

王子文,尹进,王星,等.辽宁省入侵植物曼陀罗的生境适宜性评价——基于Biomod2组合模型.应用生态学报,2023,34(5):1272-1280

Wang ZW, Yin J, Wang X, et al. Habitat suitability evaluation of invasive plant species *Datura stramonium* in Liaoning Province: Based on Biomod2 combination model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(5): 1272-1280

## 辽宁省入侵植物曼陀罗的生境适宜性评价 ——基于 Biomod2 组合模型

王子文<sup>1,2,3</sup> 尹进<sup>2,3</sup> 王星<sup>2,3</sup> 陈越<sup>2,3</sup> 毛子昆<sup>2,3</sup> 蔺菲<sup>2,3</sup> 巩宗强<sup>4</sup> 王绪高<sup>2,3\*</sup>

(<sup>1</sup>辽宁大学生命科学院,沈阳110036; <sup>2</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所,中国科学院森林生态与管理重点实验室,沈阳110016; <sup>3</sup>辽宁省陆地生态系统碳中和重点实验室,沈阳110016; <sup>4</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所,中国科学院污染生态与环境工程重点实验室,沈阳110016)

**摘要** 曼陀罗作为辽宁省一种主要的入侵植物,入侵成功后难以清除,对当地生态环境、生物多样性等形成较大的威胁。为了评价曼陀罗在辽宁省的生境适应性,我们通过实地调查、数据库查询等方式收集了曼陀罗在辽宁省的地理分布数据,利用Biomod2组合模型研究曼陀罗在当前和未来气候情景下的潜在适宜分布区及其主要环境影响变量。结果表明:由广义线性模型(GLM)、广义增强回归模型(GBM)、随机森林模型(RF)、最大熵模型(MaxEnt)4个模型组成的组合模型的模拟效果良好。将曼陀罗的适生区分为高、中、低和不适宜区,高适生区主要分布于辽宁省的西北部和南部,面积约为3.81万km<sup>2</sup>,占全省总面积的25.8%;中适生区主要分布于辽宁省的西北部和中部,面积约为4.19万km<sup>2</sup>,占全省总面积的28.3%。坡度和土壤表层(0~30 cm)黏土含量对曼陀罗生境适宜性的影响最大,曼陀罗的适宜性随着坡度和土壤表层黏土含量的增大呈现先上升后下降的趋势。在未来不同的气候变化情景下,曼陀罗的总适生区均呈现扩张趋势,在锦州、盘锦、葫芦岛、丹东等地适宜性明显增加。

**关键词** 生物入侵;曼陀罗;潜在分布;气候变化

**Habitat suitability evaluation of invasive plant species *Datura stramonium* in Liaoning Province: Based on Biomod2 combination model.** WANG Ziwēn<sup>1,2,3</sup>, YIN Jīn<sup>2,3</sup>, WANG Xīng<sup>2,3</sup>, CHEN Yuē<sup>2,3</sup>, MAO Zīkūn<sup>2,3</sup>, LǐN Fēi<sup>2,3</sup>, GONG Zōngqiáng<sup>4</sup>, WANG Xūgāo<sup>2,3\*</sup> (<sup>1</sup>College of Life Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China; <sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>3</sup>Key Laboratory of Terrestrial Ecosystem Carbon Neutrality, Shenyang 110016, China; <sup>4</sup>CAS Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China).

**Abstract:** *Datura stramonium*, as a major invasive plant in Liaoning Province, is difficult to be removed after its successful invasion, and is a great threat to ecological environment and biodiversity. To evaluate the habitat suitability of *D. stramonium*, we collected its geographic distribution data in Liaoning Province through field investigation and database query, and using the Biomod2 combination model, and investigated its potential and suitable distribution areas and main influencing environmental variables at present and under future climate change scenarios, respectively. The results showed that the combined model which composed of GLM (generalized linear model), GBM (generalized boosting regression model), RF (random forest model), and MaxEnt (maximum entropy model) had a good performance. By classifying the habitat suitability of *D. stramonium* into four categories: high-, medium-, low- and un-suitable habitats, we found that the high-suitable habitats were generally distributed in the northwest and south of Liaoning Province, with an area of about  $3.81 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, accounting for 25.8% of the total area. The medium-suitable habitats were mostly distributed in the northwest and central parts of Liaoning Province, with an area of about  $4.19 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, accounting for 28.3% of the total area. Slope and clay content of topsoil (0-30 cm) were the two main variables explaining the habitat suitability of *D. stramonium*, and the total suitability of *D. stramonium* first increased and then decreased with the increasing slope and clay content of topsoil in this region.

本文由辽宁省自然生态系统外来入侵物种调查与评估项目(2021000079)和辽宁省生物多样性本底调查与评估项目资助。

2023-01-13 收稿,2023-03-14 接受。

\* 通信作者 E-mail: wangxg@iae.ac.cn

Under future climate change scenarios, the total suitability of *D. stramonium* showed an expanding trend, and its suitability would be obviously increased in Jinzhou, Panjin, Huludao, and Dandong.

