

新疆千里光 *Senecio jacobaea* 在中国的 适生区预测

田忠赛, 徐琳, 程丹丹*

中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074

摘要:【背景】菊科植物新疆千里光原产于欧亚大陆,在北美和澳洲为入侵植物,目前在中国只有新疆有分布记录。新疆千里光一旦成为入侵植物,将对农业、畜牧业和人类健康都可能产生危害,所以需要评估其在中国的扩散趋势。【方法】搜集新疆千里光在中国和世界其他地区的分布记录,结合当前和未来(2050年)气候条件下19种生物气候变量,应用Maxent模型和DivaGis软件,定量预测新疆千里光在中国目前和未来的潜在分布区域;并通过接受者操作特征曲线(ROC)分析法对模型进行精度检验。另外,通过Maxent给出新疆千里光在欧洲(原产地)、北美洲和大洋洲(入侵地)以及中国等4个分布区的年均温度和年均降水量的气候阈值。【结果】用中国和全球分布的数据预测的结果有些差异。前者结果表明除了新疆地区,其他省份几乎没有新疆千里光的适生区;而后者显示在中国其他几个省份也有可能分布,且在甘肃四川交界处有较高适生性。前者模型精确度较高,但2个结果都显示新疆千里光在中国目前和未来的分布区大部分还是在新疆地区。中国分布区年均温度和年均降水量的阈值比其他2个地区都低。【结论与意义】新疆千里光在当前和未来气候条件下在中国的扩散趋势较弱,基本局限于新疆地区。用中国分布数据预测优于全球分布数据预测结果,新疆千里光不同分布区的气候阈值的差异揭示分布于中国的新疆千里光与其他地区的种群的生态位有所不同,可能是一个新的亚种,希望未来能进行进一步的研究。

关键词: 菊科; 入侵植物; 入侵风险; 最大熵模型

Prediction of the potential distribution of *Senecio jacobaea* in China

Zhong-sai TIAN, Lin XU, Dan-dan CHENG*

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract:【Background】*Senecio jacobaea*, a common weed native in Eurasia and invasive in North American, Australia and New Zealand. However, the occurrence records of this species in Xinjiang, China, are limited. Once successfully introduced, *S. jacobaea* can be damaging to crop, livestock farming, and human health. Hence, it is urgent to estimate the potential distribution of *S. jacobaea* in China.【Method】Based on 19 current and predicted (2050) climate variables and occurrence records from China and the other areas in the world, we quantitatively predicted the current and future potential distribution of *S. jacobaea* in China with the Maxent and DivaGIS. The predicted models were evaluated by the receiver operator characteristic (ROC) curve. In addition, we calculated the climate thresholds of annual mean temperature and annual precipitation of the *S. jacobaea* distribution in different areas (Europe — the native area, North America and Oceania — the invasive area, and China) by modeling in Maxent.【Result】The model built with occurrence data from China is better than that with the data from the whole world in relation to ROC curve and comparison to the occurrence record from China, but results of both model show that the current and future distribution area of *S. jacobaea* is in Xinjiang, China. The annual average temperature and precipitation in China are lower than in other regions for *S. jacobaea* invasion.【Conclusion and significance】*S. jacobaea* is and will be limited in Xinjiang China. The differences between two predicting models and different climatic thresholds of *S. jacobaea* distribution in China compared to that in other regions indicate that the populations of *S. jacobaea* in Xinjiang differ from those in other regions and may be a different subspecies.

