

# 外来入侵植物腺龙葵在我国的适生区预测

唐瑶<sup>1,2</sup>, 王瑞<sup>1\*</sup>, 张震<sup>2</sup>, 李家美<sup>3</sup>, 万方浩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害国家重点实验室, 北京 100193; <sup>2</sup>安徽农业大学资源与环境学院, 安徽合肥 230036; <sup>3</sup>河南农业大学生命科学学院, 河南郑州 450002

**摘要:**【目的】全球恶性杂草腺龙葵最早于 20 世纪 80 年代入侵我国辽宁, 90 年代以后在河南被发现, 近年来在新疆和北京都有入侵记录。明确其潜在的适生区对制定防控措施具有重要意义。【方法】通过查找全球生物多样性信息数据库、标本记录、文献信息以及实地调查等途径获得了腺龙葵在全球的分布点, 利用 Maxent 生态位模型模拟了其适应的气候生态位, 并投影到中国预测了其潜在适生区。【结果】适生区预测结果显示, 腺龙葵在我国存在广阔的适生区, 除海南、广东、黑龙江、吉林外的 27 省区都存在其适生区。【结论】腺龙葵在我国进一步扩散蔓延的风险极高。建议对新入侵地采取早期监测预警和根除措施, 并加大对适生区内进口货物接受区的监测力度, 以预防其再次入侵。

**关键词:** 腺龙葵; 适生区; 入侵植物; 生态位模型

## Predicting the potential distribution of the invasive weed, *Solanum sarrachoides* in China

TANG Yao<sup>1,2</sup>, WANG Rui<sup>1\*</sup>, ZHANG Zhen<sup>2</sup>, LI Jiamei<sup>3</sup>, WAN Fanghao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory for Biology and Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; <sup>2</sup>College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; <sup>3</sup>College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China

**Abstract:** 【Aim】The notorious weed of worldwide importance, *Solanum sarrachoides*, was first recorded at Liaoning, northeast of China in the 1980s. It was found to invade Henan, central China in 1990s, Beijing, north China and Xinjiang, northwest China in 2010s. To monitor and control its further invasion and spread, it is necessary to establish an early warning program by predicting its potential distribution in China. 【Method】We firstly collected occurrence records of *S. sarrachoides* worldwide using the GBIF database, field investigations, herbarium records, and published literature. Subsequently, we used ecological niche modeling to predict the potential distribution of *S. sarrachoides* in China. Finally the highly risk area for potential invasion and spread was identified. 【Result】Maxent modeling prediction showed that with the exception of four provinces in the south and north of China (Heilongjiang, Liaoning, Jilin and Hainan), most areas were suitable for the survival of *S. sarrachoides*. 【Conclusion】*S. sarrachoides* may invade local areas and spread faster in the future. It is recommended that an eradication program should be attempted in the newly invaded areas and monitoring programs should be applied in the potentially vulnerable regions, particularly in receiving harbors, transfer stations of imported cereal grains or fodder crops, which are highly vulnerable to be contaminated with seeds of *S. sarrachoides*.

**Key words:** *Solanum sarrachoides*; potential invasive distribution; invasive plant; ecological niche model

腺龙葵 *Solanum sarrachoides* Sendtner 是茄科茄属的一年生直立或倾卧草本, 全株密披黏质腺毛, 高达 70 cm, 叶卵形, 花单生或为蝎尾状聚伞花序, 花冠白色 (马金双, 2013; 田朝阳等, 2005)。腺龙

葵原产于南美巴西、乌拉圭和阿根廷的暖温带地区, 是当地一种普通农田杂草, 具有传播方式多、繁殖力强、生长周期短、抗逆性强、光合作用效率高等特性, 其可通过与作物争夺养料、水分、阳光和空间

收稿日期 (Received): 2018-10-09 接受日期 (Accepted): 2018-11-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1200800); 国家自然科学基金 (31471827); 国家科技支撑计划 (2015BAD08B03)

