

DOI: 10.5846/stxb201712272333

王书越, 潘少安, 王明睿, 王明馨, 叶吉. 基于 MaxEnt 模型评估刺五加在东北地区的空间分布. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Wang S Y, Pan S A, Wang M R, Wang M X, Ye J. Assessing the geographic distribution of *Acanthopanax senticosus* in Northeastern China based on the MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

基于 MaxEnt 模型评估刺五加在东北地区的空间分布

王书越¹, 潘少安², 王明睿³, 王明馨⁴, 叶吉^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 北京林业大学, 北京 100083

3 沈阳市第二中学, 沈阳 110016

4 沈阳市第二十七中学, 沈阳 110016

摘要: 研究刺五加 (*Acanthopanax senticosus*) 在东北地区的潜在分布区及生态适宜性, 针对 267 个刺五加分布样点数据和 17 个环境因子数据, 应用最大熵模型 (Maximum Entropy Model, 简称 MaxEnt) 和地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 评估刺五加的地理分布。结果表明: 最大熵模型的 AUC 值为 0.929, 模型预测结果的准确性可信度高, 可以用来预测刺五加的地理分布。刺五加生态适宜区主要集中在长白山山脉及小兴安岭东南地区, 分布面积约为 22.12 万 km², 存在概率最高的区域主要在辽宁省东部, 吉林省东南部以及黑龙江省中部。影响刺五加地理分布的主要环境因子依次为: 年均降水量、森林类型、极端低温、生长季降水量及海拔。耦合了大尺度环境数据、植被群落类型数据与刺五加分布之间的关系, 科学预测了东北地区刺五加的生态适宜区及主导环境因子, 为其种群恢复与开发利用提供了科学依据。

关键词: 刺五加; 最大熵模型; 潜在分布区; 生态适宜性

Assessing the geographic distribution of *Acanthopanax senticosus* in Northeastern China based on the MaxEnt model

WANG Shuyue¹, PAN Shaoan², WANG mingrui³, WANG mingxin⁴, YE Ji^{1,*}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 No.2 Middle School of Shenyang, Shenyang 110016, China

4 No.27 Middle School of Shenyang, Shenyang 110016, China

Abstract: The maximum entropy model (MaxEnt) and geographic information system (GIS) were used to predict the suitable ecological region for *A. senticosus* based on 267 plots and 17 ecological factors. The results showed that the area under the receiver operator characteristic curve (AUC) reached 0.929. The accuracy of model prediction results was high and it can therefore be used to predict the geographical distribution of *A. senticosus*. The results suggested that the ecological adaptation area of *A. senticosus* was mainly concentrated in the Changbai mountains and the southeast part of Xiaoxing'anling mountains. The total area of the suitable regions was approximately 221,200 km². The main environmental factors that affect the geographical distribution of *A. senticosus* were successive annual mean precipitation, forest type, extreme minimum temperature, growing season precipitation, and altitude. This paper, combined with large-scale environmental data, vegetation community types, and the distribution of *A. senticosus*, will enable the assessment of the ecological adaptation area of *A. senticosus* and the determination of the dominant environmental factors. These results will provide a scientific basis

基金项目: 重点研发计划: 2016YFC0500301 和林业公益性行业科研专项 201204309-1

收稿日期: 2017-12-27; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yeji1011@163.com

for population recovery and utilization of *A. senticosus*.

Key Words: *Acanthopanax senticosus*; maximum entropy model; potential distribution; ecological suitability

刺五加为五加科 (*Araliaceae*) 五加属 (*Acanthopanax*) 落叶灌木, 主要产于东北三省, 是针阔混交林林下的重要组成部分。刺五加是我国传统药用植物, 具有较高的药用价值, 其全株均可入药, 对多种疾病有“扶正”和“祛邪”之功效。近年来, 刺五加亦走进了保健品市场, 以其为主要原料的产品多达千种, 畅销国内外市场。刺五加嫩芽也被用作山野菜, 深受喜爱。刺五加需求日益增加, 市场价格年年攀高, 而其供给主要依赖野生资源, 致使野生资源遭受严重破坏。刺五加种子是先天性休眠类型, 需要的萌发条件严格^[1]。刺五加种群大多依赖萌生繁殖, 扩散能力较弱^[2]。刺五加生长发育受环境因素限制较大。在兼顾生态效益和经济效益的迫切需求下, 科学合理地在东北地区促进刺五加种群的恢复意义重大。刺五加种群恢复的关键就是要对刺五加的区域环境适应性进行合理地评估, 科学预测刺五加的生态适宜区, 以此找出刺五加种群恢复过程中的限制性环境因素, 科学指导刺五加种群的适宜恢复区域。

气候条件是影响植物地理空间分布的重要影响因素之一^[3]。近年来, 根据物种已知分布点的地理位置与环境间的相互关系, 基于生态位理论和统计学原理^[4-6], 利用物种分布模型分析该物种的分布概率, 进而判断物种的潜在适生区域已成为一种行之有效的手段^[6]。随着计算机技术的发展, 物种潜在分布区的预测方法已有了新的突破。目前, 在景观生态和保护生物学领域, 构建基于点数据的生态位模型进行预测物种的潜在分布已趋于成熟^[7]。在众多生态位模型中, 基于最大熵原理的 MaxEnt 模型, 由于对数据样本量要求低、操作灵活且预测精度高而得到越来越广泛的应用^[8]。

