#### DOI: 10.5846/stxb201808291847

罗旭,梁宇,贺红士,黄超,张庆龙.气候变化和不同强度造林对大兴安岭主要树种林分信息和地上生物量的长期影响.生态学报,2019,39(20):

Luo X, Liang Y, He H S, Huang C, Zhang Q L. Long-term effects of climate change and different silvicultural strategies on stand information and aboveground biomass of forest major species in the Great Xing'an Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

# 气候变化和不同强度造林对大兴安岭主要树种林分信 息和地上生物量的长期影响

## 罗 旭<sup>1,\*</sup>,梁 宇<sup>2</sup>,贺红士<sup>3</sup>,黄 超<sup>2</sup>,张庆龙<sup>2</sup>

1 宁波大学地理与空间信息技术系,宁波 315211
 2 中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室,沈阳 110016
 3 东北师范大学地理科学学院,长春 130024

摘要:气候变化及相应火干扰在不同尺度上影响着我国大兴安岭地区森林动态,且在未来的影响可能继续加剧。为了提高森林 生态功能和应对气候变暖,国家在分类经营基础上全面实施抚育采伐和补植造林,效果较好,但抚育采伐对森林主要树种的长 期影响知之甚少,其在未来气候下的可持续性也有待进一步评估,同时,探讨造林措施对未来森林的影响也显得尤为重要。本 文运用森林景观模型 LANDIS PRO,模拟气候变化及火干扰、采伐和造林对大兴安岭地区主要树种的长期影响。结果表明:1) 模型初始化、短期和长期模拟结果均得到了有效验证,模拟结果与森林调查数据之间无显著性差异(P>0.05),基于火烧迹地数 据的林火干扰验证亦能够反映当前火干扰的效果,模型模拟结果的可信度较高;2)与当前气候相比,气候变暖及火干扰明显改 变了树种组成、年龄结构和地上生物量,B1 气候下研究区森林基本上以针叶树种为主要树种,A2 气候下优势树种向阔叶树转 变;3)与无采伐预案相比,当前气候下,抚育采伐使落叶松的林分密度和地上生物量分别降低了 165±94.9 株/hm<sup>2</sup>和 8.5±5.1 Mg/hm<sup>2</sup>,增加了樟子松、白桦和云杉等树木株数和地上生物量(3.3—753.4 株/hm<sup>2</sup>和 0.2—4.0 Mg/hm<sup>2</sup>),而对山杨的影响较小; B1 和 A2 气候下抚育采伐显著改变林分密度,降低景观尺度地上生物量,进而表现为不可持续;4) B1 气候下,推荐实施中低强 度造林预案(10%和 20%强度),在 A2 气候下,各强度造林均可在模拟后期增加树种地上生物量。 关键词:气候变化;造林;森林景观;大兴安岭;LANDIS

## Long-term effects of climate change and different silvicultural strategies on stand information and aboveground biomass of forest major species in the Great Xing' an Mountains

LUO Xu<sup>1,\*</sup>, LIANG Yu<sup>2</sup>, HE Hongshi<sup>3</sup>, HUANG Chao<sup>2</sup>, ZHANG Qinglong<sup>2</sup>

1 Department of Geography & Spatial Information Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2 CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China

3 School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract: Climate change and climate-induced fire effects on boreal forests are expected to continue and intensify in the future. Therefore, the Natural Forest Conservation Policy, tending, thinning, and replanting methods were implemented in 2000 and 2014, to balance ecological restoration and deal with future climate warming. These policies and tending, thinning methods have successfully improved the boreal forests over the last eight years, however, the long-term effects of tending

收稿日期:2018-08-29; 网络出版日期:2019-00-00

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(31600373)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: luoxu@nbu.edu.cn

thinning methods on boreal major species is still poorly understood. The sustainability of these methods also needs to be evaluated under future possible climates. Simultaneously, understanding and quantifying the effects of various silvicultural strategies on future boreal forests is increasing important for forest ecosystem management. The objective of this study was to investigate effects of climate change, climate-induced fire, and silvicultural strategies on forest major species in a boreal forest landscape in Northeast China. To do this, we used a forest landscape model (LANDIS PRO) to predict tree density and biomass over long time periods (up to 200 years). The results suggested that 1) the initialized landscape, the shortterm and long-term simulated results were consistent with the forest inventory data at landscape scales, and the simulated fire was comparable to the field data (measured stand density). 2) Compared to the current climate condition, climate warming and climate-induced fire have altered species compositions, age cohorts, and aboveground biomasses. Under the B1 climate scenario, the major forest composition in the study area will maintain dynamic balance (dominated coniferous trees), while converting to broadleaf forests under the A2 climate scenario. 3) Compared to the no harvesting scenario, the predicted stand density and aboveground biomass of larch species under the current climate and tending thinning scenarios were reduced by 165±94.9 trees/hm<sup>2</sup> and 8.5±5.1 Mg/hm<sup>2</sup>, respectively, and the stand density and biomass of pine, birch, and spruce increased by 3.3-753.4 trees/hm<sup>2</sup> and 0.2-4.0 Mg/hm<sup>2</sup>, respectively. Under both B1 and A2 climate scenarios, the tending thinning scenario altered the stand density significantly, and reduced the mean aboveground biomass at landscape scale, and thus it was not sustainable. 4) Under the B1 climate scenario, 10 and 20% intensities of planting were suggested, and these planting strategies could be implemented in the boreal forests to increase biomass over the longterm period and A2 climate scenario. Results from this study provide insight into effective future forest management practices and implications for improving boreal forest sustainability.

