

DOI: 10.5846/stxb201810112206

李莎, 史明昌, 刘晓宇, 赵辉, 孙林山, 柯尊发, 周欢. 湖北省马尾松精准适宜性空间分布研究. 生态学报, 2019, 39(6): - .

Li S, Shi M C, Liu X Y, Zhao H, Sun L S, Ke Z F, Zhou H. Precise Spatial Distribution of Suitability of Masson Pine in Hubei Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

湖北省马尾松精准适宜性空间分布研究

李 莎¹, 史明昌¹, 刘晓宇², 赵 辉³, 孙林山², 柯尊发², 周 欢²

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 湖北省太子山林场管理局, 荆门 431822

3 湖北省林业勘察设计院, 武汉 430074

摘要: 马尾松作为南方主要的造林树种, 研究其适宜性精准空间分布对其退化评价、造林选地等具有生产指导价值。本研究采用多元线性回归克里金模型利用 R 语言对湖北省降雨量、气温等 15 个气象因子进行 30×30m 的空间插值, 插值结果作为气象因子空间变量, 插值的交叉检验结果≥90%; 利用 30m 的 DEM 提取坡度、坡向、高程 3 个地形因子空间变量。首先利用年均温、最冷月最低温、年降水量、高程、土壤类型等限制性因子进行空间叠加排除不适宜的空间单元, 然后在可能适宜的空间单元内, 再基于 18 个空间变量和 294 个样方数据, 利用最大熵模型(MAXENT) 计算每个格网的适宜性指数, 最后按照适宜指数进行适宜性分类。区别于以往大尺度区域研究, 其结果是落实到地块尺度的精准计算。结果表明: ROC 模型的评价效果达到较好水平(ROC=0.826), 高程、土壤、降雨相对标准差、最湿季降雨量、坡度、年均温为湖北省马尾松的适宜性主要影响因子, 马尾松中、强适宜区主要分布在湖北省东北部及中北部地区, 主要分布在高程低于 1200m、坡度在 40°以下、年均温 13–18℃的区域, 中等及以上适生区面积共计 4.65 万 km², 占湖北省总面积的 25.01%。

关键词: 精准空间; MLRK; 最大熵模型; 适宜性; 马尾松

Precise Spatial Distribution of Suitability of Masson Pine in Hubei Province

Li Sha¹, Shi Mingchang¹, Liu Xiaoyu², Zhao Hui³, Sun Linshan², Ke Zunfa², Zhou Huan²

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Hubei Taizishan Forest Farm Administration, Jingmen 431822, China

3 Hubei Forestry Investigation and Design Institute, Wuhan 430074, China

Abstract: *Pinus massoniana* is the main afforestation tree species in the south of China, and so it is important to study precise spatial distribution of the suitability of *Pinus massoniana*, which has high value for guiding evaluation of its degradation and selection of land for afforestation. In this study, interpolated results of meteorological factors such as precipitation and temperature in Hubei Province at a 30 × 30 m spatial level were attained by using the multivariate linear regression Kriging model. This model used meteorological factors as spatial variables. The cross-check results of interpolation were ≥90%. Meanwhile, the study used DEM data at a 30 m resolution to extract three terrain factor spatial variables: slope, aspect, and elevation. First, the study used the annual mean temperature, the min temperature of coldest month, the annual precipitation, the elevation, the soil type, and other restrictive factors to carry out spatial superposition to exclude unsuitable spatial units, and then, based on the 18 spatial variables and data from 294 samples, determined the suitability index of each grid by using the maximum entropy model (MAXENT). Finally, it performed a suitability classification for the suitability index in all grids and obtained the spatial distribution of the suitability of *Pinus massoniana*.

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0505500, 2017YFC0505504)

收稿日期: 2018-10-11; **修订日期:** 2019-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shime@dtgis.com

in the study area. Different from previous large-scale regional studies, this method allowed for accurate calculations at a small land unit scale. The results showed that the evaluation effect of the ROC model reached a good level (ROC = 0.826). The elevation, soil, relative standard deviation of precipitation, the precipitation of wettest quarter, slope and annual mean temperature were the main factors affecting the suitability of *Pinus massoniana* in Hubei Province. The most suitable areas are mainly distributed in the northeast and north central areas of Hubei Province and areas with the elevation of less than 1200m, a slope of 40° or less, and an average annual temperature of 13—18°C. The moderately and highly suitable areas total 46,500 km², accounting for 25.01% of the total area of Hubei Province.

