

DOI: 10.20103/j.stxb.202204100939

林敬梧, 桂东伟. 火炬树在北美和中国空间分布差异对比及防范入侵措施. 生态学报, 2024, 44(4): 1692-1699.

Lin J W, Gui D W. Comparing spatial distribution of torch tree in North America and China and its preventing measures. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1692-1699.

# 火炬树在北美和中国空间分布差异对比及防范入侵措施

林敬梧<sup>1,2</sup>, 桂东伟<sup>1,2,\*</sup>

1 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 火炬树原产于北美洲东部, 引进中国后主要栽培于贫瘠土壤上, 用于植树造林和保持水土。然而其入侵性和扩散能力较强, 管控不当将会严重破坏侵入地生态系统的多样性。采用了 GIS 和 MaxEnt 模型相结合的方法, 模拟了火炬树在北美和中国地区的适宜分布区域, 分析了主要环境影响因素, 并利用 ROC 曲线验证模型结果的准确度。研究结果表明: 火炬树在北美和中国的适宜分布区域都主要集中在 30°—40°N 气候相对湿润地带; 影响 MaxEnt 模型预测结果的关键环境因子都是气候因子; 预测模型的 AUC 值都大于 0.9。但两个地区的部分环境因子的阈值范围存在明显差异, 说明在入侵中国后火炬树的气候空间和生态位发生了较大变化, 对中国本地的生态系统构成一定威胁。可为防疫监测和林业部门的工作提供参考依据, 有助于其制定早期预警和监管措施, 从而有效防治中国地区火炬树的入侵和保护生物多样性。

**关键词:** 火炬树; MaxEnt 模型; 空间适宜分布; 入侵植物; 环境因子; 生态危害

## Comparing spatial distribution of torch tree in North America and China and its preventing measures

LIN Jingwu<sup>1,2</sup>, GUI Dongwei<sup>1,2,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract:** *Rhus typhina* L is native to the eastern part of North America. After its introduction to China, it has been mainly cultivated in infertile plains for afforestation and soil conservation purposes. However, due to its strong invasive and spreading abilities, the inadequate management will severely disrupt the biodiversity of invaded ecosystems. In this study, a combined approach using GIS and the MaxEnt model was employed to simulate the suitable distribution areas of *Rhus typhina* L in North America and China, and to analyze the environmental factors influencing its distribution. The accuracy of the model simulation was validated using ROC curves. The research results indicate that the suitable distribution areas of *Rhus typhina* L in both North America and China are predominantly concentrated in regions with a relatively humid climate between 30 to 40 degrees north latitude. The key environmental factors influencing the predictive results of the MaxEnt model were climate-related factors. The AUC values of the predictive models were greater than 0.9 for both regions. However, there were significant differences in the threshold ranges of certain environmental factors between the two regions. After invading China, *Rhus typhina* L has undergone significant changes in its climatic niche and ecological space, posing a

基金项目: 新疆自然科学基金(2022D01E099)

收稿日期: 2022-01-10; 网络出版日期: 2023-11-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guidwei@ms.xjb.ac.cn

# 本研究尚缺乏中国港澳台统计数据。

certain threat to the local ecosystems in China. This study provides a reference basis for quarantine monitoring and forestry departments, aiding in the formulation of early warning and regulatory measures to effectively prevent the invasion of *Rhus typhina* L in China and protect biodiversity.

**Key Words:** *Rhus typhina* L; MaxEnt model; spatial optimum distribution; invasive plant; environmental factors; ecological damage

火炬树(*Rhus typhina* L)又称鹿角漆,是一种原产于加拿大和美国的大型落叶灌木,在北美地区分布范围北至魁北克,南至乔治亚,西至爱荷华。其生长速度快,适应能力强,常种植在贫瘠的沙土和砾质土上,具有涵养水源、保持水土的功能以及较高的观赏价值。1959年中国科学院植物研究所将其作为观赏树引入中国,后因其具有高繁殖率和高扩散率的优势,被栽培在黄河以北,如山东<sup>[1]</sup>、河北<sup>[2]</sup>、北京<sup>[3]</sup>等地用于植树造林和恢复退化的土地。但由于火炬树根系繁殖的特性,在适宜条件下入侵性和扩散能力强,易向四周蔓延占据灌丛、草地、林地和农田等,会对侵入地植物群落的演替过程和分布格局产生重要影响,对生态系统的稳定产生重大威胁<sup>[4]</sup>。

