

气候变化对中国大兴安岭森林演替动态的影响^{*}

程肖侠^{1,2} 延晓冬^{1*,*}

(¹ 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 应用森林生长演替动态模型-FAREAST,在气候变化背景下对大兴安岭漠河林区森林的演替动态进行了模拟。模拟选择了目前气候情景、增暖情景、温度和降水都增加情景3种气候情景,并考虑了气候变化引起的火干扰变化对森林演替的影响。结果表明:维持目前气候不变,兴安落叶松(*Larix gmelini*)将继续作为绝对优势树种,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、桦树(*Betula*)、杨树(*Populus*)伴生其中;气候发生变化,东北森林带将有北移的趋势,大兴安岭将可能以温带针阔混交林为主,森林群落中出现红松(*P. koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、椴树(*Tilia*)等树种;火干扰影响森林生物量及森林的物种组成和结构。

关键词 FAREAST;大兴安岭;气候变化;火干扰;森林演替

中图分类号 S718.5 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2007)08-1277-08

Effects of global climate change on forest succession in Daxing 'anling of Northeast China.

CHENG Xiao-xia^{1,2}, YAN Xiao-dong¹ (¹Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology* 2007 26(8):1277-1284.

Abstract: By using forest gap model FAREAST, the forest succession and the potential responses of some typical species to climate change in Daxing 'anling were simulated. Three climate change scenarios developed from GCM results, *i. e.*, current climate, warmer climate, and more precipitation and higher temperature, were selected, with the effects of climate-induced variations of fire frequency on forest succession taken into account. The results showed that if the current climate goes with no change, *Larix gmelini* will still be the dominant species companied with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *Betula* and *Populus*. If the climate changes, the forest belt in Northeast China will tend to move northward, and temperate broadleaved-coniferous mixed forest will have the chance to be dominant, *i. e.*, *Pinus koraiensis*, *Quercus mongolica* and *Tilia* will appear as new species. Fire disturbance has effects on forest biomass and its species composition and structure.

Key words: FAREAST; Daxing 'anling; climate change; fire disturbance; forest succession.

1 引 言

近200多年来,人类活动,尤其是工业化进程的迅速发展,所排放的温室气体,如CO₂、CH₄、N₂O、O₃和氟氯碳化物(CFC)等造成大气温室效应而导致全球增温,这种增暖效果会在不同尺度下导致森林的变化(Gates,1990;Shugart *et al.*,1992;Foley *et al.*,1994;Sykes & Prentice,1996)。森林生态系统作为

陆地生态系统的主体,其生态系统服务价值对生物生存具有重要意义。森林群落对气候变化的响应十分敏感,气候的微小扰动都可能对群落的结构和演替过程产生巨大影响。气候变化直接影响树木的生理过程(Prentice *et al.*,1992)和土壤水分有效程度(Bonan & Sirois,1992;Pastor & Mladenoff,1992),温度的增加也可通过影响有机质的矿化过程引起许多生态过程的改变(Pastor & Post,1988)。新的气候条件下,气候因素、土壤过程、树木个体的响应等诸多因素的结合,可以导致森林演替过程偏离目前的轨道(Guetter & Kutzbach,1990)。国内有研究认为,当

^{*} 国家自然科学基金项目(40675408)和国家重点基础研究发展规划资助项目(2006CB400500)。

^{**} 通讯作者 E-mail: yxd@tea.ac.cn

收稿日期:2006-10-20 接受日期:2007-05-06

温度增加 1℃, 北部落叶松、针叶松林面积将缩小, 落叶针叶林南部边缘北移了一个纬度; 当温度升高 3℃, 落叶针叶林消失, 全部被阔叶林所代替(钟秀丽和林而达 2000); 可见温度升高对森林的影响之大。而森林对于人类生存的重要意义使得其任何不利于人类的变化将给人类带来巨大损失。

尽管温室气体的增温效应及幅度大小具有很大的不确定性, 存在很多分歧(Shackley *et al.*, 1998), 但大气环流模型(GCMs)预测的未来气候变化的总体趋势基本趋于一致(刘国华和傅伯杰 2001)。目前已经有许多研究探索了森林系统对未来可能气候变化的响应(Solomon, 1986a, 1986b; Pastor & Post, 1988; Shugart & Smith, 1996; Mouillot *et al.*, 2002)。中国也在这方面做了不少有意义的研究, 如在中国东北长白山阔叶红松林中应用林窗模型成功的例子(Shao *et al.*, 1994; 郝占庆等, 2001); Yan 和 Zhao (1996)用 NEWCOP 模型评估了东北森林对未来可能气候变化的响应。另外, 还有研究用空间景观直观模型(LANDIS)(He *et al.*, 2002)对中国东北景观尺度森林演替进行了模拟研究。

在中国, 东北森林生态系统具有重要的意义, 是主要的木材来源地, 林副产品的生产在全国也占重要地位, 因此预测未来气候变化对它的影响并尽早采取必要适应措施具有重要的价值, 尤其是生态系统服务价值。本文采用已经在中国东北及俄罗斯远东地区进行验证校准的林窗模型—FAREAST(Yan & Shugart 2005), 评估大兴安岭漠河地区森林对未来可能气候变化的响应。在以前的研究中, 气候变化假定各月温度和降水都变化相同的值(He & Mladenoff, 1999a, 1999b; He *et al.*, 1999; 延晓冬和赵士洞 2000; 郝占庆等 2001)。林火作为森林演替过程一个重要的干扰因子, 在以往大兴安岭森林对气候变化响应的研究中, 很少考虑气候变化引起的火干扰频率和强度的变化对森林演替的影响。本研究采用全球环流模型预测未来 100 年该地区各月温度和降水的变化量, 并考虑气候变化对火干扰的影响, 在已有研究的基础上, 进一步模拟森林对气候变化的响应。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区概况

