

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5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.010

论文标题： 气候变化下海南岛8种古树生境适宜性评价

作　　者： 陈芷琪，钟云芳，杨泽秀，等

收稿日期： 2025-05-08

引文格式： 陈芷琪,钟云芳,杨泽秀,等.气候变化下海南岛8种古树生境适宜性评价[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):89-100,200.

CHEN Z Q, ZHONG Y F, YANG Z X, et al. Habitat suitability evaluation for eight ancient tree species on Hainan island under climate change[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):89-100,200.

相关论文推荐

Recommended articles

基于优化MaxEnt模型的濒危植物海南风吹楠生境适宜性评价

Evaluating habitat suitability of endangered plant *Horsfieldia hainanensis* based on the optimized MaxEnt model

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

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

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

基于随机森林和MaxEnt模型的长沙市银杏古树生境适宜性评价

Habitat suitability evaluation of ancient ginkgo trees in Changsha based on random forest and MaxEnt model

4种气候变化情景下梁山慈竹在中国的潜在适生区预测

Spatial shifts in potential habitats of *Dendrocalamus farinosus* in China under four climate change scenarios

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.010
http: //qks.csuft.edu.cn

气候变化下海南岛 8 种古树生境适宜性评价

陈芷琪[1]，钟云芳[1]，杨泽秀[2]，何荣晓[1]
（1. 海南大学 热带农林学院，海南 海口 570228；2. 海南省珠峰林业生态研究所，海南 海口 570220）

摘　要：【目的】旨在实现海南岛 8 种古树在气候变化下的潜在适宜生境分布和环境因子的响应评估，为海南岛古树的管理与保护提供参考。【方法】以海南岛树龄≥ 300 a 的 8 种古树为研究对象，筛选相关环境变量，通过 MaxEnt 模型预测 8 种古树在当前和未来气候条件下的潜在适宜生境变化和关键影响因素。【结果】1）8 种古树的训练 AUC 平均值均＞ 0.9，表示预测准确性极高。2）人口密度分布是多种古树适宜分布的重要影响因子，且该因子的贡献率与置换重要值较高。不同古树还受到各自特定的气候、土壤等因子的共同作用。3）当前气候条件下，黄葛树 *Ficus virens* 在海南岛的适宜生境范围最广，约为 20 248.36 km^2，其次为秋枫 *Bischofia javanica*（16 367.39 km^2），杧果 *Mangifera indica* 和酸豆 *Tamarindus indica* 的适生区域则在 8 种古树中相对狭窄。4）在未来气候情景下，古树的潜在适宜生境变化区域基本集中于原有适生区域的边缘。古树损失、增益和周转较高的区域主要集中在海南岛的东北部和西南部等沿海市县。【结论】使用优化的 MaxEnt 模型能够较好地模拟出海南岛 8 种古树对气候变化的响应。人类活动与自然环境对古树的长期生存具有综合影响。研究结果可为海南岛古树资源的可持续保护提供科学参考。

关键词：MaxEnt 模型；古树；潜在适宜生境；环境因子；气候变化；海南岛
中图分类号：S718.45　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0089-12

Habitat suitability evaluation for eight ancient tree species on Hainan island under climate change

CHEN Zhiqi[1], ZHONG Yunfang[1], YANG Zexiu[2], HE Rongxiao[1]

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;
2. Zhufeng Forestry Ecology Research Institute of Hainan, Haikou 570220, Hainan, China)

Abstract:【Objective】This study aims to evaluate the distribution of the potential suitable habitats of eight ancient tree species on Hainan island under climate change and their responses to environmental factors, and to provide a reference for the management and protection of ancient trees on Hainan island.【Method】Taking eight ancient tree species with a tree age of ≥ 300 years on Hainan Island as the research objects, relevant environmental variables were screened out. The MaxEnt model was used to predict the changes in the potential suitable habitats and the key influencing factors of these eight ancient tree species under current and future climate conditions.【Result】1) The average training AUC values of the eight ancient tree species are all above 0.9, indicating extremely high prediction accuracy. 2) Population density is an important influencing factor for the suitable distribution of many ancient tree species, and the contribution rate and permutation importance value of this factor are relatively high. Different ancient tree species are also jointly affected by their respective specific climate, soil and other factors; 3) Under the current climate conditions, *Ficus virens* and *Bischofia javanica* have the widest suitable habitat ranges on Hainan island, approximately 20 248.36 km^2 and 16 367.39 km^2 respectively. The suitable habitat areas of *Mangifera indica* and *Tamarindus indica* are relatively narrow among the eight ancient tree species; 4) Under the future climate scenarios, the areas of potential suitable habitat change for ancient trees are basically centred on the edges of the original suitable habitat areas. Areas of high loss, gain and turnover of ancient trees are mainly concentrated in coastal cities and counties in the northeast and southwest of Hainan island.【Conclusion】The response of eight species of ancient trees on Hainan island to climate change can be better simulated using the optimized MaxEnt model. Human activities and the natural environment have a combined effect on the long-term survival of ancient trees. The results can provide scientific reference for the sustainable conservation of Hainan's ancient tree resources.

Keywords: MaxEnt model; ancient trees; potentially suitable habitat; environmental factors; climate change; Hainan island

收稿日期（Received）：2025-05-08　　**修订日期**（Revised）：2025-07-18
基金项目：国家自然科学基金项目（32371959）。
第一作者：陈芷琪（zhiqishiyuchen@163.com），硕士研究生。　　**通信作者：**何荣晓（rx.he@hainanu.edu.cn），讲师，博士。
引文格式：陈芷琪 , 钟云芳 , 杨泽秀 , 等 . 气候变化下海南岛 8 种古树生境适宜性评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):89-100,200.
CHEN Z Q, ZHONG Y F, YANG Z X, et al. Habitat suitability evaluation for eight ancient tree species on Hainan island under climate change[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):89-100,200.

古树，作为人类聚居地的标志性生物体，被誉为“绿色文物”[1-2]。古树不仅是自然界中极为珍稀的宝藏，同时也是人类历史文化的宝贵见证。它们不仅以实体的形式存在，更承载着厚重的历史文化价值，成为人类文化、习俗与历史的生动缩影[3]。此外，古树还如同一部自然与历史的编年史，记录了所在地区的气候、地质、地理、植被以及生态等自然状况。同时，它们也映射出该地区人类活动和社会发展的历史轨迹，成为了解地方历史的重要窗口[4]。在自然生态系统中，古树亦扮演着不可或缺的角色，它们在涵养水源、固碳以及维持生态平衡等方面发挥着重要作用。古树通过改善微气候和维持区域生物多样性，在生态功能上同样发挥着重要作用[5]。

然而，全球古树正遭受气候变化和人类活动的双重威胁，面临衰退的严峻挑战。这不仅可能导致古树的大量死亡，进而丧失其独特的生态与文化价值，还可能严重破坏区域生态系统的平衡[6]。研究表明，稳定适宜的生境对古树生长至关重要[7]。然而，环境变化致使古树栖息地的适宜性降低后，其种群和个体可能难以自我恢复。快速的环境变迁能够改变植物群落内部的生境条件和物种间的相互作用[8]。若古树的生境适宜性受到人为干扰和土壤性质变化的进一步影响，其恢复过程将极为缓慢，甚至可能变得不可逆[9]。因此，在未来气候变化加剧及人类活动频繁的新形势下，有效保护古树资源已成为当前亟待解决的重要课题。

近年来，MaxEnt 模型因其运算结果稳定、运算时间短以及操作简便，已成为评估全球气候变化对物种分布影响的主流生态位模型[10]。国内外学者纷纷尝试运用 MaxEnt 模型预测气候变化下植物的潜在分布区，如福建柏 *Chamaecyparis hodginsii*[11]、闽楠 *Phoebe bournei*[12]、花椒 *Zanthoxylum bungeanum*[13] 以及白桦 *Betula platyphylla*[14] 等，并取得了良好的预测效果。这些研究成果为管理者在气候变化背景下制定生态保护策略提供科学依据，特别是在分析不同树种适宜生境的空间分布格局以及保护珍稀濒危树种栖息地方面发挥关键作用。

