DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2016.03.013

基于 MaxEnt 模型的入侵植物白花鬼针草的分布预测及适生性分析

岳茂峰, 冯 莉, 崔 烨, 张 纯, 田兴山*
广东省农业科学院植物保护研究所/广东省植物保护新技术重点实验室,广东 广州 510640

摘要:【背景】白花鬼针草为农区恶性杂草,原产于美洲,现已广泛分布于世界热带及亚热带地区,但其在全球和中国的适生区域及适生等级还不明确。【方法】利用 MaxEnt 生态位模型对白花鬼针草在全球以及中国的潜在适生区进行预测。【结果】白花鬼针草在全球的分布更多受到温度因素的影响。白花鬼针草的适生区主要集中在北半球和南半球 15°~30°之间的热带和亚热带地区。其中,北美南部、南美中南部、非洲南部、东南亚北部以及大洋洲中南部沿海地区为白花鬼针草中、高度适生区。白花鬼针草在中国的适生区主要位于广东、广西、海南、云南、福建、台湾。到 2070 年,白花鬼针草在全球的适生区面积与当前相似,但在中国的适生区有所增大。【结论】白花鬼针草在我国有进一步扩张的风险。

关键词: MaxEnt; 白花鬼针草; 潜在分布区; 预测

Prediction of the potential distribution and suitability analysis of the invasive weed, *Bidens alba* (L.) DC

Mao-feng YUE, Li FENG, Ye CUI, Chun ZHANG, Xing-shan TIAN*
Institute of Plant Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection, Guangzhou, Guangdong 510640, *China*

Abstract:【Background】*Bidens alba* (L.) DC, a worst weed native to America, is widely distributed in tropical and subtropical regions of the world, but its potential distribution area in the world and China is still unclear.【Method】In this study, the MaxEnt niche model was used to predict the potential distribution of *B. alba* in China and the world.【Result】*B. alba* was mainly distributed in the tropical and subtropical regions, between 15° and 30° in both the Northern and Southern Hemispheres. Its medium and highly suitable areas are mainly concentrated in southern North America, south-central South America, southern Africa, northern Southeast Asia, and southeastern Australia. The main suitable area of *B. alba* in China was mainly in Guangdong, Guangxi, Hainan, Yunnan, Fujian and Taiwan. It is predicted that the suitable area of *B. alba* would not change significantly in the world, but could increase in China by 2070.【Conclusion】*B. alba* has the risk of further expansion in China.

Key words: MaxEnt; *Bidens alba*; potential distribution area; prediction

白花鬼针草 *Bidens alba* (L.) DC,有别于传统“白花鬼针草”*Bidens pilosa* var. *radiata* Sch.-Bip.(邢福武等,2007),属菊科鬼针草属,是一种 1 年生或短命的多年生植物,原产于美洲,现在广泛分布于热带和亚热带地区(Ballard, 1986; Lu *et al.*, 2014)。近年来,白花鬼针草在我国华南地区大面积入侵,成为广东省危害最严重的入侵杂草之一(岳茂峰等,2011a),入侵面积超过 3 万 hm^2(田兴山等,2010),对华南地区农业生产及生物多样性造成严重危害。笔者在对越南、泰国等国家外来入侵生物的调查过程中均发现有白花鬼针草分布,其分布区域多靠近我国边境地区。目前,有关白花鬼针草在世界和我国可能的适生区及适生等级仍不明确。

当前,国内外用来预测物种分布的模型有 Bioclim、Climex、Domain、Garp 以及 MaxEnt 最大熵模型

收稿日期(Received): 2016-05-21 **接受日期(Accepted)**: 2016-07-04
基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAD08B02); 科技部科技伙伴计划(KY201402015); 广东省农科院院长基金项目(201610)
作者简介: 岳茂峰, 男, 副研究员。研究方向: 外来入侵植物生理生态与防控技术
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: xstian@tom.com