由于全球气候变化以及人类活动为物种迁移创造了新途径,中国植物群落的潜在分布可能将会有所增加<sup>[5]</sup>,土地管理者深入认识火炬树适宜生境分布的范围及主要影响因素有助于其制定控制入侵植物的全面战略和保护当地的生态环境。通过 GIS 技术从目标物种的已知分布点位入手,利用统计学技术和模型归纳的方法对生物与环境之间的关系进行回归分析,从而预测物种的空间分布并进行适宜性评价,是国内外生态保护和入侵物种管控领域热门研究方向之一。已有许多模型被科学家们应用于物种分布模拟,如最大熵模型(MaxEnt)<sup>[6]</sup>,广义加法模型(GAM)<sup>[7]</sup>,人工神经网络(ANNs)<sup>[8]</sup>,随机森林模型(RFs)<sup>[9]</sup>及遗传算法预测模型(GARP)<sup>[10]</sup>等。在对众多模型进行测试后,MaxEnt 模型因为具有以下优势:(1)在数据样本量较小或数据不完整的情况下仍能得到较为稳定的结果和较高的预测精度(2)估计未知分布的概率时,约束条件少而选择更多(3)可以处理连续变量和分类变量(4)模型软件源代码公开,可根据研究的实际情况进行灵活性编程,所以被认为是目前分析植物适生区精度最高,应用范围最广的模型<sup>[11-12]</sup>。例如,姬柳婷等<sup>[13]</sup>利用最大熵模型预测了北重楼在当前时期和未来时期的潜在适生区,并分析了影响其地理分布的主导气候因子。赵儒楠等<sup>[14]</sup>基于 ArcGIS 与 MaxEnt 模型预测了千金榆在中国的潜在分布区,为植物的引种和保存提供了重要的指导。Arogroundade 等<sup>[15]</sup>将 MaxEnt 模型与遥感数据和环境变量结合模拟夸祖鲁-纳塔尔省的银胶菊入侵,预测潜在的五种外来入侵植物在内布拉斯加州北普拉特河蔓延的可能性;Luizza M W 等<sup>[16]</sup>结合当地牧民知识、参与式制图和物种分布模型评估入侵植物橡胶藤的适宜栖息地和潜在影响,揭示了橡胶藤对阿法尔地区构成的威胁日益严重以及许多提供重要生态服务功能的当地特有树种正濒临灭绝。

上述研究充分验证了 MaxEnt 模型预测植物适生区分布的准确性,然而都局限于单个区域。为了探究某一外来入侵物种的生存特性,将其原产地和入侵地的空间分布进行比较是一种行之有效的研究方法。因此,本文在利用 GIS 和 MaxEnt 模型相结合分别得到火炬树在北美和中国的适宜生长区分布范围及其主要环境影响因子后,进一步地通过对比不同地区火炬树的分布差异来深入剖析其环境因子阈值发生变化的原因,探讨火炬树入侵可能对中国本地生物群落和生态环境带来的危害,并提出了一些合理的入侵防范和监管措施。

## 1 材料与方法

### 1.1 分布点数据的采集与处理

为了得到更加准确的火炬树分布预测结果,首先必须要有一定量精度准确又具有代表性的分布点数据。北美地区的火炬树分布点数据来自 GBIF 数据库(<https://www.gbif.org/>),共 18007 条记录;中国地区的火炬树分布记录较少,本文通过实地调查、查阅地方植物志,文献报告和国家标本资源共享平台([<http://www.ecologica.cn>](http://www.nsii.</a></p></div><div data-bbox=)

org.cn) 得到 275 个火炬树在中国的分布点位。在剔除信息不完整的点,进行空间自相关性处理和利用 ArcGIS 缓冲区分析功能删去分布过于密集的点后,最终分别得到北美地区 1202 个和中国地区 77 个具有准确经纬度且地理分布较均匀的火炬树点位数据。

## 1.2 环境数据

本研究采用的环境因子数据包括气候、土壤和地形三个方面。其中,气候数据来源于 Worldclim 数据库 ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)),空间分辨率为 30s,共有年均气温、等温性、年降水量等 19 个生物气候变量。土壤数据是利用 R 语言从国际土壤信息中心 (<https://www.isric.org/>) 下载的 250 m 空间分辨率的栅格数据,包含土壤沙含量、土壤有机碳含量、土壤酸碱度等 11 个指标。DEM 数据源自美国国家海洋和大气管理局地形数据网站 (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>),其空间分辨率为 1 km,并利用 ArcGIS 中 3D Analysis 工具计算出坡度和坡向变量集。

## 1.3 地图数据

北美和中国地图数据是从中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 下载的 1:100 万全球国家行政边界数据。

