



海南热带雨林国家公园金钟藤空间格局和环境因子分析

庞瑞, 熊国玲, 赖恢铿, 陈小孟, 何荣晓, 周韬, 杨帆

引用本文:

庞瑞, 熊国玲, 赖恢铿, 等. 海南热带雨林国家公园金钟藤空间格局和环境因子分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(1): 34–44.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4971>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

系统发育多样性与系统发育结构在岛屿植物群落保护中的意义——以蜈支洲岛为例

Significance of Phylogenetic Diversity and Phylogenetic Structure in Conservation of Island Plant Communities: A Case of Wuzhizhou Island

热带亚热带植物学报. 2017, 25(5): 419–428 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3712>

内生真菌和内生细菌接种对雷公藤生长和次生代谢产物积累的影响

Effects of Inoculation with Endophytic Fungi and Endophytic Bacteria on Growth and Accumulation of Secondary Metabolites in *Tripterygium wilfordii*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 347–355 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4176>

海南霸王岭陆均松种子雨和土壤种子库特征

Characteristics of Seed Rain and Soil Seed Bank of *Dacrydium pierrei* in Bawangling, Hainan

热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 13–23 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3781>

黔中喀斯特9种木质藤本叶功能性状研究

Studies on Leaf Functional Traits of Nine Woody Lianas in the Karst Area of Central Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 455–464 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4328>

海南岛油茶种质资源遗传多样性的SRAP分析

Genetic Diversity Analysis of *Camellia oleifera* Resources Based on SRAP Markers in Hainan Island

热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 659–668 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4027>

向下翻页, 浏览PDF全文

海南热带雨林国家公园金钟藤空间格局和环境因子分析

庞瑞^a, 熊国玲^{a,b}, 赖恢铿^a, 陈小孟^a, 何荣晓^a, 周韬^a, 杨帆^{a*}

(海南大学, a. 热带农林学院; b. 生态学院, 海口 570228)

摘要: 金钟藤(*Merremia boissiana*)是海南岛一种具灾变特性的本土藤本植物, 近年来在海南热带雨林国家公园内迅速扩散, 严重威胁了当地生态系统的稳定。为分析关键环境因子对金钟藤发生的影响, 该研究通过实地调查, 分析金钟藤在海南热带雨林国家公园的空间分布格局, 建立环境驱动因子与金钟藤发生概率的预测模型。结果表明, 金钟藤在五指山片区危害最为严重, 空间核密度呈现不均匀的聚集特征, 且发生区域表现出正向空间自相关($P<0.01$)。其主要集中在人类活动频繁的区域, 如人工林、次生林林缘和道路边缘, 发生最为严重的海拔范围为 300~900 m。此外, 随机森林模型表明, 距道路的距离和海拔是影响金钟藤发生的主要环境因子。Logistic 回归分析结果表明, 距道路距离、海拔、距人工林距离和距生态游憩点距离是影响金钟藤发生的重要环境因子($P<0.01$)。金钟藤的扩散与人类活动密切相关, 尤其在生产和旅游活动密集的区域, 建议加强该区域的监测和防控措施以防止其进一步扩散。

关键词: 金钟藤; 海南热带雨林国家公园; 人类活动干扰; 空间分布

doi: 10.11926/jtsb.4971

CSTR:32235.14.jtsb.4971

Spatial Pattern and Environmental Factor Analysis of *Merremia boissiana* in Hainan Tropical Rainforest National Park

PANG Rui^a, XIONG Guoling^{a,b}, LAI Huikeng^a, CHEN Xiaomeng^a, HE Rongxiao^a, ZHOU Tao^a, YANG Fan^{a*}

(a. School of Tropical Agriculture and Forestry; b. School of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: *Merremia boissiana*, a native vine with catastrophic characteristics, is rapidly spreading in Hainan Tropical Rainforest National Park in recent years, posing a serious threat to the stability of the local ecosystem. To analyze the influence of key environmental factors on the occurrence of *M. boissiana*, the spatial distribution pattern of *M. boissiana* in the Hainan Tropical Rainforest National Park was analyzed after a field investigation and established a predictive model of environmental driving factors and the occurrence probability of *M. boissiana*. The results showed that *M. boissiana* was most severely harmful in the Wuzhishan area, with an unevenly aggregated spatial kernel density and a positive spatial autocorrelation in the occurrence area ($P<0.01$). It mainly concentrated in areas with frequent human activities, such as the edges of artificial forests, secondary forests, and roads, and the most severely affected altitude range was 300–900 m. In addition, the random forest model indicated that the distance from roads and altitude were the main environmental factors affecting the occurrence of *M. boissiana*. The results of Logistic regression analysis showed that the distance from roads, altitude, the distance from artificial forests, and the distance from ecological recreation areas were important environmental factors

收稿日期: 2024-09-13 接受日期: 2024-11-19

基金项目: 海南省林业局项目(HD-KYH-2023254)资助

This work was supported by the Project of Forestry Administration of Hainan Provincial (Grant No. HD-KYH-2023254).

作者简介: 庞瑞(1999年生), 女, 硕士研究生, 主要从事有害生物遥感研究。E-mail: pangrui0104@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanf_yang@hainanu.edu.cn

affecting the occurrence of *M. boissiana* ($P < 0.01$). The spread of *M. boissiana* is closely related to human activities, especially in areas with intensive production and tourism activities. It is recommended to strengthen monitoring and control measures in these areas to prevent further spread.

Key words: *Merremia boissiana*; Hainan Tropical Rainforest National Park; Human activity disturbance; Spatial distribution

金钟藤(*Merremia boissiana*)是海南岛的一种土著灾变藤本植物, 隶属于旋花科(Convolvulaceae)鱼黄草属^[1], 主要生长在路缘、沟谷、溪边和山坡中下部等环境中, 通过缠绕和覆盖乔灌木, 附着在植物顶端, 阻挡底层植物获取阳光, 最终导致其他植物的死亡^[2-3]。1882年, 金钟藤首次在海南澄迈被记录, 随后迅速扩散^[1]。21世纪以来, 其在海南岛的分布面积已超过 20 km², 呈现出持续蔓延的趋势, 在中部山区尤为严重, 已爆发成灾^[4]。据 2021 年海南热带雨林国家公园霸王岭片区的金钟藤有害生物风险评估调查显示, 金钟藤被列为高度危险有害生物^[5]。

金钟藤具有高度的生态适应性^[6-8]、高效的基因调控机制^[9-10]、繁殖能力强^[11]、扩散速度快^[12], 能迅速覆盖并抑制周围植物, 从而形成高度单一的优势群落^[3]。其快速扩散侵扰了海南热带雨林国家公园的生态系统, 导致生物多样性下降^[13], 威胁了国家公园的长期健康与稳定。然而, 现有研究主要集中在生理特性、群落特征、遗传基础等方面, 对于其空间分布模式和影响因子的研究相对不足。基于局部实地调查, 有研究发现金钟藤种群呈聚集分布或随机分布, 这与其自身的生物学特性和受环境因子胁迫相关^[3]。在海拔较高、光照条件相似、群落结构和树种组成一致的区域, 金钟藤种群往往呈随机分布; 而在人为活动频繁、光照差异明显的区域, 种群则易形成聚集分布。