海南岛拥有我国最为集中、类型最为多样、保存状态最佳且连片面积最大的大陆性岛屿型热带雨林，其自然条件得天独厚，植物资源极为丰富，同时也孕育了众多的古树资源。然而，当前针对海南省古树资源的研究相对匮乏，且多数研究主要聚焦于海南岛古树的资源现状及其分布格局。基于此，本研究综合运用 ArcGIS 软件和 MaxEnt 模型，系统分析生物气候变量、地形因子、土壤条件以及人口密度分布等多类因子之间的相互作用，以评估这些变量对海南岛 8 种常见古树（树龄≥ 300 a）潜在适宜生境的影响，探讨在当前和未来气候变化情景下，这 8 种古树在海南岛的潜在适宜生境分布情况及其损失和周转状况，并明确各类因子对其潜在适宜生境的相对重要性及贡献度，以期为海南岛古树资源的科学保护提供有力的指导依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究以海南岛 3 个地级市（海口市、三亚市、儋州市）和 15 个省直辖县级行政单位（不包含三沙市及相关海域）为研究范围。海南岛位于南海北部，属热带季风海洋性气候，光热资源丰富，年均气温 22 ～ 26 ℃，年降水量 1 500 ～ 2 000 mm，全年暖热，干湿季节分明，雨水充沛[15]。地形呈中间高四周低的穹隆山地形，梯度结构明显[16]。海南省的古树资源较为丰富且具有显著热带区系特征。其中，一级古树（树龄≥ 300 a）达 1 075 株，隶属 33 科 55 属 74 种，以桑科 Moraceae、无患子科 Sapindaceae、壳斗科 Fagaceae 为优势科，以高山榕 *Ficus altissima*、荔枝 *Litchi chinensis* 等热带乡土树种为优势种[17]。

1.2 数据收集与处理

选取海南岛 8 种常见古树（树龄≥ 300 a）作为研究样本，其分布点位的数据来源于海南各县市政府官方网站公布的古树名录资料以及野外实地调查所获取的经纬度数据。为保证所获样本点数据的准确性，对全部分布点进行筛选。所有分布点的经纬度输入 Excel 表格并保存为“.csv”格式。为尽量避免因地理聚集带来的空间自相关，8 种古树的分布点位利用物种分布模型工具箱对分布数据进行筛选，在 1 km×1 km 的网格中只保留 1 个分布点，最终得出高山榕分布点 152 个，见血封喉 *Antiaris toxicaria* 分布点 48 个，荔枝分布点 47 个，酸豆 *Tamarindus indica* 分布点 53 个，垂叶榕 *Ficus benjamina* 分布点 20 个，秋枫 *Bischofia javanica* 分布点 18 个，黄葛树 *Ficus virens* 分布点 15 个，杧果 *Mangifera indica* 分布点 10 个（图 1）。

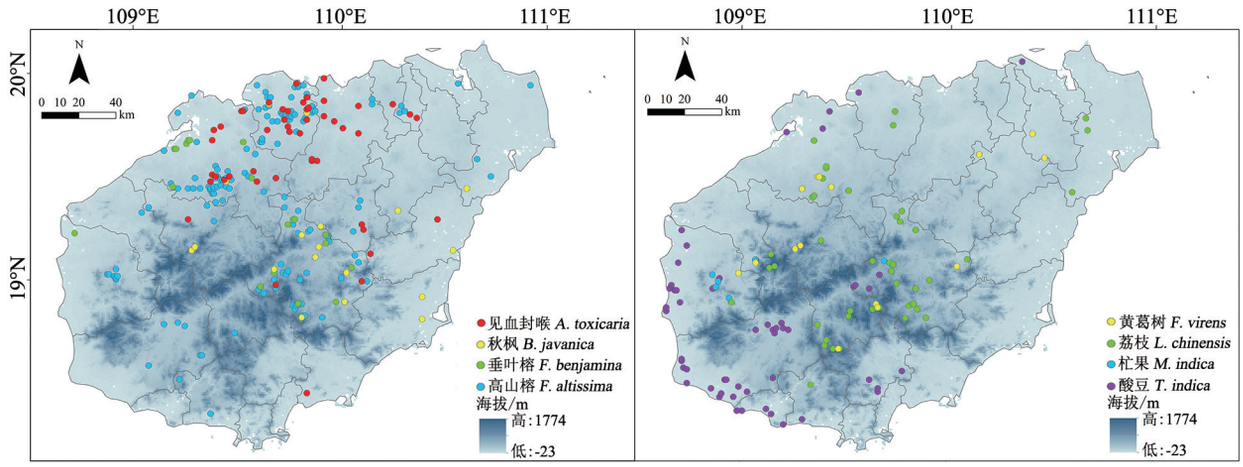


图 1　8 种古树在海南岛的分布点位

Fig. 1　Distribution points of eight species of ancient trees on Hainan island

1.3　环境变量数据收集与处理

环境数据包括气候、地形、土壤以及其他相关变量，总计 41 个变量（表 1）。其中，气候数据来源于世界气候数据库（http://www.worldclim.org/），分辨率为 30″（约 1 km）。气候数据包中包含了 19 个生物气候变量。当前和未来气候数据均采用基于 CMIP6 的 WorldCLim 2.1 数据集，未来预测选取 2041—2060 年（2050s）和 2061—2080 年（2070s）两个时段，分别选择 SSP126 和 SSP585 这 2 个共享社会经济情景进行预测。地形因子来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，包含海拔、坡度和坡向 3 个变量，空间分辨率为 12.5 m。土壤因子数据来源于世界土壤数据库（HWSD）的中国土壤数据集，经过提取与整理，选择 16 个土壤因子变量，分辨率为 1 km。植被归一化指数来自国家生态科学数据中心（http://www.nesdc.org.cn/）。土地利用分类数据来源于 CLCD（China land cover dataset）数据集 [18]。人口密度分布数据来源于 LandScan 平台（https://landscan.ornl.gov/）发布的 1 km 精度人口分布栅格数据集。将选择的 41 个环境变量数据的图层文件用 ArcGIS 10.8 软件进行重采样，统一栅格大小，统一地理坐标系统，统一分辨率为 1 km。

考虑到各环境因子之间存在一定的相关性，为避免 MaxEnt 模型出现过拟合以及相关性对建模结果准确性的影响 [19]，本研究采用 MaxEnt 模型对 8 种古树的分布点位与 41 个预选环境变量进行预试验，计算环境因子的百分比贡献率。使用 ENMtools 软件对预选环境变量进行 Pearson 相关性分析，在 8 种古树的预试验中，对于高相关性（$|r| \geqslant 0.8$）的变量，剔除其中贡献率较低的环境因子，最终保留 15 个相关性 $|r| < 0.8$ 且贡献率较高的环境变量，用于后续建模 [20]（表 2）。

1.4　模型参数的设置与构建

为了提升预测模型的精确度，本研究运用 R 语言中的 ENMeval 程序包，对正则化乘数（Regularization multiplier，RM）和特征组合（Feature combination，FC）的参数设置进行优化。设置 RM 值为 0.5 ～ 4.0，间隔 0.5。FC 包括线性（Linear，L）、二次型（Quadratic，Q）、片段化（Hinge，H）、乘积型（Product，P）和阈值型（Threshold，T）5 种变量特征，最终建立 64 种 RM 和 FC 参数组合进行测试 [21]。AICc 值综合考量了模型的拟合优度和复杂性，是评估模型性能的关键指标，AICc 值越小，模型拟合效果越好。因此，选取具有最小 AICc 值（delta.AICc 为 0）的最优参数组合和调控倍频构建模型 [11]。将筛选的 15 个环境变量数据与古树分布点数据导入 MaxEnt 模型，随机选取 75% 的分布数据用于建模，25% 的数据用于模型验证，模型重复运行 10 次，选择 Bootstrap，取平均值作为最终预测结果。选择受试者工作特征曲线（Receiver operating characteristic curve，ROC）中的 AUC（Area under curve）值来衡量模型的准确程度。AUC 值的取值范围为 0 ～ 1，该值与模型模拟效果呈正相关关系，值越大，表示模型判断能力越强，其中，当 AUC 值≥ 0.9 时，模拟效果极准确 [22]。

1.5　古树的适宜生境等级划分及分析

将 MaxEnt 模型的模拟输出结果导入 ArcGIS 软件中，转换为栅格格式，结合地图数据，对其进

行重分类。通过人工分级方法将适宜等级划分为 4 类，分别为低度适宜（0～0.2]、中度适宜（0.2～0.4]、高度适宜（0.4～0.6] 和极度适宜（0.6～1.0]。同时，利用 ArcGIS 软件中的面积制表功能，计算各等级适生区面积。并依据古树的适宜生境（中度适宜、高度适宜和极度适宜）范围，利用 SDM Toolbox 工具对其进行比较分析，得到不同时期气候变化下 8 种古树的适宜生境变化情况。

表 1　MaxEnt 模型中选取的环境变量
Table 1　The environmental variables selected in the MaxEnt model

