

DOI: 10.5846/stxb201909101884

刘宪钊<sup>1,2,\*</sup>, 韩文斌<sup>3</sup>, 高瑞东<sup>3</sup>, 贾俊峰<sup>3</sup>, 白晋华<sup>4</sup>, 徐建军<sup>3</sup>, 高文强<sup>1,2</sup>

Liu X Z, Han W B, Gao R D, Jia J F, Bai J H, Xu J J, Gao W Q. Potential impacts of environmental types on geographical distribution of *Larix principis-rupprechtii*. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1885-1893.

## 不同环境类型对华北落叶松分布的潜在影响

刘宪钊<sup>1,2,\*</sup>, 韩文斌<sup>3</sup>, 高瑞东<sup>3</sup>, 贾俊峰<sup>3</sup>, 白晋华<sup>4</sup>, 徐建军<sup>3</sup>, 高文强<sup>1,2</sup>

1 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

2 森林经营与生长模拟国家林业局重点实验室, 北京 100091

3 山西省管涔山国有林管理局, 宁武 036700

4 山西农业大学, 太谷 030800

**摘要:**植物分布-环境因子之间的关系是生态学、生物地理学研究中一个核心问题。采用最大熵物种分布模型,选取气候、土壤和地形 3 类环境类型中 33 个因子,对气候、气候-土壤、气候-地形、气候-土壤-地形 4 种环境组合对华北落叶松在河北省、山西省和内蒙古自治区的分布预测进行建模和检验。利用 ArcGIS 空间统计,划分华北落叶松分布适宜区,并制作分布适宜性等级图。结果表明,不同环境类型组合对华北落叶松分布影响的训练集和检验集的 AUC 值在 0.965—0.983 之间,均达到极准确的精度水平。在影响华北落叶松分布的主导因子上,气候、气候-土壤两种环境类型组合均为最热月的最高温度、温度的年较差和季节性温度变异,累计贡献率均达到 74% 以上,而气候-地形、气候-土壤-地形两种环境类型组合中海拔和坡度的影响最大,分别为 48.8% 和 51.8%。在影响华北落叶松适生区(中、高、极高适宜区)面积上,气候、气候-地形两种环境类型组合差异不大,分别为 102583 km<sup>2</sup> 和 100698 km<sup>2</sup>,而气候-土壤、气候-土壤-地形两种环境类型组合影响下的华北落叶松适生区面积出现显著下降分别为 57134 km<sup>2</sup> 和 66754 km<sup>2</sup>。最大熵模型能够很好的预测华北落叶松分布,地形因子能明显改变单一气候因子对华北落叶松分布的预测结果,虽然土壤因子对落叶松分布格局的影响不大,但在适宜性、尤其是中等以上适宜区分布上,其影响作用显著。以上结论可为华北地区的生态修复和落叶松可持续经营提供依据。

**关键词:**华北落叶松; 物种分布模型; 环境类型组合; 分布适宜性制图

## Potential impacts of environmental types on geographical distribution of *Larix principis-rupprechtii*

LIU Xianzhao<sup>1,2,\*</sup>, HAN Wenbin<sup>3</sup>, GAO Ruidong<sup>3</sup>, JIA Junfeng<sup>3</sup>, BAI Jinhua<sup>4</sup>, XU Jianjun<sup>3</sup>, GAO Wenqiang<sup>1,2</sup>

1 Research Institute of Resources and Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling, State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

3 Guancenshan State-owned Forest Administration of Shanxi Province, Ningwu 036700, China

4 Shanxi Agricultural University, Taigu 030800, China

**Abstract:** The relationship between plant distribution and environmental factors is a core issue in ecology and biogeographic research. Maximum entropy models were used for predicting potential distribution suitability for *L. principis-rupprechtii*, in Hebei, Shanxi and Inner Mongolia province. Thirty-three environmental factors were chosen from climate, soil and terrain. The climate, climate-soil, climate-terrain and climate-soil-terrain four environmental combinations were modeled and tested. Suitable area of the distribution of *L. principis-rupprechtii* was divided and mapped by ArcGIS spatial statistics. The results showed that the maximum entropy models were successful at discriminating between suitable and unsuitable habitat at

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD060040302)

收稿日期:2019-09-10; 网络出版日期:2021-01-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxz9179@163.com

the local level for all environmental combination types, and the Area under curve (AUC) values were from 0.965 to 0.983 for calibration and test data with the excellent effect. In the dominant factors affecting the distribution of *L. principis-rupprechtii*, the highest temperature of the hottest month, the annual temperature difference and seasonal temperature variation were important, and the cumulative contribution rate was above 74% in the environmental types of climate only and climate-soil. The effects of altitude and slope were the highest in the environmental types of climate-terrain and climate-soil-terrain, with 48.8% and 51.8% respectively. In the area affecting the suitable distribution of *L. principis-rupprechtii* (middle, high, and extremely high-adapted areas), the environmental types of climate and climate-terrain had little difference, with 102583 km<sup>2</sup> and 100698 km<sup>2</sup>, respectively. While, the environmental types of climate-soil and climate-soil-terrain, under the influence of the suitable area was significantly reduced to 57134 km<sup>2</sup> and 66754 km<sup>2</sup>, respectively. The maximum entropy model could reliably simulate the potential distribution area of *L. principis-rupprechtii*. The terrain factors can significantly change the prediction results of single climatic factor on the distribution of *L. principis-rupprechtii*. Although the soil factors have little effect on the distribution pattern of larch, the influence is significant in the suitability, especially the distribution of suitable areas above medium. All results could be as a reference for ecology restoration and sustainable management in north China.