(maximum entropy model)等(Elith *et al.*,2006)。其中, MaxEnt 模型是通过物种已知样本分布数据和环境数据找出物种概率分布的最大熵,从而对物种的分布进行估计和预测(Phillips *et al.*,2006)。由于 MaxEnt 模型表现出良好的准确性而被广泛用来预测保护物种、有害生物以及药用植物等的潜在生境分布区域(陈丽娜等,2016; 徐军等,2015; 岳茂峰等,2013; Costa *et al.*,2015)。此外,王运生等(2007)应用 ROC(receiver operating characteristic)曲线分析法对 5 种模型的预测结果比较发现, MaxEnt模型的 ROC 曲线下面积(area under cover, AUC)值最大,预测效果最好。可见,MaxEnt 模型对物种分布具有较好的预测能力。

本研究通过 MaxEnt 生态位模型,利用世界上已有的白花鬼针草分布点数据以及当前和未来的环境数据对该杂草在世界和中国的潜在适生区进行预测,以期为相关部门合理制定防控策略提供依据。

1　材料与方法

1.1　白花鬼针草分布数据

从全球生物多样性信息机构(Global Biodiversity Information Facility,GBIF)网站下载白花鬼针草在全球的分布资料,得到 281 条可用数据。此外,通过笔者在越南、广东以及广西的实地调查,得到 57 条数据,共计 338 条数据。按照 MaxEnt 软件的格式要求整理成物种分布数据文件。

1.2　环境及基础地理数据

从 Worldclim 网站(http://www.worldclim.org/)下载当前的环境数据(1950—2000 年监测数据)以及未来 2070 年 CCSM4.0 模式(美国国家大气研究中心)和 BCC-CSM1-1 模式(北京气候中心)下的环境变量:19 个生物气候变量(Bio1-19),即 Bio1(年均温)、Bio2(昼夜温差月均值)、Bio3(等温性)、Bio4(温度季节变化方差)、Bio5(最热月最高温度)、Bio6(最冷月最低温度)、Bio7(年气温变化范围)、Bio8(最湿季度平均温度)、Bio9(最干季度平均温度)、Bio10(最热季节平均温度)、Bio11(最冷季节平均温度)、Bio12(年均降水量)、Bio13(最湿月降水量)、Bio14(最干月降水量)、Bio15(降水季节变异系数)、Bio16(最湿季节降水量)、Bio17(最干季节降水量)、Bio18(最暖季度降水量)、Bio19(最冷季度降水量);地形变量,Alt(海拔);月值环境变量,即 Tmin1 - 12(1—12 月平均最低温)、Tmax1-12(1—12 月平均最高温)、Tmean1-12(1—12 月平均温度)、Prec1-12(1—12 月平均降水量)。空间分辨率为 2.5 min,下载的 ASC Ⅱ格式数据在 MaxEnt 软件中可以直接使用。

基础地理信息为从国家基础地理信息系统(http://nfgis.nsdi.gov.cn/)下载的 1∶400 万中国行政区划图。

1.3　应用软件

MaxEnt 模型从 http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/免费下载。制图软件采用 ESRI 公司开发的 ArcGIS 10.3。

1.4　研究方法

1.4.1　环境变量的筛选　用刀切法(jackknife)将 68 个环境变量在模型中按训练得分排列后,筛选出最优的环境参数。在生物气象因子中 Bio1、Bio3、Bio4、Bio9、Bio11 的贡献值较高,在月值环境变量中 Tmax2、Tmax3、Tmax10、Tmax11、Tmean3、Tmean11、Tmean12 的贡献值较高,因此选择这 12 个环境变量做进一步分析。

1.4.2　模型运行　将白花鬼针草的分布数据和筛选的环境数据导入模型,随机选取 25%的分布点作为测试集(test date),75% 作为训练集(training date),其他为软件默认参数,输出文件为ASC Ⅱ栅格图层(Elith *et al.*,2011; Phillips *et al.*,2006)。利用 ArcMap 的格式转换工具(conversion tools)将预测结果 ASC Ⅱ格式转化为 RASTER 格式,再利用空间分析工具(spatial analysis tools) 的再分类功能(reclassify)选定合适的阈值对适生指数(suitable index,SI)划分适生等级(雷军成和徐海根,2010)。