漠河地区位于大兴安岭北坡(52°10′—53°33′N, 121°07′—124°20′E), 平均海拔为 500 m。

本地区地处寒温带, 气候寒冷, 生长季短, 森林自然火比较频繁, 有永冻层。年平均气温在 -5.5℃, 年降水量在 460.8 mm。森林属于典型的寒温带针叶林, 森林结构比较单一, 以兴安落叶松(*Larix gmelini*)占绝对优势, 其次为樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、桦树(*Betula*)、杨树(*Populus*)等。

中国大兴安岭林区北部处于中国寒温带针叶林地带, 这里气候严寒, 降水较少, 是自然火的多发地区(徐化成 2004)。目前的研究中, 关于大兴安岭兴安落叶松林的火烧轮回期一般取为 150 年(延晓冬和赵士洞 2000)。1987 年特大森林火灾发生之后, 森林防火工作的加强导致中国东北林区的森林火周期延长。本研究不考虑人为因素的影响, 即不考虑人为防火工作对森林火灾发生频率的影响, 单纯考虑气候变化对森林火灾频率的影响。全球变暖将导致我国东北林区火险期延长, 高火险日数增加(田晓瑞等 2005), 这势必增加了火灾发生的可能性, 正如 IPCC 第三次报告中指出的: 如果没有气候政策的介入, 火灾对生态系统的扰动频率增加。所以, 本研究假定未来火灾频率加倍。

2.2 研究方法

2.2.1 FAREAST 模型 与所有的林窗模型一样, FAREAST 模型可以模拟从树木个体、森林斑块到森林景观的森林生态系统结构组成的数量特征。其主要方法是: 同时模拟多个森林斑块, 每个斑块是一个林窗大小的面积, 多个森林斑块的数量特征就是森林景观的数量特征; 模拟每个斑块中的每一株树木更新、生长和死亡, 这样, 森林斑块内所有树木生长状况的综合就是林分的数量特征(Shugart, 1984, 1998, 2003; Botkin, 1993)。

FAREAST 模型主要包括 5 个子模型: 生物气候模型、林冠模型、生长模型、死亡模型和更新模型。生物气候子模型应用月气候资料(月最温和月降水), 通过计算每日温度和更新的土壤水、碳、氮, 计算每一年的生物气候、土壤湿度和可利用养分, 模拟影响生态系统的生物气候变量以及影响树木生长和更新的土壤养分量; 林冠子模型计算叶的垂直分布和林冠高度, 计算各高度以上的累积叶面积指数; 生长子模型采用理想直径增长公式和实际直径增长公式(Botkin *et al.*, 1972; Leemans & Prentice, 1989), 模拟生物气候变量、土壤养分和光照条件对每株树的年胸径增长的影响, 计算每株树的年胸径增长。

$$\frac{dDBH}{dt} \Big|_{opt} = gDBH \frac{1 - \frac{DBH \cdot H}{D_m \cdot H_m}}{2H + D \frac{\partial H}{\partial DBH}}$$

$$\frac{dDBH}{dt} = \frac{dDBH}{dt} \Big|_{opt} \cdot f_L(H) f_T f_N f_D$$

式中 DBH (cm)为树木的胸径(130 cm 高处树木的直径) H 为树的高度 ; g 为一个标量参数 ; D_m (cm)和 H_m (m)分别为最大胸径和最大高度 ; $f_L(H)$ 、 f_T 、 f_N 、 f_D 分别为光照条件、温度、养分及干旱对树木生长的影响系数。更新子模型模拟生物气候变量、土壤养分和光照条件对幼树更新的影响 ,计算每年进入林地的幼树种类、数量和胸径大小。通过计算每年幼树的自然死亡以及种子发芽和抽芽对苗库进行年更新 ,种子库每年也会因为本地树种产生新种子、从斑块以外入侵的种子以及种子库中种子的死亡而进行更新 :

$$seedbank = seedlingbank \cdot NDE + sprouting + seedbank \cdot f_L(2) f_T f_N f_D$$

$$seedbank = seedbank \cdot NDS + invader + seed$$

式中 $invader$ (seeds · m⁻²)为每年从斑块以外入侵到研究斑块的种子数量 ; $seed$ (seeds · m⁻²)为本地树种每年产生的种子数 ; $sprouting$ (seedlings · m⁻²)为斑块内因抽芽产生的树苗数量 ; NDE 和 NDS 分别为苗库和种子库每年的成活系数。死亡子模型模拟每年林分内活生物量变成死生物量的过程 ,计算每年进入林地的凋落物量。一棵树每年的死亡概率是 (Shugart ,1984) :

$$P_n = 1 - \exp\left(\frac{-death}{AGE_{max}}\right)$$

式中 AGE_{max} 为最大自然生长年龄 ; $death$ 为群落中能够成活达到最大年龄的个体比例。

FAREAST 模型的树种参数数据库包含 44 个树种 ,将 44 个树种分为 12 个组 (表 1)。模型关于森林生态系统的模拟结果按 12 个组输出。关于各个树种的生物参数以及该模型更详细的介绍见文献 (Yan & Shugart 2005)。经验证该模型具有模拟中国东北地区和俄罗斯远东地区森林的组成、物理过程和演替格局的能力。由于模型主要以气候变量和环境参数为驱动变量 ,可用来估计可能的气候变化及环境变化对森林的影响。

