

基于 MaxEnt 模型的小黄花茶在中国的适生区域研究

代玉烜, 金 塘, 徐海霞, 王 东, 王 丽
(四川大学生命科学学院, 成都 610065)

摘 要: 珍稀植物小黄花茶(*Camellia luteoflora* Y. K. Li)在自然分布区内数量缩减, 存在濒临灭绝的风险. 为分析当前气候环境条件下小黄花茶的潜在适宜分布区, 本研究运用最大熵(MaxEnt)生态位模型和地理信息系统(ArcGIS)软件对小黄花茶在我国的适生区进行预测, 探讨影响其分布的主要环境因子. 结果显示, 四川泸州、宜宾, 贵州遵义, 云南昭通、昆明以及重庆江津、綦江是小黄花茶的高度适生区(适生指数>0.54), 黔、川、渝交界处是其核心分布地. 刀切法(Jackknife)检测结果表明, 影响小黄花茶分布区的主要环境因子包括最热季平均气温(Bio10)、最热季降水量(Bio18)以及最冷季降水量(Bio19), 累计贡献率高达 90.8%. 适生区环境因子的统计分析结果显示, 最热月最高气温为 22.5~27.5℃, 最热季平均气温为 11.1~18.0℃, 最湿月降水量为 290~500 mm, 最热季降水量为 4.4~6.6 mm, 最冷季降水量为 16.7~24.8 mm, 海拔为 450~1 000 m, 坡向在-40°~190°范围内, 而坡度在 20°~64°之间是小黄花茶最适宜生长的生态位参数. 本次研究预测了小黄花茶适生区, 除已知报道的三处自然分布区外, 预测结果显示可能还存在尚未发现的小黄花茶生长地, 有待进行实地勘测.

关键词: 小黄花茶; 濒危植物; 适生区; MaxEnt 模型; 物种分布

中图分类号: Q948.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.026002

Study on the suitable area of *Camellia luteoflora* Y. K. Li in China based on MaxEnt model

DAI Yu-Xuan, JIN Tang, XU Hai-Xia, WANG Dong, WANG Li
(College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The rare plant *Camellia luteoflora* Y. K. Li has shrunk in the natural distribution area and is at risk of extinction. In order to analyze the potentially suitable distribution area of *C. luteoflora* under the current climate and environmental conditions, Maximum Entropy Model (MaxEnt) and Geographic Information System (ArcGIS) were used to predict the suitable distribution areas of *C. luteoflora* and to explore the dominant environmental factors. The results show that Luzhou, Yibin, Zunyi, Zhaotong, Kunming, Jiangjin and Qijiang of Chongqing are the highly suitable areas for *C. luteoflora* (fitness index>0.54), and the junction of Guizhou, Sichuan and Chongqing is its core distribution area. The results of the jackknife test showed that the main environmental factors affecting the distribution area of *C. luteoflora* included the average temperature of the hottest quarter (bio 10), the precipitation of the hottest quarter (bio 18) and the precipitation of the coldest quarter (bio 19), with a cumulative contribution rate of 90.8%. The results of statistical analysis of environmental factors in the suitable area

收稿日期: 2020-07-18
基金项目: 四川省科技厅项目(2017SZ0186)
作者简介: 代玉烜(1995-), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向为植物资源与天然产物. E-mail: 1024034515@qq.com
通信作者: 王丽. E-mail: yzxi@vip.163.com.

show that the highest temperature in the hottest month is 22.5~27.5 °C, the average temperature in the hottest season is 11.1~18 °C, the precipitation in the wettest month is 290~500 mm, the precipitation in the hottest season is 4.4~6.6 mm, the precipitation in the coldest season is 16.7~24.8 mm, the altitude is 450~1 000 m, the slope direction is in the range of -40°~190°, and the slope is between 20°~64°, which is the most suitable niche parameter for *C. luteoflora*. In addition to the three reported natural distribution areas, the prediction results show that there may still be undiscovered growth areas of *C. luteoflora*, and field surveys are needed.

Keywords: *Camellia luteoflora* Y. K. Li; Endangered plants; Suitable area; MaxEnt model; Species distribution

1 引言

小黄花茶(*Camellia luteoflora* Y. K. Li), 山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)灌木或小乔木,是山茶属小黄花茶组的唯一种. 1981 年首次在贵州赤水发现小黄花茶^[1],据统计,当地仅有 1 700 余株^[2-3]. 2013 年长宁环保局科考人员在四川长宁自然保护区发现了至少几十株小黄花茶和至少两处小黄花茶的生长地^[4]. 2015 年陈锋课题组在四川古蔺县桂花乡发现了小黄花茶的存在,该物种在四川的新发现为进一步的研究提供了基础资料^[5]. 经过研究者野外踏查及长宁林竹局涂为熙等科考人员统计,目前发现小黄花茶数量约为泸州古蔺 1 200 株、宜宾长宁 800 株.

1983 年国家科委明令将小黄花茶作为我国禁止外流的特殊保护物种^[2];1988 年小黄花茶被列为贵州省一级珍稀濒危保护植物^[3];2013 年在《中国生物多样性红色名录一高等植物卷》中,其濒危等级评定为易危;IUCN(名)收录时,濒危等级为 VU,为我国特有种(环境保护部和中国科学院,2013)^[6]. 小黄花茶在形态、结构上的特殊性决定了其在遗传育种、系统发育、种质资源等方向的科研价值,以及在庭园绿化、园艺观赏、生态建设等方面的经济价值. 但小黄花茶开花不多,结果较少,种子易受虫害鸟食、自然生长较慢、移栽成活率低,加之近年来随着人为砍伐和过度采食加剧了其群落的破碎化等,导致了小黄花茶目前处在濒危之境.