**Key words:** biological invasion; *Datura stramonium*; potential distribution; climate change.

生物入侵是指生物由原来的栖息地传入到新的栖息地,并成功存活、繁殖和扩散的一种生态现象。在世界范围内,外来生物的入侵威胁着生物多样性、生态系统功能和服务,影响着人类健康,从而对入侵地的环境和经济等产生较大的影响<sup>[1]</sup>。随着中国的快速发展以及与世界各国的经济贸易和国际活动的日益增多,外来入侵物种正以前所未有的速度在我国扩张,对我国农业发展、环境情况和人民生活都造成巨大威胁。辽宁省是我国北方重要的经济区,属于大陆性气候,其生态系统类型多样,野生动植物资源丰富,对外来物种入侵响应敏感,是外来物种入侵的主要地区之一<sup>[2-4]</sup>。

曼陀罗(*Datura stramonium*)原产于北美洲墨西哥,隶属于茄科(Solanaceae)曼陀罗属(*Datura*),为一年生大型直立草本,现广泛从热带地区扩张到温带地区。张杰等<sup>[5]</sup>研究发现,曼陀罗在我国除青藏高原地区外各省份均有分布,辽宁省也为其主要分布区之一,并有持续扩大的趋势。曼陀罗对环境的适应性极强,在干旱、低营养和被污染的环境中均可生存。有研究发现,曼陀罗具有极强的入侵能力,入侵成功后入侵地土壤全氮、碳含量、氮磷比等显著增加,而全磷含量、碳氮比显著下降,改变了入侵地的土壤性质,威胁本地植物的生存,降低了入侵地的生物多样性<sup>[6-7]</sup>。同时,曼陀罗对农业生产也造成巨大危害。有研究发现,曼陀罗浸提液对油菜、小麦等作物生长均有抑制作用,不仅危害当地的农作物生产,还会促进病虫害的传播影响人类的生活环境<sup>[8-10]</sup>。曼陀罗入侵辽宁省多年,目前对曼陀罗在辽宁省分布的影响因素、地理分布格局及其未来变化趋势等研究结果存在争议<sup>[11-12]</sup>。而物种分布模型是解决这些问题的有效途径,有助于在区域尺度上对曼陀罗进行防控治理。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)作为研究物种分布规律并确定其关键影响因素的重要工具,已逐渐应用于入侵物种的分布预测。近年来,基于生态位的物种分布模型受到特别关注,这些模型将物种分布情况与气候或地形数据联系起来,明确了决定物种分布模式的关键环境变量<sup>[13-14]</sup>。然而,物种分布模型数量众多、关注角度不同且各有优缺点,因此,使用单一模型难以获得准

确的预测结果<sup>[15]</sup>,而将不同模型的预测输出组合成一个集合模型可以有效提高预测能力<sup>[16]</sup>。集合建模的基本原理是,每个单独的模型都具有所研究关系的真实“信号”,以及由数据和模型结构中的误差和不确定性产生的“噪声”;组合模型可以将来自不同模型的信号与噪声进行分离,使组合模型表现出比单个模型更好的预测性能<sup>[16-17]</sup>。

本研究使用组合模型方法,对曼陀罗在辽宁省当前和未来气候下的地理空间分布和适生区进行预测,评估当前气候条件下,曼陀罗在辽宁省的潜在分布区域,明确影响曼陀罗空间分布的重要环境变量,预测未来气候背景下曼陀罗在辽宁省的分布格局及变化规律。研究结果将为曼陀罗在辽宁省的预警、监测和防治提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 物种分布数据获取

2021年7—10月,在辽宁省内进行大面积野外调研,并通过“两步路户外助手”APP和GPS定点共获得173条曼陀罗分布信息,为了减少空间自相关,利用ArcGIS软件中“Proximity”的“Buffer”功能去除了曼陀罗在选定点1 km空间内的重复、错误、模糊等记录,最后选取77条有效曼陀罗分布记录。同时,通过查询中国数字植物标本馆(CVH)、中国植物图像库(PPBC)、国家标本资源共享平台(NSII)等记载的曼陀罗在辽宁省的野外分布记录,将曼陀罗分布数据导入到ArcGIS 10.2软件中。

### 1.2 环境数据获取

本研究选取4种环境变量(表1),包含气候、地形、土壤和人类影响指数。其中,当前气候变量参数选自世界气候数据库(www.worldclim.org) 2.1版本,该数据库包括19个气候变量,分辨率30 m;地形变量下载于地理空间数据云(www.gscloud.cn),使用地理空间数据云获得高程数据,得到海拔、坡度、坡向3个地形变量;土壤数据是通过世界土壤数据库(HWSD)获取。人类影响指数变量来自美国宇航局地球观测系统数据和信息系统(EOSDIS)的社会经济数据和应用中心(SEDAC),这一变量综合考虑了人口密度、交通线路等因素,能较为准确地反映人类在地理区域尺度上活动的强度和状态。

未来气候变量选自世界气候数据库 BCC-CM2-MR 模型预测的未来数据,数据采用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)最新的共享社会经济路径与典型浓度路径组合情景(shared socioeconomic pathways and the representative concentration pathways, SSP),分别为 SSP1-26(低强迫情景)、SSP2-45(中等强迫情景)、SSP3-70(中等至高强迫情景)和 SSP5-85(高强迫情景)。由不同的社会经济假设驱动,以人类将如何排放温室气体为基础,经由一系列科学计算和研究得出<sup>[18-19]</sup>。

利用 ArcGIS 10.2 软件提取辽宁省环境数据,为了模型的简洁和准确性,对选取的环境变量进行了筛选。在筛选过程中,为了防止气候环境变量间的多重共线性造成模型过度拟合影响预测结果,首先使用 R4.2.1 软件对所选的 19 个气候变量进行相关性分析,当环境变量的相关系数大于 0.8 时,选择模型试运行结果中贡献率较高的一个<sup>[20]</sup>。然后进行初次建模,将筛选后的气候变量和余下的全部变量进行建模,去除其中贡献率低于 5% 的变量。最终,本研究采用 5 个气候指标(年均温、平均气温日较差、气温季节性变动系数、最热月份最高温、年降水量)、2 个地形指标(海拔、坡度)、1 个人类影响指数变量(全球人类影响指数)和 2 个土壤变量(土壤表层 0~30 cm 黏土含量和酸碱度),未来气候采取 4 种共享社会经济路径,为了保证模型的可比性,未来与当前气候指标选取对应变量,其余环境指标假定不随时间改变(表 1)。