Key Words: Precision space; MLRK; maximum entropy model; suitability; *Pinus massoniana*

适地适树是造林的基本原则,由于过去的获取数据条件和分析技术有限,人们只能从较大的区域尺度进行立地类型划分,尤其在气象条件方面区域尺度更为粗放,导致人工林多年以后会出现部分区域林地低效或退化现象。为了解决这一问题,人们试图通过研究植物生长的复杂环境来科学分析其适宜的区域,如 Mark J. Kimsey 等使用地理加权回归模型,在区域尺度上对美国北部爱德华州地区的冷杉进行立地指数计算,并进行分析评价,得到相关结果^[1]。Bourque 等利用 DEM、温度、降水量、潜在蒸发量、土壤酸碱性等数据,对牙买加西南海岸的五种生物质能源树种进行了生境适宜性分析及产碳特性分析,得到了良好的分析结果^[2]。巩垠熙等在旺业甸林场,以落叶松为研究目标,利用遥感和地面调查数据,引入反向传播人工神经网络(Back Propagation Artificial Neural Network, BPANN)模型,在小班尺度上评价落叶松立地质量^[3]。高蓓、卫海燕等利用 GIS 和最大熵模型对气候指标、土壤指标、地形指标来确定 100×100m 精度上秦岭冷杉的潜在地理分布^[4]。李程利用地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)的方法,结合辽宁红松落界数据,得到了辽宁省红松适宜性结果和立地指数空间分布格局^[5],等等。从近年的研究成果来看,尽管植物适宜性空间单元逐渐缩小,对生产决策有一定指导性,但到具体地块上仍需对适宜性进行精准研判。

人工林低效或退化的原因有多种,树种不适宜也是其中原因之一。若能精准的分析具体地块上树种是否适宜,对人工林低效类型和成因分析以及林地改造具有一定的实际应用价值。

本文以湖北省种植面积较大的马尾松为例,将空间划分为 30m 的格网,通过空间拟合、地形分析等模型获得每个格网的气象和地形要素,从地块尺度上排除不适宜马尾松生长的区域,再结合地面调查单元数据利用最大熵模型计算马尾松最适宜的分布空间,得到湖北省马尾松适宜性精准空间分布,为退化人工林生态功能提升改造在空间结构优化上提供理论支撑和技术参考。

1 研究区概况

湖北省,位于 108°21'42"E—116°07'50"E、29°01'53"N—33°6'47"N 之间,地势呈三面高,中间低的状态,西部整体而言地势较高,西、北、东部均有山脉环绕,中南部为平原,总面积 18.59 万 km²。该研究区位于亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。省内林地面积 793.89 万 hm²,占土地总面积的 42.71%,主要分布在山区和丘陵地区,平原地区分布较少,林种也以马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏树(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)等树种为主,其中研究表明,现有马尾松面积为 114.23 万 hm²,占总林地面积的 13.04%,并且省内大部分马尾松林存在退化现象。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

气象数据是在中国气象数据网站(<http://data.cma.cn/site/index.html>)下载 1981—2010 年中国地面累年值月值数据,包含 103 个气象站点数据(其中湖北省内 67 个,相邻省外 36 个),并通过整理得到 1981—2010 年年均温、年均昼夜温差、最热月最高温、最冷月最低温、年温日较差、最小气温日较差、气温标准差、年温范围、

等温性这 9 个气温要素、4 个降雨量要素含年降雨量、最湿季降雨量、最干月降雨量、降雨相对标准差和气压、湿度 2 个要素。

地形数据是在地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载的 30m 分辨率的数字高程数据(DEM)。利用 DEM 计算坡度、坡向、高程数据。土壤数据是在寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)上下载的 1:100 万土壤数据集^[6],表 1 为模型所需的环境数据。

表 1 模型输入环境数据
Table 1 Model input environment data

环境要素 Environmental element	变量 Variable	处理方法 Approach
年均温 Annual mean temperature	Tem1	裁剪之后分块使用 MLRK 插值
年均昼夜温差 Mean diurnal range	Tem2	月平均最高温-最低温,分块插值
最热月最高温 Max temperature of warmest month	Tem3	裁剪之后分块进行 MLRK 插值
最冷月最低温 Min temperature of coldest month	Tem4	
年温日较差 Poor annual temperature	Tem5	
最小气温日较差 Minimum daily temperature range	Tem6	
气温标准差 Temperature standard deviation	Tem7	
年温范围 Temperature annual range	Tem8	Tem3-Tem4, 然后进行分块插值
等温性 Isothermality	Tem9	Tem2/Tem8×100, 然后进行分块插值
年降雨量 Annual precipitation	Pre1	裁剪之后分块进行 MLRK 插值
最湿季降雨量 Precipitation of wettest quarter	Pre2	
最干月降雨量 Precipitation of driest month	Pre3	
降雨相对标准差 Relative standard deviation of precipitation	Pre4	
气压 Pressure	Pressure	
湿度 Humidity	Humidity	
高程 Elevation	DEM	地理空间数据云下载通过裁剪获得
坡度 Slope	Slope	DEM 数据进行坡度分析而得
坡向 Aspect	Aspect	DEM 数据进行坡向分析而得

