

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2017.05.001

基于 MaxEnt 的四川省红豆杉潜在分布区 分析及适宜性评价

李 灿^{1,3}, 刘贤安^{1,4}, 王 娟^{2,4}, 彭培好^{2,3,4*}, 邵怀勇^{1,3}

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 四川 成都 610059;

3. 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 四川 成都 610059; 4. 成都理工大学生态资源与景观研究所, 四川 成都 610059)

摘 要:以四川省全国第二次重点保护野生植物资源调查中 201 个红豆杉分布点为基础数据源, 筛选 31 个影响红豆杉分布的环境变量, 应用 MaxEnt 最大熵模型, 结合 ArcGIS 地理信息系统, 划定四川省红豆杉潜在分布区并进行适宜性评价, 结果表明:①红豆杉在四川省的最适生区域面积 11 508.750 89 km², 占全省面积 2.37%; 适生区域面积 13 340.487 64 km², 占全省面积 2.75%; 较适生区域面积 12 099.527 38 km², 占全省面积 2.49%; 不适生区域面积 448 368.743 5 km², 占全省面积 92.39%; 最适生、适生及较适生区域主要位于茶坪山、龙门山、大巴山、华蓥山、大娄山、大相岭及邛崃山等盆周山地边缘;②31 个影响红豆杉分布的环境变量中, 海拔、年均温、7 月降水量、昼夜温差月均值、最冷季度平均温度、降水量变异系数、最冷月最低温、坡度、3 月光照强度、7 月平均温度、最干季平均温度及 11 月平均温度是对红豆杉分布有主要影响的 12 个环境变量;③红豆杉最适生环境为气候较为温暖, 年均温 7.5℃~15℃, 昼夜温差月均值 7℃~10℃; 海拔 1 000 m~2 400 m; 降水量充沛, 7 月降水量 50 mm~160 mm, 降水量变异系数 50~75; 光照充足, 3 月光照强度 11 000 KJ·m⁻²·d⁻¹~12 200 KJ·m⁻²·d⁻¹ 的亚热带地区, 植被覆盖率较高的山沟或山林中。

关键词:MaxEnt; 红豆杉; 潜在分布区; 适宜性评价; 四川省

中图分类号:Q948.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-5508(2017)05-0001-07

Predictive Distribution and Habitat Suitability Assessment of *Taxus chinensis* Based on MaxEnt in Sichuan Province

LI Can^{1,3} LIU Xian-an^{1,4} WANG Juan^{2,4} PENG Pei-hao^{2,3,4*} SHAO Huai-yong^{1,3}

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology Ministry of Land and Resources,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. Institute of Ecological Resources and Landscape, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The 201 localities of *Taxus chinensis* were selected as the underlying data source found in the second national survey of key wild plant resources in Sichuan. A total of 31 environmental variables were screened that affect the distribution of *Taxus chinensis*. The potential distribution areas of *Taxus chinensis* in Sichuan were designated and their suitability was evaluated by using the maximum entropy model (MaxEnt) and the ArcGIS geographic information system. The results have indicated that ① the most suitable area size for the growth of *Taxus chinensis* in Sichuan is 11 508.750 89 km², accounting for 2.37% of the total area of Sichuan; the suitable area size for the growth is 13 340.487 64 km², account-

收稿日期:2017-07-03

基金项目:四川省林业厅全国第二次重点保护野生植物资源调查项目(80303-KZZ031)

作者简介:李灿(1993-),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事“3S”技术与资源环境遥感评价研究。E-mail:lc1993926@sina.com

*通讯作者,彭培好(1963-),E-mail:peihaop@163.com。

ing for 2.75% ;the relatively suitable area is 12 099.527 38 km², accounting for 2.49% ;and the unsuitable area size is 448 368.743 5 km², accounting for 92.39%. The area which is the most suitable, suitable and relatively suitable for the growth of *Taxus chinensis* is mainly distributed at the edge of the mountain regions around the Sichuan Basin, such as Chaping Mountains, Longmen Mountains, Daba Mountains, Huaying Mountains, Dalou Mountains, Daxiangling Mountains and Qionglai Mountains; ② Among the 31 environment variables which have influence on the distribution of *Taxus chinensis*, 12 of them have the major impact. To be specific, these major variables are altitude, annual temperature, precipitation in July, the monthly mean diurnal temperature range, the average temperature in the coldest month, the precipitation variation coefficient, the lowest temperature in coldest month, the slope, the solar radiation in March, the average temperature in July, the average temperature in the driest season and the average temperature in November; ③ The most suitable environment for *Taxus chinensis* is highly vegetated subtropical ravine comparatively warm climate of 7.5 °C ~ 15 °C in annual mean temperature, and 7 °C ~ 10 °C in mean diurnal range, altitude of 1 000 meters ~ 2 400 meters, abundant 50 mm ~ 160 mm precipitation in July with a 50 ~ 75 variation coefficient, solar radiation of 11 000 KJ · m⁻² · d⁻¹ to 12 200 KJ · m⁻² · d⁻¹.