环境变量 Environmental variable	描述 Description	代号 Code	环境变量 Environmental variable	描述 Description	代号 Code
气候变量 Climate variable	年平均温度（℃）	bio1	土壤变量 Soil variable	硫酸盐含量（%）	t_$CaSO_4$
	昼夜温差月均值（℃）	bio2		黏性层土壤的阳离子交换能力（cmol/kg）	t_cec_clay
	等温性	bio3		土壤的阳离子交换能力（cmol/kg）	t_cec_soil
	温度季节变化标准差（℃）	bio4		黏土含量（%）	t_clay
	最热月最高温（℃）	bio5		电导率（dS/m）	t_ece
	最冷月最低温（℃）	bio6		可交换钠盐（%）	t_esp
	年均温度变化范围（℃）	bio7		碎石体积百分比（%）	t_gravel
	最湿季均温（℃）	bio8		有机碳含量（%）	t_oc
	最干季均温（℃）	bio9		土壤酸碱度（$-\log(H^+)$）	t_ph_H_2O
	最热季均温（℃）	bio10		土壤容重（kg/dm^3）	t_ref_bulk
	最冷季均温（℃）	bio11		沙含量（%）	t_sand
	年均降水量（mm）	bio12		淤泥含量（%）	t_silt
	最湿月降水量（mm）	bio13		交换性盐基（cmol/kg）	t_teb
	最干月降水量（mm）	bio14		USDA 土壤质地分类	t_usda_tex
	降水量季节性变化	bio15	地形变量 Terrain variable	海拔（m）	altitude
	最湿季降水量（mm）	bio16		坡向	aspect
	最干季降水量（mm）	bio17		坡度（°）	slope
	最热季降水量（mm）	bio18	其他变量 Other variable	植被归一化指数	ndvi
	最冷季降水量（mm）	bio19		土地利用分类	clcd
土壤变量 Soil variable	土壤基本饱和度（%）	t_bs		人口密度分布（人 /km^2）	PD
	碳酸盐含量（%）	t_$CaCO_3$			

表 2　8 种古树保留用以预测的环境变量
Table 2　Environmental variables used to predict the retention of eight ancient trees

树种 Species	保留的环境变量 Reserved environmental variables
高山榕 *F. altissima*	bio1、bio2、bio7、bio13、bio18、bio19、aspect、slope、clcd、ndvi、PD、t_clay、t_esp、t_gravel、t_oc
见血封喉 *A. toxicaria*	bio2、bio7、bio15、bio16、bio18、altitude、aspect、slope、clcd、ndvi、PD、t_$CaCO_3$、t_clay、t_gravel、t_silt
荔枝 *L. chinensis*	bio4、bio9、bio12、bio14、altitude、aspect、slope、clcd、ndvi、PD、t_$CaCO_3$、t_esp、t_gravel、t_oc、t_silt
酸豆 *T. indica*	bio3、bio7、bio9、bio13、bio15、bio18、altitude、aspect、slope、clcd、ndvi、PD、t_$CaCO_3$、t_cec_soil、t_clay
垂叶榕 *F. benjamina*	bio2、bio7、bio11、bio18、bio19、altitude、aspect、slope、clcd、PD、t_cec_soil、t_esp、t_gravel、t_silt、t_teb
秋枫 *B. javanica*	bio2、bio8、bio9、bio12、bio19、aspect、slope、clcd、ndvi、PD、t_$CaCO_3$、t_cec_clay、t_clay、t_esp、t_gravel
黄葛树 *F. virens*	bio2、bio8、bio9、bio18、bio19、aspect、slope、clcd、ndvi、PD、t_bs、t_$CaCO_3$、t_cec_clay、t_esp、t_gravel
杧果 *M. indica*	bio2、bio4、bio6、bio13、bio14、bio18、altitude、aspect、slope、clcd、ndvi、t_bs、t_gravel、t_silt

1.6　树种损失及周转分析

将 MaxEnt 模型预测的古树概率图（值域 0～1）导入 ArcGIS 软件，基于敏感度和特异度阈值，通过 Con 函数生成二值分布图（0，不适宜区；1，适宜区）[23]。分别以 L/S_R、G/S_R 和 $(L+G)/(S_R+G)$ 计算树种损失率、增益率与周转率，其中 L 表示未来气候情景下单个网格内的树种损失总数，S_R 表示当前气候情景下物种丰富度，G 表示未来气候情景下每个网格单元新增的树种数量 [23-24]。根据上述公式，运用 R 语言的 Raster 包编写代码进行模拟运算，从而得到未来 2 种气候情景下 8 种古树损失、增益与周转的空间分布图，以及平均损失率和周转率。

2　结果与分析

2.1　模型优化结果与准确性评价

本研究运用 R 语言中的 ENMeval 数据包对 MaxEnt 模型进行优化，对 8 种古树在海南岛的潜在适宜生境进行预测。最终 8 种古树选取的建模参数设置如下：高山榕的 FC 为 LQHP，RM 值为 3.5；见血封喉的 FC 为 LQH，RM 值为 4.0；荔枝的 FC 为 LQH，RM 值为 4.0；酸豆的 FC 为 LQ，RM 值为 1.0；垂叶榕的 FC 为 L，RM 值为 3.5；秋枫的 FC 为 L，RM 值为 4.0；黄葛树的 FC 为 L，RM 值为 4.0；杧果的 FC 为 QPT，RM 值为 3.0。在各参数下，8 种古树的测试集 AUC 平均值均＞0.9（表 3）。由此表明，8 种古树的预测结果拟合程度较高，预测结果非常准确。

表 3　8 种古树的最优 MaxEnt 模型的特征
Table 3　Characteristics of the optimal MaxEnt model for eight species of ancient trees

树种 Species	特征组合 Feature combination	调频倍率 Regularization multiplier	曲线下面积 AUC
高山榕 *F. altissima*	LQHP	3.5	0.933
见血封喉 *A. toxicaria*	LQH	4.0	0.943
荔枝 *L. chinensis*	LQH	4.0	0.932
酸豆 *T. indica*	LQ	1.0	0.973
垂叶榕 *F. benjamina*	L	3.5	0.961
秋枫 *B. javanica*	L	4.0	0.901
黄葛树 *F. virens*	L	4.0	0.916
杧果 *M. indica*	QPT	3.0	0.988

2.2　8 种古树生境适宜度的关键环境因子分析

对影响 8 种古树生境适宜度的主要环境因子进行比较，结果（表 4）显示，人口密度分布因子是高山榕、见血封喉、荔枝、酸豆、垂叶榕等多种古树生境适宜度的重要影响因素，说明人类活动及其聚集程度在很大程度上影响古树的适宜生境。除人口密度分布因子外，8 种古树还受到各自独特的气候与土壤等环境因子影响。对比 8 种古树的环境因子贡献率与置换重要值，酸豆的人口密度分布因子贡献率达 35.6%，置换重要值为 41.7%，在重要影响因子中占主导地位，表明人口密度分布对酸豆适生影响程度较深。同样，杧果的土壤碎石体积百分比贡献率达到 46.2%，置换重要值为 55.9%，也凸显了该因子对其生境适宜性的关键作用。而秋枫的各重要影响因子的贡献比例相对均衡，土壤碎石体积百分比、年均降水量和土壤碳酸盐含量的贡献率分别为 18.5%、14.2% 和 12.1%，没有特别突出的主导因子。这表明不同古树的适生分布受主要因子的影响比例不同，有些古树有起主导作用的因子，有些则是多个因子相对均衡地发挥影响。

表 4　8 种古树排名前 3 的环境因子贡献率及置换重要值
Table 4　Contribution rate and permutation importance of environmental factors for the top three of the eight species of ancient trees

树种 Species	环境因子 Environmental factor	贡献率 Contribution /%	置换重要值 Permutation importance /%
高山榕 *F. altissima*	人口密度分布	29.9	25.8
	最冷季度降水量（bio19）	18.7	8.1
	年平均温度（bio1）	13.1	15.4
见血封喉 *A. toxicaria*	年均温度变化范围（bio7）	38.3	15.2
	人口密度分布	24.0	20.9
	降水量季节性变化（bio15）	9.1	7.4
荔枝 *L. chinensis*	海拔	37.0	31.3
	人口密度分布	26.5	32.6
	年均降水量（bio12）	11.1	7.5
酸豆 *T. indica*	人口密度分布	35.6	41.7
	最热季度降水量（bio18）	22.0	5.7
	降水量季节性变化（bio15）	13.8	28.4
垂叶榕 *F. benjamina*	人口密度分布	35.2	38.1
	最热季度降水量（bio18）	13.7	19.8
	最冷季度降水量（bio19）	9.0	4.4
秋枫 *B. javanica*	土壤碎石体积百分比	18.5	13.5
	年均降水量（bio12）	14.2	15.2
	土壤碳酸盐含量（t_$CaCO_3$）	12.1	24.1
黄葛树 *F. virens*	最干季度均温（bio9）	14.2	13.9
	土壤碳酸盐含量（t_$CaCO_3$）	13.2	17.5
	最冷季度降水量（bio19）	11.6	4.5
杧果 *M. indica*	土壤碎石体积百分比	46.2	55.9
	最热季度降水量（bio18）	21.8	14.4
	最干月降水量（bio14）	21.2	15.4

