

## 不同程度火干扰对大兴安岭冻土区土壤碳组分的影响

闫志刚<sup>1</sup>,王 鼎<sup>2\*</sup>,周 梅<sup>3</sup>,赵鹏武<sup>3</sup>,田金龙<sup>4</sup>,舒定玺<sup>4</sup>

(1. 内蒙古大兴安岭航空护林局, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 2. 甘肃农业大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070;

3. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010000; 4. 内蒙古毕拉河国家级自然保护区, 内蒙古 呼伦贝尔 165479)

**摘 要:**以 2017 毕拉河林业局(岛状冻土区)与 2018 汗马保护区(永久冻土区)火烧迹地为对象,通过对比不同火烧程度(轻度火烧、中度火烧、重度火烧、未火烧对照)土壤有机碳、易氧化有机碳含量(质量分数,下同)的变化特征,揭示林火干扰对冻土区土壤有机碳组分的影响。结果表明:1)在毕拉河岛状冻土区火干扰会显著增加 0~10 cm 土壤层有机碳含量( $P<0.05$ );在汗马永久冻土区轻度和中度火干扰会显著增加 0~20 cm 土壤层有机碳含量( $P<0.05$ )。2)在大兴安岭冻土区土壤 ROC(有机碳)含量与 SOC(易氧化有机碳)含量之间存在极显著正相关关系( $P<0.01$ )。3)在毕拉河岛状冻土区火干扰会降低 0~20 cm 土壤层 ROC/SOC 的值,且火烧程度越小 ROC/SOC 的值越小。在汗马永久冻土区轻度火干扰会增加 0~30 cm 土壤层 ROC/SOC 的值,而中度和重度火干扰会降低 0~20 cm 土壤层 ROC/SOC 的值。

**关键词:**火烧迹地;冻土区;兴安落叶松;土壤有机碳;易氧化有机碳

**中图分类号:**S762.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)05-0141-05

## Effects of Different Degrees of Fire Disturbance on Soil Carbon Composition in the Greater Khingan Mountains Permafrost Region

YAN Zhi-gang<sup>1</sup>, WANG Ding<sup>2</sup>, ZHOU Mei<sup>3</sup>, ZHAO Peng-wu<sup>3</sup>, TIAN Jin-long<sup>4</sup>, SHU Ding-xi<sup>4</sup>

(1. Inner Mongolia Daxinganling Aviation Forest Protection Bureau, Hulunbeier 021000, Inner Mongolia, China;

2. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China; 4. Bila River National Nature Reserve, Hulunbeier 165479, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** In this study, burned areas managed under the Bila River Forest Bureau (segregated frozen ground) in 2017 and Hanma National Nature Reserve (permafrost region) in 2018 were selected as research objects. By comparing the variation characteristics of soil organic carbon (SOC) and readily oxidized carbon (ROC) in different burning levels (light burning, moderate burning, severe burning and non-burning, control), to reveal the effects of forest fire interference on soil organic carbon components of frozen soil area. The conclusions were as follows. 1) In the segregated frozen ground of the Bila River, fire interference significantly increased the organic carbon content in 0—10 cm soil layer ( $P<0.05$ ). In Hanma permafrost area, light and moderate fire interference significantly increased the organic carbon content in the soil layer of 0—20 cm ( $P<0.05$ ). 2) There was a significant positive correlation between soil ROC content and SOC content ( $P<0.01$ ) in the Greater Khingan Mountains of permafrost region. 3) In the segregated frozen ground of the Bila River, fire interference can reduce the ROC/SOC ratio in the 0—20 cm soil layer, and the lower the fire degree, the lower the ROC/SOC ratio. In the Hanma permafrost region, light fire interference

收稿日期:2021-08-16 修回日期:2021-11-23

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2020MS03049);国家自然科学基金(41563006);甘肃省青年科技基金(21JR7RA852);甘肃省农业大学科研启动基金(GAU-KYQD-2020-25)。

第一作者:闫志刚,高级工程师。研究方向:生态学。E-mail: yzgl567@126.com

\* 通信作者:王 鼎,讲师。研究方向:土壤学。E-mail: 15147124612@163.com

increased the ROC/SOC ratio in the 0–30 cm soil layer, while moderate and severe fire interference decreased the ROC/SOC ratio in the 0–20 cm soil layer.