表 1 FAREAST 模拟的树种和分组
Tab.1 Species and category of forest gap model ,FAREAST

组	树种	中文名
<i>Abies</i>	<i>A. holophylla</i> , <i>A. nephrolepis</i> , <i>A. sibirica</i>	冷杉
<i>Picea</i>	<i>P. koraiensis</i> , <i>P. ajanensis</i> , <i>P. abovata</i>	云杉
<i>Larix</i>	<i>L. gmelini</i> , <i>L. olgensis</i>	落叶松
<i>Pinus</i>	<i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> , <i>P. sibirica</i> , <i>P. pumila</i> , <i>P. koraiensis</i>	松树
其它针叶树	<i>T. orientalis</i> , <i>T. cuspidate</i>	其它针叶树
<i>Populus</i>	<i>P. suaveolens</i> , <i>P. maximowiczii</i> , <i>P. davidiana</i> , <i>P. tremula</i> , <i>P. koreana</i>	杨树
<i>Betula</i>	<i>B. platyphylla</i> , <i>B. mandshurica</i> , <i>B. costata</i> , <i>B. schmidtii</i> , <i>B. ermani</i> , <i>B. dahurica</i>	桦树
<i>Quercus</i>	<i>Q. mongolica</i>	蒙古栎
<i>Tilia</i>	<i>T. taquetii</i> , <i>T. amurensis</i>	椴树
<i>Fraxinus</i>	<i>F. rhynchophylla</i> , <i>F. mandshurica</i>	白蜡树
<i>Ulmus</i>	<i>U. propinqua</i> , <i>U. laciniata</i>	榆树
其它落叶阔叶树	<i>Phellodendron amurense</i> , <i>Juglans</i> <i>mandshurica</i> , <i>Acer ukurunduense</i> , <i>Kalopanax ricinifolium</i> , <i>Carpinus</i> <i>cordata</i> , <i>Micromeles alnifolia</i> , <i>Acer</i> <i>mandshurica</i> , <i>Alnus hirsute</i> , <i>Acer</i> <i>mono</i> , <i>Chosenia macrolepis</i> , <i>Maakia</i> <i>amurensis</i> , <i>Syringa robusta</i>	其它落叶阔叶树

2.2.2 模拟试验方法 IPCC 第三次报告指出 ,不同的气候模式预测认为全球平均地面气温在 1991—2100 年将升高 1.4 ℃ ~5.8 ℃ ,预测 21 世纪全球平均年降水量会增加。在 CO₂ 加倍 ,全球变暖的背景下 ,为了检验气候变化对漠河森林的潜在影响 ,本研究采用大气环流模型 ECHAM5-OM 预测的未来 100 年后该地区温度和降水的变化量 (表 2) ,设计了 3 种模拟方案 : S_0 为目前气候情景 ,即维持该地区当前的温度和降水条件不变 ; S_1 为增暖情景 ,假定未来 100 年内该地区各月温度增加 ,降水维持当前气候条件下的降水量不变 ; S_2 为温度和降水都增加情景 ,该地区未来温度和降水都发生变化。100 年内各月温度和降水增值见表 2。同时 ,研究考虑气候变化引起的火干扰变化对森林生态系统的影响。资料表明 ,目前气候条件下该地区林火周期是 150 年左右 (郑焕能等 ,1986 ;冯林 ,1989 ;李景文 ,1993)。为了说明气候变化引起的火频率变化对森林结构和动态的影响 ,本研究首先假定气候变化之后林火频率不发生变化 ,单纯考虑气候因素 ,模拟气候变化对森林演替的影响 ;其次假定林火频率在气候变暖的背景下加倍 ,即在加倍的林火频率下模拟

表 2 ECHAM5-OM 预测的未来 100 年后漠河地区各月温度和降水的变化量

Tab.2 Monthly changes of temperature and precipitation in 100 years in Mohe simulated by ECHAM5-OM

月份	变化量		月份	变化量	
	温度 (℃)	降水 (mm)		温度 (℃)	降水 (mm)
1	2.69	4.08	7	1.07	7.75
2	3.83	2.31	8	1.7	37.11
3	4.78	5.73	9	1.71	-2.38
4	3.01	6.13	10	2.17	22.71
5	2.77	2.14	11	2.37	-2.59
6	1.48	42.00	12	2.52	0.77

表 3 试验概括

Tab.3 Test summary

气候情景	试验设计	试验描述
目前气候情景(S_0)	CON	控制试验,维持当前的温度和降水条件不变
增暖气候情景(S_1)	S_1 NF	未来 100 年各月温度增加,火频率不变
	S_1 F	未来 100 年各月温度增加,火频率加倍
温度降水都增加情景(S_2)	S_2 NF	未来 100 年各月温度和降水都增加,火频率不变
	S_2 F	未来 100 年各月温度和降水都增加,火频率加倍