Key Words: climate change; silvicultural treatment; forest landscape; the Great Xing'an Mountains; LANDIS

近百年来,由于化石燃料使用以及土地利用变化,导致大气中 CO<sub>2</sub>等温室气体浓度明显增加,全球气候变 暖已毋庸置疑<sup>[1]</sup>。气候变化在不同尺度上对植被生产力、树种分布和组成等产生重大影响<sup>[2-4]</sup>,且这些影响 在高纬度森林生态系统中尤为明显。大兴安岭地区是我国最主要的中高纬度林区,在减缓气候变暖和维持森 林碳平衡方面起着至关重要的作用<sup>[5]</sup>。同时,研究表明,大兴安岭地区森林对自然干扰(如火干扰)与人为干 扰(如采伐)的响应较为敏感<sup>[6-7]</sup>。林火是控制北方森林演替的主导因素之一。随着温度、降水等改变以及生 长季节的延长,北方森林火干扰发生频率和火烧面积可能增加,将对森林生态系统产生显著的影响<sup>[8-10]</sup>。如 Krawchuk 等研究表明,21世纪后半叶高纬度森林火烧频率将会增加1.5—1.8 倍<sup>[11]</sup>。Liu 等预测到 2100 年我 国大兴安岭地区林火发生频率和平均火烧面积将增加 30—200%<sup>[12]</sup>。气候变化引起的火干扰变化将改变大 兴安岭地区森林结构和地上生物量,最终影响区域生态安全。

采伐是大兴安岭地区重要的人为干扰之一。在景观尺度上,采伐改变了森林地上生物量、森林树种组成和年龄结构等,并最终影响森林树种分布格局<sup>[13-15]</sup>。20世纪50年代以来,大兴安岭林区经历了高强度采伐,树种组成、年龄结构和地上生物量等变化明显,目前大部分森林主要处于中幼龄林阶段,林分组成单一<sup>[16]</sup>。为了保护森林生态功能和促进森林资源恢复,国家林业局先后实施"天然林保护工程"和全面停止商业性采伐,仅进行抚育采伐和补植造林<sup>[17]</sup>。大兴安岭地区实施"天保工程"后,森林生态产能总价值增加明显,主要树种和林龄结构得到有效恢复<sup>[18]</sup>。有研究表明,与商业性采伐相比,抚育采伐有助于提高森林地上生物量和改善森林结构<sup>[7]</sup>。目前对"天保工程"及抚育采伐的研究主要集中于阶段性实施效果评价方面,缺乏对当前气候条件下实施抚育采伐的长期定量化研究。再者,气候变化及火干扰等对森林的作用可能越发明显,而对基于当前气候和火干扰现状而制定的抚育采伐措施在未来气候下的表现知之甚少,缺乏气候变化及火干扰和抚育采伐等交互作用对森林的影响方面研究。同时,造林措施是缓解气候变化的关键因子,通过优化林分组成和结构、提高森林碳储量,吸收和固定大气中的 CO<sub>2</sub>以减缓气候变暖<sup>[16,19]</sup>。因此,探求造林措施对未来森

3

## 林景观的影响显得尤为重要。

气候变化、火干扰、采伐和造林及其交互作用对北方森林的影响是长期的、大范围的、且具有时滞性<sup>[19-21]</sup>,用传统的野外观测和生态调查方法来研究存在一定困难,特别是在考虑林火和采伐交互作用,以及评估采伐在未来气候下的可持续性等方面<sup>[22-23]</sup>。为了能够更好地量化不同强度造林对未来森林景观的影响,应用空间直观景观模型,将当前理论知识和研究成果运用到未来有关气候变化的大尺度森林景观研究中,使其成为研究气候变化、自然和人为干扰及其相互作用的有效工具<sup>[23-24]</sup>。因此,本研究拟采用森林景观模型LANDIS PRO 模拟气候变化下大兴安岭地区森林结构和地上生物量等的动态变化,以量化气候变化及火干扰、采伐和造林等对森林主要树种的长期影响。

## 1 研究区概况

研究区位于黑龙江省大兴安岭中北部地区(51°34′28″—52°25′0″ N,122°30′54″—125°35′10″ E),包括塔 河、呼中和新林3个林业局,总面积2.76×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,活立木蓄积量约1.9×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,南北长约235 km,东西宽约 200 km。该区属于典型的低山丘陵地貌,地势平缓,平均坡度约9.5°,平均海拔550 m。在寒温带大陆性季风 气候作用下,冬季寒冷漫长,夏季凉爽短暂,季节温差较大,年平均气温在-4.3℃—2.4℃之间,年降水量约 463—550 mm,主要集中在7、8月份。本区内土壤以棕色针叶林土最具代表性。本区地带性植被为寒温带针 叶林。主要树种包括落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris var. mongolica*)、 山杨(*Populus davidiana*)、云杉(*Picea koraiensis*)、偃松(*Pinus pumila*)、钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)和甜杨 (*Populus suaveolens*)。落叶松是单优势树种;白桦为先锋树种,可在火烧迹地上迅速定植生长;樟子松一般分 布在海拔300—900 m的阳坡上部范围内;山杨对热量的要求较高,仅在低海拔区域有所分布;云杉主要分为 红皮云杉和鱼鳞云杉,现均为保护树种;偃松矮曲林多分布于海拔1000 m 以上的山地;甜杨和钻天柳常成带 状分布于河谷地带。

#### 2 研究方法

### 2.1 模型选择

空间直观景观模型 LANDIS 主要用于模拟大时空尺度上森林自然更新、种子传播、自然干扰(如林火)和 人为干扰(如采伐)等过程的森林景观模型<sup>[25]</sup>。LANDIS 模型基于栅格数据结构,将整个景观看成大小相同 的一系列像元组成的格网,记录每一个像元中树种种类、株数和年龄信息,并根据树种生物属性及相关生长特 性,模拟森林演替及干扰过程。由于演替模块引入林分密度概念,模型可设置具体树种异速生长方程,并输出 树种地上生物量;同时,直接使用森林样点调查数据来完成模型初始化、校正和验证工作,增强了模型对森林 景观模拟的真实性<sup>[26]</sup>。

在林火模块中,对林火的模拟主要包含3个方面:林火发生的次数、时间和地点;林火从起火点蔓延至景观上其他地方;过火像元内各树种死亡的株数和龄级等。在采伐模块中,首先将模拟景观划分为不同的管理区,其次在各管理区内划分最小采伐和造林单元(林相图小班);管理区为具体管理方案提供作业范围,林相图小班单元为采伐和造林事件提供具体发生边界和作业对象。关于 LANDIS PRO 模型森林采伐和造林的介绍可参看 Fraser 等<sup>[27]</sup>。

#### 2.2 模型初始化

LANDIS 模型初始化需输入空间参数(GIS 图层)和非空间参数(DAT 文本)。空间参数主要包括树种组成图、立地类型图、火干扰机制图、管理区图等。树种组成图为栅格形式的 GIS 图层,每一个像元内均记录着各树种株数和龄级信息。研究区树种组成图主要来源于 2000s 林相图数据、森林调查数据和野外样点调查数据。由于空间异质性,LANDIS 模型将整个研究区划分为若干个相对均质的生态区,每个生态区内针对某一具体树种设有相同的树种生长和萌发概率。本研究基于土地利用数据、地形图、TM 遥感影像、DEM 数字高程

