

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

刘 娜¹,齐淑艳^{1,2},陈宏伟^{1,2*},洪娇娇¹,许 晶¹

(1. 沈阳大学 生命科学与工程学院,辽宁 沈阳 110044;2. 辽宁省城市有害生物治理与生态安全重点实验室,辽宁 沈阳 110044)

摘要:大兴安岭林区是我国北方唯一现存的寒温带针叶林,在维持区域生态平衡和碳循环方面起着重要的作用。林火干扰是大兴安岭森林生态系统的常见的干扰因子之一,火后的恢复过程中森林的碳密度变化是衡量森林恢复的一个重要指标。以大兴安岭呼中林区为例,对2000—2012年的火烧迹地进行调查,采用异速生长方程计算等到乔木层碳密度,采用收获法和实验室烘干分析灌木层和草本层的碳密度。结果表明,林火干扰显著降低了森林乔木层和灌木层的碳密度,随着火后恢复时间的增加,森林乔木层和灌木层的碳密度逐渐增加;草本层碳密度呈现相反趋势,火后明显增加了草本层的碳密度,尤其是在火后初期增加尤为明显。火后恢复过程中碳密度的变化可以为林火管理和森林可持续经营提供科学的指导。

关键词:林火;碳密度;森林恢复;大兴安岭

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)05-0008-05

Temporal Changes in Forest Carbon Density after Fire Disturbance in Huzhong Forest Region of Daxing'anling Mountains

LIU Na¹, QI Shu-yan^{1,2}, CHEN Hong-wei^{1,2*}, HONG Jiao-jiao¹, XU Jing¹

(1. College of Life Science and Bioengineering, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Urban Integrated Pest Management and Ecological Security, Shenyang, Liaoning 110044, China)

Abstract: The forest region of the Great Xing'anling Mountains is the only place in which the cool temperate coniferous forest exists in China, which plays an important role in regional ecological balance and carbon cycling. Fire is one of the prevalent disturbance agents in the ecosystem of the region. The change in forest carbon density is one important indicator for characterizing forest recovery processes after fire disturbance. Taking Huzhong forest region of the Great Xing'anling Mountains as the study area, we conducted a field investigation in the burned areas of the forests which had been burned by wild land fire in the time periods of 2000—2012. The carbon density of the tree layer was calculated by using allometric-equations. The carbon density of shrub and herbaceous layers was obtained through biomass-harvesting method. The results showed that fires significantly decreased the carbon density of the tree and shrub layers. The carbon density of the tree and herbaceous layers increased gradually along forest recovery. The herbaceous layer showed an opposite trend in responding to fire disturbance compared with tree and shrub layers. Fire disturbance increased the carbon density of herbaceous layer, especially in the initial stage of forest recovery. This research would provide a theoretical guide for fire and forest management.

Key words: forest fire; carbon density; forest restoration; Daxing'anling Mountains

北方针叶林生态系统在全球碳循环中起着重要的作用,林火干扰是我国北方寒温带针叶林生态系

统重要的自然干扰因子之一^[1],尽管林火干扰是森林生态系统得以维持和持续发展的驱动力^[2],在森

收稿日期:2016-11-29 修回日期:2017-03-26

基金项目:国家自然科学基金(41201185);辽宁省自然科学基金(201602513);沈阳市科技计划(F16-158-9-00)项目。

作者简介:刘 娜,女,在读硕士,研究方向:森林生态学。E-mail:liuna_chw@126.com

* 通信作者:陈宏伟,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:森林生态学。E-mail:chwsrsss@163.com

