

大兴安岭北部森林景观对气候变化的响应*

李晓娜^{1,2} 贺红士^{1**} 吴志伟¹ 梁宇¹

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 将森林景观模型 LANDIS 和林窗模型 LINKAGES 相结合, 模拟气候变化对大兴安岭森林景观的影响, 并比较分析了气候变化对森林景观的直接影响与通过火干扰改变所产生的影响。结果表明: 维持当前气候和火干扰情景的条件下, 森林景观保持动态平衡, 兴安落叶松占据优势树种地位, 未来气候情景下, 兴安落叶松和偃松的分布面积降低, 白桦、山杨、甜杨和钻天柳等阔叶树以及樟子松的分布面积增加, 森林景观的破碎化和多样性增加; 气候变化对森林景观的影响具有时滞性和长期性, 气候变暖有利于大部分树种(兴安落叶松除外)的生长, 火干扰增加使山杨、甜杨和钻天柳等分布面积增加, 使兴安落叶松、樟子松和偃松的分布面积明显降低; 火干扰增加对森林景观的影响几乎与气候变化的直接影响同等重要, 其加剧了气候变化对森林组成、森林景观破碎化和森林景观多样性的直接影响。

关键词 森林景观组成 气候变暖 火干扰 LANDIS 呼中自然保护区

文章编号 1001-9332(2012)12-3227-09 中图分类号 S718 文献标识码 A

Responses of boreal forest landscape in northern Great Xing'an Mountains of Northeast China to climate change. LI Xiao-na^{1,2}, HE Hong-shi¹, WU Zhi-wei¹, LIANG Yu¹ (¹State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2012 23(12): 3227-3235.

Abstract: With the combination of forest landscape model (LANDIS) and forest gap model (LINKAGES), this paper simulated the effects of climate change on the boreal forest landscape in the Great Xing'an Mountains, and compared the direct effects of climate change and the effects of climate warming-induced fires on the forest landscape. The results showed that under the current climate conditions and fire disturbances, the forest landscape in the study area could maintain its dynamic balance, and *Larix gmelinii* was still the dominant tree species. Under the future climate and fire disturbances scenario, the distribution area of *L. gmelinii* and *Pinus pumila* would be decreased, while that of *Betula platyphylla*, *Populus davidiana*, *Populus suaveolens*, *Chosenia arbutifolia*, and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* would be increased, and the forest fragmentation and forest diversity would have an increase. The changes of the forest landscape lagged behind climate change. Climate warming would increase the growth of most tree species except *L. gmelinii*, while the increased fires would increase the distribution area of *P. davidiana*, *P. suaveolens*, and *C. arbutifolia* and decrease the distribution area of *L. gmelinii*, *P. sylvestris* var. *mongolica*, and *P. pumila*. The effects of climate warming-induced fires on the forest landscape were almost equal to the direct effects of climate change, and aggravated the direct effects of climate change on forest composition, forest landscape fragmentation, and forest landscape diversity.

Key words: forest landscape composition; climate warming; fire disturbance; LANDIS; Huzhong Nature Reserve.

近百年来, 全球气候变暖已毋庸置疑。气候变化

将在全球范围内影响森林生态系统的生产力、树种分布范围和自然干扰机制, 且这些影响在高纬度地区尤为显著^[1]。北半球高纬度地区作为对气候变暖最敏感的区域之一, 气候变化不仅直接影响北方森

* 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403206)和国家自然科学基金项目(41071120)资助。

** 通讯作者。E-mail: heh@iae.ac.cn
2012-03-26 收稿, 2012-09-24 接受。

林的生产力^[2-4]和树种分布^[5-6],还通过林火等干扰间接影响北方森林的固碳能力^[1,7-9]和碳汇功能^[10].

气候变化直接影响北方森林的动态.温度、降水、太阳辐射和大气 CO₂ 浓度等的改变使树木的分布、生长和更新等均发生了变化^[4-6,11-12],进而改变了树种间的竞争力^[13-14].一般而言,气候变暖将增加北方森林的净初级生产力^[13-14].而气候变暖情景下林火频发等可能减少北方森林的碳储量^[11].

气候变化通过自然干扰如林火等间接地影响北方森林景观^[8].火是驱动北方森林演替的主导因素^[15],是一种形成植物特性的进化压力^[16].气候变暖背景下,北方森林地区的火烧频率和火烧面积可能将大幅增加^[17-20].到 21 世纪末期,加拿大北方森林的火烧面积将增加 74%~118%^[18]、林火发生频率将增加 75%~140%^[19],我国大兴安岭森林的林火发生概率也将增加 50%~100%^[20].有研究表明,气候变化导致的火干扰的变化对森林动态的影响可能相当于或大于气候变化的直接影响^[7,21-22].如 He 等^[22]研究表明,气候变化背景下,火干扰的增加加剧了威斯康星北部森林优势树种从北方树种向南方树种的转变;Kurz 等^[10]研究表明,气候变化背景下,火干扰增加导致森林碳储量的损失可能超过温度升高引起的北方森林生物量的增加.