近 20 年来, 金钟藤在海南岛快速蔓延并造成危害^[4], 逐渐成为土著灾变植物。已有研究指出, 海拔和人为干扰可能是影响金钟藤扩散的关键因素, 其扩散趋势从低海拔向高海拔地区推进, 高海拔区域的种群多处于灾变后期阶段^[3]。人类活动直接或间接干预导致栖息地结构的变化, 如修建道路等基础设施, 会导致当地林分结构破碎化, 从而为金钟藤的扩散提供了机会。在这种破碎化的林分结构中, 金钟藤凭借其强大的无性繁殖能力和较高的光合速率^[8-11], 能够在受干扰严重的林缘、旅游小径附近定殖, 并通过匍匐和攀爬生长至附近的自然

林^[5]。这种现象与入侵物种的生长分布特性表现一致, 对豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)^[14]、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)^[15]和薇甘菊(*Mikania micrantha*)^[16]的扩散动态研究表明, 道路^[17]、海拔^[18]和人为活动^[19]等是影响其扩散的重要因素。因此, 随着海南热带雨林国家公园生态旅游的迅速发展, 多种环境因子的扰动作用日益增加^[20], 这可能会进一步加剧金钟藤的扩散态势。因此, 深入分析金钟藤的扩散规律及关键影响因子的作用机制对于有效控制金钟藤种群生长至关重要^[21]。

本研究通过实地调查和分析, 详细探讨了金钟藤在海南热带雨林国家公园的空间分布格局, 并从自然条件和人类活动干扰 2 个方面建立了金钟藤发生概率的预测模型, 定量分析关键环境因子对其发生的影响。研究旨在揭示环境因子影响下金钟藤的发生规律, 预测其未来的潜在扩散趋势, 为海南热带雨林生态系统的保护和管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

2021 年 10 月, 海南热带雨林国家公园正式成立, 成为我国第一批公布的 5 个国家公园之一。其地处海南岛中部山区, 东起吊罗山, 西至尖峰岭, 南自保亭县毛感乡, 北至黎母山, 区划总面积为 4 269 km²^[22], 地理坐标为 108°44'32"~110°04'43" E, 18°33'16"~19°14'16" N, 该区域属热带海洋性季风气候区^[23]。海南热带雨林国家公园是我国分布面积最广、连片面积最大的岛屿型热带雨林, 森林面积占 96%以上, 海南热带雨林国家公园是生物多样性的重要资源库^[22]。

1.2 数据来源

野外调查和发生程度标准 2021 年 9 月至 2022 年 4 月, 对海南热带雨林国家公园 7 个片区(尖峰岭片区、霸王岭片区、鹦哥岭片区、毛瑞片区、五指山片区、黎母山片区和吊罗山片区)全域范围内的金钟藤分布情况进行了详细调查。本次调查采用

卫星影像判读与实地踏查相结合的方法。首先,通过卫星遥感影像,初步判读金钟藤在遥感影像上灾变分布,在金钟藤连续密集覆盖的区域,影像上呈现具有“绿霉”状的光谱特征,从而掌握其大致分布范围。随后,沿海南热带雨林国家公园道路两侧进行实地踏查,并核实影像判定区域,同时利用无人机标注和定位金钟藤的具体分布区域。利用搭载北斗定位系统的平板进行金钟藤数据采集,并通过 GPS 面积测定功能计算其种群分布面积。最后,结合林业小班资源数据对金钟藤发生面积进行了提取、统计和分析。对金钟藤发生程度达到轻度及以上统计标准的面积,分“轻度、中度、重度”,3 个等级进行统计。轻度:攀援率小于 20%,盖度小于 20%;中度:攀援率 20%~30%,盖度达到 20%~60%;重度:攀援率大于 30%,盖度大于 60%。

环境变量数据 本研究中的环境因子变量包括地形因子、水系因子和人类干扰因子 3 个方面,共包括 7 个变量。地形因子包括海拔(Dem)、坡度(Slope);水系因子包括距水系距离(D wat);人为干扰因子包括距离人工林距离(D pla)、距道路距离(D rd)、距生态游憩点距离(D tra)、距居民点距离(D set)。地形因子来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),其空间分辨率为 30 m。在 ArcGIS 软件,根据海拔数据创建坡度的栅格图层,通过应用“提取分析”工具,从生成的“坡度”栅格数据中提取金钟藤存在点和伪存在点提取海拔和坡度信息。水系因子来源于地球资源数据云平台(<http://gis5g.com>),水系数据包括主要河流、支流和溪流。人为干扰因子包括距人工林距离、距道路距离、距生态游憩点距离和距聚居点距离。其中,道路主要涵盖高速公路、国道、省道、县道和乡道。数据来自全国地理信息资源目录服务系统的 1:100 万全国基础地理数据库(<https://www.webmap.cn>)。在 ArcGIS 软件中,通过“邻域分析”工具来处理空间数据,选择金钟藤分布点和伪分布点作为输入要素,计算每个金钟藤距离人工林、公路、生态游憩点、聚居点的距离,并使用“提取分析”工具为各分布点赋值,将计算得到的距人工林距离、距道路距离、距生态游憩点距离和距聚居点距离数值用于二值 logistic 回归分析。

1.3 数据分析

空间核密度分析 核密度分析的理论基础是概率,它基于地理事件可以发生在空间中的任何

位置,但发生的概率不一样^[24]。核密度分析方法是把每个已知的数据点作为中心点,通过使用核密度函数计算该中心点在指定范围内(半径为某值的圆)对不同网格单元的密度贡献^[25]。与中心点距离越近,密度越大,密度贡献与中心点距离成反比,边际点密度默认为 0,以避免边缘效应;距离越远,密度逐渐减小。此外,若多个中心点在同一位置的密度贡献重合,则贡献值进行累加,以得到该位置的总密度。具体表现为金钟藤发生越密集的区域其周边发生金钟藤危害的概率也就越大,金钟藤发生分布密集程度与核密度值成正比, $P(x_i, y_i) =$

$\frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$, 式中, $P(x_i, y_i)$ 为金钟藤空间点 (x_i, y_i) 的密度值; n 为空间点的数量; h ($h>0$) 为阈值; $(x-x_i)$ 为空间点 x 到 x_i 点的距离; k 函数为空间权重函数。

空间自相关统计 空间自相关分析是评估邻近空间区域中某变量的同一属性值之间的相关程度^[26],通过空间自相关系数的标准来检测区域单位的属性值在空间分布上是否具有聚集性。全局指标是使用一个值衡量该区域整体的自相关度,测量整个研究区域的空间聚集趋势;局部指标是计算目标区域每个空间单元与周围单位在特属性上的相关程度^[27]。全局 Moran 指数 I 用于判断研究区内金钟藤整体发生程度是否存在聚集特征, I 绝对值越接近 1,表明金钟藤发生程度的空间相关性越明显,

