

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.008

论文标题： 中国珍稀濒危龙脑香科树种分布预测及保护优先区研究

作　　者： 黎宏琴，殷晓洁，王　妍，等

收稿日期： 2025-06-28

引文格式： 黎宏琴,殷晓洁,王妍,等.中国珍稀濒危龙脑香科树种分布预测及保护优先区研究[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):80-90.

LI H Q, YIN X J, WANG Y, et al. Prediction of the distribution of rare and endangered Dipterocarpaceae tree species in China and research on priority conservation areas[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):80-90.

相关论文推荐

Recommended articles

不同气候情景下小兴安岭3个珍稀易危树种的潜在分布预测

Prediction of potential distribution of three protective tree species in Xiaoxing'an mountain under different climatic scenarios

基于MaxEnt和ArcGIS的赤皮青冈在中国的潜在适生区预测

Prediction of the potential distribution of *Cyclobalanopsis gilva* in China based on the MaxEnt and ArcGIS model

基于MaxEnt模型的珠海市红树林潜在适生区分析

Research on the potential suitable habitat of mangroves analysis in Zhuhai City based on MaxEnt modeling

基于MaxEnt模型预测湖南省榧树适宜分布区

Identification of suitable distribution areas for *Torreya grandis* in Hunan Province based on the MaxEnt model

气候变化情景下细叶云南松的潜在分布预测

Prediction of potential distribution of *Pinus yunnanensis* under climate change scenarios

气候变化下中国珍稀濒危柏科树种潜在适生区分布

Distribution of potential suitable areas of rare and endangered Cupressaceae species in China under climate change

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.008 http: //qks.csuft.edu.cn

中国珍稀濒危龙脑香科树种分布预测及保护优先区

黎宏琴[1, 3]，殷晓洁[1, 2, 3]，王 妍[2]，唐继敏[2]

（1. 西南林业大学 林学院，云南 昆明 650224；2. 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室，云南 昆明 650224；3. 云南省跨境森林保护空间智能工程国际联合实验室，云南 昆明 650224）

摘 要：【目的】模拟和预测中国珍稀濒危龙脑香科树种的适生区分布，进行保护优先区和保护空缺分析，为其保护和管理提供依据。【方法】基于气候、地形、土壤及人类影响因子，利用 R 语言优化的 MaxEnt 模型模拟并预测中国 8 种珍稀濒危龙脑香科乔木的适生区及变化趋势；结合 Marxan 模型，识别珍稀濒危龙脑香科乔木树种的保护优先区，对其进行保护空缺分析。【结果】1）使用优化的 MaxEnt 模型模拟各树种适生区精度高，AUC 值均大于 0.971；2）中国珍稀濒危龙脑香科植物主要分布于云南、海南和广西等南方热带地区，分布范围较集中；3）年均温、等温性及人类活动是影响龙脑香科树种适生区分布的主导影响因子；其中，年均温对龙脑香科各树种的影响最大，贡献率均值达到 52.9%；4）在 SSPs126 和 SSPs585 情景下，东京龙脑香、狭叶坡垒、望天树和青梅适生区面积减少 0.29% ～ 60.00%，适生区质心向西南迁移；云南娑罗双、广西青梅则扩张 8.60% ～ 52.22%，分别向西北和东北迁移；坡垒、无翼坡垒在 SSPs126 情景下适生区分别减少 21.70%、1.61%，在 SSPs585 情景下扩张 26.14%、13.01%，且质心均向东北迁移；5）龙脑香科珍稀濒危树种的保护优先区主要分布于云南省南部和海南省中部，目前受保护面积仅为 0.515 6×10^4 km^2。【结论】优化后的 MaxEnt 模型能够很好地预测龙脑香科各树种适生区，优先适生区受保护面积较少，应加大其保护力度，扩大各树种的分布范围。

关键词：珍稀濒危；龙脑香科；MaxEnt；Marxan；气候变化

中图分类号：S717 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)06-0080-11

Prediction of the distribution of rare and endangered Dipterocarpaceae tree species in China and research on priority conservation areas

LI Hongqin[1,3], YIN Xiaojie[1,2,3], WANG Yan[2], TANG Jimin[2]

(1.College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Mountainous Rural Ecological Environment Evolution and Pollution Control, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Yunnan Province Cross-border Forest Protection Space Intelligent Engineering International Joint Laboratory, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract:【Objective】In order to simulate and predict the suitable habitat distribution of rare and endangered Dipterocarpaceae tree species in China, conduct conservation priority area and conservation GAP analysis, and to provide a basis for their protection and management.【Method】Based on climate, terrain, soil, and human impact factors, MaxEnt model optimized was used with R language to simulate and predict the suitable habitats and changing trends of eight rare and endangered Dipterocarpaceae trees in China. The Marxan model was combined to identify priority areas for the protection of rare and endangered Dipterocarpaceae tree species and conducted a protection GAP analysis.【Result】The results showed that: 1) The optimized MaxEnt model simulated the suitability zone of various tree species with high accuracy, with AUC values greater than 0.971; 2) Rare and endangered Dipterocarpaceae plants in China are mainly distributed in southern tropical regions such as Yunnan, Hainan, and Guangxi, with a relatively concentrated distribution range; 3) Annual mean temperature, isothermality, and human impact factors are the dominant factors affecting the distribution of the suitable habitat of Dipterocarpaceae tree species. Among these, annual mean temperature has the greatest impact on Dipterocarpaceae tree species, with an average contribution rate of 52.9%; 4) Under the SSPs126 and SSPs585 scenarios, the suitable areas for *Dipterocarpus*

收稿日期（Received）：2025-06-28 **修订日期**（Revised）：2025-08-15

基金项目：国家自然科学基金项目（31700467）；云南省重大科研专项（202202AD080010）；云南省基础研究专项（202401AT070294）；云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目（XDYC-QNRC-2022-0251）；云南省重点研发计划项目（202503AP140004）。

第一作者：黎宏琴（pear_liii@126.com）硕士研究生。 **通信作者：**殷晓洁（xjyinanne@163.com），副教授，硕士研究生导师。

引文格式：黎宏琴 , 殷晓洁 , 王妍 , 等 . 中国珍稀濒危龙脑香科树种分布预测及保护优先区 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):80-90.

LI H Q, YIN X J, WANG Y, et al. Prediction of the distribution of rare and endangered Dipterocarpaceae tree species in China and research on priority conservation areas[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):80-90.

retusus, *Hopea chinensis, Parashorea chinensis, Vatica mangachapoi* decrease by 0.29% to 60.00%, and the center of gravity of the suitable areas shifts southwestward. *Shorea assamica* and *Vatica guangxiensis* expand by 8.60% to 52.22%, migrating northwest and northeast, respectively. The suitable areas for *Hopea hainanensis* and *Hopea reticulata* land decrease by 21.70% and 1.61%, respectively, under the SSPs126 scenario, and expand by 26.14% and 13.01%, respectively, under the SSPs585 scenario, with their centers of gravity shifting northeastward; 5) The priority areas for the protection of rare and endangered tree species of the Dipterocarpaceae family are mainly distributed in southern Yunnan Province and central Hainan Province. Currently, the protected area is only 0.515 6×10^4 km^2. 【Conclusion】The optimized MaxEnt model can effectively predict the suitable habitats of various tree species in the Dipterocarpaceae. The priority suitable habitats are not sufficiently protected, so efforts should be made to strengthen their protection and expand the distribution range of each tree species.