林天然更新方面做出了卓越的贡献,但是林火对植被组成、森林演替以及和碳汇功能发挥均造成巨大的影响^[3]。大兴安岭处于我国最北方,由于地理位置因素和气象因素影响,大兴安岭是我国北方林火多发区^[4],年均森林过火面积居全国首位^[5]。林火干扰过程时刻改变森林的年龄结构、树种组成、森林更新,森林生物量以及碳碳分配格局等等^[6-7]。我国东北林区面积占全国森林总面积的30%以上,其生物量占森林总生物量的35%以上,因此北方森林生态系统在全国碳循环以及碳收支平衡方面起着举足轻重的作用^[8]。大兴安岭林区是我国北方森林的典型区域,在维持区域生态平衡以及生态效应发挥方面起着积极的重要作用,同时大兴安岭也是我国林火高发区,因此探讨林火干扰对大兴安岭地区森林碳密度的影响有重要的理论意义和现实意义。

目前,国内外许多研究机构在林火干扰对森林生物量以及碳储量影响方面开展了大量的调查研究。国外相关研究主要集中在火烧过程对碳释放的影响^[9]、森林生态系统碳储量的变化^[10]、碳分布时空格局以及碳动态变化趋势^[11]、碳地球化学循环以及碳平衡^[12]等方面。国内学者也开展了大量的相关研究,主要包括火干扰对生态系统碳储量^[13]、碳元素分布和碳化学循环^[14]的影响,同时在火干扰对森林碳汇能力与潜力^[15]、森林土壤碳储量及其空间分布格局^[16]、森林碳释放以及碳库动态的影响等方面也开展了大量的研究工作^[17],这些研究都在某种程度上直接或间接地反映了火干扰对森林碳储量以及碳空间分布的影响规律。但是森林火后恢复过程中物种组成以及年龄结构的变化,必然导致森林碳密度的变化^[18],而这方面研究相对较少。本研究在不同火后恢复时间样地内分别设置样地,同时采用未过火区作为对照样地,定量研究森林火后不同恢复时间群落尺度上碳密度的变化趋势及其影响机制,为应对全球气候变暖条件下的森林可持续经营提供科学的管理依据。

1 研究区概况

呼中林区包括呼中林业局和呼中国家自然保护区,位于我国黑龙江省大兴安岭伊勒呼里山北坡,处于呼玛河中上游,其分布范围在 $122^{\circ}39'30''-124^{\circ}21'00''E$, $51^{\circ}14'40''-52^{\circ}25'00''N$ 。研究区南北长约125 km,东西宽约115 km,总面积约为9 372.44 km²。呼中林区地处我国高纬度寒温带地区,属典型大陆性季风气候,气候寒冷湿润,冰冻期长达6个月,绝对最低温度-47.5℃。地貌类型属典型石质中低山山地,坡度平缓,绝大部分坡度低于15°,局部阳坡和半阳坡

较陡,达到35°以上,地势西南高东北低。海拔500~1 000 m,平均海拔为812 m,最高峰在南部小白山处,海拔1 404.2 m,最低处在东北部呼玛河出境处,海拔420 m^[19]。

呼中林区植被类型以西伯利亚植物区系成分为主,混有东北植物区系和蒙古植物区系成分^[20]。典型地带性植被类型为寒温带针叶林,单优势种为兴安落叶松林(*Larix gmelinii*)。主要的针叶乔木树种有兴安落叶松、云杉(*Picea koraiensis*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)以及少量分布于高海拔山地的偃松(*Pinus pumila*)。主要的阔叶乔木树种有山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、甜杨(*Populus suaveolens*)和位于河岸以及沟谷两侧的钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)。

2000—2012年火灾统计资料来自于呼中林业局森林防火指挥部,统计数据包括每次起火点的经度、隶属行政区域范围、火烧面积、起火原因、林分类型、林分年龄以及扑救信息等内容。

2 研究方法

2.1 样地设置

2013年7—8月,依据起火点记录信息在大兴安岭呼中林区过火区内设置样地。野外调查在过火区(2000—2012年火烧迹地)和未火烧区分别设置样地,样地位置如图1所示。2013年8月在火烧迹地上选取不同过火时间样地,同时以临近未火烧区作为对照样地,每个火烧样地及未火烧区各设置准样地,乔木样方大小均为20 m×20 m,同时设置4个重复样方,共计36个乔木样方。记录每样方的地