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}; \text{局部 Moran}$$

指数 I_i 则表示 i 金钟藤发生程度与邻近金钟藤发生

$$\text{的聚集显著性, } I_i = \frac{n(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}, \text{ 式中, } n$$

为金钟藤危害斑块的数量, y_i 、 y_j 分别为斑块 i 和斑块 j 的发生密度, $\bar{y}$ 为所有斑块金钟藤发生密度的均值, W_{ij} 为空间权重矩阵。

随机森林特征重要性排序 本研究使用了随机森林模型来评估环境因子对金钟藤分布的相对重要性。随机森林通过构建多棵决策树来提高模

型的准确性和稳定性, 是一种集成学习方法^[28]。为了确定各个环境因子的相对重要性, 采用了平均精度下降和基尼指数下降 2 个常用的特征重要性评估指标。其中, 平均精度下降主要反映特征对模型整体预测能力的影响, 而基尼指数下降则更多地反映特征在分类决策中的贡献。

Logistic 回归模型 在数据预处理中, 首先利用 ArcGIS 软件提取金钟藤分布的面数据中心点, 并剔除了中心点与分布面数据存在偏差的记录, 最终确定了 938 个金钟藤存在点用于建模^[14]。真实的物种不出现点通过研究区域内的随机采样获得, 生成“伪不出现点”, 并获取了每个样点的地理位置信息(经度/纬度)。前期处理步骤包括: (1) 利用陆地掩模排除位于水中的随机采样点; (2) 通过缓冲区分析排除位于物种出现点附近 8 个邻域内的随机采样点, 以减少空间自相关的影响。为了预测入侵物种的潜在分布区域, 使用物种实际出现和模拟的非出现位置(称为“伪-物种不出现点”)来构建广义线性模型(GLM)。由于响应变量是二分类数据(0 或 1), 因此采用的 GLM 的二值 logistic 回归^[29]。预测海南热带雨林国家公园内金钟藤的发生概率, 可以使用 Logistic 回归模型来分析金钟藤发生概率, 该模型研究因变量, 因变量为二元分类, 表示金钟藤的存在“1”或不存在“0”。同时, 该模型涉及多个连续自变量。将金钟藤的发生概率定义为 P , 金钟藤不存在概率为 $(1-P)$, 模型关系为: $\ln[p/(1-P)] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$, 式中, β_0 为常量; 自变量 x_n 为筛选出的影响金钟藤分布的各驱动因子; β_n 则是自变量对应的系数。在构建预测金钟藤发生概率的 Logistic 回归模型时, 从数据集中剔除存在多重共线性的变量, 筛选出主要驱动因子, 并将金钟藤分布数据划分为 60% 用于构建模型的建模样本和 40% 则用验证样本。利用建模样本建立能够预测金钟藤发生概率预测模型, 利用验证样本来评估预测模型的准确性。为了评估模型精准评价及阈值确定, 采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC), ROC 曲线下的面积(AUC)是衡量回归模型效果的重要指标, 其值为 0.5~1, 若 ROC 曲线下的面积大于 0.75, 表示该模型模拟效果较好。为了确定模型的最佳临界值, 利用模型的敏感度和特异性计算约登指数(约登指数=敏感度+特异性-1), 模型的准确率、误报率和漏报率计算将通过最佳临界值来计算^[30]。

2 结果和分析

2.1 金钟藤发生空间格局分析

金钟藤发生程度空间分布 调查表明, 海南热带雨林国家公园 7 个片区均有金钟藤危害发生(图 1), 调查发现金钟藤斑块共 1 126 个, 危害总面积为 69.91 km²。金钟藤发生程度以轻度和中度为主, 占总危害面积的 81%。在分布上, 中度危害主要集中在五指山和尖峰岭片区, 其他片区危害程度较轻。重度危害区域主要在尖峰岭片区西部、霸王岭片区北部、毛瑞片区中部和东南部、吊罗山片区东南部以及五指山片区西南部和东部。五指山片区最为密集, 其中五指山片区的轻度和重度危害程度最高。金钟藤在 0~1 200 m 海拔范围内均有发生, 且易分布于 300~599 m 中低海拔区域, 发生面积为 39.3 km², 占总面积的 56.2%, 其中海拔 900~1 200 m 的发生面积最小, 发生面积为 0.3 km², 占总面积的 0.4%。

金钟藤发生程度的空间核密度 利用 ArcGIS 可视化处理和核密度分析功能对海南热带雨林国家公园 7 个片区的金钟藤空间位置信息进行分析, 结果表明, 金钟藤的发生密度在空间上呈现不均匀的聚集特征(图 2)。尖峰岭片区西南部呈现出带状中密度和高密度区域; 霸王岭片区东北部和毛瑞片区中部出现圆状高密度区域; 霸王岭片区西南部和鹦哥岭片区西北部则呈现椭圆状低密度区域; 黎母山片区东北部出现圆状中密度区域; 五指山片区的北部、西南部和东南部构成了一个倒“V”型高密度区域, 并向周边扩散; 吊罗山片区西北区域则出现半圆状高密度和中高密度区域。五指山片区的金钟藤高密度区覆盖面积最广, 且这些高密度与中高密度区域主要集中在人类活动频繁的区域以及道路两侧。

金钟藤危害地块的空间自相关性 海南热带雨林国家公园金钟藤危害地块的全局 Moran 指数 I 为 0.104 938, 表明金钟藤危害地块在空间上具有正空间自相关关系($P < 0.01$), 即空间分布呈聚集特征。图 3 可见, 高值聚集区主要分布在尖峰岭片区、吊罗山片区和鹦哥岭片区的西南部, 以及五指山片区的西南部和东北部, 西南部特征尤为明显。低值聚集区在各片区均有分布, 主要位于靠近公园边界的区域。高值聚集区集中在人为活动较多的区域, 以人工林和次生林为主。低值聚集区则主要分布

