

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.03.003

基于 MAXENT 模型预测齿裂大戟 在中国的潜在分布区

张 路

北京大学城市与环境学院, 北京 100871

摘要:【背景】齿裂大戟原产于北美,是近年来入侵我国的一种检疫性杂草。目前,该杂草已在我国的华北、华东和西南建立种群,并呈扩散蔓延趋势。由于该入侵植物具有极强的繁殖能力,一旦大面积扩散势必造成极大损失,急需通过风险评估明确其未来的扩散趋势,进而制定早期预警措施。【方法】使用 MAXNET 模型,运用齿裂大戟在原产地和中国的已知分布数据及筛选后的环境变量,结合地理信息系统(Geographic information system,GIS)及其生活史特征和环境适应特性,直观和定量地预测了该原产北美的植物在中国的适生范围,并采用受试者工作曲线(Receiver operator characteristic curve,ROC)分析方法对模型预测结果进行了检验。【结果】齿裂大戟在我国有较为广阔的潜在分布区,其中高风险区主要集中在地处33°~40°N,109°~119°E 的北京、天津、河北南部、河南北部、山东中北部、山西南部 and 陕西西安等地。【结论与意义】结合齿裂大戟在我国的分布现状和传入扩散特性,划定了其在我国潜在的高风险区域,为制定预防和控制入侵植物进一步传入和扩散的早期预警和监测措施提供科学依据。

关键词: 齿裂大戟; 最大熵模型; 入侵植物; 生态位; 潜在分布区预测

Prediction of potential distribution area of *Euphorbia dentata* in China based on MAXENT model

Lu ZHANG

College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract:【Background】*Euphorbia dentata*, an alien weed native to North America, has been introduced to China in the past century.【Method】By using model and geographic information system (GIS), this paper analyzed the environmental variables affecting the distribution of *E.dentata* on the basis of the biological characteristics, as well as quantitatively predicted its future distribution in China. The prediction was verified by the ROC curve.【Result】The results showed that *E.dentata* could have a wide potential distribution in China, with the main suitable areas located between 33°~40°N and 109°~119°E, i.e., in regions of Beijing, Tianjin, South Hebei, North Henan, Central & North Shandong, South Shanxi, and Xi'an of Shaanxi. The potential distribution of *E.dentata* in the world was also determined using the same method.【Conclusion and significance】Eradicating the present populations in China and monitoring its dispersion may represent the effective measures to prevent and control the potential rampant invasion of this alien weed.

Key words: *Euphorbia dentata*; MAXENT model; invasive species; niche; potential suitable distribution area

外来种及其入侵导致世界性的生态、经济 and 人类健康问题,是全球环境变化的重要组成部分和本世纪最棘手的环境问题之一,引起了世界各国的强烈关注(Cox,2004; Mooney *et al.*,2005; Pimental *et al.*,2005; US Congress,1993)。由于生物可以自行繁殖、更新和扩散,一旦成功入侵便很难根除,甚至难以阻止其进一步扩散(Sharma *et al.*,2005)。因此,在入侵种大规模泛滥之前进行评估、治理是经济有效的防治手段(高增祥等,2003; Lodge *et al.*, 2006; Goncalves *et al.*, 2014; Richardson *et al.*, 2000; Sakai *et al.*,2001)。外来种的入侵是入侵生物与被入侵环境相互作用的过程,能否成功入侵并造成严重危害取决于外来种的生物学特性以及被入侵环境是否容易被该物种入侵等因素。物种的

潜在分布区描绘了其在消除地理屏障后可能分布的区域(Bradley, 2013)。预测具有潜在入侵风险生物的潜在分布区,对准确评价入侵物种的入侵潜力以及及早预防、控制其蔓延具有重要的指导意义(Goncalves *et al.*, 2014)。

