

山桐子的地理分布及其潜在适宜栽培区区划

刘芙蓉^{1,2}, 罗建勋^{1*}, 杨马进¹

(1. 四川省林业科学研究院林业研究所, 四川 成都 610081; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 为探明山桐子的地理分布范围和潜在适宜栽培区划, [方法] 本文基于气候、海拔和土壤因子数据集, 结合野生山桐子地理分布数据, 利用最大熵模型 (Maxent) 进行山桐子潜在适宜栽培区预测和区划。 [结果] 表明: 山桐子的水平分布范围为 23°10'~35°30'N, 102°45'~121°40'E, 垂直分布点位于海拔 14~2 500 m。温度和降雨对山桐子分布的影响较大, 而土壤条件次之, 这与山桐子耐贫瘠的特性相一致。山桐子分布区的适宜年均气温为 13~21℃, 适宜年降水量为 800~1 800 mm, 适宜越冬的极端最低气温为 -3~8℃, 适宜越夏的极端最高气温为 34℃。山桐子的潜在最适宜和较高适宜栽培区主要分布在四川盆周山区、大巴山、武陵山、苗岭、雪峰山、武功山、武夷山、九连山、戴云山、大别山、伏牛山、云贵高原以东、大瑶山和云开大山以北地区; 四川盆中丘陵区、两湖平原和鄱阳湖平原地区为一般适宜区。 [结论] 本文阐明了山桐子在我国地理分布范围和主要气候特征, 并采用 Maxent 进行了山桐子潜在分布区预测和适宜栽培区区划, 为我国山桐子的推广栽培提供指导依据。

关键词: 山桐子; Maxent; 地理分布区; 适宜栽培区

中图分类号: S794

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)06-1028-06

Geographic Distribution and Regionalization of Potential Suitable Cultivated Area for *Idesia polycarpa*

LIU Fu-rong^{1,2}, LUO Jian-xun¹, YANG Ma-jin¹

(1. Research Institute of Forestry, Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] To explore the Geographic distribution and regionalization of potential suitable cultivated area for *Idesia polycarpa*. [Method] Based on the data of climate, altitude and soil, as well as the natural distribution of *I. polycarpa*, Maxent model was applied to predict the suitable cultivated area for *I. polycarpa*. [Result] The horizontal distribution of *I. polycarpa*, naturally ranges from 23°10'N to 35°30'N, 102°45'E to 121°40'E, and the elevation of distribution area ranges from 14 m to 2 500 m. Temperature and precipitation are the dominant factors affecting the distribution of *I. polycarpa*, followed by soil. This result is in accordance with the leanness-resistant characteristic. The suitable annual mean temperature and annual precipitation for the growth of *I. polycarpa* are 13~21℃ and 800~1 800 mm, respectively. The suitable mean temperature of the coldest month and the max temperature of the warmest month are -3~8℃ and 34℃, respectively. The potential cultivated regions of *I. polycarpa* with high suitability are Daba, Wuling, Miaoling, Xuefeng, Wugong, Wuyi, Jiulian, Daiyun, Dabie, Funiu mountains, the eastern Yunnan-Guizhou plateau, the northern Dayao and Yunkai mountains, as well as the margin of Sichuan Basin. The cultivated regions with ordinary suitability are the upland areas of Sichuan Basin, the plain of

收稿日期: 2017-05-05

基金项目: 山桐子高产、高含油良种选育与栽培示范(2015BAD15B02); 四川省科技计划项目“木本油料突破性新品种选育、育种材料与方法创新”(2016NYZ0035-06); 四川省植物资源共享平台建设项目(TJPT20160021)

作者简介: 刘芙蓉(1987—), 女, 四川成都人, 在读博士. 主要研究方向: 林业资源遥感. E-mail: liu729103540@163.com

* 通讯作者: 罗建勋(1964—), 男, 四川成都人, 博士, 研究员. 主要研究方向: 林木种质资源和林木遗传育种. E-mail: jianxunl@163.com

two lakes, Poyang-lake plain. [**Conclusion**] In this paper, the geographic distribution and the dominant bioclimatic factors are clarified. This paper predicts the regionalization of potential suitable cultivated area and provided references for cultivating *I. polycarpa*.