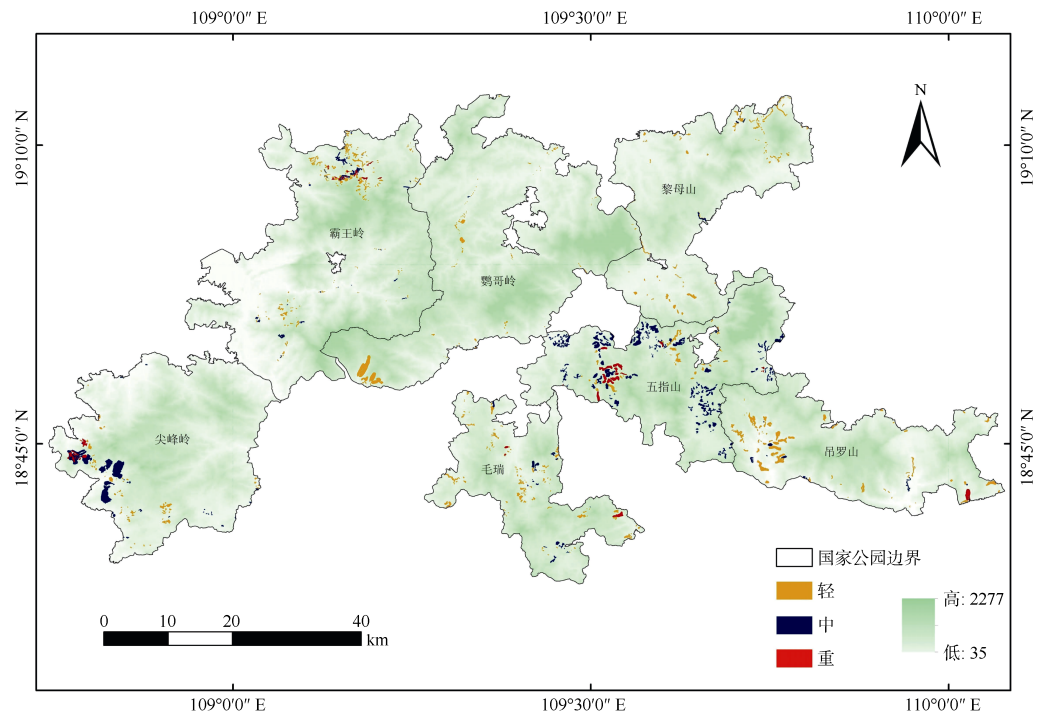


图 1 金钟藤在海南热带雨林国家公园危害程度

Fig. 1 Damage degree of *Merremia boissiana* spread in Hainan Tropical Rainforest National Park

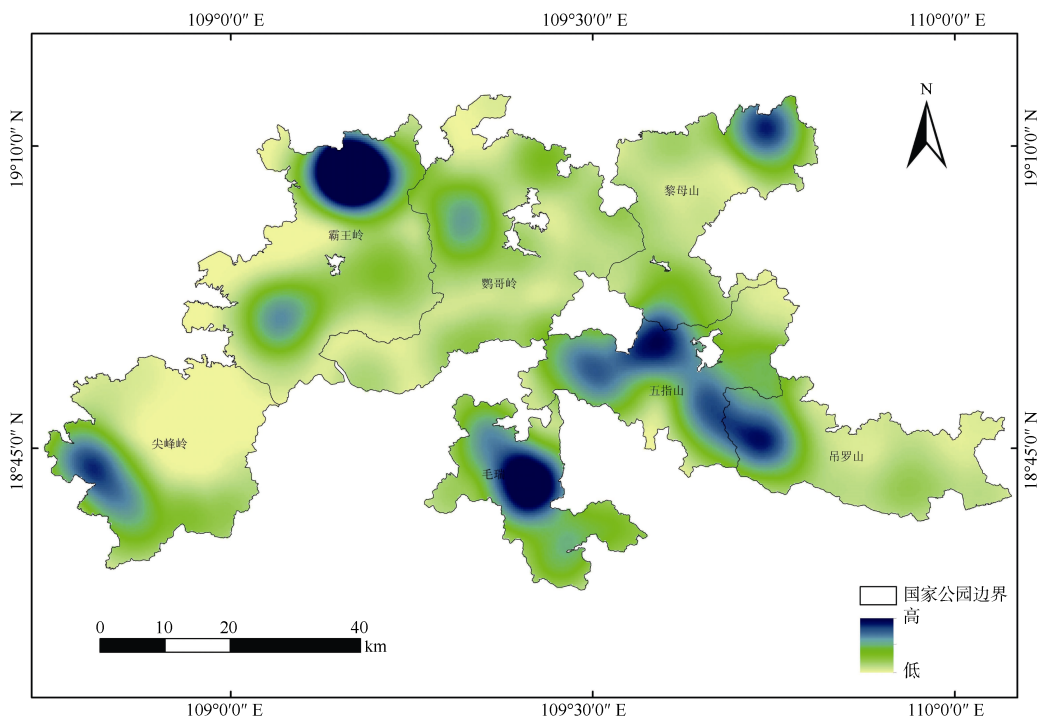


图 2 金钟藤在海南热带雨林国家公园的空间核密度

Fig. 2 Spatial kernel density of *Merremia boissiana* in Hainan Tropical Rainforest National Park

于林木茂盛、人为干扰较少的公园边界区域。空间自相关分析表明，人工林和次生林的金钟藤危害程度最为严重，其次是人为活动频繁的区域和道路，

天然林周边的危害程度最低。

2.2 金钟藤发生程度的影响因子分析

环境因子随机森林特征重要性

随机森林

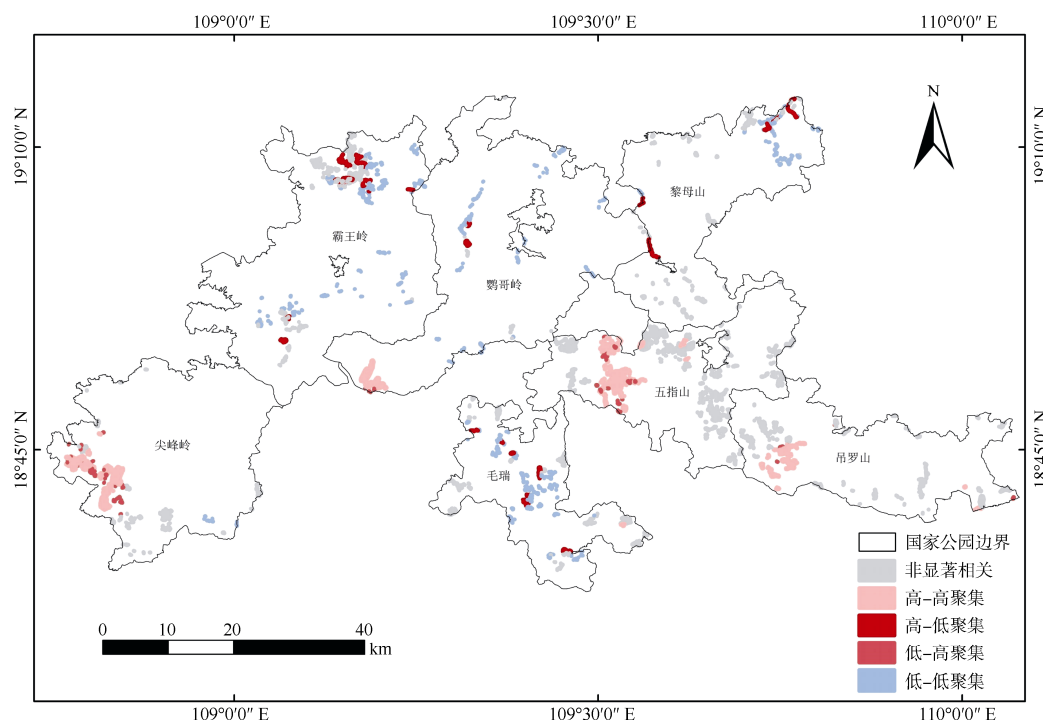


图 3 金钟藤在海南热带雨林国家公园的空间相关性

Fig. 3 Spatial correlation of *Merremia boissiana* in Hainan Tropical Rainforest National Park