气候变化对森林演替的影响。探索火和气候变化耦合对森林结构组成的影响。所有的试验描述见表 3。

研究以现有林为基础,模拟时间尺度为 1 600 年,前 1 000 年森林从裸地开始生长达到平衡,作为气候变化森林演替的基础林型。之后经历 100 年的

气候变化过渡期,在这 100 年内设定每年各月温度和降水以 1% 的速率变化,之后气候达到平衡,平衡气候下再模拟 500 年。

为了说明火干扰因子对森林树种组成的影响,用火灾频率加倍试验的模拟结果减去火灾频率不变试验的模拟结果,探讨火干扰因子在森林生态系统中的重要性。例如 S_1 F- S_1 NF 就得到了气候增暖背景下,火频率加倍对森林生态系统的影响。

3 结果与分析

3.1 森林对气候变化的响应

3.1.1 气候不变情景(S_0) 控制试验(CON)的模拟结果表明(图 1),维持目前气候情景(S_0)不变,

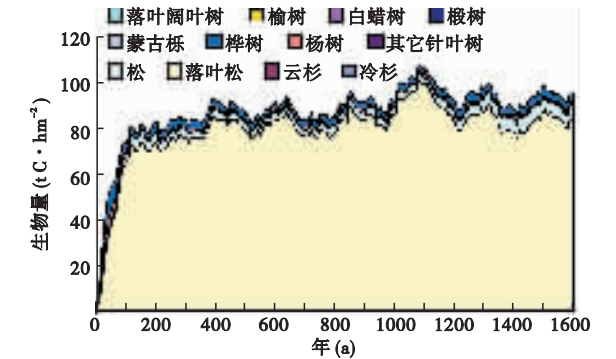


图 1 控制试验(CON)得到的漠河森林依生物量表示的组成变化动态

Fig.1 Composition dynamics of Mohe forest resulted from CON by biomass

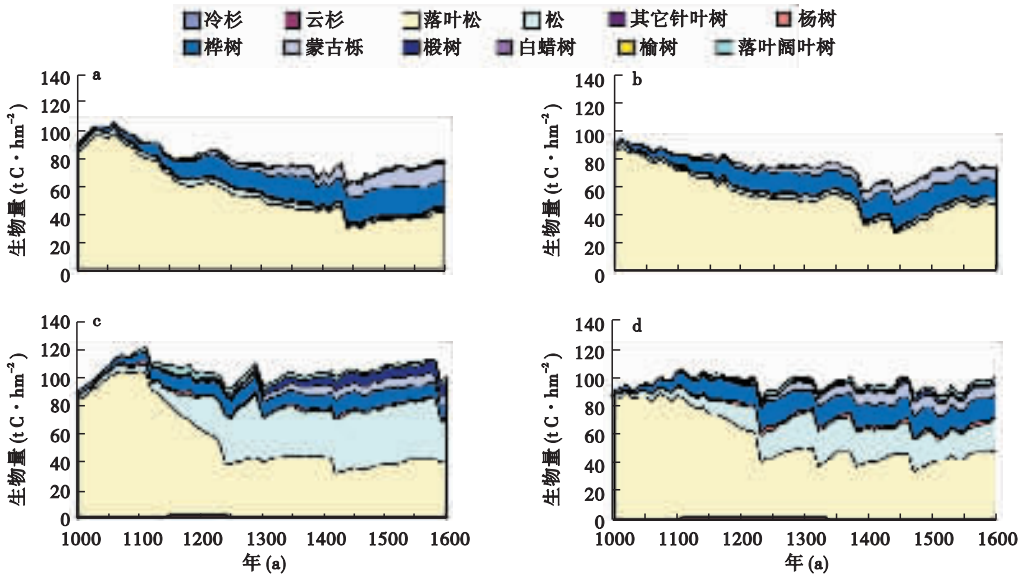


图 2 不同试验下漠河现有森林依生物量表示的未来组成变化动态

Fig.2 Composition dynamics of Mohe forest by biomass under four different tests

a 试验 S_1 NF 增暖情景,维持目前的火频率不变;b 试验 S_1 F 增暖情景,火频率加倍;c 试验 S_2 NF,考虑降水增加,维持目前火频率不变;d 试验 S_2 F 考虑降水增加,火频率加倍。

落叶松(*Larix*)仍然是主要树种,其生物量大概为 $83 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$,占森林群落总生物量的 90%,在大兴安岭地区,落叶松树种主要是兴安落叶松(*L. gmelini*),兴安落叶松是该地区的绝对优势树种。

由图 1 可以看出,除了主要树种落叶松之外,还伴生着松树(*Pinus*)、桦树及极少量杨树。实际观测表明,在大兴安岭地区,落叶松林的伴生树种松树,主要是樟子松。

3.1.2 气候变化情景(S_1 , S_2) 温度增加,火灾频率不变,模拟结果表明(图 2a),大兴安岭漠河地区森林的优势种落叶松生物量下降,在林分中所占的比例也下降,伴生树种桦树生物量增加,其它伴生树种的生物量变化不大,森林群落中出现新生树种蒙古栎,其生物量在气候增暖之后逐渐增加,表明森林斑块中阔叶树的比重加大。假设气候增暖后林火频率加倍,降水不发生变化,即试验 S_1F (图 2b),森林群落的生物量变化及树种组成和结构变化与增暖情景下火灾频率不变试验模拟的变化趋势是一致的。优势树种落叶松的生物量及其在森林斑块中的比例下降,桦树生物量增加,同时出现蒙古栎,森林斑块中阔叶树比重加大。

