热带亚热带植物学报　2018, 26(1): 24 ~ 32
Journal of Tropical and Subtropical Botany

基于 GIS 与 Maxent 模型的金花茶潜在适生区与保护研究

谭钰凡，左小清*
(昆明理工大学国土资源工程学院，昆明 650093)

摘要：为明确珍稀植物金花茶(*Camellia nitidissima*)的潜在分布，利用最大熵模型(Maxent)模拟金花茶在中国的潜在适生区，运用受试者工作特征(ROC)曲线分析法进行验证。结果表明，金花茶的适生区域主要集中在我国西南片区，与已知原生地重合但不局限于已有报道的地点。ROC 曲线分析法的面积 AUC 值为 0.992，表明预测结果可靠。Jackknife 检验表明，影响金花茶分布的最主要环境因子(阈值)是：年均温(24.3℃)、积温(7 515.84℃)、最干季湿度(14.5%)和最湿季均温(26.2℃)。缓冲区分析定量评价了人类活动对金花茶适生生境的干扰。这些有助于制定金花茶的保护规划。

关键词：金花茶；Maxent 模型；影响因子；潜在适生区；植物保护
doi: 10.11926/jtsb.3796

Studies on Potential Suitable Growth Areas and Protection of *Camellia nitidissima* Based on GIS and Maxent Model

TAN Yu-fan, ZUO Xiao-qing*
(*Kunming University of Science and Technology, Engineering College of Territorial Resources*, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to clear the potential distribution region of rare plant *Camellia nitidissima*, the Maxent model was used to simulate the potential suitable habitats of *C. nitidissima* in China based on its distribution data as well as combined with climate, elevation, land use types and other environmental data, and then it was verified by using the ROC curve analysis method. The results showed that the suitable growth area of *C. nitidissima* was mainly located in the southwest areas of China, which is coincident with the known native sites, but not limited to sites already reported. The AUC area was 0.992 by using ROC curve, indicating that the predicting results were reliability. The major environmental factors affected *C. nitidissima* distribution (threshold) by Jackknife test included the annual average temperature (24.3℃), accumulated temperature (7 515.84℃), humidity in the driest season (14.5%), and average temperature in the wettest season (26.2℃). The disturbance of human activities to the habitat of *C. nitidissima* was evaluated quantitatively by Buffer analysis. All of these would be helpful for setting out conservation planning of *C. nitidissima*.

Key words: *Camellia nitidissima*; Maxent model; Influence factor; Potential suitable area; Plant conservation

金花茶(*Camellia nitidissima*)被誉为“植物界的大熊猫”，具有特殊的色泽遗传基因，其繁衍很难被复制，填补了茶科(Theaceae)家族没有金黄色花朵的空白，具有极高的科研、观赏及经济价值。此外，金花茶特殊的保健治疗功能，如降脂、抑制肿瘤等已经得到广泛认可，具有极高的药用价值。全

收稿日期：2017-07-20　　**接受日期：**2017-10-24
基金项目：云南省教育厅科研基金项目([2016]ZZX051)资助
This work was supported by the Scientific Research Foundation of Department of Education in Yunnan (Grant No. [2016]ZZX051).
作者简介：谭钰凡(1992~)，女，硕士研究生，主要从事土地资源等方面研究。E-mail: 824705550@qq.com
* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 514012196@qq.com

世界 90% 的野生金花茶分布于中国广西防城港市十万大山的兰山支脉一带，以海拔 200~500 m 较常见，垂直分布的下限为海拔 20 m 左右。

金花茶喜温暖湿润气候，苗期喜荫蔽，进入花期后，颇喜透射阳光。对土壤要求不严，微酸性至中性土壤中均可生长。有较强耐低温性，耐涝力强。

近年来伴随社会经济的发展，国内外对金花茶的需求不断增加，金花茶的市场培育和推广种植越来越受到重视[1]；然而，由于滥砍乱伐、土地使用权和土地资源管理权的分离等原因，使金花茶的保护更为迫切。目前，对于金花茶的研究主要集中在病虫害、药理成分、生物活性、繁育等，而对该物种潜在适宜生长区未见报道。

目前结合物种分布信息与 GIS 技术研究物种分布格局的应用已比较普遍。其中利用物种分布模型对物种的地理空间分布预测和适宜性评价是物种保护和资源管理的一种较新兴手段[2]。物种分布模型是基于现有数据依据特定的算法和生态学原理模拟物种的生态位并投影到生态环境中，以物种出现概率的形式反映生境的适宜度等，在环境保护，资源调查等方面均有重要研究价值，具体应用包括自然保护区的设计，物种迁地保护的筛选等[3]。典型代表有 GARP、GLM、Maxent、HABITAT 等物种分布模型，其中，最大熵模型(Maxent)是根据物种现实分布点和物种分布区域的环境变量，运算得出目标物种在预测地区的可能分布情况，根据已有研究资料表明，因 Maxent 对于数据需求较低、稳定性好等优点已成为预测物种潜在生境的首选模型[4]。本文搜集已有的金花茶调查和研究资料、采集标本数据以及气候、土壤等要素的网络数字化信息，通过 Maxent 模型预测其在中国的潜在适生区，利用 GIS 进行适宜性等级划分并对关键的环境影响要素进行分析，以期为金花茶自然保护区的合理规划以及迁地保护提供科学的参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