Keywords: *Idesia polycarpa*; Maxent; geographic distribution; suitable cultivated area

山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim.) 为大风子科 (Flacourtiaceae) 山桐子属 (*Idesia*) 落叶乔木, 树干通直, 枝条轮生, 树形美观^[1]。山桐子为亚热带阳性速生树种, 其果实产量高, 呈串状, 入秋后红艳夺目, 被喻为“美丽的树上油库”, 是我国重要的木本油料树种。果实和种子含油率高达 20% 以上^[2], 油脂中不饱和脂肪酸的含量达 70% 左右^[3], 对高血压、高血脂等心脑血管疾病有很好的预防作用和辅助疗效, 具有很高的价值。作为重要的经济林树种之一, 山桐子具有较大的产业推广前景, 目前相关研究主要集中在良种选育、苗木繁殖、栽培技术和油脂成分等方面^[3-5], 而其地理分布区及气候特征等方面的研究还较少, 对该树种的适宜栽培区进行区划有利于推动山桐子产业化发展。

物种分布模型充分利用物种现有的分布资料和环境数据, 分析环境因素与物种分布区的关系, 并将该关系特性用于预测物种的潜在分布区。目前, 大量基于 GIS 技术和数学算法发展而来的物种分布模型被用于濒危植物保护^[6-7]、外来物种入侵风险评估^[8-10], 预测气候变化对物种分布的影响^[11]、野生植物引种栽培区区划^[12]等多个领域, 如生态位因子模型 (ENFA)、广义线性模型 (GLM)、最大熵值模型 (Maxent)、神经网络各模型 (ANN)、距离模型 (Domain) 和随机森林模型 (MARS) 均是重要的物种分布模型^[13-14], 这些生态学模型为物种资源的科学管理提供了重要依据。许多研究者对不同模型的模拟效果进行了对比分析, 曹向锋等^[15]利用 Maxent、GARP、ENFA、Bioclim 和 Domain 5 种生态位模型预测了黄顶菊在中国范围内的潜在适生分布区, 并利用受试者工作特征曲线 (ROC) 比较不同模型的模拟精度, 认为 Maxent 的预测结果对黄顶菊的拟合度较高, 预测的效果较好。殷晓洁等^[16]利用 Maxent 模拟的蒙古栎潜在分布区域覆盖了蒙古栎实际地理分布点的 98%, 表明模拟的我国蒙古栎地理分布与实际分布非常符合, 并利用我国蒙古栎的地理分布概率与主导气候因子的关系, 得出了主导气候因子的阈值。Maxent 模型是基于最大熵理论发展起来的生态位模型, 在物种潜在分布区的预测中效果较好, 被

广泛用于经济作物的栽培区适宜性评价。采用物种分布模型对其地理分布范围和主要环境因子进行分析, 对于指导山桐子的栽培推广和产业布局具有重要意义。因此, 本研究以山桐子的野生分布数据为基础, 采用 Maxent 模型对其适宜栽培区进行预测, 以期如山桐子推广栽培的生产实践工作提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 山桐子分布数据的收集与整理

查询中国数字植物标本馆 (<http://www.cvh.org.cn/>) 和国家科技部教学标本资源共享平台 (<http://mnh.scu.edu.cn/>) 等数据库, 收集全国范围内山桐子标本信息, 选取野生分布的位置, 并查阅相关文献记录。结合山桐子实地调查, 采用 GPS 对山桐子野生资源分布位置进行定位, 整理分布样点, 剔除重复的数据分布点, 共确定了 220 个野生山桐子分布点, 利用 ArcGIS 软件整理成 shp 格式文件, 用于绘制山桐子地理分布图。