### 1.3 模型筛选

为了预测曼陀罗在辽宁省当前和未来的分布状

表 1 模型使用环境变量

Table 1 Environmental variables used in the model

环境变量 Environmental variable	描述 Description	代号 Code
气候变量 Climate variable	年平均气温 Annual mean temperature (°C)	bio1
	平均气温日较差 Mean diurnal range (°C)	bio2
	气温季节性变动系数 Temperature seasonality	bio4
	最热月份最高温度 Max temperature of warmest month (°C)	bio5
	年降水量 Annual precipitation (mm)	bio12
土壤变量 Soil variable	表层(0~30 cm)黏土含量 Topsoil clay content (%)	T_CLAY
	表层(0~30 cm)酸碱度 Topsoil potential of hydrogen	PH
地形变量 Terrain variable	海拔 Above sea level (m)	ASL
	坡度 Slope (°)	SLO
人类影响指数变量 Human influence index variable	人类影响指数 Human influence index	HII

况,本研究使用 R 包“biomod2”4.1.2 版本,分别预测当前、2050s(2040—2060 年)、2070s(2060—2070 年)和 2090s(2080—2100 年)时期曼陀罗的适生区。Biomod2 是实现物种分布建模(SDM)的一个集成平台,基于统计和机器学习等算法的建模和分类技术,建立物种与环境变量之间的关系,用来预测物种在地理空间中的生境适宜性。首先,使用该程序包自带的 10 个模型进行单个模型建模(表 2),并随机选取 75% 的曼陀罗分布数据样本作为训练数据,剩余 25% 作为测试数据用于评估模型的性能<sup>[21]</sup>。其中,训练数据和测试数据的划分随机重复 5 次,模型重复运行 10 次,并用 2 个指标评估模型的准确性:1) 受试者工作曲线下的面积(area under ROC curve, AUC)。AUC>0.9 的模型被认为优秀,0.8~0.9 是良好,0.7~0.8 是一般,0.6~0.7 是差<sup>[22]</sup>;2) 真实技巧统计法(true skill statistic, TSS)。根据 TSS 值,模型可以分为以下 5 组:优秀模型 TSS>0.8、良好模型(0.6~0.8)、一般模型(0.4~0.6)、差的模型(0.2~0.4)和失败模型(TSS<0.2)<sup>[23-24]</sup>。然后,选择其中 AUC 值>0.9 且 TSS 值>0.75 的优秀模型作为基础模型,用 biomod2 包对其进行组合处理并获得组合模型框架。最终,运用最优的组合模型算法,得到包括当前和未来气候的 4 个不同情景下的集合模型结果。

### 1.4 数据处理

对当前气候以及 2050s、2070s、2090s 时期的结果进行处理,对模型预测的物种分布趋势(面积增加、减少或没有变化)进行比较。将适宜分布区栅格图使用 ArcGIS 10.2 软件中的重分类功能,绘制二进制地图,使用 ArcGIS 插件 SDM toolbox v2.4,计算空间格局变化和适生区质心迁移变化。对比当前和

表 2 Biomod2 平台的物种分布模型

Table 2 Species distribution model of Biomod2 platform

模型名称 Model name	缩写 Model code
广义线性模型 Generalized linear model	GLM
推进式回归树模型 Boosted regression tree model	GBM
广义相加模型 Generalized additive model	GAM
多元适应回归样条函数 Multivariate adaptive regression spline model	MARS
分类树分析模型 Classification tree analysis model	CTA
人工神经网络模型 Artificial neural networks model	ANN
表面分布区分室模型 Surface range envelope model	SRE
柔性判别分析模型 Flexible discriminant analysis model	FDA
随机森林模型 Random forest model	RF
最大熵模型 Maximum entropy model	MaxEnt

未来预测的总适生区面积,然后评估总适生区减少或增加,计算扩张、收缩面积以及增益率和损失率来评估适生区变化情况;根据质心坐标的变化计算质心的空间移动的方向和距离,描述曼陀罗未来分布趋势的总体变化<sup>[25-26]</sup>。

为了更直观地展示出曼陀罗的入侵形势,将预测的适生区划分为 0~1 的形式,结合模型分布/不分布结果,基于 Biomod2 模型自动生成平等的训练性和特异性阈值(0.2),将属性值分为相等大小的子范围,得到 4 个等级的分布区域,即不适生区 [0, 0.2],低适生区(0.2, 0.4],中适生区(0.4, 0.6],高适生区(0.6, 1],高、中、低 3 个适生区之和为总适生区<sup>[27]</sup>。在 ArcGIS 软件中生成曼陀罗高中低适生区图。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型准确性评估

筛选 AUC 值>0.9 和 TSS 值>0.75 的模型,分别为广义线性模型(GLM),广义增强回归模型(GBM),随机森林模型(RF)和最大熵模型(Max-Ent)。为了提高预测结果的准确性和可靠性,对这 4 个模型进行组合,获得组合模型性能评价图(图 1),AUC 平均值达到 0.95,TSS 平均值达到 0.91,均达到优秀标准,且高于所有单一模型,表明组合模型对预测曼陀罗在辽宁省的潜在分布结果更为准确和可信。

### 2.2 环境变量贡献率

运用最优的组合模型,对影响曼陀罗分布的环

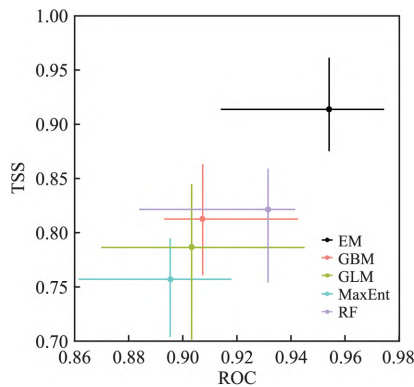


图 1 单一模型和组合模型的 TSS 与 AUC 值比较

Fig.1 Comparison of TSS and AUC of individual models and their ensemble model.

EM: 组合模型 Ensemble model; GBM: 广义增强回归模型 Generalized boosting regression model; GLM: 广义线性模型 Generalized linear model; MaxEnt: 最大熵模型 Maximum entropy model; RF: 随机森林模型 Random forest model.

