

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2023.04.009

# 气候变化对全球马缨丹分布影响的空间模拟

杨冬琼<sup>1</sup>, 陈可薇<sup>2</sup>, 刘 明<sup>1</sup>, 张国防<sup>1</sup>, 刘 宝<sup>1</sup>, 陈世品<sup>1</sup>, 阮少宁<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; <sup>2</sup>福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002

**摘要:**【目的】马缨丹是世界 10 种最有害的入侵杂草之一, 预测其潜在适生区变化对入侵植物防控具有重要意义。【方法】以马缨丹为研究对象, 采用有效分布点数据 1744 份和 10 个气候因子, 使用 MaxEnt 模型和 ArcGIS10.4 软件, 选用当前气候情景以及 2050sSSP126、2050sSSP245、2050sRCP5.8、2090sSSP126、2090sSSP245、2090sSSP585 6 个不同气候情景, 对马缨丹全球潜在分布区进行预测。【结果】温度和降水因子是制约马缨丹入侵的主要因子, 其中年降水量 (bio12, 48.6%)、最干季度的平均温度 (bio9, 36.4%)、温度季节性 (bio4, 4.6%) 和最热季度的平均温度 (bio10, 4.2%) 是制约马缨丹分布格局的主要环境因子。南美洲、非洲南部、亚洲南部以及澳大利亚北部和东部具有较高的入侵风险。从当前气候情景到 2050 年气候情景再到 2090 年气候情景的过渡中, 其适生区面积呈增加趋势, 其中高适生区面积持续增加。【结论】在水热条件以及生物因素 3 个层面上严格防控马缨丹入侵, 以增加土著生态系统的完整性。

**关键词:** 马缨丹; 入侵植物; MaxEnt 模型; 潜在适生区; 防治措施



开放科学标识码  
(OSID 码)

## Prediction of global range shifts of the invasive giant *Lantana camara*

YANG Dongqiong<sup>1</sup>, CHEN Kewei<sup>2</sup>, LIU Ming<sup>1</sup>, ZHANG Guofang<sup>1</sup>,  
LIU Bao<sup>1</sup>, CHEN Shipin<sup>1</sup>, RUAN Shaoning<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;  
<sup>2</sup>College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

**Abstract:** 【Aim】*Lantana* (*Lantana camara* L.) is among the world's top 10 most harmful invasive weeds. Understanding its potential change in distribution is crucial. 【Method】We focused on *L. camara*, utilizing data from 1744 effective distribution points and ten climate factors. We applied the MaxEnt model in combination with ArcGIS software, assessing both current climate conditions and six different climate scenarios: 2050sSSP126, 2050sSSP245, 2050sRCP5.8, 2090sSSP126, 2090sSSP245 and 2090sSSP585 to forecast the potential range of *L. camara* worldwide. 【Result】Annual precipitation (bio12, 48.6%), mean temperature in the driest season (bio9, 36.4%), temperature seasonality (bio4, 4.6%), and mean temperature in the hottest season (bio10, 4.2%) played the primary roles in shaping the distribution pattern of *L. camara*. Regions at high risk of invasion include South America, southern Africa, southern Asia, and northern and eastern Australia. The projects for 2050–2090 showed an expansion to suitable zones, particularly in high-suitability areas. 【Conclusion】Strict prevention and control measures against *L. camara* invasion are crucial for preserving the integrity of native ecosystems.

**Key words:** *Lantana camara*; invasive plant; MaxEnt model; potential suitable area; control measures

全球生物多样性和生态系统服务评估报告预测, 外来物种入侵严重威胁着全球物种和生态系统 (吴杨等, 2020)。在气候变化方面, 联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次评估报告表明, 气候变化对人类和生态系统威胁日益增加, 极端气候已超过一些动植物的承受极限, 造成物种的大量死亡 (马占云等, 2022)。气候变化和入侵物种的结合, 使生物多样性丧失速度加快 (井新等, 2022; 寇紫倩等, 2022)。入侵植物和本地植物对气候变化的

响应不同,入侵植物具有较高的可塑性和稳态适应性,其地理分布格局受气候变化的影响 (Ba & Facelli, 2022; Beyene *et al.*, 2022)。因此,了解入侵物种对气候变化的响应,可为制定入侵植物防控措施提供理论依据。

生态因子模型主要通过调查数据、标本馆记录和文献记录等途径获取物种分布点数据,结合相应的算法推测物种生物生态位,依据分布点的密集情况以概率的形式表现物种对生境的喜好,预测物种潜在适生区对气候变化的响应 (叶兴状等, 2021)。当前常用的生态位模型有 ENFA、BIOCLIM、DOMAIN、GARP、MaxEnt 模型等。MaxEnt 通过对已知物种分布点数据和环境变量,预测未来物种的潜在分布,在样本较少的情况下也能精确预测 (Phillips & Miroslav, 2008)。因此 MaxEnt 模型已被广泛运用于濒危动植物和入侵植物潜在适生区的预测,还可用于预测环境变量对生态系统服务需求的影响 (白晓娟等, 2023)。近年来,利用 MaxEnt 模型预测入侵植物潜在适生区的研究日趋增多,如三裂叶豚草 *Ambrosia trifida* L. 在中国的潜在适生区预测 (李佳慧等, 2021), 以及菜豆象 *Acanthoscelides obtectus* (Say) 全球潜在适生区预测 (徐养诚等, 2021)。

马缨丹 *Lantana camara* L. 属马鞭草科 Verbenoideae 一种常绿灌木,原产于热带和亚热带美洲 (李玉霞等, 2019), 因其花色多变,观赏价值高,作为观赏物种被引入多个国家。此外,马缨丹在药理作用、生态修复、害虫防治、生理生化等方面具有应用潜力 (Ayaa *et al.*, 2022; Gillela *et al.*, 2022; Negi *et al.*, 2023)。但因其繁殖力极强、生长快、不择土壤、耐高温、抗干旱、病虫害少、根系发达、生态适应能力强、天敌少等特征,已成为世界十大恶性杂草之一 (Pyšek *et al.*, 2020)。马缨丹有大量的化感物质,竞争力极强,其持续性的入侵破坏演替甚至导致本土物种灭绝 (Lone *et al.*, 2022; Ntalo *et al.*, 2022)。研究发现,马缨丹已入侵众多农田、森林、牧场、果园,导致农林牧业遭受着巨大损失 (Maddheshiya & Singh, 2022)。马缨丹对人类和牲畜有毒害作用 (Shackleton *et al.*, 2017), 如会累积在鸟类的腿上,削弱其栖息能力和觅食行为 (Taylor *et al.*, 2012)。因此,在全球气候变化背景下,了解马缨丹入侵的程度和预测潜在的入侵风险的区域,对于管理马缨丹入侵是必要的。目前,研究人员只对印

度、非洲、澳大利亚和南美等做出预测,但并没有在全球层面上做出预测 (Dube, 2020; Shackleton, 2017; Taylor, 2012; Verdeguer, 2009)。在未来气候变迁背景下,马缨丹全球分布格局的变化、限制地理分布的主要气候因子以及这些因子如何引起地理分布改变,这些问题尚未解决,依旧制约着马缨丹防治工作的科学开展。

鉴于此,本研究以 MaxEnt 模型结合 GIS 平台的物种潜在分布预测模型,在 Java 环境下运行,通过刀切法 (Jackknife) 对环境变量分布进行分析,比较各变量的贡献率,并且判断每个环境对马缨丹分布的影响。

1 材料和方法

1.1 收集数据

马缨丹的分布数据主要来源于中国数字植物标本馆 (<https://www.cvh.ac.cn>)、国家标本平台 (<https://www.nsii.org.cn>)、全球物种多样性信息库 (<https://www.gbif.org>) 以及野外引种数据等,获得分布点数据总计 88416 份。数据中位置记录的分布点根据经纬度查询 (<http://map.jiqrxx.com/jing-weidu/>) 获得经纬度数据。对马缨丹的全部分布记录进行筛选,去掉无图片、信息模糊、重复记录等采样点。将采样点保存为 csv 格式,导入 ArcGIS10.4 软件中,进行定义投影和投影处理,并设置缓冲区范围为 30 km×30 km,筛选出缓冲区未重叠的分布点,最终得到有效分布点数据 1744 份。

