

• 研究报告 •

基于生态位模型预测野生油茶的潜在分布

崔相艳^{1,2} 王文娟^{1,2} 杨小强^{1,2} 李 述² 秦声远^{1,2} 戎 俊^{1,2*}

1 (南昌大学生命科学研究院流域生态研究所, 南昌大学生命科学学院, 南昌 330031)

2 (南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031)

摘要: 油茶(*Camellia oleifera*)是我国第一大木本油料作物, 野生油茶是油茶育种的宝贵遗传资源。本研究从中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)获得可靠的野生油茶分布点数据, 结合气象和土壤数据, 分别应用最大熵(MaxEnt)模型和规则集遗传算法(GARP)模型构建了野生油茶的生态位模型, 预测了野生油茶的潜在分布区, 并分析了影响野生油茶分布的主要环境变量。根据生态位模型预测的分布概率值, 对野生油茶的潜在分布区划分适生等级, 并与主要油茶产地的实际分布数据进行比较, 以验证适生等级划分的可靠性。结果表明, 两种模型的预测结果均能较好地反映油茶的分布情况。GARP模型预测的潜在分布区更广, 而MaxEnt模型的预测结果更精确。两种模型的预测结果均显示, 野生油茶的潜在分布区大部分位于中国, 但在中南半岛也有部分分布。MaxEnt模型预测的野生油茶在中国的潜在分布区与我国亚热带常绿阔叶林的分布区基本吻合, 高适生区主要可以分为3大区域: (1)东北–西南走向的武夷山脉及附近的群山区域; (2)东西走向的南岭山脉及附近的群山区域; (3)东北–西南走向的武陵山脉及附近的群山区域。MaxEnt模型分析显示, 影响野生油茶分布的主要环境变量是昼夜温差均值、最干季降水量与最暖季降水量。油茶生长面积较大的地区绝大部分都位于MaxEnt模型预测的中、高适生区, 说明适生等级的划分较可靠。实地考察显示, 生态位模型的预测结果对于寻找野生油茶资源具有较高的参考价值。此外, 本研究也充分显示, 利用中国数字植物标本馆的植物分布数据, 结合相应的环境数据构建生态位模型, 有助于了解作物野生近缘种的地理分布。

关键词: 野生油茶; 地理分布; 生态位模型; 降水量; 温度; 最大熵模型; 规则集遗传算法模型

Potential distribution of wild *Camellia oleifera* based on ecological niche modeling

Xiangyan Cui^{1,2}, Wenjuan Wang^{1,2}, Xiaoqiang Yang^{1,2}, Shu Li², Shengyuan Qin^{1,2}, Jun Rong^{1,2*}

1 Center for Watershed Ecology, Institute of Life Science, Nanchang University and School of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang 330031

2 Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031

Abstract: *Camellia oleifera* is the dominant woody oil crop in China, and wild *C. oleifera* is a valuable genetic resource for *C. oleifera* breeding. Using distribution data of wild *C. oleifera* from the Chinese Virtual Herbarium (CVH, <http://www.cvh.org.cn/>), together with climate and soil data, ecological niche models were constructed with MaxEnt and genetic algorithm for rule-set prediction (GARP) models to predict the potential distribution of wild *C. oleifera*, and the major environmental factors affecting the distribution of wild *C. oleifera* were analyzed. Based on the presence probability of wild *C. oleifera* predicted by the models, the distribution regions of wild *C. oleifera* were divided into different suitable growing categories, which were then compared with actual distribution data of major *C. oleifera* production fields to evaluate reliability. Results indicated that the predictions of both MaxEnt and GARP models represented the distributions of *C. oleifera* well. The potential distribution range predicted by the GARP model was wider, while that predicted by the MaxEnt model was more accurate. Predictions of both the MaxEnt and GARP models showed that the

收稿日期: 2016-06-21; 接受日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(31460072)和江西省“赣鄱英才555工程”项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: rong_jun@hotmail.com

potential distribution regions of wild *C. oleifera* were located mainly in China and partly in the Indo-China Peninsula. According to predictions of the MaxEnt model, the potential distribution regions of wild *C. oleifera* in China were matched with the distribution regions of subtropical evergreen broad-leaved forests, and the highly suitable growing regions could be divided into three large regions: (1) northeastern-southwestern trending Wuyi Mountain and adjacent mountainous regions; (2) eastern-western trending Nanling Mountain and adjacent mountainous regions; (3) northeastern-southwestern trending Wuling Mountain and adjacent mountainous regions. The analysis of the MaxEnt model showed that the major environmental factors affecting the distribution of wild *C. oleifera* were mean monthly diurnal temperature range, precipitation during the driest quarter, and precipitation during the warmest quarter. The vast majority of the regions with large growing areas of *C. oleifera* were located in the medium to highly suitable growing regions predicted by the MaxEnt model, suggesting that the division of suitable growing regions was reliable. The field investigations showed that the model predictions had high reference values for finding wild *C. oleifera* resources. Additionally, the study shows that using the plant distribution data from CVH and related environmental data to construct an ecological niche model can help to understand the geographic distribution of crop wild relatives.

Key words: wild *Camellia oleifera*; geographic distribution; ecological niche model; precipitation; temperature; MaxEnt model; genetic algorithm for rule-set prediction (GARP) model

作物的野生近缘种是作物育种的宝贵遗传资源。与作物相比,其野生近缘种携带的抗病、抗虫以及抗逆性基因更多,从而可以适应严酷的生境(如高海拔、高盐、干旱等极端生境)(Hajjar & Hodgkin, 2007; 于燕波等, 2013)。而位于分布区边缘的作物野生近缘种群体可能比位于分布区中心的群体具有更广的生态适应性(胡标林等, 2011)。例如:江西东乡的普通野生稻(*Oryza rufipogon*)群体位于世界普通野生稻自然分布的最北缘,具有优良的耐冷、耐旱等抗逆性状(胡标林等, 2011)。全球气候变化可能引发恶劣的天气变化,未来洪涝、干旱等自然灾害的发生可能更加频繁,而作物的病虫害也可能会更加严重。深入研究不同生境中作物野生近缘种表型性状的变异,挖掘与利用其中蕴含的宝贵基因资源,有助于改良作物应对不良环境胁迫的能力,对于在气候变化条件下保障作物的产量和品质具有重要意义(于燕波等, 2013)。

了解作物野生近缘种的地理分布是对其进行保护、挖掘与利用的基础。中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)收录了大量的植物标本信息,包括采集时间、地点等,为了解不同植物的地理分布提供了参考依据。在此基础上,利用物种分布数据和相关生境数据构建生态位模型,分析影响物种分布的关键生态因子,可以对物种的潜在分布区进行预测(朱耿平等, 2013)。生态位模型的应用范围很广,包括预测物种在未知区域的潜在分布(Raxworthy et al, 2003)、外来种入侵趋势(雷军成和