通过查阅已有文献、地方植物志，搜索国家标本资源共享平台，整理出有代表性的全国金花茶标本位置记录 33 个，然后结合百度坐标拾取系统工具将记录整理为经纬度坐标，将其输入 Excel 整理为 Maxent 样本文件所需的数据格式并保存为.csv 文件。在 http://www.Worldclim.org/中下载年平均温(bio1)、昼夜温差月均值(bio2)、昼夜温差与年温差比值(bio3)、温度变化方差(bio4)、最热月最高温(bio5)、最冷月最低温(bio6)、年温变化范围(bio7)、最湿季均温(bio8)等 19 个精度及认可度均较高的生物气候图，在中国科学院资源环境数据中心下载全国的土地利用及高程图等专题地图。上述图层作为 Maxent 所需的环境变量图层，经 ArcGIS 10.0 掩膜方式裁剪并转换为统一地理边界、坐标系及象元大小后转化为 ASCII 文件保存备用。

1.2 方法

1.2.1 环境变量筛选

植物的生长经常受到多种环境因素的影响，根据相关研究[5–8]，本文选取海拔、坡向、坡度表征地形特点，年平均降水量、年平均温度、太阳辐射、湿润指数等因子表征湿热条件等，共备选 29 个环境图层，这就产生了测定多要素之间的相关关系问题。当要素之间高度相关，则称自变量间存在多重共线性。而较多的自变量因素，一方面多变量之间有一定的重叠性，过多会导致复杂性并干扰 Maxent 对于响应关系、贡献率的评判；另一方面多个变量相互间的关系十分复杂，特别是本文涉及的生物气候变量，有的不是直接对反应变量产生影响，而是通过对其他自变量的作用间接地影响反应变量。故在 SPSS 中在相关分析和线性回归的基础上进行多重共线性检验及通径分析，尽可能全面地考虑各种环境因素又选择最相关的变量因子进行预测和评价[9,12]。

首先将各备选环境图层属性编辑进 SPSS 并进行标准化处理，然后通过皮尔逊相关对多重共线的变量进行第一轮筛选(表 1)，剔除相关系数大于 0.7 的变量；接着通过线性回归里的线性分析指标 Standardized coefficients[9]和共线性指标 VIF (<10)，分别判定第二轮入选因子的直接影响性和多重共线性，最终从统计量角度确定环境指标(表 2)。

1.2.2 Maxent 模型模拟

将整理好的样本点分布数据和筛选出的环境变量图层加载进 Maxent 3.3，依据模型特征，当训练数据介于 15~79 时，使用 linear、quadratic 和 hinge 特征要素；勾选 create response curve 绘制环境变量是如何决定预测的发生概率值的线，do jackknife 测量每个环境变量的重要性。输出形式选择 logistic,

表 1 皮尔逊相关检验

Table 1 Pearson correlation test

序号 No.	指标 Index	最湿月湿度 Humidity in the wettest month	海拔 Altitude	积温 Accumulate temperature
1	最干季湿度 Humidity in the driest season	0.601**	0.457**	0.672**
2	最湿月湿度 Humidity in the wettest month	1	0.617**	0.513**
3	年均湿度 Annual mean humidity	–0.119 801 031	–0.123 282 313	–0.073 882 579
4	最湿季均温 Mean temperature in the wettest season	–0.018 947 36	0.151 897 901	–0.038 6
5	年温变化范围 range of annual temperature	0.374*	–0.088 632 092	0.363*
6	温度变化方差 Variance of temperature change	0.270 080 954	0.337*	–0.069 077 904
7	昼夜温差月均值 Monthly mean temperature difference from day to night	0.115 251 024	0.188 067 01	0.666**
8	年均温 Mean annual temperature	–0.139 312 817	0.296 773 337	–0.207 039 805
9	年降水量 Annual precipitation	0.187 160 795	0.019 267 22	–0.143 424 565
10	地形 Terrain	0.252 1103 8	0.191 474 013	–0.019 749 289
11	海拔 Altitude	0.617**	1	0.384*
12	土壤类型 Soil type	0.080 460 911	–0.036 696 715	–0.046 322 7
13	湿润指数 Humidity index	0.003 041 383	–0.158 224 044	0.015 686 002
14	积温 Accumulate temperature	0.513**	0.384*	1
15	坡向 Aspect	–0.036 964 439	–0.048 090 278	0.032 774 587
16	日较差 Daily range	–0.365	–0.017 512 222	0.152 190 703
17	太阳辐射 Solar radiation	–0.076 400 845	–0.167 430 932	–0.101 568 436
18	坡度 Slope	0.367*	0.618**	0.334*

表 2 通径系数与 VIF 检验

Table 2 Path coefficient and VIF test

序号 No.		β 通径系数 β Path coefficient	Zero-order	Prtial	Part	VIF
1	最干季湿度 Humidity in the driest season	0.146	0.491	0.77	0.094	2.414
2	年均湿度 Annual mean humidity	0.090	0.141	0.047	0.025	1.444
3	最湿季均温 Mean temperature in the wettest season	0.127	0.061	0.149	0.079	2.602
4	温度变化方差 Variance of temperature change	0.186	0.334	0.288	0.157	1.395
5	年均温 Annual temperature range	0.081	0.232	0.100	0.053	2.335
6	年降水量 Annual precipitation	0.052	0.020	0.086	0.045	1.351
7	地形 Terrain	0.106	0.200	0.181	0.096	1.218
8	海拔 Altitude	0.462	0.749	0.503	0.305	2.302
9	土壤类型 Soil type	0.137	0.093	0.213	0.114	1.442
10	湿润指数 Humidity index	0.150	0.000	0.237	0.127	1.385
11	积温 Accumulate temperature	0.339	0.519	0.394	0.224	2.291
12	坡向 Aspect	0.082	0.049	0.146	0.077	1.144
13	太阳辐射 Solar radiation	0.156	0.006	0.269	0.146	1.140