齿裂大戟 *Euphorbia dentata* Michx. 属大戟目 Euphorbiales 大戟科 Euphorbiaceae, 为一年生草本, 全体具白色有毒乳汁, 原产于北美。目前该植物已扩散至欧洲、澳洲和亚洲等地区, 在澳大利亚东北部、俄罗斯阿尔泰山、高加索等地、乌克兰、泰国、爱尔兰、巴西和阿根廷等地已广泛分布。由于其入侵后极易对入侵地造成危害, 乌克兰等国已将其列为检疫性杂草(Oprea, 1997)。目前, 我国北京、河北、江苏、浙江、湖北、湖南、云南、广西和内蒙古等地已有其入侵分布的记载。齿裂大戟具有较强的繁殖能力, 种子出苗率高, 在国内最早的入侵地北京香山中科院植物园内长势凶猛, 已形成单优群落, 且呈扩散蔓延趋势(马金双, 2013; 张路等, 2012)。此外, 海关进境检疫数据也显示, 该植物仍在不断地通过进境货物传入我国, 仅 2009~2011 年间齿裂大戟在全国海关口岸截获检出次数高达 2661 次, 来源于 17 个国家, 8 种货物类型(胡长松等, 2014)。基于该物种在我国的传入和扩散形式, 国家质量监督检验检疫总局在 2007 年将其列入《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》。因此, 齿裂大戟已入侵我国并呈扩散蔓延趋势, 急需通过潜在分布区的预测研究探明其未来的传入和扩散趋势, 进而制定针对性的监测措施为有效地控制其扩散蔓延、降低其危害提供依据。

最大熵模型(Maximum entropy model, MAX-ENT)是以最大熵理论为基础的密度估计和物种分布预测模型, 最大熵理论是一种基于有限信息对未知分布进行无偏推断的数学方法(邢丁亮和郝占庆, 2011; Phillips *et al.*, 2006; Phillips & Dudík, 2008)。在入侵生物学领域, MAXENT 模型被广泛运用于预测外来入侵物种的潜在分布(Bradley, 2013; Giovanelli *et al.*, 2008; Ward, 2007), 我国学者已利用该模型预测了入侵植物飞机草 *Eupatorium odoratum* L.、加拿大一枝黄花 *Solidago decurrens* Lour.、春飞蓬 *Erigeron philadelphicus* L.、毒莴苣 *Lactuca serriola* L. 和假苍耳 *Iva xanthifolia* Nutt. 等在我国

的潜在分布区(郭水良等, 2011; 雷成军和徐海根, 2010; 许志东等, 2012; 杨波等, 2009; 张颖等, 2011)。已有研究表明, MAXENT 模型在物种现实生境模拟、生态环境因子筛选等方面优于其他的物种分布模型, 能够较好地预测物种的潜在分布区(李明阳等, 2008; 马松梅等, 2010; 王运生, 2007; Elith *et al.*, 2011)。

前人对齿裂大戟的研究主要集中在其分类地位(牛玉璐, 2011; 王彦红等, 1999; 徐瑛等, 2010; 薛恒钢等, 2007)、入侵生物学特性(张路等, 2012)、分布记录(曲红等, 2007; 喻勋林等, 2007)以及海关检疫报道(胡长松等, 2014; 李俊影等, 2014)。哈斯巴特尔等(2012)、莫南(2014)和牛玉璐(2011)分别对云南德宏州、河北、内蒙古赤峰地区的种群进行了实地调查, 但是关于该种在我国的适生程度、潜在分布区等还没有相关研究和报道。本文在对北京及周边地区的齿裂大戟种群进行野外调查和生活史观察(张路等, 2012)的基础上, 以齿裂大戟的分布资料和筛选后的全球气候环境数据作为输入数据, 利用 MAX-ENT 模型对齿裂大戟在我国的潜在分布区进行预测, 评估其在我国的入侵潜力, 为科学防治、阻止其进一步扩散蔓延提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据采集与整理

1.1.1 地理分布数据的收集与整理 齿裂大戟在原产地的分布数据通过全球生物多样性信息网络数据库(Global biodiversity information facility, GBIF, <http://www.gbif.org/>)检索, 得到全球分布记录点 1707 个, 去除缺失经纬度、除中国之外的非原产地以及错误或重复的数据后得到 523 个有效记录。齿裂大戟在我国的分布数据主要来源于文献(哈斯巴特尔等, 2012; 马金双, 2013; 莫南, 2014; 牛玉璐, 2011)、标本记录以及野外实地调查。对国内关于齿裂大戟的研究中未能具体标明地理坐标的采集和记录, 在地名数据库(Geographic names database, GNDB)查找其地理坐标确定大致经纬度。此外还对北京市石景山区玉泉路地区、海淀区马连洼地区、海淀区南辛村、海淀区黄庄等区域进行了实地考察, 并利用 GPS (60CSx) 记录齿裂大戟分布的地理坐标。国内的分布记录见表 1。国内外分布数据均按照 MAXENT 3.3.3k 软件格式要求整理, 作为输入文件。