徐海根, 2010)以及全球气候变化对物种分布的影响(Roura-Pascual et al, 2004)等。

最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型是应用最广泛的生态位模型之一(Phillips et al, 2006)。最近,应用 MaxEnt 模型对太白米(*Notholirion bulbuliferum*) (车乐等, 2014)、檀香(*Santalum album*) (胡秀等, 2014)、金钱松(*Pseudolarix amabilis*) (王雷宏等, 2015)和细辛属(*Asarum*)植物(景鹏飞等, 2015)的潜在分布区进行了分析。大量研究结果显示,该方法建立的生态位模型普遍具有较高的可靠性,可以对植物的潜在分布区进行适生等级划分,有助于了解植物的分布规律。规则集遗传算法(genetic algorithm for rule-set prediction, GARP)模型也是常见的生态位模型之一。GARP模型常用于研究外来种入侵(陈立立等, 2008),在预测入侵的潜在分布区范围上显示出比MaxEnt模型更高的准确性,但是预测的假阳性率可能会高于MaxEnt模型(Sobek-Swant et al, 2012)。因此,在建立生态位模型的过程中应对不同模型的预测结果进行比较,选择预测效果较好的模型进行最后的分析(王运生等, 2007)。

油茶(*Camellia oleifera*)是我国栽培面积最广、总产油量最高的木本油料植物,与油棕榈(*Elaeis guineensis*)、椰子(*Cocos nucifera*)和油橄榄(*Olea europaea*)并称为世界四大木本油料植物,与核桃(*Juglans regia*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)和油桐(*Vernicia fordii*)并称为我国四大木本油料植物。我国是世界上最大的植物油消费国,年消费量超过

3,000万吨,其中近七成依赖进口(USDA-FAS, 2015)。大力发展适宜于山地种植的油茶等木本油料作物,可以充分利用我国的山地资源,提高植物油特别是健康优质的食用植物油的自给率,满足不断增长的消费需求。目前,限制油茶产业发展的核心问题是缺少优良品种、病虫害严重、茶油产量极低(陈永忠等, 2013)。因此,选育适于不同地区的高产、优质以及抗病虫害等不利环境胁迫的优良品种,可以大力推动油茶产业的发展。

目前,油茶种质资源的采集、研究和利用主要集中于栽培品种,包括农家品种、优良无性系、家系和杂交组合,对野生油茶的关注不多(陈永忠, 2008; 庄瑞林, 2012)。应加强对野生油茶的研究,而其首要任务就是充分了解野生油茶的分布状况,认识影响野生油茶分布的关键生态因子。我国从20世纪50年代开始进行油茶种质资源的普查工作,积累了大量的数据。由于油茶良种选育与大规模栽培始于20世纪60年代,此前的数据主要反映了油茶的自然分布情况,受人为因素干扰较小,可以用于了解野生油茶的自然分布规律。本研究首先收集并筛选了中国数字植物标本馆中关于野生油茶分布点的可靠记录。然后,通过世界气候数据库和全球土壤数据库分别获得分辨率为1 km × 1 km的基于温度、降水、海拔以及土壤的环境图层数据。最后,分别应用MaxEnt和GARP模型软件构建生态位模型,综合两者的预测结果对野生油茶的潜在分布区进行分析,并分析影响油茶分布的主要环境因子。

1 材料与方法

1.1 野生油茶分布点数据

通过在中国数字植物标本馆中检索油茶学名 *Camellia oleifera*, 共获得2,006条标本数据。对这些标本数据进行筛选,去除放置在不同标本馆的同一标本的重复、无地理信息和采集时间的标本以及相同地点与时间重复采样的标本,结果获得1,201条标本数据。将这1,201条数据分别赋予唯一的编号,整合关于标本的关键信息(采集时间、地点),在Excel表格中建立数据库。将数据库中明确标有栽培的样本去除。然后,利用谷歌地图核实每条记录的经纬度信息,去除一些由于采集信息不详无法获得准确经纬度的数据,最终得到741条数据。其中, 20

世纪50年代的标本数量最多(344条),反映了油茶种质资源普查的情况。为了反映油茶的自然分布情况,选取油茶大规模栽培以前(早于1960年)的数据(433条)。为减少空间自相关(Waltari et al, 2007),在ArcGIS 9.3中利用Data management tools生成0.1° × 0.1°的网格,对于网格内多于1条的数据,只选取距离中心点最近的1条,共得到270条数据。为减少采样偏差,将各省单位面积内油茶分布点的数目进行排序,以排在中间的省份作为标准,对高于该标准的省份,依据面积按该标准计算应该采用的分布点数目,然后从该省份的分布点中随机抽取相应数目的分布点用于后续的分析。经过以上筛选,最终得到油茶分布点数据174条,并转换成MaxEnt (3.3.3k)模型软件要求的csv格式。

1.2 环境图层数据

从世界气候数据库 WorldClim (<http://www.worldclim.org/>) (Hijmans et al, 2005)下载1950–2000年世界气候的环境图层数据(包括19个生物气候变量和一个海拔变量,表1),选取图层的分辨率为30" (1 km × 1 km)。土壤数据来自北京师范大学的全球土壤数据库(<http://globalchange.bnu.edu.cn/research/>) (Wei et al, 2014),本研究仅选取与油茶生长相关的8个因子(表1)。图层的分辨率为30" (1 km × 1 km),这些图层依据土壤深度分为8层,本研究选取反映表层土的前4层(0–4.5、4.5–9.1、9.1–16.6和16.6–28.9 cm),通过ArcGIS的栅格计算器工具求得平均值图层数据。根据《世界山茶属的研究》(闵天禄, 2000),山茶属(*Camellia*)大致分布在7° S–35° N, 80°–140° E之间,而油茶组分布在长江以南、热带东喜马拉雅和中南半岛北部。因此,本研究利用ArcGIS软件中的Extract工具从世界环境图层中提取37° N至中南半岛南部, 85° E至我国东部的环境图层数据用于后续的分析。

由于各环境因子之间可能存在相关性,利用ArcGIS的空间分析工具,分别对19个生物气候变量和8个土壤变量进行相关性分析,当相关系数 $|r| \geq 0.8$ 时,仅选取其中的一个变量建立模型。最终选用16个环境变量(Bio1、Bio2、Bio3、Bio7、Bio12、Bio15、Bio17、Bio18、SAND、OC、TN、pH、EXK、BD、GRAV、VMC1)构建生态位模型。用ArcGIS软件中的Conversion工具将环境图层转换成ASCII格式。

