

气候变化对中国东北主要森林类型的影响

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 100049)

摘要:应用林窗模型-FAREAST, 模拟未来气候变化对中国东北主要类型森林演替动态的影响。根据大气环流模型 ECHAM5-OM 和 HadCM3 预测的气候变化资料, 模拟选择了目前气候情景、增暖情景、增暖且降水变化情景 3 种气候情景。结果表明: 维持目前气候不变, 东北森林树种组成和森林生物量基本维持动态平衡。气候增暖不利于东北主要森林类型生长, 主要针叶树种比例下降, 阔叶树比例增加; 温带针阔混交林垂直分布带有上移的趋势; 增暖幅度越大, 变化越明显。气候增暖基础上考虑降水变化, 东北森林水平分布带有北移的趋势, 降水对低海拔温带针阔混交林影响不大。

关键词:FAREAST; 中国东北; 气候变化; 森林动态

文章编号: 1000-0933(2008)02-0534-10 中图分类号: Q142, Q948, S718.1 文献标识码: A

Effects of climate change on typical forest in the northeast of China

CHENG Xiao-Xia^{1,2}, YAN Xiao-Dong^{1,*}

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0534 ~ 0543.

Abstract: By using the forest gap model-FAREAST, we simulated the effects of climate changing in future on forest composition and forest biomass of typical forest type in northeast of China. We chose three different climate change scenarios developed from GCMs results of ECHAM5-OM and HadCM3: current climate, warmer climate and the state of changing precipitation with higher temperature. The results show as follows, if the climate goes with no change, northeastern forest composition and forest biomass will maintain dynamic balance. Warmer climate is unadvantaged to major forest type in the northeast of China, The percentage of major conifers decrease, along with the percentage increase of some broadleaf trees. The Mixed broad-leaved tree species/Korean pine forest belt in temperate zone will tend to move up. And more warmer, more distinct. Taken account of rainfall further, the forest belt of northeast of China will tend to move northward, rainfall has a little effect on the Mixed broad-leaved tree species/Korean pine forests in temperate zone.

Key Words: FAREAST; northeast China; climate change; forest dynamic

近百年来(1880 ~ 1990 年), 全球平均气温上升了 0.55℃, 全球平均降水量增加了 21mm^[1]。根据政府间

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2006CB400500); 国家自然科学基金资助项目(40675048)

收稿日期:2006-12-06; **修订日期:**2007-07-03

作者简介:程肖侠(1980 ~), 女, 陕西韩城人, 硕士生, 主要从事气候变化对森林演替的影响研究; E-mail: shuishixiaoyue@hotmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxd@tea.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Key Basic Research Program of China (No. 2006CB400500); National Natural Science Foundation of China (No. 40675048)

Received date: 2006-12-06; **Accepted date:** 2007-07-03

Biography: CHENG Xiao-Xia, Master candidate, mainly engaged in the effects of climate change on forest succession; E-mail: shuishixiaoyue@hotmail.com

气候变化委员会 IPCC 的最新预测表明:到 2100 年全球平均温度将增加 1.4 ~ 5.8℃,比 20 世纪观测到的增温幅度高 2 ~ 10 倍,降水和云格局也会发生改变^[2]。这种增暖效果会在不同尺度下导致森林的变化^{[3][4][5][6]}。国内有研究认为,当温度增加 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^[7];可见对森林的影响之大。而森林对于人类生存至关重要的意义使得其任何不利于人类的变化都将给人类带来巨大的损失。

目前国内外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。Pastor 和 Post^[8]、Shugart 和 Smith^[9]研究了未来可能气候变化对森林的影响;Solomon^[10]用 FORENA 模拟了美国 CO₂ 浓度的升高引起的气候变化对森林的影响。在国内,延晓冬和赵士洞^[11]用 NEWCOP 模型评估了东北森林对未来可能气候变化的响应;邓慧平和吴正方等^[12]应用林窗模型模拟了气候变化对小兴安岭阔叶红松林的影响;郝占庆和贺红士^[13]等应用 LINKAGES 模型模拟了气候变暖对长白山主要树种的潜在影响。

中国东北地区是我国重要的木材生产基地,大兴安岭林区的落叶松林以及小兴安岭和长白山林区的针阔混交林是东北地区典型的森林类型,森林未来的演替动态对人民的生产生活有很大的影响,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,也是林业部门长期经营计划的依据。本研究采用全球环流模型预测的未来 100a 该地区各月温度和降水的变化量,在已有研究的基础上,更全面,更系统,更直观地模拟分析中国东北主要类型森林对气候变化的响应。

1 研究区概况

中国东北森林分布于中国东北广大的山区,是中国最大的商品木材提供者。森林分布范围北起 53.30°N 的黑龙江,南抵 40°N 的辽宁,东起 135°E 的乌苏里江,西至 119°E 的额尔古纳河。森林类型主要是位于大兴安岭北部山地的大兴安岭针叶林区;以及东北东部山地针叶落叶阔叶林区,包括小兴安岭、张广才岭、完达山及长白山等几个主要林区。