Key words: Asteracea; invasive plant; invasive risk; Maxent

收稿日期(Received): 2015-07-03 接受日期(Accepted): 2015-11-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(CUG130411); 国家自然科学基金(C031302)

作者简介: 田忠赛, 女, 硕士研究生。研究方向: 植物生态学。E-mail: zhongsai_tian@qq.com

* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: dandan.cheng@cug.edu.cn

目前,我国全部已查明的外来入侵种 529 种中,植物占 265 种(Xu *et al.*, 2012)。虽然入侵植物大多数是从其他国家引入,但不能以行政区划为依据定义入侵植物,也不能把来自国外作为入侵的唯一标准(闫小玲等, 2012; Pyšek *et al.*, 2004)。中国地域辽阔,东西南北的气候、地形等差异很大,地区间相互入侵是正常现象。因此,当一个中国土著种从原产地进入一个新分布区且空间跨度较大的,即使仍在中国境内也应该作为入侵分布而视为外来种(就地域而非国界而言)(闫小玲等, 2014)。如新疆白芥 *Sinapis arvensis* L., 原产于欧洲、西亚、中亚,在中国只在新疆野生,但目前已经基本覆盖全国并被列为入侵植物(万方浩等, 2012; 徐海根和强胜, 2004, 2011)。

在入侵生物学领域,最大熵(maximum entropy, Maxent)模型被广泛运用于预测外来入侵物种的潜在分布,能够在分布点较少的情况下得到较满意的结果。国内已利用 Maxent 模型成功进行了入侵植物紫茎泽兰 *Eupatorium adenophora* Spreng.、飞机草 *Chromolaena odorata* (L.) R.M. King & H. Rob.、加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L.、薇甘菊 *Mikania micrantha* Kunth (Weber *et al.*, 2008)、黄顶菊 *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze、草胡椒 *Peperomia pellucida* L.、刺轴含羞草 *Mimosa pigra* L.、南美蟛蜞菊

Wedelia trilobata (L.) Pruski、齿裂大戟 *Euphorbia dentata* Michx. 等在我国的分布区及潜在分布区预测(曹向锋等, 2010; 董旭等, 2013; 雷军成和徐海根, 2010; 刘勇涛等, 2013; 王翀等, 2014; 徐小伟等, 2014; 杨波等, 2009; 岳茂峰等, 2013; 张路, 2015)。另外,一些研究运用多种模型预测植物的分布区,其比较结果都表明 Maxent 的稳定性最好(曹向锋等, 2010; 刘欣, 2012; 王运生等, 2007, 2009)。

新疆千里光 *Senecio jacobaea* (Asteraceae), 异名 *Jacobaea vulgaris* Gaertn., 属菊科千里光属, 中文名又名异果千里光、臭千里光(安争夕等, 1999; 刘刚, 2007)。多年生草本,生于疏林或草地,在土地、路旁和牧场生长丰富(林容和陈艺林, 1985)。新疆千里光原产于欧亚大陆,在全球分布广泛,在欧洲、北美洲、大洋洲、亚洲、非洲、南美洲都有其分布记录(Bain, 1991; Cameron, 1935; Coombs *et al.*, 1991; Hodálová *et al.*, 2015; McLaren *et al.*, 2000)(图 1)。新疆千里光在中国分布于新疆北部阿尔泰、布尔津、北屯、奇台、阜康、乌鲁木齐、石河子、玛纳斯、和布克赛尔、额敏、塔城、托里、温泉、霍城、沙湾、察布查尔、伊宁、特克斯、巩留、塔什库尔干等地(安争夕等, 1999)及江苏(江阴);但据可靠记录,应该只分布在新疆地区,在江苏的出现可能为引种逸生的结果(林容和陈艺林, 1985)。