1.1.2 气候环境数据与地图数据的收集 气候环境数据源于 WorldClim 环境数据库 (<http://www.worldclim.org/>)。选取当前气候条件下 (Current conditions) 空间分辨率为 2.5° 的数据。下载 19 个对物种分布有重要影响的生物气候因子作为环境变量, 变量名为 bio1~bio19, 包括年均温、最冷月均

温、最热月降水等, 全部变量的信息见表 2。中国基础地理信息数据下载自国家基础地理信息系统网站 (<http://zrdl.snnu.edu.cn>)。全球基础地理信息源于 DIVA-GIS 网站 (<http://www.diva-gis.org/>)。

表 1 齿裂大戟在中国的分布
Table 1 Geographic distribution of *Euphorbia dentata* in China

国内分布 Current Distribution in China	分布地点 Location	经度 Latitude	纬度 Altitude	参考文献 References
北京 Beijing City	海淀区香山 Xiangshan, Haidian	116°10'20.00" E	39°59'26.00" N	张路等, 2012
	海淀区黄庄 Huangzhuang, Haidian	116°16'41.98" E	39°57'15.75" N	张路等, 2012
	石景山区玉泉路 Yuquan Road, Shijingshan	116°15'10.02" E	39°54'46.23" N	张路等, 2012
河北 Hebei Province	保定市南郊 Baoding	115°30'20.22" E	38°50'14.52" N	牛玉璐, 2011
	曲阳县 Quyang	114°44'41.73" E	38°37'20.08" N	牛玉璐, 2011
	易县清西陵 Yixian	115°24'10.44" E	39°23'3.29" N	牛玉璐, 2011
	鹿泉县封龙山 Luquan	114°20'49.69" E	37°53'29.80" N	牛玉璐, 2011
湖南 Hunan Province	长沙中南林业科技大学 Changsha	112°59'45.71" E	28°7'58.82" N	喻勋林, 2007
云南 Yunnan Province	德宏州芒市 Mangshi, Dehongzhou	98°35'17.11" E	24°26'1.28" N	莫南, 2014
	德宏州盈江县 Yingjiang, Dehongzhou	97°55'55.04" E	24°42'18.76" N	莫南, 2014
	德宏州陇川县 Longchuan, Dehongzhou	97°47'31.58" E	24°10'58.67" N	莫南, 2014
	德宏州瑞丽市 Ruili, Dehongzhou	97°51'6.95" E	24°0'46.11" N	莫南, 2014

表 2 环境变量
Table 2 Environmental variables

变量 Variable	描述 Description	变量 Variable	描述 Description
bio1	年平均温度 Annual mean temperature	bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter
bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range [mean of monthly (max temp-min temp)]	bio12	年均降水量 Annual precipitation
bio3	等温性 Isothermality (bio2/bio7)×100	bio13	最湿月降水量 The wettest month precipitation
bio4	温度季节变化标准差 Temperature seasonality (standard deviation×100)	bio14	最干月降水量 The driest month precipitation
bio5	最暖月最高温 Max temperature of the warmest month	bio15	降水量变异系数 Precipitation sasonality (coefficient of variation)
bio6	最冷月最低温 Min temperature of the lowest month	bio16	最湿季度降水量 The wettest season precipitation
bio7	年均温度变化范围 Temperature annual range	bio17	最干季度降水量 The driest season precipitation
bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of the wettest season	bio18	最暖季度降水量 The warmest season precipitation
bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of the driest season	bio19	最冷季度降水量 The coldest season precipitation
bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of the warmest season		

1.2 研究方法

1.2.1 气候环境数据筛选 根据齿裂大戟的生活史特征 (张路等, 2012), 从 19 个广泛应用的与物种分布密切相关的生物气候变量 (bio1~bio19) 中选取对齿裂大戟生长有直接影响的环境变量。齿裂大戟为一年生草本植物, 最冷月以种子形式过冬。因此, 采用去除与最冷月气温有关的 2 个环境变量 (bio6 最冷月最低温, bio7 年气温极差) 后的

