

中国东北落叶松属 3 种植物潜在分布对气候变化的敏感性分析

冷文芳^{1 2} 贺红士^{1 3} 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 100049) (3 密苏里大学自然资源学院, 哥伦比亚市 密苏里州 美国 65211)

摘要 该文在东北地区多年平均的年均温、年降水分布图、海拔高程图、坡度图、坡向图和植被图的基础上, 使用地理信息系统和 Logistic 回归模型的结合, 预测 3 种落叶松 (*Larix* sp.) 的“气候-地形”潜在分布区。预测精度用敏感性、指定度和总正确率进行评价, 3 个树种的敏感性为 61% ~ 88%, 指定度为 80% ~ 99.8%, 总正确率为 80% ~ 99.8%。年均温、年降水和海拔是控制 3 种落叶松分布的主要环境因子。采用 5 种气温变化方案 (+1 °C、+2 °C、+3 °C、+4 °C 和 +5 °C) 和 6 种降水变化方案 (-30%、-20%、-10%、+10%、+20% 和 +30%), 预测气候变化对各个树种潜在分布的影响, 探索不同的树种对气候因子的敏感性。结果表明, 气温每上升 1 °C, 兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 将减少 12%; 长白落叶松 (*Larix olgensis* var. *changpaiensis*) 将增加 23%; 华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 将增加 500%。降水每增加 10%, 兴安落叶松将减少 12.5%; 长白落叶松将增加 64%; 华北落叶松将减少 15%。随气候的“暖干化”(+5 °C, -30%) 兴安落叶松将向西北方退缩 100 km 左右; 长白落叶松向西北方扩展 100 km 左右; 华北落叶松将向东北方扩展 800 km 左右。随气候的“暖湿化”(+5 °C, +30%) 兴安落叶松将向西北退缩 400 km 左右; 长白落叶松将向西北方扩展 550 km; 华北落叶松将向东北方扩展 320 km 左右。

关键词 兴安落叶松 长白落叶松 华北落叶松 潜在分布 气候变化 敏感性

SENSITIVITY ANALYSIS OF THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON POTENTIAL DISTRIBUTION OF THREE LARCH (*LARIX*) SPECIES IN NORTHEASTERN CHINA

LENG Wen-Fang^{1 2}, HE Hong-Shi^{1 3}, BU Ren-Cang¹, and HU Yuan-Man¹

¹Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China, ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China, and ³School of Natural Resources, University of Missouri, Columbia, Missouri 65211, USA

Abstract Aims Prediction of potential distribution of tree species and their responses to climate change is an increasingly important field of global change. *Larix* are important tree species in northeastern China. In this study we predict the potential distribution of three *Larix* species based on “climatic-topographic” relationships. Our aims are to determine: 1) the dominant factors that control the distributions of the three *Larix* species and 2) the sensitivities of the species to climate change.

Methods Spatial overlap analysis was used to sample the distribution information of the three *Larix* species and corresponding environmental factors. A logistic regression model was used to explore the quantitative relationships between environmental factors and *Larix* species. A map calculator method was used to transform the results of the logistic regression model to a prediction map in ArcGIS. Three indices (sensitivity, specificity and percentage of correctness) were used to assess the prediction accuracy of the logistic regression models. Five temperature change scenarios (+1 °C, +2 °C, +3 °C, +4 °C, and +5 °C) and six precipitation change scenarios (-30%, -20%, -10%, +10%, +20%, and +30%) were used to explore the impacts of climate change on the distributions of the three *Larix* and the sensitivities of the species to climate factors.

Important findings Mean annual temperature, annual precipitation and elevation were found to be dominant factors controlling the distributions of the *Larix* species. The sensitivity of the species changed from 61% to

88% , the specificity changed from 80% to 99.8% and the percentage of correctness changed from 80% to 99.8% . *Larix gmelinii* decreases by 12% and *L. olgensis* var. *changpaiensis* and *L. principis-rupprechtii* increase by 23% and 500% , respectively , with the temperature increase 1 °C . *L. olgensis* var. *changpaiensis* increases by 64% and *L. gmelinii* and *L. principis-rupprechtii* decrease by 12.5% and 15% , respectively , with the precipitation increasing 10% . With climate change to “ warm and dry ”(+ 5 °C , - 30%) , *L. gmelinii* shifts northwestward by about 100 km , *L. olgensis* var. *changpaiensis* expands northwestward by about 100 km and *L. principis-rupprechtii* expands northeastward by about 800 km . With climate change to “ warm and wet ”(+ 5 °C , + 30%) , *L. gmelinii* shifts northwestward by about 400 km , *L. olgensis* var. *changpaiensis* expands northwestward by about 550 km and *L. principis-rupprechtii* expands northeastward by about 320 km . All three species are sensitive to climate change ; therefore , future climate change in northeastern China may greatly impact their distributions .