在如今的气候变化背景下,对珍稀濒危植物的生物多样性保护最重要的在于进行就地保护,利用原生生态环境使被保护的生物能够更好地生存,以保证生物遗传繁育的完整性. 近年来物种分布模型在生物多样性保护的多方面得到应用,如物种环境生态位的量化、未来环境气候变化对物种分布的影响、自然保护区的选择、传染病的空间传播、生物

能源开发、入侵物种扩散及其适生区的问题等研究^[7-10]. 其中 MaxEnt 生态位模型只需要基于物种存在数据和整个研究区域的环境信息,则能够分析统计后预测出物种的潜在生境^[11-12],样本量少、精确度高、操作简明是其优势,而 ArcGIS10.2 不仅能简便地进行参数地输入,还能形象化地输出结果,显示规律^[13].

小黄花茶被发现以来,引起了国内外科研人员和国际组织的高度重视. 国内众多学者对其进行了繁殖技术、种群结构、分布格局、生理生化特性等多方面的研究^[14],但对其适生区的预测研究、气候变化的影响研究等尚未有报道. 本文基于贵州省、四川省小黄花茶的野生生境调查研究、标本记录和各环境变量,运用 MaxEnt 生态位模型和 ArcGIS 相结合预测其潜在的适生区,对该树种的繁育保护有实际指导意义.

2 材料与方法

2.1 小黄花茶分布点数据

小黄花茶的分布点数据来源于资料搜集和野外调查. (一)通过查阅国内外公开发表的相关文献、中国植物图像库(PPBC, <http://ppbc.iplant.cn/>)、中国国家标本资源平台(NSII, <http://nsii.org.cn/2017/home.php>)等找出已报道的分布地点;(二)查阅有关报道以及政府网站的新闻消息;(三)同时利用野外调查数据补充分布点. 目前小黄花茶已知分布点共计 20 个,通过 Google Earth 校正,识别并删除重复点,从而保持 1 km×1 km 范围内的一个点,以避免采样偏差^[15]. 将有效点按照 MaxEnt 软件要求的格式录入到 Excel 表中,添加为 XY 数据,保存为 *.csv 格式.

2.2 方法

2.2.1 环境数据来源及预处理 (一)从 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/>)下载 30

s(约 1 km)空间分辨率的生物气候因子 19 个(Bio1~Bio19)。(二)坡度和坡向、海拔数据从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载的数字高程模型(DEM)通过 ArcGIS 软件利用空间分析工具获得。(三)将从国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)中下载的 1:400 万中国矢量地图作为分析底图,并进行相对应的环境图层的剪裁提取^[16]。

考虑到物种分布模型的一个问题是由于变量之间的多重共线性而导致模型过度拟合^[17],会影响对于响应关系、贡献率的评判^[18]。故在 SPSS22.0 软件中先进行标准化处理,然后进行斯皮尔曼相关性分析,比较所使用的 22 种环境因子之间的相关性,选择相关系数 <0.75 的变量。而生态极限往和植物的实际分布相关。小黄花茶贵州分布地属于中亚热带温和湿润气候,海拔在 700~1 060 m 高处,其植株常生在坡度较陡的崖壁上、灌丛中及沟谷两旁的密林内,多分布于杂木林和竹林中,喜温暖潮湿^[5]。结合植物生存环境需求及其生理特性,在相关系数 >0.75 的变量中保留最重要的生态因子^[17]。筛选环境变量后通过 ArcGIS 将获得的气候、地形数据.tif 格式,转换为 MaxEnt 模型运行所需的*.asc 格式^[11],建立面文件对环境数据进行掩膜处理,使模拟结果的实用性更高。

2.2.2 模型预测及数据处理 将小黄花茶的有效分布点数据和主要环境变量数据集同时导入 Max-Ent 模型中,将测试子集设置为分布点数据的 25%,训练子集为数据的 75%。以线性二次抽样、铰链功能的方式进行 10 次重复运算,其余参数设置为默认值,算法在 160 次迭代(1 s)后收敛,运行计算物种的适生区。

采用刀切法(Jackknife)检验环境因子贡献权重,设置受试者特征曲线(ROC, Receiver operating characteristic curve),以假阳性率即 1-特异性为横坐标,代表佣金误差;以真阳性率即灵敏度为纵坐标,表示没有遗漏误差。用筛选的所有主要变量建立模型(红色条带表示);单独用每一个变量建立模型(宝蓝色条带表示);每次排除依次排除一个变量,用剩余的变量建立模型(青蓝色条带表示),观察条带之间的变化。当蓝色条带越长代表增益值越高,说明该变量对物种分布贡献越大;当青蓝色条带降低较多,则代表该变量可能含有较多信息,对物种分布较为重要;红色条带表示所有环境变量对建模的累积贡献率^[19]。ROC 曲线是通过绘制所有可能阈值的 x 轴上的 1-特异性和 y 轴上的灵敏

度而成的^[12]。其曲线下面积(AUC, Area under the ROC curve)的大小作为评价模型运算结果精准确度的指标^[20-21]。AUC 值在 0.5~1,一般来说, $0.5 \leq AUC < 0.6$ 为差, $0.6 \leq AUC < 0.7$ 为较差, $0.7 \leq AUC < 0.8$ 为一般, $0.8 \leq AUC < 0.9$ 为好, $0.9 \leq AUC < 1.0$ 为非常好^[18,22]。

运行 ArcGIS 软件处理预测结果,将适生分布信息按自然简单分级法显示^[23]。将分析结果导入软件中,依据 Maxent 模型最大约登指数及自然间断点对其进行重分类,得到小黄花茶生境适宜性评价图,在布局视图中点击插入对应的比例尺、图例、指北针,完善分布图,最后运用 ArcMap 软件空间分析模块工具提取各潜在适生区的面积^[24]。