17 个生物气候变量 (bio1~bio5, bio8~bio19) 进行生态位模拟。
1.2.2 最大熵模型预测 将齿裂大戟在原产地和我国的分布数据以及 17 个全球环境变量数据导入 MAXENT 3.3.3k (Bradley, 2013; Elith *et al.*, 2011)。为了提高模型预测的准确性, MAXENT 提供 2 种方法以消除随机因素的影响: (1) 随机将分布点中 25% 的数据选取作为验证集 (Testing data), 剩余

75%的数据用作训练集 (Training data) 构建模型;

(2)将模型的运算重复 (Replicate) 设置为重复 10 次。2 种方法无法同时使用。本研究采用第 2 种方法,并在参数设置中选择使用刀切法 (Jackknife) 和绘制响应曲线 (Create response curves) 的选项。将通过 MAXENT 模型得到的以 ASC II 格式输出的预测结果导入 ArcGIS10.0 中,并转换为 raster 格式。使用 ArcGIS 软件中空间分析模块的自然间断点分级法 (Jenks' natural breaks) 进行适生区分级。

1.2.3 模型精度评价与主导因子选取 采用受试者工作特征曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 与横坐标围成的面积,即 AUC 值 (Area under curve) 对建立的最大熵模型模拟准确性进行评价。通过 MAXENT 自带的 Jackknife 模块分析各环境变量对齿裂大戟分布的贡献率。

2 结果与分析

2.1 齿裂大戟在我国的潜在分布区预测及其生境适应等级的划分

齿裂大戟潜在分布区的预测结果被自然间断点分级法 (Jenks' natural breaks) 分为 4 类:非适生区, $P<0.066$;低度适生区, $0.066<P<0.218$;中度适生区, $0.218<P<0.442$;高度适生区, $0.442<P<0.881$ 。结合我国省级行政区划图得出的齿裂大戟在我国的潜在分布区如图 1 所示。预测结果表明,齿裂大戟在我国的潜在分布区主要包括北京、天津、河北省南部、山东省大部、河南省大部、山西省南部、陕西省中部、湖南省东部及江西、江苏、浙江、四川、云南和甘肃省部分地区。其中高风险区主要集中在地处 $33^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $109^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$ 的北京、河北省中南部、河南省中北部、山东省中西部、山西省南部和陕西省西安等地以及江西、云南省的部分地区。