大兴安岭林区属于“寒温带针叶林区域”,森林树种以兴安落叶松为主,其它树种有白桦、蒙古栎、樟子松、山杨、黑桦等阔叶树;小兴安岭林区在植被区划上属于“温带针阔混交林区域”,森林树种以红松为主要树种,其它还有兴安落叶松、鱼鳞云杉、红皮云杉、冷杉等针叶树和蒙古栎、白桦、黑桦、水曲柳、春榆、山杨、椴树等阔叶树;长白山林区森林和小兴安岭林区森林一样属于温带针阔混交林区域,红松阔叶混交林是主要森林群落,主要树种为红松、紫椴、水曲柳、槭树、榆树和栎树等。

本研究选取了 6 个站点:属于大兴安岭森林的漠河、图里河和嫩江地区森林,属于小兴安岭森林的伊春地区森林,以及长白山地区森林和植物成分属长白山系的尚志地区森林(表 1)。以此 6 个地区森林群落在未来气候变化条件下的演替趋势,说明中国东北地区主要类型森林对气候变化的响应。

表 1 研究区概况

Table 1 Some information about simulated sites

站点 Site	漠河 Mohe	图里河 Tulihe	嫩江 Nenjiang	伊春 Yichun	尚志 Shangzhi	长白山 Changbaishan
纬度 Lat(°N)	53.48	50.48	49.17	47.73	45.22	42.2
经度 Lon(°E)	122.35	121.68	125.23	128.92	127.97	127.95
海拔 Elev(m)	500.0	700.0	500.0	400.0	700.0	740.0
森林类型 Forest	针叶林 Coniferous forest	针叶林 Coniferous forest	针叶林 Coniferous forest	针阔混交林 mixed broadleaf- conifer forest	针阔混交林 mixed broadleaf- conifer forest	针阔混交林 mixed broadleaf- conifer forest

2 研究方法

2.1 林窗模型

本研究使用的模型是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^[14],该模型能够准确再现中国东北地区顶级森林的树种组成及其在东北地区的垂直分布规律和水平分布规律;还具有对

现有森林的跟踪模拟能力^[11]。

该模型主要包括 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。生物气候子模型主要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;更新模型计算每年进入林地的幼树种类、数量和胸径大小;死亡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。模型中的主要方程有胸径增长方程、树木可获得光照方程、死亡率方程以及更新方程等,这些方程中的参数是通过许多专家的野外工作得到的,经过全世界不同地点的使用证明了其可靠性^[15]。模型所用公式和参数见表 2,引自文献^[14]。

表 2 FAREAST 模型的主要公式
Table 2 Formulas of forest gap model, FAREAST

理想胸径增长方程 Optimal diameter increment formula	$\left. \frac{dDBH}{dt} \right _{opt} = gDBH \frac{1 - \frac{DBH \cdot H}{D_m \cdot H_m}}{2H + D \frac{\partial H}{\partial DBH}}$
实际胸径增长方程 Actual diameter increment formula	$\frac{dDBH}{dt} = \left. \frac{dDBH}{dt} \right _{opt} \cdot f_L(H) f_T f_N f_D$
可获得光照方程 Available light formula	$I(Z) = I(0) e^{-kLAI(Z)}$
死亡率方程 Death probability formula	$P_n = 1 - \exp\left(\frac{-death}{AGE_{max}}\right)$
种子库更新方程 Seedbank regeneration formula	$seedbank = seedbank \cdot NDS + invader + seed$
苗库更新方程 Seedlingbank regeneration formula	$seedlingbank = seedlingbank \cdot NDE + sprouting + seedbank \cdot f_L(Z) f_T f_N f_D$

胸径增长方程中的参数 DBH (cm) 是树木的胸径(130cm 高处树木的直径); H 是树的高度; g 是一个标量参数; D_m (cm) 和 H_m (m) 分别是最大胸径和最大高度; $f_L(H)$, f_T , f_N , f_D 分别是光照条件、温度、养分及干旱对树木生长的影响系数。可获得光照方程中 $I(Z)$ 表示高度 Z 处的有效光; k 是消光系数; $LAI(Z)$ 是叶面积指数。死亡率方程中 AGE_{max} 是最大自然生长年龄, $death$ 表示群落中能够成活达到最大年龄的个体的比例。更新方程中 $invader$ (seeds m^{-2}) 表示每年从斑块以外入侵到研究斑块的种子数量; $seed$ (seeds m^{-2}) 是本地树种每年产生的种子数; $sprouting$ (seedlings m^{-2}) 表示斑块内因抽芽产生的树苗数量; NDE 和 NDS 分别是苗库和种子库每年的成活系数。

2.2 试验设计和数据资料

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^[16],但是大气环流模型(GCMs)预测未来气候变化的总体趋势基本趋于一致^[17]。全球变暖背景下,近 100a 来中国年平均地表气温增加,近 50a 增暖尤其明显,降水量变化趋势不显著,但年代际波动较大。近 47a (1956 ~ 2002 年) 全国平均年降水量呈现增加趋势,但是年降水量趋势变化存在明显的区域差异,本文所研究区域东北地区 1956 ~ 2000 年间降水变化情况为:东北北部地区降水量有一定程度的增加,东北南部地区年降水量出现下降趋势^[18]。结合对中国东北近 50a 气候变化情况的分析,本研究选择大气环流模型 ECHAM5-OM 和 HadCM3 对中国东北未来气候变化的预测数据,模拟气候变化对中国东北主要类型森林的潜在影响。研究设计了 3 种模拟方案:(s0) 当前气候情景(本底气候情景),即维持该地区当前的温度和降水条件不变;(s1) 增暖情景,假定未来 100a 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;(s2) 增暖且降水变化情景,即未来 100a 该地区温度和降水都发生变化。分别在这 3 种模拟方案下研究气候变化对森林的影响。