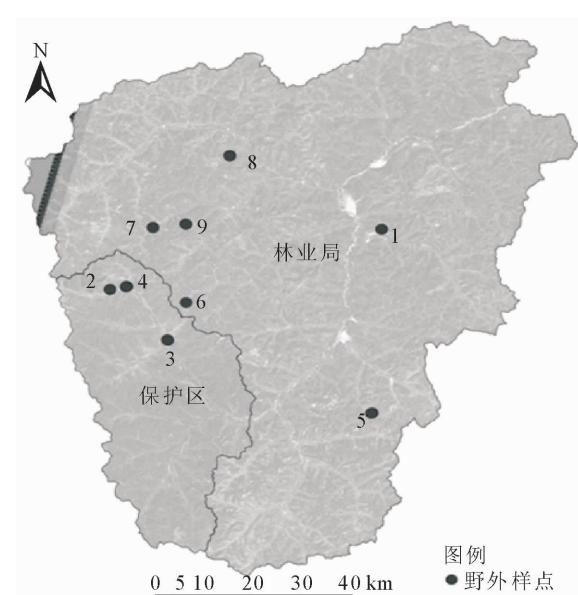


图1 研究区概况与野外调查点

Fig. 1 Study areas and sampling plots

理坐标、坡向、坡位、坡度、海拔高度、林分类型、林分年龄和火烧强度等信息,在乔木样方内设置灌木和草本样方^[21-22],样地具体位置信息见表 1。

2.2 调查方法

乔木:对样地内胸径 ≥ 5 cm 的林木进行每木检尺,测量并记录树种、胸径、树高、冠幅等信息。

灌木:在乔木样方中设置 3 个 2 m×2 m 的灌木样方,记录灌木的种类、株数、高度、地径、盖度等

相关信息,收集样方内的全部样品,在野外称量根、枝、叶鲜重,全部收集后带回实验室放入 80°C 烘箱中烘干至恒重,利用天平测定其干重。

草本:在每个灌木样方对角线上分别设置 3 个 1 m×1 m 的具有代表性的草本样方。记录所有草本植物种类、数量和盖度,全部收获样方内样品,分地上部分和地下部分在野外称量鲜重后,带回实验室放入 80°C 烘箱中烘干至恒重,利用天平测定其干重。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sampling plots

样地编号	起火时间	恢复年限/a	树木熏黑高度/m	坡位/(°)	坡向	海拔/m	植被类型
1	2012 年	1	5.8	坡下	北坡	745	兴安落叶松,混有少量白桦
2	2011 年	2	5.8	坡下	北坡	733	兴安落叶松,混有少量白桦
3	2010 年	3	6.2	坡下	北坡	722	兴安落叶松
4	2009 年	4	6.1	坡下	北坡	878	兴安落叶松,混有少量白桦
5	2008 年	5	6.2	坡下	北坡	633	兴安落叶松,混有少量白桦
6	2004 年	9	5.7	坡下	北坡	669	兴安落叶松,混有少量白桦
7	2003 年	10	5.4	坡中	北坡	657	兴安落叶松林
8	2002 年	11	5.6	坡中	北坡	766	兴安落叶松林
9	2000 年	13	6.4	坡下	北坡	721	兴安落叶松林

2.3 数据分析

乔木采用异速生长方程(表 2),分别计算乔木层各个树种干、枝、叶的生物量(表 2),各物种估算枯立木、倒木和树桩的碳密度值(F)设为 0.5,灌木和草本的碳密度值(F)设为 0.45,然后把单位面积

生物量换算成碳储量,换算公式为: $C=B\times F$,其中: C 为森林碳储量, B 为森林生物量, Q 为碳密度值,碳储量与样地面积相比得到森林生态系统单位面积的碳密度。