表1 图层数据的环境变量
Table 1 Environmental variables in layers

| 环境变量 Environmental variable | 描述 Description |
|--------------------------------|--|
| Bio1 | 年平均温度 Annual mean temperature |
| Bio2 | 昼夜温差月均值 Mean diurnal range (Mean of monthly (max.temp. - min.temp.)) |
| Bio3 | 昼夜温差与年温差比值 Isothermality (Bio2 / Bio7) ($\times 100$) |
| Bio4 | 温度季节变化 Temperature seasonality (Standard deviation $\times 100$) |
| Bio5 | 最热月份最高温 Max temperature of warmest month |
| Bio6 | 最冷月份最低温 Min temperature of coldest month |
| Bio7 | 年温度变化范围 Temperature annual range (Bio5 - Bio6) |
| Bio8 | 最湿季平均温度 Mean temperature of wettest quarter |
| Bi 9 | 最干季平均温度 Mean temperature of driest quarter |
| Bio10 | 最暖季平均温度 Mean temperature of warmest quarter |
| Bio11 | 最冷季平均温度 Mean temperature of coldest quarter |
| Bio12 | 年均降水量 Annual precipitation |
| Bio13 | 最湿月降水量 Precipitation of wettest month |
| Bio14 | 最干月降水量 Precipitation of driest month |
| Bio15 | 降水量季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality |
| Bio16 | 最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter |
| Bio17 | 最干季降水量 Precipitation of driest quarter |
| Bio18 | 最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter |
| Bio19 | 最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter |
| Alt | 海拔 Altitude |
| OC | 土壤有机碳 Soil organic carbon |
| TN | 土壤总氮 Soil total N |
| pH | 土壤pH值(以水作为浸出液体) Soil pH value (with water as the leaching liquid) |
| EXK | 土壤可交换钾 Soil exchangeable potassium |
| SAND | 土壤含沙量 Soil sand content |
| GRAV | 土壤碎石含量 Soil gravel content |
| BD | 土壤容重 Soil bulk density |
| VMC1 | 土壤含水量 Soil volumetric water content at -10 kPa |

1.3 MaxEnt模型分析

把油茶分布点数据和环境图层数据导入MaxEnt模型软件。在MaxEnt模型分析中,最大迭代次数设置为2,000, Bootstrap重复运算10次,并开启Random seed,勾选绘制响应曲线(response curves)与刀切法(jackknife)功能来分析影响油茶生长的环境变量。将80%的油茶分布点数据用于模型的构建和预测(训练数据),其余20%的数据用于模型检验(测试数据)。MaxEnt模型软件会自动绘制ROC曲线

(receiver operating characteristic curve)并计算曲线下面积AUC (areas under the receiver operating characteristic curves)来对模型的拟合效果进行评价。AUC的取值范围为0–1, $AUC < 0.5$ 表明模型预测效果很差, AUC 值为0.6–0.9表明模型预测效果一般, $AUC > 0.9$ 则表明模型的预测效果很好(王运生等, 2007)。因正则化乘数(regularization multiplier, β)的设置会对模型的拟合效果产生影响,并与模型的复杂性密切相关,较小的 β 值会导致过拟合(overfitting),较复杂的模型也更容易产生过拟合的问题,因此应在建模的过程中调整 β 值,以平衡模型的拟合效果和复杂性(Warren et al, 2014)。在MaxEnt模型分析过程中,首先选择16个环境变量建模,从0.2–15设置不同的 β 值,比较不同模型的拟合效果,训练数据AUC值和测试数据AUC值间的差值随 β 值的增加而减小并逐渐趋于稳定,最后选择两者间差值较小且均大于0.9的预测效果较好的模型作为最优模型($\beta = 1.6$)。然后,根据环境变量对模型的贡献率及刀切法分析结果,选取重要性高的变量组合重新调整 β 值建模。

MaxEn模型的预测结果采用0–1的分布概率值来表示物种在预测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。依据MaxEnt模型预测的油茶分布的适宜程度,选用ArcGIS软件中的Reclass工具,对油茶的适生等级进行划分。在适生等级划分过程中,重分类的方法(Ayalew et al, 2004)有很多:在本研究中, Geometrical interval以及Quantile对高适生区划分的范围过宽,分别为0.13–0.76和0.23–0.76; Equal interval采用等间距划分,过于人为; Manual默认为10个等级,划分过细; Standard deviation对高适生区划分的范围过窄,为0.62–0.76; Defined interval把低于0.15划分为不适生区,过高的下限值会把适宜油茶生长的地区划为不适生区;用自然分割法(natural breaks)划分为4个适生等级,其结果最接近真实的油茶分布情况。最后,为了更加直观展示预测结果,在ArcGIS软件中将分析结果与中国行政区划和中国主要河流的数据进行叠加,这两份数据均来源于国家基础地理信息中心(<http://nfgis. nsdi.gov.cn/>)。

1.4 GARP模型分析

使用Dataset Manager将ASCII格式的环境图层数据转换成Desktop GARP (1.1.6)能够识别的格式。

然后,把物种分布点数据和环境图层数据导入到Desktop GARP。第一次运行时,采用全部16个环境图层数据,运行次数设置为1,000次,80%的数据用于建立模型,至少使用20个分布点数据作为训练数据(training data),重复运算次数最大值(max iteration)设为10,000,收敛极限(convergence limit)为0.01,规则类型(rule types)使用默认设置,生成ASC格式的图层。根据运行结果计算基础遗漏误差(omission error)。在选取最优的环境因子时,使用刀切法每次忽略一个环境因子,分别创建16组不同的模型。对于每组环境因子重复运行100次,共计创建1,600个模型。如果一个环境因子的缺失导致遗漏误差显著低于基础遗漏误差,则该环境因子将不被包含在最终的分析中(陈立立等,2008)。计算结果并未发现有某一个环境因子的缺少会导致遗漏误差显著低于基础遗漏误差,因此选择全部16个环境图层数据进行最终的分析。在最终分析中,根据所选择的环境图层重复创建3,000次模型。从获得的3,000份数据中,去除 omission error (int)不为0以及 omission error (ext) ≥ 0.05 的数据,按 omission error 从小到大排序,选择排前100位的数据,通过ArcGIS的空间分析模块(spatial analyst)进行叠加,然后利用栅格计算器工具将叠加后的图层除以100,使预测的分布概率值在0–1之间。用自然分割法将预测结果划分为4个适生等级,并把分析结果与中国行政区划和中国主要河流的数据进行叠加。

在ArcGIS中,通过Data Management Tools随机生成966个点作为“不存在点”(实际分布值为0),与随机抽取的34个已知分布点(测试数据,实际分布值为1)合并成一个图层,提取这1,000个点的模型预测值。导出该图层的属性表,利用SPSS 21软件绘制ROC曲线并计算AUC值。重复上述过程10次,计算AUC的平均值和置信区间。由于GARP模型预测结果的 omission error < 0.05 ,传统的AUC值计算方法可能无法准确评价该模型预测结果的可靠性,故采用部分面积ROC法(partial-area ROC approach)分别计算GARP模型和MaxEnt模型的部分AUC值(omission error < 0.05),比较不同模型的预测效果(Peterson et al, 2008)。

1.5 适生等级划分可靠性分析

2009年由国家发展改革委员会、财政部和国家林业局印发的《全国油茶产业发展规划(2009–2020

年)》(<http://zfxgk.ndrc.gov.cn/>)根据生长面积把油茶生长县分成4个等级:小于666.67 ha (小于1万亩)、666.67–3,333.33 ha (1–5万亩)、3,333.33–6,666.67 ha (5–10万亩)以及大于6,666.67 ha (大于10万亩)。湖南、江西和广西是油茶的主要产区,其面积占全国油茶总面积的76.2%。大于6,666.67 ha的油茶生长县湖南有49个,江西有45个,广西有18个。以这些油茶生长县作为适生区的参照,与生态位模型预测的油茶中、高适生区进行比较,对适生等级划分结果的可靠性进行检验。在ArcGIS中,叠加生态位模型的预测结果与中国行政区划的县级行政界线图层,通过ArcGIS的栅格计算器工具,把不同的适生区呈现出来,分析江西、广西、湖南3省现有面积大于6,666.67 ha的油茶生长县是否位于预测的中、高适生区内。