综上所述, 本文基于东北地区大量规范的野外植被调查数据与高精度的环境监测数据, 应用 MaxEnt 模型预测刺五加在东北地区的潜在分布区, 确定其生态适宜区并探讨影响其分布的主要环境因子, 以为刺五加种群恢复、种植区规划、规范化栽培提供科学的依据^[9]。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

1.1.1 刺五加分布数据

刺五加分布数据来自于东北植物与生境数据库, 该数据库共包含 1960 块 30 m×30 m 的乔灌草调查样方和 1372 块面积为 20 m² 的早春植物调查样方。对样方普查数据筛选后得到刺五加的分布样点 516 个, 对该分布点数据进行去错、去重筛选后得到最终刺五加分布点数据 267 个, 如图 1 所示。

1.1.2 环境数据

气候数据来自东北地区 97 个气象台站, 从 1980 年至 2012 年的日平均气象观测记录, 包含有温度、降雨量、日照时数、气压、湿度、风速等相关数据, 利用传统的反距离平方法进行气象数据插值计算 (图 2)。反距离权重插值法 (IDW) 是 GIS 软件中常用的插值方法, 它根据空间自相关性, 即在空间上越靠近的事物就越为接近的原理进行插值计算^[10-12], 最终获得 12 个环境栅格数据。

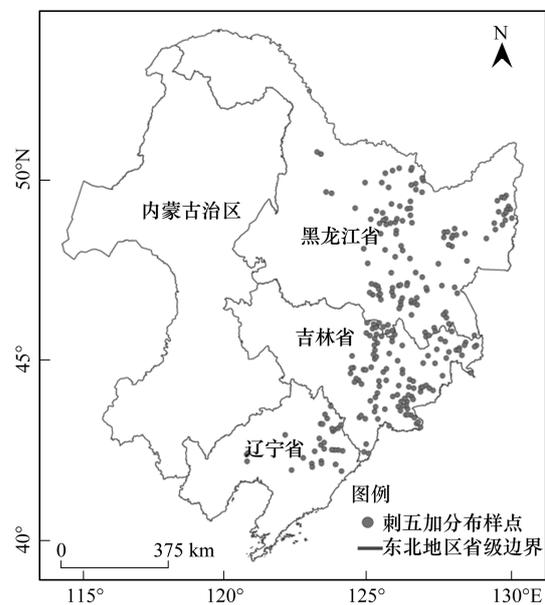
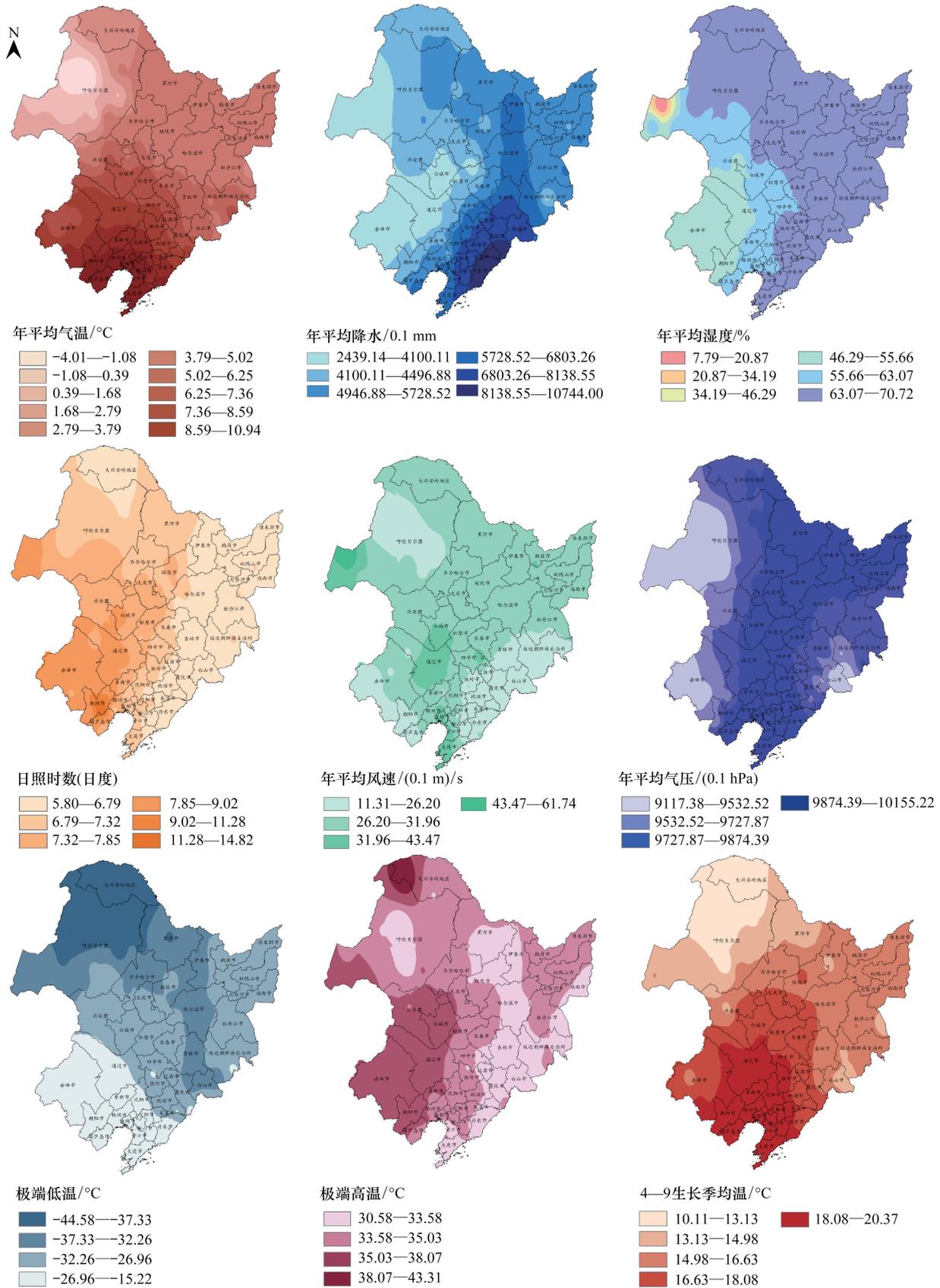