结果以概率形式便于描述。选取 25%的分布点作为测试集，75%的分布点为训练集。其余参数选择默认设置分析结果以 ASCII 类型文件输出[10–11]。

1.2.3 Maxent 模型的精度检验

Maxent 采用接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic curve，ROC)分析法进行模型精度检验，ROC 曲线基于非阈值依赖判断(threshold-independent evaluation)模型精度，即以预测结果的每一个值作为可能的判断阈值，由此计算得到相应的灵敏度和特异度。以特异度(1-specificity) (实际没有该物种分布而被预测为阳性的概率)为横坐标，灵敏度(1-omission rate) (实际有该物种分布且预测为阳性的概率)为纵坐标绘制成曲线，该曲线与横坐标围成的面积即为 AUC (area under curve)值，用以评价模型预测结果的精准度。一般来说, 0.5≤AUC<0.6 为失败，0.6≤AUC<0.7 为较差, 0.7≤AUC<0.8 为一般，0.8≤AUC<0.9 为良好, 0.9≤AUC<1.0 为优秀。AUC 值越接近 1，说明环境变量与预测物种

地理分布之间的相关性越大，模型预测结果越准确[10,13]。

1.2.4 适生区分析

将 Maxent 模型导出的潜在适生图导入 ArcGIS 转换为栅格图并根据统计学原理关于概率“存在性”的表述及经验法将适生区划分为 4 个等级：0~0.12 为非适生区，0.12~0.25 为低度适宜生长区，0.25~0.5 为中度适宜生长区，大于 0.5 为高度适宜生长区[10](图 1)。

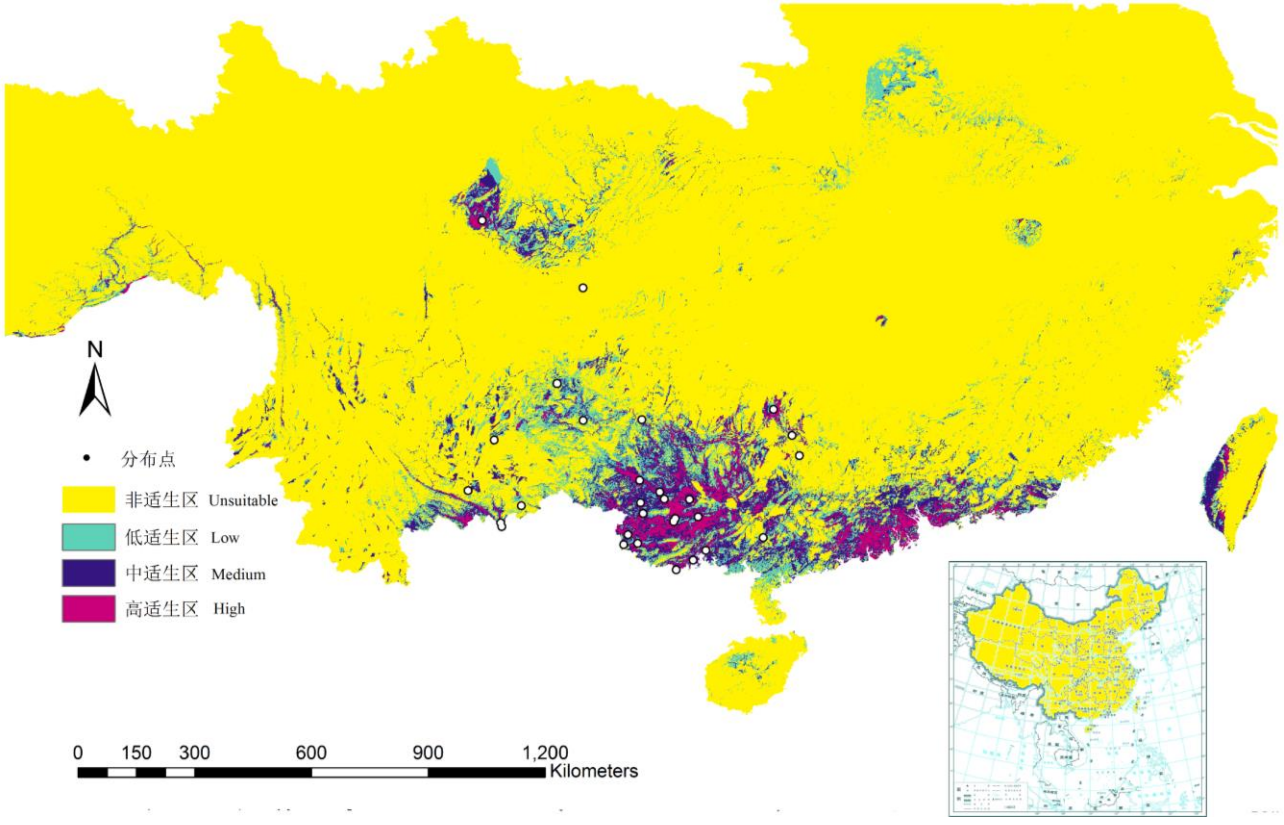

图 1 金花茶在中国的潜在适生区分布预测

Fig. 1 Predicted potential suitable areas of *Camellia nitidissima* in China

2 结果和分析

2.1 适生区预测

结合金花茶实际发生状况和 Maxent 模拟结果，金花茶适生区主要位于 19°30′~33°N、93°~122°E 的中国东部地区(图 1)，主要集中在云南、贵州、四川、广西、广东、海南和台湾等省区。