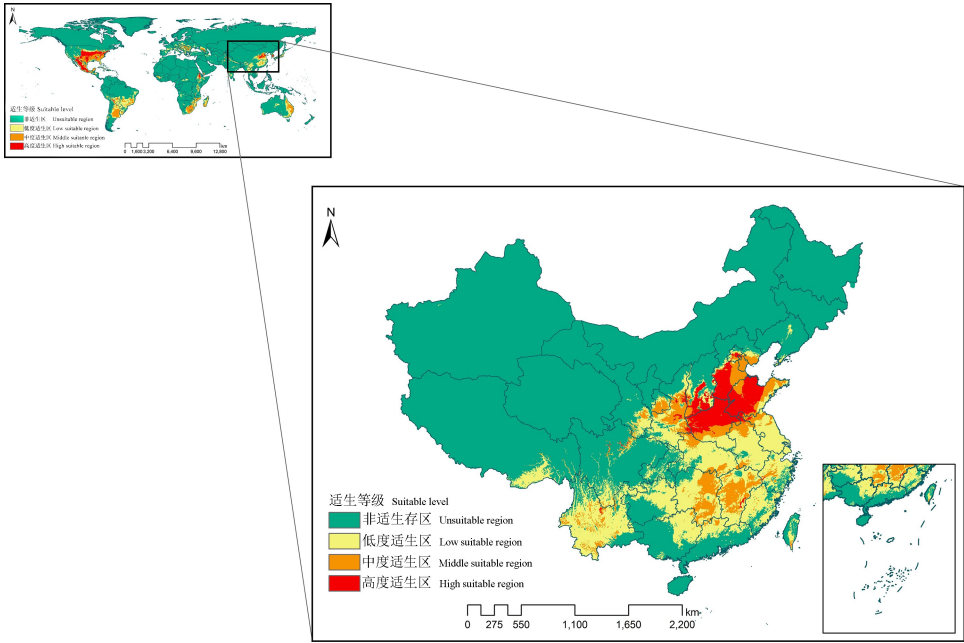


图 1 齿裂大戟在中国的潜在分布区图示

Fig.1 Potential geographic distribution of *Euphorbia dentata* in China

2.2 预测模型精度测评

ROC 曲线分析法在物种潜在分布预测模型评价中的应用十分广泛 (许志东等,2012)。本研究中数据的 ROC 曲线下面积 AUC 值为 0.956,远高于随机预测值 0.5,表明 MAXENT 模型对齿裂大戟在我国潜在分布区的预测效果很好。

2.3 齿裂大戟潜在分布区主导因子分析

MAXENT 模型的刀切法分析工具能够判断预测所使用的每一个环境因子对预测结果影响的相对大小,原理是在模型运行中依次忽略一个环境变量,使用其余的环境变量进行建模预测,再单独使用该变量建模,最后使用所有变量建模。各变量对最终结果的影响程度以规范训练结果作为评价指

标。由图 2 可以看出, bio1 年平均温度、bio9 干旱季节平均气温、bio11 最冷季度平均气温对最终结果的贡献较大, 而 bio15 季节平均降水、bio14 最干

旱月份降水、bio17 最干旱季度降水、bio19 最冷季度降水对结果的影响较小。

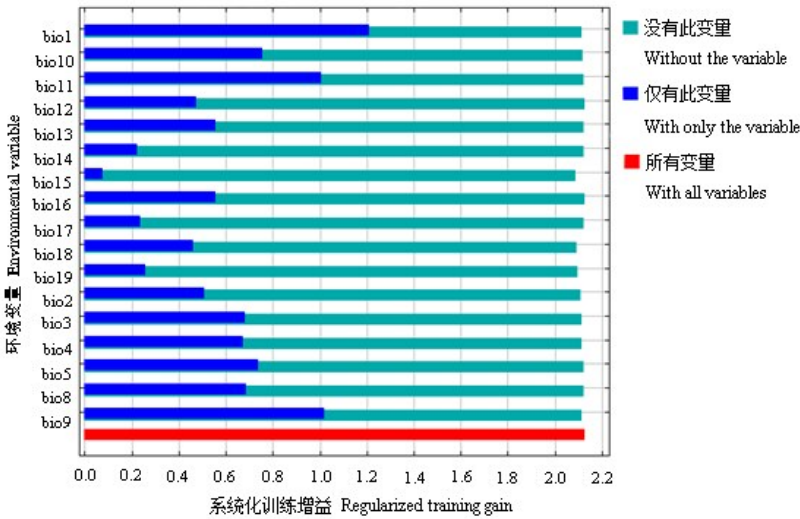


图 2 基于刀切法的环境变量重要性分析

Fig.2 Significance analysis of environmental variables based on Jackknife test

3 讨论

3.1 环境因子和分布数据的选择

MAXENT 最大熵模型是目前表现最好、应用最广的生态位模型, 在入侵生物潜在分布区或病虫害潜在危害区域预测、濒危物种或有经济价值物种的适生区预测以及自然保护区设计以及全球气候变化对物种分布的影响等热点问题上有很好的应用(邢丁亮和郝占庆, 2011)。

物种生态位的保守性是应用生态位模型预测物种潜在分布区的前提(Holt & Gaines, 1992), 但有研究表明, 当入侵地的环境与原产地的环境有所区别时, 入侵种的生态位可能会发生漂移(Wiens *et al.*, 2010)。因此仅使用原产地的分布数据不能很好预测发生过生态位漂移的入侵种的潜在分布区。本研究采用了齿裂大戟在原产地以及在我国已知入侵地的作为分布点, 能够部分弥补仅使用原产地分布数据所造成的偏差(Broennimann & Guisan, 2008)。

本研究依据齿裂大戟的生活史特征, 使用了去除与最冷月气温有关的 2 个环境变量(bio6 最冷月最低温, bio7 年气温极差)后的 17 个环境变量进行生态位模型构建。最高气温与最低气温是影响多年生物种地理分布的主要因素。但是由于土壤中种子对低温的耐受能力一般较强(丁格根其尔, 2014), 最冷月最低温对于以种子形式过冬的一年