**Key Words:** *Larix principis-rupprechtii*; maximum entropy models; environment type combination; distribution suitability mapping

物种-环境之间的关系不仅是生态学、生物地理学研究中一个核心问题,更广泛的影响着森林培育、经营、病虫害防治和珍稀物种保护等各个领域<sup>[1-2]</sup>。物种在各种各样的生物和非生物因子的共同作用下,都有一定的地理分布范围,且这种分布格局随着外界影响因素的变化而改变<sup>[3]</sup>。在区域尺度上,气候因素是影响物种分布的主要因素,且物种分布格局的变化对气候因素的响应最为敏感。特别是工业化革命以来人类活动导致的大气臭氧层的不断破坏以及温室气体的持续增加带来的全球变暖、冰川消融和极端天气的骤增都显著的影响着动植物的发育、扩张、物候、生长等生理节律并最终造成其地理分布格局的改变<sup>[4]</sup>。研究发现,随着全球气候的变化包括松材线虫在内的农林业虫害有潜在分布区扩大的趋势<sup>[5-6]</sup>,而诸如红松、桃儿七等自然分布在较高纬度或高海拔地区的物种均呈现出向更高纬度和更高海拔移动且分布面积缩减的趋势<sup>[2,7]</sup>。此外,包括海拔、地形地貌、植被类型和土壤特性等自然环境也影响着物种的地理分布<sup>[8]</sup>。由于全球气候变化的热点关注,物种分布研究主要集中在其对气候因素的响应上,综合考虑多种类型环境因素对物种分布的研究较少。因此,开展此方面的比较研究,可为全面了解物种地理分布与环境的关系提供依据<sup>[9]</sup>。

物种分布模型是评估环境因子对物种分布影响的主要方法,其主要将物种的分布信息与对应的环境数据进行关联,通过特定的算法估计物种的生态位并以概率的形式反映物种对生境的适应程度<sup>[3]</sup>。物种分布模型始于 BIOCLIM 模型的开发和应用<sup>[10]</sup>,随着研究的深入开展,产生了包括生态位因子分析模型、广义线性模型、分类与回归树模型、边界函数方法、最大熵模型、人工神经网络等基于统计的和基于人工智能的模型<sup>[11]</sup>。与其他模型相比,最大熵模型具有样本量要求低、变量处理灵活(只需要发生数据)、降噪效果好、预算精度高等优点<sup>[12]</sup>。基于此,本研究选用最大熵模型进行不同类型环境因子对物种潜在分布区的比较研究。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*),松科落叶松属高大乔木,是我国华北中高山典型的地带性树种,其生长迅速、耐严寒干旱、材质优良,在华北山区生态建设和木材战略储备中发挥着重要作用。华北落叶松天然分布主要在山西、河北两省,垂直分布从河北围场、雾灵山、小五台的海拔 1400—2400m 到山西管涔山、关帝山、五台山、恒山和太岳山海拔 1600—2800m,海拔跨度 1400m<sup>[13-14]</sup>。随着引种栽培技术的推广,近些年在山西、河北两省低海拔地区,内蒙古、北京、山东、辽宁、陕西、甘肃、宁夏、新疆等省市均有种植。由于其受地理环境和自然条件的影响很大,加之气候变化的影响,除原生地外其他地区的引种栽培大多效果不佳。因此,开展不同类型环境因子对华北落叶松分布的潜在影响研究,对合理制定华北落叶松中长期发展规划,开展适地适树经营至关重要。但是综合考虑气候、土壤和地形等多种类型环境因素的研究还未见报道。基于此,本研

究选取气温、降水、温度的年较差等气候因子,土壤容重、有机质、全氮等土壤理化因子,海拔、坡度、坡向等地形因子,对比研究不同环境类型及其组合对华北落叶松潜在分布的影响,为华北落叶松适地适树和可持续经营提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区选取山西省、河北省和内蒙古自治区( $34^{\circ}54'—53^{\circ}34'N, 97^{\circ}175'—126^{\circ}075'E$ ),涵盖华北落叶松原产区和引种栽培最集中的省份,即山西省西部的关帝山、管涔山,北部的恒山、五台山,中南部的太岳山;河北省北部承德和张家口坝上高原、燕山山地和太行山山地;内蒙古兴和县苏木山、卓资县上高台、呼和浩特市大青山、赤峰市旺业甸等地区。该区域主要为温带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温在  $8—13^{\circ}C$ ,年降水量在  $400—800mm$ 。华北落叶松天然林多以混交为主,海拔由低向高混交树种由杨(*Populus*)桦(*Betula*)等阔叶树种向油松(*Pinus*)、云杉(*Picea*)等针叶树种过渡,人工栽培以纯林为主。