表 2 各树种单木生物量方程

Table 1 Single wood biomass equation for different tree species

树种	干	枝	叶	根系
兴安落叶松	$W_s=0.025(D^2H)^{0.96}$	$W_b=0.0021(D^2H)^{0.8181}$	$W_l=0.00126(D^2H)^{0.968}$	$W_r=0.0075(D^2H)^{0.9725}$
樟子松	$W_s=0.0134(D^2H)^{1.02}$	$W_b=0.0105(D^2H)^{0.7386}$	$W_l=0.181D^{1.8145}$	$W_r=0.21447(D^2H)^{0.5372}$
白桦	$W_s=0.1193(D^2H)^{0.8372}$	$W_b=0.002(D^2H)^{1.12}$	$W_l=0.000015(D^2H)^{1.47}$	$W_r=0.0100(D^2H)^{0.9209}$
山杨	$W_s=0.2286(D^2H)^{0.6938}$	$W_b=0.00247(D^2H)^{0.7378}$	$W_l=0.0108(D^2H)^{0.8181}$	$W_r=0.01553(D^2H)^{0.5951}$
蒙古栎	$W_s=0.03141(D^2H)^{0.733}$	$W_b=0.00212(D^2H)^{2.9504}$	$W_l=0.00321D^{2.4735}$	$W_r=0.0495502(D^2H)^{0.952453}$
黑桦	$W_s=0.14114(D^2H)^{0.723}$	$W_b=0.00724(D^2H)^{1.0025}$	$W_l=0.0079(D^2H)^{0.8085}$	$W_r=0.0616(D^2H)^{0.7892}$

注:D 代表胸径,H 代表树高,文献来源[23-26]。

3 结果与分析

3.1 不同火烧年限森林乔木层的碳密度变化

对比分析火后不同恢复年限森林生态系统乔木层的碳密度损失差异,结果表明随着火后恢复时间的增加碳密度呈现逐渐增加趋势。火后 1 a 时间,火烧样地内乔木层碳密度损失明显,损失量约为 41.04%。在火后 13 a 火烧样地碳密度损失为 8.01%,随着恢复时间越长,火烧样地和对照样地碳密度的差异越小(图 2)。同时保护区内地块样地的平均碳密度高于林业局的样地,主要是因为保护区长期(2、3、4 号地块)没有人为的经营活动,所以无

论在过火样地和对照样地内的碳密度均高于林业局内样地。

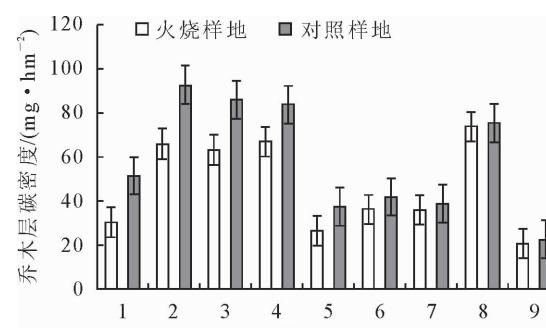


图 2 乔木层碳密度差异

Fig. 2 Carbon density of the tree layer

3.2 不同火烧年限森林灌木层的碳密度变化

对样乔木样方内的灌木层碳密度进行测定,结果表明,火烧明显的降低了林内灌木层碳密度,尤其是火后1 a 和 2 a 的灌木样方内,碳密度损失明显。火后1 a 灌木层的碳密度损失最大,高达 $6.43 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (90.04%),随着过火时间的增加,灌木层的碳密度损失逐渐的降低,而火后13 a 灌木层碳密度损失在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (1.61%)(图3)。随着火后恢复时间的增加,林下灌木逐渐的恢复,但是在调查样地内,13 a 后仍然没有到达未火烧区水平。