1.2 环境变量的筛选

气候数据来自于世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org/>)。当前 (1970—2000 年) 的气候条件包括平均温度、最小温度、最大温度、降水量、海拔和生物气候。未来气候条件基于 BCC-CSM2-MR 全球气候模型,通过第二代国家气候中心中等分辨率气候模式下调,获得 2041—2060 年和 2081—2100 年的平均估算。全球气候模型不代表未来气候变化的可能性,而是给予大范围的降水和温度变化。本研究中,选用与当前温室气体浓度不同的 SSP126、SSP245 和 SSP585 3 个代表浓度途径。选用来自各个地点的月温度和降水的 19 个生物气候变量,并将空间分辨率统一为 2.5', 进行模拟物种分布,这些生物气候变量对入侵物种的存在和建立起到重要的作用。为了得到与当前气候像元一致的栅格图层,可利用 ArcGIS10.4 软件对气候数据进

行掩膜、重采样等过程,并保存为 asc 格式。

由于生物气候变量之间存在对物种分布格局产生相似的影响(叶兴状等, 2021), 为了避免过度拟合需要对生物气候变量进行筛选。综合分析贡献率、相关性和马缨丹生理特征, 获得一组不相关的生物气候变量, 并进行建模。相关性分析时, 当相关系数  $|r| \geq 0.8$  时, 比较每个生物气候变量对模型的贡献率, 找出其中一个贡献率较大的变量。最终得到 10 个不相关的生物气候变量。

1.3 MaxEnt 建模

使用 MaxEnt 软件和 ArcGIS10.4 软件对数据进行分析。MaxEnt 模型设置测试集为 25% 的分布点, 其余 75% 则为训练集, 结合马缨丹的分布数据和筛选后的生物气候变量, 重复运行 10 次, 绘制出 ROC 曲线 (receiver operating characteristic curve)。验证模型的准确性通常采用 AUC 值 (area under curve, AUC) 作为模型评价的指标, 其为 ROC 曲线下的面积, 不受阈值影响, 可靠性较高。若 AUC 值  $< 0.7$ , 预测结果不理想, 可信度低, 一般不能使用;  $0.7 \leq AUC < 0.8$ , 预测结果一般;  $0.8 \leq AUC < 0.9$ , 预测结果良好;  $0.9 \leq AUC < 1.0$ , 预测结果极佳。利用刀切法检验、贡献率以及置换重要值, 找出影响分布的关键气候因子。

MaxEnt 输出潜在适生区的预测结果, 使用 ArcGIS10.4 进行可视化分析, 以训练集特异性与灵敏性之和作为适生区划分标准, 划分为四类, 其中  $[0, 0.2)$  代表非适生区,  $[0.2, 0.4)$  代表低适生区,  $[0.4, 0.6)$  代表中适生区,  $[0.6, 1)$  代表高适生区, 利用面积制表工具对各适宜区进行分析, 使用从红色到黄色再到绿色颜色变化, 表示马缨丹适生性从高到低的变化。使用 ArcGIS10.4 软件对未来不同气候情景下数据模拟的平均值结果进行重分类。以分布概率值 0.4 为界, 划分不适生区和适生区, 分别赋值 0、1, 建立矩阵。矩阵值  $0 \rightarrow 1$  为迁入新增区,  $1 \rightarrow 0$  为迁出丧失区,  $1 \rightarrow 1$  为平衡区。使用 ArcGIS10.4 绘制空间迁移格局的变化图。

可利用多元环境相似度面 (multivariate environmental similarity surface, MESS) 和最不相似变量 (most dissimilar, MoD) 检测未来不同气候情景下影响马缨丹潜在适生区变化的关键生物气候变量(叶兴状等, 2021)。MESS 主要用于分析指定时期某点的气候与参考气候之间的相似度。当多元相似度

大于 0 时, 表示该点气候并没有受到影响, 为正常; 当多元相似度小于 0 时, 表示该点气候受到影响, 为异常。如果多元相似度小于 0, 说明有一个或多个生物气候变量的值超出了参照值的范围。MoD 表示多元相似度最低或者异常程度最高的某点所对应的生物气候变量, 这个生物气候变量可能为导致物种空间格局发生变化的关键因子 (Elith *et al.*, 2010)。

2 结果

2.1 模型性能和生物气候变量的贡献

通过综合分析气候因子的贡献率、置换重要值以及刀切法检验筛选出影响当前潜在地理分布区的主导因子。由贡献率从大到小依次为年降水量 (bio12, 48.6%)、最干季度的平均温度 (bio9, 36.4%)、温度季节性 (bio4, 4.6%) 和最热季度的平均温度 (bio10, 4.2%)。置换重要值排名前四的依次为最热季度的平均温度 (bio10, 35.6%)、温度季节性 (bio4, 14.6%)、年降水量 (bio12, 6.7%) 和最湿季度的平均温度 (bio8, 12%) (表 1)。在刀切法检验中, 当使用单一气候因子变量时, 对正规化训练增益、测试增益和 AUC 值影响最大的气候因子变量为温度季节性 (bio4) 和最干季度的平均温度 (bio9), 说明二者含有其他气候因子不具有的信息 (图 1)。综上所述, 温度季节性 (bio4)、最干季度的平均温度 (bio9)、年降水量 (bio12)、最湿季度的平均温度 (bio8)、最热季度的平均温度 (bio10) 对马缨丹潜在地理分布起到关键作用。

表 1 用于入侵性杂草马缨丹模型预测的气候因子及其贡献率  
Table 1 Climate factors and contribution rates used for model prediction of *L. camara*

| 变量<br>Variable | 贡献百分率<br>Percent contribution<br>/% | 置换重要值<br>Permutation<br>importance |
|----------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Bio2           | 2.2                                 | 5.5                                |
| Bio4           | 4.6                                 | 14.6                               |
| Bio8           | 1.8                                 | 12.0                               |
| Bio9           | 36.4                                | 8.8                                |
| Bio10          | 4.2                                 | 35.6                               |
| Bio12          | 48.6                                | 14.0                               |
| Bio14          | 0.6                                 | 15.0                               |
| Bio15          | 0.5                                 | 3.4                                |
| Bio18          | 0.6                                 | 2.8                                |
| Bio19          | 0.4                                 | 1.7                                |

在马缨丹的地理分布中,温度季节性 (bio4)、最干季度的平均温度 (bio9)、年降水量 (bio12)、最热季度的平均温度 (bio10)起着重要作用。当温度季节性 (bio4) 大于 750 ℃时,分布概率下降到 0.5 以下,表示温度季节性小于 750 ℃,适宜马缨丹生长。最干季度的平均温度 (bio9) 在 0~35 ℃内,分布概率大于 0.5,说明最干季度的平均温度在此范围适宜马缨丹生长。最热季度的平均温度 (bio10)

大于 18 ℃,且随着最热季度的平均温度升高,分布概率呈上升的趋势。年降水量 (bio12) 大于 500 mm 时,分布概率大于 0.5,随着降水量的不断升高,分布概率达到最高峰,此时年降水量为 1000 mm,最适宜马缨丹扩散,随后分布概率呈下降的趋势,表示马缨丹适宜生长扩散的年降水量范围为 500~7500 mm (图 2)。