图 1 刺五加样点分布图

Fig.1 Distribution points of *Acanthopanax senticosus* in northeast of China



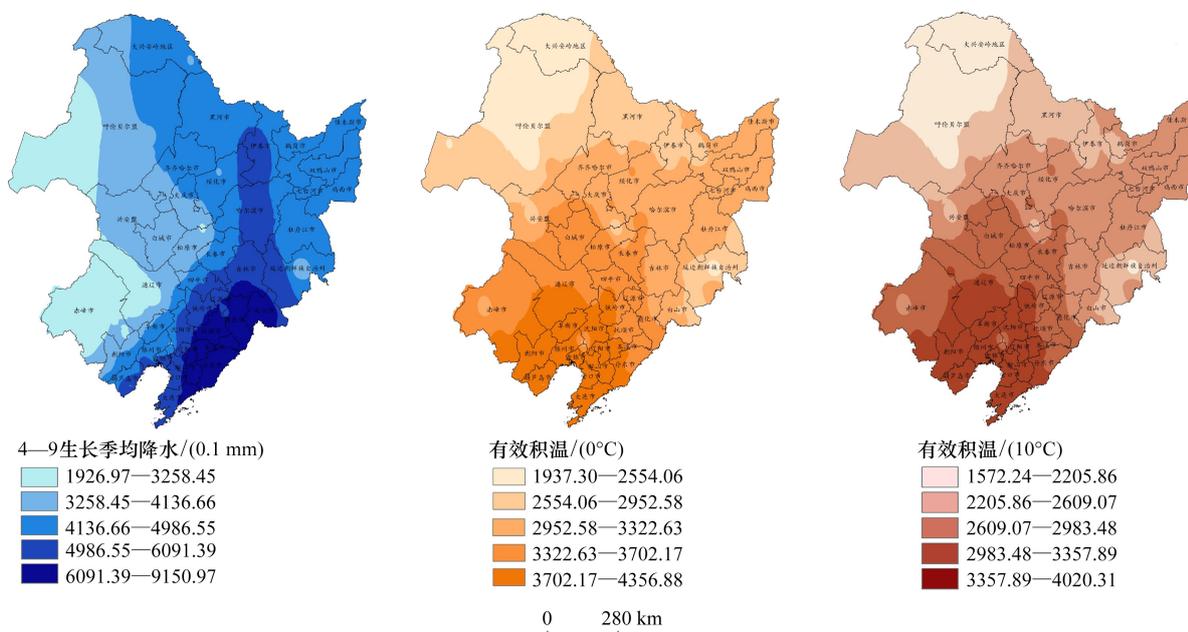


图2 气候数据图

Fig.2 Climate data graph

a:年平均气温 b:年平均降水量 c:年平均湿度 d:日照时数 e:年平均风速 f:年平均气压 g:极端低温 h:极端高温 i:4—9月生长季均温 j:4—9月生长季降水 k:有效积温 0°C l:有效积温 10°C

植被类型数据,是以 2015 年的 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像为数据源,利用面向对象分类方法解译获得东北地区植被类型数据,更新已发布的中国 1:100 万植被图数据,将野外样地物种调查数据作为验证点,整合而成精度为 30 m×30 m 的植被类型数据(图 3),该数据按照植物资源一类调查分类标准,将东北地区主要植被资源划分为 33 种类型。土壤类型数据,来自于最新版的中国 1:100 万数字化土壤图,分类到土属类型,本研究区包括 197 种土属类型。地形数据包括海拔(图 4)、坡度(图 5)、坡向,均根据我国 30 m 精度 DEM