### 1.2 数据采集

#### 1.2.1 华北落叶松地理分布数据

本研究使用的华北落叶松地理分布数据共计 345 个。其中,第 8 次森林资源一类清查固定样地数据(142 个)、森林资源第 4 次二类调查样地数据和少量前期调查数据(131 个)。同时结合中国数字化标本馆(<http://www.cvh.ac.cn>)、中国自然标本馆(<http://www.cfh.ac.cn>)和文献检索对华北落叶松分布数据进行补充(72 个)。汇总不同类型数据的位置坐标信息,利用 ArcGIS 生成华北落叶松现实分布点图(图 1)。

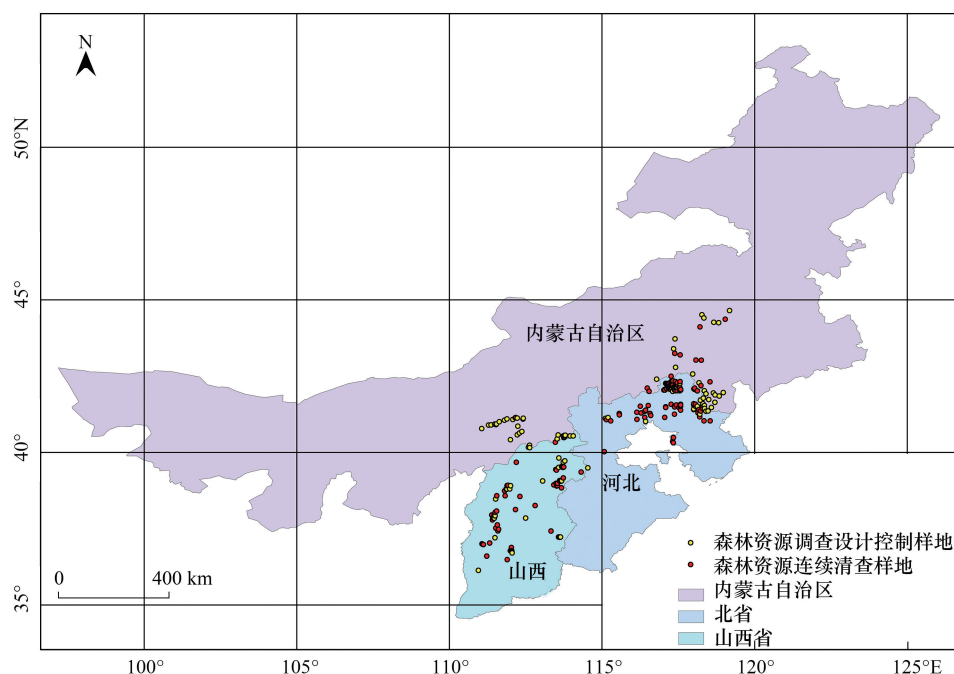


图 1 实验区位置及数据分布范围

Fig.1 Location of test site and coverage area of data

#### 1.2.2 气候数据

气候基准数据来源于世界气候数据库(WorldClim, <http://www.worldclim.org>),空间分辨率为  $30''$ (约  $1km$ )。该数据库将全球 1950—2000 年各地气象站点的数据进行插值形成全球气候栅格数据,并以 2000 年作为基准年。将全球气候栅格数据与山西、河北和内蒙三省区基础地理数据配准、裁剪形成研究区气候数据,包

括年平均气温、年降水量、等温性等 19 个气候变量<sup>[2]</sup>。

### 1.2.3 土壤数据

土壤数据利用国家地球系统科学数据共享平台提供的面向路面模拟的中国土壤数据集,数据来源为第 2 次土壤普查(1978 年冬—1979 年)的 1:100 万中国土壤图,选择全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、容重、粒级(粘粒、粉粒、沙粒)和有机质等 11 个数据。数据库中每个土壤理化性质包含 8 个土层深度数据(0—0.045 m、0.045—0.091 m、0.091—0.166 m、0.166—0.289 m、0.289—0.493 m、0.493—0.829 m、0.829—1.383 m 和 1.383—2.296 m),将 8 个土壤栅格数据进行加权平均,与山西省、河北省和内蒙古自治区的基础地理数据配准、裁剪作为本研究的土壤环境变量。

### 1.2.4 地形特征

海拔、坡度和坡向数据由数字高程模型(DEM)生成,该数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),分辨率 90 m。利用 ArcGIS 10.2 空间分析模块进行坡度、坡向分析,生成 Tiff 格式的坡度和坡向图层。