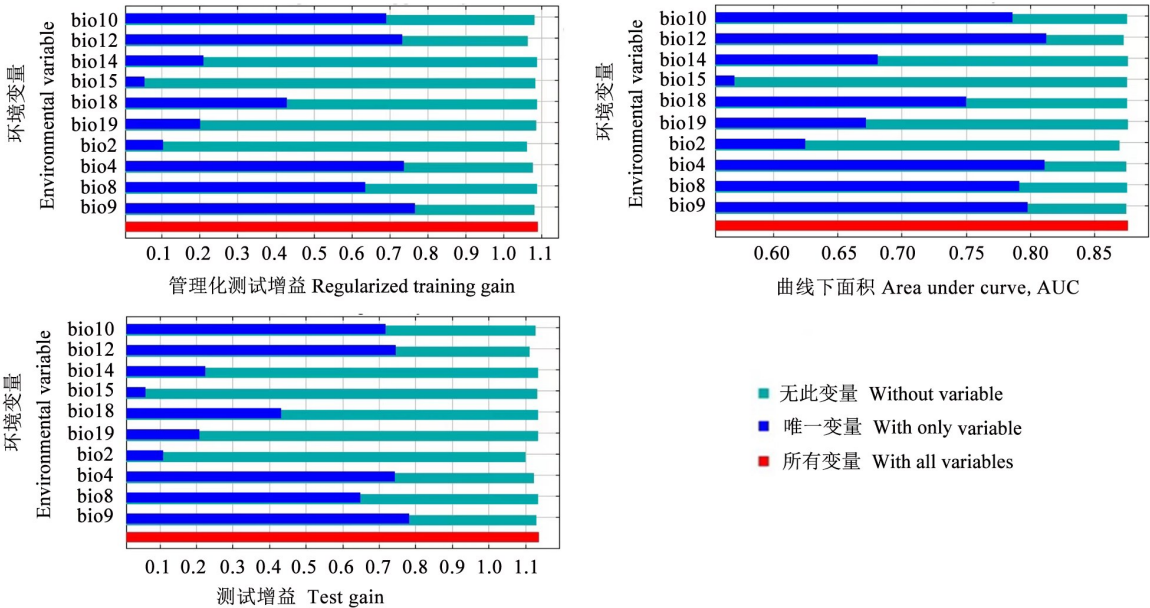


图 1 环境变量的 Jackknife 检验

Fig.1 Results of the Jackknife test for the environmental variables

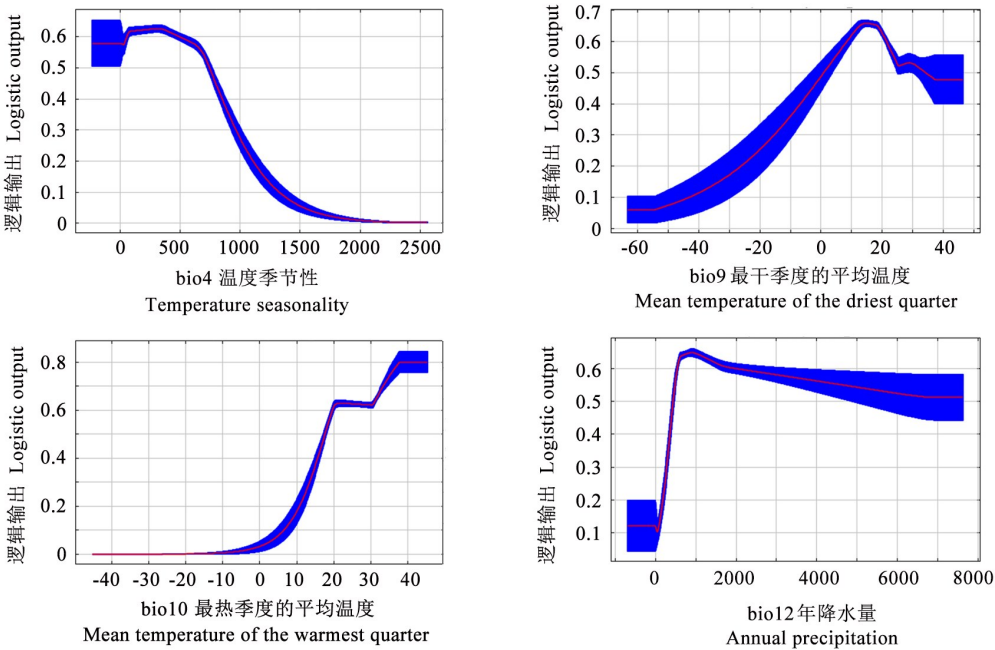


图 2 MaxEnt 模型的响应曲线在特定变量范围内发生概率的预测变化

Fig.2 Marginal response curves of the MaxEnt model show the predicted change of occurrence probability across a particular variable range

2.2 当前气候条件下马缨丹的潜在适生区

基于不同数据库和文献收集的当前连续栖息地适宜性图(图 3)。通过对当前气候条件下马缨丹的潜在适生区分析可知,北美洲、南美洲、非洲、亚洲、欧洲以及大洋洲有入侵风险,其中南美洲、非洲南部、亚洲南部以及澳大利亚北部和东部具有较高的入侵风险。马缨丹主要分布于热带、亚热带地区,少部分分布在温带地区,而在寒带没有分布。

从分布范围可以看出,马缨丹偏好热带季风气候、亚热带季风气候、热带草原气候、热带雨林气候和地中海气候等气候类型。

对当前和未来气候情景下,全球各类分布区的陆地面积进行量化(表 2)。在当前气候条件下,适生区面积( $5016 \times 10^4 \text{ km}^2$ )占世界陆地面积的 23.05%,其中低适生区为 6.38%,中适生区为 11.03%,高适生区为 5.64%。

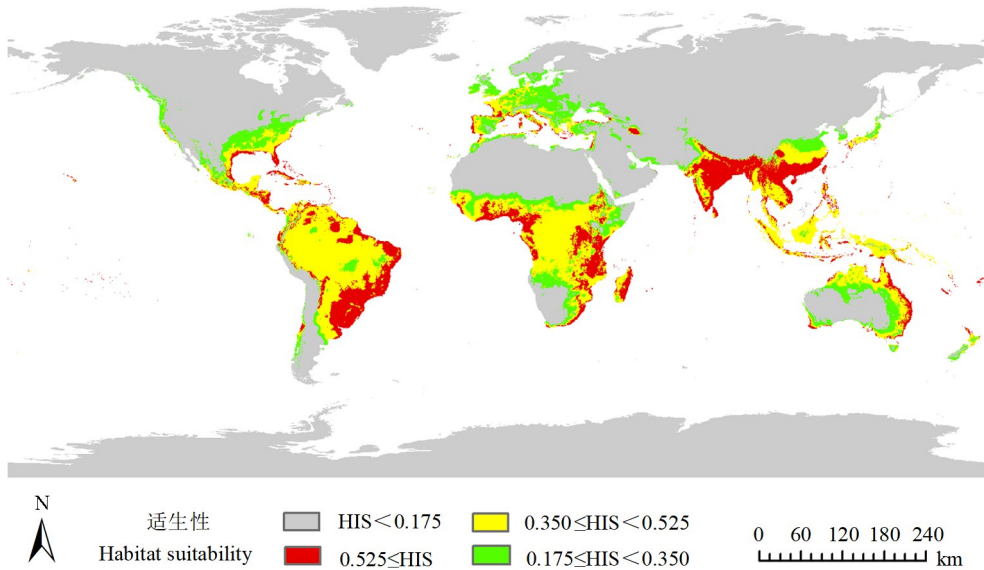


图 3 当前气候条件下马缨丹的潜在适生区[审图号:GS(2023)2937 号]

Fig.3 The potential suitable areas of *L. camara* under the current climate conditions

表 2 当前和未来气候条件下马缨丹各潜在适生区的面积( $\times 10^4 \text{ km}^2$ )

Table 2 The potential suitable areas of *L. camara* under the current and future climate conditions ( $\times 10^4 \text{ km}^2$ )

| 适生区类型<br>Type of suitable area | 当前 Current<br>(1970—2000) | 2050s  |        |        | 2090s  |        |        |
|--------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                |                           | SSP126 | SSP245 | SSP585 | SSP126 | SSP245 | SSP585 |
| 非适生区 Unsuitable area           | 16742                     | 16624  | 16526  | 16688  | 16546  | 16653  | 16465  |
| 低适生区 Marginally suitable area  | 1388                      | 1394   | 1437   | 1395   | 1326   | 1318   | 1408   |
| 中适生区 Moderately suitable area  | 2401                      | 2426   | 2452   | 2334   | 2548   | 2543   | 2508   |
| 高适生区 Highly suitable area      | 1227                      | 1203   | 1233   | 1231   | 1227   | 1135   | 1267   |
| 适生区 Total suitable area        | 5016                      | 5023   | 5122   | 4960   | 5101   | 4996   | 5183   |