Key words: MaxEnt, *Taxus chinensis*, Potential distribution area, Habitat suitability assessment, Sichuan province

红豆杉是世界上公认的天然珍稀抗癌植物,属于历经第四纪冰川遗留下来的古老孑遗物种,国家一级重点保护植物^[1];由于自身巨大的经济价值,常面临盗挖滥伐,保护迫在眉睫。目前,对红豆杉的研究主要集中在遗传学^[2,3]、组织培育^[4,5]、药用开发^[6,7]等方面;针对四川省红豆杉,仅有蔡小虎等^[8]对种群结构和动态的初步研究,未见利用生态学原理预测四川省红豆杉潜在分布区的研究实例。已知植物潜在分布区预测的生态学模型主要有生态位因子分析模型、环境包络模型、基于遗传算法的规则组合预测模型、MaxEnt 模型、BIOCLIM 模型及 DOMAIN 模型等。其中,基于 MaxEnt 模型的野生植物潜在分布区预测结果较其他模型优势明显,即使在物种分布数据残缺的情况下,该模型仍具有良好的预测效果和可信度;并在国内外珍稀植物物种,如伯乐树、独叶草、南方红豆杉^[9-11]等的潜在分布区预测分析方面有广泛的研究。本文应用 MaxEnt 模型,结合 ArcGIS 地理信息系统,对四川省红豆杉的潜在分布区域进行了预测、分析及适宜性评价,为四川省红豆杉植物资源保护、人工栽培、药用开发等提供重要依据,对珍稀植物资源保护与合理开发利用具有重要的指导意义与参考价值。

1 数据与方法

1.1 数据来源

1.1.1 分布点数据 红豆杉的实际分布数据来源

于四川省全国第二次重点保护野生植物资源调查项目中 201 个红豆杉分布点,主要位于盆周山地边缘及四川盆地向川西北高原地区过渡的河谷深切区(图 1)。

1.1.2 环境数据 气候数据来源于世界气候数据库 WorldClim (<http://www.worldclim.org/>) 网站,共有 28 种气候变量,其中包括符合植物生态学特征的 19 种生物气候变量 (bio1 - 19) 和 9 种单月气候变量,即 3 月平均气温 (tmean3)、7 月平均气温 (tmean7)、11 月平均气温 (tmean11)、3 月光照强度 (solar3)、7 月光照强度 (solar7)、11 月光照强度 (solar11)、3 月降水量 (prec3)、7 月降水量 (prec7) 及 11 月降水量 (prec11),分别代表 1 a 中具有等时间间隔的 3 个不同季节的气温、光照及降水量对植物生长的影响;月平均气温主要影响植物蒸腾作用,光照强度反映了光合作用的强弱,降水量制约植物根系对水分及其他营养物质的吸收利用。气候数据时间跨度为 1960 年 ~ 2000 年,图层分辨率 30 弧秒,空间分辨率 1 km × 1 km。3 种地形变量包括海拔 (dem)、坡度 (slope)、坡向 (aspect),海拔与气温、氧气含量、气压等关系密切,对植物生长影响显著,坡度、坡向体现了太阳光照条件;dem 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/search>) STRM30m 高程数据 (单位 m),坡度、坡向使用 ArcGIS 空间分析工具 spatial analyst tools 生成 (表 1)。