模型通过平均精度和基尼指数 2 个指标评估环境因子的特征重要性(图 4)。结果表明,距道路的距离和海拔在平均精度和基尼指数中均具有最高的重要性,得分分别为 70.80 和 63.38, 143.67 和 140.12。其他重要环境因子包括距生态游憩点的距离、距聚居点距离、距人工林的距离、海拔的平方项和距水系距离,这些因子在 2 个指标中的得分也较高,表明它们对模型的预测能力具有显著贡献。相比之下,坡度的平均精度和基尼指数得分较低,分别为 6.41 和 84.04。

Logistic 回归结果 热带雨林国家公园中金钟藤发生的 Logistic 回归模型拟合结果(表 1),在地形因子中,海拔与金钟藤发生概率呈显著负相关($P < 0.001$)。首先,在地形因子中,海拔、纳入海拔的平方项(Dem_sq)和坡度表现出显著的负相关关系($P < 0.05$),表明地形因子对金钟藤的分布有显著影响。在水系因子中,距水系距离与金钟藤发生概率相关性不显著($P > 0.05$)。在人类活动因子中,距道路距离、距人工林距离和距生态游憩点距离均与金钟藤发生概率呈显著负相关($P < 0.001$),说明人类活动因子对金钟藤的发生概率具有显著的促进作用,即距离人类活动区域越近,金钟藤发生概率越大,距居民点距离相关性不显著($P > 0.05$)。

2.3 金钟藤发生概率预测模型

构建热带雨林国家公园区域金钟藤发生概率预测模型 $P = 1/[1 + e^{-(0.492 \cdot x_1 - 0.449 \cdot x_2 - 0.450 \cdot x_3 - 0.307 \cdot x_4 - 0.401 \cdot x_5)}]$, 式中, P 为金钟藤发生概率, x_1 为海拔的平方; x_2 为坡度; x_3 为距道路距离; x_4 为人工林距离; x_5 为生态游憩点距离; e 为自然常数,且变量均经标准化处理。可见,2 个自然因子和 3 个人类活动干扰因子与金钟藤发生概率均呈显著负相关。其中,在自然因子中,海拔对金钟藤发生影响最显著。在人类活动因子中,距道路距离对金钟藤发生概率的影响最显著,要大于距生态游憩点距离以及距人工林距离。

从金钟藤发生概率预测模型 ROC 曲线可见(图 5),曲线下面积值(AUC)为 0.80,该模型通过了各项检验,可用于金钟藤发生概率预测分析;进一步计算该模型得到的约登指数最大值为 0.460,对应的最佳临界值为 0.435,通过最佳临界值计算金钟藤发生概率预测模型准确率。模型在建模样本总体准确率为 74.46%,验证样本总体准确率达 72.31%。

3 讨论和结论

近 20 年来,金钟藤在海南快速生长,扩散蔓延快,发生成灾,对林业生产和生态系统造成了严重

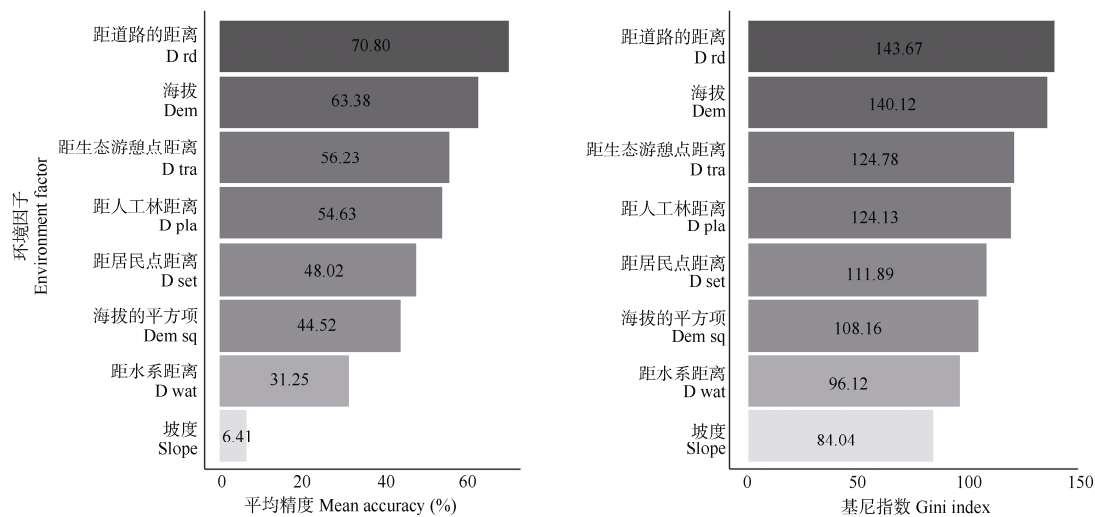


图 4 环境因子随机森林特征重要性排序。D rd: 距道路的距离; Dem: 海拔; D tra: 距生态游憩点距离; D pla: 距人工林距离; D set: 距居民点距离; Dem sq: 海拔的平方; D wat: 距水系距离; Slope: 坡度。

Fig. 4 Random forest feature importance ranking of environment factors. D rd: Distance from the road; Dem: Elevation; D tra: Distance to ecological recreation sites; D pla: Distance to artificial forest; D set: Distance to residential areas; Dem sq: Square of elevation; D wat: Distance to the water system; Slope: Slope.

表 1 Logistic 回归模型拟合结果

Table 1 Fitting result of Logistic regression model

自变量 Independent variable	系数 Coefficient	标准误差 Standard error	z	P
Dem	-0.492 30	0.086 71	-5.678	<0.001
Dem sq	-0.448 51	0.082 16	-5.459	<0.001
Slope	-0.149 14	0.070 82	-2.076	<0.050
D Wat	-0.147 03	0.074 40	-1.219	-
D Rd	-0.449 66	0.087 07	-5.165	<0.001
D Pla	-0.306 85	0.090 22	-3.401	<0.001
D Tra	-0.409 96	0.073 21	-5.600	<0.001
D Set	-0.070 44	0.070 37	-1.001	-

-: 不显著

-: No significant

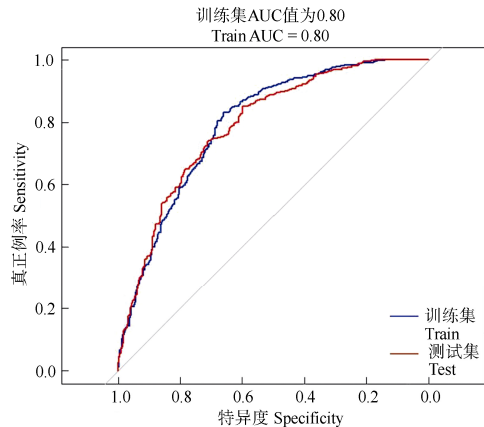


图 5 金钟藤发生概率预测模型 ROC 曲线

Fig. 5 ROC curve of prediction model on occurrence probability of *Merremia boissiana*