1.6 野生油茶分布点的实地考察

为了进一步验证生态位模型预测的野生油茶分布的可靠性,选取纬度梯度的部分代表性野生油茶分布点进行实地考察,主要是确定是否有野生油茶分布。本研究中野生油茶的判断标准是:生境自然,没有明显的人工栽培痕迹;油茶的株型不一致,具有明显的年龄结构,可以长期生长和繁殖,种群可以自然更新。

2 结果

2.1 生态位模型模拟的准确性

本研究中,运用MaxEnt模型,基于16个环境变量建模的训练数据AUC值为0.946,测试数据AUC值为0.915 (95%置信区间: 0.906–0.924)。运用GARP模型,基于16个环境变量建模的测试数据AUC值为0.939 (95%置信区间: 0.936–0.943)。采用部分面积ROC法计算测试数据的部分AUC值(omission error < 0.05),MaxEnt模型为0.756 (95%置信区间: 0.741–0.771),GARP模型为0.879 (95%置信区间: 0.869–0.888)。基于测试数据,MaxEnt模型和GARP模型的AUC值均大于0.9,说明两者都可以较好地拟合实际的油茶分布数据;此外,MaxEnt模型的AUC值和部分AUC值均显著低于GARP模型。GARP模型预测的油茶分布区更广,涵盖了全部的已知分布点地区,并扩展到许多没有油茶分布点数据的地区。且GARP模型所预测的大部分分布区的分布概率都是100%。相比而言,MaxEnt模型预测的

油茶分布区范围较小,主要限于有已知分布点的地区,但预测结果更为精确,可以明显分成不同的适生区。因此,本研究综合两种模型的预测结果进行分析。

2.2 影响油茶分布的主要环境变量

在MaxEnt模型中,刀切法显示:最干季降水量、降水量季节性变异系数、昼夜温差月均值、最暖季降水量、年平均温度、年均降水量、年温度变化范围、昼夜温差与年温差比值是影响油茶分布的主要环境变量(图1),累积贡献率达到85.2%。其中,昼夜温差月均值(贡献率25.1%)、最干季降水量(贡献率18.6%)与最暖季降水量(贡献率11.3%)是对模型贡献最大的环境变量(累计贡献率55%)。昼夜温差月均值小于9.2℃时比较适合油茶的分布(分布概率值为0.29–0.76)(图2);昼夜温差月均值大于9.8℃时不适合油茶的分布(分布概率值为0–0.10)。最干季降水量在45–335 mm时比较适合野生油茶的分布(分布概率值为0.29–0.76)(图3);最干季降水量低于36 mm或高于427 mm时,不适合油茶的分布(分布概率值为0–0.10)。最暖季降水量在443–833 mm时比较适合油茶的分布(分布概率值为0.29–0.76)(图4);最暖季降水量低于415 mm或高于1,288 mm时,不适合油茶的分布(分布概率值为0–0.10)。选取对模型贡献最大的8个环境变量重新构建MaxEnt模型(最优模型 $\beta = 1.6$),训练数据AUC值为0.920,测试数

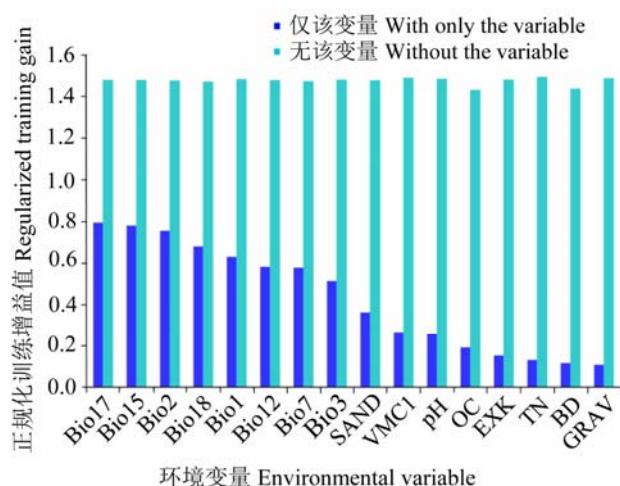


图1 MaxEnt模型的刀切法分析结果,环境变量含义见表1
Fig. 1 Results of jackknife test in MaxEnt model, environmental variable meanings are shown in Table 1.

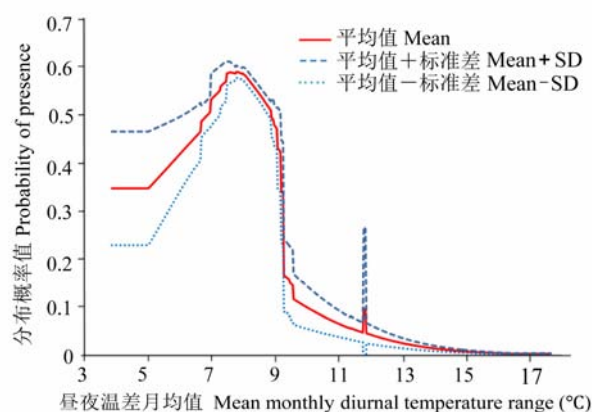


图2 MaxEnt模型分布概率值对昼夜温差月均值的响应曲线
Fig. 2 Response curves of probabilities of presences to mean monthly diurnal temperature range in MaxEnt model

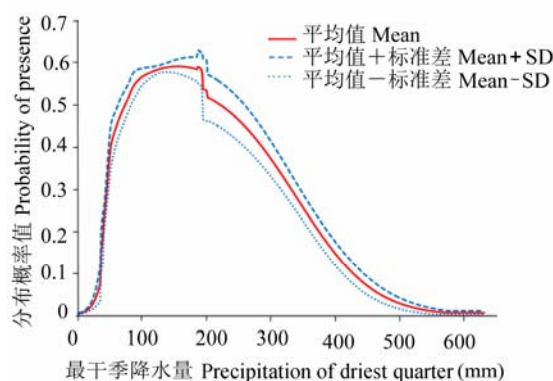


图3 MaxEnt模型分布概率值对最干季降水量的响应曲线
Fig. 3 Response curves of probabilities of presences to precipitation of driest quarter in MaxEnt model