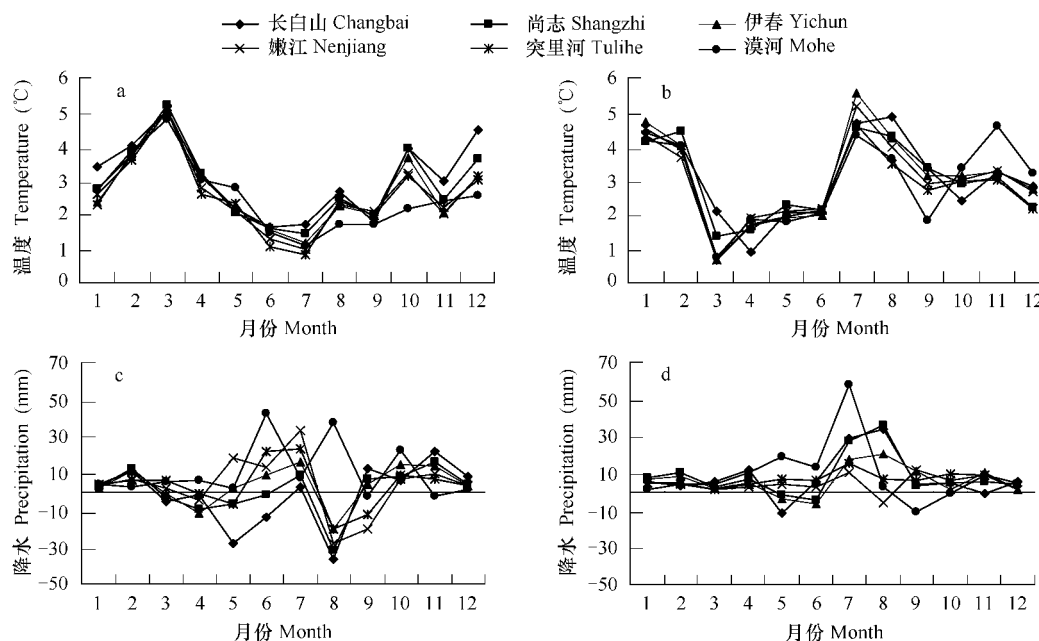


图1 环流模型 ECHAM5-OM 和 HadCM3 预测的 6 个站点未来 100a 后温度和降水的变化

Fig. 1 The change of temperature and precipitation simulated by ECHAM5-OM and HadCM3 after 100 years at the simulated sites

两个环流模型在 CO_2 加倍条件下预测中国东北 6 个站点 100a 后温度和降水的变化见图 1。可以看出,未来 100a 东北地区地表气温将升高, HadCM3 预测的增温幅度大于 ECHAM5-OM 的预测结果。对于降水的模拟两个模型的预测结果偏差较大,在较高纬度(漠河、图里河、嫩江等)的预测结果基本一致,年降水量增加,且高纬度增加量大;随着纬度降低,两个环流模型的预测结果偏差也越大,尤其是对长白山地区降水量的预估出现相反的结果, ECHAM5-OM 预测长白山未来 100a 后年降水量减少 20.174mm, HadCM3 预测该地区未来降水增加 94.712mm。可见对于降水的预测不同模型存在较大差异。

研究以现有林为基础,研究模拟时间尺度为 1600a。前 1000a 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 100a 的气候变化过渡期,在这 100a 内按照两个环流模型预测的气候变化结果,温度和降水分别以 1% 的速率变化。100a 后气候达到平衡,即不再发生变化,在平衡气候条件下再模拟 500a,使森林在气候变化之后达到平衡态。比较气候变化之后平衡态森林的生物量和树种组成比例与气候变化之前森林的生物量和树种组成比例,讨论气候变化对东北森林的影响。

3 结果与分析

3.1 当前气候情景(s0)