危害^[31]。本次调查发现,金钟藤的发生核密度在空间上呈现不均匀的聚集特征,且与人类活动密切相关。在海南热带雨林国家公园中,五指山片区的金钟藤发生面积最大,且存在多处中度和重度受金钟藤入侵的区域,主要集中在水满乡、毛阳镇、通什镇区域。其中,通什镇是五指山市的行政、经济文化中心,水满乡则是海南热带雨林国家公园内最具代表性的生态旅游乡镇之一,内有五指山热带雨林风景区、海南热带雨林国家公园五指山生态旅游景区、五指山毛纳村等,吸引了大量生态旅游爱好者和自然教育活动的组织者^[32-33]。相比而言,鹦哥岭片区、黎母山片区金钟藤的发生面积较小,且几乎为轻度入侵。空间自相关分析说明了金钟藤在海南

热带雨林中的正向空间自相关关系, 其中, 高值聚集区集中在人为活动频繁的区域, 如人工林、次生林林缘及道路边缘, 而低值聚集区则位于公园内的天然林区域。

金钟藤是海南岛一种本土灾变植物, 具有极强的繁殖和适应能力, 能在全年生长^[8]。通过种子和无性繁殖快速扩散, 扩张至郁闭度较低的干扰林、灌木林和次生林^[34]。同时, 金钟藤具有强大的资源竞争能力, 自身分泌化感物质抑制其他植物生长, 形成有利与自身生长环境, 并削弱本地植物的生长^[10]。此外, 金钟藤光合速率较高^[8], 在高温、干旱及低温等环境条件下仍能快速生长^[6,35], 增强了其在不同生态环境下的优势。金钟藤表现出与外来入侵种相似的生态入侵特征, 且在人类活动干扰下更易传播^[36]。已有研究通过对金钟藤分布特性的调查分析, 推测旅游活动可能促进其扩散^[13]。在五指山片区, 金钟藤的危害问题尤为严重, 与该区域的人类活动密切相关。生态旅游热点区域, 如通什镇和水满乡, 由于人类活动频繁, 金钟藤的发生概率较高。本研究进一步通过随机森林模型证实, 距离道路、人工林及生态游憩点越近, 金钟藤的发生概率越高。生态游憩点通常是游客频繁出入的地方, 人为活动直接或间接干预导致栖息地结构的变化, 这些区域往往会修建步道、休息区等设施, 建设和日常维护会改变原有植被结构, 造成裸露或扰动的土壤条件, 为金钟藤扎根提供了适合的条件^[37]。道路和林缘等开放区域通常是较脆弱的生态系统过渡带, 金钟藤通过无性繁殖(如匍匐茎、根蘖等方式)能够快速占领空间, 形成密集的植株群落^[38]。本研究还发现, 金钟藤的发生与距村庄聚居点的远近并无显著相关性, 表明本土居民的日常生活对森林生态系统的扰动通常较小, 对金钟藤的影响相对有限。

根据调查, 金钟藤在海拔 300~900 m 发生最为严重, 说明该范围最适宜金钟藤发生与扩散, 这与前人^[39]的研究结果基本一致。在 Logistic 回归结果中, 海拔因子与金钟藤的发生概率呈显著负相关的非线性关系进一步证明了我们的推断, 随着海拔的升高, 金钟藤的发生概率会降低。在中低海拔范围内, 冠层郁闭度较低, 且多为长势不好的原生林, 群落破坏程度大, 为金钟藤灾变创造条件。高海拔区域, 森林郁闭度较高, 群落之间具有较强稳定性, 生物多样性较为丰富, 可能通过种间竞争、资源利用等在一定程度上抵御外来植物的入侵, 对金钟藤

扩张有一定的抵抗性^[34,40-41]。此外, 本研究还表明坡度对于金钟藤分布的影响显著, 即在较大坡度的地形条件下, 金钟藤的扩散可能受到抑制。坡度可以间接反映植物可利用的光照资源, 大多数具有入侵特性的外来植物在光照充足且竞争较少的环境中更容易扩散和占据生态位^[42-43]。

综上, 金钟藤在海南热带雨林国家公园的快速生长和扩散对生态系统和林业生产造成了严重威胁。本研究表明, 人类活动、海拔、坡度、距离道路的距离和距离人工林的距离是金钟藤分布的关键因素。特别是生产和旅游活动, 如大规模的土地利用、道路修建和植被清理等, 显著改变了原有的生态环境, 为金钟藤提供了新的栖息地和扩散机会。因此, 基于以上分析, 建议在靠近道路和人工林区域, 特别是在受破坏的次生林、后期栽培的人工林的林缘、路缘, 对金钟藤缠绕的植被进行彻底清理, 并重新种植本土或与其竞争性较强的树种, 以抑制其扩散趋势, 并恢复当地植被结构。同时, 在游憩点及其周边增设监控点, 及时发现并清除新生的金钟藤植株, 防止其进一步蔓延。

参考文献

- [1] WANG B S, QIU H X, LIAO W B, et al. Revision and additional notes on *Merremia boissiana* and *M. boissiana* var. *fulvopilosa* (Convolvulaceae) [J]. *Guihaia*, 2007, 27(4): 527-536. [王伯荪, 丘华兴, 廖文波, 等. 金钟藤分类考证及补充描述 [J]. *广西植物*, 2007, 27(4): 527-536. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2007.04.001.]
- [2] HE Z, TAO J P, LIU J X, et al. The study of biological characteristics of *Merremia boissiana* [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, 20(12): 1827-1830. [何泽, 陶建平, 刘晋仙, 等. 金钟藤(*Merremia boissiana*)生物学特点初探 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1827-1830. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2011.12.006.]
- [3] QIAN J, QIU M H, DU S J, et al. The distribution pattern of the populations of *Merremia boissiana* in Wuzhishan, Hainan Island [J]. *Ecol Sci*, 2016, 35(4): 97-101. [钱军, 邱明红, 杜尚嘉, 等. 五指山市金钟藤种群分布格局分析[J]. *生态科学*, 2016, 35(4): 97-101. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2016.04.013.]
- [4] WU L F, LIANG Y Q, CHEN K, et al. Damage and prevention of *Merremia boissiana* in Hainan Province, China [J]. *Guangdong For Sci Technol*, 2007, 23(1): 83-86. [吴林芳, 梁永勤, 陈康, 等. 金钟藤在海南的危害与防治 [J]. *广东林业科技*, 2007, 23(1): 83-86. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2007.01.018.]

