 倍,差异达到显著水平( $P<0.05$ )。轻度

火烧迹地 5—10 cm 土层 BC/SOC 比例为 24.22%,较对照样地增加了 6.12%,差异达到显著水平( $P<0.05$ )。轻度火烧迹地 0—5 cm 土层与 5—10 cm,10—15 cm,15—20 cm 土层 BC/SOC 比例差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

易氧化碳与土壤有机碳的比值是反映土壤碳稳定性的指标,比值越大,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差<sup>[14]</sup>。易氧化碳仅占土壤有机碳很小的一部

分,在 0—20 cm 土层内,轻度火烧迹地和对照样地 ROC/SOC 比例范围分别为 4.32%~5.23% 和 4.70%~6.49%(见图 2)。对照样地 ROC/SOC 比例随土层深度增加而降低,而轻度火烧迹地表现出先增大后减小的趋势。轻度火烧使樟子松天然林土壤 ROC/SOC 比例降低。火烧后 0—5 cm 和 5—10 cm 土层范围内 ROC/SOC 比例分别下降了 1.49% 和 0.65%,与对照样地差异达到显著水平 ( $P<0.05$ ),说明轻度火烧后樟子松天然林土壤有机碳活性变小、难以转化。

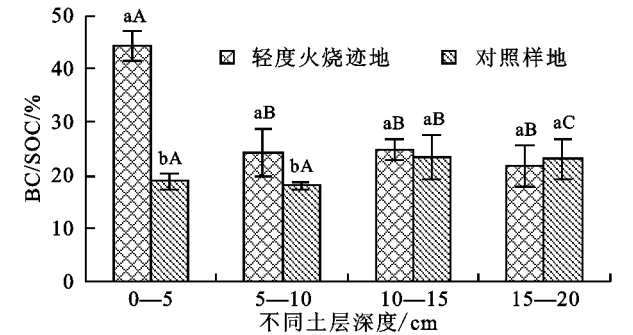


图 1 轻度火烧对樟子松天然林土壤 BC/SOC 的影响

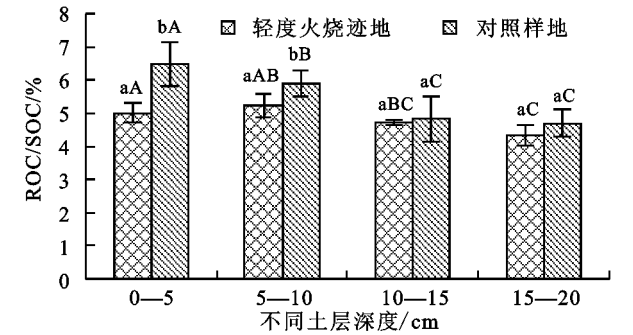


图 2 轻度火烧对樟子松天然林土壤 ROC/SOC 的影响

轻度火烧迹地和对照样地 POC/SOC 比例的范围分别是 31.82%~60.46% 和 34.62%~62.52%,且均表现出随土层深度增加而减小的趋势(见图 3)。轻度火烧迹地 0—5 cm 和 5—10 cm 土层 POC/SOC 比例较对照样地分别减少了 2.06% 和 1.57%,但差异性未达到显著水平 ( $P>0.05$ );轻度火烧迹地和对照样地 0—5 cm 与 5—10 cm 土层间 POC/SOC 比例差异达到显著水平 ( $P<0.05$ )。

2.3 土壤有机碳和各组分的关系

回归分析表明(见表 2),未发生火烧的樟子松天然林土壤有机碳与易氧化碳、颗粒有机碳含量之间存在极显著正相关关系 ( $P<0.01$ )。轻度火烧后,土壤有机碳和易氧化碳含量存在极显著正相关关系 ( $P<0.01$ )。轻度火烧使樟子松天然林土壤黑碳、易氧化碳和颗粒有机碳等有机碳组分含量发生了明显变化,改变了不同组分在土壤有机碳组分中的比例。生物质的不完全燃烧增加了大兴安岭樟子松天然林土壤黑碳输入。