境变量进行研究,各环境变量的贡献率如图 2 所示。坡度和土壤表层黏土含量对曼陀罗适生区面积影响最大,其次是年降水量、土壤表层酸碱度和最热月最高温。曼陀罗最适生长环境范围:坡度为 1.32°~14.46°,土壤表层黏土含量为 6.7%~29.9%,年降水量为 431.94~572.66 mm,土壤表层酸碱度为 5.66~8.28,最热月最高温为 25.1~30.7 °C。

### 2.3 当前气候下曼陀罗的分布区域

由图 3 可以看出,曼陀罗高适生区总体分布于辽宁省西北部的朝阳、阜新、锦州,以及南部的大连等地,中部的沈阳、辽阳的小部分区域也有分布,面积约为 3.81 万 km<sup>2</sup>,占全省总面积的 25.8%;中适生区总体分布较为分散,除辽宁省东部地区外,省内其余地区均有分布,面积约为 4.19 万 km<sup>2</sup>,占全省总面积的 28.3%;低适生区总体位于辽宁省的西南部

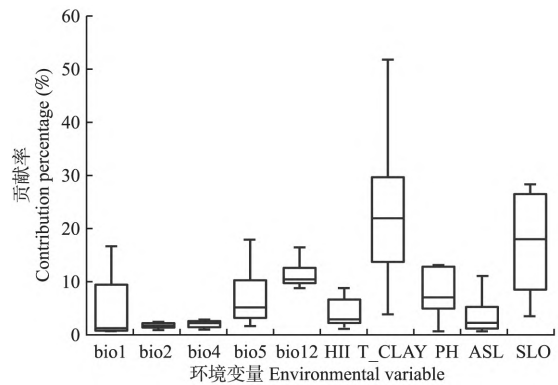


图 2 环境变量对曼陀罗潜在分布影响的贡献率

Fig.2 Contribution percentage of the environmental variables to distribution of *Datura stramonium*.

图中环境变量含义见表 1 The meanings of environment variables were shown in Table 1.

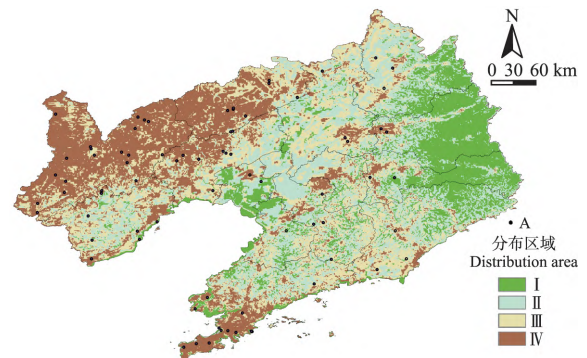


图 3 基于组合模型预测的曼陀罗在辽宁省的潜在分布

Fig.3 Potential distribution of *Datura stramonium* in Liaoning Province based on ensemble model.

A: 建模点 Modelling point. I: 不适生区 Unsuitable area; II: 低适生区 Lowly suitable area; III: 中适生区 Moderately suitable area; IV: 高适生区 Highly suitable area. 下同 The same below.

的葫芦岛、北部的铁岭部分区域、中部的沈阳和鞍山部分区域,面积约为 4.08 万  $\text{km}^2$ , 占全省总面积的 27.6%; 不适生区总体位于辽宁省东部的抚顺、本溪、丹东、铁岭, 以及中部的盘锦、营口部分区域, 面积约为 2.72 万, 占全省总面积的 18.4%。

#### 2.4 未来气候下曼陀罗的分布

未来 4 种气候情景下 (SSP1-26、SSP2-45、SSP3-70、SSP5-85), 曼陀罗总适生区面积均呈现增加趋势, 但是规律并不一致 (图 4、5)。由表 3 可以看出, 在 2050s 时期, SSP5-85 气候情景下曼陀罗总适生区面积增长的最多, 为 1.4 万  $\text{km}^2$ ; 而在 SSP2-45 气候情景下, 虽然中适生区和高适生区增长较多, 但是其低适生区面积下降也较多, 最终其总适生区面积达到 13.01 万  $\text{km}^2$ , 占辽宁省总面积的 87.9%; SSP3-70 气候情景下总适生区相比 SSP2-45 气候情景下增加略

有减少, 但多数适生区转为低适生区, 中适生区和高适生区面积减少。SSP2-45 总适生区扩张面积最大, 达到 1.78 万  $\text{km}^2$ , 增加了 13.7%, 说明相比于当前气候下, SSP2-45 的适生区范围变化最为剧烈。在 2070s 时期, SSP3-70 气候情景下总适生区面积增加最多, 同时低适生区面积下降, 中高适生区面积同样增加, 说明 2070s 时期 SSP3-70 气候情景下最适合曼陀罗扩张。在 2090s 时期, SSP2-45 气候情景下总适生区面积增加, 中适生区和高适生区面积同样增加, 而低适生区面积下降; 并且 SSP2-45 情景下扩张面积和增益率均最高, 这说明在 2090s 时期 SSP2-45 气候情景下最适合曼陀罗扩张。