## 1.3 数据分析及模型评价

### 1.3.1 数据分析

选用树种分布预测较为成熟的最大熵 MaxEnt 模型(V 3.4.1.k)进行气候变化背景下华北落叶松适生性分析。软件输入数据包括研究区范围的 33 个环境因子数据(气候、土壤和地形数据)和华北落叶松在该区域分布的点坐标数据,并在软件中设置最大迭代次数 500,收敛阈值为  $10^{-5}$ 。将模型运算的结果文件导入 ArcGIS 10.2 中,生成华北落叶松不同气候背景下分布概率图,并进一步保存成可以制作专题图的格式。对树种的适宜性划分标准采用刘丹<sup>[15]</sup>的 5 级划分标准,即非适生区、低适生区、中适生区、高适生区和极高适生区分别对应的评价指数区间为  $[0-0.05]$ 、 $(0.05-0.2]$ 、 $(0.2-0.5]$ 、 $(0.5-0.8]$  和  $(0.8-1]$ 。

### 1.3.2 MaxEnt 模型评价

为评价模型精度,随机选取 75% 的华北落叶松分布点作为训练集,用于获取模型相关参数,剩余 25% 作为验证集来进行模型验证。采用受试者工作特征曲线(ROC-receiver operator characteristic curve)分析法预测模型准确性,以 ROC 曲线下面积 AUC 反映模型预测结果,取值 0—1,其中 AUC 取值 0.5—0.6、0.6—0.7、0.7—0.8、0.8—0.9 和 0.9—1.0 分别代表模型预测精度较差、一般、较准确、很准确和极准确。环境参数设置采用刀切法(Jackknife)来评价各种环境因子的权重,筛选出影响华北落叶松地理分布的主导环境因子。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的适用性分析

基于最大熵模型的不同类型环境因子对华北落叶松适宜性分布的训练集和检验集的 AUC 在 0.965—0.983 之间(表 1),四个预测模型的预测精度均达到极准确水平。

表 1 不同环境因子影响下的 ROC 曲线下面积与模型精度

Table 1 AUC values and the accuracy by SDMs of different environmental types

| 环境类型<br>Environmental types   | 训练集精度<br>Train data AUC | 检验集精度<br>Test data AUC | 精度评价<br>Accuracy evaluation |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 气候 Climate                    | 0.968                   | 0.965                  | 极准确                         |
| 气候-土壤 Climate-soil            | 0.983                   | 0.976                  | 极准确                         |
| 气候-地形 Climate-terrain         | 0.971                   | 0.967                  | 极准确                         |
| 气候-土壤-地形 Climate-soil-terrain | 0.979                   | 0.979                  | 极准确                         |

图 2 给出四种环境类型对于华北落叶松影响预测模型的 ROC 曲线,四个预测模型的曲线下面积均接近 1 且红线和蓝线十分接近,表明模型预测效果也十分稳定<sup>[15]</sup>。