Keywords: rare and endangered; Dipterocarpaceae; MaxEnt; Marxan; climate change

全球气候变化直接影响物种的栖息环境 [1]，乔木较其他植被类型更容易受环境影响 [2]，尤其珍稀濒危乔木种因其数量较少、适生区有限，伴随土地利用、森林砍伐及城市化等造成的栖息地丧失和生态系统退化 [3]，珍稀濒危树种的生长与分布受到进一步威胁。

龙脑香科 Dipterocarpaceae 树种是热带雨林的核心植物群，起源于白垩纪时期，分布于亚洲及非洲热带。中国的龙脑香科树种主要分布于海南、云南南部、广西南部和西藏东南部地区 [4]。龙脑香科树种在生态方面发挥着重要作用，并可为雨林动物提供栖息地；其材质优良，用途广泛，具有重要的经济价值 [5]。受气候变化、人类活动干扰等诸多不利影响，许多龙脑香科树种已列入《国际自然保护联盟》（IUCN）濒危红色名录。保护这些树种对维持全球生态平衡和应对气候变化至关重要，但目前缺乏对气候变化下龙脑香科珍稀濒危树种分布及保护的系统研究。

MaxEnt 模型因其操作简单易行、运算时间少、预测精度高、样品数据需求低等优势 [6-7]，被广泛应用于气候变化对物种分布的影响研究 [8]。但未经优化的模型预测结果可能存在严重的拟合偏差 [9]，为提高模型的准确性，可优化 MaxEnt 模型的 RM 与 FC 值，对物种潜在适生区进行分布模拟和预测 [10-12]。

系统保护规划是实现生物多样性保护效益最大化较为高效的途径，当前主要的模型工具有 Marxan、Zonation 和 C-Plan 等 [13]。其中，Marxan 最大的优点在于能够在满足生物多样性保护目标的同时，最小化保护成本，并生成空间聚集性强、连通性高的保护区网络。

本研究以中国珍稀濒危龙脑香科树种为对象，选取气候、地形、土壤及人类影响因子，通过优化的 MaxEnt 模型模拟珍稀濒危龙脑香科树种在气候变化下的分布，同时结合 Marxan 模型对其进行系统保护规划研究，以期为其保护规划提供科学借鉴。

1　材料与方法

1.1　物种地理分布数据

根据《国家重点保护野生植物（2021 版）》，确定中国珍稀濒危龙脑香科树种共有 9 种（表 1）。各树种地理分布数据来自全球生物多样性信息网络平台（https://www.gbif.org/）、国家资

表 1　树种生理生态特征、分布点及 AUC 值比较

Table 1　Comparison of physiological and ecological characteristics, distribution points, and AUC values of tree species

物种 Species	生理生态特征 Physiological and ecological characteristics	分布点 Distribution point	AUC
东京龙脑香 *Dipterocarpus retusus*	生长在海拔 1 100 m 左右的潮湿沟谷雨林及石灰山密林中，喜温、喜湿、速生、对土壤要求较高。	31	0.991
狭叶坡垒 *Hopea chinensis*	生长在海拔 600 m 左右的山谷、坡地、丘陵地区；喜光、耐寒耐阴、喜湿润肥沃的酸性土。	41	0.991
坡垒 *Hopea hainanensis*	生长在海拔 700 m 左右的热带雨林中；喜光、耐阴，具有较强的萌生力和种子活力。	49	0.994
无翼坡垒 *Hopea reticulata*	生长在海拔 400 m 左右的丘陵、坡地、山岭的森林中；初期耐阴，后期喜光，喜湿、速生。	15	0.997
望天树 *Parashorea chinensis*	生长在海拔 300 ～ 1 100 m 的低山、河谷、丘陵及石灰山密林中，且生长速度较快；喜光、不耐寒。	84	0.971
云南娑罗双 *Shorea assamica*	生长于海拔 900 ～ 1 110 m 的低热河谷地区；喜光耐阴、喜潮湿、寿命长、病虫害少的优良树种。	16	0.999
广西青梅 *Vatica guangxiensis*	生长在海拔 800 m 左右的坡地及丘陵地带；喜光、耐阴、耐寒且繁育周期长。	19	0.996
青梅 *Vatica mangachapoi*	生长在海拔 700 m 左右的丘陵、坡地林中；喜光、耐寒、耐贫瘠、抗旱能力差。	79	0.992
西藏坡垒 *Hopea shingkeng*	生长在海拔 1 000 ～ 2 500 m 的地带；喜光、喜湿、喜肥沃土壤、抗风性强。	1	未模拟

源标本平台（https://www.nsii.org.cn/）、中国数字植物标本馆（https://www.cvh.ac.cn/）、中国自然标本馆（https://www.cfh.ac.cn/）、中国知网（https://www.cnki.net）和植物智（http://www.iplant.cn）。为准确反映物种的实际分布情况，结合树种的生理生态特征，剔除异常点[14]，并利用百度地图拾取坐标系统（https://api.map.baidu.com/lbsapi/getpoint）获取各分布点经纬度坐标。东京龙脑香 *Dipterocarpus retusus*、狭叶坡垒 *Hopea chinensis*、坡垒 *Hopea hainanensis*、无翼坡垒 *Hopea reticulata*、望天树 *Parashorea chinensis*、云南娑罗双 *Shorea assamica*、广西青梅 *Vatica guangxiensis* 和青梅 *Vatica mangachapoi* 这 8 个树种共 334 个分布点，整理为 csv 文件。西藏坡垒 *Hopea shingkeng* 仅有 1 个分布点，不进行模拟[15]。

1.2 影响因子数据

本研究选取 19 个气候因子、15 个土壤因子、3 个地形因子以及人类影响因子，共 38 个，用于 MaxEnt 建模。气候数据下载自世界气候数据库（https://worldclim.org/），空间分辨率为 30″，包括基准期（1970—2000 年）和未来（2061—2080 年）气候情景数据。其中，未来 2061—2080 年气候数据包括 2 种共享社会经济路径：BCC-CSM2-MR 模式下的低强迫情景数据（SSPs126）和高强迫情景数据（SSPs585）。地形数据下载自地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/），空间分辨率为 90 m，并利用 ArcGIS 软件提取出海拔、坡向和坡度数据。土壤数据基于联合国粮农组织（FAO）和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库；中国境内数据为南京土壤所提供的 1∶100 万第二次全国土地调查数据，分辨率约为 1 km^2。

人类影响因子由人口密度、国内生产总值、夜间灯光、人类活动足迹强度 4 个社会经济因素利用 ArcGIS 软件进行归一化处理得到。

$$X_{normalized} = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中：X 指原始值；$X_{\min}$ 指数据中的最小值；$X_{\max}$ 指数据中的最大值；$X_{\text{normalized}}$ 指归一化后的值。

将各影响因子空间分辨率统一为 30″，坐标系统一转化为 WGS_1984。本研究所涉及的矢量边界地图，来源于标准地图服务系统（http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/），审图号为 GS（2022）1873。

在 Marxan 模型中，规划单元成本由人口密度、国内生产总值、夜间灯光、土地利用、道路密度及人类活动足迹强度等数据利用熵值赋权法分别赋予不同权重，合并成一个因子。自然保护区数据下载自中国自然保护区标本资源平台（http://www.papc.cn）。