1.1.3 地图数据 2012 年中国电子地图,该地图包含四川省各市 (州) 的属性数据,使用 ArcGIS 选

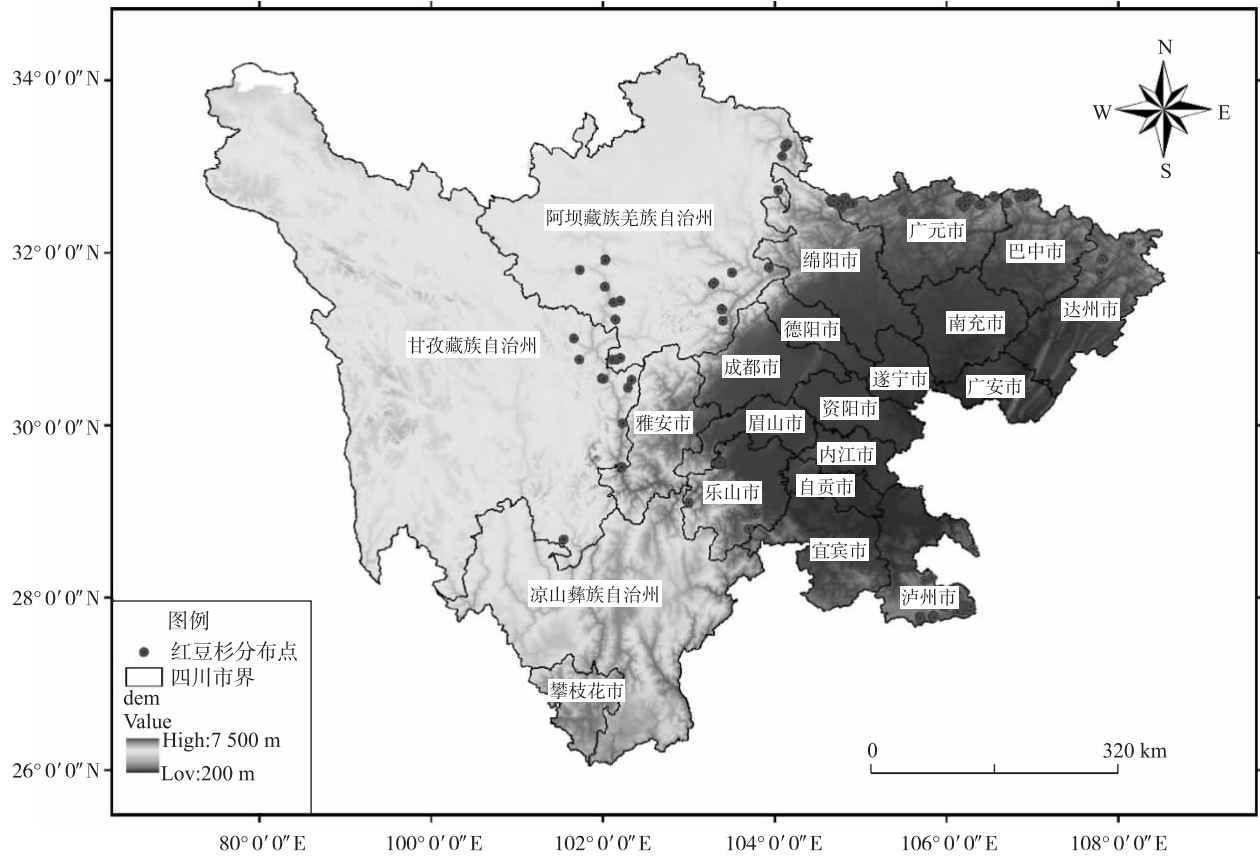


图 1 四川省红豆杉采样点分布图
Fig. 1 Sampling site distribution map of *Taxus chinensis* in Sichuan province

表 1
Tab. 1 环境变量名称
Environment variable name

变量类型 Variable type	变量简称 Variable abbreviation	描述 Description	变量类型 Variable type	变量简称 Variable abbreviation	描述 Description
生物气候变量 Bio-climate variable	bio-1	年均温 Annual Mean Temperature	单月气候变量 Monthly climate variable	bio-14	最干月降水量 Precipitation of Driest Month
	bio-2	昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))		bio-15	降水量变异系数 Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
	bio-3	等温性 Isothermality (BIO2/BIO7) (* 100)		bio-16	最湿季度降水量 Precipitation of Wettest Quarter
	bio-4	温度季节性变化的标准差 Temperature Seasonality (standard deviation * 100)		bio-17	最干季度降水量 Precipitation of Driest Quarter
	bio-5	最暖月最高温 Max Temperature of Warmest Month		bio-18	最暖季度降水量 Precipitation of Warmest Quarter
	bio-6	最冷月最低温 Min Temperature of Coldest Month		bio-19	最冷季度降水量 Precipitation of Coldest Quarter
	bio-7	年均温变化范围 Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)		tmean-3, tmean-7, tmean-11	3、7、11 月平均气温 Mean temperature of Mar, Jul, Nov
	bio-8	最湿季度平均温度 Mean Temperature of Wettest Quarter		solar-3, solar-7, solar-11	3、7、11 月光照强度 Solar radiation of Mar, Jul, Nov
	bio-9	最干季度平均温度 Mean Temperature of Driest Quarter		prec-3, prec-7, prec-11	3、7、11 月降水量 Precipitation of Mar, Jul, Nov
	bio-10	最暖季度平均温度 Mean Temperature of Warmest Quarter		dem	海拔 Altitude
	bio-11	最冷季度平均温度 Mean Temperature of Coldest Quarter		slope	坡度 Slope
	bio-12	年均降水量 Annual Precipitation		aspect	坡向 Aspect
	bio-13	最湿月降水量 Precipitation of Wettest Month			
			地形因子变量 Landform factor variable		

中四川省行政区划矢量面状界线并输出,用于环境数据栅格图层的裁剪等处理;2010年四川省土地利用图用于潜在分布区结果辅助验证与分析。

1.2 数据处理

1.2.1 环境栅格数据处理 环境数据栅格图层使用 ArcGIS 的处理工具转换为具有相同地理坐标系 (WGS84 坐标)、空间范围和像元大小的栅格数据;并将处理结果转换为 ASC II (asc 格式)文件备用。

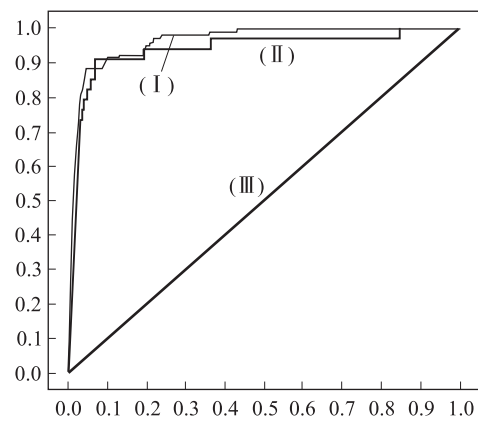
1.2.2 MaxEnt 模型预测 MaxEnt 模型的核心是充分利用不完全信息来推断未知信息,将已知信息作为约束条件,进而求出概率分布满足熵值最大化的条件。采用该模型进行预测时,不做倾向性假设,在确保已有信息不丢失前提下,当熵值最大时,冗余信息被排除,使得未知信息不确定性降低。假设随机变量 α , 包含 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n, n$ 种可能, 则其熵值:

$$H(\alpha) = -\sum_{i=1}^n P_i \log \frac{1}{P_i} = -\sum_{i=1}^n P_i \log P_i$$