2.3 马缨丹潜在适生区的面积变化和空间变换格局

在 2050s 和 2090s 的一系列未来气候情景下,图 4 展现了 SSP126、SSP245 和 SSP585 的预测结果,分别代表了温室气体排放浓度最低、中等和最高的路径。在未来不同气候情景下,入侵高风险地区,如南美洲、非洲南部、亚洲南部以及澳大利亚北部和东部,马缨丹适生区范围持续保持不变。

由表 2 可知,从当前至 2050s 再至 2090s,在 SSP126 气候情景条件下,马缨丹适生区的陆地面

积呈现小幅增加的趋势,依次增加了 0.15%、0.37%;在 SSP245 气候情景条件下,马缨丹适生区的陆地面积呈现先增后减的趋势,分别增加了 0.61%和减少了 0.58%;在 SSP585 气候情景条件下,马缨丹适生区的陆地面积呈现先减后增的趋势,减少了 0.14%和增加了 1.03%。此外,在 2050s 和 2090s,马缨丹潜在适生区面积随着温室气体排放浓度呈正相关关系。结果表明,气候变暖加剧对马缨丹防治极为不利。

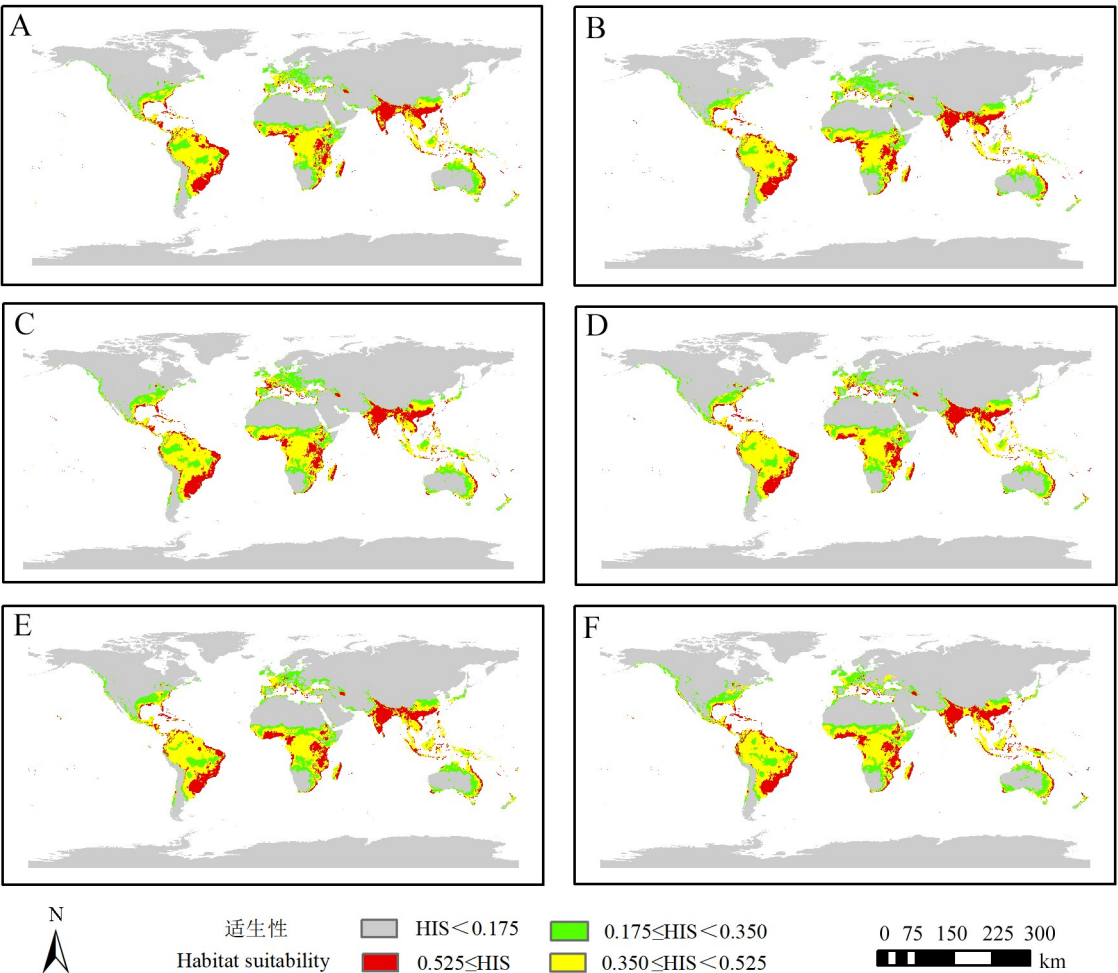


图 4 未来条件下马缨丹潜在适生区[ 审图号:GS(2023)2937 号]

Fig.4 The potential suitable areas of *L. camara* under future climate conditions

A: 2050sSSP126; B: 2090sSSP126; C: 2050sSSP245; D: 2090sSSP245; E: 2050sSSP585; F: 2090sSSP585.

由表 3 和图 5 所示,在 2050sSSP126、2050sSSP245、2050sSSP585、2090sSSP126、2090sSSP245 和 2090sSSP585 6 种气候情景中,马缨丹适生区呈扩增的趋势,即增加区大于丧失区。2050sSSP585 适生区新增面积最大,约 $280.97\times10^4\text{ km}^2$ ,达 7.31%,新增地区主要分布于中国、澳大利亚东部、撒哈拉沙漠南部、马达加斯加西部、巴西和秘鲁等。在 SSP126 气候情景下,

2050s 丧失率小于 2090s 丧失率,说明 2090s 空间变换波动相对较大,马缨丹生存受气候制约较显著。在 SSP245 气候情景下,2050s 空间变化波动相对 2090s 空间波动较大;2090sSSP245 气候情景下,马缨丹没有进一步入侵的趋势,但不可忽略马缨丹的入侵潜力,仍需保持警惕。

表 3 未来气候条件下马缨丹各潜在适生区的面积 ( $\times10^4\text{ km}^2$ )

Table3 The potential suitable areas of *L. camara* under the future climate conditions ( $\times10^4\text{ km}^2$ )

| 适生区类型<br>Type of suitable area | 2050s   |         |         | 2090s   |         |         |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                | SSP126  | SSP245  | SSP585  | SSP126  | SSP245  | SSP585  |
| 保留区 Maintained area            | 3456.82 | 3435.94 | 3342.32 | 3505.38 | 3398.90 | 3362.87 |
| 增加区 Increased area             | 162.68  | 188.05  | 280.97  | 122.06  | 231.60  | 254.22  |
| 丧失区 Decreased area             | 169.36  | 252.90  | 222.17  | 269.35  | 277.64  | 277.64  |
| 总面积 Total area                 | 3788.86 | 3876.89 | 3845.46 | 3896.79 | 3908.14 | 3894.73 |