1.4.3　适生等级划分　参照岳茂峰等(2013)对刺轴含羞草 *Mimosa pigra* L.适生等级的划分并根据笔者在华南以及东南亚地区的实际调查情况确定白花鬼针草适生等级。本研究将白花鬼针草的适生等级划分为 4 级:SI<0.08 为不适生区,0.08≤SI<0.20为低度适生区,0.20≤SI<0.45 为中度适生区,SI≥0.45 为高度适生区。

1.4.4　模型评估　采用 ROC 曲线分析法对预测的适生区结果进行精度检验(王运生等,2007)。ROC 曲线是以真阳性率为纵坐标,假阳性率为横坐标所

形成的曲线。AUC 值是 ROC 曲线与横坐标围成的面积值,AUC 值越大表示与随机分布相距越远,环境变量与预测的物种地理分布模型之间相关性越大,即模型预测效果越好(齐国君等,2015)。

2 结果与分析

2.1 白花鬼针草在全球的适生性分析

利用当前白花鬼针草在全球的分布数据和环境数据,通过 MaxEnt 软件获得白花鬼针草在全球的适生性分布结果(图 1)。预测结果表明,白花鬼针草在全球的中、高度适生区主要集中在南北半球 15°~30°之间的热带和亚热带地区,包括北美南部、南美中南部、非洲南部、东南亚北部以及大洋洲的中南部沿海地区。白花鬼针草总适生区占全球面积的 9.28%。其中,低度适生区比例为 5.47%,中度适生区比例为 2.88%,高度适生区比例为 0.93%(表 1)。

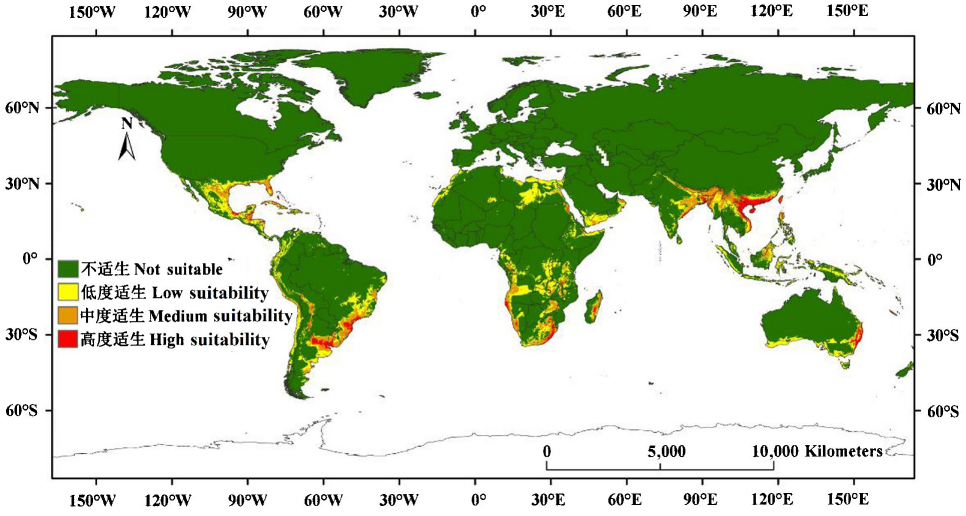

图 1 白花鬼针草在全球的适生区预测

Fig.1 Potential distribution of *B. alba* in the world

表 1 白花鬼针草全球适生等级分布比例

Table 1 Percentage of areas of the different suitability grades for *B. alba* in the world %

环境数据 Environmental data	低度适生区域 Area of low suitability	中度适生区域 Area of medium suitability	高度适生区域 Area of high suitability	合计 Total
当前 Current conditions (1950-2000)	5.47	2.88	0.93	9.28
CCSM4.0 (2070)	4.71	2.86	0.84	8.40
BCC-CSM1-1 (2070)	5.87	2.73	1.10	9.71