式(1)中: $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 为每种出现的概率。

利用某物种的分布数据结合分布区域环境变量,计算物种分布规律的最大熵值,该物种潜在分布适宜性区划即熵最大时该物种的概率分布。将红豆杉分布点数据(csv 格式)与环境数据(asc 格式)导入最大熵模型预测软件 MaxEnt3.3.3,参照 Roberto 等^[12]对研究数据的处理方法,软件设置中选择开启刀切法,并随机选择 25% 的分布点作为测试集,75% 的分布点作为训练集,数据循环计算 10 次,用于模型预测结果的交叉验证;其他设置选择软件默认值,预测结果选择输出为 ASC II (asc 格式)文件,该文件可以转换为栅格图层用于处理分析;图层每一个像元代表该像元对应实际区域的适生指数,数值范围为 0~1,使用重分级工具将预测结果栅格图层分为 4 个适生等级。

1.2.3 预测结果精度评定 采用受试者操作特性曲线 ROC 分析法进行模型精度验证,该方法通过计算曲线与横坐标围成的面积即 AUC 值判断模型预测精度,依据 Hanley 等^[13]对模型预测精度判断标准的研究,当 AUC 值为 0.50~0.60 说明预测效果为失败,0.60~0.70 预测效果为较差,0.70~0.80 预测效果为一般,0.80~0.90 预测效果为较好,0.90~1.00 预测效果为很好;一般而言,当 AUC 值 >0.9 时,预测结果精度较高,预测结果可以采用(图 2)。



(I)训练集, AUC =0.963; (II)测试集, AUC =0.939; (III)自由预测, AUC =0.5

(I)Test data, AUC =0.963; (II)Training data, AUC =0.939; (III)Random Prediction, AUC =0.5

图 2 四川省红豆杉预测的 ROC 曲线

Fig.2 ROC curves of *Taxus chinensis* in Sichuan

2 结果与分析

2.1 红豆杉潜在分布区预测模拟

根据 MaxEnt 模型生成的受试者操作特性曲线 ROC 可知,该预测过程产生的 AUC 值高达 0.963,完全满足预测精度要求,说明通过该模型预测四川省红豆杉潜在分布区范围具有很高可信度。对红豆杉潜在分布区进行适生等级评定,应用 ArcGIS 的 Reclass 重分级工具,采用人工 (Manual) 分级方法,将预测结果分为 4 个等级,适生指数在 0~0.2 为不适生区,0.2~0.3 为较适生区,0.3~0.5 为适生区,0.5~1.0 为最适生区。对各个适生等级的面积进行分类计算与统计,可得四川省红豆杉不适生区域面积 448 368.743 5 km², 占全省面积 92.39%;较适生区域面积 12 099.527 38 km², 占全省面积 2.49%;适生区域面积 13 340.487 64 km², 占全省面积 2.75%;最适生区域面积 11 508.750 89 km², 占全省面积 2.37% (图 3)。红豆杉适生区域主要出现在阿坝藏族羌族自治州东部、甘孜藏族自治州东部、雅安市西北部、眉山市西南部、乐山市西南部、凉山彝族自治州东北部、宜宾市东南部、泸州市东部、广安市中部、达州市北部、巴中市北部、广元市北部、绵阳市西北部、德阳市西北部及成都市西部;整体而言,主要位于茶坪山、龙门山、大巴山、华蓥山、大娄山、大相岭及邛崃山等盆周山地边缘。盆地内资阳市、内江市、自贡市、遂宁市及南充市,川西高原

甘孜藏族自治州中部及阿坝藏族羌族自治州北部,横断山区凉山彝族自治州及攀枝花市基本无红豆杉适生区域,可见红豆杉多适生于中海拔地区,海拔过低或过高都不宜生长(图 4)。

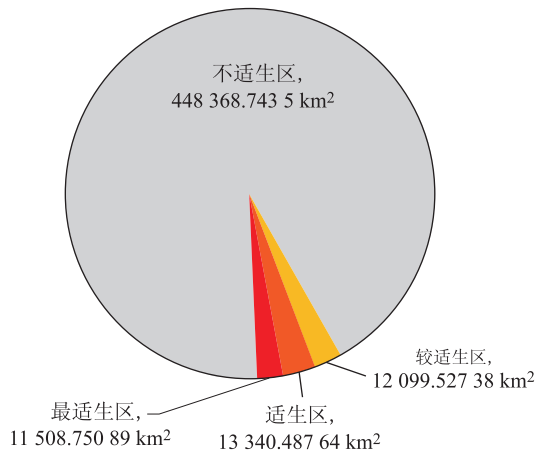


图 3 四川省红豆杉各适生等级区域面积统计图

Fig. 3 Statistical map of the suitable grades of *Taxus chinensis* regional area in Sichuan province

MaxEnt 模型在分布点极少的情况下也有较高的预测精度,201 个分布点基本覆盖了四川省有红豆杉分布且人员可到达或点位信息可获得的全部区域,分布点数量满足要求;分析红豆杉采样点与生态

