

气候变化条件下东北森林主要建群种的空间分布

冷文芳^{1,2}, 贺红士¹, 布仁仓^{1,*}, 胡远满¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 全球气候模型 HADCM2SUL 和 CGCM1 分别预测 100a 后全球年均温增加 3.7 和 5.2, 年降水增加 30.7% 和 25.1%。为了研究东北森林对这两种预测方案的反应, 使用 logistic 回归模型分析了东北森林 8 个建群种与 11 种环境因子之间的相关关系。结果表明, 除了山杨和蒙古栎之外, 年均温是决定其它树种存在与否的重要因子。采用模型结果预测现行气候条件下 8 个树种的分布并与其现实分布比较, 发现针叶树种的总正确率、敏感度、指定度和错误肯定率均比阔叶树种的要高, 而错误否定率比后者低, 说明模型对针叶树种的拟合程度要优于对阔叶树种的拟合程度。在此基础上, 预测了 8 个树种在两种气候变化方案下 100a 后的分布图。结果表明, 在 HADCM2SUL 方案下, 兴安落叶松、白桦、冷杉和云杉的覆盖率分别下降 91.2%、67.4%、11.9%、10%; 长白落叶松、红松和蒙古栎的覆盖率分别增长 87.8%、54.6%、31.3%; 在 CGCM1 方案下, 兴安落叶松、白桦、云杉、冷杉和红松的覆盖率分别下降 99.2%、89.9%、85.9%、83.2%、4.9%; 长白落叶松、蒙古栎的覆盖率分别增长 93.3%、27.5%; 山杨在这两种方案下数量不变。

关键词: logistic 回归模型; 建群种; 全球变暖; HADCM2SUL 方案; CGCM1 方案

文章编号: 1000-0933(2006)12-4257-10 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

The spatial distribution of constructive species of Northeast forest under the climate changing

LEND Wen-Fang^{1,2}, HE Hong-Shi¹, BU Ren-Cang^{1,*}, HU Yuan-Man¹ (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4257 ~ 4266.

Abstract: Global Climate Models, HADCM2SUL and CGCM1 predicted that global annual average temperature will rise 3.7 and 5.2, annual precipitation will rise 30.7% and 25.1%, respectively in the next 100 years. To explore the response of Northeastern forests to the two climate warming scenarios, Logistic regression was developed to analyze the relationship between eight constructive species of northeast forest (*Larix gmelinii*, *Pinus koraiensis*, *Picea jezoensis*, *Abies nephrolepis*, *Larix olgensis* var. *changpaiensis*, *Quercus mongolica*, *Betula platyphylla*, *Populus davidiana*) and 11 environmental variables (annual average temperature, annual precipitation, altitude, slope, aspect, soil clay, soil silty, soil sand, soil depth, soil organization material, soil total nitrogen). The logistic regression models established based on the current species distribution and the associated environment variables. The results showed that annual average temperature was the most important factor determining the occurrence of all species except for *Quercus mongolica* and *Populus davidiana*. Comparing the predicted species distributions with the actual species distributions, we found that model correctness, sensitivity, specificity and false positive rate of conifer species were greater than those of the broadleaf species, and the false negative rates of conifer species were less than those of the broadleaf

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (40331008); 中国科学院知识创新工程资助项目 (KSCX2-SW-133)

收稿日期: 2005-08-09; **修订日期:** 2006-03-01

作者简介: 冷文芳 (1976~), 女, 湖北赤壁人, 博士生, 主要从事数量景观生态学研究. E-mail: nnlwf1999@gmail.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: Burc@iae.ac.cn

Foundation item: This work was financially supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 40331008), Knowledge Innovation Project of CAS (No. KSCX2-SW-133)

Received date: 2005-08-09; **Accepted date:** 2006-03-01

Biography: LEND Wen-Fang, Ph.D. candidate, mainly engaged in the quantitative and scape ecology quantitative landscape ecology. E-mail: nnlwf1999@gmail.com

species. The results showed that the goodness of fit of conifer species were greater than those of the broadleaf species. The predicted distributions of the eight species under the two global warming scenarios were derived on the logistic regression models. The result showed that under the HADCM1SUL scenario, the coverage of *Larix gmelinii*, *Betula platyphylla*, *Abies nephrolepi*, *Picea jezoensis* decreased 91.2%, 67.4%, 11.9% and 10%, respectively. The coverage of *Larix olgensis* var. *changpaiensis*, *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* increased 87.8%, 54.6% and 31.3%, respectively. Under the CGCM1 scenario, the coverage of *Larix gmelinii*, *Betula platyphylla*, *Picea jezoensis*, *Abies nephrolepi* and *Pinus koraiensis* decreased 99.2%, 89.9%, 85.9%, 83.2% and 4.9%, respectively; the coverage of *Larix olgensis* var. *changpaiensis* and *Quercus mongolica* increased 93.3% and 27.5%, respectively. The *Populus davidiana* did not change under two scenarios.

Key words: logistic regression model; constructive species; global warming; HADCM2SUL scenario; CGCM1 scenario

全球气候模型 HADCM2SUL^[1]和 CGCM1^[2]预测 100a 后全球年均温分别增加 3.7 和 5.2 ,年降水分别增加 30.7 %和 25.1 %。东北森林对这两种预测方案的反应如何? 目前类似的研究主要在斑块、景观两种尺度水平上、以模型预测方式来进行^[3~6]。