## 1.4 数据的处理

生物气候变量之间的强相关性会使最大熵模型出现过拟合现象,导致模型预测的准确度和解释性变差。因此本文遵照数据涵盖信息量最大且冗余度最小的原则,以已知的火炬树分布点位数据为基础,运用 SPSS 软件进行 Pearson 分析,剔除相关性高于 0.7 的土壤因子及高于 0.8 的气候因子,最终得到 16 个环境因子变量集,其中包含 7 个气候、7 个土壤及 2 个地形因子(表 1)。

表 1 各环境因子说明表

Table 1 Description Table of environmental factors

环境因子 Environmental factors	全称 Full name	描述 Description
bio_1	Annual mean temperature	年均气温
bio_2	Mean diurnal range	昼夜温差日均值
bio_3	Isothermality	等温性
bio_5	Max temperature of warmest month	最热月份最高温
bio_12	Annual precipitation	年降水量
bio_15	Precipitation seasonality	降水量变异系数
bio_17	Precipitation of driest quarter	最干季节降水量
t_cec_clay	Topsoil cation exchange capacity (clay)	上层土壤粘性层的阳离子交换能力
t_gravel	Topsoil Gravel Content	上层土壤碎石体积百分比
t_oc	Topsoil Organic Carbon	上层土壤有机碳含量
t_ph_h2o	Topsoil pH (H <sub>2</sub> O)	上层土壤酸碱度
t_sand	Topsoil Sand Fraction	上层土壤沙含量
t_silt	Topsoil Silt Fraction	上层土壤淤泥含量
t_teb	Topsoil total exchangeable bases	上层土壤交换性盐基
aspect	Aspect	坡向
slope	Slope	坡度

## 1.5 模型评价

本研究随机选择 75% 的分布点数据用于训练模型,剩余的 25% 数据用于测试模型的准确性。进行拟合时,在 MaxEnt 软件中设置迭代次数为 10000,收敛阈值为 0.00001,并选择刀切法分析环境因子的重要性。拟

合结果的精度采用由特异度作为横坐标轴、灵敏度作为纵坐标轴围成的 ROC 曲线进行评价。曲线下面积称为 AUC 值,表示可分离程度或测度,取值范围为 0—1 之间,数值越接近于 1 则模型预测能力越强。一般当 AUC 值大于 0.7 时,模型的预测结果就被认为是可用的<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 火炬树的空间适宜分布

本文在经过 10 次重复运算后得到北美地区的平均 AUC 值为 0.928,中国地区的平均 AUC 值为 0.917,表明最大熵模型预测结果准确性优秀,模拟精度高。将 MaxEnt 模型模拟得到的预测结果导入到 ArcGIS 中,按照适生指数从低到高将火炬树适宜分布区划为非适生区( $<0.05$ )、低适生区( $0.05—0.3$ )、中适生区( $0.3—0.7$ )、高适生区( $>0.7$ )四个等级,并以此绘制火炬树在北美和中国地区的适宜空间分布图(图 1、图 2)。研究结果显示,北美和中国地区的火炬树都主要分布在  $30^{\circ}—40^{\circ}\text{N}$  之间,气候较湿润的区域。北美地区火炬树适宜生境(中适生区和高适生区)面积为 416.32 万  $\text{km}^2$ 。其中,高适生区主要分布在美国东部五大湖周围,包括威斯康星州、密歇根州、印第安那州、俄亥俄州、宾西尼亚州、西弗吉尼亚州以及纽约州,面积为 48.04 万  $\text{km}^2$ ;中适生区主要集中分布在北美洲的东南部以及呈破碎状分布在美国的西部地区,面积为 368.28 万  $\text{km}^2$ 。中国火炬树适宜生境面积为 124.64 万  $\text{km}^2$ 。其中,高适生区主要分布在山东省、河南的北部、河北的南部以及新疆伊犁,面积为 20.98 万  $\text{km}^2$ ;中适生区分布在华北平原、黄土高原、东北平原的南部以及新疆的西北部,面积为 103.66 万  $\text{km}^2$ 。

### 2.2 生态环境因子分析

表 2 是通过迭代算法计算出的各环境因子对 MaxEnt 模型模拟火炬树适宜生境分布的贡献百分比。由表 2 可知,影响北美地区火炬树分布的主要环境因子为昼夜温差日均值(贡献率为 29.3%)、等温性(贡献率为 23.0%)和年均气温(贡献率为 17.2%),影响中国地区火炬树分布的主要环境因子为年均气温(贡献率为 27.7%)、坡度(贡献率为 23.2%)和年降水量(贡献率为 16.5%)。