马尾松样点数据主要按照中山、低山等地形特点在湖北省范围内均匀选取实验区进行调查采样,选取以马尾松为优势种的不同高程、坡度、坡向、坡位、土壤类型、龄组的样地进行调查,采用每木检尺方法记录树高、胸径、郁闭度、材积量以及经纬度等信息,分布位置如图 1 所示。在实验区随机调查共得到 294 个 20×20m 马尾松样方数据,主要包括本人外业调查的 60 个样方以及项目组共享的 234 个样方数据,内业对数据进行整理,统一到 WGS-84 坐标系,转成 CSV 格式用于模型计算。

2.2 空间数据处理方法

本文主要采用多元线性回归克里金模型(MLRK)对湖北省的气象空间要素进行精准插值,得到各气象数据的空间分布图。多元回归克里金插值法是线性回归法和多普通克里金插值法的共同模型,它采用的是最小二乘法(OLS)估计的线性回归,是优化改进的克里金插值方法,其预测结果分为两部分,回归拟合的确定部分 $\hat{m}(s_0)$; 以及普通克里金(OK)对回归残差的插值结果部分 $\hat{e}(s_0)$ 。

使用该模型可将每个预测点的确定值和残差部分相加,从而得到待预测点的预测值,本文采用此插值方法,对气温、降雨等气象因子进行插值时,考虑高程、太阳辐射、坡度、坡向等因素对目标变量的影响,在 R 语

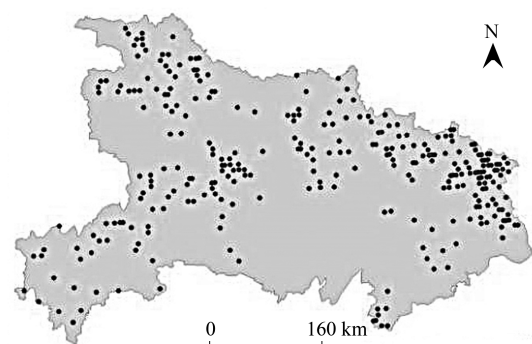


图 1 马尾松样点分布图

Fig.1 *Pinus massoniana* spot distribution map

言环境下处理,采用逐步回归方法选择关联性较大的辅助变量,具体形式如下:

$$\text{PreT} = a \times \text{DEM-std} + b \times \text{slope-std} + c \times \text{rad-std} + d \times \text{aspect} + e$$

式中,PreT 表示预测变量,DEM-std 表示标准化后的数字高程,slope-std 表示标准化后的坡度,aspect 变量中包含各个坡向 aspectN、aspectNW、aspectW、aspectSW、aspectS、aspectSE、aspectE、aspectNE 及平地 aspectPT^[7]。

为保证边界处数据精度,把湖北省边界利用缓冲区计算外扩 30km,对 15 个气象因子插值成 30m 栅格数据,再将插值结果边省界外数据裁剪掉得到湖北省的气象空间因子。15 个因子差值结果交叉验证值 R^2 均大于 90%。下图为 18 个空间因子(前三个为地形因子,后为 MLRK 模型插值得出的气象因子):

2.3 空间适宜性分析方法

马尾松属阳性树种,不耐庇荫,喜光、喜温。适生于年均温 13—22℃,年降水量 800—1800mm,绝对最低温度到-13℃。根系发达,主根明显,有根菌。对土壤要求不严格,喜微酸性土壤,但怕水涝,不耐盐碱,在石砾土、沙质土、粘土、山脊和阳坡的冲刷薄地上,以及陡峭的石山岩缝里都能生长。一般在长江下游高程 600—700m 以下,中游约 1200m 以上,上游约 1500m 以下均有分布^[8]。本研究依据该树种的生态适宜性,将各地理因子统一坐标系后分层处理,分三步分析其适宜性在空间格网上的精准分布。首先利用限制性地理要素进行空间叠加排除不适宜的区域,然后在可能适宜的区域内利用最大熵模型计算每个格网的适宜指数,最后按照适宜指数进行适宜性分类。