斑块尺度模型的代表是林窗模型,空间范围一般为 0.01 ~ 1hm²,分辨率为几米。它以单个树木个体为对象,研究在林分中个体的行为以及个体间的相互作用的动态^[7~11]。景观尺度的模型空间范围一般为 10⁴ ~ 10⁶ hm²,分辨率为几十米到几百米,它以多个生态系统为对象,研究在景观水平上,不同生态系统间的相互作用以及主要的生态过程(风、火、动物破坏、人类采伐)动态^[12]。林窗模型和景观模型都是动态模型,能够在生态过程的基础上模拟研究对象在时间维上的变化,但是因为这些过程主要体现在中、小尺度上,难以在如中国东北这样大的区域水平上应用。

logistic 回归模型是一个静态的统计模型,没有以上动态模型的困扰。它是对二分类因变量(即 $y = 0$ 或 $y = 1$)进行回归分析时最为普遍应用的多元量化分析方法^[13]。该模型应用于植被环境关系中具有以下优势:它是非线性模型,可以模拟树种在环境中分布的非线性现象;模型的构建比较简单;它不直接受空间尺度的限制,只要数据来源精确、计算机的运算能力足够强,它可以模拟极高分辨率、大的空间范围内的植被分布。

本文拟以 logistic 回归模型为手段,研究现行气候条件下,植被与环境因子之间的关系,并以这种数量关系为依据,预测两种气候变化条件下(HADCM2SUL 方案和 CGCM1 方案),东北森林建群种的分布格局。

1 研究区概况

中国东北地处欧亚大陆东缘,地域辽阔,在东经 115°05 至 135°02、北纬 38°40 至 53°30 之间,面积约为 129 万 km²。地质构造复杂,主要由东北台块、华北台块和东西两侧的地槽组成,西侧为大兴安岭和内蒙古褶皱带,东侧为太平岭和乌苏里褶皱带。由于东西南北的跨越很大,有明显的水热分布差异。从北到南,随气温的变化,可分为寒温带、温带和暖温带;从东到西,随水分的变化,可分为湿润区、半湿润区和半干旱区。相应的植被从北到南有寒温带针叶林、温带针叶阔叶混交林和暖温带落叶阔叶林;从东到西有森林、草甸草原和典型草原。土壤类型主要有山地苔原土、棕色针叶林土、暗棕壤、灰色森林土、褐土、黑土、白浆土、黑钙土、栗钙土、草甸土等^[14]。

2 研究方法

2.1 Logistic 回归模型

logistic 回归模型的函数形式为:

$$P(y_i = 1 | x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}) = \frac{1}{1 + e^{-\left(a + \sum_{k=1}^k b_k x_{ki}\right)}} \quad (1)$$

Logistic 函数是一个累积分布函数,它有两个优点:1) P 的取值总在 0 和 1 之间,这表明估计的概率不会超过 1,也不会小于 0;2) 它具有 S 型增长曲线,表明自变量在不同的区间发生变化时,对应的 p 值的生长是不同的:当 x 极小或极大时,对 P 的影响较小,而当 x 居中时,对 P 的影响较大。这种非线性的模式能够很

好地拟合树种在某一环境梯度上分布的实际情况。

事件发生的概率是 P , 不发生的概率就是 $(1 - P)$, 比值 $P/(1 - P)$ 被称为事件的发生比 (Odds):

$$odds = \frac{P_i}{1 - P_i} = e^{\left(a + \sum_{k=1}^k b_k x_{ki} \right)} \quad (2)$$

把发生比取自然对数, 就将非线性方程转换成了线性方程:

$$\ln(odds) = \ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = a + \sum_{k=1}^k b_k x_{ki} \quad (3)$$

$\ln(odds)$ 又可以表示为 $\logit(y)$, 对于其参数而言是线性的, 因此可以按照一般回归方程来解释其系数。系数计算出来后, 根据公式 (2) 和 (3) 的逆变换, 就可以计算出任意组合的环境因子条件下, 树种存在的概率。如果根据实际的环境因子组合情况, 则得到树种的实际空间分布概率图。

2.2 数据准备

2.2.1 植被数据 矢量化 1:100 万东北植被图^[15], 提取出所有乔木种类, 生成乔木分布图, 然后将矢量图转换成分辨率为 100m 的栅格图。根据各树种占乔木总面积的百分比, 提取了面积最大的、以及有代表性的 8 个树种: 兴安落叶松 (*Larix gmelinii*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、云杉 (*Picea jezoensis*)、冷杉 (*Abies nephrolepis*)、长白落叶松 (*Larix olgensis* var. *changpaiensis*) 和蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、山杨 (*Populus davidiana*)。

2.2.2 环境数据 影响东北森林植被分布的环境因子有许多, 从大尺度上来看, 有地带性的气候因子, 如温度、降水, 从中小尺度上看, 则有土壤因子、海拔、坡度和坡向等地形因子。为了与植被数据相匹配, 以下图件的分辨率均为 100m。

(1) 地形因子 海拔、坡度和转换坡向 用 1:25 万东北地形图的等高线图层以及参考点图层生成东北地区的数字高程模型 DEM。然后生成东北地区的坡度图和坡向图。海拔和坡度都是数值型变量, 可以直接进行比较, 而坡向图则只代表了坡面的朝向, 直接比较其数据没有任何意义; 同时坡向对树种的影响主要是由于其接受阳光辐射能量的多少引起的, 因此, 本文根据公式 (4), 计算转换后的坡向图 (trasp):

$$trasp = \frac{1 - \cos((/180)(aspect - 30))}{2} \quad (4)$$

trasp: 值域为 [0, 1], 0 表示接受的太阳能最少, 1 表示接受的太阳能最大; aspect: 原始坡向图, 值域为 [0, 360]。

(2) 气候因子 气温和降水 利用东北地区 77 个气象台站 35a 的气象资料^[16], 分别建立温度、降水和经纬度、海拔高度的线性回归方程, 插值得到整个东北地区的温度栅格图 Tem 和降水栅格图 Pre。以此为基础, 用图形算法分别生成两种气候变化方案下的温度栅格图和降水栅格图: H. Tem、C. Tem、H. Pre、C. Pre。