2.2 白花鬼针草在中国的适生性分析

白花鬼针草在我国的适生区主要位于北纬 30°以南的区域,包括广东、广西、海南、台湾、福建、西藏、四川、云南、贵州、湖南、江西、浙江 12 个省区(图 2)。从适生面积来看,白花鬼针草主要分布在广东、广西、海南、福建、台湾、云南、西藏 7 个省区。从适生等级来看,白花鬼针草的高度适生区分布在广东、广西、海南、台湾和云南 5 个省区,分别占该省区面积的 66.23%、49.19%、100.00%、65.16%和 12.75%;中度适生区分布在西藏、云南、广东、广西和福建 5 个省区,分别占该省区面积的 1.53%、30.70%、15.64%、14.97% 和 25.51%;低度适生区主要分布在云南、广西、广东、江西、福建、浙江 6 个省区(表 2)。

2.3 2070 年全球气候变化条件下白花鬼针草在全球的适生区

利用美国国家大气研究中心和北京气候中心 2 个机构公布的 2070 年全球环境数据对白花鬼针草潜在适生区的预测表明,2070 年白花鬼针草在全球的适生区与当前预测趋势一致(图 3~4)。在未来,白花鬼针草低度适生区占全球陆地面积的5.29%(2 个机构数据预测的均值,下同),中度适生区占 2.80%,高度适生区占 0.97%,适生区总面积占 9.06%,与当前基本一致(表 1)。

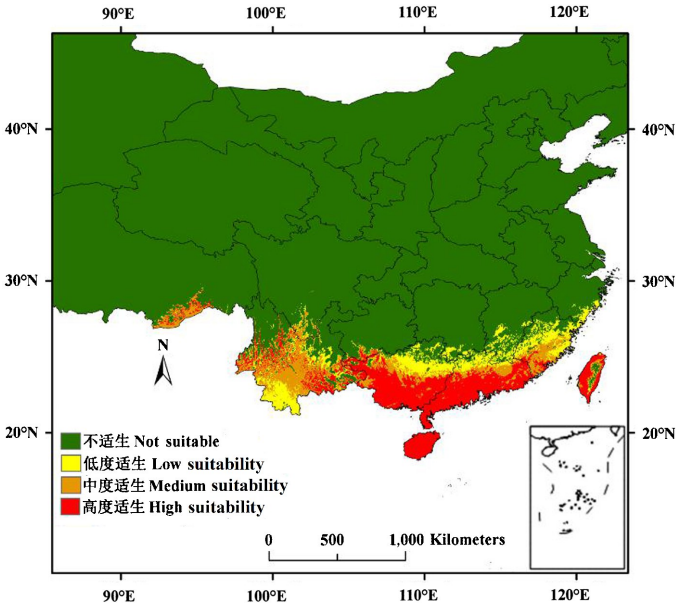

图 2　白花鬼针草在中国的适生区预测

Fig.2　Potential distribution of *B. alba* in China

表 2　白花鬼针草在中国适生等级分布比例

Table 2　Percentage of areas of the different suitability grades for *B. alba* in its main distribution areas in China　%