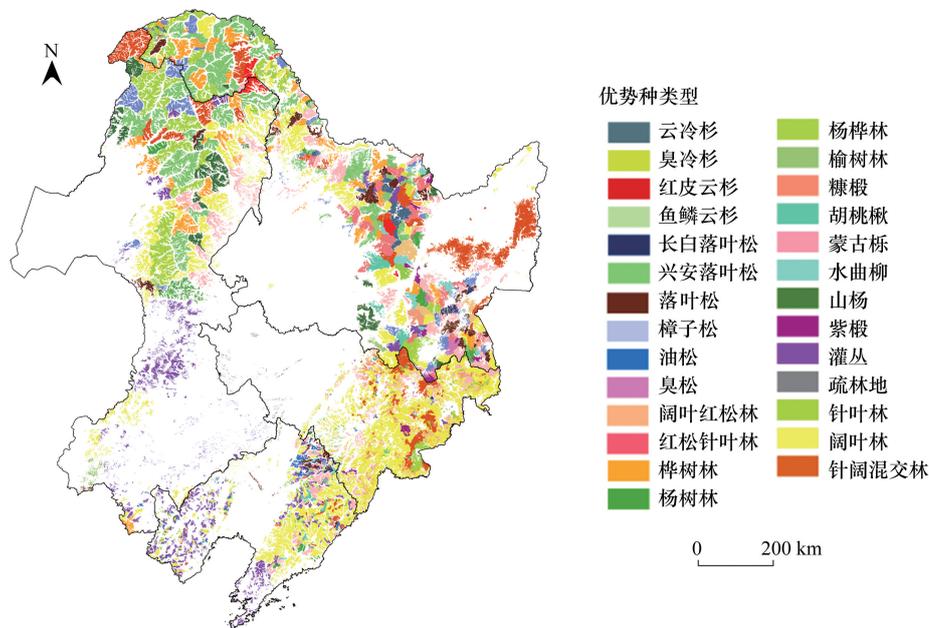


图3 森林类型图

Fig.3 Forest type

数据库解译运算获得。以上总计 17 个生态环境因子,分辨率均为 30 m×30 m,数据处理底图采用 1:100 万中国东北地区行政区划图(来源于中国基础地理信息系统 <http://nfgis.Nsdi.gov.cn/>)。

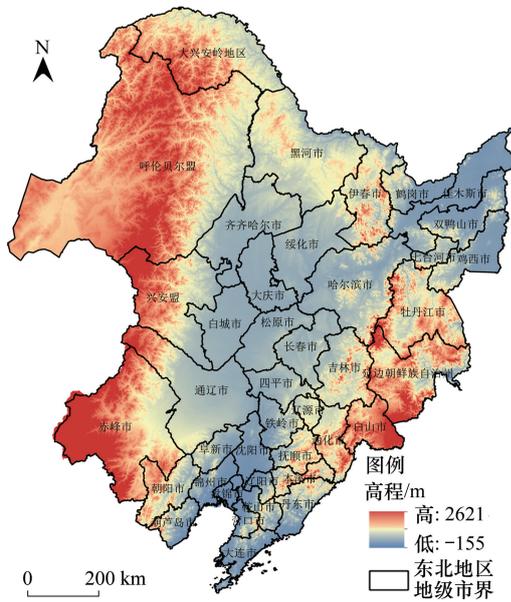


图 4 高程图
Fig.4 Elevation

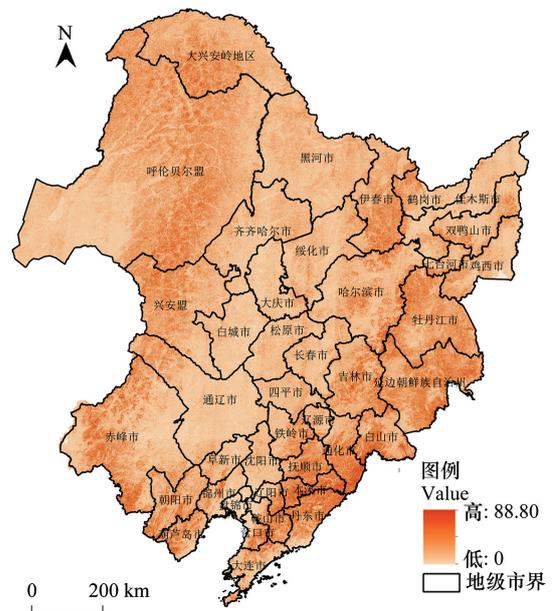


图 5 坡度图
Fig.5 Slop

1.2 研究方法

1.2.1 建立模型

采用 MaxEnt Version3.3.3 k (<http://www.cs.Princeton.edu/~schapire/MaxEnt>) 进行 MaxEnt 模型的预测,设置训练数据集为 75%,测试数据集为 25%进行分析。将刺五加数据分布点和环境数据导入到模型中,设置模型运行参数中的迭代次数为 10000 次,按结果收敛情况终止,并开启 Random seed,勾选绘制响应曲线(response curves)与刀切法(jackknife)功能,建立预测模型预测刺五加在东北地区的空间分布情况。利用 ArcGIS 的转换工具(Conversion Tools)将软件输出的 ASCII 编码文件转化为栅格(RASTER)格式进行重分类,得到刺五加在东北地区的空间分布图。

1.2.2 模型预测准确性评估

模型的预测结果采用受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic curve,ROC 曲线)下的面积值(Area Under Curve, AUC)进行检验^[13],该值大小与模型的预测精度呈正相关,取值范围为[0,1],即值越接近于 1,代表预测结果精度越高^[14-15](表 1)。