3 结果与分析

3.1 MaxEnt 模型精度评估和变量分析

经过校正,本研究最终运用于生态位模型运算的小黄花茶有效分布点共 15 个(图 1),数据导入后形成表 1。图 2 显示了 22 种环境因子之间的相关性,环境数据处理最终结果仅保留了 8 个因子(表 2),其中降水量因子占据 3 个,气温因子占据 2 个,这表明与气候变化相关的气候不稳定性和干旱压力的增加将是当地物种损失的主要决定因素。在模型预测中,使用 14 个分布点记录用于训练,1 个记录用于测试。预测结果如图 3a,显示小黄花茶适生区分布最大熵模型运算的 10 组训练集(cha) AUC 均值为 0.947,测试集的均值为 0.953,表示了实验数据可信度高。图 3b 显示了本研究运算结果中 ROC 预测精度数值最大的 1 组(cha_7),训练子集 AUC、预测子集 AUC 分别为 0.947 和 0.997,非常接近 1,根据 Swets 提出的模型评价标准^[25-26],表明该模型对其适生区的预测精度高,为优级。cha_7 可作为分析对象。

刀切法(Do Jackknife)检验结果估算了环境变量对 MaxEnt 模型的相对贡献(表 2),最热季平均气温(Bio10)贡献率最高(51.1%),其次是最热季降水量(Bio18)(23.6%)、最冷季降水量(Bio19)(16.1%);而坡度、最湿月降水量(Bio13)、坡向、海拔(Dem)、最热月最高气温(Bio5)的贡献率分别为 4.7%、1.9%、1.1%、0.9%、0.3%,累计仅达 8.9%,表明了它们本身对小黄花茶分布没有占据很大的影响。上述环境因子中降水因子占有 3 个,地形因子占 3 个,温度因子占 1 个,这与已知研究的该树种实际分布情况(喜分布于地势较低、地形

闭塞、温湿度较高的特殊生境^[27-29])是一致的. 这 8 个环境因子在模型构建过程中起主要作用,也是影响小黄花茶潜在分布最重要的生态因子.

图 4 是可变重要性的折刀测试的结果,显示了 8 个环境变量对 MaxEnt 模型预测结果的影响. 当单独使用变量时,重要性最大的环境变量为最热季降水量(Bio18),训练增益超过 1. 0;其次是最热季

平均气温(Bio10)、最冷季降水量(Bio19)以及最湿月降水量(Bio13)对模型影响较高,训练增益超过 0. 6. 结果显示,环境温湿度是影响小黄花茶的潜在适生区分布的重要因素,而夏季最高温及坡度是小黄花茶发育发展的主要制约因子. 这与目前所发现的小黄花茶生长环境相符合.

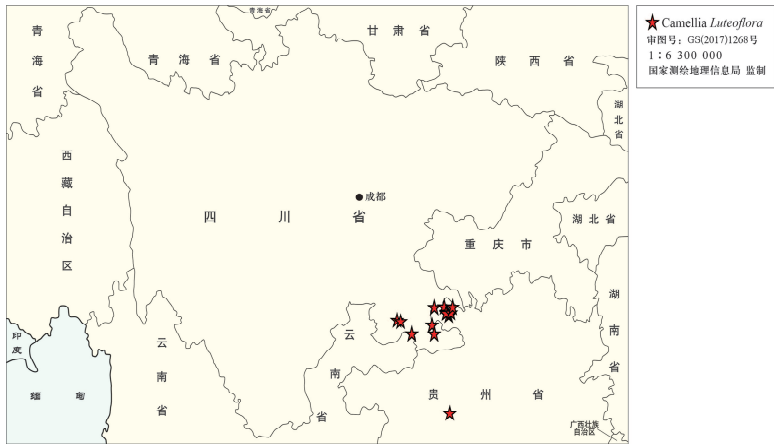


图 1 小黄花茶样点分布图
Fig. 1 Distribution points of *Camellia Luteoflora*

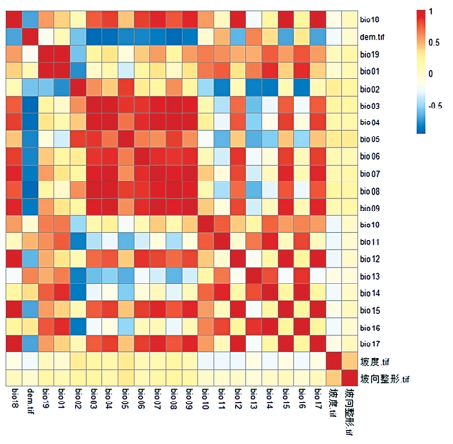


图 2 22 个环境因子间的 Spearman 相关分析
Fig. 2 Spearman Correlation results among 22 environmental factors

表 1 小黄花茶 15 个分布点的地理数据
Tab. 1 Geographical distribution of 15 locations of *Camellia Luteoflora*

地区 Region	编号及地点 Number and location	十进制纬度 Decimal latitude	十进制经度 Decimal longitude	数据来源 Data source
CS	1. 金合村金合大队	28. 583 3	105. 916 7	文献
CS	2. 金沙沟桫欏保护区	28. 416 7	106. 016 7	文献
CS	3. 金沙沟石膏岩	28. 485 5	105. 974 4	文献
CS	4. 金沙沟黄泥沟	28. 475 4	105. 978 8	文献
CS	5. 金沙沟半坡头	28. 477 1	105. 966 5	文献
CS	6. 金沙沟陈田	28. 469 2	105. 960 7	文献
CS	7. 宝源乡联华村	28. 575 0	106. 106 4	PPBC
CS	8. 赤水县大路上	28. 569 0	105. 697 0	NSII
GY	9. 贵阳植物园	26. 566 7	106. 050 0	文献
GL	10. 德跃镇金坪村	28. 069 0	105. 697 0	NSII
GL	11. 汉溪村闷头沟	28. 237 8	105. 650 3	野外
XY	12. 高峰乡文昌沟	28. 069 0	105. 197 0	NSII
XY	13. 官斗村桥沟头	28. 473 1	106. 068 6	野外
CN	14. 双河镇牛角湾	28. 327 2	104. 869 7	野外
CN	15. 梅硐镇高筒村	28. 302 5	104. 948 1	野外

注:CS. 贵州省赤水县 GY. 贵州省贵阳市 GL. 四川省古蔺县 XY. 四川省叙永县 CN. 四川省长宁县
Note: CS. Chishui county, Guizhou province GY. Guiyang county, Guizhou province GL. Gulin county, Sichuan province XY. Xuyong county, Sichuan province CN. Changning county, Sichuan province.