利用刀切法深入对每一个环境因子进行分析,判断不同环境情况对火炬树分布的影响程度。图 3、4 中的蓝色条带越长表示只使用该变量建模预测的正则化训练效果越好。由图 3、4 可知,无论是在北美还是中国地区,三类环境因子中对 MaxEnt 模型正则化训练增益结果影响最大的都是气候因子。其中,年均气温对模型影响程度最大,然后是最热月份最高温和年降水量。但北美的刀切法曲线中单个预测结果建模的效果要远远高于中国,且 slope 因子对北美地区的模型预测结果影响微弱而对中国地区影响强烈。这种差异的产生可能是由于北美大部分地区地形平坦,坡度普遍低于 5 度,在建模时差异不大,不是决定性的关键因素。而中国适宜火炬树分布的地区覆盖平原、山地、丘陵等地带,地形复杂,起伏程度大,导致坡度对模型预测结果影响较大。

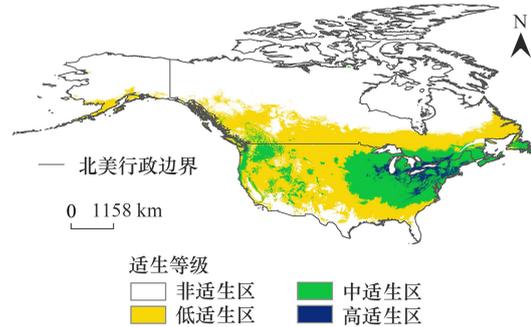


图 1 北美地区火炬树空间适宜分布图

Fig.1 The spatial optimum distribution of torch trees in North America

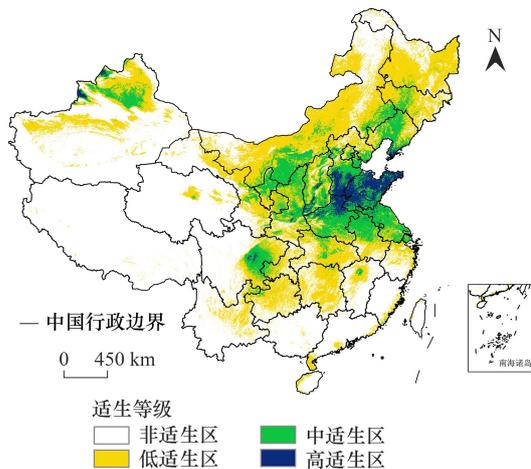


图 2 中国地区火炬树空间适宜分布图

Fig.2 The suitable distribution map of torch tree in China

表 2 各环境因子贡献百分比表

Table 2 Percentage contribution of each environmental factor

环境因子 Environmental factors	贡献百分率(北美) Percent contribution (North America)	贡献百分率(中国) Percent contribution (China)	环境因子 Environmental factors	贡献百分率(北美) Percent contribution (North America)	贡献百分率(中国) Percent contribution (China)
bio_1	17.2	27.7	t_gravel	1	0.6
bio_2	29	0.8	t_oc	0	1.1
bio_3	23	2.1	t_ph_h2o	1.6	0.1
bio_5	3.6	11.8	t_sand	2.1	0.1
bio_12	5.4	16.6	t_silt	1.6	0.2
bio_15	9.2	6	t_teb	0	0.9
bio_17	3.8	7.6	aspect	0.3	1
t_cec_clay	1.3	0.2	slope	0.9	23.2