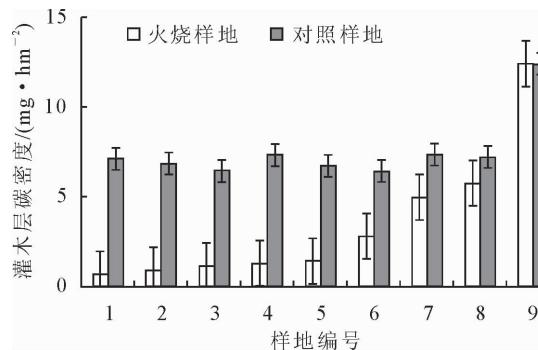


图3 灌木层碳密度差异

Fig. 3 Carbon density of the shrub layer

3.3 不同火烧年限森林草本层的碳密度变化规律

对比研究不同草本层碳密度在不同火后时间内碳密度差异,结果表明,草本层的碳储量差异较大,对比火后样地和对照样地发现,在火后1 a 和 2 a 的样地中林火干扰显著的提高了草本层的碳密度,火后1 a 内草本的碳密度增加明显,达到 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,提高了57.54%(图4)。在火后初期提高了草本层的碳密度,但是随着恢复时间的增加,火烧样地和对照样地内的草本层碳密度逐渐接近,在火后13 a 基本恢复到未火烧区水平。

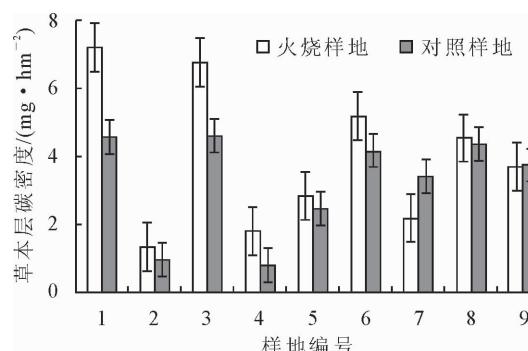


图4 草木层碳密度差异

Fig. 4 Carbon density of the herbaceous layer

4 结论与讨论

通过实地调查和实验室分析,结合异速生长方程以及统计分析方法,定量研究火后不同恢复时间

内森林生态系统碳密度变化。结果表明,随着火后恢复时间的增加,森林生态系统的地上的碳密度也产生了明显的变化。总体来说在林火干扰下,乔木层和灌木层的碳密度与未火烧相比均有所降低;随着火后恢复时间的增加,乔木层和灌木层的碳密度也逐渐增加,但是在我们调查样地内(最长13 a)还未完全恢复到火烧以前的状态。火后森林的乔木树种变化和年龄结构的差异是导致碳密度变化的主要原因。在大兴安岭呼中林区,白桦是先锋物种,在火后样地内最先出现的就是阳性树种白桦,随着森林的进展演替,白桦逐渐被耐阴性强的落叶松代替,因此森林生态系统碳密度的变化可能与物种的组成变化也有一定的关系。与此同时,在调查样地内,发现更新物种的年龄相对较小,平均树高、胸径指标都低于未过火样地,而且随着恢复时间的增加,胸径、树高、冠幅等也逐渐的增加,因此随着森林火后恢复时间的增加,森林的乔木层碳密度也随着增加。本研究的结果与胡海清^[3]研究结果相似,即火后恢复过程中乔木层和灌木层碳密度呈现逐年增加的趋势。

火后恢复过程中林下草本层的碳密度变化趋势和乔木层、灌木层不尽相同,火后初期,林火的干扰增加了草本层的碳密度,主要是由于林火的干扰,降低了乔木层物种的数量和森林的郁闭度,进而提高了地表的温度,增加了林内的光照,客观上为林下草本的生长创造了有利的条件,在火后1~3 a 碳密度增加的尤为明显,因此火后初期提高了林内草本层的碳密度;但是随着火后恢复时间的增加,乔木层和灌木层逐渐恢复,林内环境也逐渐趋于稳定,林下草本层的碳密度逐渐接近火前的状态,在调查样地内,火后11 a 和 13 a,过火与未过火样地内草本层碳密度无显著差别。