气候增暖的基础上,降水变化对森林生物量和森林树种组成的影响见图 2。维持当前的火灾频率不变(S_2NF),该地区的优势树种落叶松生物量下降,在森林群落中所占的百分比低于 40%,小于增暖情景下所占的比例,松树和桦树的生物量增加,其中松树的生物量变化尤为明显,其生物量占森林总生物量的百分比和落叶松所占的百分比差不多,是对降水变化响应最敏感的树种,在林分中已经占重要地位;另外,林分中出现了蒙古栎、椴树等树种。森林群落中桦树、蒙古栎、椴树等阔叶树比重加大,松树的生物量大幅度增加(图 2c)。如果假设未来火灾频率加倍(S_2F),模拟结果见图 2d,群落中落叶松的生物量也是呈下降的趋势,松树和桦树生物量增加,落叶松仍然是主要树种,林分中出现蒙古栎和椴树。当前火灾频率和火灾频率加倍 2 个试验中,其它一些落叶阔叶树在森林群落中的生物量也小幅度增加。可以看出,温度和降水都变化,森林树种组成由原来的落叶松为主变为阔叶树和松树的比重增加,大大改变了原来的树种组成。

对于同一组的树种来说,其生长环境不尽相同,适宜生长的气候条件也不同,如樟子松和红松(*P. koraiensis*)同属松类树种,但樟子松是大兴安岭林区

的树种,而红松则是小兴安岭和长白山林区的主要树种。由前面的结果可知,落叶松林中的松树主要是樟子松,增暖背景下,如果考虑降水的变化,松树的生物量大幅度增加。根据樟子松的生物学特性,变化的气候对于樟子松的生存竞争能力来说并不有利。所以,研究进一步从树种的角度模拟了松树对气候变化的响应。图 3 显示了不同试验模拟的东北地区松树树种的生物量以及其在森林群落中的比例随时间的变化。可以看出,气候变化之前,大兴安岭地区主要的松树树种是樟子松,其生物量维持在 $3 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,森林群落中没有红松树种,其生物量为 0。温室效应引起气候变化,增暖情景(S_1NF 和 S_1F)的模拟结果见图 3a 和图 3b,可以看出,气候增暖之后,当前火灾频率和火灾频率加倍 2 种干扰情况下,红松和樟子松的生物量变化不大,基本维持目前的生物量大小。考虑降水的变化(S_2NF 和 S_2F)现有森林群落里樟子松生物量在气候变化之后变化不大,红松的生物量在当前火灾频率和加倍火灾频率 2 种火干扰频率下的生物量都明显增加(图 3c 和图 3d),表明温度和降水的增加改善了红松的生长条件,增强了红松的生长竞争力,引起红松在该地区的生长。所以,图 2 显示森林群落里松树树种生物量的变化主要是因为红松在林分组成中生物量的变化引起的。表明气候变暖降水增加的背景下,红松有成为大兴安岭地区森林主要树种的趋势。

气候增暖、温度和降水增加 2 个气候变化情景下 4 个试验的模拟结果表明,大兴安岭漠河地区森林树种组成将发生很大变化。原有优势树种兴安落叶松生物量减小,森林群落中阔叶树的比重加大,同时出现小兴安岭林区和长白山林区的树种,如红松、椴树、蒙古栎等,这些树种的生物量在全球变暖背景下增加,表明东北地区森林带有北移的趋势。这种现象与各个树种的生物学特性有关。兴安落叶松是寒温带针叶林地区最有代表性的树种(徐化成, 1998),那里气候寒冷,生长季短,温度增加后,破坏了兴安落叶松生长环境的平衡。蒙古栎是栎属植物中最抗寒的一种,但在大兴安岭地区,气温对它已经有些过低,所以本地区的蒙古栎生长比在小兴安岭和长白山都差,正是蒙古栎的这种生活特性,未来气候变暖,为蒙古栎提供了合适的生长条件。同时,蒙古栎是演替后期阶段林分的优势树种。椴树和一些落叶阔叶树是温带针阔混交林和暖温带落叶阔叶林中常见的伴生树种,气候变暖,有利于这些树生长,

其生物量增加。红松是我国东北地区温带针阔混交林的后期优势树种,目前气候条件下大兴安岭地区的气候条件与小兴安岭和长白山地区相比较,温度偏低,降水偏少,所以温度增加和降水增多有利于红松生长,其生物量增加。