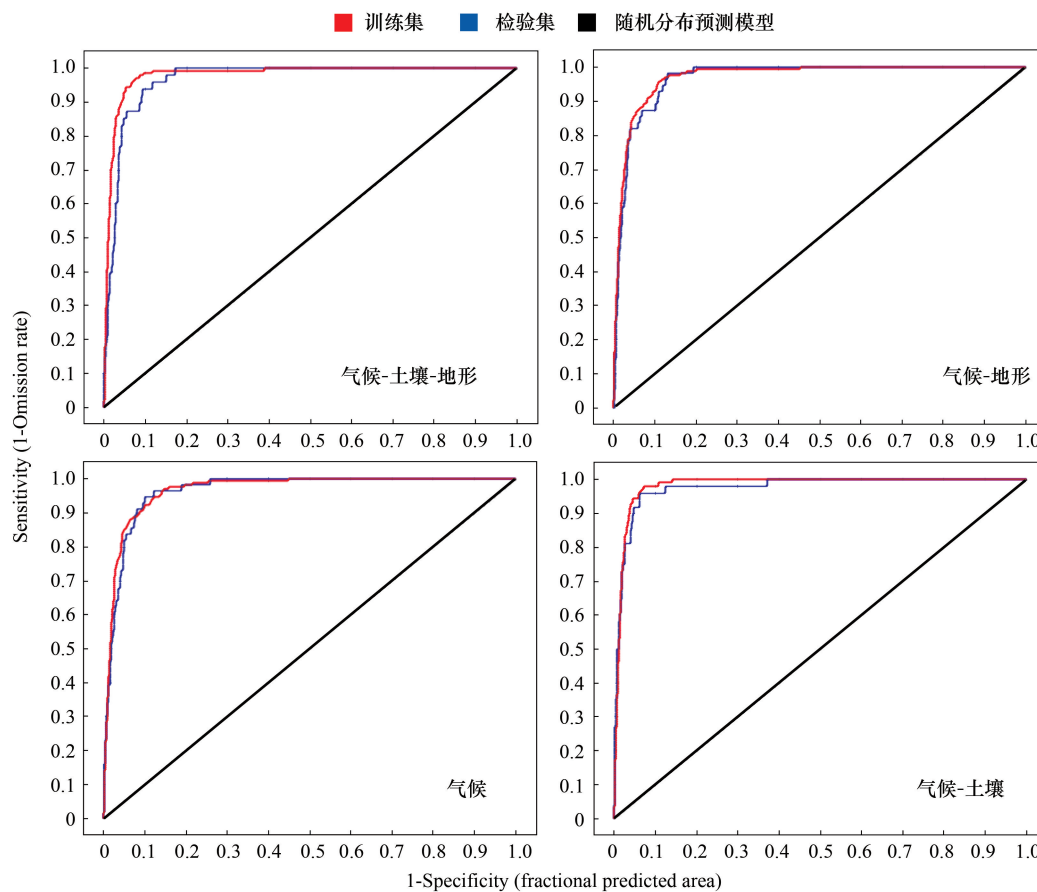


图2 不同环境类型最大熵模型的 ROC 曲线

Fig. 2 ROC curves by maximum entropy models of different environmental types

## 2.2 不同类型环境因子对华北落叶松分布的影响

只考虑 19 个气候因子,最热月的最高温度、温度的年较差和季节性温度变异 3 个因子训练过程中对华北落叶松分布的影响最高,累计达到 74.9%;增加 11 个土壤因子后,对于华北落叶松分布影响最主要的仍为以上 3 个因子,累计贡献率出现微降 74.5%,说明土壤环境对于区域尺度上华北落叶松分布的影响作用不大;综合考虑气候、土壤和地形因子后(共 33 个因子),训练集中对模型贡献率最高的 3 个因子变为海拔、坡度和季节性温度变异,累计贡献率下降到 68.3%;只考虑气候和地形两类环境对华北落叶松分布影响最主要的因子依次为海拔、坡度、最湿月的降雨量和温度的年较差,累计贡献率 70.5%。在两类含有土壤因子的环境变量组合中,仅有效磷、粉粒和全氮 3 个因子对华北落叶松分布的贡献率大于 1%,两类组合中土壤因子的累计贡献率均未超过 10%。

对于华北落叶松分布而言,地形中的海拔和坡度显著影响训练模型的结果输出,但季节性温度变异和温度的年较差两个气候因子仍对华北落叶松的分布具有较大贡献。

对于模型的排列重要性即模型检验过程中的贡献率(表 3),单一气候因子中,季节性温度变异、最湿月的降雨量、最热月的最高温度和年降雨量贡献最大,占总体的 86.1%;增加土壤因子后,影响华北落叶松分布的主要环境因子变为季节性温度变异和年平均气温,累计贡献率 64.8%;综合考虑气候、土壤、地形三类环境因子(33 个因子)季节性温度变异、最热季度的平均温度和年降雨量在检验过程中对模型的贡献率最大,达到 66.6%;只考虑气候和地形两类因子贡献率依次为年降雨量、最热月的最高温度、季节性温度变异、最冷季度的平均温度和最湿月的降雨量,累计 78.8%。与训练过程中增加海拔、坡度显著改变不同环境因子对模型的

贡献率不同,地形因子在检验过程中对于模型的影响不明显。

表 2 不同环境因子影响的贡献百分比

Table 2 Percent contribution of different environmental factors

| 环境因子<br>Environmental factors                         | 仅气候/%<br>Climate only | 气候-土壤/%<br>Climate-soil | 气候-地形/%<br>Climate-terrain | 气候-土壤-地形/%<br>Climate-soil-terrain |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 总因子数 Total factors                                    | 19                    | 30                      | 22                         | 33                                 |
| 最热月的最高温度<br>Max temperature of warmest month          | 42.7                  | 40                      | 2.7                        | 0.5                                |
| 温度的年较差<br>Temperature annual range                    | 20.3                  | 17.5                    | 10.6                       | 0                                  |
| 季节性温度变异系数<br>Temperature seasonality                  | 11.9                  | 17                      | 6.9                        | 16.5                               |
| 最湿月的降雨量<br>Precipitation of wettest month             | 2.1                   | 6.4                     | 11.1                       | 9.1                                |
| 海拔 Altitude                                           | 0                     | 0                       | 32.7                       | 35.2                               |
| 坡度 Slope                                              | 0                     | 0                       | 16.1                       | 16.6                               |
| 贡献率前 10 的因子合计<br>Total contribution of top 10 factors | 74.9                  | 74.5                    | 70.5                       | 68.3                               |

表 3 不同环境因子影响的排列重要性

Table 3 Permutation importance of different environmental factors

| 环境因子<br>Environmental factors                       | 仅气候/%<br>Climate only | 气候-土壤/%<br>Climate-soil | 气候-地形/%<br>Climate-terrain | 气候-土壤-地形/%<br>Climate-soil-terrain |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 总因子数 Total factors                                  | 19                    | 30                      | 22                         | 33                                 |
| 季节性温度变异系数<br>Temperature seasonality                | 39.5                  | 49.3                    | 9.8                        | 41.9                               |
| 最湿月的降雨量<br>Precipitation of wettest month           | 23.8                  | 6.7                     | 8.8                        | 6.2                                |
| 最热月的最高温度<br>Max temperature of warmest month        | 13.9                  | 0.7                     | 11.5                       | 2.3                                |
| 年降雨量<br>Annual precipitation                        | 8.9                   | 6                       | 39.3                       | 9.0                                |
| 年平均温度<br>Annual mean temperature                    | 5.7                   | 15.5                    | 0.9                        | 1.6                                |
| 最冷季度的平均温度<br>Mean temperature of coldest quarter    | 2.6                   | 0                       | 9.4                        | 2.3                                |
| 最热季度的平均温度<br>Mean temperature of warmest quarter    | 0.1                   | 1.7                     | 0.1                        | 9.5                                |
| 贡献率前 8 的因子合计<br>Total contribution of top 8 factors | 86.1                  | 64.8                    | 78.8                       | 66.6                               |