Key words *Larix gmelinii* , *Larix olgensis* var. *changpaiensis* , *Larix principis-rupprechtii* , potential distribution , climate change , sensitivity

古气候研究表明 ,第四纪冰期和间冰期的交替出现 ,曾导致全球植被大规模地南北迁移(Delcourt & Delcourt , 1988 ; Iverson & Prasad , 2002) 。目前 ,由人类活动引起的全球范围的气候变暖也影响到了森林植被的分布。东北地区的气温在过去的百年内上升了 1.43 °C(孙凤华等 ,2005) 。在此期间 ,黑龙江省的阔叶林向北迁移了 290 km 左右(Chen ,2000) ;而大兴安岭的兴安落叶松(*Larix gmelinii*)也在随着冻土的消退而退缩(谭俊和李秀华 ,1995) ;长白山自然保护区的苔原和云冷杉林的分布上限在上升(常禹等 2003) 。

各种大气环流模型预测东北地区在未来百年内的气温还将继续上升 ,这将对东北的森林带来持续的影响 ,学者们就这一问题展开了研究 ,预测的主要手段是林窗模型(于振良和赵士洞 ,1997) 。各类林窗模型的结果表明 ,如果气候变化较为温和(温度增长 < 2 °C) 红松(*Pinus koraiensis*) 还可能占据优势地位 ,但是兴安落叶松(*Larix gmelinii*) 、云杉(*Picea jezoensis*) 和冷杉(*Abies nephrolepis*) 会减少(陈雄文和王凤友 ,2000 ;邓慧平等 ,2000 ;郝占庆等 ,2001 ;He *et al.* , 2005) 。如果气候变化比较严峻(温度增长 > 5 °C) 那么目前占优势的针叶树种将全部被阔叶树所替代 ,阔叶树中蒙古栎(*Quercus mongolica*) 将是最重要的树种 ,同时东北地区适于森林生长的区域将大幅度减少(延晓冬等 ,1999 ,2000) 。由于林窗模型只适用于小尺度 ,无法在整个东北地区应用 ,而且其结果不具备空间信息 ,不能模拟树种的空间迁移。各种统计模型则没有以上问题的困扰。例如 ,Iverson 和 Prasad(1998) 使用分类和回归树 ,预测了美国东部 80 个树种的潜在适宜生境的变化。在 Hadley 气候变化方案下 ,有 30 个树种向北迁移的幅度超过

100 km ,其中 5 种将超过 200 km ,而在加拿大气候中心(Canadian climate center , CCC) 气候变化方案下 ,有 35 个树种向北迁移的幅度超过 100 km ,其中 24 种将超过 200 km 。曹铭昌等(2005) 使用广义线性模型、广义加法模型和分类回归树模型 ,模拟了中国 15 个树种的地理分布。结果表明 ,在年均温增加 2.5 °C ,年降水增加 12% 时 ,青冈(*Cyclobalanopsis glauca*) 向西向北扩展 ,蒙古栎也向西扩展。

落叶松属(*Larix*) 植物是目前东北森林的主要树种 ,研究其潜在分布对气候变化的响应具有重要的理论与实际意义。本文将使用一种特殊的广义线性模型——Logistic 回归模型 ,结合地理信息系统 ,预测兴安落叶松、长白落叶松(*Larix olgensis* var. *changpaiensis*) 和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*) 对气候变化的敏感性 ,为相关部门提供基本信息和资料。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

中国东北的政区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古东四盟 ,地理位置处于欧亚大陆东缘 ,地域辽阔 ,在 115°05' ~ 135°02' E、38°40' ~ 53°30' N 之间 ,面积约为 129×10^4 km² 。由于东西南北的跨度很大 ,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(周以良 ,1997) 。

1.2 Logistic 回归模型原理及其在预测树种潜在分布中的应用

树种在某一特定空间位置出现,表明该空间位置的环境因子组合适合于该树种的生存,所有适宜于某一特定树种生存的环境因子组合被称为该树种的生态位。由于自然系统的复杂性以及等级关系的存在,树种的分布在不同的尺度上,受到不同的环境因子的影响。在区域尺度上,气候与地形是影响树种分布的主要环境因子,在考虑这两类环境因子的基础上,树种分布的范围可以被称为树种的“气候-地形生态位”,由于树种的实际空间分布还受到其它环境因子的影响,因此其“气候-地形生态位”总是大于其实际分布,本文用潜在分布来表示,说明树种在没有其它因素影响下,可能分布的范围。