1.3 建模因子筛选

为减少建模因子之间的多重共线性和冗余性，需对各类因子进行筛选[16]。将所有因子代入 MaxEnt 模型进行初次模拟，剔除贡献率小于 1% 的因子。通过 ArcGIS 软件的空间分析工具，从各影响因子图层提取所有树种分布点的因子值；利用 R 语言软件进行各类因子相关性分析，若同类因子中有 2 个或多个相关系数绝对值都大于 0.8，则保留贡献率最高的因子[17]，结合树种生理生态特性（表 1），最终保留 10 个因子用于建模，依次为 BIO1、BIO3、BIO7、BIO12、BIO17、BIO18、T_CEC_CLAY、T_BS、ALT、Human。

1.4 MaxEnt 模型优化及评价

MaxEnt模型的复杂度与预测结果有很大关系，而模型复杂度在很大程度上取决于特征函数设计[18]。本研究使用 R 语言 ENMeval 程序包，对模型的正则化乘数（Regularization multiplier，RM）和要素组合参数（Feature combination，FC）进行优化调整，以提高模型预测的准确性。将 RM 设置为 0.5 ～ 4.0，间隔为 0.5；FC 设置为 6 个特征组合，分别为 L、LQ、LQH、H、LQHP 和 LQHPT，最终选择 delta.AICc=0 的参数组合进行 MaxEnt 建模[19]。

将珍稀濒危龙脑香科树种分布数据和筛选出的 10 个建模因子导入 MaxEnt 模型中，采用 Bootstrap 抽样方法，随机选取 25% 的分布数据作为测试集，其余 75% 的分布数据作为训练集用于模型的构建，迭代次数设置为 1 000 次，共运行 10 次。采用受试者工作特征曲线（ROC）下的面积（AUC 值）鉴别模型的模拟效果，取值范围为 0 ～ 1。其中，AUC 值为 [0.5 ～ 0.6) 时，认为模型模拟效果不合格；[0.6 ～ 0.7) 时，差；[0.7 ～ 0.8) 时，一般；[0.8 ～ 0.9) 时，良好；[0.9 ～ 1.0) 时，极好[20]。

1.5 适生区等级划分及质心迁移

将 MaxEnt 模型预测结果的各平均值导入 ArcGIS 中，使用转换工具将其转换为栅格格式。根据最大训练敏感性及特异性阈值（Maximum training sensitivity plus specificity，MaxSS）将珍稀濒危龙脑香科划分为 3 个等级：存在概率＜ MaxSS

为非适宜区、MaxSS ≤存在概率＜ 0.5 为低适宜区、0.5 ≤存在概率为高适宜区 [21-22]，统计并分析各等级适生区面积变化。使用 ArcGIS 软件的空间统计工具提取龙脑香科各珍稀濒危树种不同时期的适生区质心 [23]，生成迁移轨迹，分析未来不同气候情景下适生区的迁移方向和距离。

1.6　Marxan 模型构建及优化

Marxan 模型基于模拟退火算法和互补性原则筛选不可替代性高的规划单元 [24]，并通过 *BLM* 边界调节器提高空间聚集度和连通性，更符合自然保护区规划建设的原则 [25]。

基本原理如下：

$$\sum_{PUs} Cost + BLM \sum_{PUs} Boundry + \sum_{ConValue} SPF \times Penalty + CostThresholdPenalty \quad (2)$$

式中：*Cost* 指保护成本；*BLM* 指边界因子；*Boundry* 指被选中的优先保护单元边界长度之和；*SPF* 指物种保护惩罚因子；*Penalty* 指如果保护目标未被完全实现时，在模型评分中给予的惩罚值；*CostThresholdPenalty* 指成本阈值，即成本上限。

Marxan 模型进行计算需要将研究区域划分为若干个规划单元作为研究的基本单位。本研究中，利用 ArcGIS 软件将研究区划分为 18 206 个 10 km×10 km 的渔网作为规划单元，并将物种总适生区面积的 30% 设定为保护目标。利用 ArcGIS 软件中 ArcMarxan 工具箱中的 Calibrate SPF 计算 *SPF* 值，其中调整方法选择 As Group，梯度值为 0.1；后将最优 *SPF* 值代入，求最优 *BLM* 值。最后对其结果进行可视化处理，得到中国珍稀濒危龙脑香科树种的优先保护区，并将优先保护区与自然保护区进行叠加分析，识别出中国珍稀濒危龙脑香科树种的保护空缺。

2　结果与分析

2.1　模型精度评价

如图 1 所示，经过 R 语言软件优化后得到 RM=0.5，FC=LQ，此时最小信息准则 delta.AICc=0，说明其为最优参数组合，因此选择 RM=0.5，FC=LQ 为最终设置参数。在此设定下，珍稀濒危龙脑香科树种通过优化后的 MaxEnt 模型模拟的 AUC 值为 0.971 ～ 0.999（表 1），其中望天树的 AUC 值最小，云南娑罗双的 AUC 值最大，表明优化的 MaxEnt 模型预测结果极好，可很好地拟合各树种潜在适生区分布。

2.2　物种分布的主导影响因子分析

由表 2 和图 2 可知，年均温（BIO1）、等温性（BIO3）和人类影响因子（Human）是影响中国珍稀濒危龙脑香科乔木树种分布的主导影响因子，累计贡献率达 79.4%。

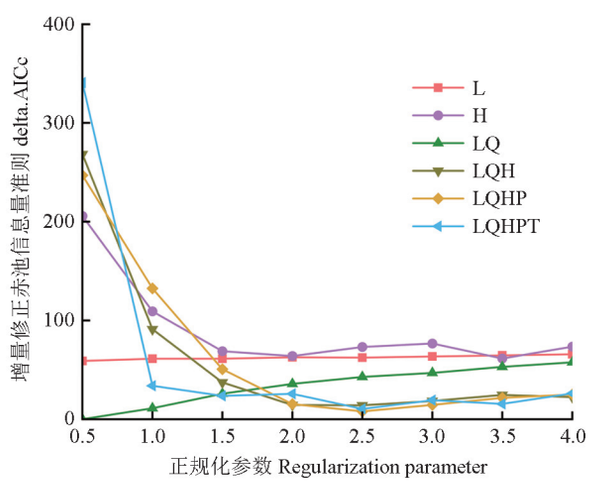


图 1　最大熵模型优化结果

Fig. 1　Maximum entropy model optimization results

表 2　树种影响因子贡献率 †

Table 2　Percentage contribution of tree species influencing factors　　%

物种 Species	BIO1	BIO3	BIO7	BIO12	BIO17	BIO18	T_CEC_CLAY	T_BS	ALT	Human
东京龙脑香 *Dipterocarpus retusus*	**27**	**36.7***	6.7	1.8	0.4	2.5	0.8	4.3	3.6	**16.2**
狭叶坡垒 *Hopea chinensis*	**56.5***	5.6	**12.1**	6	2.6	**7.7**	1	4.5	2.2	1.9
坡垒 *Hopea hainanensis*	**77.3***	2.1	**2.9**	1.6	0.7	**2.9**	0.2	0.6	0.8	**10.8**
无翼坡垒 *Hopea reticulata*	**72***	**5.2**	5	0.9	0.5	1.4	0.8	3.2	0.7	**10.2**
望天树 *Parashorea chinensis*	**56.8***	**8.3**	**11.9**	2.8	1.8	3.1	0.3	6.8	3.6	4.6
云南娑罗双 *Shorea assamica*	**18.9**	**54.6***	0.6	0.9	0	**9.6**	0.6	5.4	1.1	8.3
广西青梅 *Vatica guangxiensis*	**43.1***	**25.6**	**7.7**	0.9	1.8	2.6	4.5	7.6	2.9	3.3
青梅 *Vatica mangachapoi*	**71.9***	2.2	**4.2**	0.3	0.4	1.2	1.3	0.8	0.7	**16.9**
均值 Mean	**52.9***	**17.5**	6.4	1.9	1.0	3.9	1.2	4.2	2.0	**9.0**

† 加粗字体代表主导影响因子；*：最主要影响因子。Bold font represents the dominant impact factor; *: the most dominant impact factor.