8 种古树中贡献率最高的环境因子对生境适宜度的模型响应曲线（图 2）则表明：高山榕、酸豆及垂叶榕中贡献率最高的环境因子均为人口密度分布因子，其生境适宜度随着人口密度分布从 0 至 4 000 人 /km^2 急速上升，随后随着人口密度分布的增加而下降。年均温度变化范围则是见血封喉中贡献率最高的环境因子，其生境适宜度随着温度的上升而上升，当年均温变化达到 18.2 ℃左右时，见血封喉的生境适宜度达到最高。对于荔枝而言，海拔变化对其在海南岛的生境适宜度影响最大，适宜度随着海拔的上升而上升，当海拔达到或超过 260 m 时，荔枝处于最适宜生境。土壤碎石体积百分比则是对秋枫及杧果在海南岛生境适宜度影响最大的环境因子，对 2 种古树的影响均呈上

升趋势，而最干季度均温对黄葛树在海南岛生境适宜度的影响最大，随着温度的升高呈下降趋势，当最干季度均温达到或大于 23 ℃时，则为黄葛树的最不适宜生境状态。

2.3 8 种古树的适宜性生境变化

MaxEnt 模型预测结果显示，当前气候下 8 种古树的适生范围总面积差异较为显著（表 5）。黄葛树的适宜生境范围最广，约为 20 248.36 km^2；秋枫次之，约为 16 367.39 km^2，二者的适生范围在海南岛占据相当大的比例。而杧果的适宜生境范围最小，约为 1 158.51 km^2；酸豆的适生区域也相对较窄，约为 2 392.41 km^2。剩余几种古树的适生范围面积则处于中等水平，有着相对稳定且一定规模的适宜生长区域。8 种古树在海南岛的适生分布范围（图 3）可以分为以下 4 种类型：

1）北部集中型：高山榕、见血封喉的适宜生境明显倾向于海南岛北部区域。例如高山榕的最适宜生境区域主要集中在临高和儋州 2 个市县，几乎占据两个市县的大部分区域。见血封喉最适宜生境区域主要集中于临高、澄迈、儋州 3 个市县全域；定安县、屯昌县以及琼海市、万宁市、陵水黎族自治县和白沙黎族自治县的零散区域也是见血封喉高度适宜生境区域。

2）中部集中型：垂叶榕、荔枝的主要适宜生境多在海南岛中部区域。垂叶榕的高度适宜生境主要集中在儋州市绝大部分区域、白沙黎族自治县北部大部分区域、琼中黎族苗族自治县北部区

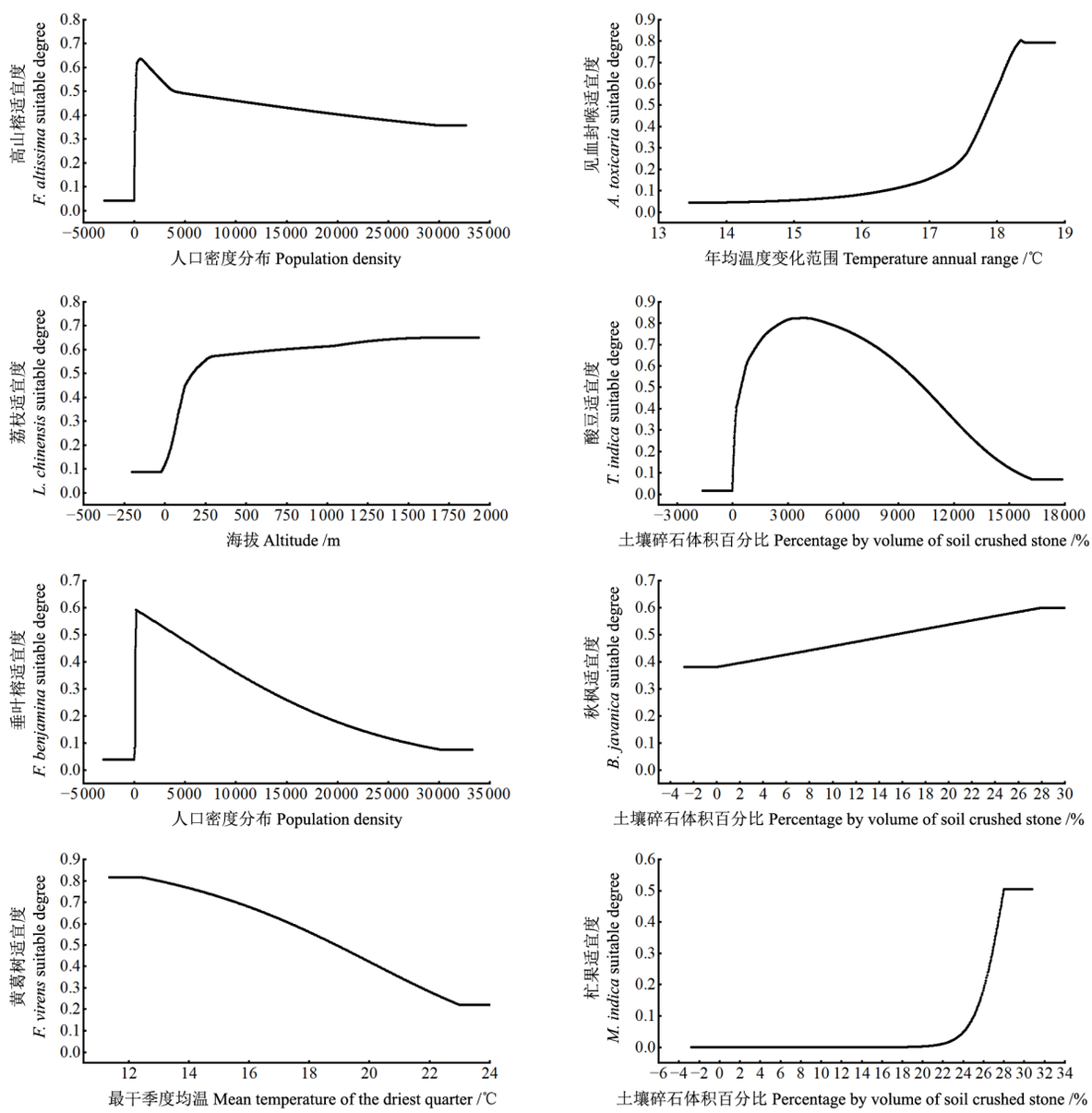


图 2 贡献率最高的环境因子与各古树适宜度的响应曲线

Fig. 2 Response curves between the environmental factor with the highest contribution rate and the suitability degree of each ancient tree species

域和屯昌县南部区域；屯昌县、五指山市及乐东黎族自治县也零散分布有高度适宜生境。荔枝在五指山市、琼中黎族苗族自治县、儋州市南部等中部区域有高度适宜区域。

3）西部集中型：酸豆和杧果的适宜生境集中于海南岛西部几个市县。酸豆的最适宜生境分布区域集中在东方市、乐东黎族自治县、三亚市的沿海区域。杧果的高度适宜生境则主要集中在东方市中部区域和昌江黎族自治县西南部区域。

4）全岛分布型：秋枫、黄葛树的适生范围几乎遍布海南岛各个市县，只是在适宜程度上各有侧重。海南岛的中偏东部比西部更适宜秋枫生长，黄葛树则是西北部市县比东南部市县更适宜生长。

对比 8 种古树未来 2 种气候情景下适宜生境发生的变化，高山榕、酸豆、秋枫、杧果的总适宜区呈现出上升的趋势，其中秋枫的适宜区增加幅度最高，而见血封喉及荔枝在不同气候情景下总适宜区的面积变化呈现下降的趋势。垂叶榕和黄葛树在 SSP126 和 SSP585 两种情景下则呈现相反的变化态势。其中，黄葛树在 SSP126 气候情景下，总适宜区的降幅达到了 13.7%（表 6）。

表 5　当前气候下 8 种古树的适宜生境面积

Table 5　Area of suitable habitat for eight species of ancient trees under current climate　　km^2

树种 Species	低度适宜 Low	中度适宜 Medium	高度适宜 High	极度适宜 Very high	总适宜区 Total suitable area
高山榕 *F. altissima*	27 639.19	3 958.03	1 526.25	776.53	6 260.81
见血封喉 *A. toxicaria*	28 077.30	3 749.45	1 438.29	634.96	5 822.70
荔枝 *L. chinensis*	27 674.38	4 223.57	1 407.30	594.75	6 225.62
酸豆 *T. indica*	31 507.59	1 443.32	659.25	289.84	2 392.41
垂叶榕 *F. benjamina*	27 565.48	4 273.00	1 584.05	477.48	6 334.52
秋枫 *B. javanica*	17 532.61	9 567.96	5 595.69	1 203.74	16 367.39
黄葛树 *F. virens*	13 651.64	13 573.74	5 841.13	833.49	20 248.36
杧果 *M. indica*	32 741.49	808.36	262.19	87.96	1 158.51