我国的兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林是欧亚大陆北方针叶林的一部分,属于东西伯利亚南部落叶针叶林沿山地向南的延续部分,生长期短、生长速度快,且在间有永冻层的条件下能保持惊人的生长速度.其林分面积大,蓄积量多,面积和蓄积量分别占我国寒温带有林地面积和蓄积量的 55% 和 75%.作为我国木材的主要产区之一,大兴安岭森林覆盖面积占全国森林面积的 30%^[23],具有重要的生态意义和社会经济价值.同时,大兴安岭森林是世界上受全球气候变化影响最严重的森林植被类型之一,其生态系统特征与其他地区的北方森林相似,火干扰是影响其组成、净初级生产力和生物量分布的主导因素^[23-25].然而,目前有关气候变化对大兴安岭森林景观动态的长期影响研究,仅程肖侠和延晓冬^[26-27]在林分尺度上研究了气候变化对大兴安岭森林的影响,结果表明,气候变暖情景下,大兴安岭森林的优势树种将由针叶树变为阔叶树,火干扰在很大程度上影响着大兴安岭森林的树种组成和生产力.

本研究将森林景观模型 LANDIS 和林窗模型 LINKAGES 相结合,模拟气候变化背景下大兴安岭

北部森林景观的动态,分析气候变化对森林景观的直接影响及火干扰增加对森林景观动态变化的影响,为本区在气候变暖背景下制定合理的森林管理政策以缓和气候变化带来的不利影响、维持大兴安岭森林的生态功能和社会经济效益提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

呼中国家级自然保护区(51°17'42"—51°56'31" N,122°42'14"—123°18'5" E)位于大兴安岭中部、伊勒呼里山东北坡,总面积 167213 hm²,南北长约 63 km,东西宽约 32 km.保护区始建于 1984 年,主要保护对象为寒温带针叶林及珍稀动植物.保护区地势西高东低,坡度平缓,海拔在 800~1200 m.保护区属寒温带大陆性季风气候,年均气温 -4℃,日均温相差悬殊,冬季寒冷而漫长,夏季温暖而短暂,春秋两季明显,季节温差大.保护区年均降水量约 450 mm,降水多集中在 6—8 月.本区植物生长期约 100 d(从 5 月下旬到 9 月上旬).区内土壤可分为棕色针叶林土、草甸土、沼泽土和石质土,其中草甸土和沼泽土一般含有冻土层,棕色针叶林土是保护区内最具代表性的土壤类型.本区地带性植被为寒温带针叶林,主要树种包括兴安落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、甜杨(*Populus suaveolens*)、钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)和偃松(*Pinus pumila*)等.兴安落叶松分布最广泛,为单优势树种;白桦在火烧迹地能够迅速繁殖生长,其分布范围仅次于兴安落叶松;山杨仅分布于低海拔的上坡,分布面积不足 2%;樟子松多分布于海拔低于 900 m 的阳坡上部,分布面积不足 5%;偃松多分布于海拔 1000 m 以上的山地;甜杨和钻天柳常沿河滩呈带状分布.

1.2 研究方法

1.2.1 预案设计 气候变化对森林景观的影响包括两方面:一是通过温度、降水和二氧化碳浓度等直接影响树木生长,即气候对树种建群系数的影响;二是通过其他因素如火干扰等间接影响森林景观.为了说明气候变化对森林景观产生的直接影响和通过火干扰等对森林景观产生的间接影响,本研究将气候和火干扰作为 2 个独立因子处理,模拟气候变化和火干扰改变对森林景观产生的影响,以及气候和火干扰相耦合对森林景观产生的综合影响(表 1).以 10 年为步长,模拟 300 年,重复模拟 5 次.

气候预案包括现行气候和未来气候 2 种,即两

种气候情景下的树种建群系数。现行气候数据为 1961—1990 年间的月均气温和降水,未来气候情景采用 Hadley GCM(UKMO-HadCM3) 预测的 A2 情景下(高的人口数量和缓慢的技术增长导致的高 CO₂ 排放)的月均气温和降水的变化量(表 2)。

火干扰预案包括现行气候和未来气候情景 2 个水平。现行气候下,火烧轮回期约 150 年^[25];未来气候情景下,火发生概率大约增加 2 倍^[20],即火烧轮回期缩短为 50 年。

1.2.2 模型选择 森林景观模型 LANDIS 是一种基于栅格数据,模拟森林自然更新、自然干扰(如林火、风倒)和人为干扰(如森林采伐)等景观过程的空间直观景观模型^[28],目前已被广泛用于模拟森林景观的长期动态^[29-30]、森林景观对气候变化的响应^[31-32]、森林景观动态对火干扰的响应^[33]。LANDIS 模型所需要的参数主要包括物种生活史特征参数、土地类型或生态区图(同一种类型或生态区具有相同的干扰史、干扰特征和树种重建系数)及树种组成图(包括每一像元上的物种和年龄信息)^[28]。其中,建群系数可用来测度环境条件(包括湿度、气候