地区 Region	环境数据 Environmental data	低度适生区域 Area of low suitability	中度适生区域 Area of medium suitability	高度适生区域 Area of high suitability	合计 Total
中国 China	当前 Current conditions(1950-2000)	2.09	2.32	3.33	7.74
	CCSM4.0(2070)	5.13	3.38	2.84	11.35
	BCC-CSM1-1(2070)	3.44	2.66	2.91	9.01
广东 Guangdong	当前 Current conditions(1950-2000)	13.27	15.64	66.23	95.14
	CCSM4.0(2070)	19.78	21.13	58.05	98.96
	BCC-CSM1-1(2070)	16.96	16.23	57.47	90.66
广西 Guangxi	当前 Current conditions(1950-2000)	20.14	14.97	49.19	84.30
	CCSM4.0(2070)	24.12	19.52	53.33	96.97
	BCC-CSM1-1(2070)	22.56	14.48	46.19	83.23
海南 Hainan	当前 Current conditions(1950-2000)	0.00	0.00	100.00	100.00
	CCSM4.0(2070)	0.00	1.63	98.37	100.00
	BCC-CSM1-1(2070)	0.00	7.08	92.92	100.00
福建 Fujian	当前 Current conditions(1950-2000)	36.72	25.51	6.61	68.84
	CCSM4.0(2070)	55.95	34.04	0.53	90.52
	BCC-CSM1-1(2070)	41.75	24.45	3.02	69.22
台湾 Taiwan	当前 Current conditions(1950-2000)	5.65	16.39	65.16	87.20
	CCSM4.0(2070)	8.89	18.90	64.09	91.88
	BCC-CSM1-1(2070)	15.04	9.73	63.20	87.97
云南 Yunnan	当前 Current conditions(1950-2000)	17.26	30.70	12.75	60.71
	CCSM4.0(2070)	13.56	44.89	3.93	62.38
	BCC-CSM1-1(2070)	13.17	41.05	4.85	59.07
西藏 Tibet	当前 Current conditions(1950-2000)	0.19	1.53	0.57	2.29
	CCSM4.0(2070)	0.47	2.37	0.00	2.84
	BCC-CSM1-1(2070)	0.28	1.05	1.32	2.65
四川 Sichuan	当前 Current conditions(1950-2000)	0.99	1.45	0.07	2.51
	CCSM4.0(2070)	6.02	2.71	0.01	8.74
	BCC-CSM1-1(2070)	4.73	2.09	0.31	7.13
重庆 Chongqing	当前 Current conditions(1950-2000)	0.00	0.00	0.00	0.00
	CCSM4.0(2070)	17.92	1.80	0.00	19.72
	BCC-CSM1-1(2070)	12.74	0.09	0.00	12.83
贵州 Guizhou	当前 Current conditions(1950-2000)	1.04	2.18	2.48	5.70
	CCSM4.0(2070)	8.00	7.55	3.13	18.68
	BCC-CSM1-1(2070)	10.31	3.70	3.94	17.95

表中所列为中、高适生区比例高于 1%的地区。

The regions listed in the table are the areas with medium and high suitable percentage above 1%.

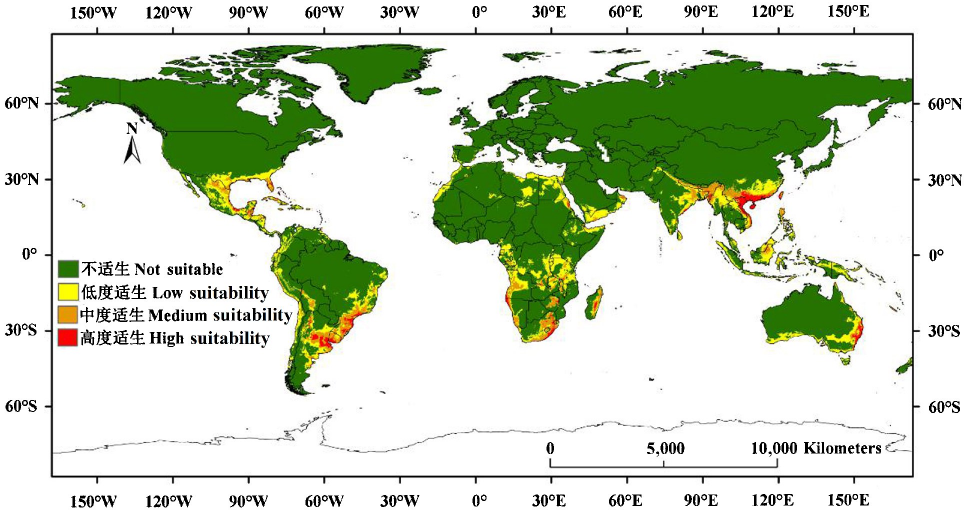

图 3 CCSM4.0 模式下 2070 年白花鬼针草在全球的适生区预测

Fig.3 Potential distribution of *B. alba* in the world under the model predictions by CCSM4.0, year 2070