1.2 环境数据集来源

本文选择了影响植物生长和分布的环境因子数据集, 主要包括: 气候、海拔和土壤条件, 共 24 个因子作为环境数据集。气候和海拔数据来源于世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org>), 气候数据是采用各地气象站的气象信息进行插值生成的全球气候数据, 包括与温度和降水量相关的 19 个生物气候变量^[17], 包括: 年平均气温 (bio1)、平均月气温变化范围 (bio2)、等温性 (bio3)、气温季节变化方差 (bio4)、极端最高气温 (bio5)、极端最低气温 (bio6)、年气温幅度 (bio7)、雨季平均气温 (bio8)、干季平均气温 (bio9)、最暖季平均气温 (bio10)、最冷季平均气温 (bio11)、年降水量 (bio12)、最湿月降水量 (bio13)、最干月降水量 (bio14)、季降水量变异系数 (bio15)、最湿季降水量 (bio16)、最干季降水量 (bio17)、最暖季降水量 (bio18)、最冷季降水量 (bio19), 数据空间分辨率为 30”。

中国省级行政区划图来自国家基础地理信息系统数据库 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)。土壤数据

采用“基于世界土壤数据库的中国土壤数据集”数据产品,空间分辨率为1 km。选择0~30 cm表层土壤的4个因子,包括:土壤类型、土壤有机质含量、土壤pH值和土壤密度,利用ArcGIS软件对土壤数据进行投影转换、裁剪,以获得空间分辨率为30"的数据。

1.3 潜在分布区模拟及检验

采用基于最大熵原理开发的Maxent模型软件,进行物种潜在分布区预测。将野生山桐子的220个有效分布点导入Maxent模型进行模拟,并生成分布图。Maxent模型的预测结果为山桐子在待预测地区的存在概率P,取值范围0~1,值越接近于1则栽培区的适宜性越高,值为0则表明该区域不适宜栽培山桐子。采用受试者工作特征曲线(ROC曲线)下的面积(AUC)对模型的模拟效果进行评估。ROC曲线以假阳性率为横坐标,以真阳性率为纵坐标绘制曲线,ROC曲线分析法是目前最佳的评价指标之一,在物种潜在分布区预测模型评价中应用广泛^[18]。AUC值越大,则表示预测效果越好。通常AUC值的评估标准为:0.90~1.0(非常好)、0.80~0.90(好)、0.70~0.80(一般)、0.60~0.70(较差)、0.50~0.60(失败, fail)^[19]。根据文献及实地栽培区验证,可将预测的区域划分为5个等级:最适宜区($0.5 \leq P \leq 1$)、较高适宜区($0.3 \leq P < 0.5$)、一般适宜区($0.1 \leq P < 0.3$)、低适宜区($0.05 \leq P < 0.1$)和不适宜区($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 地理分布

植物的地理分布范围主要受到海拔、气温、降水量和土壤条件等因素的影响,各环境因子随不同海拔梯度的变化而变化,调控着植物的生理生态特性和地理分布范围。野生山桐子的水平分布范围为 $23^{\circ}10' \sim 35^{\circ}30'N$, $102^{\circ}45' \sim 121^{\circ}40'E$,主要在四川盆周山地、重庆、云南、贵州、陕西南部、甘肃南部、湖北、湖南、江西、浙江、福建和台湾等地区。山桐子的垂直分布点位于海拔14~2 500 m,最低处位于江苏、浙江、广东等地区,最高处位于云南地区。我国山桐子的分布北缘为陇南山地-秦巴山区-伏牛山-大别山,南缘为南岭-赣闽南部山丘,西缘为四川盆周山地-云贵高原以东山区,东缘为台湾岛。根据山脉走势和地形特征来看,山桐子主要分布于四川盆周山区、大巴山、方斗山、武陵山、大娄山、苗岭、雪峰