和养分等)对物种的适合程度,可以通过树种建群系数将 LANDIS 模型与其他模型如林窗模型相结合,模拟气候变化对森林景观动态的影响^[31-32]。LANDIS 模型参数化的数据源包括:2000 年 TM 遥感影像两景(WRS: P/R: 120/24 和 121/24)、1990 年林相图和 1:5 万地形图,大兴安岭 1965—2005 年火烧记录、大兴安岭植被^[24]和大兴安岭植被^[25]等。模型输出结果主要包括树种分布图、年龄分布图和火干扰分布图等。LANDIS 模型包括演替、采伐、火、风、生物干扰和可燃物 6 个独立模块,本研究仅运行演替模块和火模块。LANDIS 将异质性景观分成相对均质的土地类型单元,假设处在同一种土地类型中的物种具有相同的环境条件,每一土地类型具有相对一致的物种建群系数^[28]。本研究区中树种建群系数主要受地形地貌的影响,根据地形地貌依据本区 1990 年林相图,将土地类型分为 5 种,分别为水域、阶地、阳坡、阴坡和大于 1000 m 的高海拔区(图 1),象元大小为 90 m×90 m。其中,阴坡、阳坡、阶地和 high 海拔区 4 种有效土地类型面积分别占研究区总面积的 30.2%、31.9%、4.0% 和 33.4%。

将 LANDIS 模型与林窗模型 LINKAGES 耦合,可模拟气候变化对森林景观的直接影响^[34]。LINKAGES 模型是最具代表性的林窗模型之一,可以设置多个气候条件来模拟森林演替动态,其模拟面积为 1/12 hm²,以年为步长,输入参数除了运行参数外,还包括气候、土壤、林分和树种等参数,可输出树种生物量、基面积、立木株数、碳和氮储量、矿化量、凋落物及土壤有机质含量等多项重要指标^[35-36]。参

表 1 模拟预案概况

Table 1 Simulation preparedness summary

模拟情景 Scenario	预案 Preparedness	描述 Description
现行气候情景 Current climate scenario	C ₁ F ₁	维持当前气候火干扰
	C ₁ F ₂	当前气候下火频率增加 2 倍
未来气候情景 Future climate scenario	C ₂ F ₁	温度和降水增加 火干扰不变
	C ₂ F ₂	温度和降水增加 火干扰增大 2 倍

表 2 UKMO-HadCM3 预测的未来 100 年后呼中地区各月温度和降水的变化量

Table 2 Monthly changes of temperature and precipitation in 100 years in Huzhong area projected by UKMO-hadCM3

月份 Month	温度 Temperature (°C)	降水 Precipitation (mm)
1	4.38	5.14
2	6.58	5.91
3	6.02	3.64
4	4.41	5.05
5	5.64	10.18
6	7.32	35.66
7	8.17	42.45
8	9.03	16.58
9	7.08	35.52
10	5.34	4.68
11	6.71	4.24
12	4.07	5.42

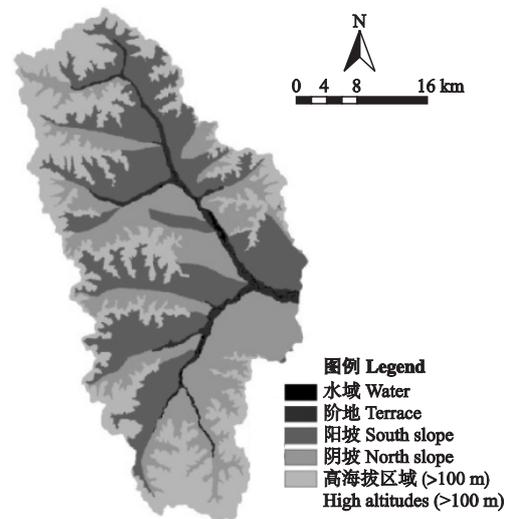


图 1 研究区土地类型图

Fig. 1 Land types stratified in the study area.

数化数据源包括 1961—1990 年研究区气象数据、1 : 100 万土壤调查数据、大兴安岭植被^[24]和大兴安岭森林^[25]等。LINKAGES 模型模拟树木生长时考虑了树种对温度和降水等的适应性,故其输出结果可以作为树木生长对气候变化的响应^[34-36]。这也是本文选择 LINKAGES 模型量化树种建群系数的原因^[34]。LINKAGES 模型模拟过程中仅改变气候参数,其余参数均保持不变^[31-32],模拟结果用以量化树种建群系数(SEC)^[34]:

$$SEC_{ij} = \sqrt{b_{ij}} \sqrt{b'_{ij}} / \max \left(\sqrt{\sum_{j=1}^j b_{ij}}, \sqrt{\sum_{j=1}^j b'_{ij}} \right) \quad (1)$$

式中: b_{ij} 为现行气候情景下 i 物种在 j 土地类型上的生物量; b'_{ij} 为未来气候情景下 i 物种在 j 土地类型上的生物量。为了模拟气候变化的渐变过程,气候变化情景下的树种建群系数在初始时使用现行气候的值,模拟的前 100 年,以 10 年为间隔线性插值改变树种建群系数,模拟后 200 年的树种建群系数保持不变^[31-32]。100 年后的气候变暖将更严重^[1],因而本研究的预测值比较保守。LINKAGES 模型所需的树种主要参数见表 3,现行气候和未来气候 2 种