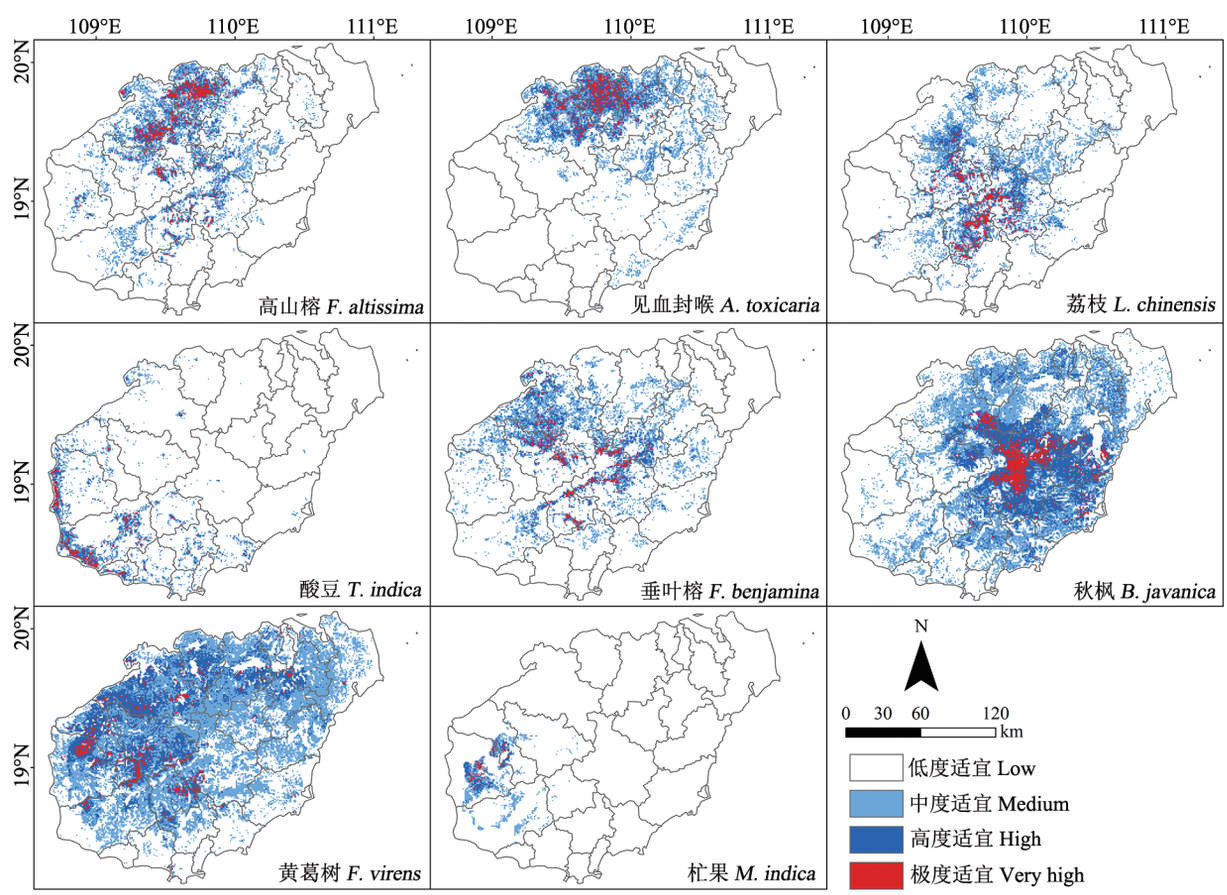


图 3　当前气候下 8 种古树在海南岛的生境适宜区分布

Fig. 3　Habitat suitability of the eight species of ancient trees on Hainan island under current climate

表 6　8 种古树未来 2 种气候情景下较当前的适宜生境变化 †

Table 6　Changes in suitable habitat for eight species of ancient trees under two future climate scenarios compared to the current one

树种 Species	时期 Period	低度适宜 Low /%	中度适宜 Medium /%	高度适宜 High /%	极度适宜 Very high /%	总适宜区 Total suitable area /%
高山榕 *F. altissima*	当前	81.5	11.7	4.5	2.3	18.5
	SSP126	79.0/−2.5	13/1.3	5.5/1.0	2.5/0.2	21.0/2.5
	SSP585	77.4/−4.1	14.1/2.4	5.8/1.3	2.6/0.3	22.6/4.1
见血封喉 *A. toxicaria*	当前	82.8	11.1	4.2	1.9	17.2
	SSP126	85.3/2.5	8.5/−2.6	4.1/−0.1	2.1/0.2	14.7/−2.5
	SSP585	83.7/0.9	10.4/−0.7	4.3/0.1	1.6/−0.3	16.3/−0.9
荔枝 *L. chinensis*	当前	81.6	12.5	4.2	1.8	18.4
	SSP126	82.7/1.1	11.7/−0.8	4.0/−0.2	1.6/−0.2	17.3/−1.1
	SSP585	82.7/1.1	11.9/−0.6	3.9/−0.3	1.5/−0.3	17.3/−1.1
酸豆 *T. indica*	当前	92.9	4.3	1.9	0.9	7.1
	SSP126	92.2/−0.7	5.1/0.8	1.8/−0.1	0.8/−0.1	7.8/0.7
	SSP585	92.4/−0.5	4.9/0.6	1.9/0	0.8/−0.1	7.6/0.5
垂叶榕 *F. benjamina*	当前	81.3	12.6	4.7	1.4	18.7
	SSP126	85.5/4.2	10.6/−2.0	3.2/−1.5	0.7/−0.7	14.5/4.2
	SSP585	83.3/2.0	11.6/−1.0	4.0/−0.7	1.1/−0.3	16.7/−2.0
秋枫 *B. javanica*	当前	51.7	28.2	16.5	3.6	48.3
	SSP126	45.5/−6.2	32.0/3.8	18.6/2.1	4.0/0.4	54.5/6.2
	SSP585	44.3/−7.4	33.8/5.6	19.6/3.1	2.3/−1.3	55.7/7.4
黄葛树 *F. virens*	当前	40.3	40.0	17.2	2.5	59.7
	SSP126	54.0/13.7	30.5/−9.5	13.5/−3.7	2.0/−0.5	46.0/−13.7
	SSP585	38.3/−2.0	41.6/1.6	16.6/−0.6	3.5/1.0	61.7/2.0
杧果 *M. indica*	当前	96.6	2.4	0.8	0.3	3.4
	SSP126	92.2/−4.4	5.6/3.2	1.6/0.8	0.6/0.3	7.8/4.4
	SSP585	96.4/−0.2	2.4/0	0.9/0.1	0.2/−0.1	3.6/0.2

† 不同未来气候情景的适宜生境占比为 2050 时期和 2070 时期的平均值。
The proportion of suitable habitat for different future climate scenarios is averaged over the 2050 and 2070 periods.

在未来 2 种情景下，高山榕的适宜区域继续向东扩散至海口市区域；秋枫未来适宜扩张区域主要集中于澄迈县南部和定安县北部交界区域，以及儋州市南部和白沙黎族自治县北部交界区域；酸豆未来基本延续当前气候适宜区域边缘扩散的趋势。而杧果在未来气候下扩张面积较广，尤其是 SSP126 情景下，持续向东扩张，白沙黎族自治县、儋州市南部和琼中黎族苗族自治县北部交界区域将成为其未来适生区域。荔枝在未来 2 种气候情景下的变化区域则主要集中于海南岛北部，如临高县等部分区域；见血封喉适生区域产生的变化主要集中在海南岛东部几个市县的部分区域，如海口市、定安县、屯昌县和琼海市。垂叶榕在未来气候下收缩区域则分布于北部几个市县交界区域；黄葛树的收缩区域则主要集中在海口市琼山区和文昌市接壤区域、澄迈县南部和定安县、屯昌县北部接壤区域（图 4）。

2.4　古树的损失、增益和周转

在不同的气候情景下，海南岛古树的损失、增益和周转情况存在一定差异。不同的气候情景下古树的增益变化与气候情景及年份之间无明显的关系。根据 R 语言 Raster 包的运行结果，古树损失和周转的变化范围为 0 ～ 100%，在 2050 时期的 SSP126 情景下，古树的平均损失率为 14.48%，平均周转率为 23.05%；SSP585 情景下，古树的平均损失率为 8.08%，平均周转率为 22.36%。而 2070 时期的 SSP126 情景下，古树的平均损失率为 15.12%，平均周转率为 23.93%；SSP585 情景下，古树的平均损失率为 12.01%，平均周转率为 21.56%。从整体来看，古树的平均损失率和周转率随气候强度的增强呈下降趋势。在 SSP126 气候情景下，古树的平均损失率和周转率随着年份增加呈现缓慢增长的趋势。SSP585 气候情景下，古树的平均损失率随着年份的增加则呈现上升的趋势。在未来气候情景下，相较于海南岛中部区域的几个市县，未来古树损失、增益和周转较高的区域主要集中在海南岛东北部的海口市、定安县、琼海市及文昌市和西南部的东方市、乐东黎族自治县及三亚市等沿海市县（图 5）。