生植物的生物学意义并不明显。张路等(2012)野外观察发现, 在北京齿裂大戟为一年生草本, 以种子形式过冬。标本调查和文献检索也没有发现两年生或多年生的植株的记录(哈斯巴特尔等, 2012; 莫南, 2014; 牛玉璐, 2011)。需要注意的是, 在气候温暖、四季不分明的地区齿裂大戟春季至秋季种子皆可发芽, 花果期可从 5 月延续到翌年 2 月(莫南, 2014)。但由于一年生植物齿裂大戟有能力在温度低时以种子形式过冬, 最低气温仅影响齿裂大戟的过冬形式, 并不会对齿裂大戟的分布区域产生影响, 因此不适用于齿裂大戟潜在分布区的预测。如在生长不受到最冷月的影响下使用含有最冷月数据的环境变量, 会导致预测结果遗漏适宜齿裂大戟生长的区域。如冬季寒冷但是其他条件均适宜的地区 *P* 值会偏低(朱耿平等, 2014)。因此, 本文使用去除无关变量后的环境数据集构建预测模型。刀切法分析表明, 对齿裂大戟分布影响较大的主要环境因子为年平均温度和干旱季节平均气温, 降水因素的影响较小。另外, 本研究使用的是气候变量, 没有考虑物种间的相互作用, 如能综合植被类型、天敌等因素会增加预测结果的准确性。

3.2 模型预测的准确性

研究采用了 ROC 曲线下面积的 *AUC* 值作为验证模型精度的指标, 是目前最常用也是最佳的模型

评价指标之一 (Ficetola *et al.*, 2007; Gibson *et al.*, 2007; Moffett *et al.*, 2007)。随机分布模型的 *AUC* 值为 0.5, *AUC* 值大于 0.9 或小于 0.1 时诊断价值较高 (Elith *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006)。本研究的 *AUC* 值 0.965, 表明预测准确性很高。另外, 齿裂大戟在巴西、澳大利亚东北、俄罗斯、韩国等地成功定植的分布点也包含在齿裂大戟的全球适生区内, 进一步说明了预测的准确性。

3.3 管理措施

本研究利用 MAXENT 生态位模型和地理信息系统 (ArcGIS) 相结合, 对外来植物齿裂大戟在我国的潜在分布区进行了预测, 结果表明齿裂大戟在我国具有广阔的潜在分布区, 主要位于我国的中部和东部, 包括我国北京、河北省中南部、山东中西部、河南中北部、山西南部、陕西中部、江西、湖南东部及云南部分地区。值得注意的是, 预测结果中的高度适生区域 (图 1 中红色部分) 与我国部分粮食主产区重合。鉴于齿裂大戟具有较强的繁殖能力、传播能力和适应能力, 常形成单优群落, 对当地的生物多样性破坏较大 (张路等, 2012), 一旦侵入农田, 与农作物争夺养分与空间, 将会造成农作物的大量减产 (哈斯巴特尔等, 2012; Juan, 2003), 并影响农产品的质量。这从我国进口的产自巴西的大豆和美国的小麦中常夹带齿裂大戟的种子可以得到警示 (李宁, 2009; 张路等, 2012)。

关于入侵物种种群动态的研究已经表明, 入侵种在大规模暴发前会有一段增长缓慢的时滞期 (Shigesada & Kawasaki, 1997)。在该时期, 入侵种的种群数量尚小、增长缓慢, 因此易于控制, 是进行治理的最佳时期。齿裂大戟在我国分布尚处于分散零星状态, 整体来看尚未进入暴发期, 但在某些地方的种群数量已经很大, 并且有快速扩散的趋势。结合齿裂大戟的现状和分布区预测的结果, 本文提出如下防控措施: 首先对于已经建立了齿裂大戟的种群并且属于高度适宜生境的分布地如北京、河北石家庄、保定等尽快组织人员进行治理和灭除; 对于对外交流频繁的港口同时具备齿裂大戟的较适宜生境的区域如辽宁大连、天津、河北唐山、山东潍坊、东营、滨州等对该齿裂大戟进行全面的监控, 以防由此引入新的齿裂大戟种源。对处于适生区域并属于交通干线如京港澳高速河北河南段沿线、云南楚雄彝族自治州永仁县京昆高速沿线等应