和土壤类型图等生成立地类型图,其中有效立地类型4类(阶地、阳坡、阴坡和亚高山区),无效立地类型2类 (水域和非林地),模型不模拟无效立地类型上的景观变化(树种只能在有效立地类型上生长和萌发,在无效 立地类型上则不能生长和萌发)。为了降低计算负荷,所有空间图层均重采样为90m×90m空间分辨率。

非空间参数包括树种生物学属性、树木生长曲线、树种建群概率、火干扰和采伐参数等。本文拟选取研究 区内5个主要树种进行模拟,树种生物学属性获取途径包括查阅相关发表文献<sup>[28-30]</sup>、咨询有关专家和当地林 业工作人员以及多次野外调查(表1)。树木生长曲线是模拟各树种在寿命范围内生长过程的主要参数。在 林相图属性数据库的基础上建立年龄—胸径数学模型,结合野外使用树木生长锥获取的标准木树芯数据,获 得树种的生长曲线。树种建群概率是模型确定各树种在不同立地类型上生长和萌发概率的重要参数,其值在 0—1之间,数值越大表示在该立地类型上生长和萌发的可能性越高,LANDIS 模型通过树种建群概率的变化 来间接反映气候变化对各树种的长期影响。现行气候条件下树种建群概率主要参考前人发表关于本区的文 献(表2)。关于气候变暖,本文选取 B1(低人口密度和较高处理技术水平下低 CO<sub>2</sub>排放浓度,PCM 大气环流 模式预测年均气温增加2.34℃和年降水增加约16%)和A2(高人口密度和较低处理技术水平下高 CO<sub>2</sub>排放浓 度,UKMO-HadCM3 大气环流模式预测年均气温增加5℃和年降水量增加约35%)两种未来气候情景,且该两 种气候情景下温度和降水在 2015—2100 年内呈线性上升趋势,2100—2200 年气候将稳定在 2100 年水平。参 考已有研究<sup>[30-31]</sup>,利用 LINKAGES 模型估算上述两种气候情景下的树种建群概率。

树种 Species	寿命 Longevity/a	成熟年齢 Maturity age/a	耐阴性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	有效种 子传播距离 Effective seeding distance/m	最大平 均胸径 Maximum mean diameter/cm	最大林 分密度 Maximum stand density/ (株/hm <sup>2</sup> )	潜在种子 萌发数 Potential germination seeds
落叶松 Larix gmelinii	300	20	2	4	50	55	600	10
白桦 Betula platyphylla	150	15	1	3	-1	30	690	30
樟子松 Pinus sylvestris	250	25	2	3	100	60	560	20
云杉 Picea koraiensis	300	30	4	1	100	60	520	10
山杨 Populus davidiana	120	10	1	2	-1	50	680	30

表 1 研究区主要林冠树种生物学属性 Table 1 Species vital biological attributes for canopy species in the study area

耐阴性、耐火性:5表示耐受性最强;有效种子传播距离为-1表无限距离

- 衣 2
-------

Table 2 Par	ameters for fire dis	turbance and SEPs	by each species for	the major	and types u	under currer	nt climate cor	nditions
生态区	面积比例	平均火烧 轮回期	平均火烧面积 Moon fire		Species esta	树种建群机 blishment pro	既率 obabilities(Sl	EP)
Eco-region	occupied/%	Mean fire	size/hm <sup>2</sup>	落叶松	白桦	樟子松	云杉	山杨
	1	return interval/a		Larch	Birch	Pine	Spruce	Aspen
阳坡 Southern slope	38	150	200	0.35	0.35	0.35	0.005	0.03
阴坡 Northern slope	41.8	160	210	0.4	0.15	0.01	0.03	0.005
亚高山 Subalpine	6.7	140	238	0.2	0.07	0.01	0	0.02
阶地 Terrace	11.4	500	90	0.2	0.03	0.05	0.05	0.07
其他 Others	2.1	1500	0	0	0	0	0	0

林火参数主要包括火点燃概率、火烧轮回期、平均火烧面积等。当前气候条件下林火参数来源于 1965—2005 年的大兴安岭火烧数据。研究区内 40 年间共发生火灾 436 次,森林过火面积达 5.2×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>,占大兴安 岭该时期总过火面积的 14.9%(表 2)。Liu 等研究表明,在 B1 情景下,大兴安岭地区林火发生概率和平均过 火面积增加 30%,而在 A2 情景下增加 200%<sup>[12]</sup>。本文按照该研究成果设置未来气候下火干扰参数。火干扰 机制图来源于立地类型图。

采伐模块参数主要来源于研究区林业局森林经营管理方案。从林相图中提取相关管理区:禁伐区 (34%)、限伐区(40.8%)和商品林区(25.2%)。按照全面停伐要求,只进行抚育采伐(疏伐),限伐区平均采伐 强度为每5年抚育采伐小班蓄积量的3%,商品林的平均采伐强度为每5年抚育采伐小班蓄积量的5%。禁伐 区不实施采伐措施。抚育采伐的树种为白桦、山杨和兴安落叶松,其他树种受到保护禁止采伐。按照现行管 理方式,以林相图小斑为最小采伐作业单元进行抚育采伐。

### 2.3 预案设计

为了探讨气候变化、采伐和造林等对森林景观的影响,将火干扰作为背景预案考虑(即现行气候+当前火 干扰预案、B1 气候+火干扰增加 30%预案和 A2 气候+火干扰增加 200%预案)(表 3)。采伐参数设置为抚育 采伐,即在作业小班内按照树木胸径大小排序,按从小到大顺序进行抚育采伐;按照当前管理政策要求,抚育 采伐树种为白桦、落叶松和山杨,其他树种全部保留(表 4)。造林方面,为了促进研究区森林演替,在当前本 区实施的造林措施基础上(3300 株/hm<sup>2</sup>,5 年成活率约 60%—70%),结合择伐阔叶树种的同时按照造林密度 梯度上升方式(10%、20%、30%、40%和 50%造林密度)设置相关造林措施(表 5)。