山、九连山、武功山、武夷山、伏牛山、武当山和大别山等山系及一些中低山丘陵区。

2.2 气候特征

利用最大熵模型评价25个环境因子对野生山桐子的贡献率,以筛选并确定影响山桐子分布的主导因子。本文选择累积贡献率达85%的因子作为影响山桐子分布的主要因子,其贡献率见表1,按顺序大小依次为:最冷季平均气温(bio11) > 极端最低气温(bio6) > 平均月气温变化范围(bio2) > 气温季节变化方差(bio4) > 雨季平均气温(bio8) > 年降水量(bio12) > 海拔 > 极端最高气温(bio5) > 年均气温(bio1)。贡献率的排序表明:低温对山桐子分布区的影响极其重要,限制着植物是否能安全越冬;月平均气温变化范围和气温季节变化方差则反映了物种对温差变化的需求是否得到满足,影响植物的正常花芽分化及开花结实等;雨季平均气温反映了山桐子在生长季对水热同步的需求;年降水量反映了植物对水分条件的需求和耐受能力;海拔反映了山桐子在垂直方向上的分布范围;极端最高气温反映了山桐子对高温的耐受范围;年均气温反映了植物对全年总热量的需求范围。前9个累积贡献率达86.6%,这表明山桐子对温度的要求很高,而土壤因子的贡献率相对较小,这可能是由于山桐子根系发达,耐贫瘠,对土壤养分条件的要求不太严格,因此,山桐子在重庆等地区的石漠化治理造林中应用较广泛^[20]。

表1 影响山桐子分布的环境因子的贡献率

Table 1 Contribution rate of environmental factors affecting the distribution of *Idesia polycarpa*

因子 Factors	贡献率/% Percent contribution	累积贡献率/% Accumulated percent contribution
bio11	25.1	25.1
bio6	23.9	49.0
bio2	9.7	58.7
bio4	5.4	64.1
bio8	5.1	69.2
bio12	5.0	74.2
altitude	4.9	79.1
bio5	4.1	83.1
bio1	3.4	86.6

温度和降雨是影响植物分布范围的重要气候因素,其中,年平均气温、年降水量、极端最高气温和极端最低气温是影响山桐子分布的主要因素。野生山桐子分布区气候因子的频率分布见图1,将累积频率大于90%的高频率区间作为最适宜生存的气候

条件^[21],则山桐子分布区的年平均气温为9~23℃,以13~21℃为适宜的年平均气温;年降水量为600~2 000 mm,以800~1 800 mm为适宜的年降水