2.3.1 马尾松可能适宜空间单元筛选

根据马尾松生物生态学习性,分析出马尾松适宜的生长环境条件,本文主要是利用限制性因子通过空间叠加,将不适宜空间单元进行排除。通过对前人研究成果分析,马尾松限制性因子包括年均温、最冷月最低温、年降水量、土壤类型。高程虽然不是独立的因子,但在适宜性中有明显的指示作用,也作为限制因子之一考虑。

$$SR = \text{Tem1} \times \text{Tem4} \times \text{Pre1} \times \text{Soil} \times \text{DEM};$$

SR(Suitable Raster)指马尾松的适宜空间单元,当 $SR=1$ 时表示该格网位置理论上适宜马尾松生长,当 $SR=0$ 时表示该格网所在位置不适宜。Tem1 表示年均温,当 $\text{Tem1} < 13^\circ\text{C}$ 或 $\text{Tem1} > 22^\circ\text{C}$ 时,取“0”,当 $13^\circ\text{C} \leq \text{Tem1} \leq 22^\circ\text{C}$ 时,取“1”;Pre1 表示年降水量,当 $\text{Pre1} < 800\text{mm}$ 或 $\text{Pre1} > 1800\text{mm}$ 时,取“0”,当 $800\text{mm} \leq \text{Pre1} \leq 1800\text{mm}$ 时,取“1”;DEM 表示高程因子,当 $\text{DEM} > 1500\text{m}$ 时,取“0”,当 $\text{DEM} \leq 1500\text{m}$ 时,取“1”;Soil 表示土壤要素,当 Soil 为水体、沼泽土、草甸土时,取“0”,当 Soil 其它类型土壤时,取“1”。SR 计算结果如图 3 所示。

2.3.2 马尾松适宜性空间计算方法

物种分布模型(Species Distribution Models,SDMs),也称生态位模型^[9],即使用环境和地理信息解释观测到的物种出现信息关联,而对目标物种分布进行估计和预测。其中的最大熵(MAXENT)模型^[10],由于在物种现实生境模拟、生态环境因子筛选等方面作用显著,能够更好的预测物种的潜在分布区域,近年来被林业及生态学者广泛应用。本研究在 3.1 计算的基础上利用最大熵(MAXENT)模型,计算 $SR=1$ 的格网上马尾松适宜性空间分布,进一步分析马尾松在不同精准空间上的适宜程度。

最大熵模型的思想是在满足已知条件的情况下,不对未知情况做任何有偏的假设,这样得到的模型预测风险最小。也就是概率相等,这实际上就是说条件熵最大。其公式^[11]为:

$$\max H(Y/X) = - \sum_i \sum_j p(x_i, y_j) \log p(y_j/x_i)$$

式中, $X \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $Y \in \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为离散变量,在计算中,模型根据物种“出现点”(样方数据)的环境特征变量运算出目标物种分布的约束条件,并探寻此约束条件下最大熵的可能分布,预测目标物种在研究地的生境分布及适宜性^[12]。在树种潜在分布的预测研究中,同一生态系统中的树种和树种所依附的生境,通过数理统计,计算系统具有最大熵时的状态参数确定物种和环境之间的稳定关系,估计物种的分布^[13]。