本研究对比不同火烧后恢复年限森林生态系统碳密度的变化,客观上为林火的管理和森林可持续经营提供了一定的理论基础。但是由于林区道路和起火点记录信息不完整所限,样地时间序列不是十分完整,但是基本上可以反映乔木层、灌木层以及草本层的碳密度在一定时间内的变化趋势。同时需要注意的是,森林地下生态系统的土壤中有机碳储量也是森林碳储量的主要组成部分^[28],同时土壤中生物残体和根系微分泌物等也含有较多的有机碳^[29],本项研究中没有加以考虑,在以后的工作中将会开展深入的研究。

参考文献:

- [1] WU Z W, HE H S, CHANG Y, et al. Development of customized fire behavior fuel models for boreal forests of Northeastern

- China[J]. Environmental Management, 2011, 48(6): 1148-1157.
- [2] 李明泽,王斌,范文义,等.东北林区净初级生产力及大兴安岭地区林火干扰影响的模拟研究[J].植物生态学报,2015,39(4):322-332.
- LI M Z,WANG B,FAN W Y,*et al.* Simulation of forest net primary production and the effects of fire disturbance in North-east China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39 (4): 322-332. (in Chinese)
- [3] 胡海清,魏书精,孙龙.1965-2010年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究[J].植物生态学报,2012,36(7):629-644.
- HU H Q,WEI S J,SUN L. Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36 (7): 629-644. (in Chinese)
- [4] 杨达,吴志伟,梁宇,等.火干扰对森林碳库影响的量化研究进展[J].世界林业研究,2015,28(1):37-42.
- YANG D,WU Z W,LIANG Y,*et al.* Research progress on quantifying the influence of fire disturbance on forest carbon sink[J]. World Forestry Research, 2015, 28(1): 37-42. (in Chinese)
- [5] 张骞,胡先锋,杨传凤,等.大兴安岭林区雷击火灾规律及概率分析[J].东北林业大学学报,2014,42(5):149-154.
- ZHANG Q,HU X F,YANG C F,*et al.* Lightning fire rules and probability of Daxing'an Mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(5): 149-154. (in Chinese)
- [6] 田晓瑞,王明玉,殷丽,等.大兴安岭南春季火行为特征及可燃物消耗[J].林业科学,2009,45(3):90-95.
- TIAN X R,WANG M Y,YIN L,*et al.* Fire behavior and consumption of fuel loadings in spring season in Southern Daxing'an Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(3): 90-95. (in Chinese)
- [7] ITO A. Modelling of carbon cycle and fire regime in an east Siberian larch forest[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(3): 121-139.
- [8] 王晓莉,常禹,陈宏伟,等.黑龙江省大兴安岭主要森林生态系统生物量分配特征[J].生态学杂志,2014,33(6):1437-1444.
- WANG X L,CHANG Y,CHEN H W,*et al.* Biomass allocation characteristics of the main forest ecosystems in the Great Xing'an Mountains, Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1437-1444. (in Chinese)
- [9] VASCONCELOS S S,FEARNSIDE P M,GRAA P M,*et al.* Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: estimates of area and potential carbon emissions[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 291: 199-208.
- [10] GOUGH C M,VOGEL C S,SCHMID H P,*et al.* Controls on annual forest carbon storage: lessons from the past and predictions for the future[J]. Bioscience, 2008, 58(7): 609-622.
- [11] WANG C K,BOND L B,GOWER S T. Carbon distribution of a well-and poorly-drained black spruce fire chronosequence [J]. Global Change Biology, 2003, 9(7): 1066-1079.
- [12] CHEN J,CHEN W J,LIU J,*et al.* Annual carbon balance of Canada's forests during 1895-1996[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 839-849.
- [13] 牟长城,包旭,卢慧翠,等.火干扰对大兴安岭兴安落叶松瘤囊苔草湿地生态系统碳储量的短期影响[J].林业科学,2013,49(2):8-14.
- MU C C,BAO X,LU H C,*et al.* Short-term effects of fire disturbance on carbon storage of *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands ecosystem in Daxing'an Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(2): 8-14. (in Chinese)
- [14] 吕爱峰,田汉勤,刘永强.火干扰与生态系统的碳循环[J].生态学报,2005,25(10):2734-2743.
- LV A F,TIAN H Q,LIU Y Q. State of the art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2734-2743. (in Chinese)
- [15] 高仲亮,周汝良,王军国,等.计划烧除对森林碳汇的影响分析[J].森林防火,2010(2):35-38.
- [16] 周文昌,牟长城,刘夏,等.火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松—苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响[J].生态学报,2012,32(20):6387-6395.
- ZHOU W C,MU C C,LIU X,*et al.* Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of *Betula platyphylla* and *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6387-6395. (in Chinese)
- [17] 方东明,周广胜,蒋延玲,等.基于CENTURY模型模拟火烧对大兴安岭兴安落叶松林碳动态的影响[J].应用生态学报,2012,23(9):2411-2421.
- FANG D M,ZHOU G S,JIANG Y L,*et al.* Impact of fire on carbon dynamics of *Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains of Northeast China:a simulation with CENTURY model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2411-2421. (in Chinese)
- [18] 李明军,杜明凤,喻理飞.贵州省森林植被碳储量、碳密度及其分布[J].西北林学院学报,2016,31(1):48-54.
- LI M J,DU F M,YU L F. Carbon storage and density of forest vegetation and its spatial distribution pattern in Guizhou Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 48-54. (in Chinese)
- [19] 陈宏伟,胡远满,常禹,等.呼中林区不同森林采伐方式对林火的长期影响模拟[J].北京林业大学学报,2011,33(5):13-19.
- CHEN H W,HU Y M,CHANG Y,*et al.* Simulating long-term effects of different harvesting modes on forest fire in Huzhong forest region Northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(5): 13-19. (in Chinese)
- [20] 胡远满,徐崇刚,常禹,等.空间直观景观模型LANDIS在大兴安岭呼中林区的应用[J].生态学报,2004,24(9):1846-1856.
- HU Y M,XU C G,CHANG Y,*et al.* Application of spatially explicit landscape model (LANDIS): a case researches in Huzhong area, M t. Daxing'anling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (9): 1846-1856. (in Chinese)
- [21] 刘志华,常禹,陈宏伟,等.大兴安岭呼中林区地表死可燃物载荷量空间格局[J].应用生态学报,2008,19(3):487-493.
- LIU Z H,CHANG Y,CHEN H W,*et al.* Spatial pattern of land surface dead combustible fuel load in Huzhong forest area in Great Xing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(3): 487-493. (in Chinese)