表 1 受试者工作特征曲线面积与模型精度

Table 1 Relationship between Area Under Curve and the accuracy of MaxEnt mode

模型准确性 Accuracy of model	受试者工作特征曲线下面积 Area under the receiver operating characteristic curve
不及格 Fail	0.5—0.6
较差 Poor	0.6—0.7
一般 Fair	0.7—0.8
良好 Good	0.8—0.9
优秀 Excellent	0.9—1.0

1.2.3 主要生态因子的选择

17 个生态因子和刺五加 267 个分布点数据同时导入到 MaxEnt 模型软件进行处理。根据 MaxEnt 模型多次迭代计算的结果,选取总贡献值 $\geq 90\%$ 的因子作为主要生态因子。根据各主要生态因子的响应曲线,获得各生态因子的适宜值范围^[16]。

1.2.4 适宜性区域划分

MaxEnt 模型的预测结果采用 0—1 的概率值来表示,即用存在概率值 P 来表示物种在分布区中分布的适宜性,其中 0 表示不适宜,1 表示非常适宜^[17]。将预测最终结果导入到 ArcGIS 软件中进行适生等级划分和可视化表达。利用 Reclass 工具中的人工(Manual)分级法,根据其适宜性指数进行划分,即 0.00—0.10 为不适宜区、0.10—0.30 为低适生区、0.30—0.50 为边缘适生区、0.50—0.70 为适生区、0.70—1.00 为最适生区^[18]。同时利用 ArcGIS 软件中空间分析模块,将模型输出的刺五加生境分布图与东北地区行政区地图叠加,便于分布地域分析^[19]。

2 结果与分析

2.1 生态位模型的准确性

MaxEnt 模型得到刺五加生境分析的平均训练 AUC 值(Mean training AUC)为 0.929,平均测试 AUC 值(Mean test AUC)为 0.899,根据分类标准,此模型对刺五加的适生区预测精度达到优秀水平。获得的 ROC 曲线如图 6 所示。

2.2 刺五加的分布区

根据 MaxEnt 预测结果,将刺五加潜在分布区预测结果进行适宜性区域划分,划分结果如图 7 所示。刺五加的潜在分布区主要集中在黑龙江省中东部、吉林省东部以及辽宁省东部,以长白山山脉附近为最佳,不同适宜性区域在各省的分布面积见表 2。

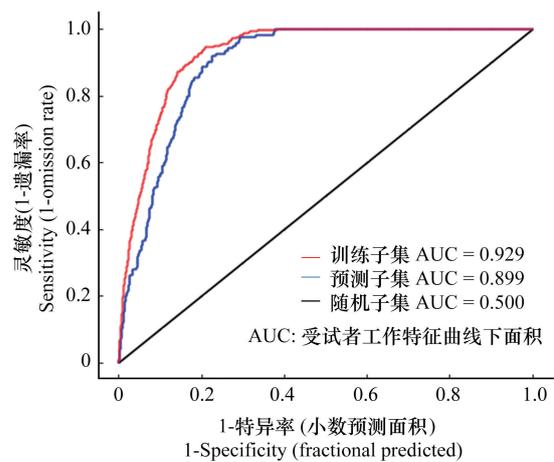


图 6 刺五加的受试者工作特征曲线

Fig.6 Receiver operating characteristic curve of *A. senticosus*

表 2 刺五加不同适宜性指数的区域分布/(万 km²)

Table 2 Distribution area with different suitable index of *Acanthopanax senticosus*

地区 Region	适宜性指数 Suitable index			
	0.1—0.3	0.3—0.5	0.5—0.7	≥ 0.7
黑龙江省	6.71	5.55	3.45	1.72
吉林省	2.66	3.32	2.51	2.69
辽宁省	1.69	1.15	0.96	0.77
内蒙古自治区	0.00	0.00	0.00	0.00

刺五加在东北三省均有较为广泛的分布,适宜概率在 0.3—0.7 之间,面积约为 16.94 万平方千米,占总研究区域面积的 13.64%。适宜概率 ≥ 0.7 的最适宜区主要在宽甸满族自治县北部、本溪满族自治县、新宾满族自治县、桓仁满族自治县、安图县、抚松县、临江市、长白朝鲜族自治县、舒兰市南部、敦化市北部及铁力市东部等地区,面积约为 5.18 万平方千米,占总研究区域面积的 4.17%。

2.3 影响刺五加分布的主要环境因子

利用刀切法(Jackknife test)分析各生态因子对刺五加分布适宜度的贡献率,贡献率大于 0 的因子有 16 个,排列前 7 的环境因子依次是年平均降水量、森林类型、极端低温、4—9 月生长季降水量、土壤类型、海拔、日照时数,累计贡献率达 92.2%(表 3)。

MaxEnt 模型运行结果中包含生态因子响应曲线,即存在概率与生态因子阈值范围的关系(图 8)。根据刺五加的响应曲线,划分主要生态因子的适宜值范围(存在概率大于 0.5 的范围):年均降水量范围在 550—940 mm,最适宜值在 880 mm 左右;森林类型包括落叶松林、阔叶红松林、杨桦林、榆树疏林、阔叶林等;极端低温在 -36°C 以上时存在概率大于 0.5,表明刺五加耐受的极端低温为 -36°C ;4—9 月生长季降水量范围在 490—800 mm,最适宜值在 750 mm 左右;海拔高度范围在 350—1580 m,最适宜值在 1200 m 左右;日照时数范围在 6—7 h 之间,最适宜值在 6.4 h 左右;所有土壤类型影响值均超过 0.5。