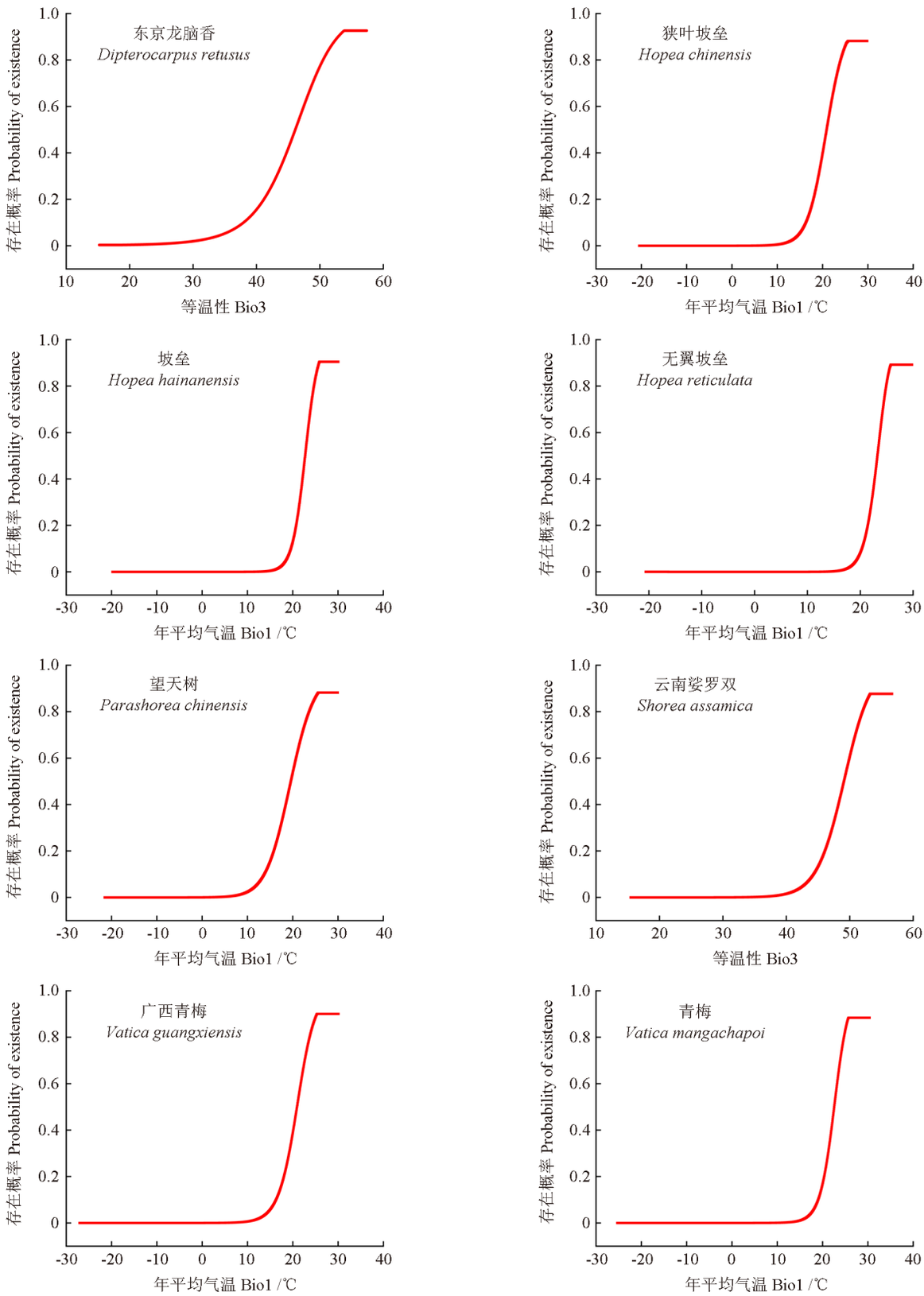


图 2　树种最主要影响因子响应曲线

Fig. 2　Response curves of the most important influence factors of tree species

狭叶坡垒、坡垒、无翼坡垒、望天树、广西青梅及青梅受年均温影响最大。其中，狭叶坡垒、望天树及广西青梅在年均温低于 10 ℃左右的条件下存在概率均为 0；当气温超过 10 ℃时存在概率迅速上升，在 26 ℃时达到最大并趋于平稳。与它们生长在年均温 20 ～ 25 ℃以上的热带或亚热带地区的低山丘陵、山地或盆地相符，尤其是温差较小、光照充足、降水丰富的地区。坡垒、无翼

坡垒和青梅在年均温低于 15 ℃时存在概率几乎为 0；年均温大于 15 ℃时存在概率随气温上升而急剧增加，年均温达 26 ℃时存在概率达到最大。对应于它们生长在年平均气温较高的热带与亚热带低山或丘陵地带，如海南、广东和广西等地区，这些地区也是人为活动较密集区域，人类影响因子均有较高贡献率（表 2）。

东京龙脑香和云南娑罗双受等温性影响最大，当等温性大于 40 时，存在概率迅速上升，等温性达 54 时，存在概率达到最大值且趋于平稳，与两树种生长于温度波动较小、昼夜条件稳定的热带地区相对应。

2.3　适生区分析

由表 3 可以看出，望天树的潜在适生区面积最大，总适生区面积为 103.40×10^4 km^2，高适生区面积达 10.93×10^4 km^2。东京龙脑香、坡垒、广西青梅、狭叶坡垒和青梅总适生区面积在 23.37×10^4 km^2 ～ 42.88×10^4 km^2，高适生区面积为 0.81×10^4 km^2 ～ 3.77×10^4 km^2。云南娑罗双和无翼坡垒总适生区面积较小，分别为 7.82×10^4 km^2 和 15.77×10^4 km^2，高适生区小于 5 000 km^2。

表 3　不同气候情景下树种适生面积统计

Table 3　Statistics on area suitable for tree species under different climate scenarios　　$\times10^4$ km^2