Table 3         Scenarios of simulating for climate change and fires in the study area								
气候情景 Climate scenario	模拟预案 Simulation preparedness	描述 Description						
当前气候条件 Current climate	CF0	现行气候下,火干扰不变						
B1 气候情景 B1 scenario	B1F1	低 CO <sub>2</sub> 排放下气候变暖,火干扰增加 30%						
A2 气候情景 A2 scenario	A2F2	高 CO <sub>2</sub> 排放下气候变暖,火干扰增加 200%						

## 表 3 研究区气候变化和林火模拟预案

表 4 抚育采伐预案参数									
Table 4   Parameters for thinning scenarios									
管理区 Management area	面积 Area occupied/%	采伐方式 Harvest type	采伐树种 Harvest species	采伐比例 Proportion treated	采伐间隔 Harvest interval/a				
禁伐区 Harvest banned	34	_	—	—	_				
限伐区 Harvest restricted	40.8	择伐(小树)	白桦、落叶松、山杨	3%	5				
商品林区 Harvest permitted	25.2	择伐(小树)	白桦、落叶松、山杨	5%	5				

主星	<b>研究区区出现出社社协会出现</b>
ৰ মহ	

Table 5	Sconarios	of	horvocting	and	nlanting	in	the	etudy	araa
Table 5	Scenarios	01	narvesung	anu	planung	ш	une	study	area

档扣预案	描述 Description					
Simulation preparedness	采伐树种类型	树种造林密度				
1 1	Harvest for species	Planting intensity of species				
НОРО	无采伐	无种植树种				
H1P0(现行抚育伐)	采伐白桦、山杨、落叶松	无种植树种				
H2P1	采伐白桦、山杨	按 10% 强度种植针叶树种				
H2P2	采伐白桦、山杨	按 20%强度种植针叶树种				
H2P3	采伐白桦、山杨	按 30%强度种植针叶树种				
H2P4	采伐白桦、山杨	按 40% 强度种植针叶树种				
H2P5	采伐白桦、山杨	按 50%强度种植针叶树种				

## 2.4 数据分析

采用林分密度、年龄组成和地上生物量等指标来量化气候变化、采伐与造林等对森林景观的影响。以5 年为模拟步长,模拟2000—2200年的森林景观的变化,分析气候变化及采伐和造林等对各主要树种的影响。 调整随机种子数重复模拟各预案5次,统计均值,以减小模型模拟结果误差。年龄组成按照演替阶段划分为 幼龄林(1—40年)、中龄林(41—100年)、近熟林(101—140年)、成熟林(141—180年)和老龄林(>180年)5 个阶段。采用单因素方差分析方法来验证背景预案、气候变化及相关林火预案和抚育采伐间的显著性差异。 运用多重比较的方法(LSD法,*a*=0.05)进行气候变化及相关火干扰和抚育采伐预案在0—50(Ⅰ)、50—100 (Ⅱ)、100—150(Ⅲ)和150—200年(Ⅳ)4个阶段的显著差异分析。使用 SPSS 软件进行相关数据分析。 2.5 模型验证

本文模型验证拟在初始化验证和模拟结果验证两个方面进行。模型初始化验证:随机选取 70%的森林 调查数据(2000s)进行森林景观的初始化,调整树木生长曲线并重复运行模型,直至模拟的初始化景观与余 下 30%森林调查数据之间差异不显著。模拟结果校验:将已通过初始化验证的模型不断调整潜在种子萌发 数并重复模拟 10 年(至 2010 年),直至模拟的林分密度和 2010s 森林调查数据相吻合。

林火的验证主要侧重于火烧斑块内树种自然更新方面。首先,将现行预案(CF0)模拟 200 年,在结果输 出图中随机选择 40 场低强度林火(25 年内未再次发生林火,选择时避免火烧迹地和采伐迹地)。统计火后 5、10、15、20 年和 25 年的火场内树种类型和株数信息。本研究于 2010 年和 2011 年的 7—8 月在研究区内调 查了 40 场林火,具体火烧时间为 1985s、1990s、1995s、2000s 和 2005s,每个时间点选取 8 个样点(每个样点选 取 5 个大小为 10 m × 10 m 的调查样方),记录样方内乔木的类型、胸径(植株>1cm)等信息。比较野外调查 数据和模型模拟数据以验证林火干扰效果。为了提高模型长期模拟结果的可信度,本文采用空间替代时间的 方法,将模拟 150—200 年的树种组成与呼中自然保护区内目前的树种组成进行比较,以验证模拟结果的可靠 性。呼中自然保护区内森林基本上处于老龄林阶段,代表了大兴安岭森林未受干扰前的状况。

### 3 结果分析

## 3.1 模拟结果验证

结果表明,初始化 2000 年的林分密度和年龄组成与 2000 年的森林调查数据之间较为吻合(配对 T 检验, 林分密度:T=0.644, df=4, P=0.554;年龄组成:T=0.971, df=4, P=0.387),模拟的 2000 年森林景观与森林 调查数据之间无显著性差异(P>0.05)。模拟的 2010 年森林景观与真实的森林景观吻合度较高(配对 T 检 验,林分密度:T=-1.314, df=4, P=0.369; 年龄组成:T=-0.784, df=4, P=0.477),模拟数据与森林调查数 据之间差异不显著(P>0.05)(图 1)。



图 1 景观尺度 2000 年与 2010 年各树种林分密度和森林年龄结构实测值和模拟值比较

Fig.1 Landscape scale stand density by species (a) and different age cohorts (b) for the inventory data and simulations at year 2000 and 2010

火干扰模拟结果表明,不同火烧时期后的模拟结果基本上处在观测值范围内,且火烧迹地调查数据和火 干扰模拟结果在 25 年内变化趋势基本一致(图 2)。火后针叶树种林分密度在初始 15 年内表现为增加趋势, 然后经过 25 年后林分密度降至最低。从曲线总体变化趋势看,针叶树种林分密度变化较为平缓(图 2a),阔 叶树种林分密度则变化明显(图 2b)。火干扰释放一定生长空间,为白桦和山杨等先锋树种大量定植提供基本环境,使其能够达到较大林分密度值,后期群落竞争导致自稀疏出现林分密度降低的趋势。