**Key words:** burned area; permafrost region; *Larix gmelinii*; soil organic carbon; readily oxidized carbon

森林土壤有机碳是土壤碳汇的重要组成部分,森林土壤碳库占全球土壤碳库的 73%,内部组成极为复杂,且受外界影响较大,在调节陆地生态系统碳收支和碳平衡过程中起着关键作用<sup>[1]</sup>。因此,研究土壤有机碳对森林土壤碳汇的影响有重要意义<sup>[2-3]</sup>。森林土壤有机碳库的变化可能会引起大气中 CO<sub>2</sub> 浓度发生改变,从而影响局地的气候变化。因此,各国学者也越来越重视森林土壤碳库的研究<sup>[4-5]</sup>。

火是森林生态系统碳循环的重要干扰因子,不同程度的火烧对森林生态系统的作用不同,对森林土壤的有机碳库造成影响也不同<sup>[6-7]</sup>。大兴安岭林区森林火灾频繁发生,严重影响着森林生态系统的服务功能及土壤碳库<sup>[8]</sup>。土壤活性有机碳占土壤有机碳总量的比例较小,但活性有机碳能够直接参与土壤生物化学过程,反映出土壤质量的微小变化<sup>[9]</sup>。

大兴安岭林区林下资源丰富,是森林火灾频发区<sup>[10]</sup>。内蒙古大兴安岭冻土分布较广,北部地下多为连续永久冻土带,东南部多为岛状冻土和季节性冻土分布区域。火干扰将导致部分冻土区冻土融化、土壤性质发生改变<sup>[11-12]</sup>。本研究以内蒙古大兴安岭冻土区不同火烧程度火烧迹地为对象,研究森林火灾后土壤恢复期碳组分的变化特征,旨在为森林火灾后土壤碳库恢复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于毕拉河林业局 2017 年火烧迹地(49°00′–49°54′N, 122°42′–123°55′E),与汗马国家级自然保护区 2018 年火烧迹地(51°20′–51°49′N, 122°23′–122°52′E),2 个研究区均隶属于中国内蒙古大兴安岭森林工业集团有限公司。毕拉河林区

位于大兴安岭山脉的东南坡,地下为岛状冻土区,汗马保护区位于内蒙古大兴安岭山脉西坡北部,地下为永久冻土区。气候均属寒温带大陆性气候,特点是夏季温暖短促、多雨,冬季寒冷漫长。毕拉河林区年平均气温为 -1.1℃,年平均降水量为 480 mm,降雨期多集中在 7–8 月,约占全年降水量的 50%~60%,无霜期 130 d 左右。汗马保护区年平均气温 -5.3℃,年降水量 450 mm 左右,集中在 7–9 月,约占全年总降水的 70%。保护区全年有长达 10 个月的积雪覆盖,局部地区积雪常年不化,无霜期只有 80~100 d。

### 1.2 样地布设

分别于 2017 年 5 月和 2018 年 7 月在内蒙古大兴安岭毕拉河林区 2017 年火烧迹地和汗马保护区 2018 年火烧迹地内设置轻度、中度、重度 3 种类型火烧样地,同时在距离轻度火烧样地 1 km 范围内设置未火烧对照样地。每个类型样地设置 3 个重复,共 24 块样地,样地规格均为 30 m×30 m。