物种 Species	基准期 Base period		SSPs126		SSPs585	
	总适生区 Total habitat area	高适生区 High suitability area	总适生区 Total habitat area	高适生区 High suitability area	总适生区 Total habitat area	高适生区 High suitability area
东京龙脑香 *Dipterocarpus retusus*	25.10	1.62	20.91	0.86	13.09	0.25
狭叶坡垒 *Hopea chinensis*	35.06	3.77	29.94	2.18	24.12	0.71
坡垒 *Hopea hainanensis*	29.58	0.99	23.16	2.49	37.31	4.15
无翼坡垒 *Hopea reticulata*	15.77	0.48	15.51	1.78	17.82	2.11
望天树 *Parashorea chinensis*	103.40	10.93	84.50	10.38	103.09	10.59
云南娑罗双 *Shorea assamica*	7.82	0.34	8.47	0.53	8.49	2.00
广西青梅 *Vatica guangxiensis*	23.37	2.73	35.57	3.21	34.96	5.30
青梅 *Vatica mangachapoi*	42.88	0.81	34.15	0.76	17.30	0.39

由图 3 可以看出，基准期，中国珍稀濒危龙脑香科乔木树种主要集中在云南、海南和广西，高适生区主要分布在云南和海南。

2.4　未来气候情景下各树种适生区变化预测

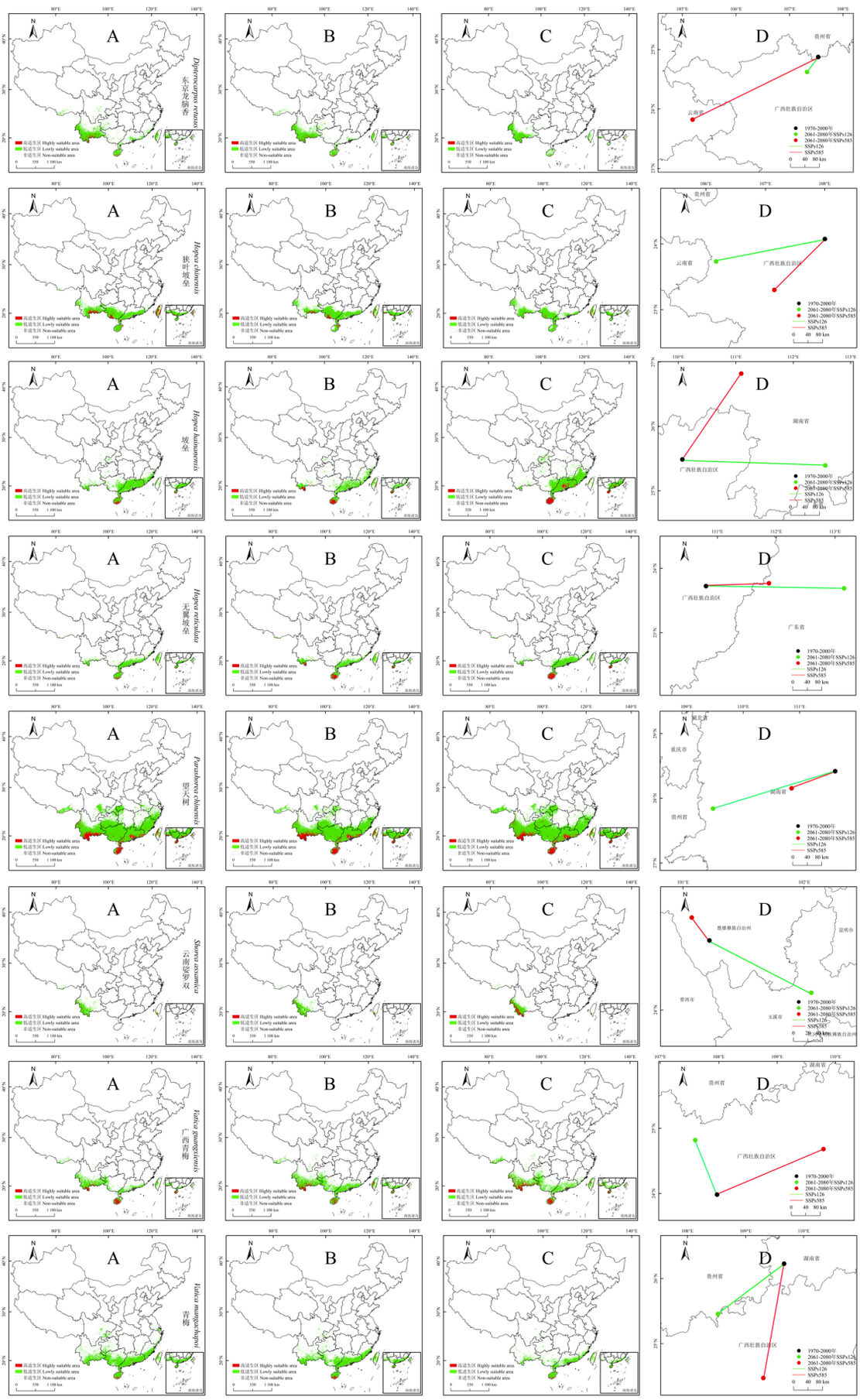
由表 3 和图 3 可知，在未来 SSPs126、SSPs585 情景模式下，东京龙脑香、狭叶坡垒、望天树和青梅适生区较基准期呈收缩趋势，适生区质心向西南迁移 43 ～ 320 km。具体来说，狭叶坡垒和青梅在未来 2 种情景模式下迁移距离均大于 100 km，东京龙脑香在 SSPs585 情景下、望天树在 SSPs126 情景下迁移距离均大于 100 km。东京龙脑香在不同情景下总适生区减少 16.72% 和 48.02%，云南、海南及台湾的高适生区衰退严重。狭叶坡垒总适生区分别减少 14.61% 和 31.22%，位于海南的高适生区消失。望天树总适生区则分别减少 18.27% 和 0.29%，四川、重庆等地适生区面积减少。青梅在不同情景下总适生区分别减少 20.36% 和 59.64%，在 SSPs585 情景下高适生区进一步衰退，面积减少 54.24%。

云南娑罗双、广西青梅在未来不同气候情景下，适生区呈扩张趋势。云南娑罗双在不同情景下适生区分别扩张 8.30% 和 8.60%，适生区质心向东南迁移 96 km 后又向西北迁移 24 km，在西藏东南部形成新的适生区。广西青梅适生区分别扩张 52.22% 和 49.60%，适生区质心向东北迁移 100 km 后又向西北迁移 199 km，在江西、浙江南部等地形成新的适生区。

坡垒和无翼坡垒在 SSPs126 情景下呈收缩趋势，在 SSPs585 情景下则呈扩张趋势，且适生区质心均向东北迁移 108 ～ 248 km，迁移距离均大于 100 km。坡垒在 SSPs126 情景下总适生区减少 21.70%，在云南南部形成新的高适生区；在 SSPs585 情景下总适生区扩张 26.14%，福建大部分地区均扩张为新适生区。无翼坡垒在 SSPs126 情景下总适生区减少 1.61%；在 SSPs585 情景下总适生区扩张 12.99%，广东、海南高适生区扩张明显。

2.5　龙脑香科树种优先保护区分析

计算得出 *SPF* 最优值为 1.5，经过多次测试，将 *BLM* 设置为 0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 这 5 个等级，并运行 100 次，寻找最合适的 *BLM* 值，最终将 *BLM* 设置为 0.04。将最优 *SPF* 值和最优 *BLM* 值输入 Marxan 模型中，模拟出中国珍稀濒危



A：1970—2000 年气候情景，B：2061—2080 年 SSPs126 气候情景，C：2061—2080 年 SSPs585 气候情景。
A: Climate scenarios 1970-2000, B: Climate scenarios 2061-2080 SSPs126, C: Climate scenarios 2061-2080 SSPs585.