金花茶最适宜区主要集中在南亚热带和边缘热带湿润气候区，集中于广西和广东珠江三角洲西部等地，为北热带半常绿季雨林、南亚热带季风常绿阔叶林区。最适宜区年平均气温为 22℃~24℃，历年最低温 2.8℃，历年最高温 36.5℃，年降雨量＞1 100 mm，海拔 200~1 700 m。气候整体湿热，这与已知的金花茶生长习性以及原生地环境条件相符合[5,8]。

金花茶中度适宜区多与高度适宜区相间杂，以中度适生区最为密集的台湾省西南部地区和四川东南部分析，台湾西南部属热带冬季寡雨气候，南亚热带季风常绿阔叶林区，季节性明显，干湿交替，年均温 25℃，夏季长，日照充足，雨量充沛，年平均湿度较高；四川西南部属中亚热带气候，中亚热带常绿阔叶林区，年均温为 16℃~18℃，年降雨量 1 000~1 300 mm，夏季长，无霜期长，太阳辐射不强，湿度大，满足金花茶生长所需的自然生态条件[5,8]。

金花茶低适宜区属亚热带与温带过渡带，平均气温 15℃，平均年总辐射量约为 481~511 kJ cm^2；≥10℃的活动积温在 4 700℃~5 000℃；无霜期平均在 220 d 以上；降雨量在 750~960 mm。生态环境有符合金花茶生长的条件，也有报道金花茶引种到中亚热带地区也能正常生长发育[5,8]。

金花茶为热带树种，其植被为被热带季雨林或南亚热带阔叶林或次生林，故不适宜区显示为全国大部分地区，相较于适生区，热量不足，水分、土壤条件欠佳，这与已知的适生区和非适生区各自的气候环境与递变规律相符，也与其极其狭窄的原生分布状况相符。但整体潜在适生区图与已知分布区对比表明金花茶在我国的分布还远没有达到其最大分布范围，有较大潜力。

2.2 环境变量综合分析

以刀切法为模型精度评判指标，Jackknife 结果表明，模型训练集的 AUC 值为 0.992，测试集的 AUC 值为 0.992，明显大于随机预测分布模拟值 0.5，且已达到优秀水平。这表明 Maxent 模型预测出的金花茶分布记录不具有随机性，即模型对金花茶在中国潜在适生区的预测结果可靠(图 2)，说明模拟成果可靠且精度较高。

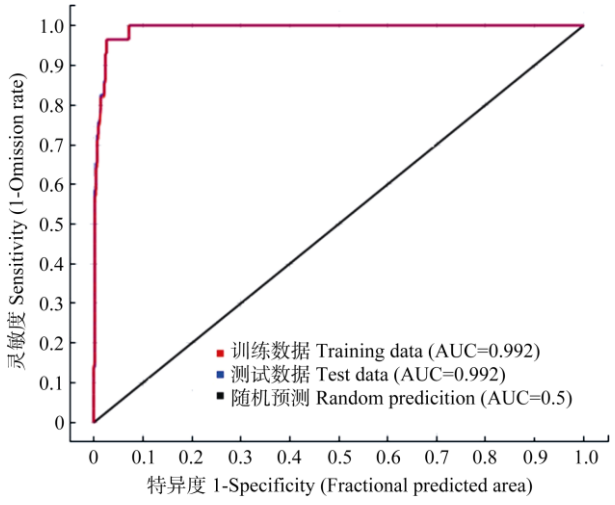

图 2 Maxent 模型对金花茶预测结果的 ROC 曲线验证

Fig. 2 ROC curve verification of prediction process for *Camellia nitidissima* by Maxent model

环境变量对 Maxent 模型的贡献率(图 3)表明，最干季湿度(26.3%)、最湿季均温(18.6%)、年平均湿度(14.3%)、地形(12%)是对 Maxent 模型模拟预测贡献最大的 4 个变量，累计贡献率达 71.2%，是模拟适生区很必要的要素，能反映生境分布的大部分信息；其次，所有入选变量都有不同的贡献率，贡献最小的变量年平均降水也为 0.4%左右，说明没有无关变量参与模拟分析，环境变量筛选有效。

重要性最大的变量为年均温(图 4)、积温，这与

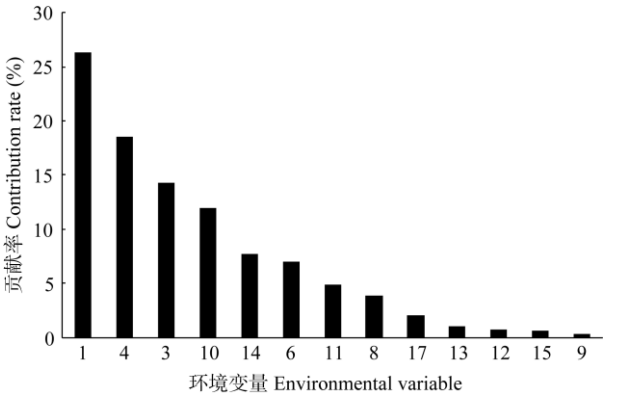

图 3 环境变量的贡献率。变量编号见表 1。

Fig. 3 Contribution rate of environmental variables. Variable No. see Table 1.