根据训练集各环境变量的贡献率排序结果,对影响华北落叶松分布的主要环境因子的响应曲线分析得到:(1)仅考虑气候因子作用,华北落叶松分布概率随最热月的最高温度的升高而降低,最热月最高温度在 $16^{\circ}$ 左右,其发生的概率达到 95%,温度升高到 $24^{\circ}$ ,概率下降到 40%,温度大于 $33^{\circ}$ ,概率几乎为 0。增加土壤和地形因子后,华北落叶松分布概率随最热月最高温变化的趋势同单一气候因子结果相似。(2)温度的年较差在 $40^{\circ}$ 之内时,3 类环境因子组合下华北落叶松分布概率大于 70%,而单一气候因子或任意 2 类环境因子组合下其分布概率下降到 60%;随着气温年较差的增加,华北落叶松发生概率显著下降,气温年较差增加到 $45^{\circ}$ 时,3 类环境因子组合和 1 类、2 类环境因子组合对华北落叶松分布的影响下降到 60% 和 50%。气温年较差大于 $50^{\circ}$ 时,华北落叶松在何种类型环境因子下分布概率几乎为 0。(3)在不同类型环境因子及其组合中,季节性温度变异系数对华北落叶松分布的影响与温度的年较差相似,表现为随着该系数的增加,分布概率整体

呈下降的趋势,在 1100—1200 间出现小幅回升后(不足 10%)后骤降,变异系数大于 1400 其分布概率接近 0。(4)对于含有地形因子的 2 类组合,海拔对华北落叶松的响应曲线均表现为 500m 以下发生概率接近 0,500—1500m 其发生概率逐渐增大到 30%,1500—2250m 其分布概率快速上升并达到峰值 90% 以上,后出现小幅下降并恒定在 80%。

### 2.3 基于最大熵模型的华北落叶松潜在分布适宜性

图 3 给出不同类型环境组合影响下的华北落叶松适宜区分布及其适宜性等级,仅考虑气候因子的影响,在河北、山西和内蒙古三省 1504973 km<sup>2</sup> 的研究范围内,非适生区、低适生区、中适生区、高适生区和极高适生区分别占比 83.96%、9.23%、4.17%、1.88% 和 0.77%;气候因子和土壤因子综合影响下,华北落叶松按照不适宜到极高适宜的分布面积比例变为 91.07%、5.14%、2.23%、1.06% 和 0.51%;气候因子和地形因子综合影响下,华北落叶松按照不适宜到极高适宜的分布面积比例变为 84.38%、8.93%、4.13%、1.89% 和 0.68%;综合考虑气候、土壤和地形三类因子对华北落叶松适宜区的影响,按照不适宜到极高适宜的分布面积比例变为 89.69%、5.88%、2.66%、1.24% 和 0.53%。

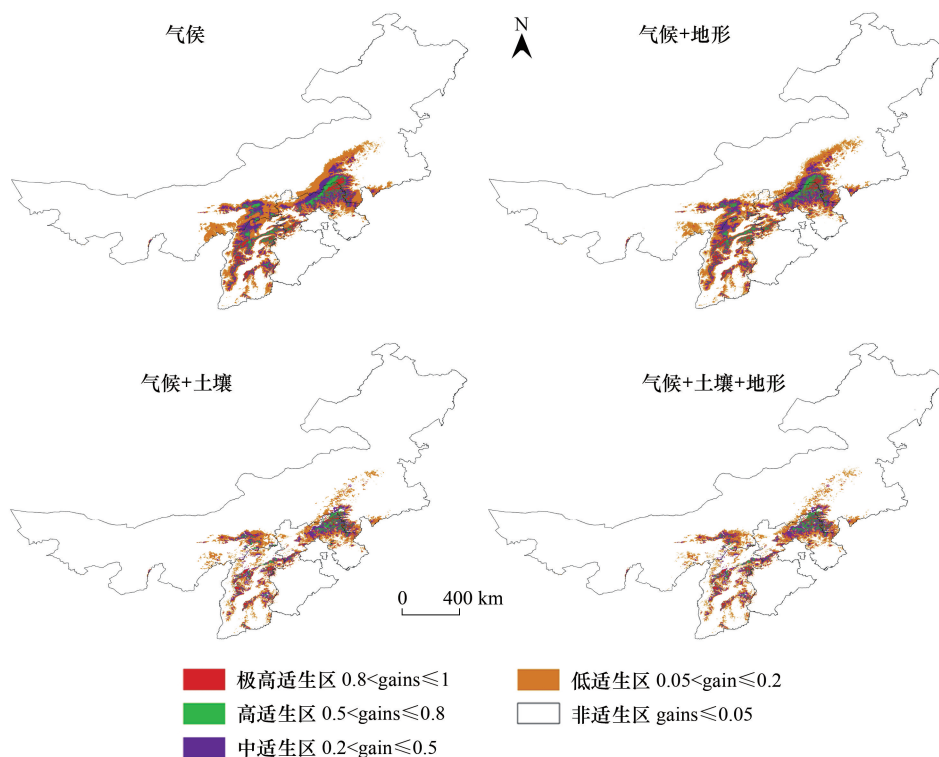


图 3 不同类型环境因子对华北落叶松的适宜性等级分布

Fig. 3 Distribution suitability maps of *L. principis* by 4 combination methods of environmental factors