模型模拟中国东北地区主要森林类型生物量的分布见图 2(a),小兴安岭、长白山以及尚志地区典型针阔混交林生物量大于大兴安岭针叶林的生物量。图 2(b)是模型模拟 6 个站点现有森林的树种组成,模拟结果显示了与实际非常一致的森林类型以及树种组成比例:大兴安岭漠河和图里河地区森林树种组成以兴安落叶松为主,其在森林树种组成中占很大比例,达到 80% 以上,同时伴生有少量桦树和樟子松。大兴安岭东南部嫩江地区森林类型为针阔混交林,针叶树为兴安落叶松和红松,阔叶树主要是桦树、蒙古栎、椴树、少量榆树,以及槭树等。模拟结果与实际观测出现偏差,模拟显示该地区有一定比例的红松生长,并且落叶松的比例比较大。FAREAST 模型以气候变量和环境变量为驱动因子,模拟结果表明嫩江地区的生物气候条件比较适合兴安落叶松和长白区系的一些树种(如红松等)生长,林业部调查规划院^[19]的实际调查结果显示该区气候温湿,土壤深厚、肥沃,可以改造蒙古栎等为兴安落叶松、樟子松等有经济价值、生长好的树种,同时引种长白区系的珍贵树种也是有可能的。模拟结果恰好从侧面证明了模型准确模拟东北森林演替过程和规律的能力。伊春地区森林树种组成与实际观测完全一致,地带性植被阔叶红松林主要树种为红松,伴生阔叶树为少量枫

接彩图 2

桦,其它伴生阔叶树有紫椴、水曲柳以及色木槭等。长白山和尚志地区森林主要树种为红松,伴生阔叶树主要是紫椴、水曲柳及一些槭树,在尚志地区由于纬度偏北,并且森林垂直分布带较窄,所以群落中出现了一定比例高海拔树种云冷杉。

为了说明气候变化对中国东北地区森林未来生长演替的影响,进一步模拟了维持当前气候,即气候条件不发生变化,东北森林未来几百年的演替动态。图 2(c)(d) 显示了这一模拟结果。可以看出,维持当前的气候条件不变,未来中国东北地区森林生物量有小幅度的增加,基本维持目前的生物量大小;森林树种组成也基本维持动态平衡,大兴安岭兴安落叶松林仍然是以兴安落叶松为主的林型,小兴安岭森林树种组成也没有大的变化,长白山和尚志地区森林依然是红松为主的针阔混交林。总之,维持当前气候条件不变,东北森林生物量和森林树种组成将不发生大的变化,基本维持目前的状态。

3.2 增暖气候情景(s1)

气候增暖对中国东北地区森林生物量和森林树种组成的影响见图 3。结果表明,气候增暖,漠河和图里河地区兴安落叶松林生物量下降,小兴安岭和长白山地区以红松为主的针阔混交林生物量也下降,大兴安岭东南部嫩江地区森林和植物成分属长白山系的尚志地区森林生物量增加。环流模型 HadCM3 预测的增暖气候情景对各个林区森林生物量的影响程度比环流模型 ECHAM5-OM 预测的增暖气候情景对森林生物量的影响程度大。这是因为模型 HadCM3 预测的较大的增温引起的(见图 1)。对树种组成比例的影响见图 3(b)(d)。气候增暖之后,漠河和图里河地区兴安落叶松林群落中,落叶松的组成比例减小,桦树、蒙古栎等阔叶树在森林群落中的组成比例增加;HadCM3 较大幅度的增温使得桦树和蒙古栎在森林群落中已经占据重要地位,同时,森林群落中出现一定量的椴树。大兴安岭东南部嫩江地区森林群落中,落叶松和红松针叶树的组成比例降低,桦树、蒙古栎、椴树和水曲柳等阔叶树的组成比例增加。小兴安岭、长白山、尚志地区针阔混交林群落中,针叶树种红松的比例大幅度下降,由于环流模型 HadCM3 较大幅度的增温,红松更加难以生存;椴树、水曲柳和色木槭等落叶阔叶树的比例增加;其中尚志地区森林在气候增暖之后,云冷杉的生物量减少几乎为 0(tC/hm^2)。总之,气候增暖之后,东北地区森林群落中针叶树的组成比例下降,阔叶树的组成比例增加;同时,气候增暖越多,这种变化趋势越明显;对小兴安岭、长白山和尚志地区森林对气候增暖响应的分析,推测该区域森林垂直分布林线上移。

3.3 温度和降水都变化情景(s2)

图 4 的结果表明,在气候增暖的基础上考虑降水变化,ECHAM5-OM 预测的气候情景下,6 个站点除了图里河和长白山两个地区森林生物量减小之外,其它 4 个站点森林生物量都不同程度增加(图 4a);HadCM3 预测的气候变化情景下,6 个站点中除了图里河森林生物量减小之外,其它林区森林生物量都增加(图 4c)。可以看出,除了长白山地区之外,两个环流模型预测的气候情景下森林生物量的变化趋势有很好的一致性,这是因为 ECHAM5-OM 预测未来长白山地区年降水量减小,而 HadCM3 预测长白山地区未来年降水量增加,对降水量预测的差异导致森林未来演替的差异。与气候增暖情景下的模拟结果(图 3)比较,可以看出,考虑降水的变化之后,除了 ECHAM5-OM 预测长白山地区年降水量减小导致长白山地区森林生物量进一步减小之外,其它地区森林生物量的变化表明,原来因增温引起的生物量增加的地区,其生物量进一步增加,增温引起的生物量减小的地区,其生物量减小的幅度因为降水增加而减小。所以,降水增加有利于森林生长。