温度调节着金花茶的生长发育过程并影响产量及品质的生物特性相符。而积温一方面可以反映作物从播种到成熟全过程的一定温度累计，更是衡量作物热量需求的指标，金花茶作为热带性树种，对热量的需求较高。年降水、年平均湿度、最干季湿度、最干季均温、温度变化方差也是重要性较高的变量。金花茶原生地干湿交替明显，相对湿度对金花茶开花起关键作用；其不同时期对于温度、降水、光照需求不同且差异明显，但自身生长习性主要是喜暖喜湿耐荫[14]。从图 4 可见，当所有变量累计时重要性得分最高，有变量不参与模拟时，重要性减少微弱，进一步说明所选环境变量与模拟相关而又自身包含有用且充分的信息，综上所述，本研究所选环境变量较好地反映和刻画其生长习性。

2.3 金花茶潜在适生分布区的缓冲分析

对种群濒危植物的迁地保育和原地及迁地结合的实施技术体系的研究是我国植物保护研究的重要方向之一。金花茶自身的稀缺性和受威胁性满足了保护的前提，其重要的经济潜力符合现阶段我国国情的植物资源评价及发掘利用战略，而中国科学院华南植物园采用 ISSR 分子标记技术对金花茶的 3 个迁地保护居群进行了遗传多样性分析，并与其野生居群遗传参数比较，表明迁地保护居群基本有效地保护了金花茶的遗传多样性总水平[17]，达到了濒危物种保护的目标。金花茶自然原生地范围狭窄，种群数量少，分布零星，如不加以人为干预保护和种植很难分布扩大规模满足生存和生产需要，另一方面，自然原生地生境由于其自生药用价值的利益驱使或缺乏管理而屡遭破坏和砍伐，人为因素

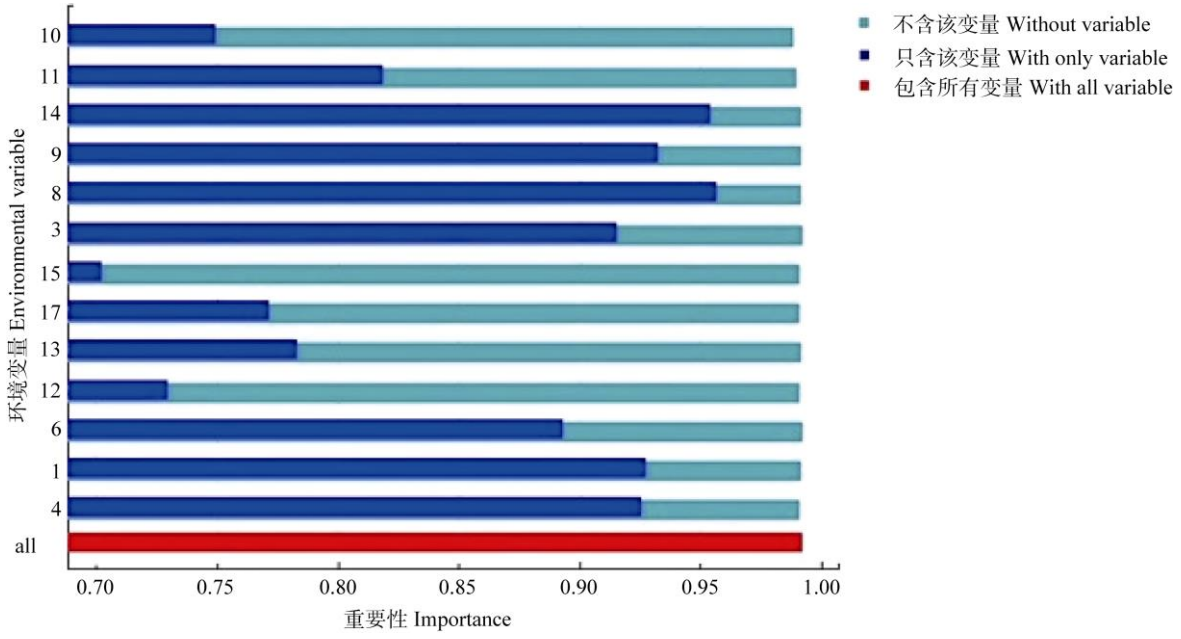

图 4 基于 AUC 的 Jackknife 法环境变量重要性测试图

Fig. 4 Test diagram of AUC based on environmental variables importance by Jackknife method

成为保护和研究其生长环境的必要因素。综上所述，本研究在考虑自然环境要素下获得潜在适生区的基础上，结合人为因素的影响，如居民点可与过度采挖金花茶的直接影响相联系，林地、道路间接影响金花茶的伴生环境，最终确定利用林地、建设用地、物种资源保护区为代表的土地利用数据进行缓冲分析，对金花茶的保护区规划和引种栽培方向给予参考[16]。