不同的树种对不同的环境因子组合具有不同的喜好,表现为其生境的特殊性。把树种在某一空间位置上的存在与否看作是响应变量 P ,存在时, P 取值为 1,否则为 0。该空间位置的环境因子,如气候、地形等,可以看作是预测变量。利用树种的实际空间分布,以及相应的环境因子组合,可以构建相应的回归模型,检测它的生境偏好。由于树种在特定空间位置上要么出现,要么不出现,因此,响应变量是二值变量,这对一般的线性回归模型——要求响应变量是连续型的,提出了挑战,而 Logistic 回归模型正是研究响应变量为二值(0/1)变量的一种多元回归分析方法,能够用于模拟预测树种的潜在分布。

Logistic 回归模型的函数形式为:

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

方程左侧 $P(y_i = 1 | x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})$ 表示当 k 个预测变量 (x_1, x_2, \dots, x_k) 在第 i 种组合时,响应变量值为 1 的概率。方程右侧 a 代表常数项,是待定的参数; b_k 分别代表 k 个预测变量的系数,也是待定参数。

在本研究中,响应变量 P 代表树种在某一空间位置存在的概率,预测变量 (x_1, x_2, \dots, x_k) 则代表该空间位置上环境因子的值。方程中的 i 表示第 i 个样本,当预测变量的组合趋近于 $-\infty$ 时, P 向 0 收敛,但是总是大于 0;当其趋近于 $+\infty$ 时, P 向 1 收敛,但是总是小于 1。这表明树种在该空间位置上出现的概率总是在 0 与 1 之间,符合现实逻辑。

从整体上看,Logistic 函数具有“S”型的分布曲线,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。

树种存在的概率是 p ,不存在的概率就是 $(1 - p)$,比值 $P/(1 - p)$ 被称为树种存在的发生比(odds):

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

把发生比取自然对数,就将非线性方程转换成了线性方程:

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

$\ln odds$ 又可以表示为 $\log_i(y)$,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。

1.3 建模过程

本文拟以 Logistic 回归模型模拟东北地区 3 种落叶松属植物的潜在分布,需要的空间数据集有两类:第一类是这 3 种落叶松在东北地区的实际分布图,代表响应变量;第二类是东北地区的气候与地形环境因子图,代表预测变量。

将中国 1:100 万植被图的东北部分进行几何校正、图像拼接、数字化和栅格化,栅格的大小为 100 m。源数据的植被信息存在 3 个等级:植被类型、森林类型与树种类别。在树种水平上,分别提取 3 种落叶松的存在信息,将其存在的所有栅格赋值为 1,否则为 0。形成 3 个响应变量图层。

用东北 1:25 万的地形图生成海拔数字高程图(Digital elevation model, DEM),在 DEM 的基础上,生成坡度图和坡向图。坡向的原始值域在 0 和 360 之间,通常按一定规则被划分为阴坡、半阴坡、阳坡和半阳坡,来代表不同坡面朝向所接受的太阳辐射的多少。本文使用公式(4),生成一个连续型的转换坡向图(Transition aspect map, TRASP),它的值域在 0 和 1 之间,0 代表接受太阳辐射最少的坡向,1 代表最大的,这种转换能够更加细致的描述不同坡向的作用。

$$TRASP = \frac{1 - \cos(\frac{\pi}{180} \times (aspect - 30))}{2} \quad (4)$$

东北地区的气温和降水具有明显的南北分带性和东西分异性,可以看成是经度、纬度和海拔的函

数。结合东北地区 76 个台站的 30 年的气候数据与 DEM, 利用多元回归法生成东北地区的温度分布图和降水分布图。为了与植被图相匹配, 栅格大小同

样采为 100 m。每个栅格的面积就是 10 000 m², 也即 1 hm²。各数据集的具体信息见表 1。

东北地区总面积约为 1.29 × 10⁸ hm², 森林的总

表 1 空间数据集
Table 1 The spatial datasets

数据集 Data sets	数据来源 Data sources	空间分辨率 Resolution
兴安落叶松分布图 The distribution map of <i>Lg</i>	中国 1:100 万植被图 1:1 × 10 ⁶ vegetation map of China	100 m
长白落叶松分布图 The distribution map of <i>Loc</i>	中国 1:100 万植被图 1:1 × 10 ⁶ vegetation map of China	
华北落叶松分布图 The distribution map of <i>Lpr</i>	中国 1:100 万植被图 1:1 × 10 ⁶ vegetation map of China	
数字高程图 Digital elevation model (DEM)	东北 1:25 万地形图 1:2.5 × 10 ⁵ contour map of northeastern China	
温度分布图 Annual average temperature map	东北台站数据与 DEM Weather station data of northeastern China	
降水分布图 Annual precipitation map	东北台站数据与 DEM Weather station data of northeastern China	
坡度分布图 Slope map	海拔数字高程图 Digital elevation model	
坡向分布图 Transition aspect map (TRASP)	海拔数字高程图 Digital elevation model	

Lg: *Larix gmelinii* *Loc*: *Larix olgensis* var. *changpaiensis* *Lpr*: *Larix principis-rupprechtii*