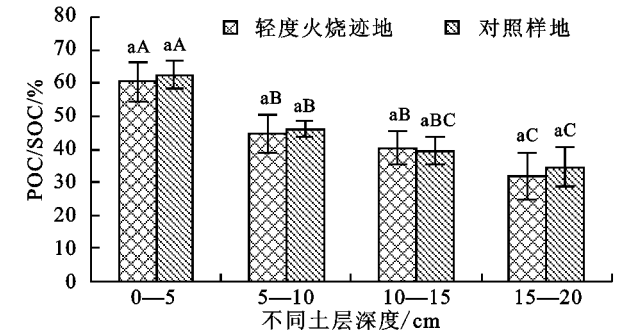


图 3 轻度火烧对樟子松天然林土壤 POC/SOC 的影响

表 2 轻度火烧后土壤有机碳与有机碳各组分相关性

有机碳各组分	样地类型	回归方程	R <sup>2</sup>
黑碳 (BC)	轻度火烧迹地	SOC=1.26BC+24.16	0.847 **
	对照样地	SOC=4.79BC+0.69	0.754 **
易氧化碳 (ROC)	轻度火烧迹地	SOC=16.47ROC+7.74	0.934 **
	对照样地	SOC=11.56ROC+14.28	0.932 **
颗粒有机碳 (POC)	轻度火烧迹地	SOC=1.00POC+20.78	0.876 **
	对照样地	SOC=1.15POC+18.67	0.944 **

注: \*\* 表示相关性达到 0.01 极显著水平。

3 讨论

林火对土壤有机碳含量的影响具有很大的变异性。目前,轻度火烧后土壤有机碳含量的变化没有统一的结论。郭爱雪<sup>[15]</sup>等研究发现,大兴安岭马尾松林轻度火烧后土壤有机碳含量下降 19.46%,有研究表明北美橡胶林林火后表层土壤有机碳含量急剧下降,与本文研究结果一致;但也有研究表明轻度火烧后土壤有机碳含量提高<sup>[16-17]</sup>;而杉木人工林皆伐火烧和大兴安岭地区落叶松天然林火后土壤有机碳含量变化不显著<sup>[4,10]</sup>。导致这种截然不同的结论可能与林火的类型、地形等因素有关<sup>[2]</sup>。部分植物被烧死,凋落物部分被烧掉,透光率增强,生长季林分温度上升,土壤有机碳矿化增强和可溶性有机碳淋失;火烧后地被物减少,导致实际采样深度下延,“下层土壤”的稀释效应同样会更大程度导致“现 0—5 cm 和 5—10 cm 土层”有机碳含量下降<sup>[2]</sup>。

火烧强度对黑碳含量有显著影响。雷雨雨等<sup>[10]</sup>研究发现,轻度火烧 2 a 后黑碳含量变化不大,而重度火烧后黑碳含量显著提高;Ansley 等<sup>[18]</sup>研究发现,火烧对温带草原土壤黑碳影响不大。本研究轻度火烧后表层黑碳含量显著增加,主要与大兴安岭是高寒区,枯落物积累较多,火烧后产生较多黑碳有关。黑碳和土壤有机碳之间具有良好的线性关系,原因可能在于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,能够保存有机碳;另外,黑碳表面具有多孔结构和酚羟基、羧基等含氧官能团,能够吸附有机物和粘土矿物,能够固定有机物<sup>[10]</sup>。

轻度火烧引起樟子松天然林表层土壤易氧化碳含量显著降低,除了火烧过程中的损失外,火烧后林

分郁闭度降低,土温升高,土壤湿度降低,加快了土壤易氧化碳的分解,使其积累减少。火烧改变了表层土壤生物的种群和数量,减少了表层土壤有机质的输入,进而导致火烧迹地表层土壤易氧化碳含量显著降低。易氧化碳占土壤有机碳比例随土层深度增加呈现出下降趋势,与 Wang 等<sup>[19]</sup>研究结果一致。易氧化碳与土壤有机碳之间呈极显著正相关,与耿玉清等<sup>[12]</sup>研究结果一致,说明易氧化碳含量很大程度上依赖于土壤有机碳,下层受生物等影响较小,有机碳含量也较上层低,因此下层土壤易氧化碳含量较低。