3 结果与分析

最大熵模型提供的刀切法(Jackknife)检验,能对环境因子贡献率和重要性进行分析,并利用受试者工作

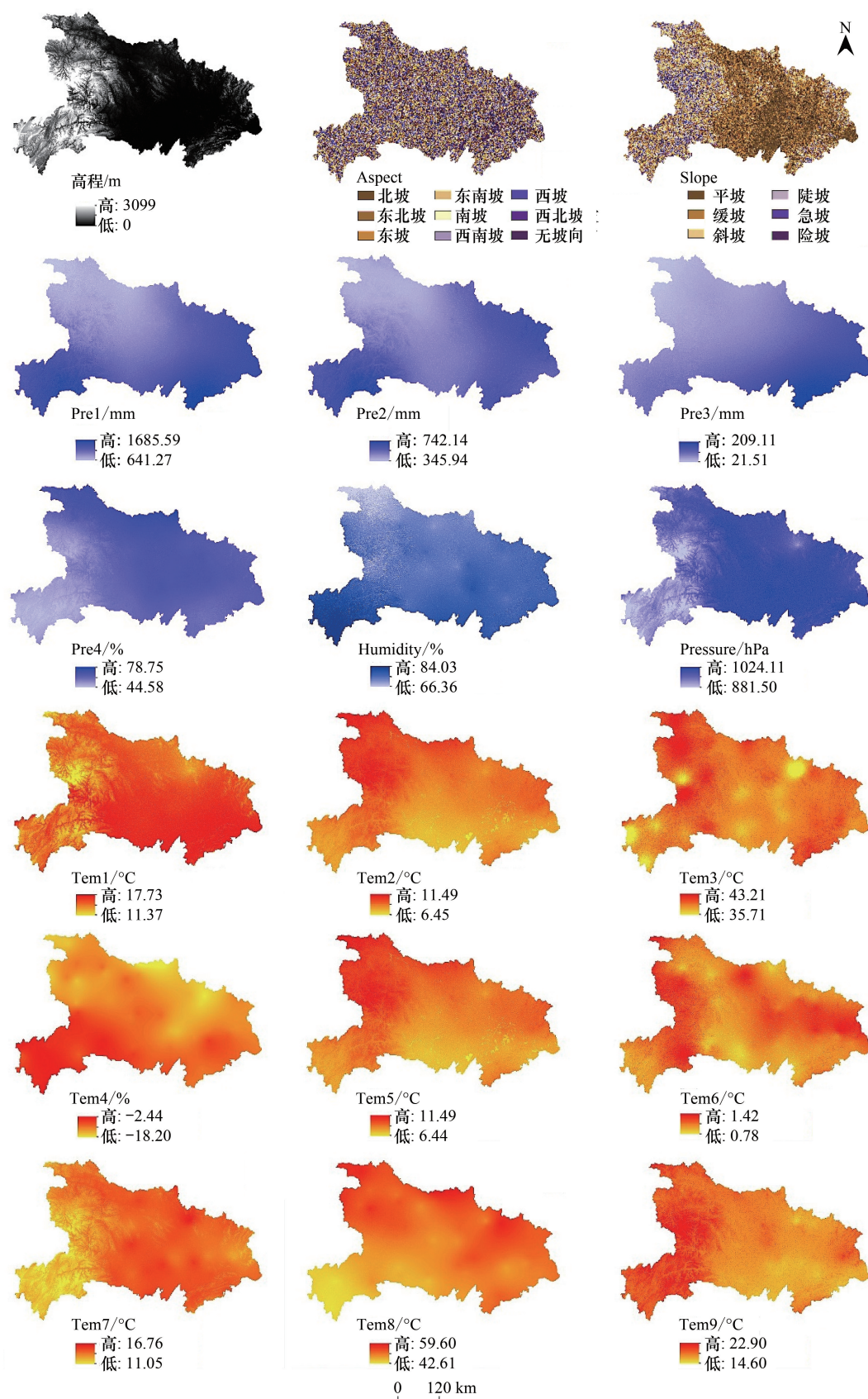


图2 因子插值结果

Fig.2 Factor interpolation result

曲线 ROC (Receiver operator characteristic curve) 评价模型模拟结果的精准度, ROC 曲线下的面积 AUC (Area Under Curve) 越大代表模型模拟效果越好^[14]。

为验证模型的精准度, 本文采用 ROC 曲线来验证适宜性结果, 如图 4 结果显示: 训练集 Training data 与测试集 Test data 这两个数据集的 AUC 值分别为 0.826 和 0.795, 均大于百分之七十五, 高于随机预测值, 这表明模型精度较为良好。