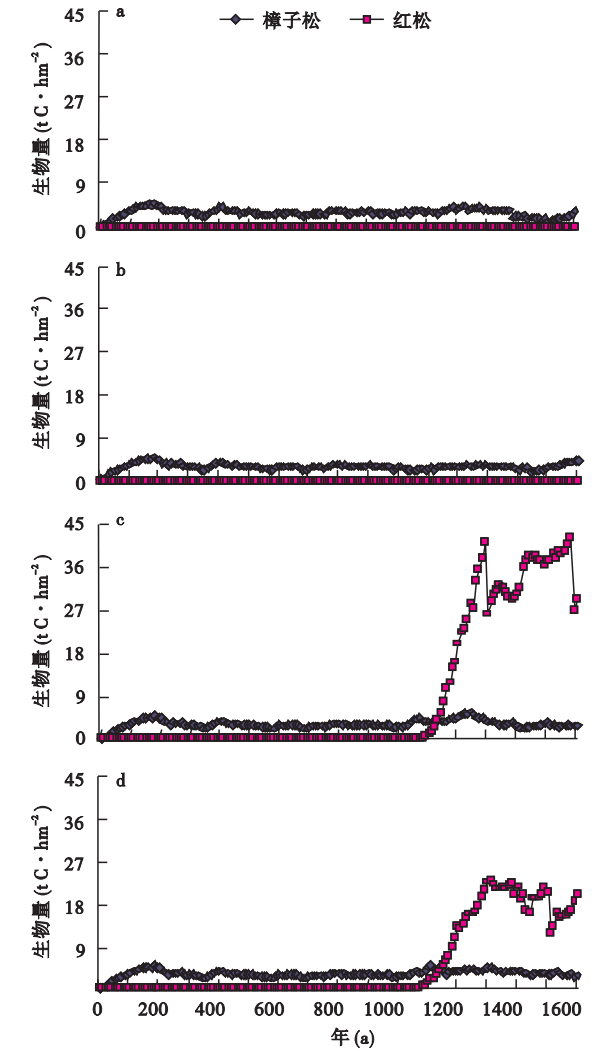


图 3 依生物量表示的松树树种的变化动态

Fig.3 Succession dynamics of *Pinus* by biomass

a. 试验 S_1NF 增暖情景,维持目前的火频率不变 b. 试验 S_1F 增暖情景,火频率加倍 c. 试验 S_2NF 考虑降水增加,维持目前火频率不变 d. 试验 S_2F 考虑降水增加,火频率加倍。

3.2 火干扰的影响

3.2.1 对森林总生物量的影响 图 4 显示了增暖 (S_1)、温度和降水增加 (S_2) 2 种气候变化情景下,火灾频率加倍对森林总生物量的影响。模拟结果表明,林火频率加倍后,森林总生物量除了在某些年份增加之外,基本上减少,尤其是在温度和降水都增加情景下,减小的幅度更明显。这是因为该气候情景下,森林群落中出现了红松、椴树和一些抗火性弱的

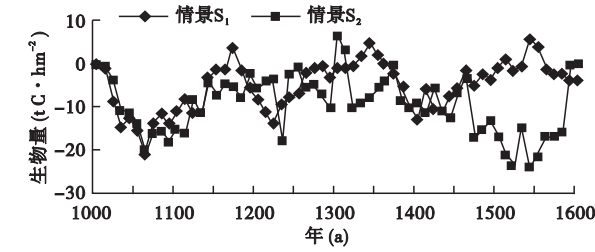


图 4 火频率加倍引起的森林总生物量在 2 种气候情景下的变化

Fig.4 Change of total biomass caused by doubled fire frequency under two scenarios

落叶阔叶树等树种,并且这些树种在森林中占据重要位置。增暖情景下,森林树种组成主要是落叶松和蒙古栎,这 2 个树种抗火性都比较强,所以森林总生物量的减少量较低。在增暖情景和温度与降水都变化情景下,减少量最大值分别达到了 20 和 24 $t C \cdot hm^{-2}$ 左右。可以看出,无论哪个气候情景下,火对森林总生物量的影响都很大。

3.2.2 对各组树种生物量的影响 气候增暖 (S_1)、温度和降水增加 (S_2) 2 种气候情景下,林火频率加倍引起试验中 12 组树种生物量的变化见图 5。模拟结果表明,2 个气候情景下,因为林火频率加倍,落叶松的生物量比当前林火频率下的生物量都增加,且增暖情景下增加更明显,增加量达 8 $t C \cdot hm^{-2}$ 左右;温度与降水都增加情景下,增加量约为 5 $t C \cdot hm^{-2}$,表明林火频率增加有利于落叶松的生长。这是因为在大兴安岭地区,兴安落叶松可以说是抗火性最强的树种,所以频繁的林火烧死了大量抗火性弱的树种,兴安落叶松却得以存活。气候增暖,松树生物量增加,增加量不大;温度和降水都增加,其生物量却大幅度下降,约减少 21.5 $t C \cdot hm^{-2}$ 左右。这是因为在温度和降水都增加情景下,松树

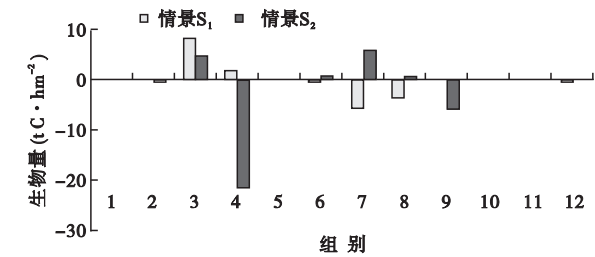


图 5 火频率加倍引起的 12 组树种生物量在 2 种气候情景下的变化

Fig.5 Biomass change of category caused by doubled fire frequency under two scenarios