(3) 土壤因子 土壤粘粒、粉砂、砂粒、有机质、全氮和厚度 土壤与植被的关系极为密切, 特定的植被往往生长在特定的土壤之上。本研究采用土壤的 6 个可量化的属性, 即粘粒、粉砂、砂粒、有机质、全氮和厚度作为植被的影响因子, 中国科学院南京土壤研究所制作的中国 1:100 万土壤栅格图原始分辨率为 2km^[17], 重采样成 100m 分辨率的栅格图。

由于植被图与各个环境因子图的来源不同, 选取地形图中的 184 个控制点对植被图和土壤图进行校正和匹配。

2.3 取样方式与 logistic 回归模型的建立

随机选择乔木分布区总像元数的 10%, 提取其中的树种和各个环境因子信息, 作为 logistic 回归模型的建模数据。以树种在像元上的存在与否作为因变量, 存在取 1, 不存在取 0, 以 11 个环境因子图层在对应像元上的值作为自变量, 选择向前逐步回归法, 建立 logistic 回归模型。

3 结果分析

3.1 Logistic 回归模型的系数

回归系数的符号指示了环境因子对树种的影响方式, 正号表示环境因子的值越大, 树种存在的概率也越

大;回归系数的绝对值指示了环境因子对树种的影响程度,值越大表示影响越显著。由表 1 可以看出,不受温度的影响的树种是蒙古栎和山杨,受温度正面影响的树种是长白落叶松,其它所有树种都受温度的负影响。不受降水影响的树种是山杨,受降水负面影响的是兴安落叶松,其它所有树种都受降水的正影响。由于东北地区温度和降水的分布格局已知:东南部高、西北部低,可以大致推测兴安落叶松主要分布于西北山区(低温少雨),而长白落叶松主要分布于东南山区(高温多雨),云冷杉和红松分布于东部山区(低温多雨)、山杨的分布没有明显的规律。

表 1 logistic 回归分析结果-系数与拟合优度

Table 1 logistic regression analysis results - coefficients and Goodness of fit

	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	红松 <i>Pinus korziensis</i>	云杉 <i>Picea jezoensis</i>	冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	长白落叶松 <i>Larix olgensis var. changpaiensis</i>	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	山杨 <i>Populus davidiana</i>
截距 Intercept	- 4.80E ×10 ⁻¹ *	- 1.03 ×10 [*]	- 1.29 ×10 [*]	- 1.27 ×10 [*]	- 1.01 ×10 [*]	- 1.08 [*]	- 1.05 [*]	- 5.63 [*]
海拔 Altitude	5.90 ×10 ⁻⁴ *	- 2.60 ×10 ⁻³ *	- 4.02 ×10 ⁻³ *	- 3.90 ×10 ⁻³ *	1.90 ×10 ⁻⁴ *	- 2.84 ×10 ⁻³ *	1.96 ×10 ⁻⁴ *	2.69 ×10 ⁻³ *
降水 Precipitation	- 6.62 ×10 ⁻³ *	1.74 ×10 ⁻² *	2.14 ×10 ⁻² *	2.76 ×10 ⁻² *	1.45 ×10 ⁻² *	3.11 ×10 ⁻³ *	4.75 ×10 ⁻⁴ *	—
坡度 Slope	3.90 ×10 ⁻² *	6.68 ×10 ⁻³ *	2.33 ×10 ⁻² *	2.37 ×10 ⁻² *	- 4.98 ×10 ⁻² *	1.77 ×10 ⁻² *	- 2.19 ×10 ⁻² *	- 2.80 ×10 ⁻² *
温度 Temperature	- 8.80 ×10 ⁻¹ *	- 5.10 ×10 ⁻¹ *	- 1.07 [*]	- 1.03 [*]	3.07 ×10 ⁻¹ *	—	- 1.34 ×10 ⁻¹ *	—
转换坡向 Trasp ^a aspect	- 3.24 ×10 ⁻² *	9.44 ×10 ⁻² *	—	—	- 8.76 ×10 ⁻² *	—	3.54 ×10 ⁻² *	- 6.40 ×10 ⁻² *
粘粒 Soil Clay	- 4.88 ×10 ⁻³ *	- 2.21 ×10 ⁻² *	5.25 ×10 ⁻² *	5.82 ×10 ⁻² *	—	—	1.99 ×10 ⁻² *	—
厚度 Soil Depth	1.62 ×10 ⁻³ *	1.22 ×10 ⁻³ *	- 8.19 ×10 ⁻³ *	- 7.17 ×10 ⁻³ *	5.92 ×10 ⁻³ *	- 7.63 ×10 ⁻³ *	—	6.02 ×10 ⁻³ *
有机质 Soil Om	2.98 ×10 ⁻³ *	- 2.09 ×10 ⁻² *	6.36 ×10 ⁻² *	8.61 ×10 ⁻² *	—	- 1.91 ×10 ⁻² *	4.74 ×10 ⁻² *	4.69 ×10 ⁻² *
砂粒 Soil Sand	6.80 ×10 ⁻³ *	- 7.07 ×10 ⁻³ *	—	—	- 2.77 ×10 ⁻² *	- 1.31 ×10 ⁻³ *	- 2.05 ×10 ⁻² *	- 9.17 ×10 ⁻³ *
粉砂 Soil Silty	—	—	- 1.29 ×10 ⁻² *	- 1.50 ×10 ⁻² *	- 6.16 ×10 ⁻³ *	2.62 ×10 ⁻² *	—	4.11 ×10 ⁻² *
全氮 Soil Tn	5.63 ×10 ⁻¹ *	—	- 1.68 [*]	- 2.16 [*]	- 2.45 [*]	—	- 1.84 [*]	- 1.76 [*]
HL	24,945 [*]	7,460 [*]	2,178 [*]	2,522 [*]	2,754 [*]	41,534 [*]	22,849 [*]	2,698 [*]
树种面积 百分比 Area %	0.23	0.042	0.019	0.015	0.015	0.319	0.166	0.074