- [5] PAN Z Y. Preliminary discussion on the harm and risk assessment of the pest *Merremia boissiana* in Bawangling forest region [J]. Trop For, 2021, 49(4): 64–66. [潘正宇. 浅谈霸王岭林区有害生物金钟藤的危害及其风险性评估 [J]. 热带林业, 2021, 49(4): 64–66. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2021.004.016.]
- [6] LI L, XU Z F, WEI X, et al. Physiological compare *Merremia boissiana* with *Pueraria lobata* under drought stress and rewating conditions [J]. Guihaia, 2008, 28(6): 806–810. [李玲, 徐志防, 韦霄, 等. 金钟藤和葛藤在干旱与复水条件下的生理比较 [J]. 广西植物, 2008, 28(6): 806–810. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2008.06.020.]
- [7] YE Y H, ZHOU K, LIU A J, et al. Relationship between ring growth of *Merremia boissiana* and climatic factors [J]. Ecol Environ Sci, 2006, 15(6): 1250–1253. [叶有华, 周凯, 刘爱君, 等. 金钟藤的年轮生长量与气候因子的相互关系 [J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1250–1253. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2006.06.025.]
- [8] LI M G, CHENG X Y, LIU B, et al. Fast growing and high photosynthetic rate of *Merremia boissiana* (Gagn.) Ooststr. [J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 2006, 45(3): 70–72. [李鸣光, 成秀媛, 刘斌, 等. 金钟藤的快速生长和强光合能力 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(3): 70–72, 81. doi: 10.3321/j.issn:0529-6579.2006.03.018.]
- [9] HUANG Q Q, SHEN Y D, LI X X, et al. Effects of light and water availability on the morphology and allelopathy of the native outbreak species *Merremia boissiana* (Gagnep.) Ooststr. [J]. Chin J Ecol, 2015, 34(2): 438–444. [黄乔乔, 沈奕德, 李晓霞, 等. 不同光照和水分条件对土著灾变种金钟藤形态性状和化感作用的影响 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 438–444. doi: 10.13292/j.1000-4890.2015.0062.]
- [10] HUANG Q Q, SHEN Y D, LI X X, et al. Native expanding *Merremia boissiana* is not more allelopathic than its non-expanding congener *M. vitifolia* in the expanded range in Hainan [J]. Am J Plant Sci, 2013, 4(4): 774–779. doi: 10.4236/ajps.2013.44096.
- [11] LI M G, LIU H Y, LI F L, et al. Seed, cutting and air-layering reproductive inefficiency of noxious woody vine *Merremia biosiana* and its implications for management strategy [J]. Front Biol China, 2009, 4(3): 342–349. doi: 10.1007/s11515-009-0014-9.
- [12] LIAN J Y, CAO H L, WANG Z G, et al. The community characteristics for invading damage of the forest killer: *Merremia boissiana* [J]. Guihaia, 2007, 27(3): 482–486. [练琚藩, 曹洪麟, 王志高, 等. 金钟藤入侵危害的群落学特征初探 [J]. 广西植物, 2007, 27(3): 482–486. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2007.03.021.]
- [13] HUANG Q Q, SHEN Y D, LI X X, et al. Research progress on the mechanisms of invasion and spread of typical harmful plants in Hainan [J]. J Biosaf, 2016, 25(1): 1–6. [黄乔乔, 沈奕德, 李晓霞, 等. 海南典型有害植物的入侵扩散机理研究进展 [J]. 生物安全学报, 2016, 25(1): 1–6. doi: 10.3969/j.issn.2095-1787.2016.01.001.]
- [14] CHEN H, CHEN L J, ALBRIGHT T P. Predicting the potential distribution of invasive exotic species using GIS and information-theoretic approaches: A case of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) distribution in China [J]. Chin Sci Bull, 2007, 52(9): 1223–1230. [陈浩, 陈利军, ALBRIGHT T P. 以豚草为例利用 GIS 和信息理论的方法预测外来入侵物种在中国的潜在分布 [J]. 科学通报, 2007, 52(5): 555–561. doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2007.05.010.]
- [15] JIAO X Y, LI J Y, YANG Q Y, et al. Spread dynamics and driving factors of alien invasive plant *Solidago canadensis* in Hubei Province [J]. Guihaia, 2024, 44(8): 1481–1494. [焦鑫宇, 李嘉谊, 杨清玉, 等. 入侵植物加拿大一枝黄花在湖北的扩散动态和影响因素研究 [J]. 广西植物, 2024, 44(8): 1481–1494. doi: 10.11931/guihaia.gxzw202210050.]
- [16] TANG S J, YANG L, LIU M J, et al. Spatial pattern of the occurrence of *Mikania micrantha* in Dapeng Peninsula, Shenzhen [J]. J Biosaf, 2023, 32(03): 226–234. [唐尚杰, 杨龙, 刘美洁, 等. 深圳大鹏半岛薇甘菊的空间发生规律 [J]. 生物安全学报, 2023, 32(03): 226–234.]
- [17] XIE Y X, WANG C Y, LIU P J, et al. Road network features and its relationship to the dispersal and spread of *Ageratina adenophora* in Yunnan, China [J]. Ecol Sci, 2021, 40(3): 17–24. [谢映旭, 王崇云, 刘鹏举, 等. 云南路网特征及其与紫茎泽兰传播扩散的相关性分析 [J]. 生态科学, 2021, 40(3): 17–24. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.03.003.]
- [18] WU H J, JIU Q J, ZENG H. Factors influencing *Mikania micrantha* invasion and distribution at regional scale [J]. Acta Ecol Sin, 2009, 29(10): 5442–5449. [吴卉晶, 咎启杰, 曾辉. 区域尺度薇甘菊入侵分布的影响因子 [J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5442–5449. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.10.031.]
- [19] GE J L, XIONG G M, MAO J T, et al. Invasion and influencing factors of *Solidago canadensis* in leisure-tourism villages in the south of the Yangtze River [J]. Chin J Eco-Agric, 2023, 31(1): 1932–1942. [葛结林, 熊高明, 毛江涛, 等. 加拿大一枝黄花在江南休闲旅游乡村的入侵特征及其影响因素 [J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(12): 1932–1942. doi: 10.12357/cjea.20230377.]
- [20] ZANG Z H, WANG N, ZHAO L, et al. Suggestions on strengthening effective protection and green development of Hainan Tropical Rainforest National Park [J]. Nat Park, 2023, 1(4): 232–237. [臧振华, 王楠, 赵磊, 等. 加强海南热带雨林国家公园有效管理与绿色发展的建议 [J]. 国家公园, 2023, 1(4): 232–237. doi: 10.20152/j.np.202311070026.]
- [21] ZHENG Z X, WANG R, ZHANG F J, et al. The geographic distri-