1 冷杉 2 云杉 3 落叶松 4 松树 5 其它针叶树 6 杨树 7 桦树; 8 蒙古栎 9 椴树 10 白蜡树 11 榆树 12 其它落叶阔叶树。

以红松为主,由于红松的抗火性弱,导致其生物量在林火频率加倍后大幅度降低,所以林火频率加倍导致松树生物量比例降低主要是因为红松生物量比例降低。桦树在增暖情景下因林火频率增加导致其生物量减小 $5 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,温度和降水都增加情景下林火频率加倍导致其生物量增加。2 个情景下林火频率加倍对桦树生物量的影响截然相反。这是因为未来气候升温,森林树种组成以落叶松为主,林火频率加倍烧死部分兴安落叶松,但却烧掉了枯枝落叶,为落叶松的更新提供了有利条件,而对于火后萌芽力很强的桦树来说,没有足够的空间,落叶松的生长竞争能力大于桦树的,所以桦树生物量比例降低;考虑降水变化情景,落叶松在森林群落中仍然占很大比例,但同时森林群落中出现了红松、椴树等抗火性弱的树种,且红松已经占据了很大比重,这样林火频率加倍烧死了大量抗火性弱的树种,火烧迹地为桦树提供了比较有利的生长环境,所以桦树比例增加。无论怎样,林火频率加倍都将引起桦树在群落中生物量的变化。林火频率加倍也影响蒙古栎的生物量,增暖情景下蒙古栎生物量减小,增暖且降水增加情景下蒙古栎生物量增加,但幅度很小。蒙古栎树皮厚,抗火性强,并且火后萌芽能力也强,增暖情景下由于抗火性同样很强的落叶松作为森林群落的优势树种,林火频率加倍只能烧死少量的落叶松,其生长竞争能力强于蒙古栎,所以蒙古栎生物量比例在林火频率加倍后降低。温度和降水都增加情景下,森林群落中阔叶树占较大比例且出现了一些抗火性弱的树种,如红松,林火频率加倍烧死抗火性弱的树种,为蒙古栎提供了有利的生长环境,所以其生物量比例增加。椴树在温度和降水都增加情景下生物量因为林火频率加倍减小了约 $6 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,增暖情景下其生物量小幅度减小。此外,云杉、杨树及一些落叶阔叶树的生物量在林火频率加倍后也发生了变化,但幅度很小。

通过以上分析可知,气候变化背景下,林火频率加倍,森林群落总生物量和各类树种的生物量、以及森林树种组成都将发生明显变化,林火干扰对森林的树种组成和结构有重要作用,一定条件下火频率的改变甚至可以改变森林群落中主要树种的地位。所以,正确认识森林生态系统的演替规律必须考虑火的作用,只有将火干扰状况与树种特性紧密结合起来,才能比较全面地认识森林的结构动态变化规律。因此,全球变暖的背景下,在模拟气候变化对森

林演替的影响的研究中,考虑气候变化引起的林火频率变化对森林的影响,具有重要意义。

4 讨 论

FAREAST 对中国东北大兴安岭森林现有林分的模拟试验表明,维持目前的气候状态,该林区森林将维持目前的优势树种的地位,森林的总生物量或保持动态平衡,或有小幅上升,这与目前观察到的现象和现有理论相符(Shugart *et al.*, 1984)。通过对目前火频率下 2 种气候变化情景对森林演替的影响和火频率加倍后 2 种气候变化情景对森林演替的影响模拟结果的比较,表明全球变暖背景下,大兴安岭地区森林结构将发生很大变化,该地区的优势种兴安落叶松生物量下降,蒙古栎、桦树、椴树等阔叶树在森林中占的比重将加大。如果考虑降水增加的作用,群落中将出现红松树种。从森林群落对这些可能气候变化的响应可以推测,东北森林分布带将有北移的趋势,大兴安岭将可能以温带针阔混交林为主。气候增暖火频率增加,森林生态系统的生态环境将发生变化,树种在森林群落中的竞争能力也发生变化,火干扰在很大程度上影响森林的树种组成和结构。因此,研究气候变化对森林演替的影响,考虑火干扰的影响,对于正确合理制定森林管理措施具有重要意义。

Gap 模型在过去模拟森林演替动态的研究中被证明是非常有效的,但是因为 Gap 模型在模拟时主要考虑的是气候因素,认为气候与物种和森林之间存在着一种平衡关系,因此其结果认为气候变化能立即导致物种和森林的位移。然而,实际上物种对气候变化的响应往往滞后于气候变化的速率。此外,物种对气候变化的适应还受其迁移能力、迁移速率和地形及地貌的影响。因此,即使一些地方的气候适于物种的生存,但可能因自然景观的隔离而使物种不能到达,从而可能造成物种的灭绝。当前的预测模拟很少或者没有考虑物种耐性、迁移能力、迁移速率以及迁移障碍等因素的影响(刘国华和傅伯杰, 2001)。因此,只能说气候变化使得大兴安岭地区的气候变得适合于红松和桦树、蒙古栎,以及其它一些落叶阔叶树等树种的生存,增强了这些树种在该林区的竞争能力,但这些物种是否能够及时到达该地区并不确定。下一步模拟将讨论种子迁移问题,以便于在未来气候快速变化的情况下,科学管理森林生态系统,合理实施天然林保护工程和植树造林工程。