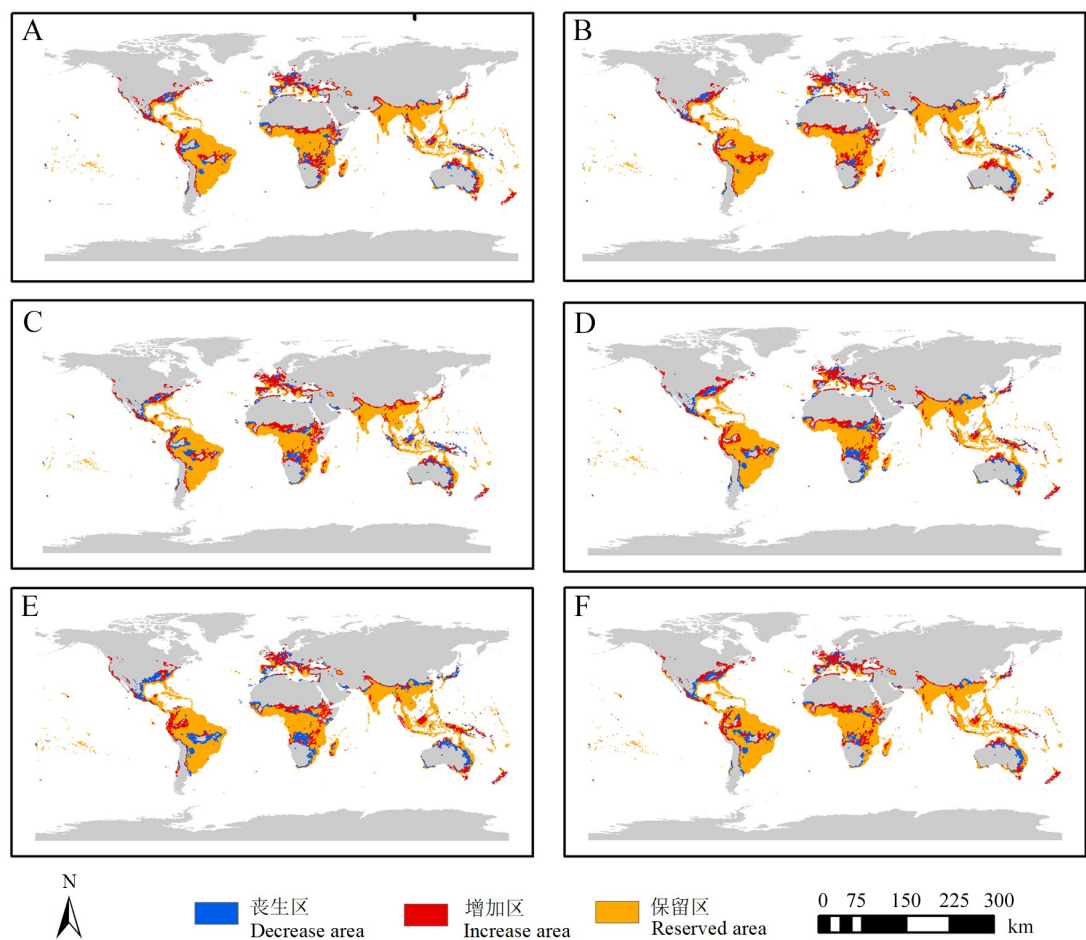


图 5 不同时期马缨丹空间变换格局[ 审图号:GS(2023)2937 号]

Fig.5 The spatial distribution pattern of *L. camara* suitable areas in different periods

A:2050sSSP126; B:2090sSSP126; C:2050sSSP245; D:2090sSSP245; E:2050sSSP585; F:2090sSSP585.

2.4 多元环境相似度面和最不相似变量分析

MaxEnt 模型预测未来的一系列气候情景下马缨丹多元环境相似面 (MESS) (图 6) 与最不相似变量 (MoD) (图 7), 1744 个当前有效分布点的多元相似度为负值的点所占比例分别为 0、0、0、0、0、1.15%。2090sSSP585 多元相似度为负值的点所占比例最高, 说明其气候异常程度最高, 异常区分布在南美洲北部、撒哈拉沙漠东边和西边以及印度尼西亚大部分地区, 最不相似变量为最热季度的平均温度 (bio10) 和最干季度的平均温度 (bio9); 2090sSSP126 气候情景下, 气候异常区与 2050sSSP126 的气候异常区大致相同, 位于撒哈拉沙漠西边, 最不相似变量为最热季度的平均温度 (bio10); 2090sSSP245 气候情景下, 气候异常区范围与 2050sSSP245 的气候异常区范围相比, 呈扩大现象, 最不相似变量为最热季度的平均温度 (bio10)。综上所述, 最热季度的平均温度 (bio10) 在未来马缨丹潜在适生区内作为最不相似变量, 其

次为最干季度的平均温度 (bio9)。最不相似变量占比最大的是温度因素, 表明温度因子是制约马缨丹的分布变迁的关键因素。

3 讨论

3.1 马缨丹当前和未来适生区对气候变化的响应

本研究中, 当前影响马缨丹地理分布格局的重要气候因子有温度季节性 (bio4)、最干季度的平均温度 (bio9)、年降水量 (bio12)、最热季度的平均温度 (bio10)。结合多元环境相似度面和最不相似变量分析, 温度因子是关键制约因子, 降水因子起到重要作用, 这与张桥英和彭少麟 (2018) 和罗丹等 (2009) 的结论一致。马缨丹能够适应夏季高温 (刘龙, 2014), 而在越冬时温度低于 5℃ 时, 不适宜其生长, 若低于 0℃ 则会干枯死亡。另外, 研究发现, 马缨丹喜降雨量充足的地区 (Masocha *et al.*, 2017; Shackleton *et al.*, 2017), 若在水资源有限的南非草原, 降雨将加速其传播 (Masocha *et al.*, 2017)。降

雨量相对较高的地区,马缨丹生存情况远远优于降雨量低的地区(Prasad *et al.*, 2018),说明降水因子可能主导马缨丹的入侵扩散。

马缨丹喜温暖湿润,阳光充足的环境。本研究发现,它的适生区全年温暖湿润,包括热带草原(非洲大部分地区、澳大利亚北部、南美洲中部)、热带雨林(南美洲北部、中非、北美南部)、温带森林(中国东部、澳大利亚东部、北美东部)和灌木丛(靠近地中海的地区),这与前人研究结论一致(Shackleton *et al.*, 2017; Subhashni & Lalit, 2013; Taylor *et al.*, 2012; Timothy *et al.*, 2020; Tiwari *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2020)。其中,南美洲、非洲南部、南亚和澳大利亚东部以热带雨林、季风林和亚热带阔叶林为主,当地居民大规模清理土地、砍伐森林并种植单一经济作物,森林资源遭到严重破坏,加之全球气候变化,导致马缨丹迅速传播(Arifin & Setyawan, 2022; Evers *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2022)。

前人研究表明,水热条件协同调控植物适生区的空间分布格局(孙忠林等, 2022; 叶兴状等, 2021; 赵先丽等, 2022)。全球陆地水热分布不平衡,多年平均降水量呈东南沿海向西北内陆递减的趋势(高艳红等, 2021; Tao, 2022)。全球温度由赤道向两极递减,且气候变化异常幅度由低纬度地区向高纬度递增(沈贝蓓等, 2021)。鉴于此,推测最干月降水量与年降水量限制马缨丹越过苏莱曼山脉-兴都库什山脉-帕米尔高原-喜马拉雅-阿巴拉契亚山脉,到达伊朗高原、图兰低地、里海沿岸平原、青藏高原和密西西比平原东侧;温度季节性限制了马缨丹越过秦岭太行山-阴山-燕山-波德平原-喀尔巴阡山脉和五大连湖,越过亚热带北界和温带海洋性气候东北界;最干月降水量、最暖季度平均温度和最干季度的平均温度限制马缨丹越过巴克利高原-大分水岭-乍得盆地到达澳大利亚中部平原、维多利亚沙漠和撒哈拉大沙漠。