- bution pattern and spatiotemporal dynamic of the invasive alien plant *Flaveria bidentis* (Asteraceae) in China [J]. *J Biosaf*, 2018, 27(4): 295–299. [郑志鑫, 王瑞, 张风娟, 等. 外来入侵植物黄顶菊在我国的地理分布格局及其时空动态 [J]. *生物安全学报*, 2018, 27(4): 295299. doi: 10.3969/j.issn.2095-1787.2018.04.013.]
- [22] XU J N, CHAO B X, PENG L L, et al. Ecological corridor construction of Hainan Tropical Rainforest National Park [J]. *J SW For Univ (Nat Sci)*, 2023, 43(06): 125–134. [徐健楠, 晁碧霄, 彭玲莉, 等. 海南热带雨林国家公园生态廊道构建 [J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2023, 43(6): 125–134. doi: 10.11929/j.swfu.202209004.]
- [23] HU X C, GAO H H. Overview of tropical natural forests on Hainan Island and their protection [J]. *Modern Agric Sci Technol*, 2008(22): 76–77. [胡小婵, 高宏华. 海南岛热带天然林概况及其保护 [J]. *现代农业科技*, 2008(22): 76–77. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2008.22.053.]
- [24] HAN Z W. Geographical distribution and affecting factors of the important agricultural heritage systems in China [J]. *Chin J Agric Resour Region Plan*, 2017, 38(2): 97–104. [韩宗伟. 中国农业文化遗产的空间分布特征及影响因素分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(2): 97–104. doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20170214.]
- [25] WANG W W, GU Y Y, ZHANG C, et al. Study on the distribution of urban-rural ecotone in Xianfeng County based on POI and kernel density analysis [J]. *Resour Environ Eng*, 2022, 36(1): 117–123. [王雯雯, 谷优阳, 张驰, 等. 基于 POI 及核密度分析的咸丰县城乡交错带分布研究 [J]. *资源环境与工程*, 2022, 36(1): 117–123. doi: 10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2022.01.020.]
- [26] HARRIS N L, GOLDMAN E, GABRIS C, et al. Using spatial statistics to identify emerging hot spots of forest loss [J]. *Environ Res Lett*, 2017, 12(2): 024012. doi: 10.1088/1748-9326/aa5a2f.
- [27] ZENG C Y, LIU Z B, ZENG G Y, et al. Analysis on forestland change by using spatial transition matrix model [J]. *For Resour Manag*, 2012 (5): 105–110. [曾春阳, 刘志斌, 曾广宇, 等. 林地动态变化的空间矩阵模型分析 [J]. *林业资源管理*, 2012(5): 105–110. doi: 10.3969/j.issn.1002-6622.2012.05.020.]
- [28] PRASAD A M, IVERSON L R, LIAW A. Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction [J]. *Ecosystems*, 2006, 9(2): 181–199. doi: 10.1007/s10021-005-0054-1.
- [29] GUIAN A, ZIMMERMANN N E. Predictive habitat distribution models in ecology [J]. *Ecol Model*, 2000, 135(2/3): 147–186. doi: 10.1016/s0304-3800(00)00354-9.
- [30] CHEN D. Prediction of forest fire occurrence in Daxing'an mountains based on logistic regression model [J]. *For Grassl Resour Res*, 2019(1): 116–122. [陈岱. 基于 Logistic 回归模型的大兴安岭林火预测研究 [J]. *林业资源管理*, 2019(1): 116–122. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2019.01.018.]
- [31] WANG B S, PENG S L, LI D J, et al. Research progress on *Merremia boissiana* [J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28(11): 2360–2365. [王伯荪, 彭少麟, 李代江, 等. 金钟藤研究述评 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2360–2365. doi: 10.13292/j.1000-4890.200911.034.]
- [32] SHENG P L, LING X C, WANG Z J. Optimization of visitor behaviour management in Hainan tropical rainforest national park: A case study of Wuzhishan Area [J]. *J For Grassl Policy*, 2023, 3(4): 80–87. [盛朋利, 凌星辰, 王忠君. 海南热带雨林国家公园访客行为管理优化路径——以五指山片区为例 [J]. *林草政策研究*, 2023, 3(4): 80–87. doi: 10.12344/lczyj.2023.11.18.0007.]
- [33] DING R. Design of tropical rainforest country park: A case study of Tongshi town country park in Wuzhishan City [J]. *China For Indust*, 2023(12): 22–24. [丁然. 热带雨林郊野公园设计——以五指山市通什镇郊野公园为例 [J]. *中国林业产业*, 2023(12): 22–24.]
- [34] HUANG Q Q, SHEN Y D, FAN Z W, et al. Effects of soil from different forest types in Wuzhi Mountain on the seedling growth of *Merremia boissiana* [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, 22(1): 95–99. [黄乔乔, 沈奕德, 范志伟, 等. 五指山不同林型土壤对金钟藤幼苗生长的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(1): 95–99. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2013.01.021.]
- [35] ZHAO N, NI G Y, LI F R, et al. Effects of temperature on photosynthesis of *Merremia boissiana* [J]. *Ecol Environ Sci*, 2006(6): 1254–1257. [赵娜, 倪广艳, 李富荣, 等. 温度对金钟藤光合特性的影响 [J]. *生态环境*, 2006(6): 1254–1257. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.06.026.]
- [36] GALLARDO B, ALDRIDGE D C, GONZÁLEZ-MORENO P, et al. Protected areas offer refuge from invasive species spreading under climate change [J]. *Glob Change Biol*, 2017, 23(12): 5331–5343. doi: 10.1111/gcb.13798.
- [37] SHANNON G, LARSON C L, REED S E, et al. Ecological consequences of ecotourism for wildlife populations and communities [M]//BLUMSTEIN D T, GEFFROY B, SAMIA D S M, et al. *Ecotourism's Promise and Peril: A Biological Evaluation*. Cham: Springer, 2017: 29–46. doi: 10.1007/978-3-319-58331-0_3.
- [38] ANDERSON L G, ROCLIFFE S, HADDADAWAY N R, et al. The role of tourism and recreation in the spread of non-native species: A systematic review and meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0140833. doi: 10.1371/journal.pone.0140833.

- [39] JIANG H. The study on genetic diversity and community characteristic of *Decalobanthus boisianus* in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2019. [江焕. 海南岛金钟藤快速扩张的遗传基础及群落特征研究 [D]. 海口: 海南大学, 2019.]
- [40] WU T T, CHEN Y Q, CHEN Z Z, et al. Analysis on the spatial distribution characteristics of representative populations in tropical rainforest of Hainan [J]. For Grassl Resour Res, 2023(5): 133–141. [吴庭天, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 海南热带雨林代表性种群空间分布特征研究 [J]. 林草资源研究, 2023(5): 133–141. doi: 10.13466/j.cnki.lczyyj.2023.05.016.]
- [41] PEARSON D E, ORTEGA Y K, VILLARREAL D, et al. The fluctuating resource hypothesis explains invasibility, but not exotic advantage following disturbance [J]. Ecology, 2018, 99(6): 1296–1305. doi: 10.1002/ecy.2235.
- [42] ZHANG H F, CHEN Y N, CHEN Y P, et al. Species quantity change and ecosystem dynamics in the lower reaches of Tarim River [J]. Chin J Ecol, 2004, 23(4): 21–24. [张宏锋, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 塔里木河下游植物群落的物种数量变化与生态系统动态研究 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 21–24. doi: 10.3321/j.issn:1000-4890.2004.04.005.]
- [43] ZHANG Z, CAO Y M, ZHONG Y H, et al. Factors contributing to the spread of the invasive plant *Solidago canadensis* L. in Hefei, Anhui Province, China [J]. J Biosaf, 2019, 28(2): 133–139. [张震, 曹亚蒙, 钟耀华, 等. 加拿大一枝黄花在安徽合肥的入侵生态因子分析 [J]. 生物安全学报, 2019, 28(2): 133–139. doi: 10.3969/j.issn.2095-1787.2019.02.010.]