量;可越冬的极端最低气温为-8~10℃,适宜越冬的极端最低气温为-3~8℃;适宜越夏的极端最高气温为34℃。

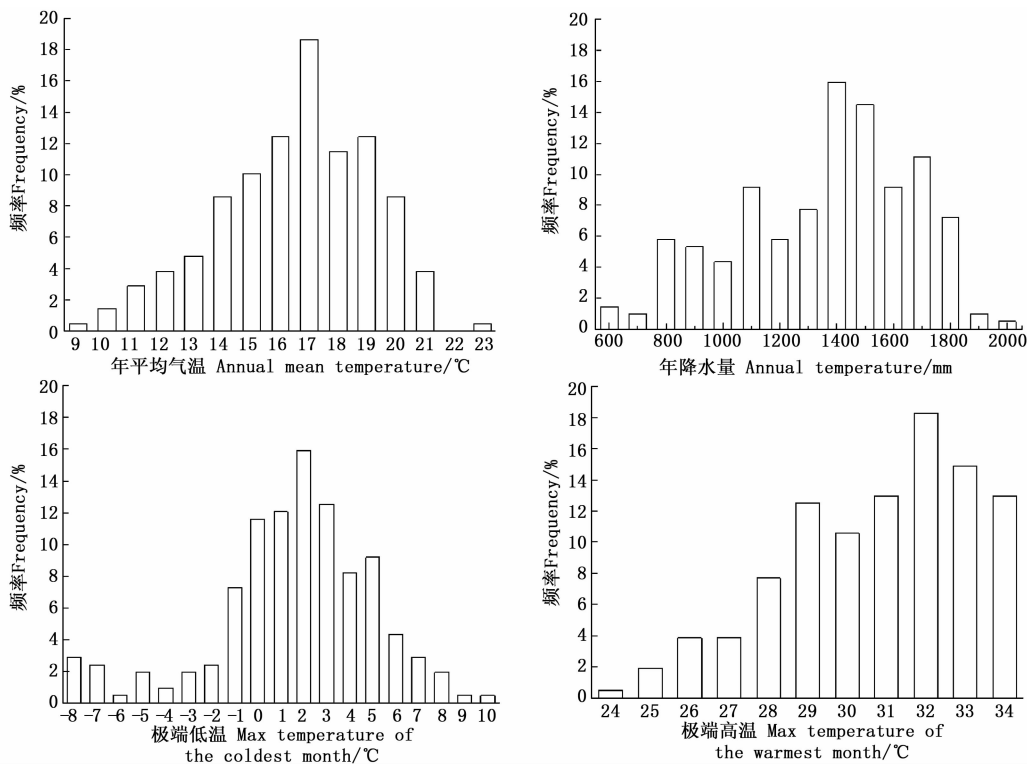


图1 山桐子分布区气候变量的频率直方图

Fig. 1 Frequency distribution histograms of different climate variables for geographical region of *Idesia polycarpa*.

2.3 潜在适宜栽培区

Maxent 模型预测结果的 AUC 值为 0.956,表明所构建的模型预测精度达到了非常好的水平。山桐子潜在适宜栽培区的预测结果与实际分布区有很好的-一致性,其潜在适宜栽植区主要集中在我国南方地区。山桐子的潜在最适宜和较高适宜栽培区主要分布在四川盆周山区、大巴山、武陵山、苗岭、雪峰山、武功山、武夷山、九连山、戴云山、大别山、伏牛山、云贵高原以东、大瑶山和云开大山以北地区;而四川盆中丘陵地区、两湖平原和鄱阳湖平原地区为一般适宜区,经人工栽培试点的验证,山桐子在该区域可进行正常的生长和结实;在一般适宜区与不适宜区的过渡地带,为较低适宜区;而当适宜性 $P < 0.05$ 的地区,不宜栽植山桐子。

由表2可知:山桐子在我国的最适宜区面积为431 717 km²,较适宜生长区面积为725 871 km²,一般适宜区为677 229 km²,较低适宜区为337 631 km²。适宜栽培区总面积较大的主要包括:四川、重庆、贵州、陕西、湖北、湖南、江西、安徽、浙江、河南、广东、广西、福建和台湾地区;而云南、甘肃、江苏、山

东等省的适宜栽培区面积相对较小,统一归并在其它地区。

表2 山桐子主要分布行政区内不同等级的适宜栽培区面积
Table 2 Different grades of suitable distribution area in China

地区 provinces	面积/km ²			
	最适宜栽培区 High potential	较高适宜栽培区 Good potential	一般适宜栽培区 Moderate potential	较低适宜栽培区 High potential
四川	41 692	57 085	70 884	17 769
重庆	19 070	35 775	20 408	2 485
陕西	27 846	12 499	20 516	16 432
贵州	44 057	90 369	22 521	11 246
湖南	56 856	113 756	35 225	5 738
湖北	45 981	52 809	64 808	13 613
江西	65 744	81 945	17 003	2 101
河南	6 687	15 644	68 424	34 439
安徽	11 751	23 616	28 450	16 632
浙江	14 647	42 381	31 063	7 520
福建	25 627	65 340	20 245	4 941
广东	32 057	41 842	31 588	22 990
广西	30 131	63 780	98 603	33 678
台湾	1 605	4 715	11 734	6 486
其它地区	7 966	24 315	135 757	141 561
合计	431 717	725 871	677 229	337 631