利用呼中自然保护区 2010 年调查的树种组成数据对 LANDIS 模型进行长期模拟结果进行验证。当前气候和火干扰下,模拟 150—200 年后大多数树种分布比例均值与呼中自然保护区的实地调查数据基本吻合,只有落叶松和樟子松变化范围较大,而模拟的山杨分布均值低于保护区的分布比例(表 6)。





Fig.2 Changes in simulated stand density of coniferous (a) and broadleaf (b) in burned areas in relation to post-fire year

树种	自然保护区 Natural reserve		研究区内 The study area	
Species	实测数据 Observed data/%	初始值 Initial value/%	变化范围(150—200年) Range (year 150—200)	均值(150—200 年) Mean (year 150—200)
	53.4	46.9	48.2—59.5	51.7
白桦 Betula platyphylla	39.7	42.4	38.3—43.9	40.1
樟子松 Pinus sylvestris var. mongolica	2.3	4.2	3.1—3.7	3.4
云杉 Picea koraiensis	2.1	1.4	2.5-2.9	2.7
山杨 Populus davidiana	2.5	5.1	1.8—2.4	2.1

表 6 现行气候条件下研究区森林组成模拟结果与自然保护区的实测值比较 Table 6 Comparison of forest composition in the study area under current climate to observed data of natural reserve at year 2010

## 3.2 气候变化及火干扰对森林主要树种的影响

## 3.2.1 气候变化及火干扰对森林树种组成的影响

模拟结果表明,A2F2 预案的落叶松株数比例下降最为明显(图3)。在模拟前150年内,各预案下白桦株数比例最大。樟子松和云杉株数比例表现为不同程度的增加(增幅:B1F1>CF0>A2F2)。在CF0和B1F1预案下,山杨的株数比例逐渐降低,但在A2F2 预案下表现为明显增加,模拟后期已成为该区最主要的树种(图3)。

与 CF0 预案相比,B1F1 预案下幼龄林林分密度稍低并有下降趋势,中龄林基本上保持不变,而近熟林、 成熟林和老龄林树种株数呈增加趋势。在 A2F2 预案下,幼龄林波动明显且逐渐增加,而中龄林、近熟林、成 熟林和老龄林呈先增加后降低的趋势(图 3)。

## 3.2.2 气候变化及火干扰对森林地上生物量的影响

结果表明,气候变化对各树种地上生物量影响较为明显(图4)。当前气候下,落叶松地上生物量在第 140年达到最大值(38.78 Mg/hm<sup>2</sup>),其后逐渐降低,地上生物量大小排序为:B1F1>CF0>A2F2(图4)。在CF0 和 B1F1 预案下,樟子松和云杉地上生物量变化趋势相似;但在 A2F2 预案下,落叶松表现为降低趋势,樟子松 和云杉则呈缓慢增加趋势(图4)。不同气候对樟子松和云杉在初始 25 年内的作用不明显,表明气候变化对 樟子松和云杉的影响存在时滞性。



图 3 现行气候和气候变化预案下森林树种组成和年龄结构动态变化

模拟时间 Simulation year/a

Fig.3 Changes of predicted density and species composition at landscape scale under current climate and climate change scenarios





Fig.4 Changes in aboveground biomass of all trees species under different climate scenarios

http://www.ecologica.cn

白桦对各气候预案的响应较为复杂,其生物量在初始的 50 年内差别较小。与 CF0 预案相比,B1F1 预案的山杨地上生物量增量较小,而 A2F2 预案下却增加明显(图 4)。在景观尺度上,B1F1 预案和 CF0 预案的地上生物量变化趋势基本相似,与 A2F2 预案的曲线变化趋势差异明显(图 4)。

### 3.3 抚育采伐对森林主要树种的影响

3.3.1 当前气候下抚育采伐对森林主要树种的影响

模拟预案 CF0H0P0 和 CF0H1P0 下各树种单因素方差分析表明,抚育采伐对模拟树种林分密度的影响显 著(图 5, P<0.05)。抚育采伐对落叶松的林分密度在 0—50 年内影响不显著,而在 50—100、100—150 和 150—200 年内均显著降低(P<0.05),说明抚育采伐对落叶松株数的影响存在滞后性(图 5a, c, e, g)。抚育 采伐显著增加了樟子松和云杉树种株数。山杨树种的林分密度相对较低,图 5 中无法显示。同时,在该两种 预案下,抚育采伐对不同树种地上生物量影响显著(图 5)。抚育采伐在整个模拟时期内显著降低了落叶松地 上生物量(P<0.05)。除 0—50 年外,抚育采伐显著增加了白桦地上生物量。樟子松和云杉地上生物量在整 个模拟阶段均呈现不同程度的增加。总体而言,抚育采伐有利于白桦、樟子松和云杉的生长,减少了落叶松的 分布比例,且只在模拟的后 100 年对山杨树种有积极作用。

3.3.2 气候变化下抚育采伐对森林主要树种的影响

多重比较结果表明,在 A2 气候及无采伐预案下落叶松林分密度从第 I 阶段的 645.54 株/hm<sup>2</sup>降至第Ⅳ阶 段的 132.51 株/hm<sup>2</sup>,降幅显著(表7,*P*<0.05)。与无采伐预案相比,在 B1 和 A2 气候下,抚育采伐显著降低了 落叶松的林分密度,却显著增加了樟子松和云杉株数。

在 B1 气候下,抚育采伐显著增加了白桦和山杨的林分密度(表 7, P<0.05)。在 A2 气候及抚育采伐下,山杨林分密度增加明显,表现为从 100.08 增至 1583.54 株/hm<sup>2</sup>。说明山杨比较适合在 A2 气候下定植生长。