### 1.3 土壤样品采集与实验方法

在样地内进行 S 形取样,每个样地取 5 份土壤样品,样品按照 0~10、10~20、20~30 cm 土壤层分层取样。取样后用自封袋保存、冷藏,带回实验室风干、研磨后进行土壤有机碳(SOC)和易氧化有机碳(ROC)含量(质量分数)的测定。Elementar vario EL III(德国)自动碳氮分析仪测定土壤 SOC 含量。土壤 ROC 含量的测定采用高锰酸钾氧化法。

### 1.4 数据处理

使用 Excel 2016 对数据进行初步分析,使用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析(Duncan),显著性水平设定为  $P=0.05$ ,使用 Sigmaplot 12.5 软件进行制图。

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic features of sample plots

研究区	样地类型	烧死木比例(%)	平均胸径/cm	平均树高/m	林型
毕拉河	轻度	25.36	9.40	17.37	兴安落叶松林
	中度	55.97	10.63	19.10	兴安落叶松林
	重度	92.38	11.06	17.29	兴安落叶松林
	未火烧	—	11.91	15.18	兴安落叶松林
汗马	轻度	27.32	10.51	9.02	兴安落叶松林
	中度	52.47	8.63	10.21	兴安落叶松林
	重度	96.78	10.06	10.73	兴安落叶松林
	未火烧	—	9.76	10.14	兴安落叶松林

## 2 结果与分析

### 2.1 不同火烧程度土壤 SOC 变化特征分析

由图1可以看出,在毕拉河与汗马研究区,4种类型样地土壤SOC含量在0~30 cm土壤层中随着土壤层的加深而降低。在毕拉河研究区,火干扰会使得0~20 cm土壤层SOC含量增加,3种程度火烧样地0~10 cm土壤层SOC含量均显著高于对照样地( $P < 0.05$ ),其中,重度火烧程度干扰下土壤SOC含量升高最多。轻度和中度火烧样地10~20 cm土壤层SOC含量均显著高于对照样地( $P < 0.05$ )。轻度和重度火干扰会使20~30 cm土壤层SOC含量增加,中度火干扰会使20~30 cm土壤层SOC含量降低,但与对照样地相比,3种程度火烧样地20~30 cm土壤层SOC含量无显著性差异( $P > 0.05$ )。在汗马研究区中,较对照样地相比,轻度和中度火干扰会使0~30 cm土壤层SOC含量增加,中度火烧样地0~30 cm土壤层中SOC含量显著高于对照样地( $P < 0.05$ ),轻度火烧样地10~30 cm土壤层中SOC含量显著高于对照样地( $P < 0.05$ )。重度火干扰会使0~30 cm土壤层SOC含量降低,但重度火烧样地0~30 cm土壤层SOC含量与对照样地差异不显著( $P > 0.05$ )。可见,在毕拉河岛状冻土区火干扰会显著增加0~10 cm土壤层有机碳含量;在汗马永久冻土区轻度和中度火干扰会显著增加0~20 cm土壤层有机碳含量( $P < 0.05$ )。