从 2015 年中国 1∶10 万土地利用分类图中提取城镇用地、农村居民点、道路建设用地等人类活动与自然界交互作用频繁且干扰性较强的地类作为人为因素代表；接着，考虑限制金花茶生长的荫庇条件，提取灌木林等有郁闭度的林地作为参考人工环境，两者合并为林地与建设用地图层；从中国生态功能保护区图里提取物种资源保护区作为保护区图层。参阅自然保护区设计规范等资料，将上述两图层分别以半径 300、500 m 生成缓冲区，最后叠加金花茶潜在适生区图进行缓冲分析(图 5)。

人为干扰对其生境的影响不可避免且不容忽视，代表人为因素的林地与建设用地图层缓冲区覆盖了绝大多数金花茶适生区，特别是中高度适生区。已经建立的，以西南保护片区为例，西南野生生物种质资源库为国家重大科学工程项目，致力于我国野生生物种质资源的国家安全保障和我国生物技术产业发展，而迁地保育物候观察数据、资源评价数据等收集管理和数字信息化远跟不上我国植物迁地保护快速发展的趋势[17]。如图所示，广西作为金花茶高、中度适生区面积最大最密集地区，已知的广西防城金花茶国家级自然保护区片仅覆盖了少部分区域，应扩大保护区范围以满足金花茶的生长及扩散需要。云南省疆域辽阔，气候多变，高、中、低适生区均有分布，但较为零散，已有的云南西南角片区覆盖了部分中度适生区，还需以红河州为代表的高适生区的东部区域延伸，并连通形成生态廊道；四川省高、中、低适生区较为集中，但目前四川中部的物种保护区仅仅与少部分中、低适生区有联系，如建立金花茶保护区，则规划范围向西南方向扩充。西藏东南边陲片区的物种保护区较好地覆盖了金花茶潜在适生区，目前其范围满足金花茶潜在分布状态且有扩散空间。

3 讨论

金花茶目前的研究主要集中于基础理论研究，如杂交育种、染色体数目和核型、金花茶的分类与系统发育、营养繁殖和组织培养是其研究热点，而应用研究较少[17]。已有的关于生境及适宜性的研究，地域局限原生地广西为研究范围，影响因素局限于气候，或对开花期等针对性阶段讨论，且适宜性区划多为传统且主观性较大的专家打分方法。本