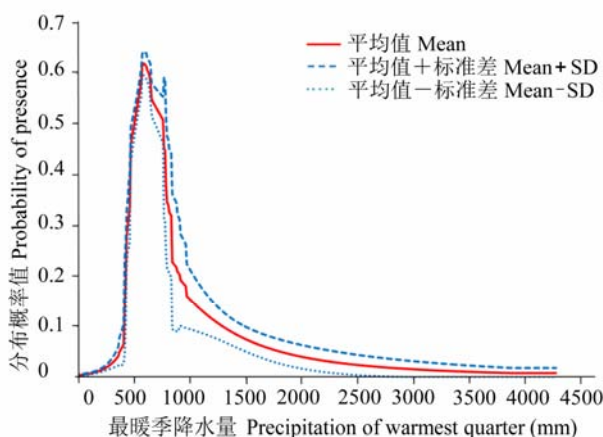


图4 MaxEnt模型分布概率值对最暖季降水量的响应曲线
Fig. 4 Response curves of probabilities of presences to precipitation of warmest quarter in MaxEnt model

据AUC值为0.902 (95%置信区间: 0.888–0.916), 与16个变量模型的AUC值无显著差异。故以下分析主要基于8个环境变量构建的MaxEnt模型的预测结果。

2.3 MaxEnt模型预测的野生油茶分布区

MaxEnt模型所预测的油茶分布情况如图5所示。其中原始分布点是中国数字植物标本馆中记录的174个可靠的油茶分布点, 图中不同颜色对应按自然分割法划分的不同适生等级。自然分割法依据油茶的分布概率值把适生度划分为4个等级: 0.00–0.10为不适生区、0.10–0.29为低适生区、0.29–0.49为中适生区以及0.49–0.76为高适生区。野生油茶的高适生区跨越22.717°–32.254° N, 103.373°–121.547° E。潜在分布区主要位于中国, 中南半岛的越南、老挝、缅甸等国可能也有少量分布。在中国的潜在分布区与亚热带常绿阔叶林的分布区基本吻合。

MaxEnt模型所预测的油茶高适生区也是一些主要山脉所在的区域, 大体可以分为3大区域: (1) 东北–西南走向的武夷山脉及附近的群山区域, 主要包括仙霞岭、怀玉山、括苍山、武夷山、杉岭、戴云山等。(2) 东西走向的南岭山脉及附近的群山区域, 主要包括大庾岭、南岭、骑田岭、都庞岭、越城岭、大瑶山、九万大山、凤凰山等。(3) 东北–西南走向的武陵山脉及附近的群山区域, 主要包括观面山、方斗山、大娄山、武陵山、苗岭等。生态位模型预测的油茶中适生区则主要围绕高适生区分布。

2.4 GARP模型预测的野生油茶分布区

GARP模型所预测的油茶分布情况如图6所示, 其中原始分布点同样是中国数字植物标本馆中记录的174个可靠的油茶分布点, 图中不同颜色对应按自然分割法划分的不同适生等级。自然分割法依据油茶的分布概率值把适生度划分为4个等级: 0.00–0.13为不适生区、0.13–0.44为低适生区、0.44–0.80为中适生区以及0.80–1.00为高适生区。GARP模型预测的野生油茶分布区较MaxEnt模型要广, 大部分预测的野生油茶分布区都是高适生区, 跨越11.29°–32.962° N, 85°–122.07° E。高适生区主要分布在中国的长江流域及其以南各省, 在越南、老挝、泰国、缅甸、孟加拉、印度等国家也有高适生区分布。中适生区则仅在高适生区的边缘有少量分布。

2.5 适生等级划分可靠性分析

根据《全国油茶产业发展规划(2009–2020年)》, 以油茶主产区湖南、江西和广西油茶生长面积大于6,666.67 ha的县为例, 对适生等级划分结果的可靠性进行分析。根据MaxEnt模型的预测结果, 湖南仅有2个县(冷水滩区和汉寿县)位于低适生区, 其他47个县均位于中、高适生区, 占所调查地区的95.9%; 江西仅有2个县(高安市和樟树市)位于低适生区, 其他43个县均位于中、高适生区, 占所调查地区的95.6%; 广西的18个县均位于中、高适生区, 占所调查地区的100%。根据GARP模型的预测结果, 所有这些县均位于高适生区。以上结果显示, 油茶生长面积较大的地区基本上位于生态位模型预测的中、高适生区内。可见, 本研究所获得的生态位模型均可较为准确地预测油茶的适生分布区。

2.6 野生油茶分布点的实地考察

选取反映野生油茶纬度梯度分布的9个代表性样点进行了实地考察(图5, 6)。在调查中发现, 这些地点均有油茶分布, 其中7个有野生油茶分布(表2)。

海南澄迈的油茶主要分布在橡胶(*Hevea brasiliensis*)林边缘。据调查该地区曾经有油茶栽培, 后改为橡胶林, 故也可能是废弃的栽培油茶。井冈山海拔较低地区受人工干扰较大: 在园潭样点, 当地居民把除油茶外的其他树木几乎砍光, 而且附近有栽培油茶林, 因此可能主要是栽培油茶田; 海拔较高的狮子岩和草坪样点有大量野生油茶分布。

据中国数字植物标本馆数据显示, 浙江天目山有不少油茶标本, 但是实地考察发现, 大部分的标本采集地点均没有发现油茶, 野生油茶的分布较少, 可能与当地较强的人类活动干扰有关。在河南白云山有大量油茶分布, 但是具有明显人工栽培痕迹, 推测可能是栽培油茶。在调查的样点中, 广东南岭的野生油茶分布数量最多, 这与MaxEnt模型的预测结果相吻合。实地考察结果说明生态位模型的预测结果对于寻找野生油茶资源具有较高的参考价值。