在适宜区面积上,仅考虑气候因子对华北落叶松分布的影响,其适宜区面积(中、高、极高)能够达到 102583 km<sup>2</sup>,增加地形因子后其适宜区面积未发生明显变化为 100698 km<sup>2</sup>,综合考虑气候、地形和土壤 3 类因子的影响,适宜区面积下降明显为 66754 km<sup>2</sup>,但仍大于气候和土壤两类因子影响下华北落叶松适宜区面积(57134 km<sup>2</sup>),表明土壤因子对华北落叶松适生区影响远高于地形因子。

### 3 讨论

已有研究表明,限制植物地理分布的主要因子是植物的耐寒性、完成生活史所需的热量供应和可利用水,这些因子主要受气候环境决定<sup>[16]</sup>;海拔、坡度和坡向等地形因子通过影响水、热、光的分配进而改变区域温、

湿状况。与气候因子、地形因子不同,土壤是在气候、生物、地形等因素的长期的作用下,陆地表层由母岩风化形成的一个能够生长植物的疏松多孔物质层,能影响种子的萌发和植物地下部分的物质、能量交换和酸碱平衡,进而影响植物的分布<sup>[17-18]</sup>。

表 4 四种类型环境因子组合方式下华北落叶松分布适宜性及面积/km<sup>2</sup>

Table 4 Area of different suitability levels by 4 combination methods of environmental factors

| 适宜性<br>Suitability     | 气候<br>Climate only | 气候-土壤<br>Climate-soil | 气候-地形<br>Climate-terrain | 气候+土壤+地形<br>Climate-soil-terrain |
|------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 非适宜区 Least suitable    | 1263504            | 1370523               | 1269845                  | 1349741                          |
| 低适宜区 Bad suitable      | 138886             | 77316                 | 134430                   | 88478                            |
| 中适宜区 Moderate suitable | 62710              | 33559                 | 62105                    | 40081                            |
| 高适宜区 Good suitable     | 28260              | 15943                 | 28372                    | 18713                            |
| 极高适宜区 High suitable    | 11613              | 7632                  | 10221                    | 7960                             |
| 总计 Total area          | 1504973            | 1504973               | 1504973                  | 1504973                          |

本研究结果表明,仅考虑气候单一环境变量,最热月的最高温度、温度的年较差和季节性温度变异对华北落叶松分布影响的贡献率最大,该结果与吕振刚对气候因子影响下河北省华北落叶松分布的研究结果存在一定差异<sup>[12]</sup>,可能源于研究尺度的显著增加和大量边缘分布区样本的增加<sup>[19]</sup>,但两个研究结果均得到:相比于水分而言,温度的变化对华北落叶松分布影响更明显,这也于华北落叶松自然分布于温度较低的中高山地带相吻合<sup>[13]</sup>。土壤因子与华北落叶松潜在分布的相关性不高,表明在区域尺度上土壤理化性质对于落叶松分布的影响作用不大,该结果与刘丹等研究得到的土壤因子累计贡献率不足总环境因子的 20% 的结果相近<sup>[15]</sup>,但在沙漠、戈壁地带,土壤因子对一些灌草植物的分布却起到关键作用<sup>[17-18]</sup>。与刘丹<sup>[15]</sup>、冷文芳<sup>[20]</sup>等的研究结果相近,地形因子(尤其是海拔)对华北落叶松地理分布的解释能力远高于土壤因子。贾翔<sup>[2]</sup>、郝珉辉<sup>[21]</sup>、王亚领<sup>[22]</sup>等人在红松、针阔混交林和单叶蔓荆等不同生活型物种的潜在分布区研究中均得到海拔在物种潜在分布中起主导作用,这些物种的分布也大多与温度相关。

与大多研究相近,环境变量的增加会降低华北落叶松分布适宜区的面积,地形与气候组合对落叶松适宜区面积的影响与气候单一因子差异不大<sup>[2,15,23]</sup>,但增加土壤因子后,华北落叶松适宜区面积出现明显减小,这一研究结果在相关的研究中从未提及。该结果表明,在华北落叶松分布的有无上,土壤因子的影响作用不大;但在适宜区、尤其是中等以上适宜区面积上,土壤因子作为立地质量的主要评价指标显著的影响着落叶松的分布<sup>[24]</sup>。