本研究还计算了曼陀罗在不同情景下的总适生区质心变化, 发现在未来气候情景下, 曼陀罗在东西方向上, 围绕当前分布质心点呈左右摇摆趋势; 但在

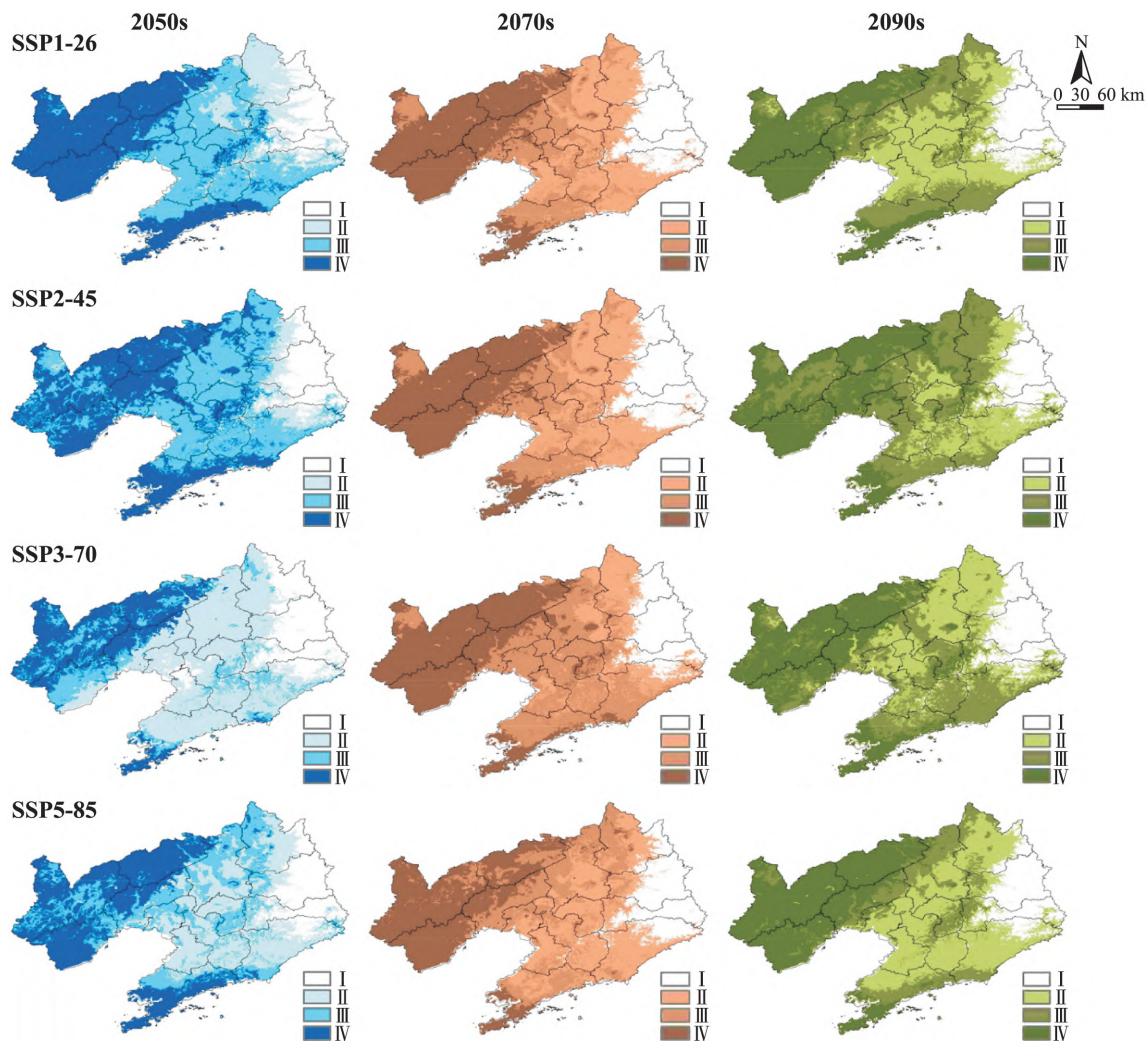


图 4 不同气候情景下基于组合模型预测的曼陀罗在辽宁省的潜在分布

**Fig.4** Potential distribution of *Datura stramonium* in Liaoning Province based on ensemble models under different climate scenarios. SSP1-26: 低强迫情景 Low forcing scenario; SSP2-45: 中等强迫情景 Medium forcing scenario; SSP3-70: 中等至高强迫情景 Medium to high scenario; SSP5-85: 高强迫情景 High forcing scenario. 下同 The same below.

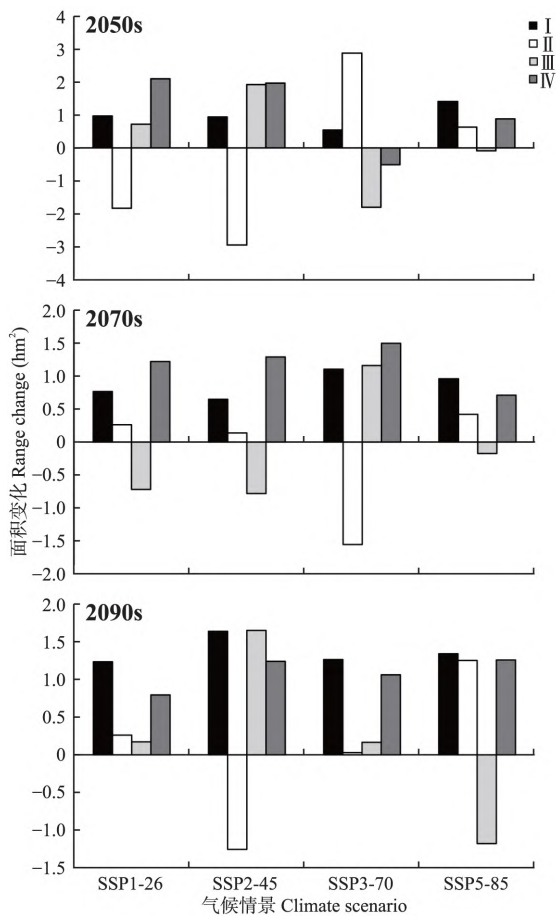


图 5 不同气候情景下曼陀罗的适生区分布预测  
Fig.5 Prediction of the suitable habitats of *Datura stramonium* under different climate scenarios.