树种 气候情景			无采伐 N	o harvesting		抚育采伐 Thinning				
Species	scenario	Ι	П	Ш	IV	Ι	П	Ш	IV	
落叶松	B1	753.18a	853.37b	679.43a	481.47c	732.16a	638.12b*	437.32c*	283.65d *	
Larch	A2	645.54a	441.08b	247.42c	132.51d	632.14a	$339.93\mathrm{b}^*$	$158.97c^{*}$	74.77d*	
白桦	B1	2222.98a	$1721.64 \mathrm{b}$	1983.68ab	$1808.46 \mathrm{bc}$	2692.34a	2750.15a*	2593.71a*	$2226.35 \mathrm{b}^{*}$	
Birch	A2	4137.03a	4649.13a	3270.85b	1139.92c	4496.73a	$5412.32\mathrm{b}^{*}$	3412.14c	989.58d	
樟子松	B1	65.67a	$170.47\mathrm{b}$	257.36c	354.50d	92.85a*	$252.84\mathrm{b}^*$	$412.38c^{*}$	570.20d *	
Pine	A2	49.35a	81.33b	88.26b	86.14b	63.30a*	$111.60b^{*}$	$135.17 c^{*}$	137.83c *	
云杉	B1	15.84a	37.79b	99.13c	123.60d	19.02a*	48.02b	103.14c	$141.04d^{*}$	
Spruce	A2	13.02a	15.22a	26.56b	22.97c	14.94a*	$19.79 { m b}^{*}$	$29.05 c^{*}$	25.55d *	
山杨	B1	49.95a	27.77b	27.35b	23.37b	54.72a	$44.73\mathrm{b}^{*}$	54.93a*	$60.49\mathrm{c}^{\;*}$	
Aspen	A2	90.93a	219.32b	739.80c	1274.38d	100.08a	283.30b	949.64c	1583.54d*	

表 7 不同模拟阶段无采伐与抚育采伐预案下主要树种林分密度动态变化/(株/hm<sup>2</sup>) Table 7 Species stand density dynamics of no harvesting and thinning scenarios for 4 simulation periods

不同字母表示各模拟阶段之间差异显著,\*表示抚育采伐与无采伐预案比较差异显著;I:0—50年,Ⅱ:50—100年,Ⅲ:100—150年,Ⅳ: 150—200年

与无采伐预案相比,B1 气候下抚育采伐降低了 15.48 Mg/hm<sup>2</sup>的落叶松地上生物量,而增加了白桦、樟子松、云杉和山杨的地上生物量,增量分别为 2.06、5.56、0.42 和 3.52 Mg/hm<sup>2</sup>。樟子松的增幅最大,表明抚育采伐有利于樟子松树种的保留。

在 A2 气候下,抚育采伐使落叶松和白桦的地上生物量表现为一定程度的降低,而樟子松、云杉和山杨的 生物量呈增加趋势。不论是否实施抚育采伐,气候变化下的山杨地上生物量均表现为明显增加,增幅分别为 59.81 和 66.35 Mg/hm<sup>2</sup>(图 6)。

3.4 不同强度造林对主要树种地上生物量的影响

结果表明,在 B1 气候下,不同强度造林均促进了落叶松地上生物量的增加;而在 A2 气候下,各强度造林





下的落叶松地上生物量呈下降趋势(图7)。与背景预案相比,在 B1 气候及各强度造林下,樟子松和云杉呈增加趋势,且云杉增幅高于樟子松。在 A2 气候下,各强度造林预案均降低了樟子松地上生物量;不同强度造林 对云杉地上生物量影响比樟子松复杂,表现为在正负值之间波动(图7)。

在各气候预案下, 白桦地上生物量呈下降趋势, 且在 A2 气候下降幅最大, 白桦分布范围减少。在 B1 气候及造林作用下, 山杨地上生物量在模拟的第 80 年后明显增加; 而 A2 气候下, 山杨地上生物量增幅达 71.71 Mg/hm<sup>2</sup>, 且各造林预案对山杨地上生物量影响不明显。在 B1 气候下, 除 B1F1H2P1 和 B1F1H2P2 外, 各造林预案下景观水平地上生物量呈下降趋势; 在 A2 气候下, 各强度造林在模拟的 80 年内降低了景观水平地上生物量均值, 但模拟的第 120 年后, 景观水平地上生物量均增幅明显, 增幅在 8.30—12.59 Mg/hm<sup>2</sup>之间。

## 4 结论与讨论

森林景观模型在进行大时空尺度上森林演替、自然和人为干扰作用的研究时具有一定的优势,而模型预



图 6 景观尺度不同气候变化背景下无采伐和抚育采伐预案下各树种地上生物量动态变化

Fig.6 Changes in aboveground biomass density at landscape scale in relation to simulation year under climate change scenario (by species for no harvesting and thinning scenarios)

测的结果是否被研究者们所接受,其在很大程度上取决于模型结果验证<sup>[32]</sup>。以往研究多通过将自身模拟结果与前人发表成果、局部样地数据、其他独立建模的预测结果以及一定时间段某一具体地点的经验性数据作比较分析来实现模型验证<sup>[31, 33-34]</sup>,而同时基于林分密度和树种组成等定量信息对模型的初始化、短期和长期 模拟结果进行验证的研究并不多见。本文还将模拟的火烧斑块数据与火烧迹地调查数据进行对比以验证火 干扰模拟效果,这在以往关于林火验证中很少涉及。结果表明,本研究模拟结果与森林调查数据之间较为吻 合,模型模拟结果的可信度较高(图1、2,表6)。

研究表明,气候变化及火干扰将会改变森林树种组成和地上生物量。这与延晓冬等<sup>[35]</sup>和程肖侠等<sup>[36]</sup>研 究结果基本相似。延晓冬等[35]表明,气候变暖下落叶阔叶树种蒙古栎取代大兴安岭地区的落叶松成为主要 树种。程肖侠等[36]研究表明,气候变暖不利于落叶松林生长,主要针叶树种生物量下降,阔叶树生物量增加。 而本文结果表明,在 B1 气候及林火增加 30%下,落叶松还是大兴安岭地区的优势树种,且针叶树种樟子松和 云杉地上生物量比例也有所提高;在 A2 气候及林火增加 200%下,针叶树比例下降明显,阔叶树种山杨成为 本区的主要树种(其地上生物量比例达70%)。产生该差异的原因可能是选用气候情景预测的增温和降水程 度不同。其次,延晓冬等[35]森林调查数据获取的时间较早(19世纪50年代),其后该区又经过高强度不合理 采伐,使得研究区蒙古栎分布少,缺少传播种源;随着演替的进行,山杨成为本区的主要树种,是因为山杨具有 阳性树种特征,且气候变暖增加了该树种在大兴安岭地区的竞争能力,比较适应在气候变暖条件下定植和生 长。程肖侠等<sup>[36]</sup>模拟气候变暖下大兴安岭地区地上生物量为 80—122 Mg/hm<sup>2</sup>,延晓冬等<sup>[35]</sup>研究表明,气候 变暖情景下 200 年后大兴安岭地区林分生物量保持 120 Mg/hm<sup>2</sup>水平,而本文得到研究区气候变暖及林火作 用下的景观水平森林地上生物量为 74.9—114.7 Mg/hm<sup>2</sup>,比上述研究结果稍低。造成该现象的原因可能是森 林景观模型 LANDIS 通过各立地类型上树种建群概率的变化间接反映气候变化对景观上各树种的影响,而林 窗模型将气候变暖视为一种干扰,强化了增温和降水对森林的直接作用;其次,气候变暖改变火干扰的频率和 强度(并非倍数关系),且林火干扰是大时空尺度上的森林景观过程,林窗模型无法模拟长期持续性火干扰和 森林景观之间的相互作用。此外,气候变暖及火干扰和抚育采伐等对部分树种的影响具有滞后性,与之前研