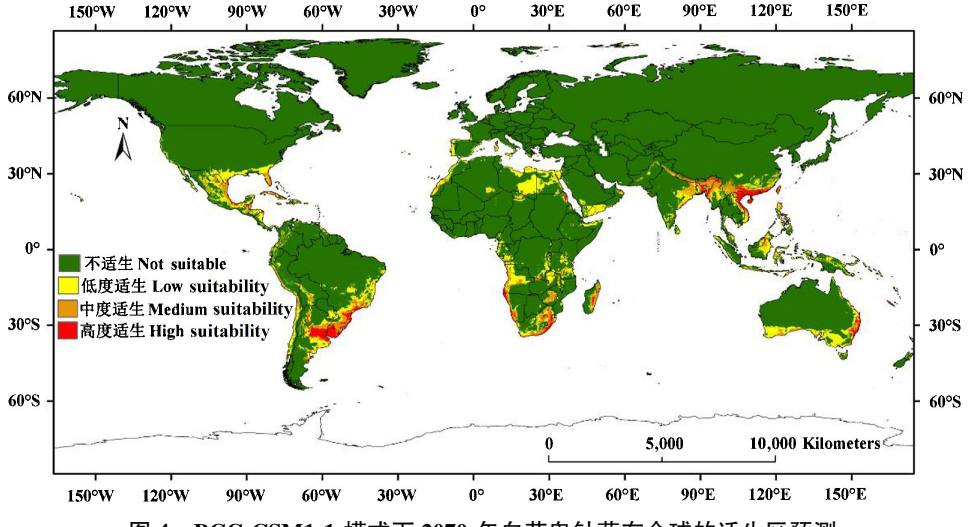

图 4 BCC-CSM1-1 模式下 2070 年白花鬼针草在全球的适生区预测

Fig.4 Potential distribution of *B. alba* in the world under the model predictions by BCC-CSM1-1, year 2070

2.4 2070 年全球气候变化条件下白花鬼针草在中国的适生区

在全球气候变化背景下,2070 年白花鬼针草在我国的适生区有明显扩大的趋势(图 5~6),由当前的 7.74%增加到 10.18%,主要表现在四川、湖南、江西、浙江以及上海的低度适生区面积明显增大,中、高度适生区仍然主要集中在广东、广西、海南、福建、云南、西藏以及台湾省区(表 2)。

2.5 ROC 曲线的精度检验

白花鬼针草在当前环境数据下 MaxEnt 模型训练集的 AUC 值为 0.980,测试集的 AUC 值为 0.975;2070 年 CCSM4.0 模式下 MaxEnt 模型训练集的 AUC 值为 0.977,测试集的 AUC 值为 0.981;2070 年 BCC-CSM1-1 模式下 MaxEnt 模型训练集的 AUC 值为 0.978,测试集的 AUC 值为 0.976。白花鬼针草的 AUC 值均非常接近 1,表明预测结果具有较高的精度,即模型预测分布区与物种实际分布区的拟合度较好。

3 结论与讨论

本研究利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 10.3 对当前以及未来气候环境下白花鬼针草在世界和我国的适生区进行预测,预测结果经 ROC 曲线分析法验证,得到模型的 AUC 值均大于 0.97。一般认为,AUC 值大于 0.9 时诊断价值较高(Walther *et al.*, 2002)。因此,本研究结果具有较高的可信度。