适宜性区划图,共有 186 个分布点位于最适生、适生及较适生区域,占总数的 92.54%。由于现实情况的复杂性,调查中未能采样的区域,模型同样预测出了大范围潜在分布区,可见预测所得四川省红豆杉生态适宜性区划是综合分析分布点区域 31 种环境变量得出的结果,红豆杉采样点的空间分布与密度主要取决于调查范围和难度,不代表潜在分布状况。同时,生态适宜性区划图结合 2010 年四川省土地利用图,对红豆杉较适生区、适生区及最适生区分别与森林、灌木地两种植被土地利用区域矢量图层进行叠置分析;结果可得,较适生区森林面积 9 565.432 02 km²,灌木地面积 15.063 92 km²,分别占较适生区面积 79.06% 和 0.12%;适生区森林面积 11 139.917 38 km²,灌木地面积 7.500 67 km²,分别占适生区面积 83.50% 和 0.06%;最适生区森林面积 9 007.323 56 km²,灌木地面积 7.520 72 km²,分别占最适生区面积 78.26% 和 0.07%;可见,红豆杉适宜生长区域大多位于森林,即乔木覆盖且树冠盖度超过 30% 的植被覆盖率较高区域,这与野外调查实践结果一致,仅有极少部分位于灌木地区域,符合红豆杉生长特性。这进一步验证了四川省红豆杉适生区域预测结果具有很高的可信度,预测精度符合要求。

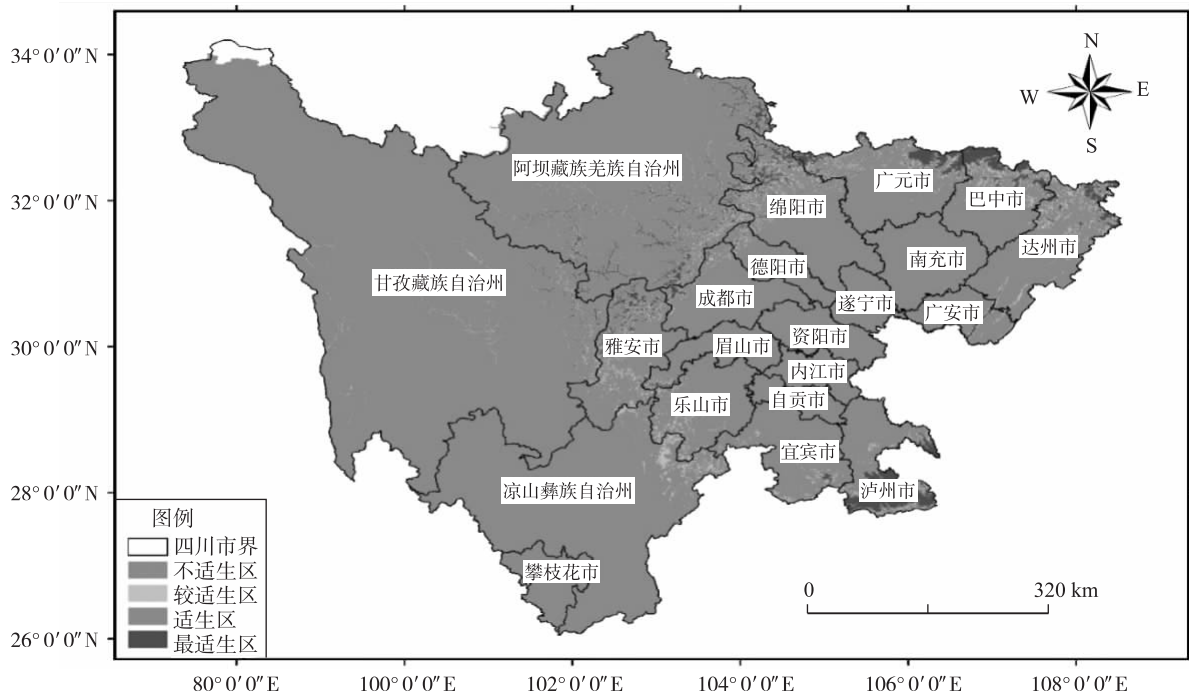


图 4 四川省红豆杉生态适宜性区划

Fig. 4 Ecological suitability regionalization of *Taxus chinensis* in Sichuan province

2.2 环境变量贡献率分析

通过 MaxEnt 模型刀切法分析环境变量影响权重并计算(图 5),可知 31 种环境变量对四川省红豆杉潜在分布区域影响的贡献率,影响红豆杉分布的主要环境变量有 12 种,贡献率由高到低依次为海拔(16.8%)、年均温(13.9%)、7 月降水量(11.9%)、昼夜温差月均值(11%)、最冷季度平均温度(10.9%)、降水量变异系数(6.2%)、最冷月最低温度(6.1%)、坡度(5.1%)、3 月光照强度(4.2%)、7 月平均温度(3.6%)、最干季度平均温度(3%)及 11 月平均温度(2.1%);这 12 种环境变量的累计贡献率达 94.8%,其中气候变量累计贡献率 72.9%(温度 50.6%,降水量 18.1%,光照 4.2%),地形变量累计贡献率 21.9%(海拔 16.8%,坡度 5.1%)。由此可知,温度对红豆杉的生长影响最大,其次是地形、降水量及光照强度等气候环境变量。