高度防范由于来往车辆引入齿裂大戟的繁殖体。其他尚未有记录的适生区域也要有足够的重视, 进行必要的监控, 一旦发现其逸生, 应及时清除。

致谢: 感谢北京大学刘峻峰研究员、中国科学院植物研究所李振宇研究员在论文选题和写作上的指导。

参考文献

- 丁格根其尔. 2013. 桃叶卫矛种子活力影响因素的研究. 哈尔滨: 东北林业大学.
- 高增祥, 季荣, 徐汝梅, 谢宝瑜, 李典谟. 2003. 外来种入侵的过程、机理和预测. 生态学报, 23(3): 559-570.
- 哈斯巴特尔, 项错峰, 崔凯, 孙凤彩, 白璐. 2012. 赤峰地区外来有毒有害植物的监测及防治方法研究. 内蒙古草业, 24(2): 35-38.
- 郭水良, 高平磊, 娄玉霞. 2011. 应用 MaxEnt 模型预测检疫性杂草毒莠苣在中国的潜在分布范围. 上海交通大学学报: 农业科学版, 29(5): 15-19.
- 胡长松, 季琴琴, 陈瑞辉, 伏建国, 周明华. 2014. 2009~2011 年全国进境货物截获杂草疫情分析. 植物检疫, 28(1): 80-87.
- 雷军成, 徐海根. 2010. 基于 MaxEnt 的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测. 生态与农村环境学报, 26(2): 137-141.
- 李俊影, 李蓉娟, 刘沙, 董越. 2014. 丹东港进口大豆携带杂草种类与检测. 辽东学院学报: 自然科学版, 21(1): 37-40.
- 李明阳, 巨云为, Kumar S, Stohlgren T J. 2008. 美国大陆外来入侵物种斑马纹贻贝 (*Dreissena polymorpha*) 潜在生境预测模型. 生态学报, 28(9): 4253-4258.
- 李宁. 2009. 美国输华小麦截获重要性杂草的风险分析. 福州: 福建农业大学.
- 马金双. 2013. 中国入侵植物名录. 北京: 高等教育出版社.
- 马松梅, 张明理, 张宏祥, 孟宏虎, 陈曦. 2010. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孪遗植物裸木的潜在地理分布及格局. 植物生态学报, 34(11): 1327-1335.
- 莫南. 2014. 德宏州齿裂大戟发生情况调查. 德宏师范高等专科学校学报, 23(2): 100-101, 96.
- 牛玉璐. 2011. 齿裂大戟的分类学研究及其在河北省的新分布. 衡水学院学报, 13(4): 50-52.
- 曲红, 路端正, 王百田. 2007. 河北植物新增补属、种与入侵物种新分布. 河北林果研究, 22(3): 257-258.
- 王彦红, 马金双, 刘全儒. 1999. 八种国产大戟属植物的核型报道. 植物分类学报, 37(4): 394-402.
- 王运生. 2007. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究. 长沙: 湖南农业大学.
- 邢丁亮, 郝占庆. 2011. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. 生物多样性, 19(3): 295-302.
- 徐瑛, 刘丽, 张建成, 张慧丽. 2010. 4 种一品红亚属植物种皮微形态特征比较研究. 西北植物学报, 30(8): 1602-1605.