从最适宜栽培区来看,江西的面积最大,为 65 744 km²,其次为湖南、湖北、贵州、四川、广东、广西、陕西和福建,而重庆、浙江、安徽、河南和台湾的最适宜栽培区面积相对较小。从较高适宜栽培区来看,湖南的面积最大,为 113 756 km²,其次为贵州、江西、福建、广西、四川、湖北、浙江、广东和重庆,而河南、陕西、台湾的较高适宜栽培区面积相对较小。从一般适宜栽培区来看,广西的面积最大,为 98 603 km²,其次为四川、河南、湖北、湖南、广东、浙江、安徽、贵州、陕西、重庆和福建,而江西、台湾的一般适宜栽培区面积相对较小。从较低适宜栽培区来看,河南的面积最大,为 34 439 km²,其次为广西、广东、四川、安徽、陕西、湖北、贵州地区,而浙江、台湾、湖南、福建、重庆、江西的较低适宜栽培区面积相对较小。

3 讨 论

本文收集野生山桐子分布点 220 个,利用 Maxent 生态学模型预测了山桐子在中国的适生范围,为山桐子适宜栽培区区划提供了依据。Maxent 模型在物种的潜在分布区研究中具有很高的价值^[22],本文预测的适宜栽培区与野生山桐子的实际分布区具有较高的一致性,精确度高,这与大多数研究结论一致^[23],可为该经济林树种的产业化栽培范围提供指导依据,有效避免盲目推广发展。

物种的地理分布区受到气候、环境因子和物种的生理生态特性等因素的综合影响^[24]。本文环境因子贡献率排序表明:低温对山桐子分布区的影响极其重要,关系着植物是否能够安全越冬,而降水量次之,这与山桐子喜光和耐干旱贫瘠的特征相关。不同植物对环境因子的敏感性具有差异,如双季稻种植区降水量为主导因子,温度次之,其最适宜的年降水量为 1 629 ~ 1 988 mm,最暖月平均气温为 28.4 ~ 29.1℃,稳定通过 18℃ 的持续日数达 158 ~ 266 d 才能满足水稻抽穗扬花期对高温持续时间的需求,主要受到植物的生理生态学特性影响。通过对影响山桐子分布的主要生物气候因子进行分析,山桐子越冬的极端最低气温为 -8 ~ 10℃,最适宜越冬的极端最低气温为 -3 ~ 8℃,这与王东洪^[25]对不同种源山桐子冬芽休眠温度特征的研究结论基本一致,河南、四川和贵州种源的山桐子顶芽在冬季经历 5℃ 低温效果最好。在将来的研究中,需要开展更多的低温、高温胁迫研究来进一步探索山桐子

对气候条件的适应范围和策略。

本文利用野生山桐子分布信息,并结合各地区进行的山桐子栽培试验点研究,在适宜栽培区区划过程中将其分为最适宜栽培区、较高适宜区、一般适宜区和低适宜栽培区。近年来,人工栽培试验为山桐子的栽培区区划提供了验证依据,在四川成都的大邑县境内山桐子人工栽培基地内,山桐子能正常发芽、开花和结实,而且达到了高产稳产的标准。在四川盆地的资阳市城区,山桐子树被用于城市园林树种,亦能正常生长和结实,展现出较好的景观和经济价值。本文将区划标准 $P < 0.05$ 定为非适宜区,这与大多研究结果相一致。段居琦等^[26]在进行中国双季稻种植区及其气候适宜性区划中,结合双季稻实际情况制定划分标准如下: $P < 0.05$ 为气候不适宜区; $0.05 \leq P < 0.33$ 划为可种植区; $0.33 \leq P < 0.66$ 划为中等气候适宜区; $P \geq 0.66$ 为气候高适宜区。胡秀等^[27]在利用 Maxent 生态学模型进行毛姜花潜在园林引种区预测时,将其适生性区间(0 ~ 1)划分为 13 个等级,大于 0.08 的区域内可成功引种,值越大则适生程度越高。本文利用 maxent 模型进行栽培区适宜程度预测,可为山桐子的推广栽培提供参考,并结合实际栽培点进行验证,可提高栽培区预测的效果,以保证经济植物适宜栽培区区划的准确性。