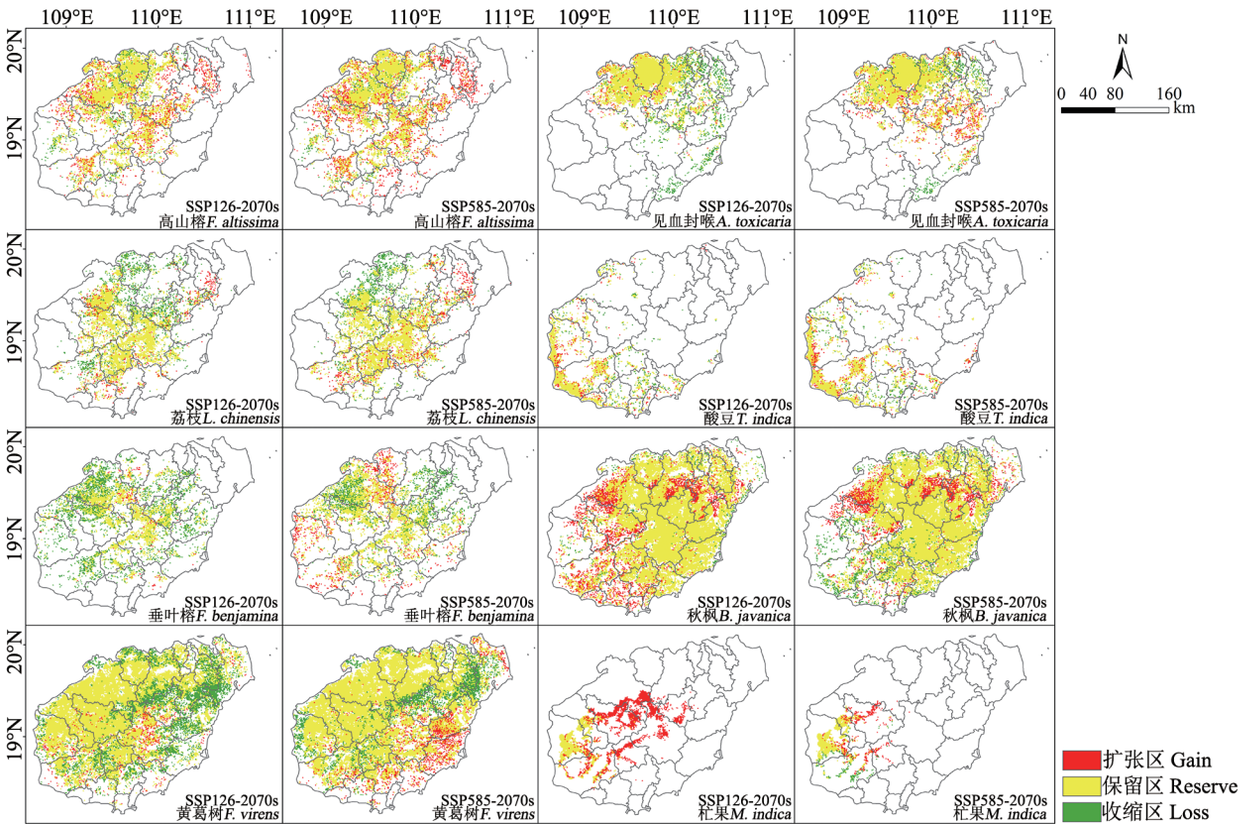


图 4　8 种古树在 2070 时期 2 种气候情景下潜在适宜生境变化趋势

Fig. 4　Potential habitat change trends of eight species of ancient trees under two climate scenarios in 2070s

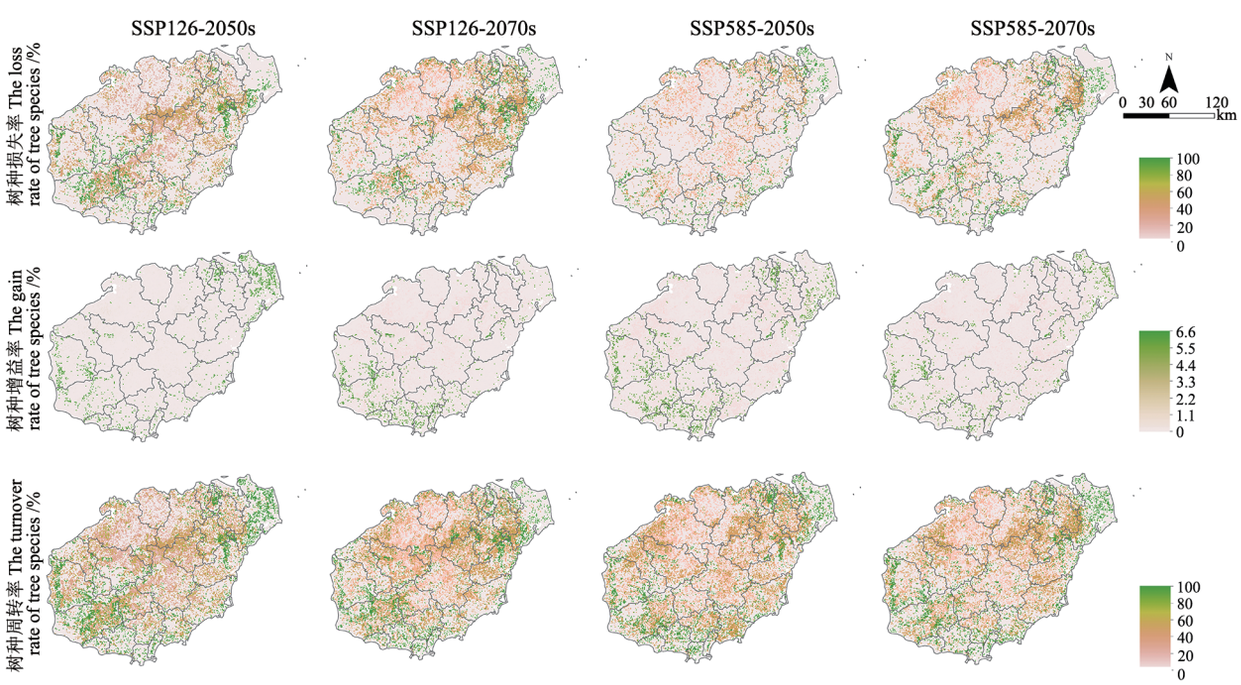


图 5　2041—2080 年 2 种气候情景下 8 种古树损失、增益与周转的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of loss, gain and turnover of eight species of ancient trees under two climate scenarios from 2041 to 2080

3　结论与讨论

3.1　讨　论

中国古树的分布格局及潜在适宜生境是多种因素综合作用的结果，这些因素主要包括气候因子、土壤条件、人类活动强度以及地形地貌。它们在不同区域和具有不同种群特征的古树中展现出不同的相关性 [25-26]。在 8 种古树中，人口密度

分布作为影响多种古树适宜分布的重要因子，其对多种古树生境适宜度的贡献率与置换重要值也较高。有研究表明，人类活动对不同区域的古树分布有着较大的影响 [27-28]。本研究结果显示，海南多种古树的生境适宜度与人口密度分布呈现单峰变化关系。在当前人口增长情景下，由于海南部分区域的人口密度分布尚未达到对古树生境构成压力的水平，因此人类聚居地对古树的潜在生境产生了正面作用，这可能与海南地区的民族宗教和风水文化有关。相关的民族文化因素增强了当地居民对古树的保护意识 [29]。然而，人口密度分布对古树生境适宜度的正面影响是有限的。未来随着人口的继续增长，城市化加速可能导致当地景观破碎化，微气候、冠层环境和土壤湿度等生境条件恶化，超出古树的承受范围，从而威胁大型古树种群的生存，可能导致其分布减少，甚至加速死亡 [30]。因此，人类活动对古树的影响具有双重性 [31]。

不同古树的适生分布既有共性的人口密度分布因子，也受各自特定的气候、土壤等因子的共同作用。物种的分布会受到气候、地形、土壤以及人为活动等因素的共同影响 [32-33]。例如，Wan 等 [34] 研究指出，在青海省的高寒地区，除了被广泛认知的气候因素外，人类干扰程度和土壤条件同样对古树生长环境的稳定性有重要影响，进而间接决定了古树的分布模式。这些因素的相互作用共同塑造了古树对所处环境的适应表现。本研究结果也显示，如最冷季度降水量和年平均温度等环境要素对高山榕的生长与分布有着关键意义。年均温度变化范围和降水量季节性变化对见血封喉产生较大的影响。而土壤碎石体积百分比等因素也对秋枫、杧果等古树的生境范围起到了一定的限制或促进作用。相关研究也曾表明，土壤性质与古树的种群规模和分布密切相关 [35]。由此可见，树种的生长与传播并非受单一环境因素的影响，而是受多种环境因子综合作用的结果 [36]。