南北方向上, 主要呈现出一种南移趋势(图 6)。

### 3 讨论

#### 3.1 曼陀罗潜在分布区的影响因素

以往研究发现, 气候、地形变量、历史分布、土壤

状况、人类活动等显著影响物种分布<sup>[27-30]</sup>。本研究发现, 坡度、土壤表层黏土含量、年降水量、土壤表层酸碱度和最热月最高温是影响曼陀罗生长的主要环境变量, 表明气候、地形和土壤条件对曼陀罗生长具有关键作用。曼陀罗为喜湿热植物, 年降水量 431.94~572.66 mm 下最适合曼陀罗生长。有研究表明, 与较低的土壤含水量 (<25%) 相比, 较高土壤含水量 (>50%) 下曼陀罗的种子数量更多, 百粒重更大, 植株更大更重<sup>[31]</sup>。月最高温在 25.1~30.7 °C 时最适宜曼陀罗生长, 并且随着温度升高, 其分布面积呈现单调上升趋势, 这可能是由于该区域的最高温度尚未到达曼陀罗生长的最适温度, 这一结果符合曼陀罗原始生境(即热带高温条件)的特征<sup>[7]</sup>。相比于本地物种, 入侵种曼陀罗繁殖体以及竞争体的优势提高了定植的可能性, 其后代的适应性也更强<sup>[32]</sup>。此外, 本研究发现, 坡度对曼陀罗的分布也有重要影响, 坡度为 1.3%~14.5% 时最适宜曼陀罗生长, 这可能是因为坡度影响了土壤矿质营养和太阳光照<sup>[33-34]</sup>。土壤变量中, 土壤表层黏土含量和酸碱度对曼陀罗分布也发挥着重要作用, 黏土含量为 6.7%~29.9% 时最适宜曼陀罗生长, 这可能是因为黏土里黏粒成分比例较高, 含沙粒很少, 土壤黏性高, 蓄水保肥能力很强, 但其透气性很差, 因此, 当黏土含量过低时土壤保水能力较弱, 黏土含量过高时土壤透气性变差, 均不利于曼陀罗生长; 土壤酸碱度 (pH) 在 5.66~8.28 时最适于曼陀罗生长, 这种酸碱度环境与土壤养分和土壤微生物活动等密切相关。

另外, 在实际曼陀罗入侵自然环境的过程中, 物种间的相互作用、自身的传播方式、植被类型等因素也会对预测物种的潜在适生范围造成一定的影

表 3 不同时期不同气候情景下曼陀罗适生区的变化

Table 3 Changes of distribution area of *Datura stramonium* in different periods under different climate scenarios

时期 Period	气候情景 Climate scenario	总适生区面积 Total suitable area ( $\times 10^5 \text{ km}^2$ )	收缩面积 Loss area ( $\times 10^5 \text{ km}^2$ )	扩张面积 Gain area ( $\times 10^5 \text{ km}^2$ )	保留面积 Unchanged area ( $\times 10^5 \text{ km}^2$ )	范围变化 Range change (%)	损失率 Percentage of loss (%)	增益率 Percentage of gain (%)
当前 Current		12.08						
2050s	SSP1-26	13.04	0.58	1.54	11.12	8.0	4.8	12.8
	SSP2-45	13.01	0.85	1.78	11.15	7.7	7.0	14.7
	SSP3-70	12.62	0.74	1.28	11.54	4.8	5.8	10.6
	SSP5-85	13.48	0.25	1.65	10.68	11.7	2.0	13.7
2070s	SSP1-26	12.85	0.57	1.34	11.31	6.6	4.5	11.1
	SSP2-45	12.72	0.66	1.30	11.44	5.7	5.1	10.8
	SSP3-70	13.19	0.42	1.53	10.97	9.2	3.5	12.7
	SSP5-85	13.04	0.55	1.51	11.12	8.3	4.2	12.5
2090s	SSP1-26	13.31	0.47	1.53	11.02	10.2	2.5	12.7
	SSP2-45	13.72	0.14	1.78	10.44	13.5	1.2	14.7
	SSP3-70	13.35	0.31	1.58	10.81	10.5	2.6	13.1
	SSP5-85	13.42	0.46	1.62	10.92	11.1	2.3	13.4

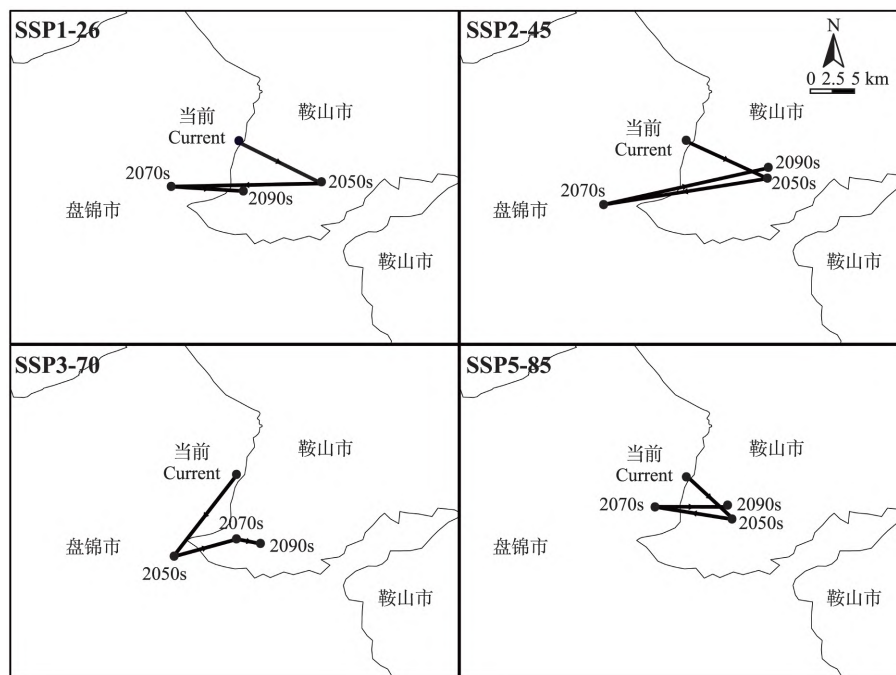


图6 不同气候情景下质心的迁移路线

Fig.6 Centroid migration routes under different climate change scenarios.