作者简介: 唐瑶, 女, 硕士研究生。研究方向: 入侵植物时空扩散与适生区预测。E-mail: geotang0215@163.com

\* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: wangreacas@163.com

等危害农业生产。腺龙葵单株可产生约 45000 粒种子 (Blackshaw, 1991), 可通过全球贸易等途径在全球扩散蔓延, 一旦这些被携带的种子进入入侵地就能够凭借其极强的适应能力定殖生长, 进而形成单优群落, 对入侵地的物种多样性和农业生产造成危害。腺龙葵还是许多危险性病虫害的中间寄主, 可促进病虫害发生, 甚至与原产地某种昆虫形成协同入侵, 增加害虫入侵与危害的风险 (Srinivasan *et al.*, 2013)。此外, 腺龙葵全株有毒, 极易对家畜造成危害。

腺龙葵目前已经从原产地扩散到了北美洲、欧洲和亚洲的许多国家和地区 (Taab & Andersson, 2009)。根据标本记录, 腺龙葵于 20 世纪 80 年代入侵我国辽宁省; 最近几年, 河南省的多个地区、新疆、北京等地相继发现腺龙葵的入侵种群 (储嘉琳等, 2016; 刘全儒和张劲林, 2014; 张源, 2007); 同时, 我国进境植物检疫中也不断截获该入侵植物的种子。因此, 腺龙葵在我国的扩散风险极大, 一旦大面积扩散蔓延势必会对我国的农业生产和多样性保护造成严重威胁。目前, 我国对于腺龙葵的研究主要集中在调查其分布区 (朱长山等, 2007)。有关其传入的途径、分布的现状以及未来可能传入与扩散的风险区尚不明确。因此, 本研究对腺龙葵在我国的适生区进行预测, 以期制定早期监测预警与控制措施, 进而抑制其再次传入与进一步扩散蔓延提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 地理分布数据的搜集与整理

腺龙葵在原产地和全球不同地区的分布数据主要源于全球生物多样性信息数据库 (<https://www.gbif.org>)。在 R 语言平台中借助 `rgbif` 程序包撰写了数据检索、下载和挖掘分析的控制语句, 实现了从检索、下载到数据的删除和重复、地理坐标的补充、空间纠错等工作的程序化。然后, 利用地理信息系统对上述获得的有效信息数据进行进一步的核验, 如有问题手动补充和完善。此外, 通过查阅文献等途径补充了腺龙葵的地理分布信息。最终把上述获得的数据转化为包含其分布点地理坐标的数据格式。

通过数字标本馆 (<http://www.cvh.ac.cn/>) 查找我国主要标本的分布记录, 并查阅相关已发表文献

(储嘉琳等, 2016; 刘全儒和张劲林, 2014; 张源, 2007; 朱长山等, 2007), 获得了腺龙葵在我国的历史分布信息。以上述已知地理分布为基础, 在已知分布地的边缘及其可能扩散的通道和潜在的传入地开展监测调查, 以明确其当前的分布现状和扩散动态。同样, 把获得的地理分布信息转换为分布点地理坐标格式。

### 1.2 气象数据的筛选

气候是决定物种分布的第一要素, 选择影响外来物种分布的主要气候因素是适生区预测的关键。本研究中的气候数据主要源于 Worldclim 数据库 (<http://www.worldclim.org>), 并利用 R 语言程序自动下载。具体步骤: 首先, 在 R 平台上进行编程, 运行控制语句建立对目标文件夹的下载; 其次, 根据当前和未来不同时间数据的下载地址, 分别运行控制语句, 下载当前和未来的气候数据, 所有下载的气候数据空间分辨率都为 5 min (约 10 km), 未来气候数据包括 2050 年和 2070 年 2 个时间段, 数据模式为中国气象局研发的 BCC-CSM 1.1 模式, 数据情景为 RCP45 情景模式; 最后, 运行控制语句将下载的当前和未来的气候数据进行解压处理。