图 7 不同树种地上生物量变化量(不同强度造林—参考预案)的动态变化

Fig.7 Changes in aboveground biomasses (different planting intensity-base scenario) in relation to simulation year by all simulated species

究结果基本一致<sup>[21,30]</sup>。

结果表明,抚育采伐显著降低了落叶松的林分密度和地上生物量,但增加了其他树种的林分密度和地上 生物量数值(图5,P<0.05)。这一结果与前期在本区的研究结论相似<sup>[37]</sup>,但也存在一定差别。有研究表明, 抚育采伐可增加林木生长空间,促进大兴安岭地区树木枝干生物量的增加<sup>[7]</sup>。而本文中抚育采伐增加了白 桦、樟子松、云杉和山杨等树种的林分密度和地上生物量,却不包括落叶松树种,造成该差异的原因可能是本 研究考虑了景观水平火干扰的额外作用。

在 B1 气候下,不同强度造林在一定程度上增加了落叶松的地上生物量。这主要是由于 B1 气候的增温 幅度暂未达到落叶松的耐受限度,且处于中龄林阶段的落叶松林分布较广;地表植被经历中低强度林火干扰 后,大部分中小径木的落叶松植株得以存活,同时过火迹地郁闭度降低,有利于落叶松树种更新;再者,不同强 度造林措施在一定程度上增加了落叶松的幼苗密度。而在 A2 气候下,兴安落叶松地上生物量明显降低,且 各强度造林对其长期影响较小,这与前人研究结果基本一致<sup>[30]</sup>。当前气候条件下,兴安落叶松受自身生物生 态学特征、太阳辐射以及有效水分等因子影响,其倾向分布于相对较冷的阴坡土地类型,而在 A2 气候下,较 大幅度增温和降水改变了兴安落叶松的生长环境和有效水分,不利于其定植和生长<sup>[38]</sup>;再者,经历高强度林 火干扰后,火烧迹地上林冠较为稀疏,落叶松分布减少,造成地上生物量下降明显<sup>[39]</sup>;虽然有实施不同强度造 林预案,但受气候增温影响,种植的落叶松存活率较低,对景观水平落叶松地上生物量的作用不明显。模拟结 果表明,樟子松地上生物量受气候变化及相应林火增加和不同强度造林的影响较为明显。樟子松为阳性树 种,耐阴系数较低,喜光性强,较为适宜在山脊和阳坡上定植生长<sup>[40]</sup>,因此 B1 气候在一定程度上有助于樟子 松地上生物量增加;但当气候增温超过一定阈值时(如 A2 气候),可能给樟子松树种带来不利影响,进而降低 其地上生物量。综上所述,A2 气候及相应林火干扰预案已不适合针叶树种的生长,即使加大针叶树种造林的 密度,也无法改变本区森林优势树种向阔叶树转变的趋势。

本研究表明,在未来气候变暖下,抚育采伐和造林措施均能显著改变北方森林生态系统,尤其对森林结构 和地上生物量等特征因子产生较大影响,而森林结构和地上生物量在未来森林碳库方面至关重要<sup>[14]</sup>。通过 人为干预积极改变北方森林的状态,将有助于北方森林适应未来日趋变暖的气候,进而在满足其自身可持续 发展的同时,保证生态功能的持续发挥。本文中主要栽植的树种为落叶松和樟子松等,并没有模拟西伯利亚 红松的栽植。近年来,本研究区林业局逐步实施西伯利亚红松引种造林试验,未来有可能大面积栽植,但其属 于引进树种,在栽种后对本区未来气候变暖的适应性,以及对本地生物群落的影响还有待进一步评估。

结论:1)基于森林调查数据的模型初始化过程、短期模拟和长期模拟结果都得到了有效的验证,模型能够很好的代表研究区的真实景观;同时,基于火烧迹地调查数据的火干扰状况验证能够反映当前火干扰效果; 2)气候变化及相应林火增加预案显著改变了研究区森林树种组成、年龄结构和地上生物量;3)在当前气候及 未来气候下,抚育采伐仅降低了落叶松的树种比例,增加了其他树种的分布比例,因此,可适当改变现行抚育 采伐内容(仅择伐阔叶树种),进而提高抚育采伐的可持续性;4)在 B1 气候及林火干扰增加 30%预案下,推荐 实施中低强度的造林措施(10%和 20%的造林密度);在 A2 及火干扰增加 200%预案下,实施各强度造林预案 均可在模拟后期提高地上生物量。

## 参考文献(References):

- [1] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, Amelung W, Lobe I, Pell A, Riha S, Ngoze S, Verchot L, Mbugua D, Skjemstad J, Schäfer T. Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. Global Change Biology, 2007, 13(2): 511-530.
- [2] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [3] Johnstone J F, Hollingsworth T N, Chapin III F S, Mack M C. Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest. Global Change Biology, 2010, 16(4): 1281-1295.