4 结 论

本文分析了 220 个野生山桐子分布点的地理数据,表明该树种在我国水平分布范围为 23°10' ~ 35°30'N, 102°45' ~ 121°40'E,垂直分布点位于海拔 14 ~ 2 500 m。山桐子的天然分布北缘为陇南山地 - 秦巴山区 - 伏牛山 - 大别山,南缘为南岭 - 赣闽南部山丘,西缘为盆周山地 - 云贵高原以东山区,东缘为台湾岛。

对野生山桐子分布区的气候和环境因子进行主成分分析发现:温度和降雨对山桐子分布的影响较大,山桐子分布区的年均气温为 9 ~ 23℃,以 13 ~ 21℃ 为适宜的年平均气温;年降水量为 600 ~ 2 000 mm,以 800 ~ 1 800 mm 为适宜的年降水量;可越冬的极端最低气温为 -8 ~ 10℃,适宜越冬的极端最低气温为 -3 ~ 8℃;适宜越夏的极端最高气温为 34℃。低温对山桐子分布区的影响极其重要,限制着是否能安全越冬。

通过 Maxent 最大熵值模型对我国范围内的山

桐子适宜栽培区进行预测和区划,结果表明:该树种的栽培区与野生山桐子分布区范围基本一致,主要集中在我国南方地区。潜在最适宜栽培区面积为431 717 km²,较适宜区面积为725 871 km²,一般适宜区为677 229 km²,较低适宜区为337 631 km²。山桐子的潜在最适宜和较高适宜栽培区主要分布在四川盆周、大巴山、武陵山、苗岭、雪峰山、武功山、武夷山、九连山、戴云山、大别山、伏牛山、云贵高原以东、大瑶山和云开大山以北地区;而四川盆中丘陵地区、两湖平原和鄱阳湖平原地区为一般适宜区。

综上所述,本文对我国范围内野生山桐子的分布点、气候和土壤因子进行了分析,基本考虑到了山桐子分布的实际生态位,给出了山桐子的天然分布范围,以及适生区的年均气温、降水量等气候因子,区划了山桐子的栽培适宜区,包括山桐子的潜在最适宜栽培区、较高适宜栽培区、一般适宜栽培区和较低适宜栽培区。本文在生物气候因子的基础上,加入了土壤因子,优化分析了山桐子栽培区范围和适宜性等级,为我国山桐子产业的推广栽培提供参考。在今后的研究中,应加强区域栽培试验工作,更好地对适宜栽培区预测工作进行验证,以提高经济林树种在产业化发展进程中的推广栽培效果。

参考文献:

- [1] 江锡兵,龚榜初,李大伟,等. 山桐子自然群体表型性状变异分析[J]. 林业科学研究,2013,26(1):113-117.
- [2] 龚榜初,李大伟,江锡兵,等. 不同产地山桐子果实含油率及其理化指标变异分析[J]. 西北植物学报,2012a,32(8):1680-1685.
- [3] 王艳梅,王东洪,刘震,等. 不同种源山桐子种子含油率和脂肪酸GC/MS分析[J]. 经济林研究,2011,29(2):14-21.
- [4] 岁立云,刘晓敏,李周岐,等. 山桐子果实性状的变异及类型划分[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(8):115-120.
- [5] 龚榜初,李大伟,江锡兵,等. 不同种源山桐子果实脂肪酸组成变异分析[J]. 植物生理学报,2012b,48(5):505-510.
- [6] Adhikari D, Barik S K, Upadhyaya K. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana* Purk., a critically endangered tree species of northeastern India[J]. Ecological Engineering, 2012, 40(3):37-43.
- [7] 姜建福,樊秀彩,张颖,等. 中国三种濒危葡萄属(*Vitis* L.)植物的地理分布模拟[J]. 生态学杂志,2014,33(6):1615-1622.
- [8] Giljohann K M, Hauser C E, Williams N S G, et al. Optimizing invasive species control across space: willow invasion management in the Australian Alps[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(5):1286-1294.
- [9] Richter R, Dullinger S, Essl F, et al. How to account for habitat

- suitability in weed management programmes [J]. Biological Invasions, 2013, 15(3):657-669.
- [10] Chapman D S, Makra L, Albertini R, et al. Modelling the introduction and spread of non-native species: international trade and climate change drive ragweed invasion[J]. Global Change Biology, 2016, 22(9):3067-3079.
- [11] Remya K, Ramachandran A, Jayakumar S. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India[J]. Ecological Engineering, 2015, 82(9):184-188.
- [12] 胡秀,郭微,吴福川,等. MaxEnt生态学模型在野生植物近自然林引种区划中的应用—以红姜花为例[J]. 广西植物, 2015, 35(3):325-330.
- [13] 李国庆,刘长成,刘玉国,等. 物种分布模型理论研究进展[J]. 生态学报,2013,33(16):4827-4835.
- [14] Yuan H S, Wei Y L, Wang X G. Maxent modeling for predicting the potential distribution of *Sanguang*, an important group of medicinal fungi in China[J]. Fungal Ecology, 2015, 17:140-145.
- [15] 曹向锋,钱国良,胡白石,等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3063-3069.
- [16] 殷晓洁,周广胜,隋兴华,等. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值[J]. 生态学报,2013,33(1):103-109.
- [17] 张兴旺,李垚,方炎明. 麻栎在中国的地理分布及潜在分布区预测[J]. 西北植物学报,2014,34(8):1685-1692.
- [18] 王运生,谢丙炎,万方浩,等. ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性,2007,15(4):365-372.
- [19] 刘少军,周广胜,房世波. 中国橡胶种植北界[J]. 生态学报, 2016,36(5):1272-1280.
- [20] 冯大兰,黄小辉,刘芸,等. 4种木本植物在石漠化地区的生长状况及光合特性[J]. 北京林业大学学报,2015,37(5):62-69.
- [21] 李垚,张兴旺,方炎明. 气候变暖对中国栓皮栎地理分布格局影响的预测[J]. 应用生态学报,2014,25(12):3381-3389.
- [22] Wang Y L. Predicting the potential geographic distribution of crofton weed (*Ageratina adenophora*) around the world using Max-ent modeling [J]. International Journal of Plant Research, 2012, 25(2):324-335.
- [23] 王伟,田荣荣,那立妍,等. 基于MaxEnt生态软件划分澳洲坚果的潜在地理适生区[J]. 林业科学研究,2017,30(3):444-449.
- [24] Wong M H G, Li R, Xu M, et al. An integrative approach to assessing the potential impacts of climate change on the Yunnan snub-nosed monkey[J]. Biological Conservation, 2013, 158(2):401-409.
- [25] 王东洪. 不同种源山桐子冬芽休眠的温度特性研究[D]. 郑州河南农业大学, 2012.
- [26] 段居琦,周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究[J]. 中国农业科学,2012,45(2):218-227.
- [27] 胡秀,吴福川,郭微. 基于MaxEnt生态学模型的毛姜花潜在园林引种区预测[J]. 中国城市林业,2013,11(4):28-31.

(责任编辑:詹春梅)