- [5] 高杰,郭子健,刘艳红.北京松山不同龄级天然油松林生物量分配格局及其影响因子[J].生态学杂志,2016,35(6):1475-1480.
- GAO J, GUO Z J, LIU Y H. Biomass allocation pattern and its influencing factors across natural Chinese pine forests of different ages in Songshan, Beijing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1475-1480. (in Chinese)
- [6] 樊后保,李燕燕,苏兵强,等.马尾松-阔叶树混交龄林生物量与生产力分配格局[J].生态学报,2006,26(8):2463-2473.
- FAN H B, LI Y Y, SU B Q, et al. Allocation pattern of biomass and productivity in the mixed uneven-aged stands of *Massons pine* and hardwood species[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2463-2473. (in Chinese)
- [7] 吕晓涛,唐建维,何有才,等.西双版纳热带季节雨林的生物量及其分派特征[J].植物生态学报,2007,31(1):11-22.
- LV X T, TANG J W, HE Y C, et al. Biomass and its allocation in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna Southwest China[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 11-22. (in Chinese)
- [8] 张俊.兴安落叶松人工林群落结构、生物量与碳贮量研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [9] 闫淑英.寒温带杜香兴安落叶松林建康评价研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [10] 周梅.大兴安岭森林水文规律研究[M].北京:中国科学技术出版社,2003.
- [11] 王飞.兴安落叶松天然林碳密度与碳平衡研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- [12] 刘志刚,马钦彦,潘向丽.兴安落叶松天然林生物量及生产力的研究[J].植物生态学报,1994,18(4):328-337.
- LIU Z G, MA Q Y, PAN X L. A study on the biomass and productivity of the natural *Larix gmelinii* forests[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1994, 18(4): 328-337. (in Chinese)
- [13] 刘世荣,柴一新,蔡体久,等.兴安落叶松人工群落生物量与净初级生产力的研究[J].东北林业大学学报,1990,18(2):40-46.
- [14] 齐光,王庆礼,王新闻,等.大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳贮量[J].应用生态学报,2011,22(2):273-279.
- QI G, WANG Q L, WANG X C, et al. Vegetation carbon storage in *Larix gmelinii* plantations in Great Xing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 273-279. (in Chinese)
- [15] 鲍春生.兴安落叶松林生态系统生产力和碳通量研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [16] 吴刚,冯宗伟.中国寒温带、温带落叶松林群落生物量的研究概述[J].东北林业大学学报,1995,23(1):95-101.
- WU G, FENG Z W. Community in the frigid-temperate zone and the temperate zone of China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(1): 95-101. (in Chinese)
- [17] 冯林,杨玉洪.兴安落叶松原始林三种林型生物产量的研究[J].林业科学,1985,21(1):86-91.
- FENG L, YANG Y H. A study on biomass and production of three types of dahurian *Larch virgin* forest[J]. Scientia Silvarum Sinicar, 1985, 21(1): 86-91. (in Chinese)
- [18] 李瑞霞,凌宁,郝俊鹏,等.林龄对侧柏人工林碳储量以及细根形态和生物量的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(2):21-27.
- LI R X, LING N, HAO J P, et al. Effects of stand ages on carbon storage, fine root morphology and biomass in *Platycladus orientalis* plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2013, 37(2): 21-27. (in Chinese)
- [19] 王立明,冯林.大兴安岭草类落叶松林可变密度生物量[C]//周晓峰.中国森林生态系统定位研究.哈尔滨:东北林业大学出版社,1994:459-465.