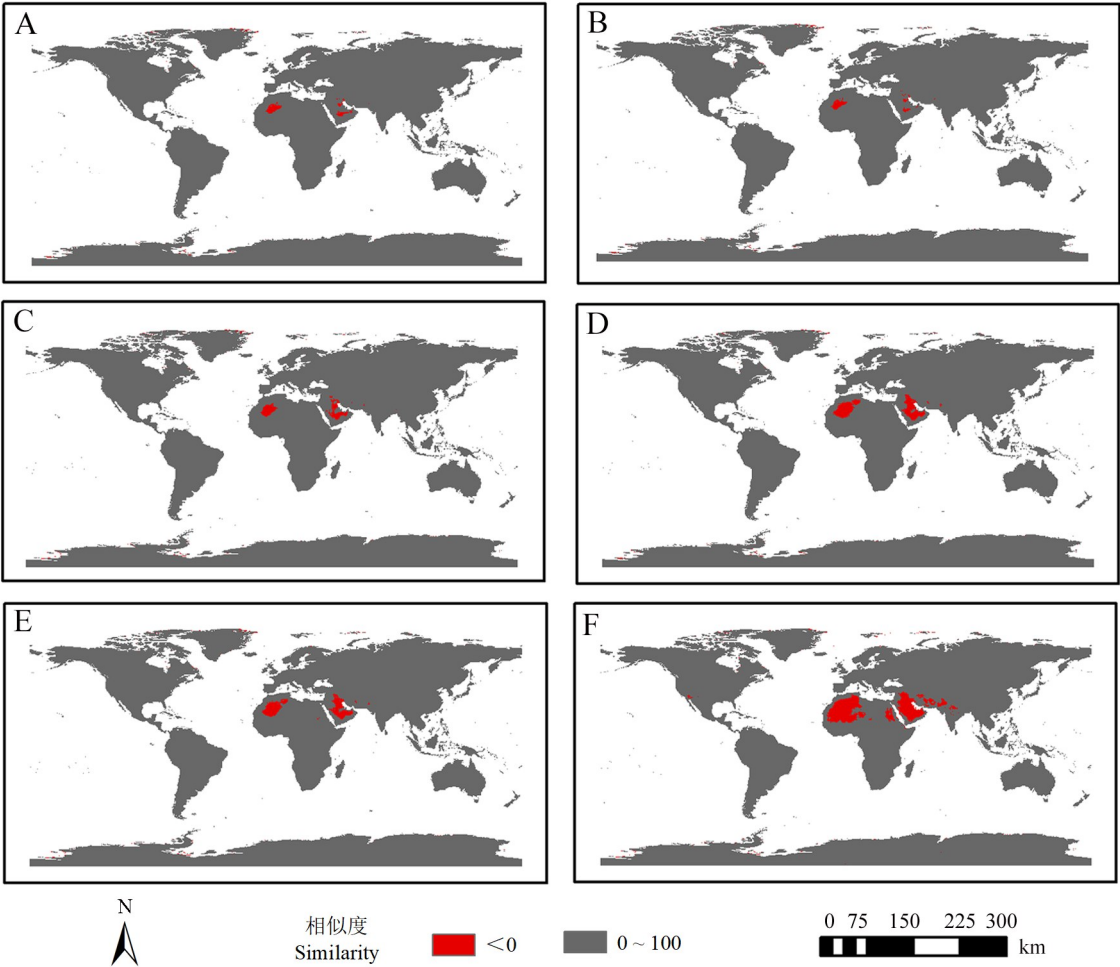


图 6 未来 6 个时期多元环境相似度面[审图号:GS(2023)2937]

Fig.6 The multivariate environmental similarity surface in six different future emission scenarios

A: 2050sSSP126; B: 2090sSSP126; C: 2050sSSP245; D: 2090sSSP245; E: 2050sSSP585; F: 2090sSSP585.

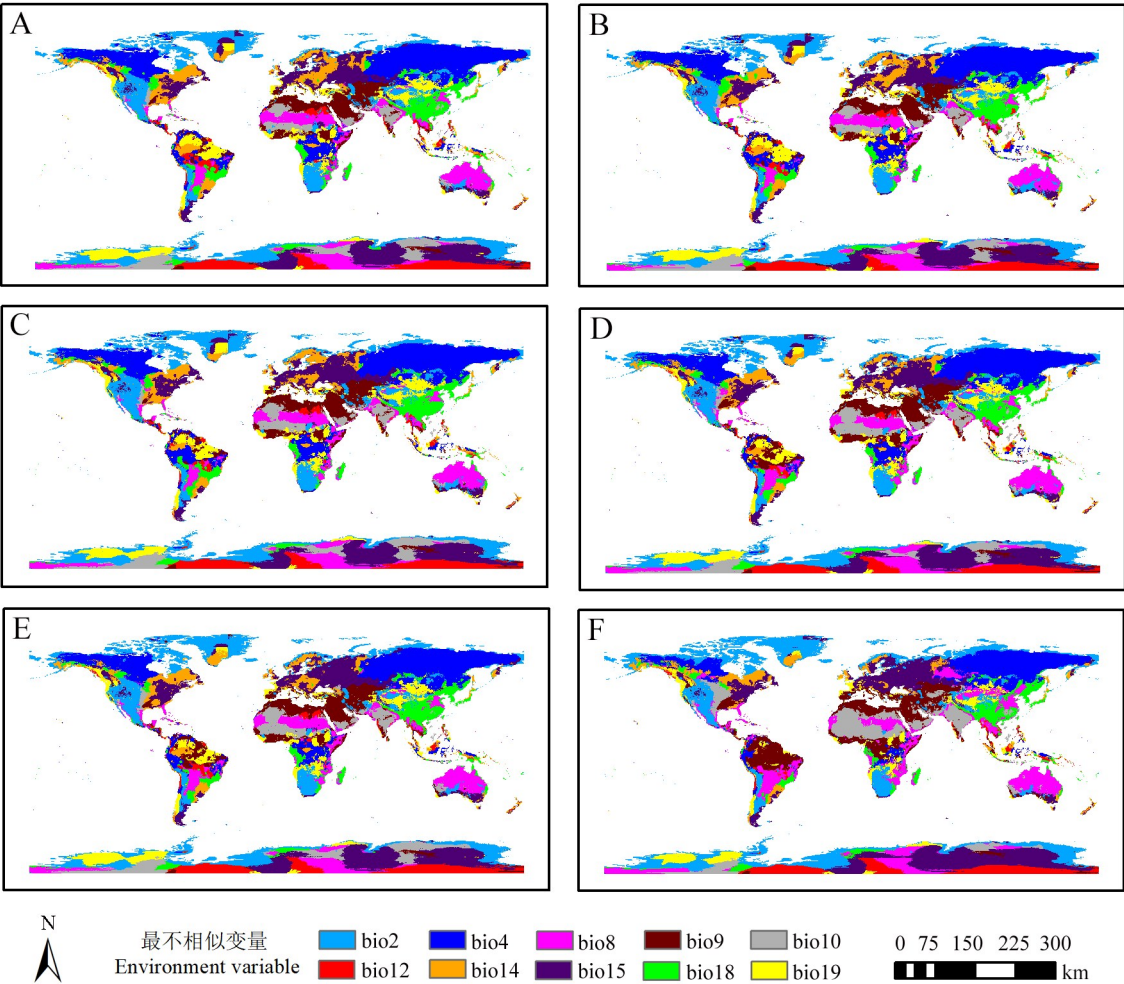


图 7 未来 6 个时期多元环境最不相似变量[ 审图号:GS(2023)2937]

Fig.7 The multivariate environmental dissimilar variables in six different future emission scenarios

A: 2050sSSP126; B: 2090sSSP126; C: 2050sSSP245; D: 2090sSSP245; E: 2050sSSP585; F: 2090sSSP585.

3.2 不同气候条件下马缨丹空间格局变化

总体上看,马缨丹的分布未达到饱和,呈现以南亚、非洲中部和南美洲为中心,向北美、南美洲南部、大洋洲和欧洲方向辐射状扩散。当前气候情景在 SSP126、SSP245、SSP585 3 种情景下至 2050s,再至 2090s,马缨丹的入侵范围继续扩大,入侵速度也在上升。温室气体排放显著地改变着全球气候,气候变化所引起的极端气候事件和环境条件改变,将促进植物入侵(Dutra *et al.*, 2021)。此时,气候引起的生存压力以及与其他气候介导的过程的相互作用相关的树木死亡率提高(Aitken *et al.*, 2008)。研究表明,马缨丹无法在茂密而完整的森林冠层下正常生长繁殖(Lone *et al.*, 2022)。森林受到破坏,为马缨丹加快扩散提供了有利条件。自 2013 年以来,保护区内木本覆盖的增加,反而加剧了马缨丹的入侵(Mungi *et al.*, 2020)。原因在于马缨丹具有