#### 4 结论

(1) 华北落叶松作为一种广布于华北地区中高山地带的针叶树种,自然状态下对于高海拔、阴凉环境的适宜性也表明其对最热月的最高温度、温度年较差和季节性温度变异等温度因子的不适宜,这种不适将随全球气候变化和温度升高变得越来越突出,进而出现潜在分布区减小、垂直分布抬升的趋势。由于地形几乎视为不变因子,土壤属慢变量因子,气候变化成为影响华北落叶松树种分布的敏感性因子,进一步研究气候变化场景下华北落叶松的潜在分布意义突出。

(2) 相比气候与地形,土壤对华北落叶松适宜区、尤其是极高适宜区的影响尤为重要,这为合理区划和发展华北落叶松、适地适树、促进华北落叶松适宜区生产力提升提供理论依据。进一步细化土壤因子对落叶松不同等级适宜区影响,对华北落叶松的高效培育和利用意义重大。

(3) 作为华北落叶松的主产区,山西省、河北省和内蒙古自治区在未来的造林和生态修复规划中应充分考虑影响落叶松潜在分布和适宜性的因子,做到适区适树、适地适树,提高森林生产力,营造健康、稳定、高效的华北落叶松森林生态系统。

## 参考文献(References):

- [1] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [2] 贾翔, 马芳芳, 周旺明, 周莉, 于大炮, 秦静, 代力民. 气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 464-473.
- [3] 郭彦龙, 李新, 赵泽芳, 卫海燕. 黑河流域胡杨适宜生境分布模拟. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 537-553.
- [4] Dyderski M K, Paž S, Frelich L E, Jagodziński A M. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1150-1163.
- [5] 何善勇, 温俊宝, 骆有庆, 宗世祥, 赵宇翔, 韩婧. 气候变暖情境下松材线虫在我国的适生区范围. *应用昆虫学报*, 2012, 49(1): 236-243.
- [6] 程功, 吕全, 冯益明, 理永霞, 王艳丽, 张星耀. 气候变化背景下松材线虫在中国分布的时空变化预测. *林业科学*, 2015, 51(6): 119-126.
- [7] 郭彦龙, 卫海燕, 路春燕, 张海龙, 顾蔚. 气候变化下桃儿七潜在地理分布的预测. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 249-261.
- [8] Guo Y L, Li X, Zhao Z F, Nawaz Z. Predicting the impacts of climate change, soils and vegetation types on the geographic distribution of *Polyporus umbellatus* in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1-11.
- [9] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 杨军, 张新时, 郭柯. 物种分布模型理论研究进展. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [10] Busby J R. BIOCLIM A bioclimate analysis and prediction system//Margules C R, Austin M P, eds. *Nature Conservation: Cost effective Biological Surveys and Data Analysis*. Canberra: CSIRO, 1991: 64-68.
- [11] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567.
- [12] 吕振刚, 李文博, 黄选瑞, 张志东. 气候变化情景下河北省 3 个优势树种适宜分布区预测. *林业科学*, 2019, 55(3): 13-21.
- [13] 方文静, 蔡琼, 朱江玲, 吉成均, 岳明, 郭卫华, 张峰, 高贤明, 唐志尧, 方精云. 华北地区落叶松林的分布、群落结构和物种多样性. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 742-752.
- [14] 郑万钧. 中国树木志(第 1 卷). 北京: 中国林业出版社, 1983: 248-249.
- [15] 刘丹, 李玉堂, 洪玲霞, 国红, 谢阳生, 张卓立, 雷相东, 唐守正. 基于最大熵模型的吉林省主要天然林潜在分布适宜性. *林业科学*, 2018, 54(7): 1-15.
- [16] 倪健. 全球变化研究中的生物气候指标. *第四纪研究*, 2017, 37(3): 431-441.
- [17] 山丹, 朱媛君, 王百竹, 刘艳书, 时忠杰, 杨晓晖. 呼伦贝尔沙地北部沙带植物群落分布格局与土壤特性的关系. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 145-155.
- [18] 赵鹏, 屈建军, 韩庆杰, 徐先英, 姜生秀, 付贵全. 敦煌绿洲边缘植物群落与土壤养分互馈关系. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 791-799.
- [19] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. *林业科学*, 2012, 48(1): 53-59.
- [20] 冷文芳, 贺红土, 布仁仓, 胡远满. 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. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 825-833.
- [21] 郝珉辉, 张忠辉, 赵珊珊, 赵秀海, 叶尔江·拜克吐尔汉, 张春雨. 吉林蛟河针阔混交林树木生长与生境的关联性. *生态学报*, 2017, 37(10): 3437-3444.
- [22] 王亚领, 李浩, 杨旋, 郭彦龙, 李维德. 基于 MaxEnt 模型和不同气候变化情景的单叶蔓荆潜在地理分布预测. *草业学报*, 2017, 26(7): 1-10.
- [23] 高文强, 王小菲, 江泽平, 刘建锋. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子. *生态学报*, 2016, 36(14): 4475-4484.
- [24] 雷相东, 符利勇, 李海奎, 李玉堂, 唐守正. 基于林分潜在生长量的立地质量评价方法与应用. *林业科学*, 2018, 54(12): 116-126.