下载的气候数据包括 55 个变量, 涉及年均温、月均温、温度变化、年降水、月降水、降水量变化等与物种分布相关的气候因素; 但是, 如果构建模型的气候因子过多, 就会出现数据过度拟合而影响模型运算的准确性。基于此, 采用如下方法筛选影响物种分布的关键气候因素。通过因子间的相关性分析剔除具有高度相关性的影响因子。将 55 个气候因子导入 R 平台, 加载 `usdm` 包, 使用方差膨胀因子分析 (variance inflation factor, VIF) 的方法选取适合构建模型的关键因子 (Guisan *et al.*, 2017)。 $0 < VIF < 10$  表示变量之间不存在相关性 (或多重共线性),  $10 \leq VIF < 100$  表示变量之间存在较强的相关性,  $VIF \geq 100$  表示变量之间的多重共线性非常严重。根据分析结果选取 VIF 值处于  $[0, 10]$  之间的因子作为构建模型的气候因子。然后, 利用 Maxent 软件自带的刀切法 (jackknife) 程序进一步判定影响腺龙葵分布的主要因子。最终, 将选定的关键影响因子用于模型的预测。

### 1.3 适生区的预测

1.3.1 模型选择 采用 Maxent (3.3.3k) 生态位模

型 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>) 预测腺龙葵在中国的适生区,并通过模型评价其预测的可靠性与准确性。该模型的基本原理是根据样本信息对某个未知分布做出推断,即利用物种的已知分布数据和环境数据来判断物种的生态需求,并预测物种的潜在分布,最终的模型可再被投影到地理空间,形成适合物种分布的数字地图 (Philipps *et al.*, 2006)。腺龙葵在中国的适生区预测是其在全球的分布数据构建其生态位模型,并把模型投影到中国来预测其在中国的适生区。

**1.3.2 模型运算** 通过参数设置把已知分布数据平分为 2 个部分:50%的初始数据用于完全独立的模型质量检验(外部检验数据, *extrinsic test data*);余下的 50%为训练数据(*training data*),其他参数为模型默认值。在环境参数设置中开启刀切法来评价各环境因子的权重。模型分析结果以 Logistic 格式、ASCII (.asc) 类型文件输出。

**1.3.3 模型评价** 采用受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 对模型预测结果进行评价。ROC 是以预测结果的每一个值作为可能的判断界值,由此计算得到相应的灵敏度和特异度。以 1-特异度(假阳性率)为横坐标、灵敏度(真阳性率)为纵坐标绘制曲线,利用其与横坐标围成的面积即 AUC (area under curve) 值来评价模型预测结果的精准度,取值范围 [0, 1]。AUC 值越大,模型的判断力越强,理想情况是模型预测分

布区与物种实际分布区完全吻合,此时 AUC 值为 1。一般认为,如果 AUC 值大于 0.7,就可以判定构建的模型具有可靠性,可用于物种适生区的研究 (王运生等, 2007)。

**1.3.4 适生区的预测** 基于上述模型评价的准确性,利用腺龙葵在全球的分布数据和影响其分布的关键因素构建 Maxent 模型,预测腺龙葵在我国的适生区,并把构建的模型投影到未来气候条件下的情景模式,预测腺龙葵 2050 年和 2070 年在我国的潜在适生区。

在 ArcGis 9.3 中加载 Maxent 的运算结果,将生成的栅格数据文件进行重分类,按照适生性预测值从低到高划分适生性风险等级。

**1.4 未来气候条件下潜在适生区的时空变化**

根据最小阈值确定腺龙葵的适生区,采用 Arc-Gis 空间分析模块统计适生区的面积,并用面积变化比例对比分析腺龙葵在不同时间段内适生区面积的变化规律,判定面积是否发生扩大或缩小 (Hu *et al.*, 2010)。