情景下的各树种建群系数见表 4。

1.2.3 数据分析 本研究用树种组成、年龄组成和景观格局指标来量化森林景观对气候变化的响应。以 10 年为步长输出树种分布图、年龄分布图和火烧分布图,从中分析气候和火干扰 2 种处理预案对树种的影响。本研究中树种组成以各树种所占的景观面积百分比来量化(LANDIS 模型中以树种所占的象元数量来计算各树种所占的景观面积,一个象元中可能有多个树种存在,各树种所占的景观面积百分比之和可能超过 100%)。年龄组成按演替阶段分为建群(1~40 年)、早期(41~100 年)、中期(101~140 年)、后期(141~180 年)和末期(>180 年)5 个阶段^[37-38]。格局变量包括树种分布格局和年龄分布格局的斑块数量(NP)、平均斑块面积(PA)、聚集度指数(AI)和香农多样性指数(SHDI),这些指数均使用 FRAGSTAT 3.3 计算得到。本研究采用双因素方差分析计算气候变化和火干扰增加对森林景观变异的影响,选用 t 值检验气候变化的直接影响和火干扰增加对各反映变量产生的影响。为了减少共线性,对各反映变量分别选择模拟 150 年和 300 年时的结果进行分析。

表 3 LINKAGES 模型所需的树种环境耐受参数

Table 3 Input key parameters of tree species to tolerate the environment in LINKAGES

树种 Species	寿命 Longevity (a)	成熟年龄 Maturity age (a)	耐荫性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	最大积温 Maximum degree-day (°C)	最小积温 Minimum degree-day (°C)	耐受低温 Tolerated temperature (°C)
山杨 <i>Populus davidiana</i>	120	10	1	1	3000	1000	-24
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	150	15	1	3	3100	600	-26
甜杨 <i>Populus suaveolens</i>	180	12	1	2	1600	600	-30
钻天柳 <i>Chosenia arbutifolia</i>	250	18	2	2	2400	600	-25
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	300	20	2	5	1900	400	-40
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	250	40	2	4	1900	700	-30
偃松 <i>Pinus pumila</i>	250	30	3	3	1400	300	-40

表 4 现行气候和未来气候情景下各树种的建群系数

Table 4 Species establishment coefficients of trees under two climate scenarios

树种 Species	当前气候 Current climate				未来气候 Future climate			
	阴坡 North slope	阳坡 South slope	高海拔区 High altitude region	阶地 Terrace	阴坡 North slope	阳坡 South slope	高海拔区 High altitude region	阶地 Terrace
山杨 <i>Populus davidiana</i>	0.010	0.050	0.000	0.005	0.179	0.199	0.073	0.193
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.150	0.350	0.010	0.020	0.300	0.387	0.138	0.243
甜杨 <i>Populus suaveolens</i>	0.000	0.010	0.000	0.070	0.009	0.011	0.000	0.169
钻天柳 <i>Chosenia arbutifolia</i>	0.000	0.000	0.000	0.080	0.010	0.050	0.000	0.333
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	0.400	0.350	0.100	0.200	0.097	0.000	0.000	0.001
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	0.010	0.250	0.020	0.000	0.023	0.086	0.129	0.000
偃松 <i>Pinus pumila</i>	0.000	0.000	0.100	0.000	0.000	0.000	0.155	0.000

2 结果与分析

2.1 树种组成对气候变化和火干扰增加的响应

当前气候下,研究区山杨、甜杨和钻天柳的分布面积保持动态平衡,白桦、樟子松和偃松的分布面积波动较大,兴安落叶松保持其优势树种地位。与当前气候相比,未来气候情景下,白桦、山杨、甜杨和钻天

柳 4 种阔叶树的分布面积大幅增加,樟子松的分布面积有所增加,兴安落叶松和偃松的分布面积大幅减少(图 2)。

气候变化的直接影响和火干扰增加对各树种分布产生的影响均较显著(表 5)。气候变化直接促进了大多数树种分布面积的增加,仅使兴安落叶松的分布面积有所降低,且模拟 300 年时气候变化对各