响<sup>[35-37]</sup>。在未来的研究中,可以通过结合生物变量来增加模型的准确性。

### 3.2 曼陀罗在辽宁省的潜在适生区及其未来变化趋势

在当前气候环境下,曼陀罗的主要适生区在辽宁省西北部和南部,即朝阳、阜新和大连市,这与曼陀罗的全国分布预测区域较为一致<sup>[5]</sup>。以朝阳为例,该区域坡度(0.01%~13.9%)、土壤表层黏土含量(9%~24%)、年降水量(374~585 mm)、土壤表层酸碱度(6.3~8.2)和最热月最高温(25.4~30.3℃)均符合曼陀罗高适生区的环境条件,验证了研究结果的准确性。

在未来气候情景3个年代、4种情景下曼陀罗的总适生区面积均呈现增加的情况。曼陀罗产自热带的墨西哥地区,原产地的气温要远高于辽宁省气温,在未来气温升高的气候情景下,曼陀罗的总适生区面积均增加,符合推测。SSP2-45情景下,曼陀罗在2050s时期的总适生区面积较高,达到13.01万 $\text{km}^2$ ,扩张面积最大,达到1.78万 $\text{km}^2$ ,增益率最高,达到13.7%。这说明在温室气体的排放状况下,SSP2-45情景下曼陀罗最适合生存,这可能是因为在SSP2-45情景下温度和降水等环境条件最适合曼陀罗生存。SSP3-70情景和SSP2-45情景下,曼陀罗的总适生区面积在2070s和2090s时期达到最高,分别为13.19和13.72万 $\text{km}^2$ 。此外,在最适合曼陀

罗生长的气候情景下,曼陀罗的总适生区面积呈现出随着时间变化递增的趋势,说明曼陀罗在辽宁省未来的适生区会越来越广泛。

就移动趋势而言,曼陀罗呈现出随时间而逐渐向南偏移的趋势。这是因为曼陀罗原生长于热带,而温度偏高的辽宁南部更适合其生长。此外,虽然葫芦岛南部、锦州市南部、大连北部和丹东南部等区域在当前气候下不是曼陀罗高适生区,但在未来气候情景下会转变为曼陀罗的高适生区,这一结果与当前气候下辽宁省年均气温状况十分契合。

### 3.3 曼陀罗防治对策

曼陀罗具有很强的繁殖能力,在没有完全根除的情况下,它将扩散到更广的区域。因此,在入侵地区,应优先治理,通过高效的方法去除曼陀罗植株;同时,在已分布区和潜在分布区之间设置隔离带,防止其种子传播到潜在分布区<sup>[7,38]</sup>。进行防治时,首先对高入侵潜力地区进行大规模的调查,如朝阳、阜新、锦州和大连等地,通过组织有关单位和人员调查曼陀罗的分布情况,确定每个地区曼陀罗植株的数量和危害状况;针对已发现的曼陀罗植株,在结实前将其铲除,以达到从根源上控制曼陀罗蔓延的目的。特别地,对于入侵到农田的曼陀罗,应在早春农作物播种前通过深耕的方式将曼陀罗种子翻耕到深层土壤中,以使其无法存活<sup>[39-40]</sup>。针对中低入侵潜力地区,应向公众宣传曼陀罗入侵的危害,进行早期预警

和生态风险评估,采取有效的防治计划和预防措施,以达到在自行传播和人为引入普遍存在的状况下,及时清除和消灭曼陀罗的源头<sup>[41-43]</sup>。

鉴于曼陀罗未来入侵范围南移,在葫芦岛南部、锦州市南部、大连北部和丹东南部等曼陀罗适生的区域,当地有关部门应制定相关政策,从曼陀罗入侵途径、传播途径等入手,积极主动防范,做到以防代治,从根本上杜绝曼陀罗入侵到这些区域的可能性。本研究结果为曼陀罗在辽宁省的监测、预警提供科学的技术支撑。在此背景下,明确受入侵区域的环境经济状况、曼陀罗引进途径和目前的管制状况等,并依此进行生态风险评估将是我们未来的重点研究方向。

#### 4 结 论

本研究利用 Biomod2 集合模型分析了曼陀罗的适生区及影响其分布的环境变量,发现曼陀罗最适宜区总体分布于辽宁省的西北部和南部。其中,影响其分布的主要环境变量为坡度、土壤表层黏土含量、年降水量、土壤表层酸碱度和最热月最高温。通过对曼陀罗未来适生区的预测,发现在不同气候情景下曼陀罗未来适生区面积均随时间而增加。目前,曼陀罗已入侵到辽宁省的多个地区,并有继续入侵和持续扩散的趋势。因此,亟需在其适宜分布的地区实施大规模调查、进行生态风险评估,并采取生物和生态防控措施阻止其继续传播和入侵,在未来可能增加的曼陀罗适生区,应加强入侵种的宣传和防控等工作。