图 3 各树种适生区分布及质心迁移

Fig. 3 Distribution of suitable habitats for various tree species and migration of centers of mass

龙脑香科树种的优先保护区。

如图 5 所示，中国珍稀濒危龙脑香科树种保护优先区主要集中在云南省南部、海南省中部的大部分地区，广西壮族自治区与云南省接壤的地区也有少量分布。保护优先区的面积约为 11.01×10^4 km^2，约占中国国土面积的 1.15%。

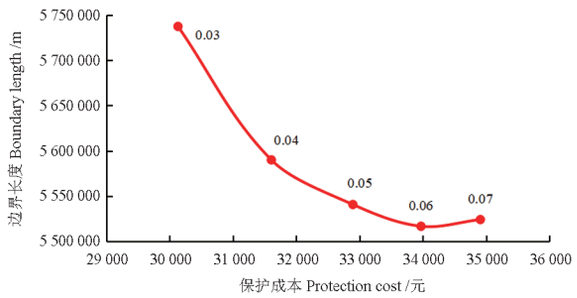


图 4　不同 BLM 值下保护成本和边界长度变化
Fig. 4　Changes in protection cost and boundary lengths under different BLM values

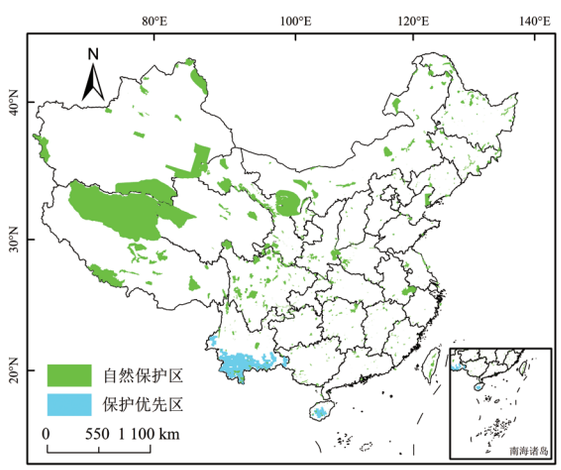


图 5　中国珍稀濒危龙脑香科树种的保护优先区
Fig. 5　Priority areas for the protection of rare and endangered *Dipterocarpaceae* tree species in China

如图 6 所示，将中国珍稀濒危龙脑香科树种的保护优先区与中国自然保护区进行叠加分析，在自然保护区内已得到保护的面积为$0.515\,6\times10^4$ km^2，主要分布在云南西双版纳国家级自然保护区、云南黄连山国家级自然保护区、海南省霸王岭国家森林公园、云南省大围山国家级自然保护区、云南元江国家级自然保护区、文山老君山自然保护区、海南吊罗山国家森林公园。保护空缺区域主要集中在云南省澜沧拉祜族自治县、景谷傣族彝族自治县、宁洱哈尼族彝族自治县、红河县、盈江县、孟连傣族拉祜族佤族自治县、元阳县；广西那坡县的西北部；海南省五指山市、保亭黎族苗族自治县西北部以及白沙黎族自治县中南部。

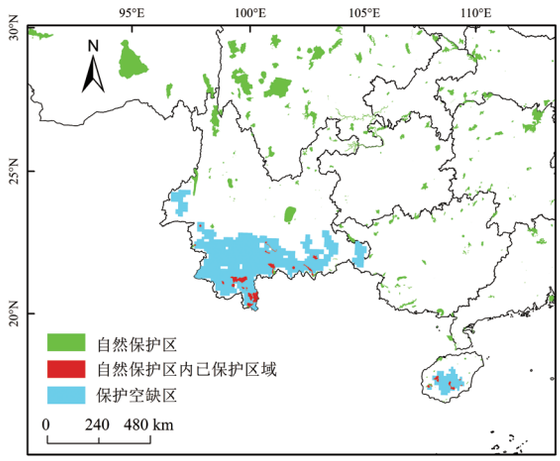


图 6　中国珍稀濒危龙脑香科树种的保护空缺分布
Fig. 6　Protection priority areas for rare and endangered *Dipterocarpaceae* tree species in China protected areas within nature reserves

3　讨论与结论

3.1　讨　论

3.1.1　气候变化对物种分布的影响

目前，全球气候变化引发的一系列影响如气温上升、海平面上升等，已成为影响物种生长分布和导致其濒临灭绝的最重要因素之一[26]。珍稀濒危龙脑香科树种是热带雨林的核心植物群，相对于其他植物，热带植物往往具有较高的专一性和较低的迁徙能力。即在面对气候变化时，难以快速适应或迁移到新的适宜环境，因此气候变化对其分布的影响将更加明显，持续时间也更长。这些因素相互作用，导致热带植物在面对气候变化时面临着更大的生存挑战和迁移风险。韦建杏等[27]研究表明包括年均温在内的气候因子是影响坡垒分布的主导环境因子，这与本研究结果相符。此外，也有研究得出最冷月最低温、等温性及年平均温度差等也是影响热带植物分布的主导因子[28-30]。本研究中，8 个珍稀濒危龙脑香科树种主要受年均温和等温性的影响，与树种生理生态特性相符。

3.1.2　未来气候条件下树种的变化趋势

在未来不同气候条件下，东京龙脑香、狭叶坡垒、望天树和青梅都呈现出不同程度的收缩趋势，反映出气候变化对这 4 个树种分布威胁较大。已有研究表明，气候变化可能导致物种分布区向高纬度或高海拔地区转移[31]。根据未来不同气候条件，随着时间推移，坡垒、无翼坡垒、广西青梅以及 SSPs585 情景下的云南娑罗双质心总体向高纬度地区迁移。缐子仪[32]研究认为，气候变化

可能导致一些适应寒冷气候的物种迁移到高纬度或高海拔地区，适应温暖气候的物种可能扩散到低纬度或低海拔地区。本研究中，东京龙脑香、狭叶坡垒、望天树、青梅以及 SSPs126 情景下的云南娑罗双质心均向低纬度地区迁移。

3.1.3 保护优先区及保护空缺分析

基于优化的 Marxan 模型得到中国珍稀濒危龙脑香科树种的优先保护区，确保以最小的面积或成本实现最大的生物多样性保护目标，这有助于降低经济成本和提高保护成效。将优先保护区与自然保护区进行叠加分析发现，优先保护区在自然保护区内的面积仅为 0.515 6×10^4 km^2，占 4.68%，仍有 95.32% 的优先保护区未得到自然保护区的保护，占比较高。其中，占优先保护区面积最大的自然保护区是云南西双版纳国家级自然保护区，其次是云南黄连山国家级自然保护区、海南霸王岭国家森林公园及云南大围山国家级自然保护区，总面积约为 0.38×10^4 km^2。保护空缺区域主要集中在澜沧拉祜族自治县、景谷傣族彝族自治县等云南省南部地区、广西那坡县、海南省中部地区。中国珍稀濒危龙脑香科树种受保护程度不高，保护空缺面积占比过大，需加强保护。对于已处于自然保护区内的树种，应完善自然保护区的管理制度，严格限制保护区内的砍伐行为，对已破碎的栖息地进行修复。而对处于保护空缺的树种，应该格外关注，可呼吁当地居民与群众积极参与保护，必要时建立生态廊道等，对其进行系统保护时应与当地实际情况密切结合。