表 2 8 个环境变量对 MaxEnt 模型的贡献率和训练集增益
Tab. 2 Contributions of eight environmental variables to the MaxEnt model and training gain

符号 Symbol	变量名称 Name of variables	单位 Unit	贡献率% Contribution	训练集增益 Training gain	排列重要性 Permutation importance
Bio10	最热季平均气温 Mean temperature of warmest quarter	℃	51.1	0.8	25.6
Bio18	最热季降水量 Precipitation of warmest quarter	mm	23.6	1.0	41
Bio19	最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter	mm	16.1	0.7	0
Podu	坡度 Slope	°	4.7	0.0	1
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	mm	1.9	0.6	25.5
Poxiang	坡向 Aspect	°	1.1	0.0	2.2
DEM	海拔 Altitude	m	0.9	0.1	4.7
Bio05	最热月最高气温 Max temperature of warmest month	℃	0.3	0.0	0.1

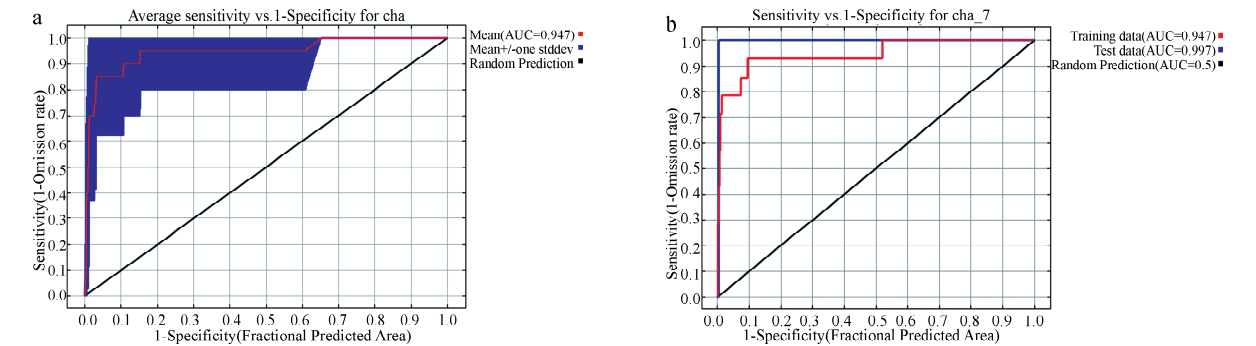


图 3 模型检验 AUC 值
Fig. 3 AUC value of the model test

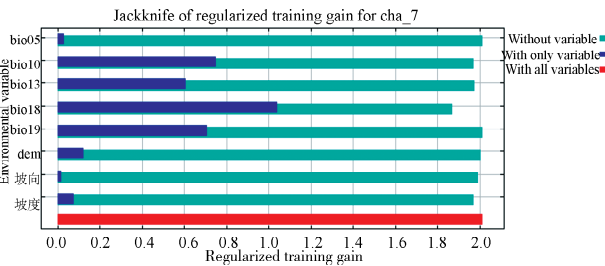


图 4 基于 AUC 的 Jackknife 法环境变量重要性测试图
Fig. 4 Test diagram of AUC based on environmental variables importance by Jackknife method

3.2 小黄花茶潜在适生区分析

借助 ArcGIS 处理,小黄花茶的适生区预测图可按 4 个等级进行划分,分级标准如下:<0.08 为非适生区,0.08~0.27 为低适生区,0.27~0.54 为中适生区,>0.54 为高适生区.从图 5 可知,小黄花茶在当前气候条件下预测的潜在适生区与现已知的实际生长地大致相符,可能存在尚未发现的生长区.图中浅米色区域表示非适生区,绿色区域表示低适生区,黄色区域表示较适生区,红色区域代表高适生区.小黄花茶适生区主要处于中国西南方 103°E~109°E,25°N~30°N 的地区,四川泸州、宜宾,贵州遵义、仁怀、赤水,云南昭通、昆明以及重庆

江津、綦江是其高度适生区,黔、川、渝交界处是小黄花茶的核心分布地.除此之外,预测显示在贵州毕节、铜仁、黔东南苗族侗族自治州,四川自贡、广安,云南曲靖、玉溪,重庆西部及北部有零星低适生区.

提取适生区面积结果显示(表 3),小黄花茶在中国的总适生区面积约为 21 371 km²,占我国陆地总面积的 0.222%.其中高、中、低适生区的面积占比分别为 0.028%、0.068%和 0.126%,而非适生区面积占比高达 99.778%.

表 3 小黄花茶潜在适生区面积统计
Tab. 3 Statistics on the potential suitable area of *Camellia Luteoiflora*

适生区等级 Suitable area grade	国土面积/km ² Area/ km ²	国土面积占比/% Proportion/%	累计占比/% Cumulative proportion/%
高适生区	2 704	0.028	0.028
中适生区	6 565	0.068	0.096
低适生区	12 102	0.126	0.222
非适生区	9 578 629	99.778	100

3.3 适生地理分布与变量的关系

模型用响应曲线图(图 6)展示了每个环境变

量是如何影响 MaxEnt 预测的,该图横坐标为对应环境因子的数值,纵坐标即为分布概率. 曲线反映了预测的分布适宜性对单一变量的依赖性,曲线变化可以为对应物种提供最佳生长所需环境阈值的有用信息^[30-31]. 一般认为,当分布概率>0.50 时,对应的环境因子值适合物种的生长.