3 讨论

本研究基于MaxEnt和GARP两种生态位模型对野生油茶的潜在分布区进行了预测。研究发现, 两种模型的预测结果均能较好地反映油茶的分布情

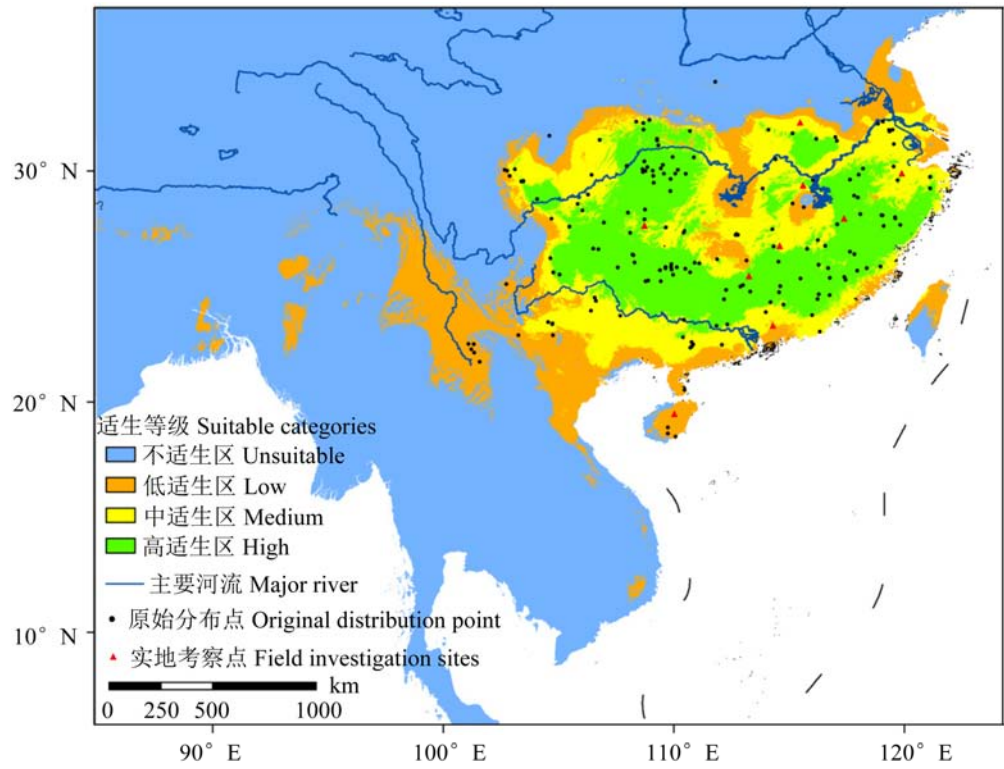


图5 MaxEnt模型预测的野生油茶分布图
Fig. 5 Distribution map of wild *Camellia oleifera* predicted by the MaxEnt model

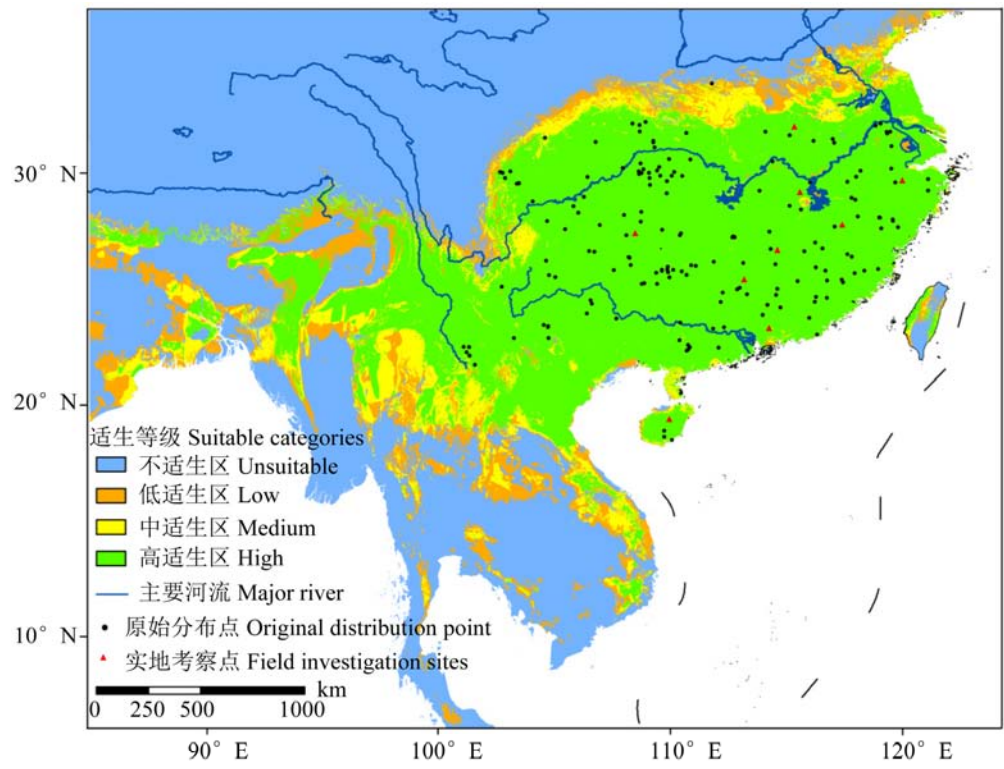


图6 GARP模型预测的野生油茶分布图
Fig. 6 Distribution map of wild *Camellia oleifera* predicted by the GARP model

表2 野生油茶实地考察点概况
Table 2 Summary of the field investigation sites of wild *Camellia oleifera*

| 编号 Code | 地点 Location | 纬度 Latitude (°N) | 经度 Longitude (°E) | 海拔 Altitude (m) | 预测分布概率 Predicted probability of presence (MaxEnt/GARP) | 频率 Frequency | 生境 Habitat | 人为干扰 Human disturbances | 备注 Remarks |
|------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|--|----------------------|--------------------------------|----------------------------|---|
| 1 | 海南澄迈 Chengmai, Hainan | 19.58 | 110.02 | 98 | 0.20/0.99 | 中 Medium | 路边、疏林 Roadside, open forest | 强 Strong | 可能为栽培 Possibly cultivated |
| 2 | 广东罗浮山 Luofu Mountain, Guangdong | 23.28 | 114.02 | 1,125–1,212 | 0.25/0.65 | 中 Medium | 路边、疏林 Roadside, open forest | 中度 Medium | 野生 Wild |
| 3 | 广东南岭 Nanling Mountain, Guangdong | 24.90 | 113.06 | 547–861 | 0.60/1.00 | 高 High | 路边、疏林 Roadside, open forest | 弱 Weak | 野生 Wild |
| 4 | 江西井冈山 Jinggang Mountain, Jiangxi | 26.55 | 114.17 | 412–978 | 0.61/1.00 | 高 High | 路边、疏林 Roadside, open forest | 中度 Medium | 低海拔可能为栽培区 Possibly cultivated at low altitudes |
| 5 | 江西马头山 Matou Mountain, Jiangxi | 27.73 | 117.16 | 506–515 | 0.62/1.00 | 中 Medium | 路边、疏林 Roadside, open forest | 弱 Weak | 野生 Wild |
| 6 | 江西庐山 Lushan Mountain, Jiangxi | 29.60 | 115.98 | 256–874 | 0.56/1.00 | 高 High | 路边、疏林 Roadside, open forest | 中度 Medium | 野生 Wild |
| 7 | 浙江天目山 Tianmu Mountain, Zhejiang | 30.32 | 119.44 | 411–463 | 0.41/1.00 | 极低 Extremely low | 路边、疏林 Roadside, open forest | 强 Strong | 野生 Wild |
| 8 | 河南白云山 Baiyun Mountain, Henan | 31.66 | 115.07 | 137 | 0.48/1.00 | 极高 Extremely high | 路边、疏林 Roadside, open forest | 极强 Very strong | 栽培 Cultivated |
| 9 | 贵州梵净山 Fanjing Mountain, Guizhou | 27.91 | 108.63 | 983–1,332 | 0.61/1.00 | 高 High | 路边、疏林 Roadside, open forest | 中度 Medium | 野生 Wild |

况,但MaxEnt模型预测结果的AUC值和部分AUC值均显著低于GARP模型。GARP模型所预测的分布区范围较广,更能反映潜在分布区的范围,但可能假阳性率较高。MaxEnt模型的预测结果较为保守,但可能更为精确。因此,整合MaxEnt和GARP模型的预测结果,充分利用彼此的优势,可以更为全面地了解野生油茶的潜在分布情况。王运生等(2007)应用常见的包括MaxEnt和GARP在内的5种生态位模型分析相似穿孔线虫(*Radopholus similis*)在中国的适生区,结果发现MaxEnt模型的预测效果最好。张海娟等(2011)在分析入侵种薇甘菊(*Mikania micrantha*)在中国的适生区时,也发现MaxEnt模型的预测结果要优于GARP模型。但是也有研究显示GARP模型的预测结果要优于MaxEnt模型(Sobek-Swant et al, 2012)。刘欣(2012)^①在分析空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)在中国的入侵风险时也认为,MaxEnt模型在预测分布细节上优于GARP模