**2 结果与分析**

**2.1 腺龙葵在全球的地理分布**

经整理,腺龙葵在全球的分布点共计 934 个,其中在南美洲原产地的分布点 62 个,入侵地分布点 872 个(图 1)。腺龙葵在我国主要分布在河南、新疆和北京。

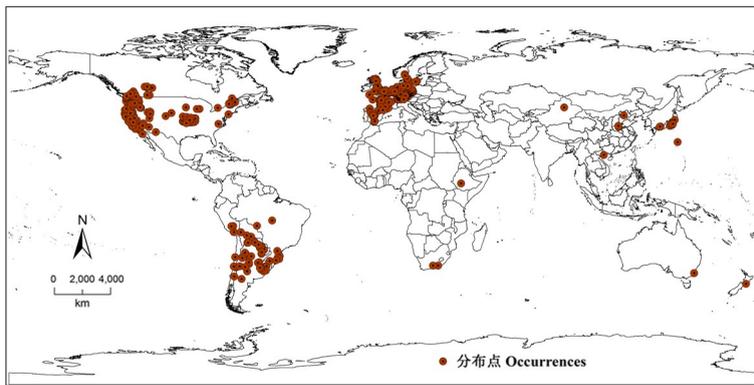


图 1 腺龙葵在全球的分布点

Fig.1 The occurrence records of *S. sarracoides* in the world

**2.2 影响腺龙葵分布的关键气候因子**

分析表明,温度季节性变化标准差 (bio4)、最干季度的平均温度 (bio9)、最干月份的降水 (bio14)、最冷季度的降水 (bio19)、3 月平均降水量

(prec3)、8 月平均降水量 (prec8)、12 月平均降水量 (prec12)、4 月平均最高温度 (tmax4)、6 月平均最低温度 (tmin6)、11 月平均最低温度 (tmin11) 等 10 个气候因子不存在相关性或多重共线性 (VIF < 10)。

刀切法分析表明,4月平均月最高温度( $t_{max4}$ )、11月平均月最低温度( $t_{min11}$ )、最冷季度的降水( $bio19$ )、最干季度的平均温度( $bio9$ )、温度季节性变动系数( $bio4$ )、6月平均月最低温度( $t_{min6}$ )、12月平均月降水量( $prec12$ )对模型的贡献率最高,是影响腺龙葵分布的关键因素,因而被用来建立最终预测模型。

### 2.3 腺龙葵在我国当前以及未来气候条件下适生区的预测结果

利用上述筛选的环境变量和全球已知分布数据构建模型,将模型模拟的环境生态位投影到全球,AUC值为0.951,远高于随机预测值0.5。这表明本研究建立的Maxent模型的预测能力较强,能够很好地拟合物种已知分布的环境生态位。

利用当前气候数据构建的Maxent生态位模型对腺龙葵在我国适生区的预测结果如图2所示。目前,腺龙葵在我国的适生区主要位于北京—山西—陕西—四川为界的东部及广东和广西以北的区域,在新疆的南部呈条带状分布。其中,腺龙葵在贵州西部地区的潜在适生风险较高。

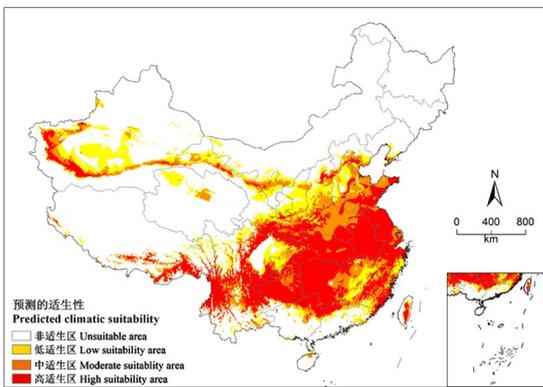


图2 当前气候条件下腺龙葵在中国的适生区预测  
Fig.2 Prediction of the suitable area for *S. sarrachiodes* in China under current climate conditions