当最热月最高气温(Bio5)(图 6a)处于<4.5℃时,小黄花茶分布概率极低;随着最高气温的上升,分布概率逐渐增大;达到27.5℃时,小黄花茶分布概率到达顶峰. 即在最热月时最高气温达到27.5℃时,小黄花茶的最适生长温度到达. 而最热季平均气温(Bio10)(图 6b)的阈值范围为 11.1~18.0℃,最适阈值低于 14.5℃,当气温高于 25℃植物分布概率趋近于 0.

最湿月降水量(Bio13)在 290~360 mm 时,小黄花茶的分布概率到达峰值(图 6c). 以分布概率>0.50 为适宜范围,最湿月降水量为 290~500 mm,此降雨区间小黄花茶生长较好. 当最湿月降水量>700 mm 后,小黄花茶分布概率几乎为零. 湿度过大

可能更容易造成植物病虫害,反而不利于小黄花茶的生长. 最热季降水量(Bio18)(图 6d)的阈值为 4.4~6.6 mm,8.5 mm 以上的最热季降水量将会影响植物的生长. 最冷季降水量(Bio19)(图 6e)适合目标物种生长的阈值为 16.7~24.8 mm.

小黄花茶在海拔 450~1 000 m 的区域中分布概率较高(图 6f),在此区间之后呈现出海拔越高分布概率越低的趋势,且小黄花茶不分布于海拔>4 000 m 的地方. 海拔愈高,温度愈低、湿度增加、光照增强、土壤含量变化,对小黄花茶的生长和分布产生了负影响. 在坡向为-40°~190°范围内小黄花茶的分布概率>0.50,说明小黄花茶喜爱分布于阴坡和半阴坡以及小部分的阳坡(图 6g). 当坡度>20°时,小黄花茶具有较高的分布概率(>0.50),随着坡度的增加其分布概率也在增大,在坡度达到 64°时,小黄花茶的分布概率到其极限值(图 6h),可能是过于陡峭的斜坡土壤含水量流失较快,小黄花茶无法汲取充足水分生长,其选择分布在更适宜生长的生态带.

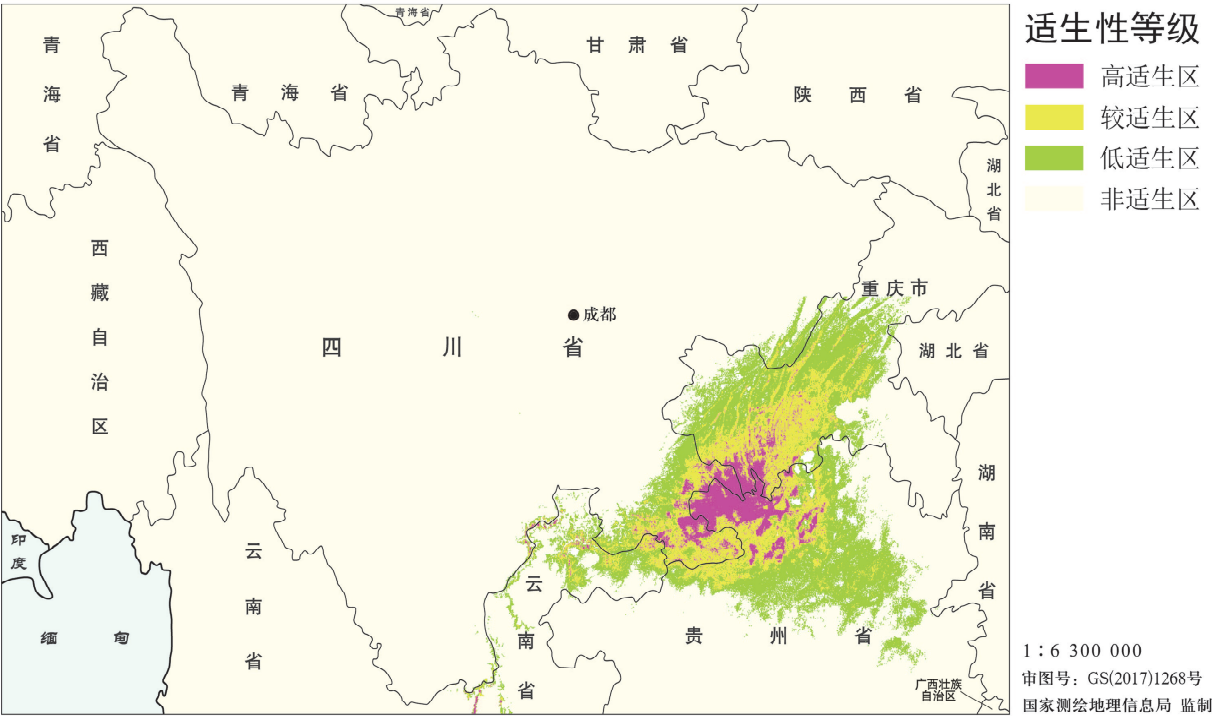


图 5 基于 MaxEnt 模型小黄花茶适生分布预测
Fig. 5 Prediction of potential establishment area of *Camellia luteoflora* based on the MaxEnt model