型,但GARP模型在预测整体分布范围上比MaxEnt模型略胜一筹。因此,进行生态位模型分析的时候,应尝试多种模型,并把预测结果与实际分布情况进行比较,对不同模型的预测结果进行综合评价与分析,而不能仅基于AUC值评判模型的优劣。

Pearson等(2007)发现,当样本量≥5时,MaxEnt模型就可以进行比较成功的预测,样本量< 10时,GARP模型的预测效果不是很好。陈新美等(2012)在对4个物种的34组不同样本量(最大样本量为1,200)的研究中发现,当样本量达到120时,MaxEnt模型的精度趋于稳定。本研究的油茶生态位模型是基于中国数字植物标本馆中174份可靠的油茶分布点数据所构建的,大量准确的油茶分布点数据为生态位模型的准确性提供了有力保障。根据闵天禄先生主编的《世界山茶属的研究》,油茶主要分布在中国,在中南半岛可能有少量分布(闵天禄, 2000)。本研究中,MaxEnt模型和GARP模型所预测的野生油茶潜在分布区大部分是重叠的,主要位于中国的长江流域及其以南各省,此外在中南半岛也有分

① 刘欣 (2012) 基于 GARP 和 MAXENT 的空心莲子草在中国的入侵风险预测. 硕士学位论文, 山东师范大学, 济南.

布。根据中国植被区划, MaxEnt模型所预测的油茶分布区域与我国亚热带常绿阔叶林的分布区基本吻合, 而所预测的油茶高适生区则主要位于中亚热带常绿阔叶林分布区内。闵天禄(2000)指出, 山茶属植物是亚热带常绿阔叶林所固有的特征种类。陈卫娟(2006)的研究也表明山茶属是中亚热带常绿阔叶林的代表性属之一。油茶作为山茶属中分布最广的物种之一, 其潜在的分布区大致反映了山茶属的分布区特征, 这与前人的研究结果相吻合。

根据目前油茶在主产区湖南、江西和广西的分布, 这3省中现有油茶面积大于6,666.67 ha的县大部分位于生态位模型预测的中、高适生区, 说明适生等级的划分能够较准确地反映油茶的实际分布状况。此外, 本研究中对油茶进行不同适生等级的划分是为了便于分析, 因此所预测的低适生区并非不适合油茶生长, 只是说明油茶分布较少。通过MaxEnt模型预测的野生油茶分布图可以看出, 现为油茶第一主产区的湖南省, 野生油茶的高适生区面积并不是最大的, 而贵州、广西和福建相比而言存在更多的高适生区。出现这一现象的可能原因是, 本研究主要针对野生油茶, 研究结果反映了油茶的自然分布状况。而湖南省一直重视发展油茶产业, 在油茶育种、栽培和生产技术方面均居于全国领先地位。这也充分说明其他的适合油茶生长的省份如贵州、广西和福建等省还蕴含着巨大的产业发展潜力。GARP模型预测的高适生区更广, 可以在推广栽培油茶时作为潜在适生区的参考。

根据MaxEnt模型的分析结果, 对油茶分布起关键作用的环境因子是昼夜温差月均值、最干季降水量与最暖季降水量。土壤因子在MaxEnt模型中的贡献值并不高。相关研究也显示, 在大尺度下, 物种分布主要受气象因子的影响, 只有在小尺度下, 土壤理化性质所造成的影响才会比较显著(朱耿平等, 2014)。《中国油茶(第二版)》(庄瑞林, 2012)中也指出, 气温和降水是影响油茶生长发育、完成生命周期的主导气候因子。此外, 降水与气温也是影响其他木本植物分布的关键气候因子, 但具体的影响因子在不同物种中可能不一致。例如, 对我国辽东栎(*Quercus wutaishanica*)地理分布影响最大的是年均降水量和最冷月最低温(殷晓洁等, 2013); 影响檀香(*Santalum album*)分布的主要气候因子是年平均温度与最冷月最低温(胡秀, 2014); 影响湖北海

棠(*Malus hupehensis*)地理分布的最重要因子是最干季平均温(王雷宏等, 2013)。

MaxEnt模型所预测的油茶高适生区可能有大量野生油茶分布, 应是调查研究的重点区域。其中, 武夷山脉、南岭山脉和武陵山脉及其附近的低山丘陵地区属于野生油茶的核心分布区, 这些地区分布的野生油茶可能蕴含着极其丰富的遗传多样性, 应注意优先开展研究与保护。本研究在实地调查的过程中发现了大量的野生油茶, 这在一定程度上印证了生态位模型的预测结果。实地考察也显示, 野生油茶主要分布在路边或疏林中, 可能会受到强烈的人类活动影响。应加大对野生油茶的调查力度, 为进一步对其进行有效保护与合理利用奠定基础。

本研究结果表明, 利用中国数字植物标本馆的植物分布数据, 结合相应的环境数据构建生态位模型, 可了解作物野生近缘种的地理分布, 促进作物野生近缘种的保护、发掘与利用。

参考文献

- Ayalew L, Yamagishi H, Ugawa N (2004) Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1, 73–81.
- Che L, Cao B, Bai CK, Wang JJ, Zhang LL (2014) Predictive distribution and habitat suitability assessment of *Notholirion bulbiferum* based on MaxEnt and ArcGIS. *Journal of Ecology*, 33, 1623–1628. (in Chinese with English abstract) [车乐, 曹博, 白成科, 王娟娟, 张琳琳 (2014) 基于MaxEnt和ArcGIS对太白米的潜在分布预测及适宜性评价. *生态学杂志*, 33, 1623–1628.]
- Chen LL, Yu Y, He XJ (2008) Historical invasion and expansion process of *Alternanthera philoxeroides* and its potential spread in China. *Biodiversity Science*, 16, 578–585. (in Chinese with English abstract) [陈立立, 余岩, 何兴金 (2008) 喜旱莲子草在中国的入侵和扩散动态及其潜在分布区预测. *生物多样性*, 16, 578–585.]
- Chen WJ (2006) Floristic Phytogeography of Evergreen Broad-leaved Forest (EBLF) in Mid-subtropical China. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [陈卫娟 (2006) 中亚热带常绿阔叶林植物区系地理研究. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- Chen XM, Lei YC, Zhang XQ, Jia HY (2012) Effects of sample size on accuracy and stability of maximum entropy model in predicting species distribution. *Scientia Silvae Sinicae*, 48(1), 53–59. (in Chinese with English abstract) [陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎 (2012) 样本量对MaxEnt模型预测物种分布精度和稳定性的影响. *林业科学*,