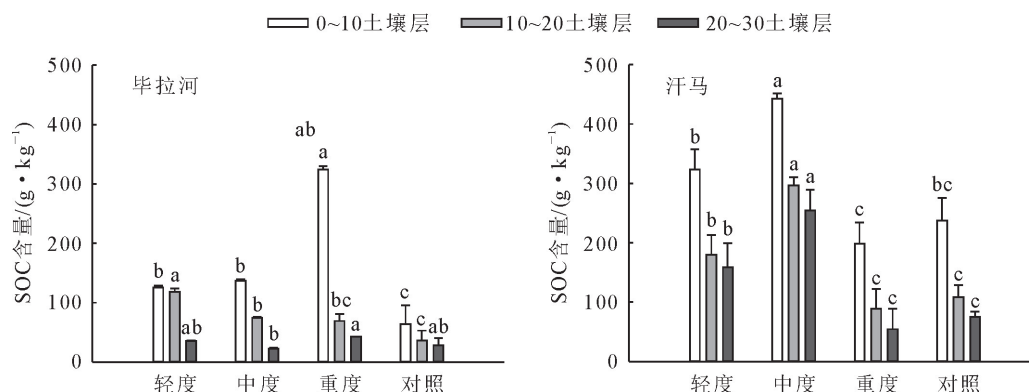
### 2.2 不同火烧程度土壤 ROC 变化特征分析

由图2可见,除毕拉河轻度火烧样地外,2个研究区各类型样地土壤ROC含量在0~30 cm土壤层中随着土壤层的加深而降低。在毕拉河研究区,中度和重度火干扰会增加0~20 cm土壤层中ROC含量。其中,重度火烧样地0~10 cm土壤层中ROC含量显著高于对照样地( $P < 0.05$ )。而轻度

火干扰会降低0~10 cm土壤层中ROC的含量,增加10~30 cm土壤层中ROC含量,但轻度火烧样地与对照样地相比,0~30 cm土壤层中ROC含量差异不显著( $P > 0.05$ )。在汗马研究区,轻度和中度火干扰会增加土壤ROC的含量,而重度火干扰会降低土壤ROC的含量。其中,轻度和中度火烧迹地20~30 cm土壤层ROC的含量显著高于对照样地( $P > 0.05$ )。

### 2.3 不同火烧程度土壤 SOC 与 ROC 关系

ROC含量在SOC含量中的比例是衡量土壤碳库活性和稳定性的重要指标,该比值越大土壤有机碳活性越高,更易被分解矿化。本研究发现,林火干扰会对ROC含量在SOC含量的占比产生影响,不同火烧程度干扰对ROC/SOC的值影响也不同。在毕拉河研究区,轻度和重度火烧样地ROC/SOC的值随着土壤层的加深而升高,对照样地ROC/SOC的值随着土壤层的加深而降低。火干扰显著降低了0~20 cm土壤层中ROC/SOC的值( $P > 0.05$ ),其中轻度火烧样地0~20 cm土壤层中ROC/SOC的值最低。在汗马研究区,未火烧样地ROC/SOC的值随着土壤层加深而降低,3种火烧样地ROC/SOC的值随土壤深度变化无明显规律。轻度火烧样地ROC/SOC的值与对照样地相比略有升高,中度样地和重度样地与对照样地相比ROC/SOC的值略有降低,3种火烧样地0~20 cm土壤层中ROC/SOC的值呈现轻度火烧样地>中度火烧样地>重度火烧样地。轻度火干扰会增加0~30 cm土壤层中ROC/SOC的值,其中10~20 cm土壤层ROC/SOC的值显著大于对照样地( $P > 0.05$ )。中度和重度火干扰会降低0~20 cm土壤层ROC/SOC的值,但会增加20~30 cm土壤层ROC/SOC的值,其中20~30 cm土壤层ROC/SOC的值显著小于对照样地。



注:不同小写字母表示相同土壤层不同火烧程度间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图1 不同火烧程度样地土壤SOC含量