* 表示回归系数极显著 $p < 0.001$ $p < 0.001$ represents the regression coefficient is significant

3.2 Logistic 模型的拟合优度

模型估计完成之后,需要评价模型是否有效地表述了因变量与自变量的关系,以及模型匹配观测数据的程度,如果模型的预测值能够与对应的观测值有较高的一致性,就认为这一模型拟合数据,否则,将不能接受该模型,需要重新设置。最常用的拟合优度统计指标有皮尔逊²、偏差(Deviance)和 Hosmer-Lemeshow 指标^[13]。由于前两者不适用于连续自变量的评价,本文选取 Hosmer-Lemeshow 指标进行评价。其统计公式如下:

$$HL = \sum_{g=1}^G \frac{(y_g - n_g \hat{p}_g)^2}{n_g \hat{p}_g (1 - \hat{p}_g)} \quad (5)$$

式中, G 代表分组数, $G = 10$; n_g 为第 g 组中的案例数; y_g 为第 g 组事件的观测数量; \hat{p}_g 为第 g 组的预测事件概率。 HL 指标越小说明模型拟合越好。8 个树种的 HL 指标都极显著,表明模型拟合不佳,而回归系数的极显著又说明自变量能够很好地解释因变量,这种矛盾经常出现,尤其是在大样本的情况下^[13]。

3.3 概率阈值的选择

Logistic 回归模型预测得到的结果是一系列的系数,根据各个空间位置点的环境因子的组合条件,可以求出树种在该点存在的概率值。一般来讲,对于空间上的任意一点,如果没有任何先验知识的支撑,该点上出现某一树种的概率是 0.5,也即树种存在与不存在的概率相等。一旦对树种生境有所了解,根据这些知识,可以确定出一套新的概率值,环境类似于某一树种生境的地点,该树种存在的可能性变大。反之则变小。但是面积小的树种在空间上存在的概率也小,这样系统误差对它的影响变大,为了消除面积对稀少树种预测结果的影响,根据树种实际分布的面积占整个研究区的面积比例来确定其存在的阈值,8 个树种的面积比例见表 1。

3.4 预测精度评价

确定了树种存在的阈值之后,概率大于该阈值的位置,树种预测为存在,否则为不存在。需要比较树种原始分布图和预测图来确定各个树种的预测结果在多大程度上与真实图相符合。通常有四种可能性出现:实际存在,预测也存在;实际存在,预测不存在;实际不存在,预测存在;实际不存在,预测也不存在。

有 5 个指标可以用于评价预测精度,总正确率(PerC, percentage of correct)、敏感度(sensitivity)、指定度(specificity)、错误肯定率(FPR, false positive rate)、错误否定率(FNR, false negative rate)^[13]:

$$\text{PerC} = \frac{a_{11} + a_{22}}{A_{\text{sum}}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{a_{11}}{A_1} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{Specificity} = \frac{a_{22}}{A_2} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{FPR} = \frac{a_{12}}{A_1} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{FNR} = \frac{a_{21}}{A_2} \times 100 \quad (10)$$

表 3 logistic 回归模型预测精度评价表

Table 3 The predicted precision of logistic regression model

项目 Item	总正确率 PerC	敏感度 Sensitivity	指定度 specificity	错误肯定率 FPR	错误否定率 FNR
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	88.00	89.41	87.22	32.38	3.50
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	75.27	82.37	74.95	87.06	1.05
云杉 <i>Picea jezoensis</i>	77.82	87.45	77.62	92.73	0.32
冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	78.13	85.30	77.99	93.09	0.36
长白落叶松 <i>Larix olgensis</i> var. <i>changpaiensis</i>	67.42	97.70	66.95	95.56	0.05
针叶树平均值 Average of conifer species	77.33	88.45	76.95	80.16	1.06
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	63.49	74.04	58.47	54.09	17.45
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	55.11	64.82	53.15	78.17	11.79
山杨 <i>Populus davidiana</i>	67.50	69.95	67.31	85.32	3.47
阔叶落叶树平均值 Average of broadleaf species	62.03	69.60	59.64	72.53	10.90

总正确率是正确预测的树种分布像元数和像元总数之比,其值高说明总的精度高;敏感度是正确预测树种存在的像元数与观测存在的像元数之比,其值高说明树种观测存在的位置上,预测也存在的概率较高;指定度是正确预测树种不存在的像元数和实际不存在的像元数之比,其值高说明树种预测不存在的位置上,预测也不存在的概率较高;错误肯定率是预测存在、而观测不存在的像元数与观测存在的像元数之比,其值高说明把观测不存在的地方预测为存在的概率较高;错误否定率是预测不存在、而观测存在的像元数与观测不存在的像元数之比,其值高说明把观测存在的地方预测为不存在的概率较高。

由以上定义可知,总正确率、敏感度和指定度的值越高,预测精度越高;而错误肯定率和否定率的值越低,预测精度越高。由表 3 可见,除了错误肯定率较高、不符合越低越好的标准之外,其它各个指标都较好。从总体来看,针叶树预测效果要好于阔叶落叶树。

产生这种结果的主要原因可能有: 针叶树种往往是地带性植被,生境特征明显,比较有规律;而 3 种阔叶树都是东北的广布种,广泛分布于东西部的山地,没有明显的规律可循; 构建 logistic 模型时,只考虑了自然因素对树种分布的影响,而没有考虑到生态过程和人为活动的影响,针叶树种分布地点受人类活动的干扰相对较少,因此预测的结果与实际较吻合;而白桦等阔叶树种生存的地点受人类活动影响较大,导致预测结果

与实际相差较大。也即,预测的结果是纯理论的可能性,而实际树种的分布总是或多或少受其他因素的影响,因此理论分布范围总是大于实际分布范围。

3.5 预测图的制作与结果分析

在已建立的各树种的 logistic 回归模型基础上,分别用两种气候变化方案下的温度栅格图 H. Tem、C. Tem 和降水栅格图 H. Pre、C. Pre 制作出 100a 后的东北目前主要建群种的分布图(图 1)。