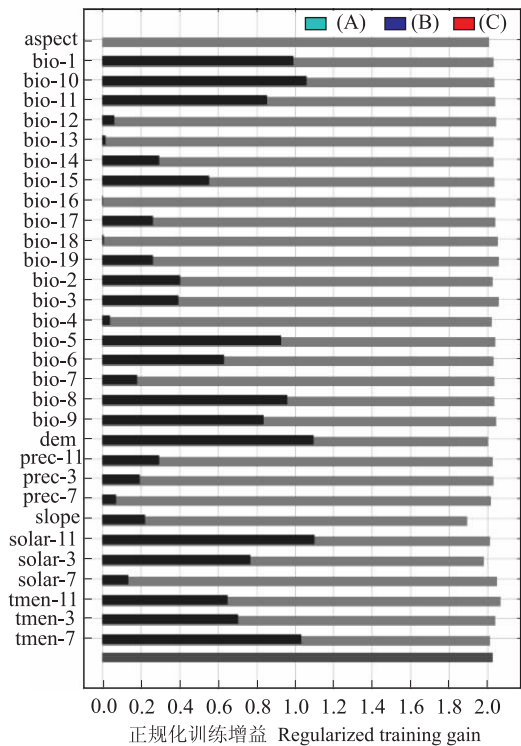


图 5 四川省红豆杉预测结果刀切图
 Fig.5 Jackknife result of prediction process of *Taxus chinensis*

2.3 主要环境变量分析

对红豆杉生长有主要影响的环境变量是温度,其次是地形、降水量及光照强度。因此,对温度变量中的年均温;降水量变量中的 7 月降水量、降水量变异系数;光照强度变量中的 3 月光照强度;地形变量中的海拔共 6 种环境变量响应曲线进行分析,探讨各环境变量与红豆杉之间的生态学联系。参考郭杰等^[14]在药用植物党参全球潜在分布区研究中的范例,即认为当存在概率大于 0.5 时,该变量数值范围适宜红豆杉生长。

年均温对红豆杉生长的贡献率最大,达 13.9%,其次是昼夜温差月均值,贡献率 11%。当年均温低于 0℃时,红豆杉的存在概率趋近于 0,年均温大于 0℃时存在概率快速上升,在 11℃左右达到峰值;当年均温范围处于 7.5℃~15℃,存在概率大于 0.5,说明该温度范围适宜红豆杉生长;当年均温大于 15℃,存在概率快速下降,说明年均温大于 15℃的环境不适宜红豆杉生长。昼夜温差月均值范围在 7~10℃时存在概率大于 0.5,说明该昼夜温差范围较适宜红豆杉生长。

海拔的贡献率为 16.8%,同时在 31 种单一环境变量中贡献率最高,说明海拔对红豆杉的生长有显著影响。海拔范围在 1 000 m~2 400 m 时有利于红豆杉生长,在 1 300 m 左右存在概率达到峰值,说明红豆杉最适宜在中海拔地区生长,海拔小于 1 000 m 或大于 2 400 m 时存在概率快速下降,说明这两个海拔段不利于红豆杉生长。

7 月降水量贡献率最大为 11.9%;其次,降水量变异系数为 6.2%。7 月降水量范围在 50 mm~160 mm 时较适宜红豆杉生长,存在概率在 100 mm 左右达到峰值,降水量大于 160 mm 时存在概率快速下降,说明降水量过大也不利于红豆杉生长。降水量变异系数范围在 50 时~75 时最适宜红豆杉生长。

3 月光照强度贡献率为 4.2%。3 月光照强度在 9 000 KJ·m⁻²·d⁻¹ 以下时红豆杉存在概率趋近于 0,当 3 月光照强度大于 9 000 KJ·m⁻²·d⁻¹ 时存在概率快速上升,在 11 900 KJ·m⁻²·d⁻¹ 左右达到峰值,3 月光照强度范围在 11 000 KJ·m⁻²·d⁻¹~12 200 KJ·m⁻²·d⁻¹ 时存在概率大于 0.5,说明该光照强度范围最适宜红豆杉生长,当 3 月光照强度大于 14 000 KJ·m⁻²·d⁻¹ 时红豆杉存在概率快速下降并逐步趋近于 0,说明大于该光照强度不适宜红豆杉生长(图 6)。