面积约为 4.76 × 10⁷ hm², 兴安落叶松、长白落叶松和华北落叶松的面积分别为 1 × 10⁷ hm²、7 × 10⁵ hm² 和 3 × 10⁴ hm²。一个像元的面积为 1 hm², 表明以上数值直接代表了各类指标的像元数目。如果将每个像元上的响应变量值和预测变量值都提取出来, 数据量将达到千万个, 本研究的 Logistic 回归分析在 SPSS11.5 中进行, 探索性分析表明, 超过 200 万的数据量, 它就无法正常运行。因此, 需要提取部分空间位置的值进行建模。

探索性分析还表明, 面积大的树种预测的结果比面积小的要准确。因为 3 种落叶松的面积差异过大, 为了尽量避免面积的影响, 本文相应采取了不同的取样方式:

兴安落叶松: 提取了 10% 树种存在的像元, 10% 不存在的像元, 作为 Mask 图层;

长白落叶松: 提取了 30% 树种存在的像元, 10% 不存在的像元, 作为 Mask 图层;

华北落叶松: 提取了 100% 树种存在的像元, 10% 不存在的像元, 作为 Mask 图层;

利用得到的 3 种落叶松的 Mask 图层, 提取对应像元的 5 种环境因子值, 分别建立 3 种落叶松的 Logistic 回归模型。

1.4 Logistic 回归模型拟合优度以及概率阈值

建立落叶松属 3 个树种的 Logistic 回归模型目的是为了预测气候变化对它们可能造成的影响。预测的基础是回归模型的正确性, 因此, 需要检验模型的拟合优度。

检验模型拟合优度的指标有很多, 例如 Kappa

指数、ROC 指数、AUC (Area under curve) 敏感性、指定度 (Specificity) 和总正确率 (Percentage of correct, PerC) 等等。可以选择其中的一种或几种, 来评价模型的拟合优度。本文选择的是敏感性、指定度和总正确率的组合 (Fielding & Bell, 1997)。

在计算这 3 个指数之前, 需要进行一些预备工作。

利用 Logistic 回归模型的系数, 根据公式 (1)、(2) 和 (3) 计算 3 个树种的空间分布概率图, 选择一个适合的阈值, 概率值大于该阈值的空间位置赋值为 1, 否则为 0, 将概率图转换成分布图。如何选择这一阈值, 将在后文介绍。将模型预测得到的树种分布图与树种实际分布图进行图形比较, 得到一个列联表 2。

表 2 观测值与预测值的列联表
Table 2 The contingency table of observed value and predicted value

		观测值 Observed value		列和 <i>i</i> Column sum
		1	0	
预测值 Predicted value	1	<i>a</i> ₁₁	<i>a</i> ₁₂	<i>A</i> _{1.}
	0	<i>a</i> ₂₁	<i>a</i> ₂₂	<i>A</i> _{2.}
行和 <i>r</i> Row sum		<i>A</i> _{.1}	<i>A</i> _{.2}	<i>A</i> _{sum}

$$PerC = \frac{a_{11} + a_{22}}{A_{sum}} \times 100 \quad (5)$$

$$Sensitivity = \frac{a_{11}}{A_{.1}} \times 100 \quad (6)$$

$$Specificity = \frac{a_{22}}{A_{.2}} \times 100 \quad (7)$$

PerC 为总正确率, 正确预测的像元数和像元总

数之比,敏感度(Sensitivity)为正确预测树种存在的像元数与观测树种存在的像元总数之比;指定度(Specificity)为正确预测的树种不存在像元数与观测树种不存在的总像元数之比。这 3 个指数的值越大,预测精度越大(王济川和郭志刚,2001)。

由此可见,Logistic 回归模型的拟合优度与概率阈值的选择密切相关,一个合适的概率阈值会提高 Logistic 回归模型的精确性。根据这个原理,选择一系列的阈值,分别计算这 3 个指数,使其组合达到最大的阈值就是我们需要确定的阈值。

1.5 气候变化方案

将现在的气温图和降水图作为预测变量代入 3 种落叶松的 Logistic 回归模型,可以求得它们目前的潜在分布。如果改变气温图和降水图的值,这 3 种落叶松的潜在分布会发生什么变化?本文设计了 5 种温度变化预案、6 种降水变化预案,来探索 3 种落叶松对变化的气候的敏感性。气温变化预案: +1℃、+2℃、+3℃、+4℃、+5℃;降水变化预案: -30%、-20%、-10%、+10%、+20%、+30%。