参考文献

- 冯林. 1989. 内蒙古森林. 北京: 中国林业出版社.
- 郝占庆, 代力民, 贺红士. 2001. 气候变暖对长白山主要树种的潜在影响. 应用生态学报, **12**(5): 653-658.
- 李景文. 1993. 黑龙江森林. 北京: 中国林业出版社.
- 刘国华, 傅伯杰. 2001. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报, **16**(1): 71-78.
- 田晓瑞, 舒立服, 王明玉. 2005. 林火动态变化对我国东北地区森林生态系统的影响. 林火研究, (1): 21-25.
- 徐化成. 1998. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社.
- 徐化成. 2004. 森林生态与森林系统经营. 北京: 化学工业出版社.
- 延晓冬, 赵士洞. 2000. 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, **24**(1): 1-8.
- 郑焕能, 贾松清, 胡海清. 1986. 大兴安岭的林火与森林恢复. 东北林业大学学报, **14**(1): 1-7.
- 钟秀丽, 林而达. 2000. 气候变化对我国自然生态系统影响的研究综述. 生态学杂志, **19**(5): 62-66.
- Bonan GB, Sirois L. 1992. Air temperature, tree growth, and the northern and southern range limits of *Picea mariana*. *Journal of Vegetation Science*, **3**: 495-506.
- Botkin DB. 1993. Forest Dynamics: An Ecological Model, Oxford: Oxford University Press.
- Botkin DB, Janak JF, Wallis JR. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, **60**: 849-872.
- Foley JA, Kutzbach JE, Coe MT, et al. 1994. Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch. *Nature*, **371**: 52-54.
- Gates DM. 1990. Climate change and forests. *Tree Physiology*, **7**: 1-5.
- Guetter PJ, Kutzbach JE. 1990. A modified Koppen classification applied to model simulations of glacial and interglacial climates. *Climate Change*, **16**: 193-215.
- He HS, Mladenoff DJ. 1999a. Effects of seed dispersal in the simulation of long-term forest landscape change. *Ecosystems*, **2**: 308-319.
- He HS, Mladenoff DJ. 1999b. Spatially explicit and stochastic simulation of forest landscape fire and succession. *Ecology*, **80**: 80-99.
- He HS, Mladenoff DJ, Crow TR. 1999. Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming. *Ecological Modelling*, **112**: 213-233.
- He HS, Hao Z, Larsen DR, et al. 2002. A simulation study of landscape scale forest succession in northeastern China. *Ecological Modelling*, **156**: 153-166.
- Leemans R, Prentice IC. 1989. FORSKA, A General Forest Succession Model. Uppsala: Institute of Ecological Botany.
- Mouillot F, Rambal S, Joffre R. 2002. Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. *Global Change Biology*, **8**: 423-437.
- Pastor J, Mladenoff DJ. 1992. The southern boreal-northern hardwood forest border// Shugart RL, Bonan GB, eds. A Systems Analysis of the Global Boreal Forest. Cambridge: Cambridge University Press: 216-240.
- Pastor J, Post WM. 1988. Response of northern forests to CO₂-induced climate change. *Nature*, **334**: 35-38.
- Prentice IC, Gramer W, Harrison SP, et al. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, **19**: 117-134.
- Shao GF, Schall P, Weishampel JF. 1994. Dynamic simulation of mixed broadleaved *Pinus koraiensis* forests in the Changbaishan Biosphere Reserve of China. *Forest Ecology and Management*, **70**: 169-181.
- Shackley S, Young P, Parkinson S, et al. 1998. Uncertainty, complexity and concepts of good science in climate change modeling: Are GCMs the best tools? *Climatic change*, **38**: 159-205.
- Shugart HH. 1984. A Theory of Forest Dynamics. New York: Springer-Verlag.
- Shugart HH, Smith TM. 1996. A review of forest patch models and their application to global change research. *Climate Change*, **34**: 131-153.
- Shugart HH, Smith TM, Post WM. 1992. The application for application of individual-based simulation models for assessing the effects of global change. *Annual Reviews of Ecology and Systematics*, **23**: 15-38.
- Shugart HH. 1998. Terrestrial Ecosystems in Changing Environments. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shugart HH. 2003. A theory of forest dynamics: The Ecological Implications of Forest Succession Models. Caldwell, NJ: Blackburn Press.
- Sykes MT, Prentice IC. 1996. Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer/hardwoods zone of Northern Europe. *Climatic Change*, **34**: 161-177.
- Solomon AM. 1986a. Transient response of forest to CO₂ induced climate change: Simulation modeling experiments in eastern North America. *Oecologia*, **68**: 567-579.
- Solomon AM. 1986b. Transient response of terrestrial C storage to climate change: Modeling C dynamics at varying temporal and spatial scales. *Water, Air & Soil Pollution*, **64**: 307-326.
- Yan XD, Zhao SD. 1996. Simulating the response of Changbai Mt. forest to potential climate change. *Journal of Environmental Science*, **8**: 354-366.
- Yan XD, Shugart HH. 2005. FAREAST: A forest gap model to simulate dynamics and patterns of eastern Eurasian forests. *Journal of Biogeography*, **32**: 1641-1658.

作者简介 程肖侠 女, 1980年生 硕士研究生. 主要从事气候变化对森林生态系统影响的研究. E-mail: chengxx@tea.ac.cn
责任编辑 李凤芹