图 4(b)(d) 是考虑降水变化后,6 个站点的森林树种组成。与现有森林树种组成相比较,ECHAM5-OM 预测的气候情景下,大兴安岭地区的兴安落叶松林在气候变化之后,森林群落中落叶松的比重降低,红松的比重增加,桦树、蒙古栎、椴树等阔叶树以及其它一些树种的比重增加;HadCM3 预测的气候变化情景下,该林区针叶树的比重明显降低,阔叶树已经占据了很大比重,桦树、蒙古栎、椴树等在森林群落中已经有相当大的比例。小兴安岭和长白山地区森林群落中红松生物量降低,椴树、水曲柳等阔叶树和色木槭等落叶阔叶树比重加大,同时在小兴安岭地区出现了一定比例的冷杉。尚志地区森林群落中云冷杉针叶树

接彩图 3

接彩图 4

比重减小,椴树、水曲柳等阔叶树和色木槭等落叶阔叶树的比重增加。

与增暖情景下树种组成比例相比较,ECHAM5-OM 预测的降水变化情景下,漠河和图里河地区兴安落叶松林群落中落叶松的组成比例降低,群落中温带针阔混交林树种红松、紫椴等生物量比例增加;嫩江地区森林群落中蒙古栎等阔叶树比例降低,红松比例增加;小兴安岭森林群落中红松组成比例增加,森林树种组成基本不变,长白山和尚志地区森林树种组成变化不大。HadCM3 预测的降水变化情景下,漠河、图里河地区森林群落中红松、紫椴、水曲柳等比例增加;嫩江地区也出现了温带针阔混交林树种红松,同时椴树、水曲柳等阔叶树比例增加,蒙古栎、椴树等阔叶树比重减小;小兴安岭森林群落中红松和冷杉的组成比例增加,阔叶树的组成比例减小。长白山和尚志地区森林树种组成变化不大。

可以看出,降水增加使得大兴安岭森林群落中出现一定比例温带针阔混交林的树种,表明东北森林水平分布带有北移的趋势;对低海拔小兴安岭和尚志地区森林来说,降水变化削弱温度增加对森林造成的影响,但不改变森林树种组成,对森林的影响不大;两个环流模型预测长白山地区降水变化差异很大,但是模拟结果表明,降水对该地区森林的影响不大。

4 结论

如果气候没有发生变化,中国东北地区森林在未来几百年内将维持动态平衡,森林生物量小幅度增加,森林树种组成基本不变,森林将稳定发展。如果气候发生变化,中国东北主要类型森林的生物量和树种组成将可能受到较大影响。气候增暖不利于东北主要森林类型兴安落叶松林以及以红松为主的温带针阔混交林生长,主要针叶树种生物量下降,阔叶树生物量增加;温带针阔混交林区域森林垂直分布带有上移的趋势;且增暖幅度越大,变化越明显。气候增暖基础上降水变化,模拟结果分别与当前气候条件下森林生物量和森林树种组成以及增暖情景下森林生物量和森林树种组成相比较,表明,降水增加大兴安岭森林群落中温带针阔混交林树种的比例增加,如红松、水曲柳等;小兴安岭、尚志和长白山地区降水增加减弱温度增加对该区域森林造成的影响;降水对低海拔温带针阔混交林的影响不大。增温的基础上考虑降水变化,降水增加使得原来因增温引起生物量增加的地区,其生物量进一步增加,增温引起生物量减小的地区,其生物量减小的幅度因为降水增加而减小甚至增加,表明降水增加有利于东北地区森林总生物量的增加。通过分析可以看出,气候增暖,东北森林群落中阔叶树的比重增加,温带针阔混交林森林垂直分布带有上移的趋势;降水使得东北森林水平分布带有北移的趋势,同时降水增加削弱温度增加对东北森林的影响。

综上所述,气候变化对中国东北森林的可能影响是显著的,研究气候变化对森林演替的影响,对于正确合理制定森林管理措施具有重要意义。在这方面,Gap 模型在过去模拟森林演替动态的研究中已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,所以其结果认为气候变化能立即导致物种和森林的迁移。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^[17]。这些都是有待解决的问题。

References:

- [1] Wang S W. Diagnostic studies on the climate change and variability for the period of 1880 ~ 1990. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 261 — 273.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Foley J A, Kutzbach J E, Coe M T, *et al.* Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch. *Nature*, 1994, 371: 52 — 54.
- [4] Gates D M. Climate change and forests. *Tree Physiol*, 1990, 7: 1 — 5.
- [5] Shugart H H, Smith T M, Post W M. The application for application of individual-based simulation models for assessing the effects of global change. *Annu Rev Ecol Sys*, 1992, 23: 15 — 38.