2 结果分析

2.1 3 种落叶松与环境因子的关系

表 3 Logistic 回归模型的系数*

Table 3 The coefficients of Logistic regression model*

	系数 Coefficient			值域 Value range		新值域 New value range		
	Lg	Loc	Lpr	极小 Min	极大 Max	Lg	Loc	Lpr
温度 Temperature	-51.00	56.00	141.00	-6.87	11.26	(350,-574)	(-385,631)	(-969,1588)
降水 Precipitation	-1.54	1.16	-1.51	219	880	(-337,-1355)	(-254,1021)	(-331,-1329)
海拔 Elevation	-0.14	-	0.89	-118	2644	(17,-370)	(-, -)	(-105,2353)
坡度 Slope	5.12	-4.60	-4.30	0	75	(0,384)	(0,-345)	(0,-323)
坡向 Aspect	-7.04	-14.00	5.05	0	1	(0,-7)	(0,-14)	(0,5)
常数 Intercept	880.00	-941.00	-555.00	-	-	880	-941	-555

* 为方便比较,系数值均扩大了 100 倍 The coefficients were expanded 100 times for comparison Lg、Loc、Lpr 见表 1 See Table 1

表 4 Logistic 模型的预测精度

Table 4 The prediction precision of Logistic regression model

	敏感性 Sensitivity	指定度 Specificity	总正确率 PerC	概率阈值 Cutoff value
兴安落叶松 Lg	88	86	86	0.85
长白落叶松 Loc	78	80	80	0.60
华北落叶松 Lpr	61	99.8	99.8	0.70

Lg、Loc、Lpr 见表 1 See Table 1

该区的降水偏少。

2.2 3 种落叶松的 Logistic 回归模型拟合优度以及概率阈值

兴安落叶松的 3 个指标比较均衡,精度全部在

模型输出的结果表明,气温和降水是落叶松属分布的主要控制因子,但是对不同的树种影响不同(表 3)。例如,气温对兴安落叶松有负影响,而对其它两个树种有正影响;降水对兴安落叶松和长白落叶松有负影响,对华北落叶松有正影响;海拔对于华北落叶松的分布影响极大,但是对长白落叶松没有影响。

系数仅仅代表了环境因子与落叶松之间数量关系的一个方面,由于不同的环境因子具有不同的量纲,我们不能仅根据系数的大小来确定控制树种分布的环境因子。正确的方法是把环境因子的值域和系数结合起来得到一个新的值域,环境对树种的作用就在这个范围之内。

从表 3 的新值域可以看出,降水、温度和海拔均对兴安落叶松有负作用,表明兴安落叶松适宜生长于降水偏少、温度低的大兴安岭北部地区,其海拔偏低是因为该区的海拔比南部普遍要低。降水和气温对长白落叶松有正作用,坡度对它有负作用,表明长白落叶松的生境多雨,气温也偏高,但是坡度较缓,海拔对它没有影响。海拔和气温对华北落叶松有强烈的正作用,而降水和坡度则有负作用,表明它适于生长在海拔较高,气温也偏高的大兴安岭南部地区,

85% 以上,而长白落叶松稍低,精度在 80% 左右;华北落叶松的敏感性较低,但是总正确率和指定度都较高,这主要是由于它的分布区面积过小造成的。整体上看,Logistic 回归模型对各树种的预测精度达到标准,故认为所建模型可以模拟树种的潜在分布。

本文将海拔、坡度和坡向设为不变量,温度和降水为变量,将温度的 5 种、降水的 6 种变化方案代入 Logistic 回归方程,得到气候变化后各个树种的潜在分布图(图 1)。