- 许志东, 丁国华, 刘保东, 池春玉, 肖玮, 金晓霞, 李春烨. 2012. 假苍耳的地理分布及潜在适生区预测. 草业学报, 21(3): 75–83.
- 薛恒钢, 周颂东, 何兴金, 余岩. 2007. 中国大戟属 13 个种 15 个居群的核型报道. 植物分类学报, 45(5): 619–626.
- 杨波, 薛跃规, 唐小飞, 王媛, 张达敏. 2009. 外来入侵植物飞机草在中国的适生区预测. 植物保护, 35(4): 70–73.
- 喻勋林, 刘克明, 谷志容. 2007. 湖南省新记录植物(II). 中南林业科技大学学报, 27(3): 66–69.
- 张路, 马丽清, 高颖, 石雷. 2012. 外来入侵植物齿裂大戟 (*Euphorbia dentata* Michx.) 的生物学特性及其防治. 生物学通报, 47(12): 43–45.
- 张颖, 李君, 林蔚, 强胜. 2011. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测. 应用生态学报, 22(11): 2970–2976.
- 朱耿平, 刘强, 高玉葆. 2014. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布. 生物多样性, 22(2): 223–230.
- Bradley B A. 2013. Distribution models of invasive plants over-estimate potential impact. *Biological Invasions*, 15: 1417–1429.
- Broennimann O and Guisan A. 2008. Predicting current and future biological invasions: both native and invaded ranges matter. *Biology Letters*, 4: 585–589.
- Cox G W. 2004. *Alien Species and Evolution*. Washington, DC: Island Press.
- Elith J, Catherine H, Graham, Robert P, Anderson, Miroslav D, Simon F, Antoine G, *et al.* 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129–151.
- Elith J, Steven J, Phillips, Trevor H, Miroslav D, Yung E C, Colin J and Yates. 2011. A statistical explanation of MAXENT for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43–57.
- Ficetola G F, Thuiller W and Miaud C. 2007. Prediction and validation of the potential global distribution of a problematic alien invasive species — The American bullfrog. *Diversity and Distributions*, 13: 476–485.
- Gibson L, Barrett B and Burbidge A. 2007. Dealing with uncertain absences in habitat modelling: a case study of a rare ground-dwelling parrot. *Diversity and Distributions*, 13: 704–713.
- Giovanelli J G R, Haddad C F B and Alexandrino J. 2008. Predicting the potential distribution of the alien invasive American bullfrog (*Lithobates catesbeianus*) in Brazil. *Biological Invasions*, 10: 585–590.
- Goncalves E, Herrera I, Duarte M, Bustamante R O, Lampo M, Velásquez G, Sharma G P and García-Rangel S. 2014. Global invasion of *Lantana camara*: Has the climatic niche been conserved across continents. *PLoS ONE*, 9: e111468.
- Holt R D and Gaines M S. 1992. Analysis of adaptation in heterogeneous landscapes-implications for the evolution of fundamental niche. *Evolutionary Ecology*, 6: 433–447.
- Juan V. 2003. Competition of spurge toothed (*Euphorbia dentata*) in soybean. *Planta Daninha*, 21: 175–180.
- Lodge D M, Williams S, MacIsaac H J, Hayes K R, Leung B, Reichard S, Mack R N, Moyle P B, *et al.* 2006. Biological invasions; recommendations for US policy and management. *Ecological Applications*, 16: 2035–2054.
- Moffett A, Shackelford N and Sarkar S. 2007. Malaria in Africa: vector species' niche models and relative risk maps. *PLoS ONE*, 2: e824.
- Mooney H A, Mack R N and McNeely J A. 2005. *Invasive Alien Species: A New Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Oprea A. 1997. A new species for the Romanian Flora; *Euphorbia dentata* Michx. *Stud Cerc Biol*, 49: 97–98.
- Phillips S J, Anderson R P and Schapire R E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231–259.
- Phillips S J and Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with MAXENT: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31: 161–175.
- Pimental D, Zuniga R and Morrison D. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, 52: 273–288.
- Richardson D M, Rejmánek M, Barbour M G, Panetta F D and West C J. 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 6: 93–107.
- Sakai A K, Allendorf F W, Hott J, Lodge D M, Molofsky J and With K A. 2001. The population biology of invasive species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32: 305–332.
- Sharma G P, Raghubanshi A S and Jamuna S S. 2005. Lantana invasion: an overview. *Weed Biology and Management*, 5: 157–165.
- Shigesada N and Kawasaki K. 1997. *Biological Invasions: Theory and Practice*. London: Oxford University Press.
- Ward K F. 2007. Modelling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biological Invasions*, 9: 723–735.
- Wiens J J, Ackerly D D, Allen A P, Anacker B L, Buckley L B, Cornell H V, Damschen E I, Davies T J, *et al.* 2010. Niche conservatism as an emerging principle in ecology and conservation biology. *Ecology Letters*, 13: 1310–1324.
- US Congress, Office of Technology Assessment (USCOTA). 1993. *Harmful Non-indigenous Species in the United States, OTA-F-565*, US. Washington DC: Government Printing Office, 392.