3 讨论

本文基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件对刺五加的潜在分布区进行了预测,预测结果 ROC 曲线下 AUC 值达到 0.929,证明 MaxEnt 模型的预测精度较高,可以较好的反应刺五加在研究区域内的潜在分布状况。环境因子的响应曲线有效的反应了物种的分布与生境环境需求间的关系,为我们提供了影响刺五加分布的主要生态因子与其适宜值范围。

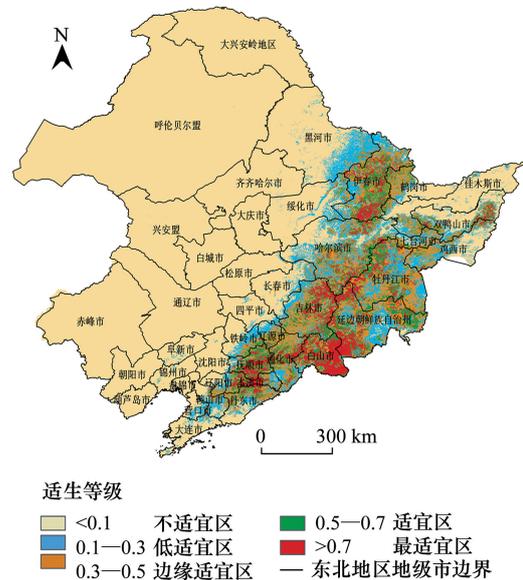


图 7 刺五加适宜性等级分布

Fig.7 Distribution of suitability value hierarchy for *A. senticosus*

表 3 生态因子贡献率

Table 3 Contribution rate of Ecological factors

生态因子 Ecological factors	贡献率 Contribution rate/%	生态因子 Ecological factors	贡献率 Contribution rate/%
年均降水量 Annual precipitation	30.4	坡度 Slop	1
森林类型 Forest type	28.4	有效积温(0°C) Effective accumulative temperature(0°C)	0.8
极端低温 Extreme low temperature	12.2	极端高温 Extreme high temperature	0.8
4—9 月生长季均降水量 Precipitation of 4—9 months	7	年均相对湿度 Annual relative humidity	0.6
土壤类型 Soil type	6	年均气压 Annual pressure	0.3
海拔 Altitude	5.3	坡向 Exposure	0.3
日照时数 Sunshine duration	2.9	年均温度 Annual temperature	0.2
4—9 月生长季均温 Temperature of 4—9 months	2.3	有效积温(10°C) Effective accumulative temperature(10°C)	0
年均风速 Annual wind speed	1.4		

物种的空间分布同区域内的气候环境、地理条件有着密不可分的联系。本次研究的研究区域为东北地区,地理位置大致为北纬 $38^{\circ}40'—53^{\circ}30'$,东经 $115^{\circ}05'—135^{\circ}02'$,南北纵跨 15° ,东西横跨 20° ,位于中亚造山带的东端^[20]。目前在区域内,已有对刺五加进行人工引种栽培的报道,其中辽东半岛的本溪满族自治县、丹东市宽甸满族自治县、黑龙江虎林市、宝清县等多地,均有刺五加种植基地,使当地农民增收效果显著,但尚未形成规模。根据 MaxEnt 分析结果,刺五加的适宜区在东北三省范围内均有分布,主要沿长白山脉和小兴安岭山脉南部分布,在长白山地区分布最为集中。适宜值 ≥ 0.7 的最适宜区地理位置主要在伊春市、吉林市、白山市和抚顺市,总面积达 5.18 万平方千米。在这些区域中,若已有小范围刺五加的种植区域,可根据实际情