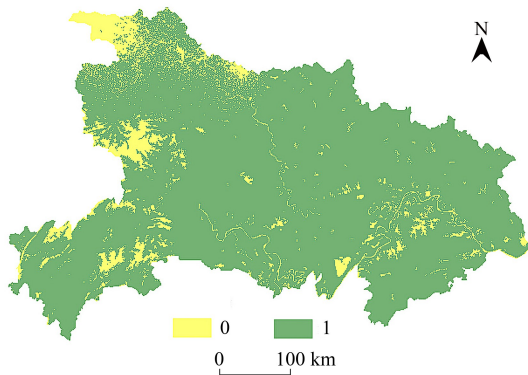


图 3 湖北省马尾松空间筛选图

Fig. 3 Spatial screening map of *Pinus massoniana* in Hubei Province

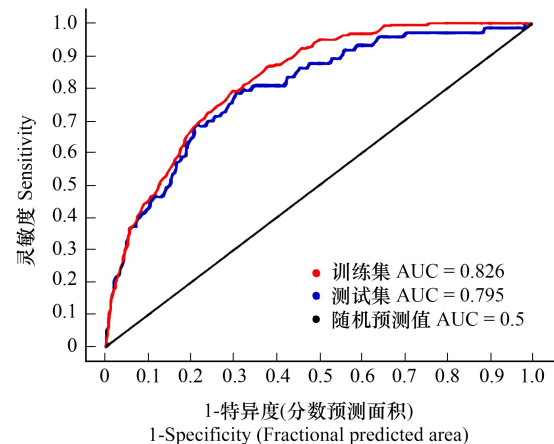


图 4 精度评价

Fig. 4 Precision Evaluation

Area Under Curve (AUC): 曲线下的面积

3.2 环境变量对适宜性的贡献分析

为获得影响湖北省马尾松的关键影响因素, 如图 5 本文采用刀切法 (Jackknife) 计算了各项因子的贡献率, 结果显示: 从贡献百分比来看, 影响湖北省马尾松适生地的主要因子为高程、降雨相对标准差、最湿季降雨量、坡度、年均温, 分别达到 42%、19%、10.4%、8.7% 和 6.3%; 气压、年均昼夜温差、气温标准差、年温范围、等温性等因子增益值较小, 贡献率均小于 0.30%; 在排列重要性上, 高程、年均温、降雨相对标准差排列靠前, 而年均昼夜温差、年温范围、等温性排序靠后。可见, 高程、降雨相对标准差、最湿季降雨量、坡度、年均温为影响湖北省马尾松适宜性分布的主要因子。

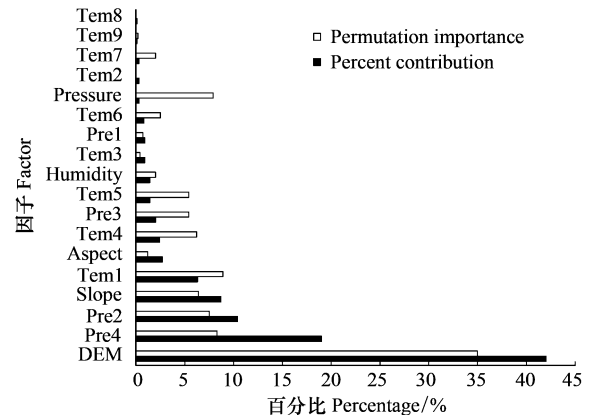


图 5 因子贡献分析

Fig. 5 Factor contribution analysis

上述因子对马尾松适宜性分布影响较大的潜在原因

因可能是年降水量、最冷月最低温因子在最大熵计算之前已经将其作为限制性因子进行事先做了不适宜性扣除, 所以在因子贡献分析上表现不突出, 其次, 湖北省处于亚热带季风性气候区, 夏季高温多雨, 雨热同期, 在一定高程范围内, 马尾松可能对于降雨量的需求较大。

3.3 马尾松适生性状况

由最大熵模型 (MAXENT) 得到精确到地块尺度上的马尾松适宜性分布, 并按照等距法重分类为不适宜区、弱适宜区、中适宜区和强适宜区。如图 6、7 所示。

空间分布显示, 湖北全省强适宜区面积为 1.28 万 km^2 , 中适宜区为 3.37 万 km^2 , 弱适宜区为 4.53 万 km^2 , 不适宜区有 9.41 万 km^2 , 中等及以上适生区面积共计 4.65 万 km^2 , 占湖北省总面积的 25.01%。其中中、强适宜区主要分布在湖北省东北部及中北部地区, 即黄冈市、孝感市地区、随州市、十堰市的部分地区等; 弱适宜区

及不适宜区主要分布在中南部及西部地区,即荆州、仙桃市、潜江市和天门市等地。从县域空间上统计强适宜面积和比率(如表 2):马尾松的中等及以上适生区主要分布在湖北省东北部及中北部的蕲春县、英山县、罗田县、麻城市、红安县、大悟县、广水市、随州市、浠水县、团风县等地区。其中麻城市适宜性面积最大,达到 0.203 万 km²,罗田县适宜性区域占比最大,占全县的 83.35%。