3.1.4 问题与展望

本研究采用优化的 MaxEnt 模型模拟预测珍稀濒危龙脑香科树种的潜在适生区分布，其适生区主要集中分布在云南、海南及广西等热带及亚热带地区，与物种的实际分布范围基本一致。但由于珍稀濒危龙脑香科树种皆为国家Ⅰ级和Ⅱ级保护树种，个别树种甚至濒临灭绝，分布点较少，在进行模拟时易产生拟合偏差 [33]，模型得到的潜在分布结果与实际分布范围存在一定差距。同时，本研究为全国尺度，因此采用气候、地形和土壤这 3 类自然因子及人类影响因子进行建模分析，而树种的生长、分布还受物种间关系的影响，如竞争、共生或寄生关系 [34]，由于尺度问题，本研究未能结合这些因素进行分析。此外，本研究仅考虑了未来气候变化对物种分布的影响，地形、土壤及人类影响因子与基准期相一致。在进行保护空缺分析时，仅考虑自然保护区较为单一，缺乏与其他数据结合分析，如国家公园数据等。

未来，珍稀濒危树种的分布与保护可结合遥感、大数据分析、栖息地景观格局分析和 AI 风险评估进行研究。将传统的实地调查和多源遥感数据结合，使用深度学习和机器学习算法进行大数据分析；通过物种栖息地景观格局分析，依据破碎化、异质性等特征规划物种的保护区分布；同时，依托 AI 技术进行风险评估、栖息地智能化高效管理等，以提升对珍稀濒危树种的保护效率。

3.2 结 论

本研究基于优化的 MaxEnt 模型模拟预测气候变化下中国珍稀濒危龙脑香科树种在基准期与未来 2 种不同气候情景下的分布及迁移趋势。同时结合 Marxan 模型，优化其 SPF 和 BLM 得到龙脑香科树种的优先保护区，并与自然保护区相叠加得到其保护空缺区域，研究结果表明：

1）模型优化后的 AUC 值均大于 0.971，模拟效果极好，其预测结果可信度较高，可有效反映珍稀濒危龙脑香科树种潜在适生区的分布情况。

2）年均温、等温性和人类活动是影响珍稀濒危龙脑香科树种分布的主导影响因子，温度则是影响其分布的最主要影响因子。频繁的人类活动也对龙脑香科树种的分布造成较大影响，即全球气候变暖及人类活动带来的负面影响都是导致龙脑香科树种面临濒危的最主要原因。

3）中国珍稀濒危龙脑香科树种分布较集中，主要分布在云南、海南及广西等热带地区及亚热带地区。在未来气候情景下，随着碳排放的增加，部分树种将呈现出不同程度的缩减趋势。在未来不同情景下，东京龙脑香、狭叶坡垒、望天树和青梅总适生区分别减少 16.72% ～ 20.36% 和 0.29% ～ 60.00%；且适生区质心均向西南迁移 43 ～ 320 km。云南娑罗双、广西青梅为扩张趋势，总适生区分别扩张 9.30% 和 8.60%、52.22% 和 49.60%；前者适生区质心向东南迁移 96 km 后又向西北迁移 24 km，后者向东北迁移 100 km 后又向西北迁移 199 km。坡垒、无翼坡垒总适生区在 SSPs126 情景下分别减少 21.70%、1.61%，在 SSPs585 情景下分别扩张 26.14%、13.01%，且两者质心均向东北迁移 108 ～ 248 km。

4）中国珍稀濒危龙脑香科树种的优先保护区面积约为 11.01×10^4 km^2，约占中国国土面积的 1.15%，主要集中在云南省南部、海南省中部及广西西部少部分地区。优先保护区受保护面积仅为 0.515 6×10^4 km^2，占 4.68%。

5）中国珍稀濒危龙脑香科树种 95.32% 的优先保护区未得到自然保护区的保护，保护空缺区主要分布在云南省中南部和海南省中部。

参考文献：

[1] HAMANN A, WANG T. Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia[J]. Ecology,2006,87(11):2773-2786.

[2] 李雯琪 . 沈阳 “ 城 - 郊 ” 梯度对不同绿地群落特征的影响 [D]. 沈阳 : 沈阳农业大学 ,2020.
LI W Q. The influence of city-suburb gradient on different green space community characteristics in Shenyang[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2020.

[3] LAURANCE W F, SAYER J, CASSMAN K G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature[J]. Trends in Ecology & Evolution,2014,29(2):107-116.

[4] 段左俊 , 郭运勇 , 曾祥全 , 等 . 龙脑香科树种在中国的分布及引种概况 [J]. 热带林业 ,2019,47(1):21-25.
DUAN Z J, GUO Y Y, ZENG X Q, et al. Distribution and introduction of the family Dipterocarpaceae in China[J]. Tropical Forestry,2019,47(1):21-25.

[5] 段左俊 , 彭文成 , 黄国宁 . 龙脑香科植物致濒原因研究概况 [J]. 热带林业 ,2020,48(4):4-8.
DUAN Z J, PENG W C, HUANG G N. A survey of research on the endangered causes of *Dipterocarpaceae* plants[J]. Tropical Forestry,2020,48(4):4-8.

[6] SONGER M, DELION M, BIGGS A, et al. Modeling impacts of climate change on giant panda habitat[J]. International Journal of Ecology,2012:108752.

[7] RATHORE M K, SHARMA L K. Efficacy of species distribution models (SDMs) for ecological realms to ascertain biological conservation and practices[J]. Biodiversity and Conservation, 2023,32:3053-3087.

[8] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species’ distributions from occurrence data[J]. Ecography,2006,29:129-151.

[9] 孔维尧 , 李欣海 , 邹红菲 . 最大熵模型在物种分布预测中的优化 [J]. 应用生态学报 ,2019,30(6):2116-2128.
KONG W Y, LI X H, ZOU H F. Optimizing MaxEnt model in the prediction of species distribution[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(6):2116-2128.

[10] 杨振扬 , 魏有海 , 郭良芝 , 等 . 基于优化 MaxEnt 模型的紫茎泽兰在中国的潜在适生区分布预测 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版),2025,46(1):49-56.
YANG Z Y, WEI Y H, GUO L Z, et al. Predicting the distribution of potential habitat areas of *Ageratina adenophora* in China based on an optimised MaxEnt model[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2025,46(1): 49-56.

[11] 张玉洁 , 余函纹 , 郑昭焕 , 等 . 基于优化的 MaxEnt 模型预测桔梗在中国的潜在适生区 [J]. 药学学报 ,2024,59(9):2625-2633.
ZHANG Y J, YU H W, ZHENG Z H, et al. Predicting the potential suitable areas of *Platycodon grandiflorum* in China using the optimized MaxEnt model[J]. Acta Pharmaceutica Sinica,2024,59(9):2625-2633.

[12] 王晓帆 , 段雨萱 , 金露露 , 等 . 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化 [J]. 生态学报 , 2023,43(16):6590-6604.
WANG X F, DUAN Y X, JIN L L, et al. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus* sect. *Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(16):6590-6604.

[13] 郭欣达 , 付奔 , 余思洁 , 等 . 城市内涝和夏季高温风险评价与优先管控区识别方法研究 [J]. 生态环境学报 ,2025,34(5): 731-742.
GUO X D, FU B, YU S J, et al. Study on the assessment and priority control area identification methods of urban flooding and summer high temperature risks[J]. Ecology and Environmental Sciences,2025,34(5):731-742.