- 48(1), 53–59.]
- Chen YZ (2008) Oil Tea *Camellia* Superior Germplasm Resources. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [陈永忠 (2008) 油茶优良种质资源. 中国林业出版社, 北京.]
- Chen YZ, Luo J, Wang R, Chen LS, Wang XN (2013) Current status and prospects for the development of oil tea industry in China. *Grain Science and Technology and Economy*, (1), 10–12. (in Chinese) [陈永忠, 罗健, 王瑞, 陈隆升, 王湘南 (2013) 中国油茶产业发展的现状与前景. 粮食科技与经济, (1), 10–12.]
- Hajjar R, Hodgkin T (2007) The use of wild relatives in crop improvement: a survey of developments over the last 20 years. *Euphytica*, 156, 1–13.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hu BL, Wan Y, Wu L, Li X, Zhang JW, Luo XD, Xie JK (2011) Research advances in genetic diversity and its ecological conservation of endangered Dongxiang wild rice (*Oryza rufipogon* Griff.). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27, 5–11. (in Chinese with English abstract) [胡标林, 万勇, 郭磊, 李霞, 张金伟, 罗向东, 谢建坤 (2011) 濒危东乡野生稻遗传多样性及其生态保护学研究进展. 中国农学通报, 27, 5–11.]
- Hu X, Wu FC, Guo W, Liu N (2014) Identification of potential cultivation region for *Santalum album* in China by the MaxEnt ecologic niche model. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(5), 27–33. (in Chinese with English abstract) [胡秀, 吴福川, 郭微, 刘念 (2014) 基于MaxEnt生态学模型的檀香在中国的潜在种植区预测. 林业科学, 50(5), 27–33.]
- Jing PF, Wu KY, Gong Y, Han LM, Cui LJ (2015) Prediction of potential geological distribution of *Asarum* in China by MaxEnt model. *Plant Diversity and Resource*, 37, 349–356. (in Chinese with English abstract) [景鹏飞, 武坤毅, 龚晔, 韩立敏, 崔浪军 (2015) 药用植物细辛在中国的潜在适生区分布. 植物分类与资源学报, 37, 349–356.]
- Lei JC, Xu HG (2010) MaxEnt-based prediction of potential distribution of *Solidago canadensis* in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 26, 137–141. (in Chinese with English abstract) [雷军成, 徐海根 (2010) 基于MaxEnt的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测. 生态与农村环境学报, 26, 137–141.]
- Min TL (2000) Monograph of the Genus *Camellia*. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [闵天禄 (2000) 世界山茶属的研究. 云南科技出版社, 昆明.]
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Peterson AT (2007) Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34, 102–117.
- Peterson AT, Papeş M, Soberón J (2008) Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63–72.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Raxworthy CJ, Martinez-Meyer E, Horning N, Nussbaum RA, Schneider GE, Ortega-Huerta MA, Peterson AT (2003) Predicting distributions of known and unknown reptile species in Madagascar. *Nature*, 426, 837–841.
- Roura-Pascual N, Suarez A V, Gómez C, Pons P, Touyama Y, Wild AL, Peterson AT (2004) Geographical potential of Argentine ants (*Linepithema humile* Mayr) in the face of global climate change. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 271, 2527–2535.
- Sobek-Swant S, Kluza D A, Cuddington K, Lyons DB (2012) Potential distribution of emerald ash borer: what can we learn from ecological niche models using MaxEnt and GARP? *Forest Ecology and Management*, 281, 23–31.
- USDA-FAS (2015) Oilseeds: world markets and trade, 07. 10. <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/fas/oilseed-trade//2010s/2015/oilseed-trade-07-10-2015.pdf>. (accessed on 2016-06-15)
- Waltari E, Hijmans RJ, Peterson AT, Nyári ÁS, Perkins SL, Guralnick RP (2007) Locating Pleistocene refugia: comparing phylogeographic and ecological niche model predictions. *PLoS ONE*, 2, e563.
- Wang LH, Yang JX, Huang CL (2013) Modelling geographic distribution of *Malus hupehensis* with MaxEnt. *Journal of Anhui Agricultural University*, 40, 383–386. (in Chinese with English abstract) [王雷宏, 杨俊仙, 黄成林 (2013) 用MaxEnt模拟湖北海棠(*Malus hupehensis*)地理分布. 安徽农业大学学报, 40, 383–386.]
- Wang LH, Yang JX, Xu XN (2015) Analysis of suitable bioclimatic characteristics of *Pseudolarix amabilis* by using MaxEnt model. *Scientia Silvae Sinicae*, 51, 127–131. (in Chinese with English abstract) [王雷宏, 杨俊仙, 徐小牛 (2015) 基于MaxEnt分析金钱松适生的生物气候特征. 林业科学, 51 (1), 127–131.]
- Wang YS, Xie BY, Wan FH, Xiao QM, Dai LY (2007) Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models. *Biodiversity Science*, 15, 365–372. (in Chinese with English abstract) [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英 (2007) ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 15, 365–372.]
- Warren DL, Wright AN, Seifert SN, Shaffer HB (2014) Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern. *Diversity and Distributions*, 20, 334–343.
- Wei SG, Dai YJ, Duan QY, Liu BY, Yuan H (2014) A global soil data set for earth system modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6, 249–263.
- Yin XJ, Zhou GS, Sui XH, He QJ, Li RP (2013) Potential geo-

- graphical distribution of *Quercus wutaishanica* forest and its dominant factors. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(8), 10–14. (in Chinese with English abstract) [殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 何奇瑾, 李荣平 (2013) 辽东栎林潜在地理分布及其主导因子. 林业科学, 49(8), 10–14.]
- Yu YB, Wang QL, Kell S, Maxted N, Ford-Lloyd BV, Wei W, Kang DM, Ma KP (2013) Crop wild relatives and their conservation strategies in China. *Biodiversity Science*, 21, 750–757. (in Chinese with English abstract) [于燕波, 王群亮, Kell S, Maxted N, Ford-Lloyd BV, 魏伟, 康定明, 马克平 (2013) 中国栽培植物野生近缘种及其保护对策. 生物多样性, 21, 750–757.]
- Zhang HJ, Chen Y, Huang LJ, Ni HW (2011) Predicting potential geographic distribution of *Mikania micrantha* planting based on ecological niche models in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27, 413–418. (in Chinese with English abstract) [张海娟, 陈勇, 黄烈健, 倪汉文 (2011) 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测. 农业工程学报, 27, 413–418.]
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, Gao YB (2013) Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 21, 90–98. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆 (2013) 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 21, 90–98.]
- Zhu GP, Liu Q, Gao YB (2014) Improving ecological niche model transferability to predict the potential distribution of invasive exotic species. *Biodiversity Science*, 22, 223–230. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 刘强, 高玉葆 (2014) 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布. 生物多样性, 22, 223–230.]
- Zhuang RL (2012) *Oil-tea Camellia in China*, 2nd edn. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [庄瑞林 (2012) 中国油茶, 第2版. 中国林业出版社, 北京.]

(责任编辑: 张大勇 责任编辑: 黄祥忠)