Fig. 1 Soil SOC content in the different degrees of burned plot

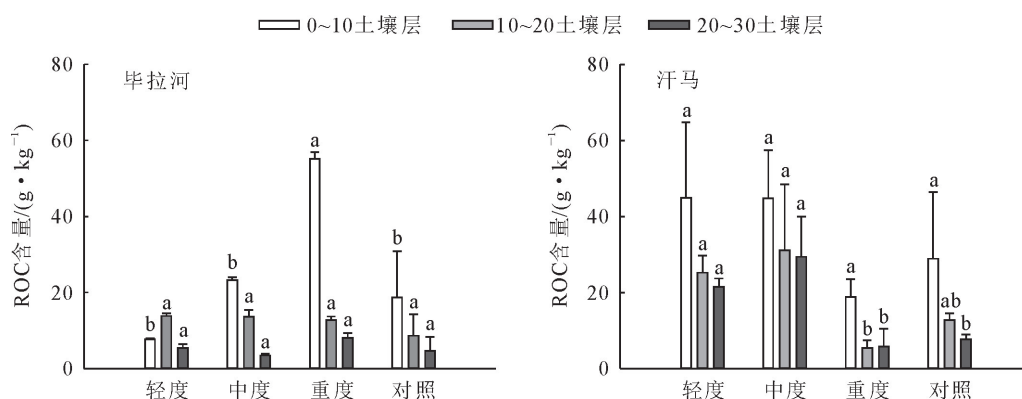


图2 不同火烧程度样地土壤 ROC 含量

Fig. 2 Soil ROC content in the different degrees of burned plot

表2 不同火烧程度样地土壤 ROC/SOC 值

Table 2 ROC/SOC ratio in the different degrees of burned plot

%

研究区	样地类型	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
毕拉河	轻度火烧	6.08±0.09 c	11.72±0.10 c	15.32±3.08 a
	中度火烧	16.94±0.28 b	18.15±1.94 b	15.21±3.08 a
	重度火烧	17.01±0.30 b	18.47±2.99 b	18.78±2.89 a
	未火烧对照	29.15±5.5 a	23.99±3.95 a	16.45±6.58 a
汗马	轻度火烧	13.88±4.58 a	16.27±0.25 a	8.94±4.79 a
	中度火烧	10.12±2.81 a	9.03±2.77 b	9.16±4.72 a
	重度火烧	10.00±3.15a	6.50±0.03 c	9.98±3.28 a
	未火烧对照	12.68±1.46 a	12.19±0.50 b	7.08±1.04 a

注:同列不同小写字母表示相同土壤层不同火烧程度间差异显著( $P<0.05$ )。

ROC 含量与 SOC 含量之间的线性回归分析表明,毕拉河与汗马研究区的 ROC 含量与 SOC 含量之间的存在极显著正相关关系( $P<0.01$ ),相关系数  $R$  分别为 0.819、0.795,表明 ROC 含量在很大程度上取决于 SOC 含量。其中汗马研究区  $R$  比毕拉河研究区高,表明 ROC 含量与 SOC 含量之间的相关性更高。

表3 不同冻土区土壤 ROC 与 SOC 相关关系

Table 3 Correlation between soil ROC and SOC in different permafrost region

研究区	回归方程	相关系数 $R$
毕拉河	$y = 4.9446x + 8.4778$	0.795**
汗马	$y = 6.2340x + 59.6040$	0.819**

注:\*\*表示极显著( $P<0.01$ )。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

1)在毕拉河岛状冻土区,火干扰会显著增加 0~10 cm 土壤层有机碳含量;在汗马永久冻土区,轻度和中度火干扰会显著增加 0~20 cm 土壤层有机碳含量( $P<0.05$ )。

2)大兴安岭冻土区土壤 ROC 含量与 SOC 含量之间的存在极显著正相关关系( $P<0.01$ )。

3)在毕拉河岛状冻土区,火干扰会降低 0~20

cm 土壤层 ROC/SOC 的值,火烧程度越小 ROC/SOC 的值越小。在汗马永久冻土区,轻度火干扰会增加 0~30 cm 土壤层 ROC/SOC 的值,中度和重度火干扰会降低 0~20 cm 土壤层 ROC/SOC 的值。