[14] 唐继敏 , 殷晓洁 , 李干 , 等 . 气候变化下中国珍稀濒危拟单性木兰属适生区模拟及 GAP 分析 [J]. 西南农业学报 ,2024, 37(9):2120-2129.
TANG J M, YIN X J, LI G, et al. Simulation and GAP analysis of suitable areas of rare and endangered *Parakmeria* in China under climate change[J].Southwest Journal of Agricultural Sciences,2024,37(9):2120-2129.

[15] 李干 , 李慧 , 殷晓洁 , 等 . 中国珍稀濒危松属主要树种的潜在适生区预测 [J]. 森林与环境学报 ,2023,43(4):416-425.
LI G, LI H, YIN X J, et al. Potential habitat prediction of rare and endangered species of *Pinus* in China under climate change[J]. Journal of Forest and Environment,2023,43(4):416-425.

[16] 郭立新 , 张春回 , 宫旰彤 , 等 . 基于 MaxEnt 模型的大果青杆潜在适生区及其分布变化 [J]. 西部林业科学 ,2024,53(3): 39-46.
GUO L X, ZHANG C H, GONG X T, et al. Prediction of potential suitable area of *Picea neoveitchii* and the influence of future climate changes on its distribution based on the optimized model[J]. Journal of West China Forestry Science,2024,53(3): 39-46.

[17] 刘晶晶 , 张舟 , 张权 , 等 . 基于参数优化 MaxEnt 模型的气候变化下青头潜鸭 (*Aythya baeri*) 在长江流域的潜在适生区预测 [J]. 生态与农村环境学报 ,2025,41(3):295-307.
LIU J J, ZHANG Z, ZHANG Q, et al. Predicting the potential suitable areas of *Aythya baeri* in the Yangtze River basin under the climate change scenario based on parameter optimization MaxEnt model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2025,41(3):

295-307.

[18] 朱耿平 , 乔慧捷 .MaxEnt 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响 [J]. 生物多样性 ,2016,24(10):1189-1196.
ZHU G P, QIAO H J. Effect of the MaxEnt model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. Biodiversity Science,2016,24(10):1189-1196.

[19] 梁惠子 , 林源 , 刘雄盛 , 等 . 基于优化 MaxEnt 模型的濒危植物海南风吹楠生境适宜性评价 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2024,44(8):16-26.
LIANG H Z, LIN Y, LIU X S, et al. Evaluating habitat suitability of endangered plant *Horsfieldia hainanensis* based on the optimized MaxEnt model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(8):16-26.

[20] 张艳芳 . 基于 MaxEnt 模型预测花烟草全球潜在适生区的研究 [D]. 泰安 : 山东农业大学 ,2023.
ZHANG Y F. Prediction of global potential suitable habitats of *Nicotiana alata* Link et Otto based on MaxEnt model[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2023.

[21] YANG L C, ZHU X F, SONG W Z, et al. Predicting the potential distribution of 12 threatened medicinal plants on the Qinghai-Xizang plateau, with a maximum entropy model[J]. Ecology and Evolution,2024,14(2):e11042.

[22] 孙颖 , 秦大河 , 刘洪滨 .IPCC 第五次评估报告不确定性处理方法的介绍 [J]. 气候变化研究进展 ,2012,8(2):150-153.
SUN Y, QIN D H, LIU H B. Introduction to treatment of uncertainties for IPCC fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis,2012,8(2):150-153.

[23] 吴茹茹 , 刘美珍 , 谷仙 , 等 . 气候变化对巨柏适宜生境分布的潜在影响和预测 [J]. 植物生态学报 ,2024,48(4):445-458.
WU R R, LIU M Z, GU X, et al. Prediction of suitable habitat distribution and potential impact of climate change on distribution patterns of *Cupressus gigantea*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2024,48(4):445-458.

[24] 张晓琳 , 金晓斌 , 吴心怡 , 等 . 基于系统保护理念的弹性生态保护空间划定 —— 以广东省茂名市为例 [J]. 生态学报 , 2021,41(18):7393-7405.
ZHANG X L, JIN X B, WU X Y, et al. Delineation of flexible ecological protection space based on the concept of systematic conservation: take Maoming City of Guangdong Province as an example[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(18):7393-7405.

[25] 栾晓峰 , 黄维妮 , 王秀磊 , 等 . 基于系统保护规划方法东北生物多样性热点地区和保护空缺分析 [J]. 生态学报 ,2009,29(1): 144-150.
LUAN X F, HUANG W N, WANG X L, et al. Identification of hotspots and gaps for biodiversity conservation in northeast China based on a systematic conservation planning methodology[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(1):144-150.

[26] BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity[J]. Ecology Letters,2012,15:365-377.

[27] 韦建杏 , 黄川腾 , 黎国运 , 等 . 基于 MaxEnt 模型的海南岛野生坡垒潜在适宜生境分布预测 [J]. 园艺与种苗 ,2020,40(8): 5-7,12.
WEI J X, HUANG C T, LI G Y, et al. Prediction of potential suitable habitat distribution of wild *Hopea hainanensis* in Hainan island based on MaxEnt Model[J]. Horticulture and Seedlings, 2020,40(8):5-7,12.

[28] 柴思雨 , 徐剑莹 , 李铁华 , 等 . 基于优化 MaxEnt 模型的细叶桢楠潜在适生区预测 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(9): 94-105.
CHAI S Y, XU J Y, LI T H, et al. Prediction of potential suitable areas of *Phoebe hui* based on optimized MaxEnt model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025, 45(9):94-105.

[29] 应邦肯 , 田阔 , 郭浩宇 , 等 . 基于 MaxEnt 模型预测未来气候变化情境下红树秋茄 (*Kandelia obovata*) 在中国潜在适生区的变化 [J]. 生态学报 ,2024,44(1):224-234.
YING B K, TIAN K, GUO H Y, et al. Predicting potential suitable habitats of *Kandelia obovata* in China under future climatic scenarios based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):224-234.

[30] 王安 , 文东新 , 周芸芸 , 等 . 基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件的湖南省林麝生境适宜性评价 [J]. 湖南林业科技 ,2024,51(1): 43-49.
WANG A, WEN D X, ZHOU Y Y, et al. Assessment of habitat suitability for *Moschus berezovskii* in Hunan Province based on MaxEnt model and ArcGIS[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2024,51(1):43-49.

[31] WALTHER G R, POST E, CONVEY P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature,2002,416:389-395.

[32] 绵子仪 . 中国人工林和天然林物候事件对气候变化的响应 [D]. 南京 : 南京信息工程大学 ,2024.
XIAN Z Y. The response of phenological events in China's planted and natural forests to climate change[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology,2024.

[33] PHILLIPS S J, ANDERSN R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling,2006,190:231-259.

[34] 方学河 , 陈威 , 胡成业 , 等 . 稀有种和常见种对鳌江口红树林大型底栖动物群落多样性的贡献 [J]. 水产学报 ,2024,48(8): 139-150.
FANG X H, CHEN W, HU C Y, et al. Contributions of rare and common species to the species diversity of the mangrove macrobenthic community in Aojiang estuary[J]. Journal of Fisheries,2024,48(8):139-150.

[本文编校：吴　彬]