对比 8 种古树的适生范围，秋枫和黄葛树在海南岛拥有更为广阔的适生区域。这表明，秋枫和黄葛树经过长期进化能更好地适应海南岛的多种生态条件。而杧果、酸豆的适生区域则在 8 种古树中相对狭窄，反映出它们对特定环境条件存在高度依赖性，这些区域构成其生态适宜性的核心地带。酸豆作为海南乡土树种中的归化品种，相较于其他树种，其潜在适宜生境主要集中于海南岛的西南部，这与酸豆喜热、耐旱、防风等习性高度契合 [37]。CMIP6 基于辐射强迫水平和当前的国家环境，提出了 4 种共享的社会经济路径（SSPs），从 SSP126 至 SSP585 情景表明气候变化的复杂程度加剧。结果显示，8 种古树的适生区域与当前时期相比，生境范围变化主要集中于全域的边缘地带。从整体来看，未来气候情景下海南岛古树的增益、损失及周转率较高的区域主要集中在东北部和西南部的沿海市县内部，中部市县内古树的周转率较为平稳。研究显示，区域气候的变化会导致陆地生态系统结构与功能发生改变 [24,38]，而海拔与地形异质性能够缓冲气候变暖带来的生态扰动 [24,39]。海南岛中部地区海拔相对较高，地形更为复杂且分布有广阔的热带雨林，可能更适合树种的生存。古树蕴含着丰富的生态历史遗传信息，对于探究树种的生态演化具有无可替代的科研价值 [40]。树种周转率代表物种组成的更替程度，海南岛中周转率较高的区域主要由古树损失所导致。因此，在未来海南岛发生较高的周转情况时，可能对当地树种分布与森林结构产生一定的影响 [41]。

古树的流失是自然因素和人为因素在各种时空尺度上相互作用的结果 [42]。因此，深入了解古树的适宜生境及其驱动因素，对于制定有效的古树保护管理措施至关重要。未来气候情景下，海南岛古树损失率和周转率较高的区域，可能会影响该区域古树的适应生存能力，需要开展相关古树的自然或人为辅助迁移等系统研究，提高受威胁古树的适应能力。为了防止人类活动干扰导致的古树生境破碎化等问题，可以将古树视为一种小型景观元素进行保护。对于那些生长于城市和生产用地中的古树，由于无法通过建立大型生态保护区进行统一保护，可根据古树的特定生境条件，采取精细化、针对性的保护措施 [35]。在未来对海南古树的管理中，可针对古树生境适宜性高的区域，基于这些地区的环境条件来制定相应的保护措施。同时，应对气候变化中影响古树生境适宜性的关键环境因子进行持续监测，使用先进的仪器设备和技术手段，有针对性地制定保护方案，并开展古树生长状况的长期健康评估 [43]。

3.2 结 论

本研究借助 MaxEnt 模型与 ArcGIS 平台，对海南岛上 8 种常见古树在不同时期气候条件下的潜在适宜生境及其主导环境因子进行了深入分析。研究结果显示，人类活动与自然环境对 8 种古树在海南岛潜在适宜生境具有综合影响作用。通过对当前气候状况及未来气候预测情景的对比评估，

未来气候情景总适宜区增加的树种有高山榕、酸豆、秋枫、杧果；总适宜区减少的树种有见血封喉及荔枝；垂叶榕和黄葛树在 SSP126 和 SSP585 两种情景下则呈现出两种相反的变化态势。未来古树损失、增益和周转较高的区域主要集中在海南岛的东北部和西南部等沿海市县。本研究结果可为海南地区古树资源的科学保护与管理提供重要参考，为制定适应气候变化的科学有效策略提供支撑。

致谢：衷心感谢海南国家公园研究院院长宋希强教授在本论文研究设计与撰写中的悉心指导，以及课题组成员在数据收集环节的积极参与和支持。

参考文献：

[1] BLICHARSKA M, MIKUSIŃSKI G. Incorporating social and cultural significance of large old trees in conservation policy[J]. Conservation Biology,2014,28(6):1558-1567.

[2] 黄力 , 靳程 , 周礼华 , 等 . 人类聚居地的古树 : 分布格局、驱动因素与保护实践 [J]. 广西植物 ,2021,41(10):1665-1673.
HUANG L, JIN C, ZHOU L H, et al. Large old trees in human settlements: distribution patterns, drivers and conservation practices[J]. Guihaia,2021,41(10):1665-1673.

[3] LINDENMAYER D B, LAURANCE W F. The ecology, distribution, conservation and management of large old trees[J]. Biological Reviews,2017,92(3):1434-1458.

[4] ZHANG H, LAI P Y, JIM C Y. Species diversity and spatial pattern of old and precious trees in Macau[J]. Landscape and Urban Planning,2017,162:56-67.

[5] THORN S, SEIBOLD S, LEVERKUS A B, et al. The living dead: acknowledging life after tree death to stop forest degradation[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2020,18(9):505-512.

[6] PEDERSON N. External characteristics of old trees in the eastern deciduous forest[J]. Natural Areas Journal,2010,30(4):396-407.

[7] LINDENMAYER D B, BANKS S C, LAURANCE W F, et al. Broad decline of populations of large old trees[J]. Conservation Letters,2014,7(1):72-73.

[8] MIETKIEWICZ N, KULAKOWSKI D, ROGAN J, et al. Long-term change in sub-alpine forest cover, tree line and species composition in the Swiss Alps[J]. Journal of Vegetation Science, 2017,28(5):951-964.

[9] LINDENMAYER D B, BLANCHARD W, MCBURNEY L, et al. Interacting factors driving a major loss of large trees with cavities in a forest ecosystem[J]. PLoS One,2012,7(10):e41864.

[10] 韩顺鑫 , 余婷 , 金正 , 等 . 不同气候情景下三种槐树在中国的潜在分布 [J]. 生态学报 ,2025,45(4):1775-1787.
HAN S X, YU T, JIN Z, et al. Predicting potential distributions of three locust trees in China under different climate scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):1775-1787.

[11] 翁慧莹 , 刘益鹏 , 杨黔越 , 等 . 福建柏地理分布及随气候变化的分布格局模拟 [J]. 生态学报 ,2025,45(1):137-146.
WENG H Y, LIU Y P, YANG Q Y, et al. The simulation of geographical distribution and distribution pattern along with climate change of *Chamaecyparis hodginsii*[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(1):137-146.

[12] 叶兴状 , 张明珠 , 赖文峰 , 等 . 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测 [J]. 生态学报 ,2021,41(20):8135-8144.
YE X Z, ZHANG M Z, LAI W F, et al. Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization model[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(20): 8135-8144.

[13] ZHUO Z H, XU D P, PU B, et al. Predicting distribution of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. in China[J]. BMC Ecology, 2020,20(1):46.

[14] AKOBIA I, JANIASHVILI Z, METREVELI V, et al. Modelling the potential distribution of subalpine birches (*Betula* spp.) in the Caucasus[J]. Community Ecology,2022,23(2):209-218.

[15] 吴胜安 , 邢彩盈 , 朱晶晶 . 海南岛气候特征分析 [J]. 热带生物学报 ,2022,13(4):315-323.
WU S A, XING C Y, ZHU J J. Analysis of climate characteristics in Hainan island[J]. Journal of Tropical Biology,2022,13(4): 315-323.

[16] 魏伟 , 曾诗瑶 , 尹力 , 等 . 近 40 年海南岛国土空间格局演化的生态效应及其影响因素 [J]. 生态学报 ,2024,44(12):5083-5101.
WEI W, ZENG S Y, YIN L, et al. Ecological effects and its influencing factors of Hainan island's territorial spatial pattern evolution in the past 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica,2024, 44(12):5083-5101.

[17] 林玲 , 黄川腾 , 陈飞飞 , 等 . 海南省一级古树资源特征及空间分布格局分析 [J]. 分子植物育种 ,2024,22(19):6514-6522.
LIN L, HUANG C T, CHEN F F, et al. Analysis of the characteristics and spatial distribution pattern of the first-class old trees resources in Hainan Province[J]. Molecular Plant Breeding, 2024,22(19):6514-6522.

[18] YANG J, HUANG X. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,2021, 13(8):3907-3925.

[19] 易烜 , 杨振宇 , 朱晋梅 , 等 . 基于 MaxEnt 模型预测湖南省榧树适宜分布区 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(5):46-55.
YI X, YANG Z Y, ZHU J M, et al. Identification of suitable

distribution areas for *Torreya grandis* in Hunan Province based on the MaxEnt model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(5):46-55.

[20] 云英英 , 范秋云 , 史佑海 . 基于最大熵模型的海南杜鹃在中国的潜在地理分布 [J]. 热带作物学报 ,2024,45(5):1031-1039.
YUN Y Y, FAN Q Y, SHI Y H. Potential geographical distribution of *Rhododendron hainanense* based on MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2024,45(5):1031-1039.