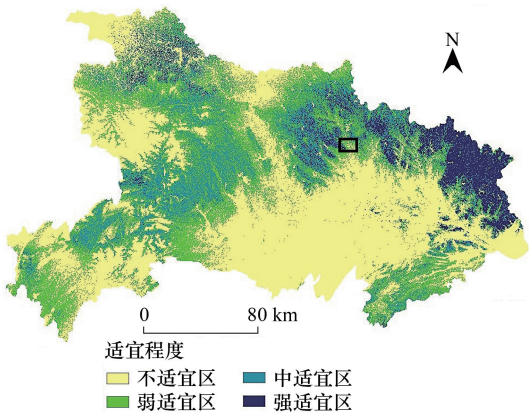


图 6 马尾松适宜性空间分布图

Fig.6 Spatial distribution map of suitability of *Pinus massoniana*

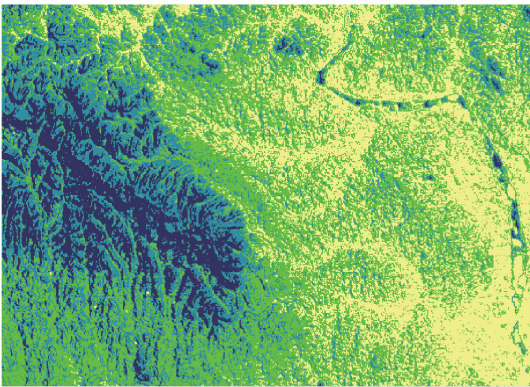


图 7 细节放大图

Fig.7 Detail enlargement

表 2 湖北省马尾松强适宜区分布表

Table 2 Distribution table of strong suitable area of *Pinus massoniana* in Hubei Province

适生区 Suitable area	麻城	罗田	英山	蕲春	随州	广水	大悟	浠水	红安	团风
面积 Area/万 km ²	0.203	0.153	0.102	0.088	0.087	0.057	0.046	0.041	0.039	0.024
占总面积比/% Total area ratio	65.68	83.35	82	43.2	14.47	25.23	27.22	24.16	25.73	35.24

从立地条件上看,由于土壤因子对马尾松适宜性分布影响较大,前期也予以考虑。因此表 3 主要基于地形因子和气象因子对马尾松适宜区进行划分:中等及以上适宜区主要分布在高程低于 1200m、坡度在 40°以下、年均温 13—18℃的区域。

表 3 适宜性要素分区

Table 3 Suitability factor partition

适宜性 Suitability	高程/m Elevation	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	年均温/℃ Annual average temperature	年降水量/mm Annual precipitation
强适宜区 Strongly suitable area	<1000	<35	阳坡、半阳、半阴	14—18	无明显要求
中适宜区 Medium suitable area	<1200	<40	无明显坡向要求	13—16	无明显要求
弱适宜区 Weakly suitable area	≤1500	<45	无明显坡向要求	13—17	无明显要求
不适宜区 Unsuitable area	>1500	≥50	无明显坡向要求	≤13	≤800

中、强适宜区主要分布在东北部及中北部等地区,主要是湖北省西部海拔较高,部分地区甚至高于 3000m,因而,相对西部地区,东部地区相对适宜马尾松生长,其次根据图 2 中降雨相对标准差(Pre4)和最湿季降雨量(Pre2)数据显示,相比于中南部及西部地区,东部及中北部地区的水分条件较好,更有利于马尾松的生长,这与马尾松生物生态学习性情况相吻合,表明在排除限制性因子的基础上采用最大熵模型分析得到马尾松适宜性分布的方法是合理的。

4 讨论

过去调查物种资源适宜性分布的方法一般是通过野外实地调研确定分布范围、数量、种类,该方法在小尺度区域得到的结果比较准确可靠,但传统的方法地面调查耗时、耗力、耗费资金,在地形复杂区耗资更大,全面的现场调查难度很大。随着地理信息系统、遥感等技术的发展,将新技术与物种适宜性分析相结合进行评价,利用最大熵模型 MAXENT 的预测结果精准分析植物适宜性分布成为可能^[15]。

本研究从马尾松生态适宜性出发来分析其适宜的空间分布,综合分析得出高程、降雨相对标准差、最湿季降雨量、坡度、年均温对马尾松适宜性分布的影响较大,分别达到 42%、29%、10.4%、8.7% 和 6.3%,相关研究也表明,对马尾松生长影响最显著的气候因子主要是均温和降雨量,特别是最湿季降雨量多少对马尾松的生长有较大的影响^[16-17];高程、坡度对马尾松的空间分布有一定影响,杨俊松等对不同坡向 30 年生的马尾松进行生长指标测定,结果显示中山区域,马尾松在阳坡的生长状况要优于阴坡^[18],而本文坡向的因子贡献率仅占 2.7%,与其产生差异的原因可能是湖北省低山丘陵区占总面积的 64%^[19],加之前期限制因子空间筛选时扣除了大于 1500m 的山区,削弱了坡向的影响程度。因此,在实际应用中,中山地带坡陡山高地区较多,阴、阳坡环境差异大,需要考虑马尾松在阴坡适宜性较差的问题;此外,土壤也是影响马尾松生长适宜性的重要因素,土壤类型、土壤质地等直接影响马尾松苗木生长质量^[20-22],这与本文 2.3.1 空间单元筛选将土壤要素作为限制因子相吻合。