由预测精度评价分析结果可知,预测现实的树种分布范围总是比现实树种分布的范围要大,为了避免由于 logistic 模型本身的原因造成的误差,以预测现实的图作为标准,来比较分析两种升温方案下、100a 后植被空间分布的变化。H. Tem、C. Tem、H. Pre、C. Pre。

3.5.1 兴安落叶松 兴安落叶松属于强阳性的寒温性树种,是东北最大的落叶松林,对环境适应性强,但是与其它树种的竞争力较弱。它集中分布在中国东北大兴安岭,在北纬 49°20' 以北为水平地带性植被;向南沿大兴安岭主脉延伸到温带草原区,则形成山地垂直地带性植被;向东南至小兴安岭,多生长在低湿地,形成的隐域性植被(图 2A(a))^[14],预测现实面积约为 1435 万 hm^2 (图 2A(b))。

HADCM2SUL 方案下,兴安落叶松总面积将减少到 126 万 hm^2 ,只在大兴安岭北端和伊勒呼里山有分布(图 2A(c)),那里的年均温在 $-3.42 \sim -2.24$ 之间,降水在 207~617mm 之间。

CGCM1 方案下,其面积将进一步减少到 1.1 万 hm^2 ,只零星分布于大兴安岭北部山岭地带(图 2A(d)),年均温在 $-1.92 \sim 1.77$ 之间,降水在 286~587mm 之间。可见,温度的增加对兴安落叶松的影响比降水要大,气候变化后兴安落叶松剧幅减少,趋于消失。

3.5.2 红松 红松属于温性树种,是小兴安岭的地带性树种。在长白山区分布时,则和多种阔叶树,如紫椴、春榆等形成阔叶红松混交林^[14](图 2B(a))。它的预测现实面积约为 1299 万 hm^2 (图 2B(b))。

HADCM2SUL 方案下,面积增加到 2008 万 hm^2 ,主要分布在张广才岭、老爷岭和长白山区(图 2B(c)),分布区年均温在 $-3.38 \sim 12.63$ 之间,平均为 5.95;年降水在 540~1259mm,平均为 818mm。

CGCM1 方案下,面积减少到 1235 万 hm^2 ,主要分布范围同上(图 2B(d)),分布区温度在 $1.57 \sim 11.94$ 之间,平均为 7.26;年降水在 612~1205mm,平均为 833mm。这说明,红松面积随着温度增加有先增加后减少的趋势,表明 HADCM2SUL 方案更加适宜于红松的生存。

3.5.3 云杉、冷杉 云冷杉的生境相近,都属暗针叶树种,主要分布在东部山区的高海拔地带,自北向南,其生境逐渐升高,在小兴安岭,它分布于 700~1100m,到张广才岭上升至 900~1500m,到长白山则上升至 1100~1800m 间^[14](图 2C(a), (图 2D(a)))。它们的预测现实面积分别为 1116 和 1280 万 hm^2 (图 2C(b), (图 2D(b)))。

HADCM2SUL 方案下,面积分别减少到 1004 和 1128 万 hm^2 ;主要分布于长白山区、张广才岭(图 2C(c), (图 2D(c)));分布区年均温在 $-3.42 \sim 10.28$,平均为 5.15;年降水在 430~1259 mm,平均为 852 mm 左右。

CGCM1 方案下,面积则分别锐减到 157 和 215 万 hm^2 ;分布区范围同上(图 2C(d), (图 2D(d))),年均温在 $1.57 \sim 10.22$,平均为 6.06;年降水在 647~1205 mm,平均为 918 mm 左右。这说明云冷杉和红松具有相似的趋势:随着温度的增加,其面积不断减少,但是树种的水平迁移不大,主要表现在垂直迁移上,表明其生境的海拔位置不断上升。