很强的表型可塑性和稳态适应性,使其生态位扩大,能适应更多环境类型,入侵防治和控制任务更加困难。

与朱耿平等(2018)研究结果一样,本研究模拟的马缨丹潜在适生区的面积大于实际分布面积。第一种可能是研究过程中仅将非生物的环境变量作为参考因素,而忽略了物种间相互作用和物种自身的繁殖能力,以至于将物种分布面积结果估算过高;第二种可能是由于马缨丹和山白树 *Sinowilsonia henryi* Hemsl.等植物一样,自身的迁移能力较弱或在迁移过程中存在障碍,无法达到其适宜的生境(杨黔越等,2021; 张华纬等,2020);第三种可能是因为部分地区防控力度较大,严格管控了马缨丹的入侵,使实际分布面积较少。

3.3 MaxEnt 模型预测精度检验

本研究通过使用 MaxEnt 模型来预测当前和未

来不同气候情景下世界范围内马缨丹潜在分布区。在各个时期预测的 AUC 值均大于 0.85, 预测结果具有一定准确性。为了进一步提升模型预测效果, 一方面, 可以对 MaxEnt 模型进行优化, 优化后的模型, 过拟合程度下降(李佳慧等, 2021); 另一方面, 虽然 MaxEnt 模型具有更多优点, 但也存在缺陷(Peterson *et al.*, 2017)。若将多个模型组合进行模拟, 能选择各模型的优势, 避开模型之间的劣势, 以此能够得到较好的模拟效果。

发生记录数和环境变量数对入侵植物 MaxEnt 模型均有影响(Wan *et al.*, 2019)。本研究收集了分布点数据共计 88416 份, 除了部分标本数据由于年代久远没有图片保存或者字迹模糊无法辨别, 导致这部分的标本数据无法收集外, 总体来说, 数据收集比较全面。

本研究中, 以生物气候变量为主, 包括 19 个气候因子, 为了避免过度拟合, 需要删除相互之间存在过多相同信息的变量。结合相关性分析、贡献率和马缨丹的生理特性来完成, 最终筛选出 10 个气候因子作为预测马缨丹的气候变量。此外, 影响物种分布稳定格局的形成, 除了气候因子外, 还包括地形、海拔、土壤成分、入侵植物以及人类活动等因子(潘红丽等, 2021)。因此, 在之后研究中, 可加入其他环境变量进行预测。但大量环境变量的加入, 会导致模型复杂程度更高, 可能造成模型模拟效果下降。所以选择适量的环境变量(如>5)是预测入侵植物分布的重要因素(Thuiller, 2014)。

3.4 预防策略

本研究显示, 入侵高风险地区, 包括南美洲、非洲南部、亚洲南部以及澳大利亚北部和东部; 中低风险地区有北美洲、南美洲、非洲、亚洲、欧洲以及大洋洲。高风险地区绝大部分为发展中国家和不发达国家, 而中低风险地区以发达国家为主。高风险地区需要用强度最大的模式防治马缨丹, 但需要考虑成本和评估防治措施。这些地区主要由于森林破碎化和生物多样性下降, 给予马缨丹入侵的机会。而 Yu *et al.* (2020) 提出, 具有优越适合度的本地植物, 且该植物生态位与马缨丹生态位绝大部分重叠, 通过竞争排斥可抑制马缨丹的建立和扩散, 此措施可能有助于生态系统的恢复。还有研究显示, 本地群落的物种多样性较高, 群落中的生态位处于比较饱和的状态时, 留给外来植物的生态位不

足, 则外来植物入侵的难度相比较于森林破碎化和生物多样性下降地区会更高。可知, 丰富地区的物种多样性也是预防马缨丹入侵的一个策略(刘艳杰等, 2022)。另外, 马缨丹具有应用价值, 或许可以借助发展它的经济价值, 这是最大限度减少其对生态系统影响最佳的方法之一, 即在显著减少其存在的同时带来经济和生态效益。经济发展是削弱人类对自然资源依赖性的重点。对于中低风险区域, 科学家、私人组织和政府机构需要合作和协调使用监测方法, 共享数据, 以提高监测入侵后的行动效率, 从而增加控制或根除的可能性。经济发达地区, 可以借助生物信息技术, 分析揭示参与配子形成的候选基因, 开发新工具, 利于入侵防控(Peng *et al.*, 2019)。

参考文献

白晓娟, 陈海, 刘迪, 史琴琴, 荔童, 2023. 基于 Maxent 模型的生态系统服务需求及其簇的空间分异——以陕西省米脂县为例. 生态学报, 43(7): 2745–2755.

井新, 蒋胜竞, 刘慧颖, 李昱, 贺金生, 2022. 气候变化与生物多样性之间的复杂关系和反馈机制. 生物多样性, 30(10): 293–311.

寇紫倩, 刘煜光, 彭伟秀, 马毅超, 史宝胜, 2022. 外来植物刺萼龙葵对当地植被组成及多样性的影响. 林业与生态科学, 37(4): 466–472.

罗丹, 陈红跃, 刘乾, 2009. 5 种屋顶绿化植物抗旱性研究. 广东林业科技, 25(6): 81–85.

李佳慧, 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 刘益鹏, 张天宇, 张国防, 刘宝, 2021. 入侵植物三裂叶豚草在中国的潜在适生区预测. 生物安全学报, 30(4): 263–274.

刘龙, 2014. 公路小气候对外来植物物种的影响. 公路, 59(10): 265–269.

李玉霞, 尚春琼, 朱珣之, 2019. 入侵植物马缨丹研究进展. 生物安全学报, 28(2): 103–110.

刘艳杰, 黄伟, 杨强, 郑玉龙, 黎绍鹏, 吴昊, 鞠瑞亭, 孙燕, 丁建清, 2022. 近十年植物入侵生态学重要研究进展. 生物多样性, 30(10): 276–292.

马占云, 任佳雪, 陈海涛, 2022. IPCC 第一工作组评估报告分析及建议. 环境科学研究, 35(11): 2550–2558.

高艳红, 张萌, 刘伟, 2021. 陆地水资源变化对变暖的响应及其影响因素. 大气科学学报, 44(3): 325–335.

潘红丽, 李慧超, 余志祥, 蔡蕾, 李旭华, 刘兴良, 2021. 攀枝花市入侵植物马缨丹群落的物种组成与多样性研究. 生态环境学报, 30(6): 1177–1182.