[21] 唐继敏 , 殷晓洁 , 高伟杰 , 等 . 气候变化下中国珍稀濒危柏科树种潜在适生区分布 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(8):49-61.
TANG J M, YIN X J, GAO W J, et al. Distribution of potential suitable areas of rare and endangered *Cupressaceae* species in China under climate change[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(8):49-61.

[22] 凌冬霖 , 潘玥婧 , 黄春晖 , 等 . 气候变化情景下细叶云南松的潜在分布预测 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(12):154-165.
LING D L, PAN Y J, HUANG C H, et al. Prediction of potential distribution of *Pinus yunnanensis* under climate change scenarios[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(12):154-165.

[23] LI G Q, HUANG J H, GUO H, et al. Projecting species loss and turnover under climate change for 111 Chinese tree species[J]. Forest Ecology and Management,2020,477:118488.

[24] 杜倩 , 魏晨辉 , 梁陈涛 , 等 . 中国东北地区 12 个建群树种对气候变化响应的 MaxEnt 模型分析 [J]. 生态学报 ,2022,42(23):9712-9725.
DU Q, WEI C H, LIANG C T, et al. Future climatic adaption of 12 dominant tree species in northeast China under 3 climatic scenarios by using MaxEnt modeling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(23):9712-9725.

[25] LIU J J, YANG B, LINDENMAYER D B. The oldest trees in China and where to find them[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2019,17(6):319-322.

[26] HUANG L, JIN C, ZHEN M M, et al. Biogeographic and anthropogenic factors shaping the distribution and species assemblage of heritage trees in China[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2020,50:126652.

[27] 刘大伟 , 王宇健 , 谢春平 , 等 . 安徽省一级古树的资源特征及影响因子分析 [J]. 植物资源与环境学报 ,2020,29(1):59-68.
LIU D W, WANG Y J, XIE C P, et al. Analyses on resource characteristics and impact factors of first-class old trees in Anhui Province[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2020, 29(1):59-68.

[28] FU Q C, QIU E F, ZHANG Y, et al. Discussion of the distribution pattern and driving factors of 2 large old tree resources in Beijing[J]. Forests,2022,13(9):1500.

[29] 郑梦菲 , 邓忠坚 , 刘倬志 , 等 . 云南彝族地区不同城镇化水平区域的古树遗留特征 [J]. 广西植物 ,2024,44(3):600-610.
ZHENG M F, DENG Z J, LIU Z Z, et al. Characteristics of ancient trees in different urbanization rates areas of Yi nationality in Yunnan Province[J]. Guihaia,2024,44(3):600-610.

[30] LE ROUX D S, IKIN K, LINDENMAYER D B, et al. The future of large old trees in urban landscapes[J]. PLoS One,2014,9(6): e99403.

[31] TIAN P P, LIU Y F, LYU W, et al. Exploring influential factors on biomass and diversity of ancient trees in human-dominated regions: a case study in Guangdong Province, China[J]. Journal of Cleaner Production,2024,480:143965.

[32] 赵泽芳 , 卫海燕 , 郭彦龙 , 等 . 人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测 [J]. 应用生态学报 ,2016,27(11):3607-3615.
ZHAO Z F, WEI H Y, GUO Y L, et al. Potential distribution of *Panax ginseng* and its predicted responses to climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(11):3607-3615.

[33] 刘超 , 霍宏亮 , 田路明 , 等 . 不同气候情景下木梨潜在地理分布格局变化的预测 [J]. 应用生态学报 ,2020,31(12):4073-4079.
LIU C, HUO H L, TIAN L M, et al. Prediction of potential geographical distribution patterns of *Pyrus xerophila* under different climate scenarios[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(12):4073-4079.

[34] WAN J Z, LI Q F, WEI G L, et al. The effects of the human footprint and soil properties on the habitat suitability of large old trees in alpine urban and periurban areas[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2020,47:126520.

[35] LINDENMAYER D B. Conserving large old trees as small natural features[J]. Biological Conservation,2017,211:51-59.

[36] 沈媛婷 , 李良涛 . 基于 GIS 的武安市古树名木空间分布及影响因素研究 [J]. 林业调查规划 ,2023,48(5):1-7.
SHEN Y T, LI L T. Spatial distribution and influencing factors of ancient and heritage trees in Wu'an City based on GIS[J]. Forest Inventory and Planning,2023,48(5):1-7.

[37] 王科明 , 孙衍汤 , 陈润泽 , 等 . 海南岛 5 个市县酸豆种质资源调查分析 [J]. 热带林业 ,2020,48(4):34-37.
WANG K M, SUN Y T, CHEN R Z, et al. Investigation and analysis of *Tamarindus indica* germplasm resources in five cities and counties of Hainan island[J]. Tropical Forestry,2020,48(4): 34-37.

[38] PENG S S, PIAO S L, CIAIS P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on northern hemisphere vegetation[J]. Nature,2013,501(7465):88-92.

（下转第 200 页）

[22] 李明鹏 , 李文婷 , 王翠翠 , 等 . 基于响应面法研究梁山慈竹材梯度结构理化性能的相关性 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2021,41(7):165-172.
LI M P, LI W T, WANG C C, et al. Study on the correlation of physical and chemical properties of *Dendrocalcamus farinosus* gradient structure based on response surface methodology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021,41(7):165-172.

[23] 张新荔 , 吴义强 , 胡云楚 . 基于响应面法的木质素炭制备工艺优化 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2017,37(8):114-121.
ZHANG X L, WU Y Q, HU Y C. Optimization of preparation conditions of lignin based conductive char using response surface methodology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2017,37(8):114-121.

[24] 刘德军 , 董彬 , 李文斌 , 等 . 无醛无毒防火秸秆人造板的制备与性能试验 [J]. 农业工程学报 ,2017,33(1):301-307.
LIU D J, DONG B, LI W B, et al. Preparation and performance test of formaldehyde-free innocuous and nonflammable straw particleboard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(1):301-307.

[25] 国家标准化管理委员会 . 人造板及饰面人造板理化性能试验方法 : GB/T 17657—2022[S]. 北京 : 中国标准出版社 ,2022.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods of evaluating the properties of wood-based panels and surface decorated wood-based panels: GB/T 17657-2022[S]. Beijing: Standards Press of China,2022.

[26] 李赐生 , 宋健 . 棉秆碎料轻质保温板性能研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2016,36(9):123-126.
LI C S, SONG J. Study on thermal insulation property of lightweight cotton stalk particle board[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2016, 36(9):123-126.

[27] 葛松涛 , 寿泉洪 , 韩文凤 , 等 . 响应面法优化酸溶蛋白发酵工艺 [J]. 饲料工业 ,2023,44(13):14-20.
GE S T, SHOU Q H, HAN W F, et al. Optimization of acid soluble protein fermentation process by response surface methodology[J]. Feed Industry,2023,44(13):14-20.

[28] 尹宁宁 , 李文珠 , 李小晴 , 等 . 基于响应曲面法的粉状竹炭密度测试方法探究 [J]. 竹子学报 ,2021,40(1):59-63.
YIN N N, LI W Z, LI X Q, et al. Density test of powdered bamboo charcoal based on response surface methodology[J]. Journal of Bamboo Research,2021,40(1):59-63.

[29] 孙晓东 , 彭亮 , 吴义强 , 等 . 基于响应面优化竹单板泡沫铝复合材料工艺研究 [J]. 林产工业 ,2021,58(7):1-5,10.
SUN X D, PENG L, WU Y Q, et al. Study on process of bamboo veneer foam aluminum composites based on response surface optimization[J]. China Forest Products Industry,2021,58(7): 1-5,10.

[30] 何勋 . 玉米秸秆皮材料特性及其制板工艺研究 [D]. 郑州 : 河南农业大学 ,2016.
HE X. Materials properties and board manufacturing process of corn stalk rind[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 100 页）

[39] CARROLL C, LAWLER J J, ROBERTS D R, et al. Biotic and climatic velocity identify contrasting areas of vulnerability to climate change[J]. PLoS One,2015,10:e0140486.

[40] XIE C P, WU S S, LIU D W, et al. Species composition, distribution patterns, and conservation needs of large old trees in Baisha, southern China[J]. Urban Ecosystems,2024,27(6): 2381-2395.

[41] DYDERSKI M K, PAŹ S, FRELICH L E, et al. How much does climate change threaten European forest tree species distributions?[J]. Global Change Biology,2018,24(3):1150-1163.

[42] LIU J J, LINDENMAYER D B, YANG W J, et al. Diversity and density patterns of large old trees in China[J]. Science of the Total Environment,2019,655:255-262.

[43] 洪文君 , 叶永昌 , 张浩 . 香港古树名木资源特征与分布格局 [J]. 广东园林 ,2021,43(1):56-59.
HONG W J, YE Y C, ZHANG H. Resource characteristics and distribution pattern of historical tree and famous tree in Hong Kong[J]. Guangdong Landscape Architecture,2021,43(1):56-59.

[本文编校：谢荣秀]