3.5.4 长白落叶松 长白落叶松也属于强阳性的寒温性树种,主要分布在长白山区,向北可分布至张广才岭

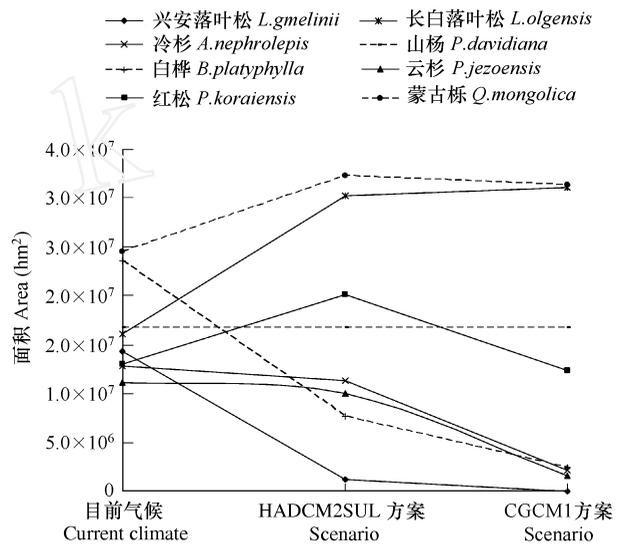


图 1 3 种气候预案下东北森林主要建群种面积变化

Fig. 1 The area of constructive species under three climate scenarios

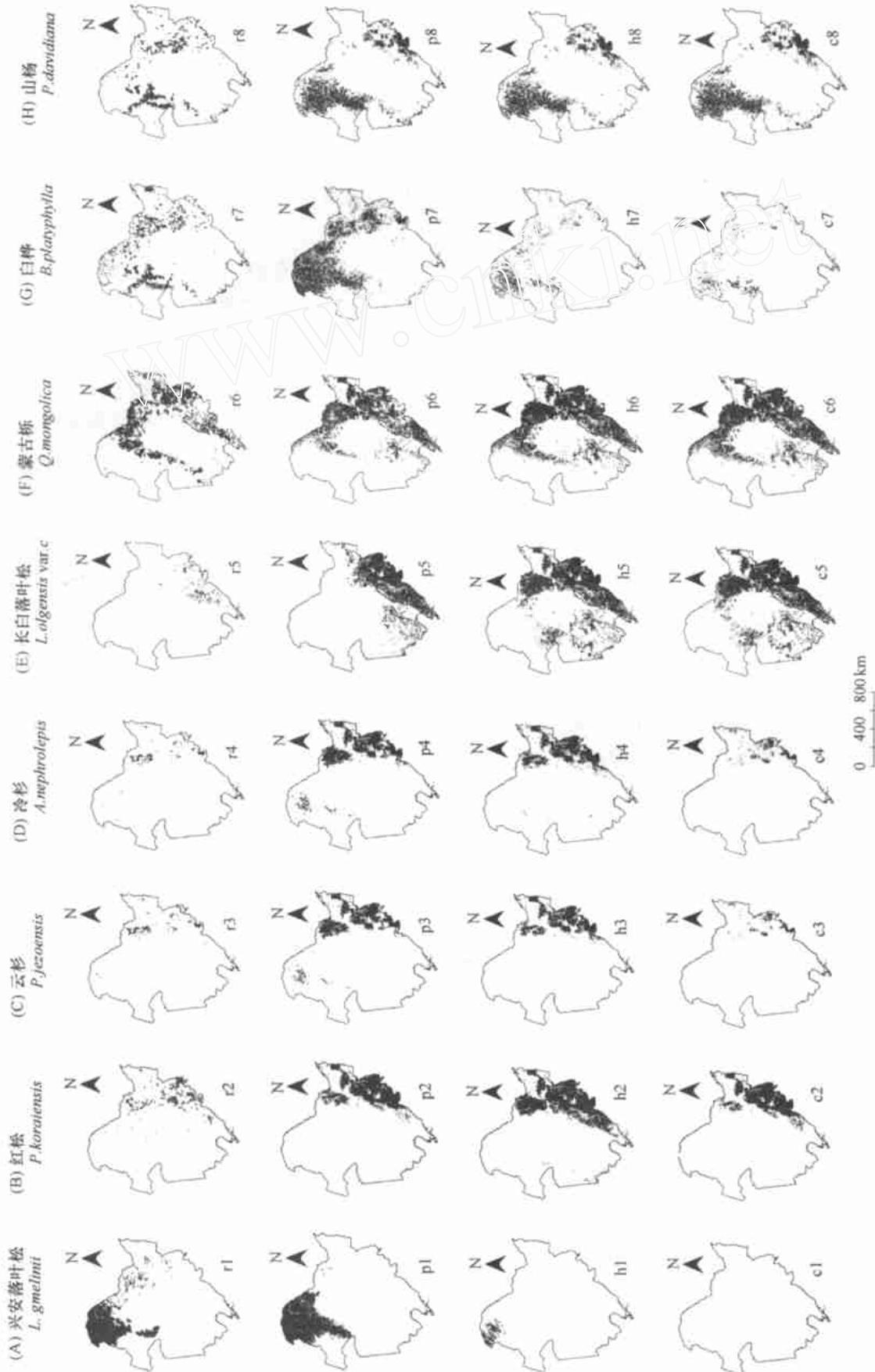


图2 东北森林建群种的分布图
Fig. 2 Distribution of constructive species of Northeast Forest

及老爷岭山区,多分布在沼泽地或沼泽化地段^[141](图 2E(a))。它的预测现实面积为 1607 万 hm^2 (图 2E(b))。

HADCM2SUL 方案下,面积增加到 3018,占据了位于辽东半岛的千山、龙岗山、长白山以及黑龙江境内的张广才岭和老爷岭地区(图 2E(c))。分布区年均温在 $-0.48 \sim 14.87$, 平均为 6.38; 年降水在 450 ~ 1259 mm, 平均为 763 mm 左右。

CGCM1 方案下,面积增加到 3106 万公顷,分布区范围同上(图 2E(d)),年均温在 $1.02 \sim 16.37$, 平均为 7.80; 年降水在 430 ~ 1205 mm, 平均为 724 mm 左右。表明长白落叶松随着温度的增加,生境有向北迁移的趋势。

3.5.5 蒙古栎 蒙古栎是目前东北面积最大的树种,广泛分布于除了中部平原、北部兴安落叶松林之外的东西部山地中。它的发生主要由于原森林经过皆伐或火烧后,环境发生改变,不再适合于原始树种的生长,而蒙古栎作为一种耐干旱贫瘠、萌发力极强的树种,就会进入该地,成为优势树种^[141](图 2F(a))。它的预测现实面积为 2455 万 hm^2 (图 2F(b))。

HADCM2SUL 方案下,面积增加到 3224 万 hm^2 ,广泛分布于东北山区(图 2F(c)),分布区年均温在 $-0.88 \sim 14.87$, 平均为 6.38; 年降水在 152 ~ 1151mm 之间,平均为 715mm。

CGCM1 方案下,面积增加到 3131 万 hm^2 ,分布区范围同上(图 2F(d)),年均温在 $0.80 \sim 16.37$, 平均为 7.45; 年降水在 145 ~ 1100mm, 平均为 686mm 左右。表明在温度升高的条件下,蒙古栎的生境增多,温度再持续升高,对它的影响也不大。

3.5.6 白桦 白桦是除蒙古栎外最多的阔叶树种,喜光耐寒,较集中分布于北部寒温带针叶林区域(大兴安岭),向南至东部温带针叶阔叶混交林区域,也常有分布^[141](图 2G(a))。它的预测现实面积为 2354 万 hm^2 (图 2G(b))。