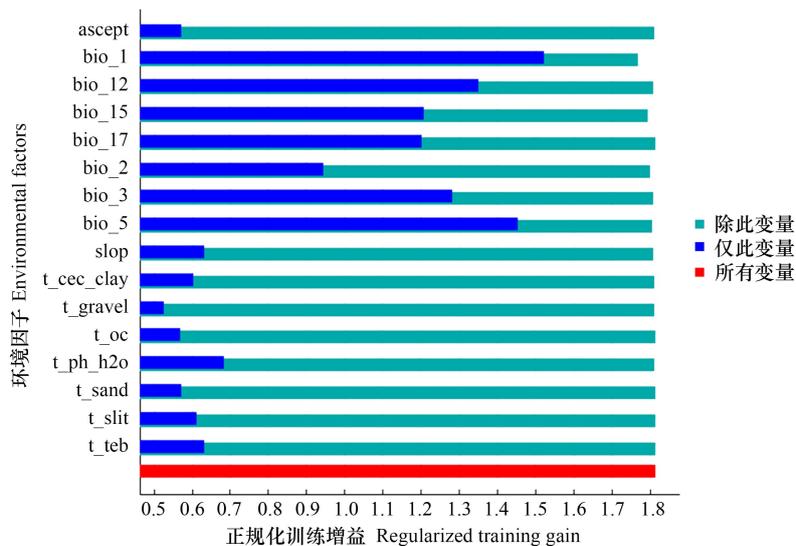


图 3 北美地区刀切法环境因子重要性分析结果

Fig.3 Importance of environmental factors in knife-cutting in North America

aspect; 坡向; bio\_1; 年均气温; bio\_12; 年降水量; bio\_15; 降水量变异系数; bio\_17; 最干季节降水量; bio\_2; 昼夜温差日均值; bio\_3; 等温性; bio\_5; 最热月份最高温; slope; 坡度; t\_cec\_clay; 上层土壤粘性层的阳离子交换能力; t\_gravel; 上层土壤碎石体积百分比; t\_oc; 上层土壤有机碳含量; t\_ph\_h2o; 上层土壤酸碱度; t\_sand; 上层土壤沙含量; t\_silt; 上层土壤淤泥含量; t\_teb; 上层土壤交换性盐基

### 3 讨论

#### 3.1 在分析火炬树分布方面应用 MaxEnt 模型的科学性

MaxEnt 模型是一种基于有限的已知信息对未知分布进行无偏推断的数学方法,在定量分析物种潜在适生区分布上已经得到了广泛的认可和使用<sup>[18-20]</sup>。MaxEnt 模型虽然在我国起步较晚,但是发展十分迅速,将近 80% 的物种分布模拟研究都涉及了该模型<sup>[21]</sup>,并取得较好效果。通过对比本文 MaxEnt 模型模拟的火炬树空间分布结果与实际中已知的火炬树在北美和中国的主要分布区域,发现两者之间相似性很高,进一步验证了模型的科学性和结果的准确性。但还是有些地方的火炬树分布模拟结果与实际情况不符,例如模拟结果显示新疆的西北部是火炬树的适宜生境,但实地调查发现当地并没有火炬树分布。可能是因为新疆西北部的伊犁气候与干旱区其他地方有较大差异,部分地区的降水量超过了 400 mm,属于湿润地带,但由于地理位置偏远,火炬树在自然状态下难以入侵到新疆。因此,该地虽然适合火炬树生长但实际并未发现火炬树,需要特别注意防范。

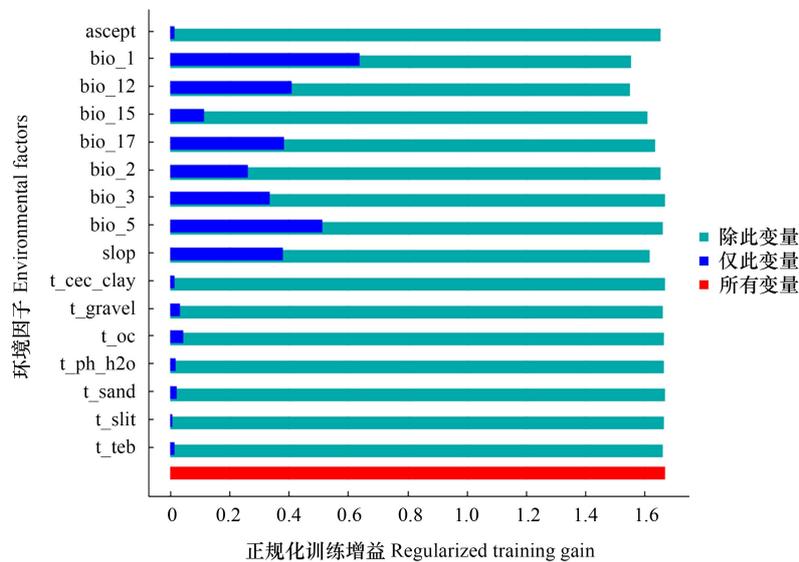


图 4 中国地区刀切法环境因子重要性分析结果

Fig.4 Importance of environmental factors in knife-cutting in China

### 3.2 北美和中国地区火炬树空间分布差异成因分析

由表 3 可以看出,火炬树在北美和中国地区 bio\_1、bio\_2、bio\_3、bio\_5、t\_oc、t\_ph\_h2o、t\_sand、aspect 和 slope 这 9 个环境因子的阈值范围差别不大,但 bio\_12、bio\_15、bio\_17、t\_cec\_clay、t\_gravel、t\_silt、t\_teb 这 7 个环境因子的阈值范围在两个地区间存在明显差异。由于火炬树在中国是入侵物种,受未达到饱和分布和生态位改变等的影响使其适宜生长环境与北美地区相比发生变化,造成两者存在一定差异。