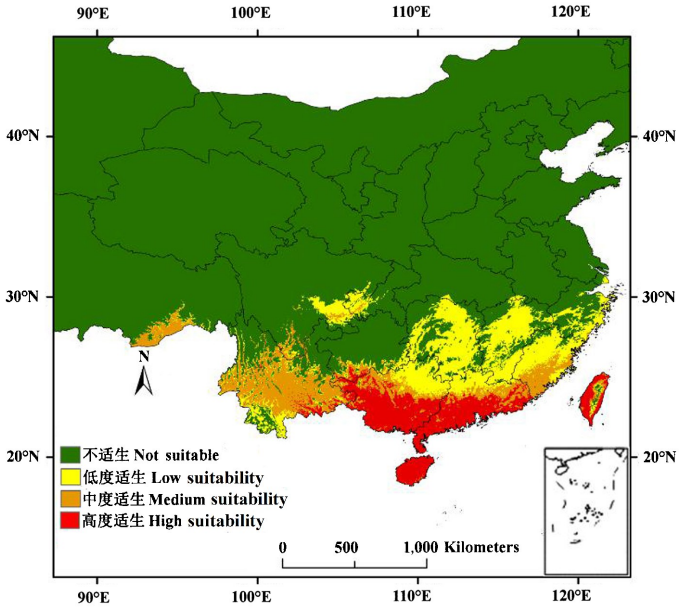

图 5　CCSM4.0 模式下 2070 年白花鬼针草在中国的适生区预测

Fig.5　Potential distribution of *B. alba* in China under the model predictions by CCSM4.0, year 2070

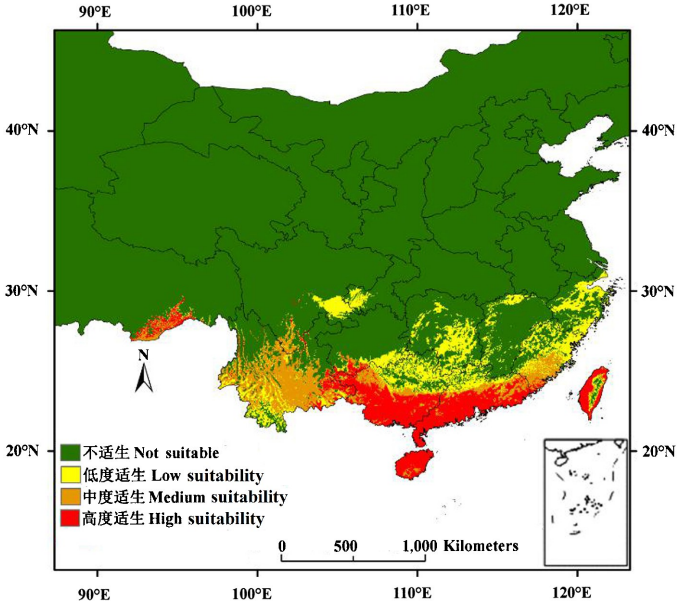

图 6　BCC-CSM1-1 模式下 2070 年白花鬼针草在中国的适生区预测

Fig.6　Potential distribution of *B. alba* in China under the model predictions by BCC-CSM1-1, year 2070

本研究表明,白花鬼针草在全球的主要适生区分布在南北半球维度 15°~30°之间,未来其在全球的适生区变化相对较小,且总适生面积没有进一步扩大。虽然当前资料表明,白花鬼针草源于美洲热带和亚热带地区(Ballard,1986),但低纬度的热带地区并不是白花鬼针草的高度适生区。笔者对我国及东南亚入侵植物调查时也发现,白花鬼针草的暴发区集中在越南北部(与华南地区气候相似)、华南地区以及台湾(Ong *et al.*,2008),而在菲律宾、马来西亚以及越南南部少见。这种分布特点可能与白花鬼针草对温度的适应特性相关。本研究利用刀切法评价 68 个环境变量对白花鬼针草分布状况的贡献值时发现,有 12 个环境变量对白花鬼针草分布的贡献值较大,这些环境变量均与温度相关,而与降水相关的环境变量的贡献值相对较小。因此,温度在白花鬼针草分布特征中扮演着重要角色,但相关机制还不明确。