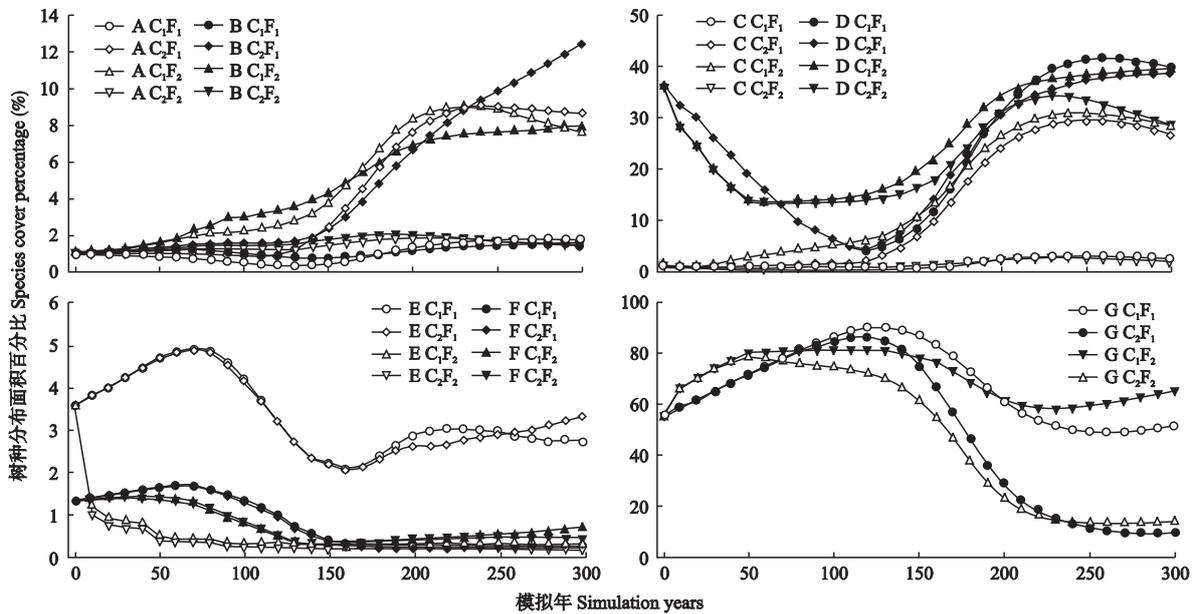


图 2 各模拟预案下树种分布面积比例的变化

Fig. 2 Change of species distribution area percentage under four preparednesses.

A: 甜杨 *Populus suaveolens*; B: 钻天柳 *Chosenia arbutifolia*; C: 山杨 *Populus davidiana*; D: 白桦 *Betula platyphylla*; E: 偃松 *Pinus pumila*; F: 樟子松 *Pinus sylvestris var. mongolica*; G: 兴安落叶松 *Larix gmelinii*. 预案的含义见表 1 The signification of preparednesses was in Table 1.

表 5 森林树种组成变量的双因素方差分析

Table 5 Two-way analysis of variance for response variables of forest species composition

模拟时长 Simulation years (a)	模拟树种 Simulation species	气候效应 Climate effect ¹⁾		火效应 Fire effect ²⁾		交互效应 Climate × fire	
		变异解释 Variation explained (%)	t	变异解释 Variation explained (%)	t	变异解释 Variation explained (%)	R ²
150	山杨 <i>Populus davidiana</i>	68.5**	33.3	20.3**	7.9	11.1**	1.00
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	63.2**	3.3	10.0**	-5.4	13.9**	0.85
	甜杨 <i>Populus suaveolens</i>	52.3**	24.4	42.2**	20.8	5.1**	1.00
	钻天柳 <i>Chosenia arbutifolia</i>	64.2**	22.0	24.3**	7.5	11.1**	1.00
	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	7.1**	-12.6	91.3**	-73.7	1.5**	1.00
	樟子松 <i>Pinus sylvestris var. mongolica</i>	0.01	-0.6	99.1**	-30.9	0.005	0.99
	偃松 <i>Pinus pumila</i>	0.04	1.3	99.9**	-188.3	0.01	1.00
300	山杨 <i>Populus davidiana</i>	98.7**	281.0	0.7**	1.7	0.6**	1.00
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	89.8**	58.0	0.2**	-33.0	9.8**	1.00
	甜杨 <i>Populus suaveolens</i>	99.1**	252.5	0.8**	16.2	0.1**	1.00
	钻天柳 <i>Chosenia arbutifolia</i>	99.4**	149.3	0.03	8.0	0.6**	1.00
	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	96.1**	-192.5	2.7**	-11.8	1.2**	1.00
	樟子松 <i>Pinus sylvestris var. mongolica</i>	26.8**	2.1	52.6**	-6.7	4.9**	0.81
	偃松 <i>Pinus pumila</i>	0.9**	12.4	98.8**	-85.4	0.2**	1.00

** P < 0.01; 1) t > 0 反映变量随气候变暖而增加 Positive t value meant that response variable increased as climate warms; 2) t < 0 反映变量随火干扰增加而增加 Positive t value meant that response variable increased as fires increase. 下同 The same below.

树种分布面积的直接影响远大于模拟 150 年时. 火干扰增加明显降低了兴安落叶松、樟子松和偃松 3 种针叶树的分布面积. 增加了山杨、甜杨和钻天柳 3 种阔叶树的分布面积. 两种效应相比, 对于白桦、山杨、甜杨和钻天柳而言, 气候变化的直接影响均远大于火干扰增加产生的影响; 对于樟子松和偃松而言, 火干扰增加产生的影响远大于气候变化的直接影响; 兴安落叶松的分布面积在模拟 150 年时主要受火干扰增加产生的影响, 在模拟 300 年时受气候变化的直接影响较大. 对于本研究区森林树种组成而言, 火干扰增加加剧了气候变化的直接影响.