表 3 各环境因子分布阈值范围表

Table 3 Distribution threshold range of environmental factors

环境因子 Environmental factors	阈值(北美) Threshold (North America)	阈值(中国) Threshold (China)	环境因子 Environmental factors	阈值(北美) Threshold (North America)	阈值(中国) Threshold (China)
bio_1	5.36—9.51	8.44—13.81	t_gravel	3.00—22.00	4.00—10.00
bio_2	9.21—12.59	9.99—12.71	t_oc	1.17—2.02	0.76—1.60
bio_3	26.82—33.00	25.00—29.00	t_ph_h2o	4.50—4.80	5.36—6.69
bio_5	25.31—28.55	28.63—32.04	t_sand	37.15—86.00	34.49—62.13
bio_12	808.30—1086.69	405.74—691.25	t_silt	8.00—49.00	23.75—40.00
bio_15	12.00—23.00	85.69—107.70	t_teb	2.50—5.70	4.56—17.78
bio_17	105.43—222.85	12.00—31.44	aspect	106.73—215.92	127.07—239.69
t_cec_clay	36.00—78.00	0.22—1.17	slope	0.28—1.39	0.22—1.17

#### 3.2.1 未达到饱和分布

火炬树入侵是一个多阶段过程,它始于繁殖体的成功萌芽,然后经过生长、繁殖等步骤扩散到新的适宜生长地区,直到遇到扩散障碍、不合适的非生物条件或生物抗性时入侵过程才趋于稳定<sup>[22]</sup>。火炬树在中国的种植时间比较短,距今只有 60 年。定殖时滞效应表明如果一个物种处于入侵过程的初始阶段,并且尚未扩散到所有可行区域,则原产地和侵入地气候空间将不匹配,其入侵范围仅为原产地范围内物种占据的气候空间的一个子集<sup>[23]</sup>。如果将火炬树在北美的分布密度视为分布饱和的话,根据表 3 显示,t\_gravel 和 t\_silt 在中国的分布还处于未饱和阶段。当入侵范围拥有一个可利用但没有被原生范围占据的气候空间时,入侵物种为了适应新环境及生物间相互作用的变化而耐受性快速进化,将其分布范围扩展到新的气候带,使得火炬树适宜生境分布的阈值范围在中国与北美地区表现出明显的特征差异。

### 3.2.2 生态位改变

近年来中国地区的夏季比原先更加温暖<sup>[24]</sup>,温度的升高会使火炬树种子的释放量增加和萌发速率加快<sup>[25-26]</sup>,更易诱发火炬树入侵后产生变异,对原本的生态系统形成威胁。一方面,入侵物种火炬树的耐受性、抗逆性和繁殖能力比当地的物种强且在中国少有天敌,能够更加迅速地改变其生态位以响应环境变化<sup>[27-28]</sup>,进入在原生地无法进入的气候生态位。另一方面,奠基者效应指出物种入侵通常始于少数个体的特殊扩散事件,如果这些个体适应当地环境并且只持有原始种群的一个基因亚样本<sup>[29]</sup>,可能会导致入侵范围内的生态灵活性变窄。这两种因素引起的生态位改变最终会使得火炬树在两个地区 bio\_12、bio\_15、bio\_17、t\_cec\_clay、t\_teb 这几个环境因子阈值发生变化。

### 3.3 火炬树入侵对中国的危害及防范措施

很久之前就有科学家指出入侵物种可能是对全球生物多样性一次最大的威胁<sup>[30-32]</sup>,且相比于美国和加拿大这些发达国家,发展中国家中国由于对国际货物交流的需求更高和检疫政策尚不完善,受到生物入侵危害的风险更大<sup>[33]</sup>。火炬树由于与中国本地物种缺少协同进化的历史,短时间内二者之间不能相互适应,入侵后会通过竞争、捕食、寄生以及携带病原体等手段对当地物种造成生存排挤<sup>[34]</sup>,影响土壤中的微生物群落<sup>[35-36]</sup>,改变种间关系<sup>[37]</sup>,干扰群落演变,毁坏生态系统景观的自然性和完整性。因此,为了更好地防范火炬树入侵,迫切需要有关部门增强预防生物入侵的警惕性和生态保护的意识,对火炬树入侵的中高风险地区进行定期地监测和持续地管理。

虽然火炬树在北美和中国的生长环境有所不同,但原产地北美与火炬树有关的大量研究资料与治理经验仍是中国预防火炬树入侵、监控火炬树过度繁殖的重要参考依据。如根据北美地区经验,为了避免火炬树发达的根系对植被及土壤的影响,在火炬树入侵的早期阶段或开花前应安排人工根除等干预措施,阻止火炬树种子过多的产生<sup>[38]</sup>,从而限制其蔓延速度。另外,北美地区利用麻栎等植物释放的化感物质对火炬树的生长进行抑制,在一定程度上可对其进行生态控制<sup>[39-40]</sup>。此方法是一种有效且风险性较小的生物防治手段,是控制火炬树扩散的一条相对廉价、环保的途径,对于治理中国部分已被火炬树入侵的地区有很强的实用性和可行性。