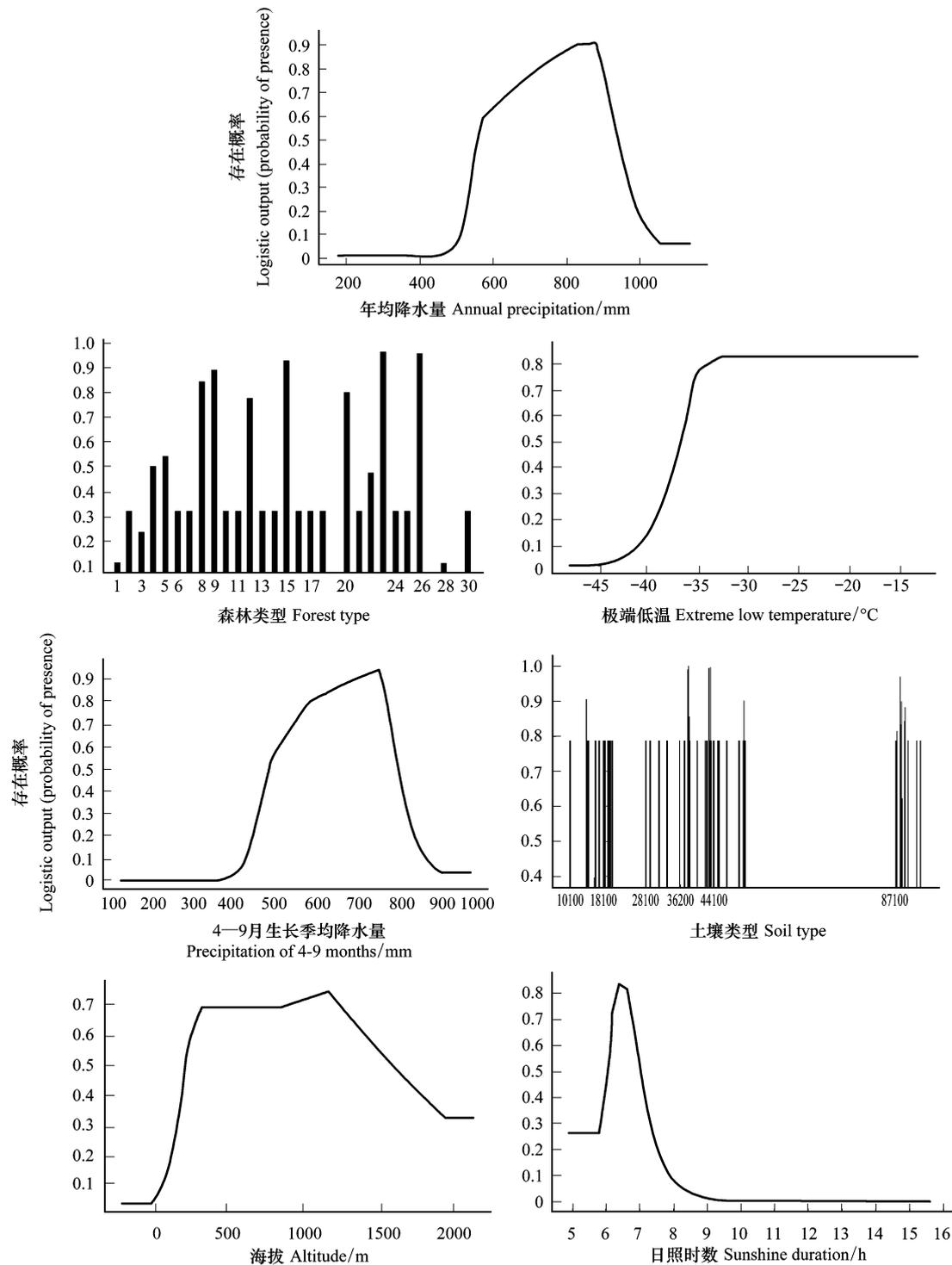


图8 主要生态因子响应曲线

Fig.8 Responses curve of ecological factors

况进行合理的扩大;若没有刺五加的种植区域,可考虑进行引种栽培。孟祥才等人研究认为刺五加的分布区主要集中在我国东北地区广大山区,其中小兴安岭及长白山北部蕴藏量尤为丰富,这与本次预测结果相符^[21]。

刺五加的生长周期长,生长发育受气候环境影响较大。东北地区气候多样,除辽东半岛外,大部分地区属于温带季风型大陆气候^[22],夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年降水量在 400—1000 mm,呈现冷湿现象。本文

中影响刺五加分布的主要生态因子是年均降水量(550—940 mm)、4—9月生长季降水量(490—800 mm)、极端低温(高于-36℃)等,这与刺五加喜温暖湿润、耐寒、耐荫蔽的生物学特征相一致。在对刺五加已有生物学特性的研究中,降水和温度是影响刺五加存活的主要环境因素。气候环境不仅影响着刺五加的地理分布范围,同时也同刺五加植株的品质有着深刻联系。有研究表明,刺五加根茎中的紫丁香苷含量受气候环境影响显著,年均温、年均降水量、年均湿度等同刺五加植株内的有效成分累积呈正相关^[23]。由于刺五加为重要的中药和保健品原料,在引种栽培时,要更加注重其优良品质的保持和提升。

物种的生长,需要相应的气候、地形、土壤等条件,也会受到周围植被类型、人类活动等方面的影响。本文研究中,适宜刺五加生长的土壤类型包括始成土、暗色土、冲积土等,在栽培过程中要选择土壤肥沃、排水良好的土壤。有研究表明,刺五加群落的存活同坡度坡向、光照条件以及所处林型都有一定联系。阴坡和林窗生境温暖潮湿、光照强度适宜,是刺五加生长的良好环境^[21,24]。刺五加种群的年龄结构、种群动态同所处林型有紧密的联系。在天然次生林中,刺五加为进展种群,在适宜条件下可以维持本种群的稳定;在硬阔叶林环境下,单株最大寿命最长;蒙古栎林中种群较小,寿命也较低。在当今市场上,刺五加野生产品供不应求,为保证刺五加的品质,商家多采用将生产基地建立刺五加生长区域内的经营方法^[23]。在采集野生刺五加的同时,也在林区模拟自然条件进行大量的人工栽培抚育,故研究适宜刺五加分布的森林类型有重要的指导意义。野外调查研究表明,刺五加多出现在阔叶红松林、杂木林、云冷杉林和蒙古栎林中^[25],与本文的预测结果基本一致。