2.3 3 种落叶松对温度和降水的敏感性

两种气候因子的单因素变化预案 11 种,双因素

耦合变化预案 30 种,共 41 种,无法全部用图示法展示,因此用落叶松潜在分布区的面积来展示它们对气候变化的敏感性,而图示法只展示了几种极端气候变化的结果。

落叶松潜在分布区的面积用各个树种被判定为 1 的象元数来代表。

图 1 中横坐标代表 7 种降水预案(1 种不变,6

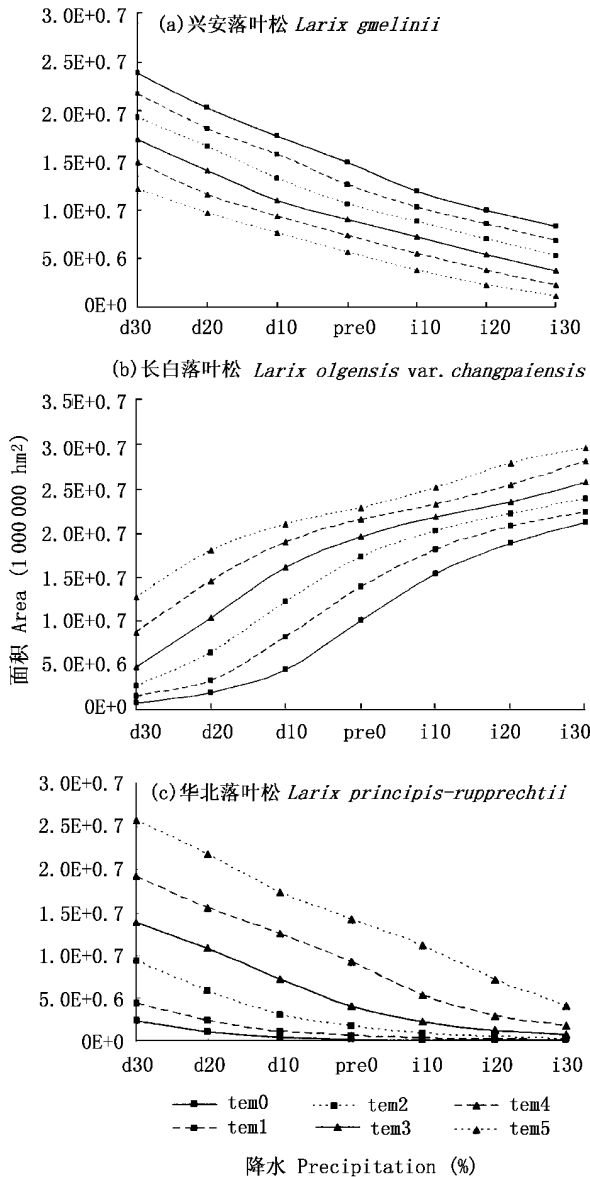


图 1 各气候变化方案下落叶松属的预测面积大小

Fig. 1 Prediction area of *Larix* genus under climate changing scenarios tem0 ~ tem5: 分别代表气温增加 0 ~ 5 °C Represent the temperature increase 0 ~ 5 °C d10 ~ d30: 分别代表降水减少 10% ~ 30% Represent the precipitation decrease 10% - 30%, respectively pre0: 代表降水不变 Represent the precipitation does not change i10 ~ i30: 分别代表降水增加 10% ~ 30% Represent the precipitation increase 10% - 30%, respectively

种变化)纵坐标代表落叶松的面积,温度变化用不同的系列表现。整体来看,3 种落叶松的面积变化是线性的。气温每上升 1 °C,兴安落叶松将减少 12%,长白落叶松将增加 23%;华北落叶松将增加 500%。降水每增加 10%,兴安落叶松将减少 12.5%;长白落叶松将增加 64%;华北落叶松将减少 15%。

2.4 暖干和暖湿气候条件下 3 种落叶松的潜在分布

以下展示了暖干预案(气温上升 5 °C,降水减少 30%)和暖湿预案下 3 种落叶松的潜在分布。

目前气候下,兴安落叶松的潜在分布区在大兴安岭北部和伊勒呼里山(图 2a);长白落叶松潜在分布区为老爷岭、长白山、张广才岭和千山(图 2d);华北落叶松的潜在分布区为内蒙古克什克腾旗南部(图 2g)。

随气候的“暖干化”(+ 5 °C, - 30%),兴安落叶松将向西北方退缩 100 km 左右,面积减少 18%(图 2b);长白落叶松向西北方扩展 100 km 左右,面积增加 126%(图 2e);华北落叶松将向东北方扩展 800 km 左右,达到大兴安岭中北部、老爷岭、张广才岭和千山,面积增加 22 359%(图 2h)。

随气候的“暖湿化”(+ 5 °C, + 30%),兴安落叶松将向西北退缩 400 km 左右,只分布于漠河和额尔古纳的西北部,面积减少 93%(图 2c);长白落叶松将向西北方扩展 550 km,达到小兴安岭、大兴安岭南端,面积将增加 292%(图 2f);华北落叶松将向东北方扩展 320 km 左右,达到大兴安岭的中部地区和千山,面积增加 3 403%(图 2i)。

东北落叶松属 3 个树种的潜在分布对温度和降水的变化都很敏感,气候的暖化不利于兴安落叶松的生存,气候的干旱化不利于长白落叶松的存在。

2.5 模型结果验证

陈雄文和王凤友(2000)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 °C、降水增加 8.7% 时,兴安落叶松数量下降。本研究中的方案(+ 2 °C, + 10%)下,兴安落叶松具有同样的变化趋势。

关于长白落叶松和华北落叶松对气候变暖的反应,以往的研究较少。这给它们的验证带来一定的困难。但是根据 Logistic 回归模型所预测的这两种树种的现实分布,与它们的实际分布比较吻合,这可以在某种程度上承认模型的合理性。