#### 3.2 讨论

不同火烧程度下,土壤 SOC 含量在垂直分布随着土壤层的加深呈递减趋势,这与韩春兰<sup>[13]</sup>等的研究结果相同,即在火烧样地,森林土壤有机碳含量随着土壤层的加深而降低。张宇婧等<sup>[14]</sup>的研究发现,轻度火烧后大兴安岭森林土壤有机层碳含量与未过火对照样地相比有小幅升高,认为是火烧使地表植被大量燃烧分解,同时产生了大量灰烬;火烧迹地土壤温度高,微生物分解速度加快,大量未被燃烧殆尽的可燃物进入土壤,对土壤有机质进行了有益补充。在本研究中除汗马重度火烧样地外,不同冻土区不同火烧程度样地 0~20 cm 土壤层中 SOC 含量也高于未火烧对照样地。韩春兰等<sup>[13]</sup>在火烧对兴安落叶松林土壤有机碳含量影响的研究中发现,重度火烧后土壤表层的有机碳大量分解,这与汗马研究区重度火烧样地结果相同,分析可知重度火干扰后初期,森林恢复植被较少,表层有机碳补充也相对较少,导致有机碳含量较未火烧样地相比明显下降。



魏云敏<sup>[15]</sup>研究发现,轻度火烧样地土壤总有机碳含量与碳组分含量高于未火烧样地,而中度和重度火烧样地,土壤总有机碳含量与碳组分含量均随火强度增强呈下降趋势。多数研究也表明火干扰后土壤活性有机碳含量会下降<sup>[16-17]</sup>,在本研究中只有在毕拉河轻度火烧样地和汗马重度火烧样地内发现该规律。在毕拉河研究区中度和重度火烧样地与汗马研究区轻度、中度火烧样地内均呈现火干扰后土壤活性有机碳含量增加的现象,这可能是因为在毕拉河研究区中、高强度的林火干扰与汗马研究区低、中强度的林火干扰会增加土壤内活性有机物的数量,增强了土壤活性有机碳的效应,致使土壤内活性有机碳含量增加<sup>[18]</sup>。目前大量的研究结果表明,不同火烧程度下土壤碳组分含量的变化没有一致的结论<sup>[19]</sup>。土壤有机碳组分变化与多种因素相关,如火烧程度、降雨、地形、林型、土壤质地、人为干扰等都与有机碳组分的变化密切相关<sup>[12-22]</sup>。因此,不同程度火烧对森林土壤有机碳含量和碳组分含量的影响,还需要进行长时期的定位观测才能有更为准确的结论。