- [6] Sykes M T, Prentice I C. Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer/hardwoods zone of northern Europe. *Climatic Change*, 1996, 34: 161 — 177.
- [7] Zhong X L, Lin E D. The impact of climate change on China ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(5): 62 — 66.
- [8] Pastor J, Post W M. Response of northern forests to CO₂-induced climate change. *Nature*, 1988, 334: 35 — 38.
- [9] Shugart H H, Smith T M. A review of forest patch models and their application to global change research. *Climate Change*, 1996, 34(2): 131 — 153.
- [10] Solomn A M. Transient response of forest to CO₂ induced climate change: Simulation Modeling experiments in eastern North America. *Oecologia*, 1986, 68: 567 — 579.
- [11] Yan X D, Zhao S D. Simulating the response of Changbai Mt. forest to potential climate change. *Journal of Environmental Science*, 1996, 8(3): 354 — 366.
- [12] Deng H P, Wu F Z, Zhou D W. Response of broad-leaved *Pinus koraiensis* forests in Xiaoxinganling Mt. to global climate change dynamic modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 1(11): 43 — 46.
- [13] Hao Z Q, Dai L M, He H S. Potential response of major tree species to climate warming in Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5): 653 — 658.
- [14] Yan X D, Shugart H H. FAREAST: a forest gap model to simulate dynamics and patterns of eastern Eurasian forests. *Journal of Biogeography*, 2005, 32: 1641 — 1658.
- [15] Boersma M V, Schaik C P, Hogeweg P, *et al.* Nutrient gradients and spatial structure in tropical forest—a model study. *Ecol model*, 1990, 55: 219 — 240.
- [16] Shackley S, Young P, Parkinson S, *et al.* Uncertainty, complexity and concepts of good science in climate change modeling: Are GCMs the best tools? *Climatic Change*, 1998, 38: 159 — 205.
- [17] Liu G H, Fu B J. Response of forest system to global warming climate. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 71 — 78.
- [18] Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, *et al.* National Assessment Report of Climate Change I. Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3 — 8.
- [19] Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration eds. *China Mountain Forest*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1981. 56 — 57.

参考文献:

- [1] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究. *气象学报*, 1994, 52(3): 261 ~ 273.
- [7] 钟秀丽, 林而达. 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*, 2000, 19(5): 62 ~ 66.
- [12] 邓慧平, 吴方正, 周道玮. 全球气候变化对小兴安岭阔叶红松影响的动态模拟研究. *应用生态学报*, 2000, 1(11): 43 ~ 46.
- [13] 郝占庆, 代力民, 贺红土. 气候变暖对长白山主要树种的潜在影响. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 653 ~ 658.
- [17] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 71 ~ 78.
- [18] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告 I. 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3 ~ 8.
- [19] 林业部调查规划院主编. *中国山地森林*. 北京: 中国林业出版社, 1981. 56 ~ 57.