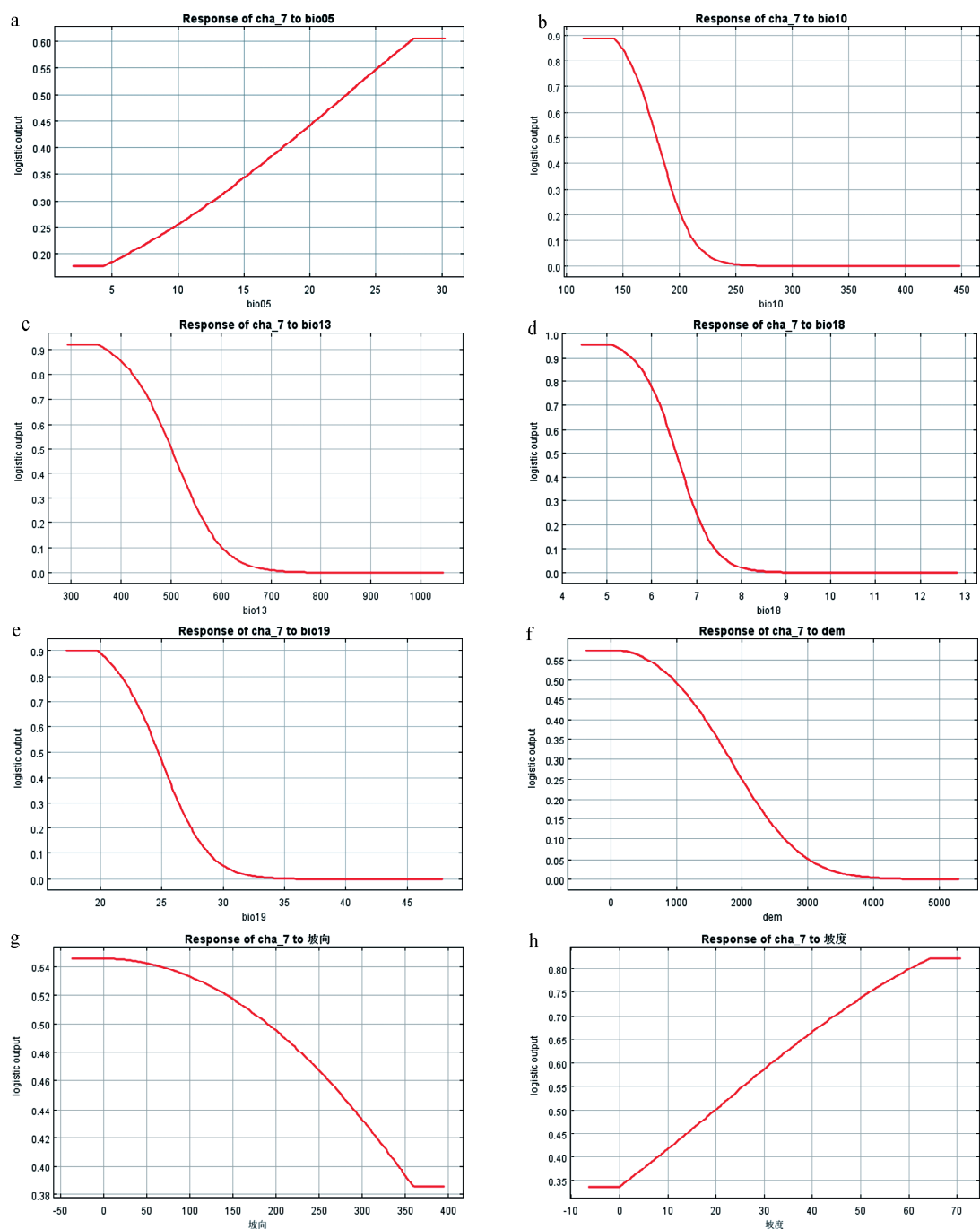


图 6 主要生态因子单一响应曲线
Fig. 6 Single responses curve of ecological factors

4 讨 论

4.1 小黄花茶潜在适生区分布

小黄花茶目前的分布面积较为狭小,其植株生长缓慢、病虫害严重、种子自然萌发率低,加之人为干扰迫害加剧,小黄花茶数量呈现下降趋势.小黄花茶在 1983 年被我国列为珍稀濒危保护物种,世界自然基金会(WWF)在 2003—2004 年将贵州赤水小黄花茶的保护和发展纳入基金会在中国的物

种保护资助项目内,2013 年小黄花茶濒危等级评定为易危,目前国家和国际组织对小黄花茶的保护高度重视^[7,32].物种适生区分布的精准预测对于物种的推广和引种极其重要^[33],在明确其目前已知的野外生存现状下,对其潜在的适生分布区进行预测十分重要.

在本次模拟中,虽然我们能够测试的物种数量分布点少于 20 个,但一些研究同样使用低样本量成功模拟了物种潜在分布,证明我们在样本量小的

情况下使用 Maxent 是可行的. 例如 Deb 等人对一种稀有兰花(*Vanda bicolor* Griff.) 仅使用了 4 个发生点来开发小样本分布预测模型^[15]; Ortega-Huerta 等对样本量只有 2~20 的 11 种鸟类和其地区环境条件的数据运用不同的模型预测了物种分布^[34]; Pearson 等对马达加斯加特有的样本大小为 4~23 个的 13 种壁虎(*Uroplatus* spp.) 建立模型, 并对其进行评估^[35]; Adhikari 等人对印度东北部一种极度濒危的大叶冬青树种进行再引种生境分布模拟, 其样本量为 16 个^[36]; Groff 等利用 17 个已验证的位置开发了生态位模型, 以评估俄勒冈州斑点蛙(*Rana pretiosa*) 在加利福尼亚州的存在情况^[37]; Hernandez 等人的研究表明当样本量小到 5、10 和 25 个时, 四种建模方法(Bioclim、Domain、GARP 和 Maxent) 中, Maxent 是最有能力产生有用结果的^[38]. 本次 MaxEnt 模型预测结果的高精确度证明了在样本量小的情况下预测小黄花茶分布是可信的.

适生区预测结果显示, 小黄花茶主要适生于黔、川、渝及滇部分区域, 这些区域主要位于长江流域一带, 气候、土壤条件适宜, 适合喜湿喜荫的小黄花茶生长. 这与目前所报道的小黄花茶发现地四川泸州古蔺、宜宾长宁竹海自然保护区、贵州赤水自然保护区相吻合, 根据试验者实地调查亦得知, 泸州叙永、贵州贵阳等地均有小黄花茶生长.