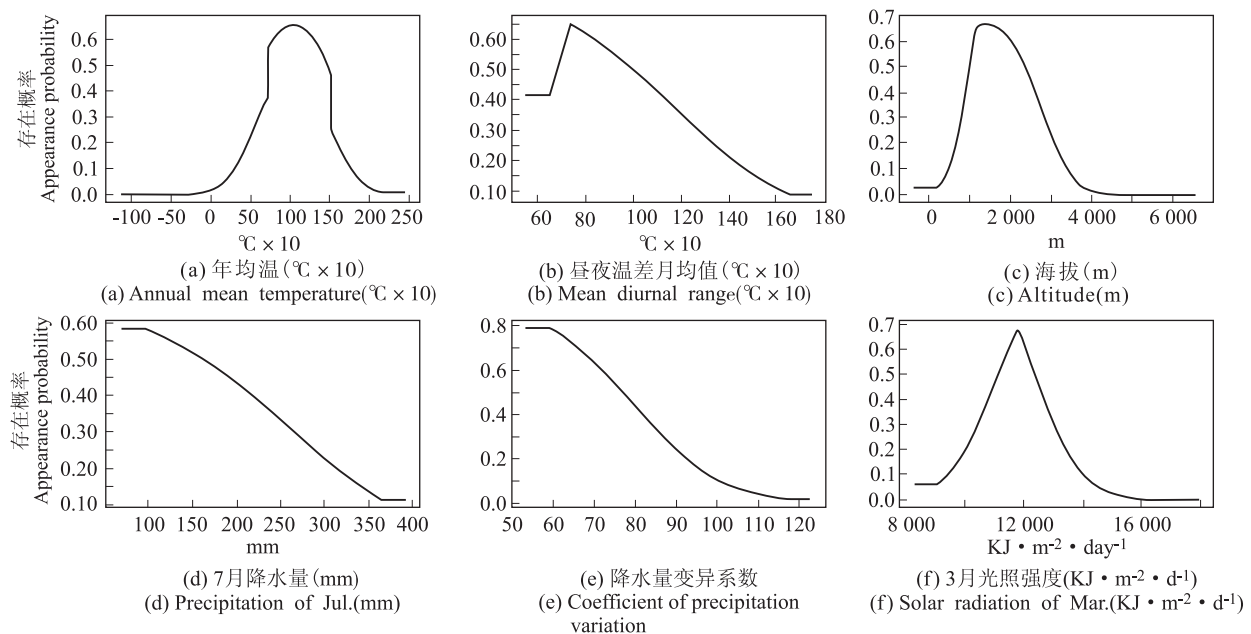


图6 主要环境变量响应曲线

Fig. 6 Response curve of main environmental

以存在概率大于 0.5 为标准,其余 6 种环境变量适宜范围分别为:最冷季度平均温度 $-1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月最低温 $-9\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,坡度 $0.3 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^6$,7 月平均温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,最干季度平均温度 $-1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,11 月平均温度 $2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 讨论与结论

本文应用 MaxEnt 模型,结合 ArcGIS 地理信息系统,最终明确了四川省红豆杉的潜在分布范围和适生环境。研究可得:①红豆杉在四川省的最适生区域面积 $11\,508.750\,89\text{ km}^2$,占全省面积 2.37%;适生区域面积 $13\,340.487\,64\text{ km}^2$,占全省面积 2.75%;较适生区域面积 $12\,099.527\,38\text{ km}^2$,占全省面积 2.49%;不适生区域面积 $448\,368.743\,5\text{ km}^2$,占全省面积 92.39%;最适生、适生及较适生区域主要位于茶坪山、龙门山、大巴山、华蓥山、大娄山、大相岭及邛崃山等盆周山地边缘;②31 个影响四川省红豆杉分布的环境变量中,海拔、年均温、7 月降水量、昼夜温差月均值、最冷季度平均温度、降水量变异系数、最冷月最低温、坡度、3 月光照强度、7 月平均温度、最干季平均温度及 11 月平均温度是对红豆杉分布有主要影响的 12 个环境变量;这与万基中等^[11]对与红豆杉同属的南方红豆杉主要影响

环境变量分析结果吻合,本研究增选了地形变量、单月降水量变量及光照强度变量,因此,对四川省红豆杉适生环境的分析更为全面,结果表明海拔与单月降水量对四川省红豆杉的分布也有很大影响;土壤等变量对红豆杉生长的影响有待进一步考证;③红豆杉最适生环境为气候较为温暖,年均温 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,昼夜温差月均值 $7\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;海拔 $1\,000\text{ m} \sim 2\,400\text{ m}$;降水量充沛,7 月降水量 $50\text{ mm} \sim 160\text{ mm}$,降水量变异系数 $50 \sim 75$;光照充足,3 月光照强度 $11\,000\text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \sim 12\,200\text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的亚热带地区,植被覆盖率较高的山沟或山林中,该结论与于海彬等^[15]对西藏自治区红豆杉适生环境研究部分结果保持一致。

据此结果,决策人员能够科学有效地获取四川省红豆杉未知分布区域,划定自然保护区,扩展保护空间范围,弥补保护漏洞,避免生境破碎化对红豆杉种群稳定产生的不利影响;研究所得最适生区,能够明确红豆杉重点保护区域范围,加大林保人员对重点区域的监督管理力度,避免盲目保护,最大程度减少人为破坏与干扰,同时为红豆杉人工繁育放归与种植救护承载力选址提供参考;主要环境变量分析数值范围可为红豆杉繁育种植区域营造仿野生生长环境提供参考依据,使红豆杉生长在合适的环境幅

(下转第 32 页)