在未来全球气候变化的影响下,白花鬼针草在我国的低度适生面积有明显变化,但其适生区的核心区域没有明显改变,这与以往刺轴含羞草和五爪

金龙 *Ipomoea cairica* (L.) Sweet 的分布预测结果(岳茂峰等,2011b、2013)相似。笔者调查发现,白花鬼针草在广东和广西中南部、海南以及台湾均有分布(Ong *et al.*,2008)。虽然当前还没有白花鬼针草在云南、福建和西藏分布的报道,但在笔者调查中发现福建南部已经有白花鬼针草的存在。预测结果表明,云南和西藏南部为白花鬼针草的中、高度适生区,有白花鬼针草入侵及暴发的可能。可见,白花鬼针草在我国南部均有较大的适生区,但主要集中在南部沿边及沿海省区。随着"一带一路"战略的实施,我国从东南亚以及南亚进口的农矿产品日益增多,白花鬼针草入侵我国的风险增大。因此,福建、台湾、西藏、云南等省区检疫部门应加强对白花鬼针草的检疫。在已经大面积暴发的区域如广东、广西、海南应该制定相应的应急措施,防止其进一步蔓延扩散。

参考文献

陈丽娜, 王声晓, 郑若兰, 胡绍庆, 2016. 基于 MaxEnt 模型的野生樱浙江适生区研究. 浙江理工大学学报(自然科学版), 35(1): 122-128.

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.

齐国君, 陈婷, 高燕, 雷妍圆, 吕利华, 2015. 基于 Maxent 的大洋臀纹粉蚧和南洋臀纹粉蚧在中国的适生区分析. 环境昆虫学报, 37(2): 219-223.

田兴山, 岳茂峰, 冯莉, 杨彩宏, 杨红梅, 2010. 外来入侵杂草白花鬼针草的特征特性. 江苏农业科学 (5): 174-175.

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.

邢福武, 曾庆文, 谢左章, 2007. 广州野生植物. 贵阳: 贵州科技出版社.

徐军, 曹博, 白成科, 2015. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测. 生态学杂志, 34(12): 3354-3359.

岳茂峰, 樊蓓莉, 田兴山, 冯莉, 周先叶, 李伟华, 2011a. 广东省农业生态系统外来入侵植物的种类调查与危害评估. 生物安全学报, 20(2): 141-146.

岳茂峰, 冯莉, 田兴山, 杨彩宏, 吕利华, 李伟华, 2011b. 基于 MaxEnt 的五爪金龙在中国的适生分布区预测// 张朝贤. 农田杂草与防控. 北京: 中国农业科学技术出版社: 99-103.

岳茂峰, 冯莉, 田兴山, 杨彩宏, 2013. 基于 MaxEnt 的入侵植物刺轴含羞草的适生分布区预测. 生物安全学报, 22(3): 173-180.

Ballard R. 1986. *Bidens pilosa* complex (Asteraceae) in North and Central America. *American Journal of Botany*, 73(10): 1452-1465.

Costa H, Ponte N B, Azevedo E B and Gil A, 2015. Fuzzy set theory for predicting the potential distribution and cost-effective monitoring of invasive species. *Ecological Modelling*, 316: 122-132.

Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J R, Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberón J, Williams S, Wisz M S and Zimmermann N E, 2006. Novel methods improve prediction of species′ distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2): 129-151.

Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E and Yates C J, 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1): 43-57.

Lu Y B, Huang D L, Wang X, Wu Z J and Tang S Q, 2014. Microsatellite markers for the invasive species *Bidens alba* (Asteraceae). *Applications in Plant Sciences*, 2(5): apps. 1400008.

Ong P L, Weng B C, Lu F J, Lin M L, Chang T T, Hung R P and Chen C H, 2008. The anticancer effect of protein-extract from *Bidens alba* in human colorectal carcinoma SW480 cells via the reactive oxidative species- and glutathione depletion-dependent apoptosis. *Food and Chemical Toxicology*, 46(5): 1535-1547.

Phillips S J, Anderson R P and Schapire R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.

Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O and Bairlein F, 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389-395.

(责任编辑:杨郁霞)