(上接第 12 页)

- [22] 马俊,党坤良,王连贺,等.秦岭火地塘林区红桦林生物量和蓄积量变化研究[J].西北林学院学报,2016,31(3):204-210.
- MA J, DANG K L, WANG L H, et al. Research on the changes in biomass and volume of betula albo-sinensis forest at Huoditang region[J]. Journal of Northwest Forestry university, 2016, 31(1): 48-54. (in Chinese)
- [23] 陈传国,朱俊凤.东北主要林木生物量手册[M].北京:中国林业出版社,1989.
- [24] 程云霄,李忠祥.兴安落叶松三个主要林型森林生物量的初步研究[J].内蒙古林业调查设计,1989(4):29-39.
- [25] 罗天祥.中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型[D].北京:中国科学院,1996.
- [26] 李海奎,雷渊才,曾伟生.基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J].林业科学,2011,48(5):7-12.
- LI H K, LEI Y C, ZHENG W S. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 48(5): 7-12. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] 楚旭,邸雪颖,杨光.林火对兴安落叶松根生物量及碳氮养分浓度的影响[J].北京林业大学学报,2013,35(2):10-16.
- CHU X, DI X Y, YANG G. Impacts of forest fire on root biomass, carbon and nitrogen concentration of *Larix gmelinii* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(2): 10-16. (in Chinese)