轻度火烧后樟子松天然林 0—10 cm 土层范围内颗粒有机碳含量显著下降,火烧破坏了森林土壤结构,将团聚体保护、胶结的新鲜碳暴露在空气中,微生物较易利用,从而减少了颗粒有机碳数量<sup>[20]</sup>,促进了颗粒有机碳矿化分解。火烧后林分透光率增强,温度升高,土壤微生物大量繁殖,也加快了颗粒有机碳的分解。耿玉清等<sup>[12]</sup>在研究北京山地针叶林和阔叶林发现,POC/SOC 比例呈现出随土层深度增加而减小的趋势,且颗粒有机碳和土壤有机碳极显著的线性关系,与本文研究结果一致,表明颗粒有机碳来源于土壤有机碳。

### 4 结 论

(1)大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳及各组分含量在剖面上分布规律一致,均表现为随土层深度增加而降低。

(2)火烧改变了土壤有机碳和各组分的含量。轻度火烧使樟子松天然林土壤有机碳含量减少,黑碳含量增加。轻度火烧引起樟子松天然林表层土壤易氧化碳、颗粒有机碳含量显著降低,对 10—15 cm,15—20 cm 土层影响不大。

(3)轻度火烧引起 0—5 cm,5—10 cm 土层 BC/SOC 显著增大;0—5 cm,5—10 cm 土层 ROC/SOC 显著降低;轻度火烧对 POC/SOC 影响不大。黑碳和有机碳之间良好的线性关系表明,黑碳对大兴安岭森林土壤有机碳有重要的贡献。土壤有机碳与易氧化碳、颗粒有机碳间极显著的正相关表明,土壤有机碳含量的变化制约着易氧化碳、颗粒有机碳含量的变化。

### 参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 孙彩丽. 陕北退耕还林还草的土壤固碳效应及对碳组分的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.

[4] 尹云锋,杨玉盛,高人,等. 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):352-355.

[5] 尹云锋,杨玉盛,高人,等. 黑碳在杉木人工林土壤不同组分中的分配规律研究[J]. 土壤,2009,41(4):625-629.

[6] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys[J]. Soil Science, 2001, 166(1):61-67.

[7] Shrestha R K, Ladha J K, Gami S K. Total and organic soil carbon in cropping systems of Nepal[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 75(75):257-269.

[8] 王鑫,王金成,刘建新,等. 黄土高原人工沙棘林恢复阶段土壤黑碳、颗粒有机碳的积累[J]. 水土保持学报, 2013,27(2):250-254.

[9] 于海艳,宫汝宁,周娅,等. 北京八达岭地区 4 种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 水土保持学报, 2015,29(5):162-166.

[10] 雷雨雨. 不同强度火烧对大兴安岭天然林土壤黑碳的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2015.

[11] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.

[12] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究[J]. 北京林业大学学报, 2009,31(5):19-24.

[13] Vieira F. C. B, Bayer C, Zanatta J A, et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1):195-204.

[14] 朱志建,姜培坤,徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4):523-526.

[15] 郭爱雪,郭亚芬,崔晓阳. 大兴安岭马尾松林下土壤在不同火烧强度下的养分变化[J]. 东北林业大学学报, 2011,39(5):69-71.

[16] Gonzalez-Prez J A, Gonzalez-Vila F J, Almendros G, et al. The effect of fire on soil organic matter: a review [J]. Environment International, 2004, 30(6):855-870.

[17] 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.

[18] Ansley R J, Boutton T W, Skjemstad J O. Soil organic carbon and black carbon storage and dynamics under different fire regimes in temperate mixed-grass savanna [J]. Global Biogeochem Cycles, 2006, 20(3):1-11.

[19] Wang Y, Ruan H H, Huang L L, et al. Soil labile organic carbon with different land uses in reclaimed land area from Taihu Lake[J]. Soil Science, 2010, 175(12): 624-630.

[20] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰,等. 黄土台原不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2):218-226.