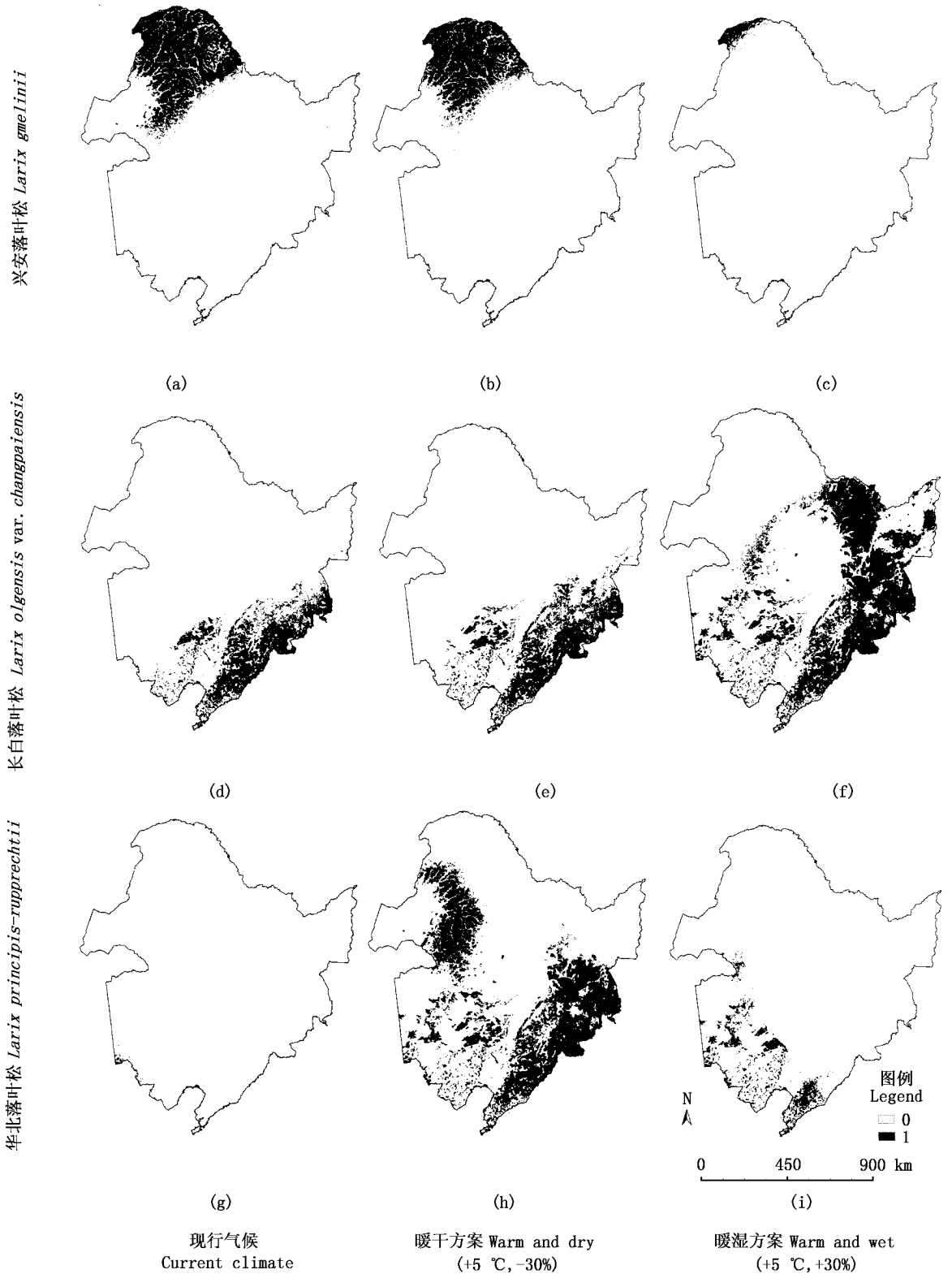


图 2 3 种落叶松在各气候方案下的潜在空间分布

Fig.2 Potential distributions of *Larix* genus under the scenarios of climate change

3 讨论和结论

在东北的区域尺度上, Logistic 回归模型能够较

好地模拟 3 种落叶松与气候-地形因子间的关系, 而地理信息系统能够将 Logistic 模型的模拟结果用图的形式直观展现。这二者的结合有利于研究气候变

化对树种分布的影响。但是,预测结果还存在以下方面的不确定性:1) Logistic 回归模型建立在目前的树种分布范围与环境因子关系的基础上,这种关系可能受气候变化的影响而不稳定;2) Logistic 回归模型没有考虑到树种的迁移障碍(如人类活动造成的景观破碎化)、迁移速度(树木从种子到成熟个体的时间)以及树种对气候变化反应的时滞效应(Vedyushkin, 1997),导致潜在分布区有很大一部分不能成为实际分布区;3) Logistic 回归模型没有考虑树种的寿命问题,即使气候不再适宜,已经存在的个体依然会存活下去;4) 判定树种存在的概率阈值是根据目前的气候条件确定的,未来气候变化是否会改变这一阈值,也不得而知。

本文计算了一系列阈值所对应的敏感性、指定度和总正确率,选取以上3个指数值较大、相应比较均衡处所对应的概率值作为确定树种存在的概率阈值,这导致了3个树种指定度和总正确率相近。