2.2 年龄组成对气候变化和火干扰增加的响应

气候变化对森林年龄组成影响显著 (表 6). 模拟 150 年时, 研究区森林年龄组成的变化几乎与气候变化的直接影响无关, 其主要受火干扰增加产生的影响. 火干扰增加明显地增加建群和早期阶段的树种的分布面积, 而明显减少了中期、后期和末期阶段的树种的分布面积. 模拟 300 年时, 气候变化和火干扰增加均显著影响本区森林年龄组成, 气候变化的直接影响明显增加了建群和早期阶段的树种的分布面积, 减少了中期、后期和末期阶段的树种的分布面积. 这可能与气候变化增加了山杨等寿命较短的阔叶树的分布面积, 减少了兴安落叶松等寿命较长的针叶树种的分布面积有关. 火干扰增加同样明显增加了建群阶段树种的分布面积, 减少了后期和末期阶段树种的分布面积.

总之, 对于年龄组成而言, 火干扰增加产生的影响高于气候变化的直接影响, 加剧了本区森林年龄

组成的变化. 未来气候情景下, 建群和早期阶段树种的分布面积大幅增加, 后期和末期阶段树种的分布面积明显降低.

2.3 森林景观格局对气候变化和火干扰增加的响应

森林景观格局受气候变化的直接影响和火干扰增加产生的影响均达到极显著水平. 然而, 森林树种组成分布格局和年龄组成分布格局对气候变化的直接响应和间接响应存在差异.

对于树种分布而言, 模拟 150 年和 300 年时, 气候变化的直接影响均增加其格局的破碎化程度和多样性. 火干扰增加了其格局的破碎化程度, 降低了其多样性. 两种效应相比, 模拟 150 年时, 火干扰增加对树种分布格局的影响与气候变化的直接影响几乎同等重要. 模拟 300 年时, 气候变化对树种分布格局破碎化的直接影响高于火干扰增加的影响; 模拟 150 年和 300 年时, 气候变化对树种分布格局多样性的直接影响均远大于火干扰增加的影响.

对于年龄分布格局而言, 模拟 150 年时, 气候变化的直接影响和火干扰增加的影响均使其破碎化程度加剧、多样性增加, 但气候变化的直接影响远低于火干扰增加的影响; 模拟 300 年时, 气候变化对森林破碎化的直接影响增加, 但火干扰增加仍然是影响年龄分布格局多样性的主要因素.

总体而言, 未来气候情景下, 本区森林景观的破碎化加剧、多样性增加, 火干扰的增加加剧了气候变化对大兴安岭森林景观破碎化的直接影响, 缓和了气候变化对森林景观多样性的直接影响 (表 7).

表 6 年龄组成变量的双因素方差分析

Table 6 Two-way analysis of variance for response variables of forest age composition

模拟时长 Simulation years (a)	年龄阶段 Age stage	气候效应 Climate effect ¹⁾		火效应 Fire effect ²⁾		交互效应 Climate × fire	
		变异解释 Variation explained (%)	t	变异解释 Variation explained (%)	t	变异解释 Variation explained (%)	R ²
150	I	2.4 **	8.2	97.1 **	79.9	0.4 **	1.00
	II	0.04	3.9	99.2 **	73.9	0.6 **	1.00
	III	0.002	-0.1	99.9 **	-82.4	0.003	1.00
	IV	0.01	0	99.9 **	-145.3	0.01	1.00
	V	0.02	-0.1	99.8 **	-68.6	0.03	1.00
300	I	52.8 **	77.3	39.5 **	60.5	7.6 **	1.00
	II	42.0 **	35.0	0.005	18.6	56.7 **	0.98
	III	45.1 **	-4.3	22.1 **	4.1	32.3 **	0.99
	IV	33.2 **	-39.6	58.2 **	-65.7	8.6 **	1.00
	V	0.8 **	-3.2	98.8 **	-82.5	0.3 **	1.00

I: 建群 Establishment (%); II: 早期 Early stage (%); III: 中期 Mid stage (%); IV: 后期 Late stage (%); V: 末期 Old growth (%).

表 7 森林景观格局反映变量的双因素方差分析

Table 7 Two-way analysis of variance for the response variables of forest landscape

模拟时长 Simulation years (a)	格局指数 Pattern index	气候效应 Climate effect ¹⁾		火效应 Fire effect ²⁾		交互作用 Climate × fire	
		变异解释 Variation explained (%)	t	变异解释 Variation explained (%)	t	变异解释 Variation explained (%)	R ²
150	NP-s	57.7**	69.4	36.6**	48.9	5.7**	1.00
	NP-a	0.2**	3.6	98.8**	91.1	0.9**	1.00
	PA-s	35.3**	-77.1	63.4**	-99.2	1.2**	1.00
	PA-a	0.003	-3.8	99.9**	-114.8	0.1**	1.00
	AI-s	49.7**	-35.8	41.4**	-30.4	8.7**	1.00
	AI-a	0.1**	-3.2	99.6**	-132.7	0.3**	1.00
	SHDI-s	88.8**	41.4	0.7**	-27.2	10.3**	1.00
	SHDI-a	4.1**	5.1	93.3**	19.6	0.4**	0.97
300	NP-s	99.7**	370.3	0.2**	12.4	0.02	1.00
	NP-a	60.1**	-38.0	24.7**	87.1	15.1**	1.00
	PA-s	58.4**	-115.0	40.8**	-97.9	0.7**	1.00
	PA-a	0.6**	0.4	98.8**	-116.3	0.5**	1.00
	AI-s	99.4**	-282.2	0.2**	8.4	0.5**	1.00
	AI-a	46.2**	31.6	40.9**	-97.9	12.8**	1.00
	SHDI-s	97.2**	199.6	2.4**	-48.1	0.5**	1.00
	SHDI-a	1.2**	14.7	50.6**	35.5	47.0**	0.99

s: 树种 Species; a: 年龄阶段 Age stage.