- 沈贝蓓, 宋帅峰, 张丽娟, 王子晴, 任崇, 李永生, 2021. 1981—2019 年全球气温变化特征. *地理学报*, 76(11): 2660–2672.
- 孙忠林, 华明阳, 尹智博, 李岩, 冯颖, 姜云天, 2022. 水热条件及坡向对长白山区蒙古栎林土壤呼吸的影响. *东北林业大学学报*, 50(11): 78–83.
- 吴杨, 潘玉雪, 张博雅, 2020. IPBES 框架下的生物多样性和生态系统服务区域评估及政策经验. *生物多样性*, 28(7): 913–919.
- 徐养诚, 刘孝贤, 王婷, 李东育, 高桂珍, 2021. 基于 Max-Ent 模型的菜豆象全球潜在适生区预测. *生物安全学报*, 30(3): 213–219.
- 杨黔越, 叶兴状, 徐毅枫, 覃名扬, 刘宝, 黄秋良, 张国防, 2021. 山白树潜在适生区对气候变化的响应. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 51(5): 629–635.
- 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝, 2021. 基于 Maxent 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. *生态学报*, 41(20): 8135–8144.
- 张华伟, 赵健, 阎波杰, 邹杰, 李志鹏, 2020. 基于 Maxent 模型和 GIS 的马缨丹在中国的适生区预测. *生态与农村环境学报*, 36(11): 1420–1427.
- 朱耿平, 原雪姣, 范靖宇, 王梦琳, 2018. MaxEnt 模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响——以茶翅蟥为例. *生物安全学报*, 27(2): 118–123.
- 张桥英, 彭少麟, 2018. 增温对入侵植物马缨丹生物量分配和异速生长的影响. *生态学报*, 38(18): 6670–6676.
- 赵先丽, 蔡福, 丁抗抗, 王赛嶙, 王笑影, 张慧, 贾庆宇, 温日红, 吴航, 2022. 锦州地区春玉米物候变化趋势及其与水热条件的关系. *气象与环境学报*, 38(5): 64–71.
- AITKEN S N, YEAMAN S, HOLLIDAY J A, WANG T L, CURTIS-MCLANE S, 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1): 95–111.
- ARIFIN B, SETYAWAN D, 2022. How palm oil industry is having a devastating impact on Indonesia's health, rainforests, and labor market. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12): 11775–11788.
- AYAA F, LUBWAMA M, KIRABIRA J B, JIANG X, 2022. Potential of invasive shrubs for energy applications in Uganda. *Energy, Ecology and Environment*, 7(6): 563–576.
- BA L, FACELLI J M, 2022. Invasive success of exotic wild oat depends on nutrient availability and competition in temperate grasslands of southern Australia. *Plant Soil*, 472: 465–478.
- BEYENE B B, LI J J, YUAN J J, DONG YH, LIU D Y, CHEN Z M, KIM J, KANG H J, FREEMAN C, DING W X, 2022. Non-native plant invasion can accelerate global climate change by increasing wetland methane and terrestrial nitrous oxide emissions. *Global Change Biology*, 28(18): 5453–5468.
- DUTRA S L, BENTO E R, SILVA L, 2021. Modelling invasive alien plant distribution: a literature review of concepts and bibliometric analysis. *Environmental Modelling and Software*, 145: 105203.
- DUBE T, SHOKO C, SIBANDA M, MADILENG P, MALULEKE XG, MOKWATEDI VR, TIBANE L, TSHEBESEBE T, 2020. Remote sensing of invasive *Lantana camara* (Verbenaceae) in semiarid savanna rangeland ecosystems of South Africa. *Rangeland Ecology & Management*, 73(3): 411–419.
- ELITH J, KEARNEY M, PHILLIPS S, 2010. The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(4): 330–342.
- EVERS C, HOLZ A, BUSBY S, NIELSEN-PINCUS M, 2022. Extreme winds alter influence of fuels and topography on megafire burn severity in seasonal temperate rainforests under record fuel aridity. *Fire*, 5(2): 41.
- GILLELA S, YADAV S M, SIHAG K, LUBIS M A R, WIBOWO E S, NEGI A, ISWANTTO A H, ANTOV P, KRISTAK L, 2022. A review on *Lantana camara* lignocellulose fiber-reinforced polymer composites. *Biomass Conversion and Biorefinery*. [2022-12-09]. DOI: 10.1007/s13399-022-02402-7.
- LONE P A, DAR J A, KOTHANDARAMAN S, KHAN M L, 2022. Invasive shrub *Lantana camara* L. alters the flora and soils in tropical dry deciduous forests of Central India. *Biotropica*, 54(6): 1412–1427.
- MADDHESHIYA R, SINGH K P, 2022. Effect of *Lantana camara* essential oil on embryogenesis and postembryonic development of the blowfly, *Chrysomya megacephala* (Diptera: Calliphoridae) following egg treatment. *Invertebrate Reproduction & Development*, 66(1): 16–22.
- MASOCHA M, DUBE T, SKIDMORE A, HOLMGREN M, PRINS H, 2017. Assessing effect of rainfall on rate of alien shrub expansion in a southern African savanna. *African Journal of Range & Forage Science*, 34(1): 39–44.
- MUNGI N A, QURESHI Q, JHALA Y V, 2020. Expanding-niche and degrading forests: key to the successful global invasion of *Lantana camara* (sensu lato). *Global Ecology and Conservation*, 23: 2351–9894.
- NEGI A, JOSHI S K, BHANDARI N S, 2023. Estimation of sorption-desorption characteristics of biosorbent of *Lantana camara* leaves for removal of Pb (II) ions from wastewater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1): 42.

- NTALO M, RAVHUHALI K E, MOYO B, HAWU O, MSIZA N H, 2022. *Lantana camara*: poisonous species and a potential browse species for goats in Southern Africa—A review. *Sustainability*, 14(2): 751.
- PENG Z, BHATTARAI K, PARAJULI S, CAO Z, DENG Z N, 2019. Transcriptome analysis of young ovaries reveals candidate genes involved in gamete formation in *Lantana Camara*, *Plants*, 8(8): 263.
- PETERSON A T, PAPE M, SOBERÓN J, 2017. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1): 63–72.
- PHILLIPS S J, MIROSLAV D, 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2): 161–175.
- PRASAD A, RATNAM J, SANKARAN M, 2018. Rainfall and removal method influence eradication success for *Lantana camara*. *Biological Invasions*, 20: 3399–3407.
- PYŠEK P, HULME P E, SIMBERLOFF D, BACHER S, BLACKBURN T M, CARLTON J T, DAWSON W, ESSI F F, OXCROFT L C, GENOVESI P, JESCHKE J M, KÜHN I, LIEBHOLD A M, MANDRAK N E, MEYERSON L A, PAUCHARD A, PERGL J, ROY H E, SEEBENS H, VAN KLEUNEN M, VILÀ M, WINGFIELD M J, RICHARDSON D M, 2020. Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews Camb Philosophical Society*, 95(6): 1511–1534.
- SHACKLETON R T, WITT A B, AOOL W, PRATT C F, 2017. Distribution of the invasive alien weed, *Lantana camara*, and its ecological and livelihood impacts in eastern Africa. *African Journal of Range & Forage Science*, 34(1): 1–11.
- SHRESTHA P R, OLI H B, THAPA B, CHAUDHARY Y, YADAV A P, 2019. Bark extract of *Lantana camara* in 1M HCl as green corrosion inhibitor for mild steel. *Engineering Journal*, 23(4): 205–211.
- SUBHASHNI T, LALIT K, 2013. Potential distribution of an invasive species under climate change scenarios using CLIMEX and soil drainage: a case study of *Lantana camara* L. in Queensland, Australia. *Journal of Environmental Management*, 114: 414–422.
- TAYLOR S, KUMAR L, REID N, KRITICOS D J, 2012. Climate change and the potential distribution of an invasive shrub, *Lantana camara* L. *PLoS ONE*, 7(4): e35565.
- TAO Z X, 2022. Predicting the changes in suitable habitats for six common woody species in Central Asia. *International Journal of Biometeorology*. [2022-12-09]. DOI: 10.1007/S00484-022-02389-W.
- THUILLER W, 2014. Editorial commentary on "BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change". *Global Change Biological*, 20: 3591–3592.
- TIMOTHY D, CLETAH S, MBULISI S, PASCHALINE M, XI-VUTISO G M, VELMA R M, LORENCIA T, TEBOGO T, 2020. Remote sensing of invasive *Lantana camara* (Verbenaceae) in semiarid savanna rangeland ecosystems of South Africa. *Rangeland Ecology & Management*, 73(3): 441–419.
- TIWARI S, MISHRA S N, DHARMENDRA K, BASANT K, VAIDYA S N, GOPAL B G, MUJIBAR S R, MASJUDA K, SANJOY G, AMIT K, 2022. Modelling the potential risk zone of *Lantana camara* invasion and response to climate change in eastern India. *Ecological Processes*, 11: 10.
- VERDEGUER M, BLÁZQUEZ M A, BOIRA H, 2009. Phytotoxic effects of *Lantana camara*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Eriocephalus africanus* essential oils in weeds of Mediterranean summer crops. *Biochemical Systematics and Ecology*, 37(4): 362–369.
- WALDEN-SCHREINER C, LEUNG Y F, KUHN T, TSAI L W, 2017. Environmental and managerial factors associated with pack stock distribution in high elevation meadows: case study from Yosemite National Park. *Environ Manage*, 193: 52–63.
- WAN J Z, WANG C J, YU F H, 2019. Effects of occurrence record number, environmental variable number, and spatial scales on MaxEnt distribution modelling for invasive plants. *Biologia*, 74: 757–766.
- YU H, YUE M, WANG C, LE R J J, PENG C, LI W, 2020. Priority effects and competition by a native species inhibit an invasive species and may assist restoration. *Ecology and Evolution*, 10(23): 13355–13369.
- ZHANG H, ZHAO J, YAN B, ZOU J, LI Z, 2020. Prediction of potential geographic distribution of *Lantana camara* in China using Maxent model and GIS. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 36(11): 1420–1427.

(责任编辑:郭莹)