与当前适生区相比,未来气候条件下腺龙葵在我国的适生区呈增加趋势:2050年适生区较当前增加了3536个栅格数(图3),2070年适生区较当前增加了3223个栅格数(图4)。

通过对不同时期腺龙葵在我国的适生区面积进行统计发现,未来气候条件下腺龙葵潜在适生区的面积发生了变化(表1)。与当前适生区相比,2050年和2070年腺龙葵在我国潜在适生区面积都呈增加的趋势,且2070年潜在适生区增加率略大于2050年。

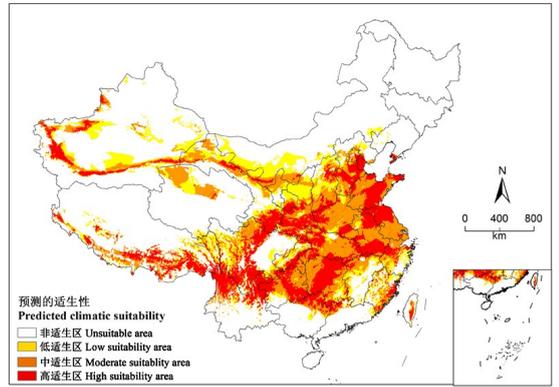


图3 2050年腺龙葵在中国的潜在适生区预测  
Fig.3 Prediction of the suitable area for *S. sarrachiodes* in China under future climate conditions by 2050

此外,适生区还存在空间变化,如甘肃—新疆的河西走廊地区由当前的非适生区转变为了适生区,未来气候条件下腺龙葵在我国西南地区的适生区面积和适生性等级均呈降低趋势(图3、4)。

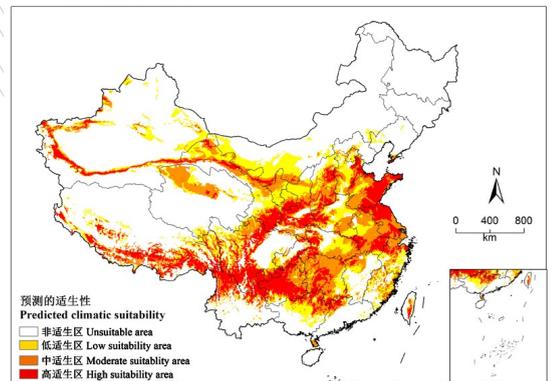


图4 2070年腺龙葵在中国的潜在适生区预测  
Fig.4 Prediction of the suitable area for *S. sarrachiodes* in China under future climate conditions by 2070

表1 不同时期腺龙葵在中国适生区面积的变化  
Table 1 Variation of the potential distribution area for *S. sarrachiodes* in different periods

年份 Year	预测面积 变化率 Change in predicted suitable area/%	面积增加率 Increase rate of area/%	面积减少率 Reduce rate of area/%	面积 Area/km <sup>2</sup>
2000	-	-	-	4851200
2050	-1.523	53.391	54.914	5204800
2070	-8.373	54.692	63.065	5173500

## 3 讨论

### 3.1 腺龙葵在我国的传入途径

由于无明确的引种记录,腺龙葵在全球的扩散应该主要是通过人类活动的无意携带而导致。对腺龙葵在我国的地理分布和入侵时间进行分析表

明,其在我国存在多次入侵,且已经在河南省和辽宁省呈扩散蔓延趋势。腺龙葵在我国隔离式的空间分布表明,其主要是通过贸易等途径传入我国不同地区。此外,随着我国与阿根廷、巴西、美国的粮食贸易量的持续增加,其再次入侵的机率非常高,且其已经入侵的种群产生繁殖体再次扩散蔓延的风险也极高。