3 讨 论

森林景观模型 LANDIS 可以较准确地模拟森林景观动态,再现当前气候下的森林组成^[29]。在当前气候条件下,本区森林景观保持动态平衡,维持寒温带针叶林景观,兴安落叶松保持其单优势树种地位,这与观测到的现象及文献资料相吻合^[24-27]。气候变暖情景下,不论火干扰是否增加,森林景观的优势树种都将由针叶树转换为阔叶树,白桦、山杨等阔叶树种将占据优势树种的地位,这与程肖侠和延晓冬^[26-27]的研究结果相似。气候变化背景下,森林景观格局的破碎化程度和多样性均将增加,可能改变本区森林生态系统特征并影响野生动物等的生存。

气候变化对模拟各树种分布面积的直接影响有差异,这与各树种应对环境变化独特的生理和生态特性有关。与兴安落叶松、樟子松和偃松等种子数量少、寿命较长的 *k* 对策树种相比,白桦、山杨、甜杨和钻天柳等种子数量多、生长速度快、寿命较短的 *r* 对策树种更能适应气候变化带来的一系列影响。未来气候情景下,阔叶树种分布面积大幅增加,针叶树种分布面积大幅减少,可能使大兴安岭森林景观朝着不易着火的方向发展。

本研究结果表明,火干扰增加对森林景观产生的影响与气候变化的直接影响同等重要。火干扰的增加改变了气候变化对樟子松和偃松等树种分布的正效应,加剧了气候变化对兴安落叶松分布的负效应,进而影响大兴安岭地区的地上植被生物量^[39]。

目前,兴安落叶松是大兴安岭地区的单优势树种,气候变化和火干扰的双重作用可能使短期内大兴安岭森林的碳汇作用减弱^[40]。

气候变化对森林景观的直接影响具有长期性和时滞性,火干扰能够在短时间内影响森林景观的变化,气候变化、火干扰和森林景观三者相互影响^[41-42]。采伐是影响森林景观尤其是北方森林景观动态的重要因素^[25,38]。本研究区是国家级自然保护区,无采伐作业。而对大兴安岭各林业局而言,采伐可能是影响森林景观的重要因素,其对森林景观动态的影响可能超过气候变化的直接影响和间接影响。

大兴安岭森林属于欧亚大陆北方针叶林的一部分,其对气候变化响应极敏感,气候变化不仅通过温度和降水的改变等影响北方森林景观,还通过改变 CO₂ 浓度、土壤养分、物种迁移、病虫害爆发和火干扰等影响森林景观动态。本研究存在以下局限: 1) 本研究仅考虑了气候变化背景下温度、降水和火干扰改变对森林景观的影响,没有考虑物种迁移等其他因素的影响; 2) 本研究中模拟未来气候情景的火干扰时,模拟初始就改变了火干扰发生状况,没有考虑其渐变性,而火干扰具有较大的变异性; 3) 100 年后气候变化将会继续或加重,但本研究假设 100 年后气候保持不变。鉴于笔者知识的有限性和模型本身的局限性,气候变化对本区森林固碳能力及其他生态效益的影响有待于进一步研究。