- [5] Wang C K, Gower S T, Wang Y H, Zhao H X, Yan P, Bond-Lamberty B P. The influence of fire on carbon distribution and net primary production of boreal Larix gmelinii forests in north-eastern China. Global Change Biology, 2001, 7(6): 719-730.
- [6] Chang Y, He H S, Hu Y M, Bu R C, Li X Z. Historic and current fire regimes in the Great Xing'an Mountains, northeastern China: Implications for long-term forest management. Forest Ecology and Management, 2008, 254(3): 445-453.
- [7] 徐文茹,贺红士,罗旭,黄超,唐志强,刘凯,丛毓,谷晓楠,宗盛伟,杜海波.停止商业性采伐对大兴安岭森林结构与地上生物量的影响.生态学报,2018,38(4):1203-1215.
- [8] Soja A J, Tchebakova N M, French N H F, Flannigan M D, Shugart H H, Stocks B J, Sukhinin A I, Parfenova E I, Chapin III F S, Stackhouse Jr P W. Climate-induced boreal forest change: predictions versus current observations. Global and Planetary Change, 2007, 56(3/4): 274-296.
- [9] 胡海清,魏书精,孙龙,王明玉.气候变化、火干扰与生态系统碳循环.干旱区地理,2013,36(1):57-75.
- [10] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉, 赵凤君. 林火与气候变化研究进展. 世界林业研究, 2006, 19(5): 38-42.
- [11] Krawchuk M A, Cumming S G, Flannigan M D. Predicted changes in fire weather suggest increases in lightning fire initiation and future area burned in the mixedwood boreal forest. Climatic Change, 2009, 92(1/2): 83-97.
- [12] Liu Z H, Yang J, Chang Y, Weisberg P J, He H S. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. Global Change Biology, 2012, 18(6): 2041-2056.
- [13] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO2减排中的作用. 应用生态学报, 2006, 17(4): 709-714.
- [14] Luo X, He H S, Liang Y, Wang W J, Wu Z W, Fraser J S. Spatial simulation of the effect of fire and harvest on aboveground tree biomass in boreal forests of Northeast China. Landscape Ecology, 2014, 29(7): 1187-1200.
- [15] Mehta S, Frelich L E, Jones M T, Manolis J. Examining the effects of alternative management strategies on landscape-scale forest patterns in northeastern Minnesota using LANDIS. Ecological Modelling, 2004, 180(1): 73-87.
- [16] 李月辉, 胡志斌, 常禹, 胡远满. 采伐影响下森林景观服务功能变化研究. 自然资源学报, 2006, 21(1): 100-108.
- [17] 张佩昌. 试论天然林保护工程. 林业科学, 1999, 35(2): 124-131.
- [18] 黄龙生, 王兵, 牛香, 宋庆丰. 大兴安岭林业集团天然林资源保护工程生态产能价值分析. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 141-148.
- [19] Shifley S R, Thompson III F R, Dijak W D, Larson M A, Millspaugh J J. Simulated effects of forest management alternatives on landscape structure and habitat suitability in the Midwestern United States. Forest Ecology and Management, 2006, 229(1/3): 361-377.
- [20] He H S, Yang J, Shifley S R, Thompson F R. Challenges of forest landscape modeling—simulating large landscapes and validating results. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(4): 400-402.
- [21] Ma J, Hu Y M, Bu R C, Deng H W, Qin Q. Predicting impacts of climate change on the aboveground carbon sequestration rate of a temperate forest in northeastern China. PLoS One, 2014, 9(4); e96157.
- [22] Gustafson E J, Shvidenko A Z, Sturtevant B R, Scheller R M. Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia. Ecological Applications, 2010, 20(3): 700-715.
- [23] He H S, Mladenoff D J, Gustafson E J. Study of landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance. Forest Ecology and Management, 2002, 155(1/3): 257-270.
- [24] Xu C G, Güneralp B, Gertner G Z, Scheller R M. Elasticity and loop analyses: tools for understanding forest landscape response to climatic change in spatial dynamic models. Landscape Ecology, 2010, 25(6): 855-871.
- [25] Wang W J, He H S, Spetich M A, Shifley S R, Thompson III F R, Larsen D R, Fraser J S, Yang J. A large-scale forest landscape model incorporating multi-scale processes and utilizing forest inventory data. Ecosphere, 2013, 4(9): 106.
- [26] Wang W J, He H S, Spetich M A, Shifley S R, Thompson III F R, Dijak W D, Wang Q. A framework for evaluating forest landscape model predictions using empirical data and knowledge. Environmental Modelling & Software, 2014, 62: 230-239.
- [27] Fraser J S, He H S, Shifley S R, Wang W J, Thompson III F R. Simulating stand-level harvest prescriptions across landscapes: LANDIS PRO harvest module design. Canadian Journal of Forest Research, 2013, 43(10): 972-978.
- [28] 罗旭,贺红士,梁宇,吴志伟,黄超,张庆龙.林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究.生态学报,2016,36 (4):1104-1114.
- [29] Luo X, He H S, Liang Y, Wu Z W. Evaluating simulated effects of succession, fire, and harvest for LANDIS PRO forest landscape model. Ecological Modelling, 2015, 297: 1-10.
- [30] 李晓娜,贺红士,吴志伟,梁宇.大兴安岭北部森林景观对气候变化的响应.应用生态学报,2012,23(12):3227-3235.
- [31] He H S, Mladenoff D J, Crow T R. Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming. Ecological Modelling, 1999, 114(2/3): 213-233.

円

15

- [32] Shifley S R, Thompson III F R, Dijak W D, Fan Z F. Forecasting landscape-scale, cumulative effects of forest management on vegetation and wildlife habitat: a case study of issues, limitations, and opportunities. Forest Ecology and Management, 2008, 254(3): 474-483.
- [33] Chen X W. Modeling the effects of global climatic change at the ecotone of boreal larch forest and temperate forest in northeast China. Climatic Change, 2002, 55(1/2): 77-97.
- [34] Thompson J R, Foster D R, Scheller R, Kittredge D. The influence of land use and climate change on forest biomass and composition in Massachusetts, USA. Ecological Applications, 2011, 21(7): 2425-2444.
- [35] 延晓冬,赵士洞,于振良.中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用.植物生态学报,2000,24(1):1-8.
- [36] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国东北主要森林类型的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 534-543.
- [37] 黄超,贺红士,梁宇,吴志伟.气候变化、林火和采伐对大兴安岭森林碳储量的影响.应用生态学报,2018,29(7):2088-2100.
- [38] 韩胜利,高涛,张秋良,乌兰.数值模拟温度变化对兴安落叶松径生长的影响.东北林业大学学报,2017,45(9):5-12.
- [39] 李秀珍,王绪高,胡远满,孔繁花,解伏菊.林火因子对大兴安岭森林植被演替的影响.福建林学院学报,2004,24(2):182-187.
- [40] 徐化成. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社, 1998.