4.2 小黄花茶生态因子特征

刀切图显示了影响小黄花茶分布的环境因子中贡献率前三分别为 Bio10、Bio18、Bio19, 重要性最大的环境变量为 Bio18, 其次是 Bio10、Bio19、Bio13 对模型影响较高. 可以看出, 最热季的平均气温和降水量以及最冷季降水量是影响小黄花茶生长分布最重要的环境因子, 这与野外调查的小黄花茶多生长于杂林中、沟谷内、崖边、溪水旁的生长地环境相符合, 其喜爱温暖湿润, 充沛的降水和湿润的环境利于其生长. 刀切法的分析结果认为平均温度和降水是影响小黄花茶分布的关键要素, 最热季平均温度与小黄花茶分布密切相关, 降水量过低或过高均不利于其分布, 说明降水和温度共同决定了其分布区气候类型.

主要环境因子响应图显示了小黄花茶的生态适宜带为最热月最高气温为 22.5~27.5℃, 最热季平均气温为 11.1~18.0℃, 最湿月降水量为 290~500 mm, 最热季降水量为 4.4~6.6 mm, 最冷季降水量为 16.7~24.8 mm, 海拔为 450~1 000 m, 坡

向在-40°~190°范围内, 20°<坡度<64°. 植物对生态环境的选择策略不同, 并对其有一定的耐受度, 不在度区间时植物的生存则会受到影响. 因此在明确了小黄花茶分布的限制环境因子后, 可以对其展开生态修复.

4.3 问题与展望

本研究基于 MaxEnt 模型对小黄花茶的潜在适生区进行了预测分析. MaxEnt 模型对于物种适生区分布预测的准确度, 主要是基于统计或理论推导的响应面, 将野外观测与环境预测变量联系起来的经验模型, 其由提供给模型的物种实际分布数据和环境变量数据决定^[32, 39].

在实际分布数据方面, 因小黄花茶分布的地域性以及环境特殊性, 其样本分布点数据量很少, 预测结果可能存在一定误差. 根据前人的研究, 当数据集过小时可以选择两种方法降低对预测结果的影响: (1) 不划分训练和测试子集时, 因为每个位置都可能提供唯一的、有价值的信息, 即先从数据集中删除每个局部性一次, 并用剩余的局部性生成一个模型, 然后在设定为 10% 的固定阈值下进行评估, 最后使用 P-Value Compute 程序以测试模型预测是否优于排除地点的随机分配^[35]; (2) 划分训练和测试子集时, 对具有 10% 训练存在的阈值规则的物种进行数次重复的模型运行, 采用交叉验证技术将样本划分为重复折叠, 并将所有其他参数用作测试数据, 构造出一个可行的模型^[15, 36]. 本研究采用了划分训练子集和测试子集的方式, 尚未在设定为 10% 的固定阈值下进行评估, 可能存在预测范围有误差. 但是小样本量开发的模型应该被解释为识别与已知物种出现的环境条件相似的区域, 而不是预测物种范围的实际限制, 因此本研究尚具有一定的区域参考价值. 当然在后续的研究中, 我们将进行多方面的建模, 以获得更高、更显著的成功率. 在环境变量方面, 本文仅仅考虑了气候及地形因子, 而没有考虑土壤类型、水分、植被、植物天敌等环境因素以及由自然或人为引起的外界扰动对其分布的影响, 存在一定的局限性和模型预测结果的不确定性. 如能综合所有因素, 预测结果将会更加准确. 同时, 在环境变量的筛选时, 可以采用 Max-Ent 模型将生态环境因子数据多次计算, 每次舍去贡献率为 0 的生态因子, 最终联系刀切法选择出贡献率在 5% 以上的环境因子作为最终环境变量组来减小对植物生境适宜性预测的影响^[40].

在研究区域方面, 本研究以四川省、湖北省、重

庆市、湖南省、云南省、贵州省、广西壮族自治区等七省(自治区、直辖市)为研究对象,空间尺度适中、精度有待提高,并且仅在小黄花茶已知的现存分布区域内进行预测与评估,可以考虑在更小范围区域展开更加精细的研究.从预测区域大小来看,在较小的区域内 Maxent 模型能够给出显著的预测结果,而当小样本数据用于更大的区域的预测时,预测模型即变得不稳定^[36],因此应该在较小面积上使用小样本量来开发模型以降低对预测结果的影响.在下一步的研究中或可以收集更多与植物分布相关的自然、人为因素添加到模拟模型中,以提高预测精度,为小黄花茶的资源保护与开发利用提供更有效的参考信息,并为其繁育研究、工作等提供科学依据.同时我们也将采集更多的物种分布信息以提高预测精确度.

在未来的研究中,我们也会预测其对于未来环境气候条件变化的响应,以此更好地了解植物对生长环境因子的需求以及其对环境变化做出的应对机制^[41].同时考虑从生态位角度探讨珍稀濒危植物的濒危机制、种间竞争及群落共存特征,为针对性地制定珍稀濒危物种保护措施提供有利信息^[42].同时我们将开展地面调查工作,通过地面试验评估模型的预测能力.

MaxEnt 模型根据气候、地形因子与小黄花茶之间的关系,找出其分布规律的最大熵,评估了影响植物生长分布的主导环境因子,预测了其潜在适生区,这对于指导植物的野生资源保护、繁育引种、开发利用等具有重要意义.小黄花茶作为中国特有植物,在我国分布范围也相当狭窄,而了解其适生区范围、适生环境阈值对发挥其高经济价值、高科研价值具有重要意义.

参考文献:

[1] 曾范安, 杨方成. 我省发现一个新的油茶物种——小黄花茶 *Camellia lutea* y. K, Li, sp. nov. [J]. 贵州林业科技, 1982, 1: 15.

[2] 刘清炳, 刘邦友, 梁盛. 小黄花茶濒危原因及对策探讨[J]. 贵州环保科技, 2005, 3: 18.

[3] 郭能彬, 邓佑华, 刘清炳. 小黄花茶生物学特性观察及初步研究[J]. 贵州环保科技, 2006, 1: 18.

[4] 杨雪. 宜宾长宁发现“茶花皇后”小黄花茶[N]. 华西都市报, 2014-5-3(a10).