#### 参考文献:

- [1] 陈仕奇,吕盛,高明,等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 953-960.  
CHEN S Q, LÜ S, GAO M, *et al.* Characteristics of soil organic carbon and mineralization with different stands in Jinyun Mountain[J]. Environmental Sciences, 2019, 40(2): 953-960. (in Chinese)
- [2] 滕秋梅,沈育伊,徐广平,等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤碳库管理指数和碳组分的变化特征[J]. 广西植物, 2020, 40(8): 1111-1122.  
TENG Q M, SHENG Y Y, XU G P, *et al.* Characteristics of soil carbon pool management index and carbon components of *Eucalyptus* plantations with different ages at north Guangxi[J]. Guangxi Plants, 2020, 40(8): 1111-1122. (in Chinese)
- [3] 朱依凡,孙兆林,王清奎. 生物炭和氮添加对亚热带常绿阔叶林土壤有机碳分解与平衡的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2851-2859.  
ZHU Y F, SUN Z L, WANG Q K. Effects of biochar and nitrogen additions on soil organic carbon decomposition and balance in a subtropical forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 2851-2859. (in Chinese)
- [4] GUO X, LUO Z, SUN O J. Long-term litter type treatments alter soil carbon composition but not microbial carbon utilization in a mixed pine-oak forest[J]. Biogeochemistry, 2021, 152(9): 1-17.
- [5] SIRIN A, MASLOV A, MAKAROV D, *et al.* Assessing wood and soil carbon losses from a forest-peat fire in the boreo-nemoral zone[J]. Forests, 2021, 12(7): 880.
- [6] 裴隆翠,陈月明,张鑫,等. 红松人工林植被恢复对土壤活性有机碳组分影响的时效性[J]. 东北林业大学学报, 2019(6): 21-25.
- PEI L C, CHENG Y M, ZHANG X, *et al.* Effects of vegetation restoration of *Pinus koraiensis* plantation on timeliness of soil active organic carbon structure[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019(6): 21-25. (in Chinese)
- [7] 陆昕,胡海清,孙龙,等. 火干扰对森林生态系统土壤有机碳影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 760-768.  
LU X, HU H Q, SUN L, *et al.* Progress on fire disturbance on soil organic carbon in the forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 760-768. (in Chinese)
- [8] 王梓璇. 内蒙古大兴安岭冻土区土壤呼吸对林火干扰与火烧迹地管理的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [9] COLEMAN D C, REID C, COLE C V. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems[J]. Advances in Ecological Research, 1983, 13: 1-55.
- [10] 刘娜,齐淑艳,陈宏伟,等. 大兴安岭呼中林区不同火后恢复年限森林碳密度变化研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(5): 8-12, 28.  
LIU N, QI S Y, CHEN H W, *et al.* Temporal changes in forest carbon density after fire disturbance in Huzhong forest region of Da Xing'an Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry university, 2017, 32(5): 8-12, 28. (in Chinese)
- [11] HA A, MP A, XUAN Z A, *et al.* Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition after forest fire in Canadian permafrost region [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 637-644.
- [12] 赵凤君,王立中,舒立福. 火烧对寒温带湿地生态系统的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 136-142.  
ZHAO F J, WANG L Z, SHU L F. Influences of fire on ecosystem of the wetlands in cold temperate area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(2): 136-142. (in Chinese)
- [13] 韩春兰,邵帅,王秋兵,等. 兴安落叶松林火干扰后土壤有机碳含量变化[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 3023-3033.  
HAN C L, SHAO S, WANG Q B, *et al.* The variability of soil organic carbon content in *Larix gmelinii* forests after fire disturbances[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 3023-3033. (in Chinese)
- [14] 张宇婧,吴志伟,顾先丽,等. 火烧强度和火后恢复时间对大兴安岭森林土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2455-2462.  
ZHANG Y J, WU Z W, GU X L, *et al.* Effects of fire severity and recovery time on organic carbon content of forest soil in Great Xing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2455-2462. (in Chinese)
- [15] 魏云敏. 火干扰对兴安落叶松林土壤理化性质和有机碳组分的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [16] 李红运,辛颖,赵雨森. 火烧迹地不同恢复方式土壤有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2747-2753.  
LI H Y, XIN Y, ZHAO Y S. Distribution characteristics of soil organic carbon of burned area under different restorations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2747-2753. (in Chinese)