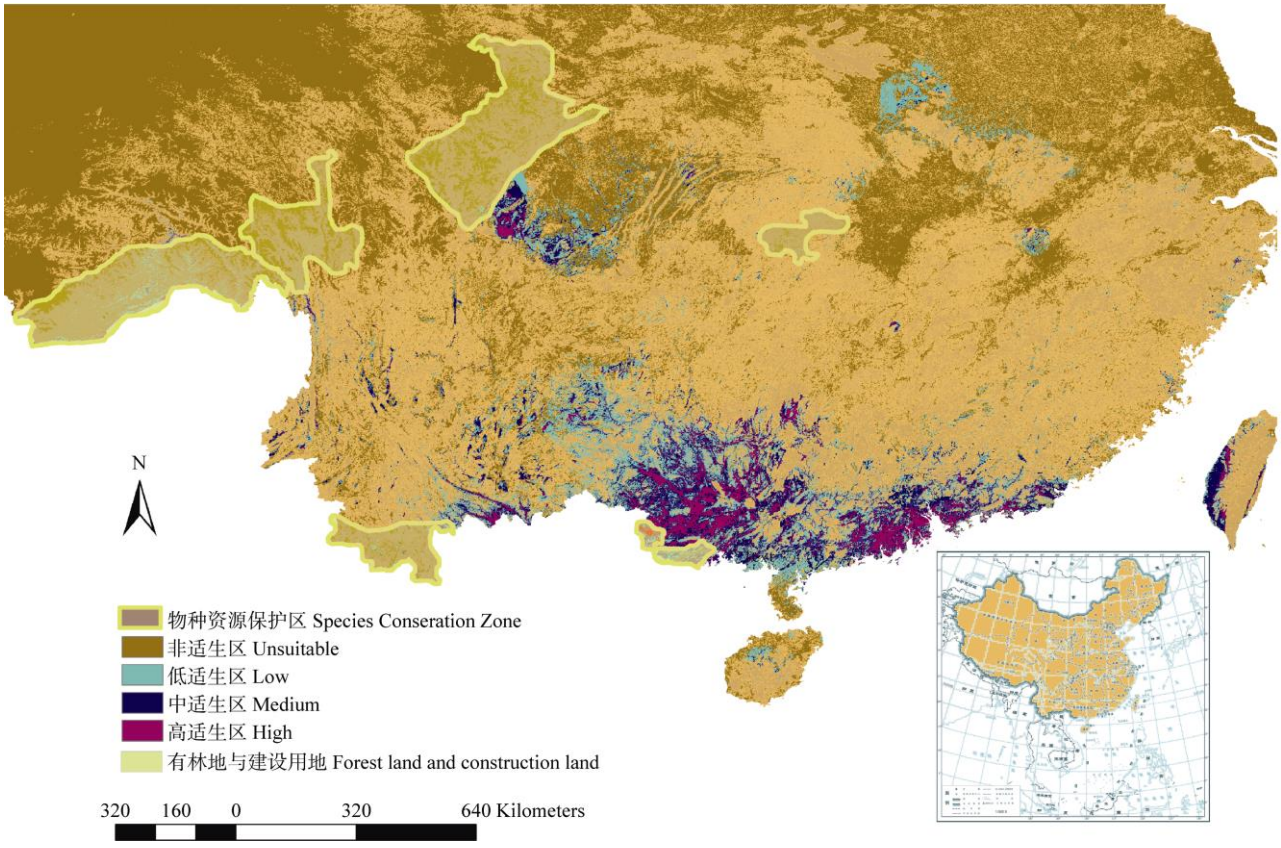

图 5 基于潜在分布区和土地利用数据的缓冲区分析

Fig. 5 Buffer analysis based on potential distribution areas and land use data

文利用 Maxent 模型进行适生区预测，应用实际分布点与环境变量之间的响应函数建模，进行多次运算与优化选择得到的适生区，较好地避免了主观性且对于适生生境的环境要素进行定量描述，如适宜性以产生的详细概率划分，低概率的区域虽然适宜度不足但可表明有分布的可能性，有利于更精准地评价。而 Maxent 模拟精度(AUC)达 0.992，结合实地调查验证[18]，如云南个旧等地的金花茶生存状况与结果相符，说明预测结果较真实可靠，而且也从一定程度上反映了此模型对于适宜性评价的适用性。本研究以全国的生境为研究对象，潜在适生区对于更大范围的农业规划调整有参考价值；对于引种试验、迁地保护也有指导意义，如引种地的选择、已有保护区扩建等，也因此从一定程度上节省了人力物力并提高工作效率。

无论从指标选取意义的角度出发，还是考虑模型的预测精度会受环境变量的相关性影响，环境变量的筛选都至关重要。本文最初选取了 29 个要素，因为气候条件始终是影响金花茶生长的诸多环境条件中最重要的影响因素[18]，其中 24 个为气候要素，剩余为土壤地形要素，尽可能全面描述环境条件。然后利用 SPSS 软件进行筛选得 13 个，通过 Maxent 结果验证了筛选的有效性，其贡献率和重要性也得到了定量刻画。在此基础上，利用 Arcgis 结合非自然要素进行进一步分析，加入对金花茶生长有重要影响、也是原生地环境重要构成要素的荫蔽因素，提取了灌木林等图层；结合道路、居民点等有代表性的人为因素综合分析，得出指导性结论及建议。但环境图层数据时效性有限，可能会对预测结果产生一定偏差。而在 SPSS 的筛选过程，由于数据有限的样本容量，从而对判定精度也产生一定影响。整个模拟过程还可在更充分的数据支持下进行更即时甚至是未来一定时期的更广时空尺度预测,从而使模型界定的潜在生态位能更好地反映该植物的分布与环境要素之间的匹配[16]。

参考文献

[1] HUANG M L, LIAO X P, LUO Y Y, et al. Climate ecological

adaptability and division of *Camellia nitidissima* in Guangxi based on GIS [J]. Chin Agric Sci Bull, 2014, 30(1): 163–168.
黄梅丽, 廖雪萍, 罗燕英, 等. 基于GIS的广西金花茶气候生态适宜性区划 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(1): 163–168.

[2] XU X T, YANG Y, WANG L S. Geographic distribution and potential distribution estimation of *Pseudotaxus chienii* [J]. J Plant Ecol, 2008, 35(5): 1134–1145. doi: 10.3773/j.issn.1005−264x.2008.05.018.
徐晓婷, 杨永, 王利松. 白豆杉的地理分布及潜在分布区估计 [J]. 植物生态学报, 2008, 35(5): 1134–1145. doi: 10.3773/j.issn.1005−264x.2008.05.018.

[3] LI G Q, LIU C C, LIU Y G, et al. Advances in theoretical issues of species distribution models [J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(16): 4827–4835. doi: 10.5846/stxb201212031735.
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. doi: 10.5846/stxb201212031735.

[4] WU J G. Potential effects of climate change on the distribution of seven protected plants in China [J]. J Wuhan Bot Res, 2010, 28(4): 437–452. doi: 10.3724/SP.J.1142.2010.40437.
吴建国. 气候变化对7种保护植物分布的潜在影响 [J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(4): 437–452. doi: 10.3724/SP.J.1142.2010.40437.

[5] WEI X, JIANG Y S, WEI J Q, et al. Investigation on the geographical distribution and habitat of *Camellia nitidissima* [J]. Ecol Environ, 2007, 16(3): 895–899. doi: 10.3969/j.issn.1674−5906.2007.03.039.
韦霄, 蒋运生, 韦记青, 等. 珍稀濒危植物金花茶地理分布与生境调查研究 [J]. 生态环境, 2007, 16(3): 895–899. doi: 10.3969/j.issn.1674−5906.2007.03.039.

[6] CHAI S F, TANG J M, WANG M L, et al. Photosynthetic and physiological characteristics of *Camellia petelotii* seedlings under drought stress [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2015, 35(2): 322–328. doi: 10.7606/j.issn.1000−4025.2015.02.0322.
柴胜丰, 唐健民, 王满莲, 等. 干旱胁迫对金花茶幼苗光合生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(2): 322–328. doi: 10.7606/j.issn.1000−4025.2015.02.0322.