参考文献

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [2] Nemani RR, Keeling CD, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, **300**: 1560–1563
- [3] Zhao MS, Running SW. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, **329**: 940–943
- [4] Lloyd AH, Bunn AG, Berner L. A latitudinal gradient in tree growth response to climate warming in the Siberian taiga. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 1935–1945
- [5] MacDonald GM, Kremenetski KV, Beilman DW. Climate change and the northern Russian treeline zone. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363**: 2285–2299
- [6] Stueve KM, Isaacs RE, Tyrrell LE, et al. Spatial variability of biotic and abiotic tree establishment constraints across a treeline ecotone in the Alaska Range. *Ecology*, 2011, **92**: 496–506
- [7] Flannigan MD, Stocks BJ, Wotton BM. Climate change and forest fires. *Science of the Total Environment*, 2000, **262**: 221–229
- [8] Dale VH, Joyce LA, McNulty S, et al. Climate change and forest disturbances. *BioScience*, 2001, **51**: 723–734
- [9] Achard F, Eva HD, Mollicone D, et al. The effect of climate anomalies and human ignition factor on wildfires in Russian boreal forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363**: 2331–2339
- [10] Kurz WA, Stinson G, Rampley G. Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increased disturbances? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363**: 2259–2268
- [11] Kelly AE, Goulden ML. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**: 11823–11826
- [12] Van Mantgem PJ, Stephenson NL. Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest. *Ecology Letters*, 2007, **10**: 909–916
- [13] Peng CH, Apps MJ. Modelling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to changes in climate and fire disturbance regimes. *Ecological Modelling*, 1999, **122**: 175–193
- [14] Xu C, Gertner GZ, Scheller RM. Potential effects of interaction between CO₂ and temperature on forest landscape response to global warming. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 1469–1483
- [15] Johnson EA, Miyanishi K, Weir JMH. Wildfires in the western Canadian boreal forest: Landscape patterns and ecosystem management. *Journal of Vegetation Science*, 1998, **9**: 603–610
- [16] Keeley JE, Pausas JG, Rundel PW, et al. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. *Trends in Plant Science*, 2011, **16**: 406–411
- [17] Stocks BJ, Fosberg MA, Lynham TJ, et al. Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Climatic Change*, 1998, **38**: 1–13
- [18] Flannigan MD, Logan KA, Amiro BD, et al. Future area burned in Canada. *Climatic Change*, 2005, **72**: 1–16
- [19] Wotton BM, Nock CA, Flannigan MD. Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, **19**: 253–271
- [20] Wang M-Y (王明玉). Characteristics of Forest Fire Response and Trend under the Scenarios of Climate Change in China. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009 (in Chinese)
- [21] Johnstone JF, Hollingsworth TN, Chapin FS, et al. Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1281–1295
- [22] He HS, Mladenoff DJ, Gustafson EJ. Study of landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance. *Forest Ecology and Management*, 2002, **155**: 257–270
- [23] Wang CK, Gower ST, Wang YH, et al. 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**: 719–730
- [24] Zhou Y-L (周以良). Vegetation in the Great Xing'an Mountains of China. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese)
- [25] Xu H-C (徐化成). Forests in the Great Xing'an Mountains of China. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [26] Cheng X-X (程肖侠), Yan X-D (延晓冬). Effects of global climate change on forest succession in the Great Xing'an Mountains of Northeast China. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2007, **26**(8): 1277–1288 (in Chinese)
- [27] Cheng X-X (程肖侠), Yan X-D (延晓冬). Effects of climate change on typical forest in the northeast of China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2008, **28**(2): 534–633 (in Chinese)
- [28] He HS, Mladenoff DJ, Boeder J. An object-oriented forest landscape model and its representation of tree species. *Ecological Modelling*, 1999, **119**: 1–19
- [29] Hu Y-M (胡远满), Xu C-G (徐崇刚), Chang Y (常禹), et al. Application of spatially explicit landscape model (LANDIS): A case researches in Huzhong area, the Great Xing'an Mountains. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2004, **24**(9): 1846–1856 (in Chinese)
- [30] He HS, Hao ZQ, Larsen DR, et al. A simulation study of landscape scale forest succession in northeastern China. *Ecological Modelling*, 2002, **156**: 153–166

- [31] He HS, Mladenoff DJ, Gustafson EJ. Study of landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance. *Forest Ecology and Management*, 2002, **155**: 257-270
- [32] He HS, Hao ZQ, Mladenoff DJ, *et al.* Simulating forest ecosystem response to climate warming incorporating spatial effects in north-eastern China. *Journal of Biogeography*, 2005, **32**: 2043-2056
- [33] Chang Y, He HS, Bishop I, *et al.* Long-term forest landscape responses to fire exclusion in the Great Xing'an Mountains, China. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, **16**: 34-44
- [34] He HS, Mladenoff DJ, Crow TR. Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming. *Ecological Modelling*, 1999, **114**: 213-233
- [35] Post WM, Pastor J. Linkages: An individual-based forest ecosystem model. *Climatic Change*, 1996, **34**: 253-261
- [36] Zhou D-H (周丹卉). Potential Responses of Major Species and Forest Types to Climate Change in Small Xing'an Mountains. PhD Thesis. Shenyang: Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2007 (in Chinese)
- [37] Gustafson EJ, Shvidenko AZ, Sturtevant BR, *et al.* Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia. *Ecological Applications*, 2010, **20**: 700-715
- [38] Zheng H-N (郑焕能), Jia S-Q (贾松青), Hu H-Q (胡海清). Forest fire and forest rehabilitation in the Great Xing'an Mountains. *Journal of North-East Forestry University* (东北林业大学学报), 1986, **14**(4): 1-7 (in Chinese)
- [39] Sun X-F (孙晓芳), Yue T-X (岳天祥). Effects of China future land use change on aboveground vegetation biomass. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(8): 2225-2232 (in Chinese)
- [40] Fang D-M (方东明), Zhou G-S (周广胜), Jiang Y-L (蒋延玲), *et al.* Impact of fire on carbon dynamics of *Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains of North-east China: A simulation with CENTURY model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(9): 2411-2421 (in Chinese)
- [41] Dale VH, Joyce LA, McNulty S, *et al.* The interplay between climate change, forests, and disturbances. *Science of the Total Environment*, 2000, **262**: 201-204
- [42] Johnstone JF, Chapin FS, Hollingsworth TN, *et al.* Fire, climate change, and forest resilience in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, **40**: 1302-1312

作者简介 李晓娜,女,1985年生,博士研究生。主要从事森林生态学、景观生态学和全球气候变化研究。E-mail: xiaonali_20060429@163.com

责任编辑 杨弘