## 4 总结

对外来入侵物种的定量化风险评估是发展的总趋势,应用基于生态位理论的模型预测外来入侵物种在目标地区的适生区是定殖风险评估的基础。本文先对环境因子进行了相关性筛选,得到7个气候指标、7个土壤指标及2个地形指标。其次,利用 MaxEnt 模型通过火炬树分布点数据和环境因子数据分别模拟了火炬树在北美和中国的适宜生境分布范围,并用 ROC 曲线验证了模型模拟结果的准确性,它们的 AUC 值分别为 0.928 和 0.917。然后将模拟结果导入到 Arcgis 中进行可视化显示,并将火炬树的适生区分为4个等级,得到在北美和中国的适宜生境面积为 416.32 万 km<sup>2</sup> 和 124.64 万 km<sup>2</sup>。另外,我们还对火炬树空间分布的影响因素进行了深入分析,发现火炬树在北美和中国地区都主要分布在 30°—40°N 降水较多的地带,对其适宜空间分布影响最大的因子都是环境因子,并且两地的部分环境因子阈值范围因为未达到饱和分布及生态位改变的影响存在明显差异。最后,指出了火炬树入侵中国可能造成的风险和提出了一些防范手段,可为决策者制定火炬树管理措施时提供技术支撑。

### 参考文献 (References):

- [1] 侯玉平,魏巍,翟文婷,初航,殷吉林,柏新富,卜庆梅. 山东半岛丘陵生境优势树种凋落物对外来植物火炬树种子萌发和幼苗生长的影响. 林业科学, 2016, 52(6): 28-34.
- [2] 王海峰. 外来种火炬树生物入侵可能性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [3] 张川红,郑勇奇,李继磊,阎海平,王玲. 北京地区火炬树的萌蘖繁殖扩散. 生态学报, 2005, 25(5): 978-985.
- [4] 侯玉平,柳林,初航,马淑杰,赵丹,梁荣荣. 外来植物火炬树(*Rhus typhina* L.)入侵对不同林型土壤性质的影响. 生态学报, 2015, 35(16): 5324-5330.
- [5] 叶有华,杨智中,李思怡,倪广艳,陈三雄,虞依娜,陈晓意. 生物入侵对自然资源资产的影响及其在自然资源资产负债表编制中的应用. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2465-2472.