[5] 陈锋, 王馨. 四川山茶科植物新记录种——小黄花茶[J]. 福建林业科技, 2016, 43: 167.

[6] 张华雨. 濒危植物小黄花茶(*Camellia luteoflora* Li

ex H. T. Chang)的群落特征和基于 ITS 序列的系统进化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.

[7] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21: 90.

[8] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models [J]. Ecol Lett, 2005, 8: 993.

[9] 张颖, 李君, 林蔚, 等. 基于最大熵生态位元模型的人侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测[J]. 应用生态学报, 2011, 22: 2970.

[10] 肖麒, 章梦婷, 吴翼, 等. 基于生态位模型的外来入侵种克氏原螯虾在中国的适生区预测[J]. 应用生态学报, 2020, 31: 309.

[11] 周海涛, 那晓东, 臧淑英, 等. 最大熵(Maxent)模型在物种栖息地研究中的应用[J]. 环境科学与管理, 2016, 41: 149.

[12] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecol Modell, 2006, 190: 231.

[13] 殷兵, 吴健平, 章文波. 基于 GIS 的降雨侵蚀力计算器实现研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21: 123.

[14] 韩焕金. 珍贵濒危物种小黄花茶的文献分析[J]. 林业科技通讯, 2019, 6: 97.

[15] Deb C R, Jamir N S, Kikon Z P. Distribution prediction model of a rare orchid species (*Vanda bicolor* Griff.) using small sample size [J]. Amer J Plan Sci, 2017, 8: 1388.

[16] 吴良, 徐正刚, 张婉, 等. 基于 MaxEnt 模型的中国构树潜在适生分布研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38: 40.

[17] Zhang M G, Zhou Z K, Chen W Yun, et al. Major declines of woody plant species ranges under climate change in Yunnan, China [J]. Divers Distrib, 2014, 20: 405.

[18] 谭钰凡, 左小清. 基于 GIS 与 Maxent 模型的金花茶潜在适生区与保护研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26: 24.

[19] 张海娟, 陈勇, 黄烈健, 等. 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27: 413.

[20] 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: 365.

[21] Cupertino-Eisenlohr M A, Vinicius-Silva R, Meireles L D, et al. Stability or breakdown under climate change? A key group of woody bamboos will find suitable areas in its richness center [J]. Biodivers

- Conserv, 2017, 26: 1845.
- [22] 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 等. 基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区[J]. 植物保护学报, 2016, 43: 1041.
- [23] 冯益明, 刘洪霞. 基于 Maxent 与 GIS 的锈色棕榈象在中国潜在的适生性分析[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29: 552.
- [24] 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[J]. 生态学杂志, 2015, 34: 3354.
- [25] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240: 1285.
- [26] 张春华, 和菊, 孙永玉, 等. 基于 Maxent 模型的原种红椿适生区变迁预测及在引种区划上的应用[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2018, 40: 164.
- [27] 邹天才. 贵州特有植物小黄花茶的物种起源探讨[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2002, 20: 6.
- [28] 张华雨, 宗秀虹, 王鑫, 等. 濒危植物小黄花茶种群结构和生存群落特征研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34: 539.
- [29] 刘海燕, 邹天才, 周洪英, 等. 贵州 20 种乡土园林植物的原生境状况及栽培繁殖试验[J]. 贵州农业科学, 2011, 39: 29.
- [30] 孙杰杰, 江波, 朱锦茹, 等. 应用生态位模型预测橡木在浙江省的潜在适生区与主导环境因子[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48: 1.
- [31] Esfanjani J, Ghorbani A, Chahouki M A Z. MaxEnt modeling for predicting impacts of environmental factors on the potential distribution of *Artemisia aucheri* and *Bromus tomentellus-Festuca ovina* in iran [J]. Pol J Environ Stud, 2018, 27: 1041.
- [32] 袁守良, 刘邦友. 濒危植物小黄花茶生物危害因子的初研[J]. 贵州环保科技, 2006, 12: 46.
- [33] 张梅, 禄彩丽, 魏喜喜, 等. 基于 MaxEnt 模型新疆枣潜在适生区预测 [J]. 经济林研究, 2020, 38: 152.
- [34] Ortega-Huerta M A, Peterson A T. Modeling spatial patterns of biodiversity for conservation prioritization in North-Eastern Mexico [J]. Divers Distrib, 2004, 10: 39.
- [35] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, *et al.* Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in madagascar [J]. J Biogeogr, 2007, 34: 102.
- [36] Adhikari D, Barik S K, Upadhaya K. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana* Purk. A critically endangered tree species of northeastern india [J]. Ecol Eng, 2012, 40: 37.
- [37] Groff L A, Marks S B, Hayes M P. Using ecological niche models to direct rare amphibian surveys: a case study using the oregon spotted frog (*Rana Pre-tiosa*) [J]. Herpetol Conserv Bio, 2014, 9: 354.
- [38] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, *et al.* The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods [J]. Echography, 2006, 29: 773.
- [39] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology [J]. Ecol Modell, 2000, 135: 147.
- [40] 张琳, 邓亦麒, 谢登峰, 等. 前胡和紫花前胡在中国的潜在分布区预测[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 54: 641.
- [41] Garah K, Bentouati A. Using the MaxEnt model for assessing the impact of climate change on the Eurasian Aleppo pine distribution in Algeria[J]. Afr J Ecol, 2019, 57: 500.
- [42] 丁少华, 葛继稳, 彭凤姣, 等. 赛武当国家级自然保护区珍稀濒危植物生态位特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38: 70.

引用本文格式:

中 文: 代玉烜, 金瑋, 徐海霞, 等. 基于 MaxEnt 模型的小黄花茶在中国的适生区域研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 026002.

英 文: Dai Y X, Jin T, Xu H X, *et al.* Study on the suitable area of *Camellia luteoflora* Y. K. Li in China based on MaxEnt model [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 026002.