416. (in Chinese)
- [21] 欧建德,吴志庄. 密大杉人工林树冠、根系生长和林木分级的早期密度效应[J]. 东北林业大学学报,2018,46(12):15-19.  
OU J D, WU Z Z. Early density effect on growth of crown and root, and forest classification of *Cunninghamia konishii* Plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46 (12): 15-19. (in Chinese)
- [22] 欧建德,吴志庄,康永武. 密大杉与杉木人工林的生长形质、林分分化和空间利用比较[J]. 东北林业大学学报,2018,46(7):7-11.  
OU J D, WU Z Z, KANG Y W. Comparison of growth, stand differentiation, form quality and space utilization of *Cunninghamia konishii* and *C. lanceolata* plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46 (7): 7-11. (in Chinese)
- [23] 覃阳平,张怀清,陈永富,等. 基于简单竞争指数的杉木人工林树冠形状模拟[J]. 林业科学研究,2014,27(3):363-366.  
QIN Y P, ZHANG H Q, CHEN Y F, et al. Canopy shape simulation of Chinese fir plantation based on simple competition index [J]. Forest Research, 2014, 27 (3): 363-366. (in Chinese)
- [24] 欧建德,吴志庄. 经营措施及地形因子与南方红豆杉树干关系[J]. 东北林业大学学报,2016,44(9):24-28.  
OU J D, WU Z Z. Relationship between management measures and terrain factors of *Taxus wallichiana* var. *mairei* artificial pure forest and its forking [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44 (9): 24-28. (in Chinese)
- [25] 高志雄,王新杰,李海萍,等. 福建地区杉木枝条基径最优模型[J]. 东北林业大学学报,2014,42(9):23-27.  
GAO Z X, WANG X J, LI H P, et al. An optimal model of the *Cunninghamia lanceolata* branch diameter in Fujian Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42 (9): 23-27. (in Chinese)
- [26] 刘兆刚,舒扬,李凤日. 樟子松人工林一级枝条基径和枝长模型的研究[J]. 植物研究,2008,28(2):244-248.
- [27] 王怡,汤景明,孙拥康. 青冈栎人工林树高曲线模型研究[J]. 森林工程,2021,37(1):1-5.
- [28] 姚正阳,刘建军. 西安市4种城市绿化灌木单株生物量估算模型[J]. 应用生态学报,2014,25(1):111-116.  
YAO Z Y, LIU J J. Models for biomass estimation of four shrub species planted in urban area of Xi'an city, northwest China. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (1): 111-116. (in Chinese)
- [29] 菊花,张明铁,张秋良. 大青山人工油松单木生物量模型的研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(3):60-65.  
JU H, ZHANG M T, ZHANG Q L. Study on Daqian Mountain artificial *Pinus tabulaeformis* biomass of individual tree model [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2010, 31 (3): 60-65. (in Chinese)
- [30] 关追追,赵江宁,邱权,等. 楸树人工林生长规律及其最优生长模型研究:以河南省洛宁县楸树为例[J]. 森林工程,2021,37(2):1-10.
- [31] 欧建德. 基于简单竞争指数的南方红豆杉人工林树冠形状模拟[J]. 西北林学院学报,2020,35(5):110-115.  
OU J D. Crown shape simulation of *Taxus chinensis* var. *mairei* plantation based on simple competition index [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35 (5): 110-115. (in Chinese)
- [32] 王轶夫,孙玉军. 马尾松生物量模型的对比研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(10):29-33.  
WANG Y F, SUN Y J. Comparative study on biomass models for *Pinus massoniana* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32 (10): 29-33. (in Chinese)
- [33] BIGING G S, DOBBERTIN M. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees [J]. Forest Science, 1992, 38 (3): 695-720.

(上接第145页)

- [17] 孔健健,杨健. 火烧对中国东北部兴安落叶松林土壤性质和营养元素有效性的影响[J]. 生态学报,2013,32(11):2837-2843.  
KONG J J, YANG J. Effects of fire on soil properties and nutrient availability in a dahurian larch forest in Great Xing'an Mountains of northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32 (11): 2837-2843. (in Chinese)
- [18] 胡海清,罗斯生,罗碧珍,等. 林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响[J]. 北京林业大学学报,2019,41(12):108-118.  
HU H Q, LUO S S, LUO B Z, et al. Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon and its components of *Cunninghamia lanceolata* forest in Guangdong Province, southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41 (12): 108-118. (in Chinese)
- [19] 田金龙. 内蒙古大兴安岭火烧迹地土壤碳组分研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [20] KUMARAVE L V, SANGODE S J, SIDDIAIAH N S, et al. Interrelation of magnetic susceptibility, soil color and elemental mobility in the Pliocene-Pleistocene Siwalik paleosol sequences of the NW Himalaya, India [J]. Geoderma, 2010, 154 (3/4): 267-280.
- [21] 谷会岩,金靖博,陈祥伟,等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响[J]. 自然资源学报,2010,25(7):1114-1121.  
GU H Y, JIN J B, CHEN X W, et al. Long-term effects of forest fires with different fire intensities on soil chemical properties of *Larix gmelinii* forest in the northern slope of the Greater Hinggan Mountains [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25 (7): 1114-1121. (in Chinese)
- [22] 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.