- [ 6 ] Dudík M, Phillips S J, Schapire R E. Maximum entropy density estimation with generalized regularization and an application to species distribution modeling. *Journal of Machine Learning Research*, 2007, 8: 1217-1260.
- [ 7 ] Lehmann A, Overton J M, Leathwick J R. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling*, 2003, 160(1/2): 165-183.
- [ 8 ] Heikkinen R K, Luoto M, Araújo M B, Virkkala R, Thuiller W, Sykes M T. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2006, 30(6): 751-777.
- [ 9 ] Bradter U, Kunin W E, Altringham J D, Thom T J, Benton T G. Identifying appropriate spatial scales of predictors in species distribution models with the random forest algorithm. *Methods in Ecology and Evolution*, 2013, 4(2): 167-174.
- [ 10 ] Stockwell D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13(2): 143-158.
- [ 11 ] 郭彦龙, 李新, 赵泽芳, 卫海燕. 黑河流域胡杨适宜生境分布模拟. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 537-553.
- [ 12 ] Berger A L, Della Pietra S, Della Pietra V J. A maximum entropy approach to natural language processing. *Computational Linguistics*, 1996, 22(1): 39-71.
- [ 13 ] 姬柳婷, 郑天义, 陈倩, 钟娇娇, 康冰. 北重楼潜在适生区对气候变化的响应及其主导气候因子. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 89-96.
- [ 14 ] 赵儒楠, 何倩倩, 褚晓洁, 鲁志强, 祝遵凌. 气候变化下千金榆在我国潜在分布区预测. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3833-3843.
- [ 15 ] Arougoundade A M, Odindi J, Mutanga O. Modelling *Parthenium hysterophorus* invasion in KwaZulu-Natal Province using remotely sensed data and environmental variables. *Geocarto International*, 2020, 35(13): 1450-1465.
- [ 16 ] Luizza M W, Wakie T, Evangelista P H, Jarnevich C S. Integrating local pastoral knowledge, participatory mapping, and species distribution modeling for risk assessment of invasive rubber vine (*Cryptostegia grandiflora*) in Ethiopia's Afar region. *Ecology and Society*, 2016, 21: art22.
- [ 17 ] Mung'i N A, Qureshi Q, Jhala Y V. Expanding niche and degrading forests: key to the successful global invasion of *Lantana camara* (sensu lato). *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01080.
- [ 18 ] Luna-Aranguré C, Vázquez-Domínguez E. Analysis of the application of ecological niche modeling in phylogeographic studies: contributions, challenges, and future. *Therya*, 2020, 11(1): 47-55.
- [ 19 ] Tiamiyu B B, Ngarega B K, Zhang X, Zhang H J, Kuang T H, Huang G Y, Deng T, Wang H C. Estimating the potential impacts of climate change on the spatial distribution of *Garuga forrestii*, an endemic species in China. *Forests*, 2021, 12(12): 1708.
- [ 20 ] 贾翔, 王超, 金慧, 赵莹, 刘丽杰, 陈庆红, 李冰岩, 肖影, 尹航. 基于优化的 MaxEnt 模型评价红松适宜分布区. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2570-2576.
- [ 21 ] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 273-283.
- [ 22 ] Oliveira B F, Costa G C, Fonseca C R. Niche dynamics of two cryptic *Prosopis* invading South American drylands. *Biological Invasions*, 2018, 20(1): 181-194.
- [ 23 ] Singh M, Arunachalam R, Kumar L. Modeling potential hotspots of invasive *Prosopis juliflora* (swartz) DC in India. *Ecological Informatics*, 2021, 64: 101386.
- [ 24 ] Sharmila S, Joseph S, Sahai A K, Abhilash S, Chattopadhyay R. Future projection of Indian summer monsoon variability under climate change scenario: an assessment from CMIP5 climate models. *Global and Planetary Change*, 2015, 124: 62-78.
- [ 25 ] Teller B J, Zhang R, Shea K. Seed release in a changing climate: initiation of movement increases spread of an invasive species under simulated climate warming. *Diversity and Distributions*, 2016, 22(6): 708-716.
- [ 26 ] Liu Y J, Oduor A M O, Zhang Z, Manea A, Tooth I M, Leishman M R, Xu X L, van Kleunen M. Do invasive alien plants benefit more from global environmental change than native plants? *Global Change Biology*, 2017, 23(8): 3363-3370.
- [ 27 ] Hellmann J J, Byers J E, Bierwagen B G, Dukes J S. Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2008, 22(3): 534-543.
- [ 28 ] Shrestha U B, Shrestha B B. Climate change amplifies plant invasion hotspots in Nepal. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(10): 1599-1612.
- [ 29 ] Medley K A. Niche shifts during the global invasion of the Asian tiger mosquito, *Aedes albopictus* Skuse (Culicidae), revealed by reciprocal distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(1): 122-133.
- [ 30 ] Diamond J. The present, past and future of human-caused extinctions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences*, 1989, 325(1228): 469-477.
- [ 31 ] Elton C S. The Ecology of Invasive Animals and Plants. *Biodiversity & Conservation*, 1958, 10(9): 1601-1601.
- [ 32 ] Sala O E, Stuart Chapin F, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [ 33 ] Meyerson L A, Mooney H A. Invasive alien species in an era of globalization. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(4): 199-208.
- [ 34 ] Qu Tongbao, Li Yiyang, Ma Wenyu. Influence of Aqueous Extract of *Rhus typhina* on Seed Germination and Seeding Growth in *Cosmos bipinnata*. *Journal of North-East Forestry University*, 2017, 45(11): 26-31.
- [ 35 ] Callaway R, Ridenour W. Novel weapons: a biochemically based hypothesis for invasive success and the evolution of increased competitive ability. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 8(2): 436-443.
- [ 36 ] Dawson W, Schrama M. Identifying the role of soil microbes in plant invasions. *Journal of Ecology*, 2016, 104(5): 1211-1218.
- [ 37 ] Zhong S, Xu Z, Yu Y, Liu J, Wang Y, Guo E, Wang C. *Rhus typhina* decreased soil nitrogen contents and peroxidase activity following the addition of nitrogen. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022: 1-10.
- [ 38 ] Inderjit, Cahill J F. Linkages of plant-soil feedbacks and underlying invasion mechanisms. *AoB PLANTS*, 2015, 7: plv022.
- [ 39 ] Bhadoria P. Allelopathy: a natural way towards weed management. *American Journal of Experimental Agriculture*, 2010, 1(1): 7-20.
- [ 40 ] Zhou T, Liu S C, Feng Z L, Liu G, Gan Q, Peng S L. Use of exotic plants to control *Spartina alterniflora* invasion and promote mangrove restoration. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12980.