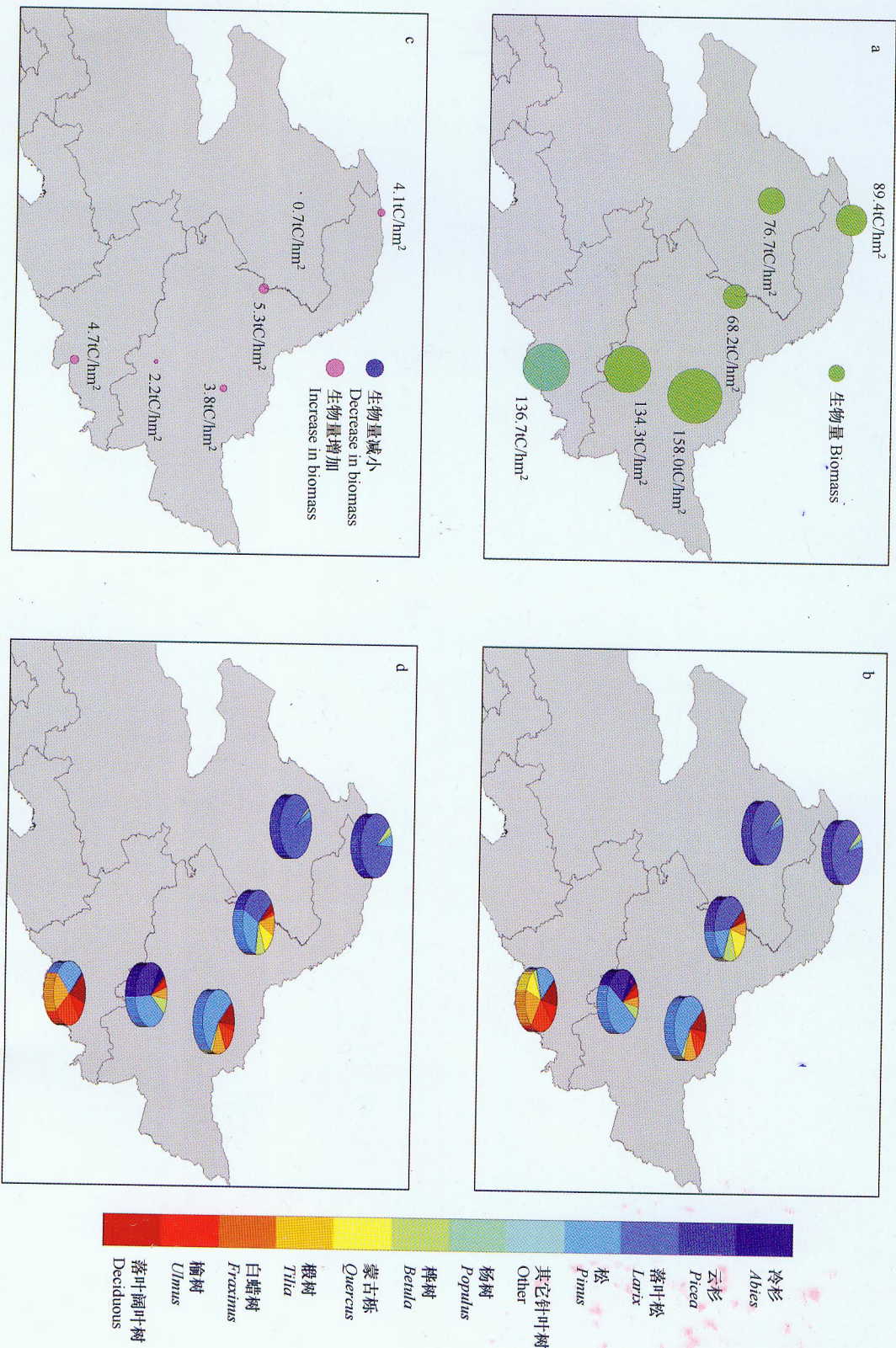


图2 东北地区现有森林生物量(a)和森林树种组成(b), 以及气候条件不变, 即气候情景s0, 100a后该地区的森林生物量(c)和树种组成(d)的变化
Fig.2 The current forest biomass(a) and forest composition(b) in the northeast of China, and the change of forest biomass(c) and forest composition(d) in the region after 100 years in steady climate condition namely scenario s0

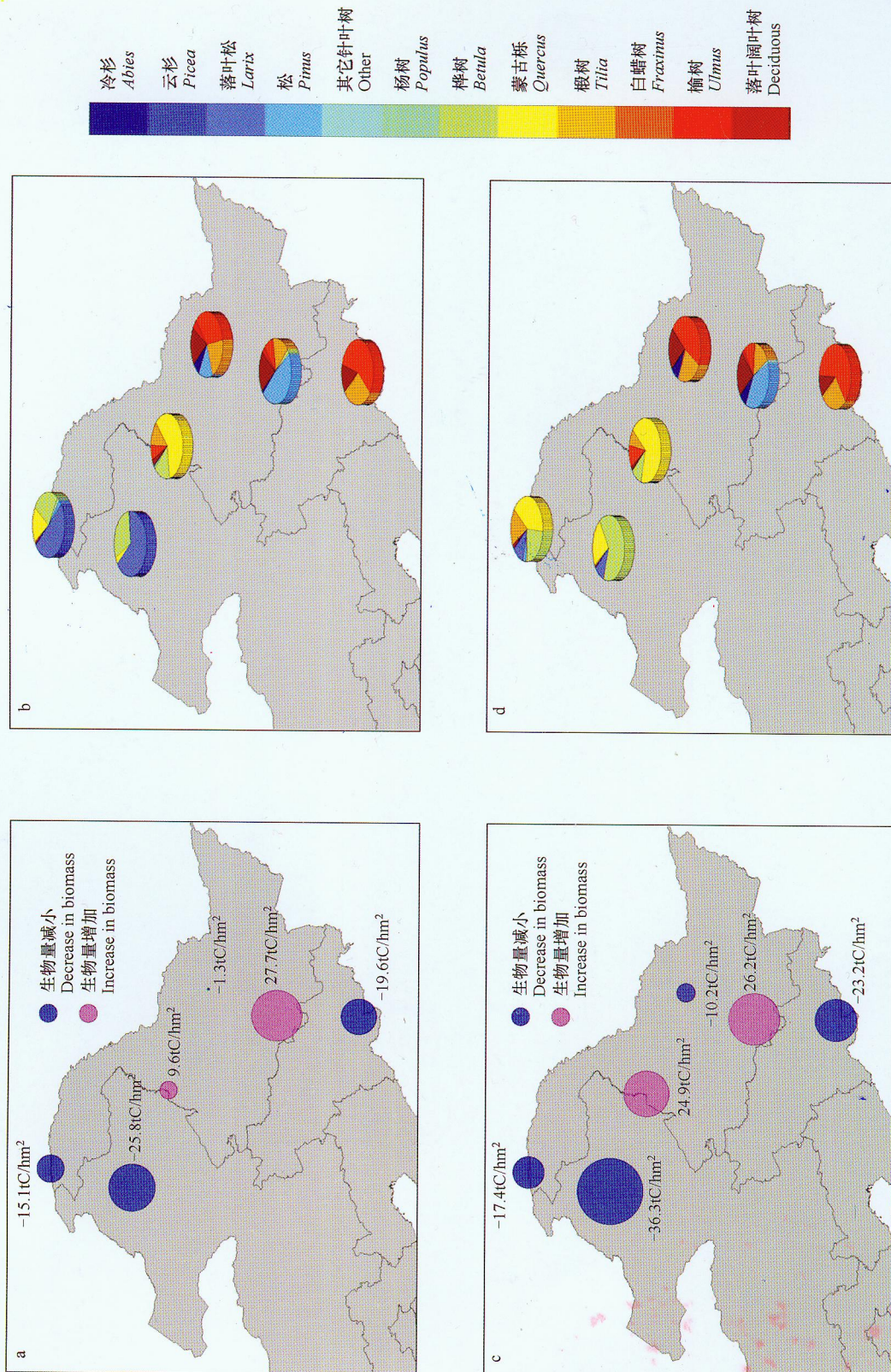


图 3 增暖气候条件下, 即气候情景 s1, 100 年后东北地区森林生物量(a)(c)和森林树种组成(b)(d)的变化

Fig.3 The change of forest biomass(a)(c) and forest composition(b)(d) in the northeast of China after 100 years under warmer climate scenario s1