植物的地理分布只受自然环境条件,并无行政区划的限制。但是,植被图、地形图、气温和降水图等环境数据却是以国家或地区为单位制作的。本文的研究是在针对3种落叶松在东北地区分布的基础上展开的,没有考虑到它们在全国以及全球的分布,因此研究结果具有特定的地域性和适用性。

虽然存在以上的不足,本文的研究依然能在某种程度上揭示气候变化对3种落叶松的潜在分布造成的影响,通过本文的研究,得出以下结论:

气温每上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 兴安落叶松将减少 12%; 长白落叶松将增加 23%; 华北落叶松将增加 500%。

降水每增加 10%, 兴安落叶松将减少 12.5%; 长白落叶松将增加 64%; 华北落叶松将减少 15%。

随气候的“暖干化”($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, -30%), 兴安落叶松将向西北方退缩 100 km 左右, 长白落叶松向西北方扩展 100 km 左右; 华北落叶松将向东北方扩展 800 km 左右。

随气候的“暖湿化”($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+30\%$), 兴安落叶松将向西北退缩 400 km 左右, 长白落叶松将向西北方扩展 550 km, 华北落叶松将向东北方扩展 320 km 左右。

参 考 文 献

Cao MC (曹铭昌), Zhou GS (周广胜), Weng ES (翁恩生) (2005). Application and comparison of generalized models and classification and regression tree in simulating tree species distribution. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 2031–2040. (in Chinese with English abstract)

Chang Y (常禹), Li YH (李月辉), Hu YM (胡远满) (2003). The preliminary reconstruct of historical forest landscapes in Changbai Mountain Natural Reserve. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 23, 309–317. (in Chinese with English abstract)

Chen XW (2000). Characteristic change of several forest landscapes between 1896 and 1986 in Heilongjiang Province. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 42, 979–984.

Chen XW (陈雄文), Wang FY (王凤友) (2000). 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* (应用生态学报), 11, 513–517. (in Chinese with English abstract)

Delcourt HR, Delcourt PA (1988). Quaternary landscape ecology: relevant scales in space and time. *Landscape Ecology*, 2, 23–44.

Deng HP (邓慧平), Wu ZF (吴正方), Zhou DW (周道玮) (2000). Response of broadleaved *Pinus koraiensis* in Xiaoxing'anling Mt. to global climate change—a dynamic modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 11, 43–46. (in Chinese with English abstract)

Fielding AH, Bell JF (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24, 38–49.

Hao ZQ (郝占庆), Dai LM (代力民), He HS (贺红士) (2001). Potential response of major tree species to climate warming in Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 12, 653–658. (in Chinese with English abstract)

He HS, Hao ZQ, Mladenoff DJ, Shao G, Hu YM, Chang Y (2005). Simulating forest ecosystem response to climate warming incorporating spatial effects in north-eastern China. *Journal of Biogeography*, 32, 2043–2056.

Iverson LR, Prasad AM (1998). Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecological Monographs*, 68, 465–485.

Iverson LR, Prasad AM (2002). Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. *Forest Ecology and Management*, 155, 205–222.

Sun FH (孙凤华), Yang SY (杨素英), Chen PS (陈鹏狮) (2005). Climatic warming-drying trend in northeastern China during the last 44 years and its effects. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 24, 751–755. (in Chinese with English abstract)

Tan J (谭俊), Li XH (李秀华) (1995). Exploring the influence of warming climate on the frozen soil's retreat and northward shift of *Larix gmelinii*, in Great Xing'an Mountain. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design* (内蒙古林业调查设计), 1, 25–31. (in Chinese with English abstract)

Vedyushkin MA (1997). Vegetation response to global warming: the role of hysteresis effect. *Water, Air, and Soil Pollution*, 95, 1–12.

- Wang JC (王济川), Guo ZG (郭志刚) (2001). *Logistic Regression Models: Methods and Application* (Logistic 回归模型——方法与应用). Higher Education Press, Beijing. (in Chinese)
- Yan XD (延晓冬), Zhao SD (赵士洞), Fu CB (符淙斌), Shugart HH, Yu ZL (于振良) (1999). How should the Xiao Hinggan Mt. forests change with potential climate change: a simulation study. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 14, 372 – 376. (in Chinese with English abstract)
- Yan XD (延晓冬), Zhao SD (赵士洞), Yu ZL (于振良) (2000). Modeling growth and succession of northeastern China forests and its applications in global change studies. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 1 – 8. (in Chinese with English abstract)
- Yu ZL (于振良), Zhao SD (赵士洞) (1997). Advance of gap model. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 16(2), 42 – 46. (in Chinese with English abstract)
- Zhou YL (周以良) (1997). *Geography of the Vegetation in Northeast China* (中国东北植被地理). Science Press, Beijing. (in Chinese)

责任编辑：倪 健 责任编辑：张丽赫