本文着重从自然环境出发研究马尾松生态适宜性空间分布,并未扣除城市建筑、水体等不能造林地,也未考虑林木经营管理和经济因素对马尾松的影响。在经营管理中,整地方式、种子质量、苗木品质、造林密度、间伐透光等对马尾松生长都会有较大影响^[23-24],微环境改变将对适宜性有一定影响;从经济角度来看,交通条件、造林难易程度、管护投入等因素会直接影响造林和经营管理成本,间接影响马尾松在具体地块上是否适宜;另外,湖北省建有三峡大坝、葛洲坝、丹江口水库、南水北调渠系等大型水利工程,水面增加改变了周围微环境,但影响范围有限。上述情况未在模型中作为因子进行分析,因此,在马尾松造林或退化林地改造中,应结合实际情况全面考虑。

参考文献 (References):

- [1] Kimsey M J, Garrison Johnston M T, Johnson L. Characterization of volcanic ash-influenced forest soils across a geoclimatic sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(1): 267-279.
- [2] Bourque C P A, Buchanan W, Hassan Q K. An analysis of habitat suitability and charcoal-yielding characteristics of five exotic tree species intended for bioenergy production in Jamaica. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2009, 3(1): 46-56.
- [3] 巩垠熙, 高原, 仇琪, 谢飞, 冯仲科, 樊江川. 基于遥感影像的神经网络立地质量评价研究. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(10): 42-47, 52-52.
- [4] 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 应用 GIS 和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 843-852.
- [5] 李程. 基于空间统计分析的储备林树种立地指数预估研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [6] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, Van Velthuisen H T, Verelst L, Wiberg D. *Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)*. Rome, Italy: IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, 2008.
- [7] Jin Q T, Zhang J T, Shi M C, Huang J X. Estimating loess plateau average annual precipitation with multiple linear regression Kriging and geographically weighted regression Kriging. *Water*, 2016, 8(6): 266.
- [8] 祁承经, 汤庚国. 树木学(南方本). 北京: 中国林业出版社, 1994: 45-45.
- [9] 宓春荣, 郭玉民, Huettmann F, 韩雪松. 基于物种分布模型的精确采样提高目标物种发现率——以黑颈鹤(*Grus nigricollis*), 白头鹤(*Grus monacha*)为例. *生态学报*, 2017, 37(13): 4476-4482.
- [10] 谢伯承, 杜东升, 陆魁东, 段居琦, 刘富来. 基于 MaxEnt 模型湖南双季稻种植气候适宜性分布研究. *中国农学通报*, 2015, 31(9): 247-251.
- [11] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//*Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. Banff, Alberta, Canada: ACM, 2004: 83.

- [12] 吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 杨宇博, 金洪阳, 邹红菲. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. 生态学报, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [13] 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.
- [14] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [15] 李芬, 吴志丰, 徐翠, 徐延达, 张林波. 三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布. 生态学报, 2014, 34(5): 1318-1325.
- [16] 张丽云, 邓湘雯, 雷相东, 赵仲辉, 项文化, 闫文德. 不同生长阶段马尾松生产力与气候因子的关系. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1104-1110.
- [17] 张今朝, 刘健, 余坤勇, 曾琪, 郑文英, 艾婧文, 上官莎逸. 气候变化下三明市主要针叶树种潜在地理分布的预测. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(1): 74-81.
- [18] 杨俊松, 王德炉, 吴春玉, 李双双, 赵迪. 地形因子对马铃乡马尾松人工林生长的影响. 林业调查规划, 2016, 41(1): 98-100.
- [19] 沈其文. 湖北低山丘陵改造的现状与对策. 安徽农业科学, 2014, 42(3): 939-939, 942-942.
- [20] 李大南, 杨炳强. 十万大山北坡土壤条件对马尾松高生长影响的初步分析. 广西农学院学报, 1991, 10(3): 69-75.
- [21] 周玮, 周运超, 叶立鹏. 种植密度及土壤养分对马尾松苗木根系的影响. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(11): 18-22.
- [22] 洪涛, 谢运球, 覃星铭, 孔祥胜, 欧梦梦, 喻崎雯. 黔西北土壤-植被系统元素地球化学特征及其生态关系. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 890-896.
- [23] 黄章平, 汪迎利, 邱智雄, 连辉明, 王伟, 何波祥, 王思红, 陈志生. 马尾松林分间伐套种质量提升研究. 林业与环境科学, 2018, 34(4): 110-114.
- [24] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响. 生态学报, 2013, 33(19): 6154-6162.