(a)(b)是在大气环流模型 ECHAM5-OM 预测的气候变化背景下模拟的结果; (c)(d)是在大气环流模型 HadCM3 预测的气候变化背景下模拟的结果

(a)(b)are simulated results under the climate changing conditions simulated from GCM of ECHAM5-OM;(c)(d)are from HadCM3

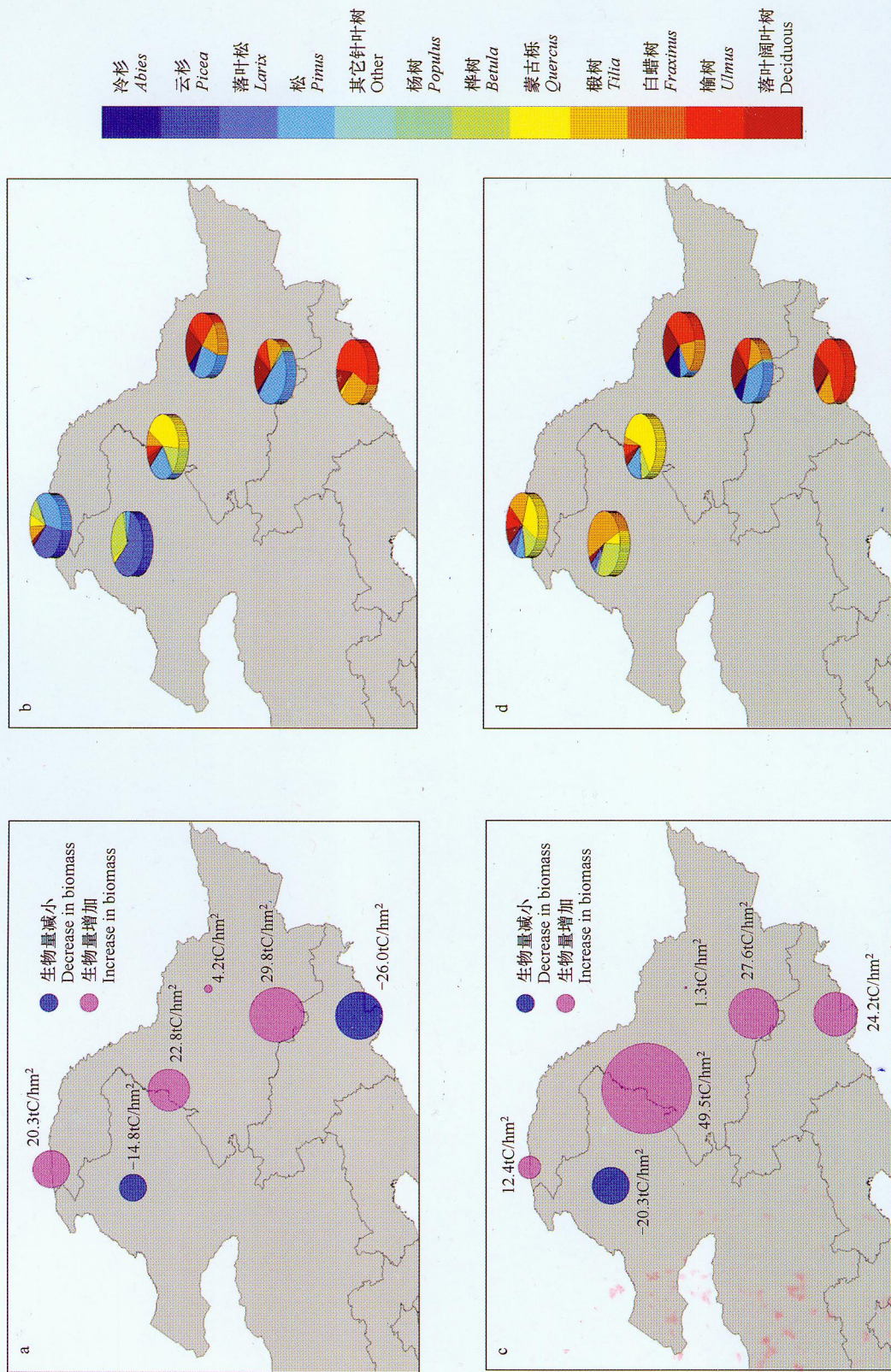


图 4 温度和降水都发生变化, 即气候情景 s2, 东北地区森林生物量和森林树种组成的变化
 (a)(b)是在大气环流模型 ECHAM5-OM 预测的气候变化背景下模拟的结果; (c)(d)是在大气环流模型 HadCM3 预测的气候变化背景下模拟的结果
 (a)(b)are simulated results under the climate changing conditions simulated from GCM of ECHAM5-OM; (c)(d)are from HadCM3