#### 参考文献

- [1] 徐承远,张文驹,卢宝荣,等. 生物入侵机制研究进展. 生物多样性, 2001, 9(4): 430-438
- [2] 王治江,李培军,万忠成,等. 辽宁省生态系统服务重要性评价. 生态学杂志, 2007, 171(10): 1606-1610
- [3] 曲波,张微,翟强,等. 辽宁省外来入侵有害生物特征初步分析. 草业科学, 2010, 27(9): 38-44
- [4] 王利,任启龙,杨生彪,等. 辽宁省地形分类标准及分区方案研究. 辽宁师范大学学报: 自然科学版, 2015, 38(3): 391-398
- [5] 张杰,张旻,李敏,等. 3种茄科入侵植物在我国的潜在地理分布及气候适生性分析. 南方农业学报, 2019, 50(1): 81-89
- [6] 马可心,张梅,方馨,等. 入侵植物曼陀罗对本地植物功能性状和土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响. 植物研究, 2020, 40(6): 867-875
- [7] Jiménez-Lobato V, Martínez-Borda E, Núñez-Farfán J, et al. Changes in floral biology and inbreeding depression in native and invaded regions of *Datura stramonium*. *Plant Biology*, 2017, 20: 214-223
- [8] 段磊,梁婷婷,冉俊祥,等. 曼陀罗对大豆的化感作用研究. 西北农业学报, 2012, 21(2): 83-87
- [9] 程月琴,王红卫,段景勉,等. 入侵杂草曼陀罗对作物化感机理的初步研究. 河南农业大学学报, 2011, 45(2): 215-219
- [10] 袁美丽,李韶霞,王宁. 5种外来入侵植物对小麦的化感作用. 贵州农业科学, 2016, 44(12): 58-62
- [11] 李晓卿. 辽宁省生物多样性现状调查与评价. 环境保护与循环经济, 2015, 35(4): 51-54
- [12] 付保荣,崔晓男,褚阔,等. 辽宁省外来物种入侵防控对策与建议. 环境保护与循环经济, 2021, 41(1): 44-49
- [13] Guisan A, Thuiller A. Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 2005, 8: 993-1009
- [14] Elith J, Leathwick JR. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697
- [15] Segurado P, Araújo MB. An evaluation of methods for modelling species distributions. *Journal of Biogeography*, 2004, 31: 1555-1568
- [16] Araújo MB, New M. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22: 42-47
- [17] Dormann CF, Calabrese JM, Guillera-Arroita G, et al. Model averaging in ecology: A review of Bayesian, information-theoretic, and tactical approaches for predictive inference. *Ecological Monographs*, 2018, 88: 485-504
- [18] 吴统文,宋连春,李伟平,等. 北京气候中心气候系统模式研发进展——在气候变化研究中的应用. 气象学报, 2014, 72(1): 12-29
- [19] 辛晓歌,吴统文,张洁,等. BCC模式及其开展的CMIP6试验介绍. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 533-539
- [20] Yang XQ, Kushwaha S, Saran S, et al. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87
- [21] Araújo MB, Pearson RG, Thuiller W, et al. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1504-1513
- [22] Eskildsen A, Roux PCL, Heikkinen RK, et al. Testing species distribution models across space and time: High latitude butterflies and recent warming. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22: 1293-1303
- [23] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43: 1223-1232
- [24] Lasram FBR, Guilhauming F, Albouy C, et al. The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemic fishes facing climate change. *Global Change Biology*, 2010, 16: 3233-3245



- [25] Hu ZJ, Guo K, Jin S, *et al.* The influence of climatic changes on distribution pattern of six typical Kobresia species in Tibetan Plateau based on MaxEnt model and geographic information system. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **135**: 375–390
- [26] 王庆莉, 王茹琳, 张利平, 等. 基于 MaxEnt 模型的川西高原松茸气候生态适宜性与潜在分布. *应用生态学报*, 2021, **32**(7): 2525–2533
- [27] 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. *应用生态学报*, 2020, **31**(12): 4073–4079
- [28] 谭雪, 张林, 张爱平, 等. 子遗植物长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*) 分布格局对未来气候变化的响应. *生态学报*, 2018, **38**(24): 8934–8945
- [29] 宗敏, 韩广轩, 栗云召, 等. 基于 MaxEnt 模型的黄河三角洲滨海湿地优势植物群落潜在分布模拟. *应用生态学报*, 2017, **28**(6): 1833–1842
- [30] 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. *应用生态学报*, 2016, **27**(11): 3607–3615
- [31] Chadha A, Florentine S, Javaid M, *et al.* Influence of elements of climate change on the growth and fecundity of *Datura stramonium*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**: 35859–35869
- [32] 侯清晨, 冯燕楼, 周玉洁, 等. 植物入侵机制的主要假说. *应用生态学报*, 2022, **33**(11): 3105–3115
- [33] Takyu M, Aiba SI, Kitayama K. Effects of topography on tropical lower montane forests under different geological conditions on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant Ecology*, 2002, **159**: 35–49
- [34] Sun J, Huang CH, Han G, *et al.* Effects of cover on soil particle and associated soil nutrient redistribution on slopes under rainfall simulation. *Journal of Soil & Sediments*, 2019, **19**: 729–740
- [35] Wiens JA, Stralberg D, Jongsomjit D, *et al.* Niches, models, and climate change: Assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**: 19729–19736
- [36] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战. *中国科学: 生命科学*, 2013, **43**(11): 915–927
- [37] Szymura TH, Szymura M, Zając M, *et al.* Effect of anthropogenic factors, landscape structure, land relief, soil and climate on risk of alien plant invasion at regional scale. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 1373–1381
- [38] Weaver SE, Warwick SI. The biology of Canadian weeds. 64. *Datura stramonium* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 1984, **64**: 979–991
- [39] 刘伟, 杨震, 晏娟. 生物入侵的危害与防治措施. *安徽农业科学*, 2015, **43**(26): 104–107
- [40] Yan H, Feng L, Zhao Y, *et al.* Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt. *Global Ecology and Conservation*, 2019, **21**: e00856
- [41] 廖慧璇, 周婷, 陈宝明, 等. 外来入侵植物的生态控制. *中山大学学报: 自然科学版*, 2021, **60**(4): 1–11
- [42] 唐龙, 李绍军, 周庆诗, 等. 外来植物入侵力主要理论与展望. *地球环境学报*, 2021, **12**(6): 585–594
- [43] 谢宗强, 陈志刚, 樊大勇, 等. 生物入侵的危害与防治对策. *应用生态学报*, 2003, **14**(10): 1795–1798

---

作者简介 王子文, 男, 1998 年生, 硕士研究生。主要从事生物入侵与物种分布研究。E-mail: ziwendamowang@163.com

责任编辑 倪健

责任编辑 孙菊

---