HADCM2SUL 方案下,面积减小到 768 万 hm^2 ,主要分布于大、小兴安岭,张广才岭(图 2G(c))。分布区年均温在 $-3.42 \sim 9.57$, 平均为 1.57; 年降水在 273 ~ 1259mm 之间,平均为 549mm。

CGCM1 方案下,降水增加 25% 时,面积减小到 238 万 hm^2 ,分布区范围同上(图 2G(d)),年均温在 $-1.92 \sim 10.95$, 平均为 2.91, 年降水在 271 ~ 1205mm, 平均为 554mm 左右。这表明温度增加,对白桦有负面影响,导致其面积持续减少。

3.5.7 山杨 山杨为强阳性树种,耐寒,与白桦的生境相近,只是对土壤水分要求较高。分布区域广泛,北自寒温带针叶林区域,南至温带针叶阔叶混交林区域(东北东部山区),再向南至暖温带落叶阔叶林区域(辽宁省南部)^[141](图 2H(a))。

从回归方程中可以看出,温度和降水并没有进入方程,可见它们对山杨的分布并无影响。因此它的 3 种预测方案的分布范围一致,主要分布于大、小兴安岭、张广才岭和长白山区(图 2H(b), 图 2H(c), 图 2H(d))。

3.5.8 综合分析 在两种气候变暖方案下,东北森林建群种有如下 3 种变化趋势: 种群下降; 种群增加; 种群不变。HADCM2SUL 方案下,兴安落叶松、白桦、冷杉、云杉的覆盖率分别下降 91.2%、67.4%、11.9%、10%; 长白落叶松、红松、蒙古栎的覆盖率分别增长 87.8%、54.6% 和 31.3%; 在 CGCM1 方案下,兴安落叶松、白桦、云杉、冷杉、红松的覆盖率分别下降 99.2%、89.9%、85.9%、83.2% 和 4.9%; 长白落叶松、蒙古栎的覆盖率分别增长 93.3% 和 27.5%; 山杨在这两种方案下数量不变。

4 讨论

4.1 logistic 回归模型预测结果的验证

东北地区有关气候变暖对树种影响的研究已经有许多前人做过,研究手段大概有两种,一是对几期历史资料的分析对比,另一种就是小尺度上的林窗模型模拟。主要研究区在小兴安岭和长白山。本文的模拟结果可以通过与上述研究对比来检验其合理性与正确性。

4.1.1 历史资料对比分析 陈雄文分析 1896 年和 1986 年间黑龙江省几种森林景观的特征变化,结果表明在这 90a 间,云冷杉林、阔叶红松林的面积分别减少 87% 和 84%^[181]。在这期间该区的人类活动干扰非常强烈,

因此不能推断森林面积减少是由于气候变暖造成。

常禹在重建长白山自然保护区历史森林景观时,研究了该区 1975 年到 1997 年间的森林变化,发现苔原、云冷杉林面积减小,而红松林面积增加^[16]。由于保护区内没有人为活动干扰,这种变化趋势应该归结于气候变化。本文用 Logistic 回归模型模拟的结果(云冷杉林面积减少,红松林增加)与这一结论一致。

4.1.2 林窗模型模拟研究 邓慧平等人应用林窗模型模拟了小兴安岭阔叶红松林在气候变化下的动态,结果表明,当降水增加幅度大于 10%,温度增幅小于 4℃ 时,云冷杉林面积减少,而红松林面积增加;当降水增加幅度大于 10%,温度增幅大于 5℃ 时,云冷杉林、红松林面积都减少^[8]。郝占庆等用林窗模型 LINKAGES 对长白山自然保护区内主要树种在各斑块类型中对气候变化的潜在反应进行了模拟,结果表明云冷杉林有上移的趋势,阔叶红松林的生长加速^[11]。本文关于云冷杉和红松的模拟结论与此一致。

陈雄文用林窗模型 BKPF 模拟了伊春地区红松针阔混交林采伐迹地对气候变化的潜在反应,当气候增加 2℃、降水增加 8.7% 时,红松、硬阔叶树数量增加,而兴安落叶松、白桦、山杨林数量下降^[10]。本研究得到的兴安落叶松和白桦的变化趋势与它一致。

延晓冬等人用林窗模型 NEWCOP 模拟了气候变化下小兴安岭天然林的演替,结果表明,在 GISS 方案下(温度增加 3.87℃,降水增加到 109%),红松的单优势地位瓦解;在 GFDL 方案下(温度增加 7.26℃,降水增加到 109%),红松林消失,被蒙古栎纯林替代^[9]。GISS 方案的结论与本研究的 HADCM2CL 方案的结论不符;但是从本研究得到的红松林的变化趋势可以推测出 GFDL 的结论。

整体上看,用 logistic 回归模型模拟气候变化后东北森林主要建群种的空间分布与真实历史资料、林窗模型的模拟研究的结论基本一致。

4.2 logistic 回归模型的预测能力

在运用 logistic 回归模型预测东北森林建群种分布的过程中,发现了以下 2 个问题: 在进行拟合优度检验时,HL 指标不佳; 进行预测精度评价时,错误肯定率太高。导致 HL 指标极显著的原因是由于样本太大,这一点无法避免,因为地理数据的特点之一就是数据量极大。错误肯定率过高是由树种存在的概率阈值偏低造成,通过本研究的探索性分析表明面积过小的树种,模型可能预测不出来,为了消除面积的影响,只能降低阈值,而降低阈值又导致错误肯定率升高,这是一个矛盾。但是可以从以下 2 个方面加以改进。

(1) 保证源数据(植被和环境)本身的精确性、数据彼此之间的吻合度 由于数据来源于 4 个不同的图层、两个不同的尺度,尽管经过了校正,误差是不可避免的。这种误差可能对面积大的树种影响不大,但是对于小面积树种的影响可能极大。