### 3.2 腺龙葵在我国的潜在适生区与入侵风险区划

适生区预测是制定外来物种早期监测预警措施的关键。本研究结果表明,腺龙葵在我国存在广阔的适生区,除海南、广东、黑龙江、吉林外的 27 省区都存在其适生区。整体上,其适生区主要集中在我国的暖温带、北亚热带地区,而温带和热带地区不适宜其种群的定殖和生长。如腺龙葵最早于 1980 年在辽宁省朝阳市被发现,但到目前其在辽宁的分布极少,可能是由于气候环境影响其繁殖和增长;但是在未来的气候背景下,这一地区的适生性风险呈增长趋势。鉴于其种子具有休眠的特性,且其还在不断地随贸易等途径传入这些地区,未来应关注腺龙葵在该地区的潜在入侵风险。

华北和华中地区是腺龙葵未来入侵的高风险区。目前,腺龙葵已经入侵河南省的多个地区,已入侵的种群产生的繁殖体势必会促进其进一步扩散蔓延;同时,未来随着郑州成为全球物流中心,其向周边地区扩散的风险极大。我国从大连到浙江宁波口岸地区也是腺龙葵适生区,未来这些地区是我国贸易进口的主要通道和集散地。此外,河西走廊地区是腺龙葵在我国的适生区,随着未来气候变化其适生性等级会增高;这一地区也是我国连接西亚和欧洲的重要通道,腺龙葵再次传入的风险极高;同时,腺龙葵已经入侵新疆乌鲁木齐,这增加了该杂草在这一区域进一步扩散蔓延的风险。因此,建议对这些地区制定早期监管措施。

与刺萼龙葵 *Solanum rostratum* Dunal. 和其他危险性入侵植物相比,腺龙葵在我国的扩散速度相对较慢,这可能与其繁殖体的结构有关。但是,腺龙葵的繁殖量很大,且其在全球的分布区尤其是南美洲的阿根廷和巴西、北美洲的美国都是我国进口粮食的主要来源地。因此,未来应该加强对我国粮食

和农产品贸易的进口地、物流的中转站等的监测预警。

### 参考文献

- 储嘉琳,张耀广,王帅郭,建宇,李家美,2016. 河南省外来入侵植物研究. 河南农业大学学报, 50(3): 389-395.
- 刘全儒,张劲林,2014. 北京植物区系新资料. 北京师范大学学报(自然科学版), 50(2): 166-168.
- 马金双,2013. 中国入侵植物名录. 北京: 高等教育出版社.
- 田朝阳,李景照,徐景文,郑晓军,朱长山,2005. 河南外来入侵植物及防除研究. 河南农业科学, 34(1): 31-34.
- 王运生,谢丙炎,万方浩,肖启明,戴良英,2007. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 15(4): 365-372.
- 张源,2007. 乌鲁木齐市外来杂草的调查与分析. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 24(2): 52-55.
- 朱长山,田朝阳,吕书凡,张云霞,徐霞,和月霞,史素芳,2007. 河南外来入侵植物调查研究及统计分析. 河南农业大学学报, 41(2): 183-187.
- BLACKSHAW R E, 1991. Hairy nightshade (*Solanum sarrachoides*) interference in dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *Weed Science*, 39: 48-53.
- GUISAN A, THUILLER W, ZIMMERMANN N E, 2017. *Habitat suitability and distribution models: with applications in R*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HU J H, HU H J, JIANG Z G, 2010. The impacts of climate change on the wintering distribution of an endangered migratory bird. *Oecologia*, 164(2): 555-565.
- PHILLIPS S J, ANDERSON R P, ROBERT E S, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distribution. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- SRINIVASAN R, ALVAREZ J M, CERVANTES F, 2013. The effect of an alternate weed host, hairy nightshade, *Solanum sarrachoides* (Sendtner) on green peach distribution and *Potato leafroll virus* incidence in potato fields of the Pacific Northwest. *Crop Protection*, 46: 52-56.
- TAAB A, ANDERSSON L, 2009. Primary dormancy and seedling emergence of black nightshade (*Solanum nigrum*) and hairy nightshade (*Solanum physalifolium*). *Weed Science*, 57(5): 526-532.

(责任编辑:杨郁霞)