- [13] 刘小龙,李霞,钱宝云,等. 植物体内钙信号及其在调节干旱胁迫中的作用[J]. 西北植物学报,2014,34(9):1927~1936.
- [14] 郭伟志. 干旱胁迫下不同杉木无性系的若干生理响应和差异蛋白质组分析[D]. 福建农林大学,2012.
- [15] 韩莎. 干旱胁迫下桑树蛋白质的差异表达分析[D]. 西北农林科技大学,2013.
- [16] 祁建民,姜海青,陈美霞,等. 干旱胁迫下红麻叶片的差异蛋白表达分析[J]. 中国农业科学,2012,45(17):3632~3638.
- [17] Oraby H, Ahmad R. Physiological and biochemical changes of CBF3 transgenic oat in response to salinity stress [J]. Plant Science, 2012,185~186(4):331.
- [18] Colcombet J, Hirt H. Arabidopsis MAPKs; a complex signalling network involved in multiple biological processes[J]. Biochemical Journal,2008,413(2):217~226.
- [19] Xiong L M, Schumaker K S, Zhu J K. Cell signaling during cold, drought, and salt stress[J]. Plant Cell,2001,14 Suppl:S165.
- [20] Zhu J K. Salt and drought stress signal transduction in plants[J]. Annual Review of Plant Biology,2003,53(53):247.
- [21] 陈涛. 盐胁迫红麻叶片差异蛋白质组学及其抗氧化酶活性的分析[D]. 福建农林大学,2011.
- [22] 广东银叶树种源幼苗生长差异及耐盐机理研究,湛江市:广东海洋大学,2014.
- [23] Zhu J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress[J]. Current Opinion in Plant Biology,2003,6(5):441.
- [24] 丁鹏. 不同盐度胁迫下绿竹差异蛋白质组学研究[D]. 福建农林大学,2015.
- [25] Bednarek P, Osbourn A, Hines P J, et al. Plant-microbe interactions; chemical diversity in plant defense[J]. Science, 2009, 324(5928):746~748.
- [26] Mayer M, Oberhuber C, Loncaric I, et al. Fireblight affects Mal d 1-related allergenicity in apple[J]. European Journal of Plant Pathology, 2011, 131(1):1~7.
- [27] 方海平,王淑珍,赵芸等. 植物应答生物逆境的蛋白质组学研究进展[J]. 分子植物育种,2014,12(3):584~602.
- [28] Li Z Y, Long R C, Zhang T J, et al. Research Progress on Plant Heat Shock Protein[J]. Biotechnology Bulletin, 2016, 32(2):7~13.
- [29] Oh C S, Beer S V. Molecular genetics of *Erwinia amylovora* involved in the development of fire blight[J]. Fems Microbiology Letters, 2005, 253(2):185.
- [30] 张海霞,张利义,田义等. 苹果叶片应答斑点落叶病菌胁迫的蛋白质组学分析[J]. 植物病理学报,2014,44(4):438~442.
- [31] Maserti B E, Carratore R D, Croce C M, et al. Comparative analysis of proteome changes induced by the two spotted spider mite *Tetranychus urticae* and methyl jasmonate in citrus leaves[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(4):392~402.
- [32] 陈全助. 福建桉树焦枯病菌鉴定及其诱导下桉树转录组蛋白组学研究[D]. 福建农林大学,2013.

(上接第7页)

度之内,促进红豆杉增量高产,从而减轻保护压力,实现资源合理开发利用。

参考文献:

- [1] 环境保护部和中国科学院. 中国生物多样性红色名录高等植物卷[M]. 内部资料,2013.
- [2] 李丽琴,付春华,赵春芳,等. 红豆杉脱分化过程中的遗传和表观遗传变异[J]. 植物生理学通讯,2009,(6):544~548.
- [3] 郑超,别庆铃,夏冰,等. 4种红豆杉属植物遗传多样性和遗传关系的 RAPD 分析[J]. 植物资源与环境学报,2013,(3):58~62.
- [4] 王俊丽,刘海英,王林,等. 红豆杉组织培养及其产物紫杉醇研究进展[J]. 生物技术,2007,17(3):89~92.
- [5] 李丽,张滢帆,何康,等. 两种红豆杉植物的愈伤组织培养及褐化抑制[J]. 复旦学报(自然科学版),2006,(06):702~707.
- [6] 方应权,谢仲德,陈鸿源. 川东地区南方红豆杉药用部位紫杉醇含量变化研究[J]. 时珍国医国药,2012,(09):2237~2238.
- [7] 张静. 植物红豆杉的抗癌药用价值研究[J]. 中国药业,2014,(01):1~3.
- [8] 蔡小虎,孙启武,罗建勋,等. 四川省红豆杉种群结构和动态的初步研究[J]. 四川林业科技,2004,25(2):21~24.
- [9] 恭维,夏青,陈红峰,等. 珍稀濒危植物伯乐树的潜在适生区预测[J]. 华南农业大学学报,2015,36(4):98~104.
- [10] 徐军,曹博,白成科,等. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3354~3359.
- [11] 万基中,王春晶,韩士杰,等. 应用 GIS 和 Maxent 预测南方红豆杉潜在地理分布及其保护建议[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):349~352.
- [12] ROBERTO M, ZAMORA R, RAMON J, et al. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using maximum entropy (Maxent) [J]. Ecological Informatics, 2011, 6:364~370.
- [13] HANLEY JA, MCNEIL BJ. The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve [J]. Radiology, 1982, 143:29~36.
- [14] 郭杰,刘小平,张琴,等. 基于 Maxent 模型的党参全球潜在分布区预测[J]. 应用生态学报,2017,(03):1~12.
- [15] 于海彬,张懿铨,高俊刚,等. 基于 GIS 和生态位模型的西藏红豆杉遗传景观和物种分布格局[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, (03):193~202.