刺五加作为药用和保健品原料植物,其资源多靠野生采挖获得,“掠夺式”的采收使刺五加野生资源量锐减,不仅破坏了刺五加群落的天然更新,也破坏了刺五加赖以生存的自然环境^[26]。此次的预测结果,可以代表与分布区大环境相似的区域,并未考虑刺五加本身的遗传变异、人为因素、复杂条件下形成的小气候等情景的影响,但是在尺度上提供了刺五加的潜在分布区,为保护野生刺五加的分布以及人工的扩种提供参考,对其保护、开发都具有重要意义。

致谢:感谢中国科学院沈阳应用生态所的于景华老师,倪震东老师在论文完成过程中给予的支持和帮助。

参考文献(References):

- [1] 祝宁,刘阳明. 刺五加生殖生态学的研究(Ⅲ)——根茎分布、能量分配及干扰对无性系小株发生的影响. 东北林业大学学报, 1993, 21(5): 35-40.
- [2] 祝宁,王义弘. 刺五加生殖生态学的研究(Ⅱ)——种子扩散、种子库及更新. 东北林业大学学报, 1992, 20(5): 12-17.
- [3] 刘德旺,谷彩梅,杨庆珍,黄林芳,谢彩香,蔡敏. 内蒙古地区道地药材蒙古黄芪资源调查及产地适宜性. 应用生态学报, 2016, 27(3): 838-844.
- [4] Patterson B D. Contingency and determinism in mammalian biogeography: the role of history. *Journal of Mammalogy*, 1999, 80(2): 345-360.
- [5] Peterson A T, Cohoon K P. Sensitivity of distributional prediction algorithms to geographic data completeness. *Ecological Modelling*, 1999, 117(1): 159-164.
- [6] Underwood E C, Klinger R, Moore P E. Predicting patterns of non - native plant invasions in Yosemite National Park, California, USA. *Diversity and Distributions*, 2004, 10(5/6): 447-459.
- [7] Li W J, Wang Z J, Ma Z J, Tang H X. A regression model for the spatial distribution of red-crown crane in Yancheng Biosphere Reserve, China. *Ecological Modelling*, 1997, 103(2/3): 115-121.
- [8] 马松梅,张明理,张宏祥,孟宏虎,陈曦. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测子遗植物裸果木的潜在地理分布及格局. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1327-1335.
- [9] 陈铁柱,刘建辉,周先建,张美,辜彬,廖述吉. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测合欢潜在分布及适宜性评价. 北方园艺, 2017, 41(16): 191-195.
- [10] 刘光孟,汪云甲,王允. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析. 中国科技论文在线, 2010, 5(11): 879-884.
- [11] 刘文岭,李伟,刘洋. 空间插值法对渤海天津海域海水盐度分布的影响. 盐业与化工, 2010, 39(2): 43-46.
- [12] 梁燕,刘爱军,邢旗,常书娟. 反距离权重内插法在内蒙古天然草原植被盖度监测中的应用//2009 中国草原发展论坛论文集. 合肥: 农

业部草原监理中心, 中国草学会, 2009: 6.

- [13] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [14] 徐军, 曹博, 白成科. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3354-3359.
- [15] 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.
- [16] 张飞, 陈随清, 王利丽, 张涛, 张小波, 朱寿东. 基于 Maxent 和 ArcGIS 的山茱萸生态适宜性区划研究. *中国中药杂志*, 2017, 42(16): 3078-3083.
- [17] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [18] 张东方, 张琴, 郭杰, 孙成忠, 吴杰, 聂祥, 谢彩香. 基于 MaxEnt 模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究. *生态学报*, 2017, 37(15): 5111-5120.
- [19] 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.
- [20] 杨文鹏, 张立东, 张俭峰, 姜海洋, 吕石佳, 李新鹏, 万太平. 东北地区新开岭-科洛杂岩变形规律与成因[J/OL]. *地球科学*, 2018: 1-21. [2018-09-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180228.1312.004.html>.
- [21] 孟祥才, 都晓伟, 孙晖, 王喜军, 袁野, 韩莹. 野生刺五加分布规律调查. *现代中药研究与实践*, 2009, 23(4): 6-7.
- [22] 晏寒冰, 吴军, 李建林, 唐旭清. 东北地区主要森林物种的分布区气候数据分析. *生物数学学报*, 2016, 31(1): 118-128.
- [23] 徐燃, 吴杰, 董林林, 徐江, 陈平, 刘森, 黄林芳, 陈士林. 刺五加全球产地生态适宜性及品质生态学研究. *药学学报*, 2018, 53(2): 313-320.
- [24] 曹建国. 刺五加生活史型特征及其形成机制的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- [25] 金慧, 尹航, 赵莹, 刘丽杰, 代玉红, 邴贵平, 刘颖. 长白山区野生刺五加种群结构与数量特征分析. *吉林林业科技*, 2017, 46(5): 1-5, 16-16.
- [26] 唐策, 文检, 张雯, 苏锦松, 谢彩香, 张艺. 基于最大熵模型的藏药翼首草生态适宜性研究. *中国中药杂志*, 2017, 42(10): 1871-1876.