[7] YANG Q H, LI X Q, YANG H S, et al. Photosynthetic ecophysiological characteristics of *Camellia nitidissima* seedlings [J]. J Beijing For Univ, 2010, 32(2): 57–63. doi: 10.13332/j.1000−1522.2010.02.010.
杨期和, 李旭群, 杨和生, 等. 金花茶幼苗光合生理生态特性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 57–63. doi: 10.13332/j.1000−1522.2010.02.010.

[8] JIANG Y S, TANG H, WEI X, et al. Introduction and acclimatization of *Camellia tunghiensis* a rare and endangered plant [J]. Guihaia, 2010, 30(3): 362–366. doi: 10.3969/j.issn.1000−3142.2010.03.016.
蒋运生, 唐辉, 韦霄, 等. 珍稀濒危植物东兴金花茶引种驯化研究 [J]. 广西植物, 2010, 30(3): 362–366. doi: 10.3969/j.issn.1000−3142.2010.03.016.

[9] DU J J, CHEN Z W. Method of path analysis with SPSS linear regression [J]. Bull Biol, 2010, 45(2): 4–6. doi: 10.3969/j.issn.0006−3193.2010.02.002.
杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法 [J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4–6. doi: 10.3969/j.issn.0006−3193.2010.02.002.

[10] LIU X Y, LI J S, ZHAO C Y, et al. Prediction of potential suitable area of *Ambrosia artemisiifolia* L. in China based on Maxent and ArcGIS [J]. J Plant Protec, 2016, 43(6): 1041–1048. doi: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2016.06.023.
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(6): 1041–1048. doi: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2016.06.023.

[11] QI G J, GAO Y, HUANG D C, et al. Historical invasion, expansion process and the potential geographic distributions for the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* in China based on Maxent [J]. J Plant Protec, 2012, 39(2): 129–136. doi: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2012.02.006.
齐国君, 高燕, 黄德超, 等. 基于 Maxent 的稻水象甲在中国的入侵扩散动态及适生性分析 [J]. 植物保护学报, 2012, 39(2): 129–136. doi: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2012.02.006.

[12] SUN Y, SHI M C, PENG H, et al. Forest lighting fire forecasting for Daxing'anling Mountains based on Maxent model [J]. Chin J Appl Ecol, 2014, 25(4): 1100–1106. doi: 10.13287/j.1001−9332.2014.0086.
孙瑜, 史明昌, 彭欢, 等. 基于 Maxent 模型的黑龙江大兴安岭森林雷击火火险预测 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1100–1106. doi: 10.13287/j.1001−9332.2014.0086.

[13] GAO B, WEI H Y, GUO Y L, et al. Using GIS and Maxent to analyze the potential distribution of *Abies chensiensis* [J]. Chin J Ecol, 2015, 34(3): 843–852. doi: 10.13292/j.1000−4890.2015.0114.
高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 应用GIS和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 843–852. doi: 10.13292/j.1000−4890.2015.0114.

[14] PEI K C, XU W L, LUO H R, et al. Climate adaptability of *Camellia nitidissima* Chi at flowering stage in Fangcheng, Guangxi [J]. J S Agric, 2016, 47(12): 2084–2090. doi: 10.3969/j:issn.2095−1191.2016.12.2084.
裴开程, 许文龙, 罗浩然, 等. 广西防城金花茶花期气候适应性分析 [J]. 南方农业学报, 2016, 47(12): 2084–2090. doi: 10.3969/j:issn.

2095−1191.2016.12.2084.

[15] XU Z F, HUANG J Y, HU H B, et al. A commentary on plant *ex situ* conservation and its researches in China nearly thirty years [J]. Guihaia, 2008, 28(6): 764–774. doi: 10.3969/j.issn.1000−3142.2008.06.013.
许再富, 黄加元, 胡华斌, 等. 我国近 30 年来植物迁地保护及其研究的综述 [J]. 广西植物, 2008, 28(6): 764–774. doi: 10.3969/j.issn.1000−3142.2008.06.013.

[16] MA S M, NIE Y B, DUAN X, et al. The potential distribution and population protection priority of *Amygdalus mongolica* [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(9): 2960–2966. doi: 10.5846/stxb201308292173.
马松梅, 聂迎彬, 段霞, 等. 蒙古扁桃植物的潜在地理分布及居群保护优先性 [J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2960–2966. doi: 10.5846/stxb201308292173.

[17] DENG G Y. Literature analysis of *Camellia nitidissima* in China [J]. Guangxi Trop Agric, 2001(1): 40–42. doi: 10.3969/j.issn.2095−0764.2001.01.025.
邓桂英. 我国金花茶研究的文献分析 [J]. 广西热带农业, 2001(1): 40–42. doi: 10.3969/j.issn.2095−0764.2001.01.025.

[18] ZHANG G L, ZHANG G S, ZHANG K, et al. Investigation and analysis of wild *Camellia fascicularis* in Yunnan Province [J]. Guangdong For Sci Technol, 2015, 31(1): 45–48. doi: 10.3969/j.issn.1006−4427.2015.01.009.
张贵良, 张贵生, 张昆, 等. 云南金花茶野生资源调查与分析 [J]. 广东林业科技, 2015, 31(1): 45–48. doi: 10.3969/j.issn.1006−4427.2015.01.009.

[19] MOU Y L. Potential distribution of the forests in northern china and their variation trend under future climate scenario [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
牟艳玲. 中国北方森林潜在分布及未来变化趋势 [D]. 兰州: 兰州大学, 2010.