(2) 改变采样方法 本文的随机采样法可能不适合于小面积树种,需要进行分层采样,增加其样本数。

4.3 气候变暖方案

本文使用了气候变暖方案 HADCM2SUL、CGCM1 的全球平均值作为未来东北的气候值,这一点不太合适,实际上全球不同空间位置上的气候变化是不同的。CGCM1 可以为中国东北提供本地气候变暖方案,但是由于 HADCM2SUL 没有类似的预测值,为了对比东北森林对这两种方案的反应,本文只能暂时使用二者的全球平均值。一旦 HADCM2SUL 对中国东北气候变化有了进一步精确地预测,可以使用相同的方法预测东北森林对该变化的反应。

References:

- [1] Johns T C, Carnell R E, Gossley J F, *et al.* The second Hadley Centre coupled ocean atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Climate Dynamics*, 1997, 13:103~134.
- [2] Boer GJ, Flato GM, Ramsden D. A transient climate change simulation with historical and projected greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. *Climate Dynamics*, 2000, 16: 427~451.
- [3] Zhou GS, Zhang XS, Gao SH, *et al.* Experiment and modeling on the responses of Chinese terrestrial ecosystems to global change. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9): 879~888.
- [4] Wang LX, Yang YL, He YH, *et al.* Discussion of research methods on relationship between climate change and plant. *Chinese Journal of Ecology*,

- 2003, 22(1) : 43 ~ 48.
- [5] Cheng Y F. Research on responses of vegetation to climate change. *Progress in Geography*, 1997, 16(2) : 70 ~ 77.
- [6] Cheng Y F. Research on the responses of vegetation to climate change : modeling. *Progress in Geography*, 1997, 16(3) : 24 ~ 28.
- [7] Sang W G, Li J W. Dynamics modeling of Korean pine forest in southern lesser Xingan Mountains of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(1) : 38 ~ 47.
- [8] Deng H P, Wu Z F, Zhou D W. Response of broadleaved *Pinus koraiensis* forests in Xiaoxinganling Mt. to global climate change —— A dynamic modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1) : 43 ~ 46.
- [9] Yan X D, Zhao S D, Fu C B, *et al.* How should the Xiao Hinggan Mt. forests change with potential climate change : A simulation study. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4) : 372 ~ 376.
- [10] Chen X W, Wang Y F. Simulation of potential responses of clear-cut of mixed coniferous and broadleaved Korean pine forest in Yichun to climate change by BKPF model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4) : 513 ~ 517.
- [11] Hao Z Q, Dai L M, He H S, *et al.* Potential response of major tree species to climate warming in Changbai Mountain, northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5) : 653 ~ 658.
- [12] He H S, Hao Z Q, Larsen D R, *et al.* Simulation study of landscape scale forest succession in northeastern China. *Ecological Modelling*, 2002, 156 : 153 ~ 166.
- [13] Wang J C, Guo Z G. Logistic regression models : methods and application. Beijing : Higher Education Press, 2001.
- [14] Zhou Y L, ed. Geographic vegetation of northeastern China. Beijing : Science Press, 1997.
- [15] Editorial Board of Vegetation map of China, Chinese Academy of Sciences. 1 100 million vegetation Atlas of China. Beijing : Science Press, 2001.
- [16] Chang Y, Li Y H, Hu Y M, *et al.* The preliminary reconstruct of historical forest landscapes in Changbai Mountain Natural Reserve. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3) : 309 ~ 317.
- [17] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, *et al.* Soil Database of 1 1,000,000 Digital Soil Survey and Reference System of the Chinese Genetic Soil Classification System. *Soil Survey Horizon*, 2004, 45(4) : 129 ~ 136.
- [18] Chen X W. Characteristic change of several forest landscapes between 1896 and 1986 in Heilongjiang Province. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(9) : 979 ~ 984.

参考文献 :

- [3] 周广胜,张新时,高素华,等. 中国植被对全球变化反应的研究. *植物学报*, 1997, 39(9) : 879 ~ 888.
- [4] 王连喜,杨有林,何雨红,等. 气候变化和植被关系研究方法探讨. *生态学杂志*, 2003, 22(1) : 43 ~ 48.
- [5] 陈育峰. 自然植被对气候变化响应的研究 : 综述. *地理科学进展*, 1997, 16(2) : 70 ~ 77.
- [6] 陈育峰. 自然植被对气候变化响应的研究 : 建模. *地理科学进展*, 1997, 16(3) : 24 ~ 28.
- [7] 桑卫国,李景文. 小兴安岭南坡红松动态模拟. *生态学报*, 1998, 18(1) : 38 ~ 47.
- [8] 邓慧平,吴正方,周道纬. 全球气候变化对小兴安岭阔叶红松林影响的动态模拟研究. *应用生态学报*, 2000, 11(1) : 43 ~ 46.
- [9] 延晓冬,赵士洞,符凉斌,等. 气候变化背景下小兴安岭天然林的模拟研究. *自然资源学报*, 1999, 14(4) : 372 ~ 376.
- [10] 陈雄文,王友凤. 林窗模型 BKPF 模拟伊春地区红松针阔叶混交林采伐迹地对气候变化的潜在反应. *应用生态学报*, 2000, 11(4) : 513 ~ 517.
- [11] 郝占庆,代力民,贺红士,等. 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.
- [13] 王济川,郭志刚. Logistic 回归模型 —— 方法与应用. 北京 : 高等教育出版社, 2001.
- [14] 周以良. 中国东北植被地理. 北京 : 科学出版社, 1997.
- [15] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 1 100 万中国植被图集. 北京 : 科学出版社, 2001.
- [16] 常禹,李月辉,胡远满,等. 长白山自然保护区历史森林景观的初步重建. *第四纪研究*, 2003, 23(3) : 309 ~ 317.
- [18] 陈雄文. 1896 年和 1986 年黑龙江省几种森林景观的特征变化. *植物学报*, 2000, 42(9) : 979 ~ 984.