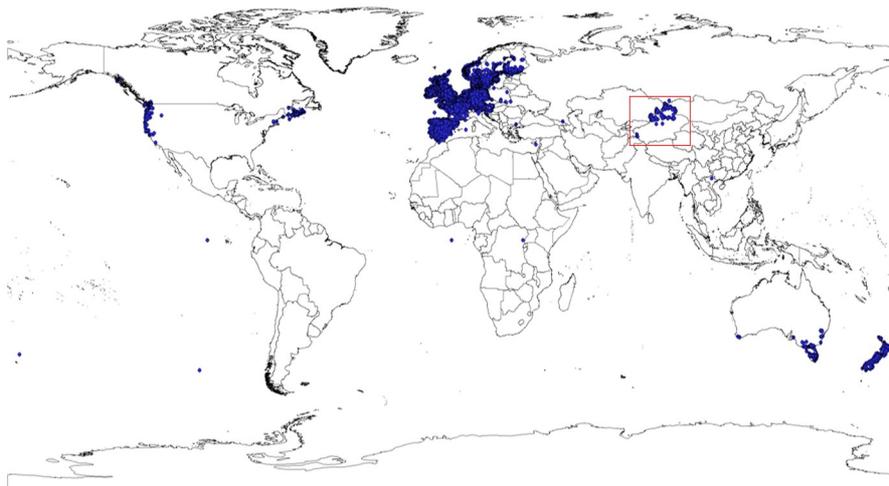


图 1 新疆千里光在世界的分布记录

Fig.1 Occurrence records of *S. jacobaea* in the world

蓝色点为新疆千里光的记录点,红色框内为新疆分布记录点。

One dot represents one record, and the dots inside the red box are within Xinjiang, China.

新疆千里光含有吡咯里西啶生物碱(PAs),这种生物碱对食草动物和致病真菌有化学防御作用(Hart-

mann, 1999),能导致细胞畸变、癌变,造成动物的急性、亚急性或慢性病变(王跃虎等, 2002)。同时,新疆千里

光扩散较快,在受影响地区,其种子会发芽并与牧草植物竞争空间和资源,导致牧场生产率下降,尤其对澳大利亚的农业和生态系统造成了很大影响(McLaren *et al.*, 2000)。对新疆千里光的控制主要为牧场管理、机械去除和化学防治,澳大利亚、新西兰、北美和加拿大开展了生物防治(Leiss, 2011)。

新疆千里光被纳入中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录(刘刚, 2007),在中国最早记录于 1951 年,目前并未扩散,在国内还不是入侵植物,将其放入有害生物名录也许是为了防止新疆千里光进一步扩散到新疆以外的其他地区,或是为了避免从其他国家带入中国沿海等地。

虽然新疆千里光目前只分布在新疆地区,但是仍存在从新疆扩散到中国其他地区成为入侵种的可能性。另外,新疆千里光的扩散能力和繁殖能力较强,且在其他国家地区分布广泛,为何在中国只分布在新疆地区?因此应进一步预测新疆千里光的分布区,观察在未来的分布趋势,判断是否会成为入侵种及入侵不同地区的可能性。若发现有入侵风险,可以及早提出预防措施,将其控制在一定范围内。本文通过利用中国和全球分布数据分别预测新疆千里光在中国目前和未来的潜在分布区,判断新疆千里光在中国是否会扩散到其他地区,以及通过这 2 种方法预测结果比较中国的新疆千里光和其他地区新疆千里光的不同。

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

新疆千里光在中国的地理分布信息来自中国数字植物标本馆(Chinese Virtual Herbarium, CVH)。根据地名查找相应的经纬度,经核对后录入到 Excel 表中,删除经纬度不明确的记录,共有 127 个分布记录。

新疆千里光在世界的地理分布信息来自全球生物多样性信息网络(global biodiversity information facility, GBIF),选取 1950—2000 年的数据进行分布区预测。在 GBIF 下载的分布数据不包括中国,为了能预测在中国的分布情况,加上了中国的分布记录点。另外,将新疆千里光的分布数据按地区分为欧洲、北美洲、大洋洲和中国 4 个部分,以便比较不同分布区的气候阈值。

通过 Worldclim 网站下载当前的环境数据(1950—2000 年监测数据)以及 IPCC 报告中各种能源的平衡发展 SRES AIB 模式下美国国家大气研究中心(NCAR)、英国气象局(UKMO)和加拿大气候中心(CCCma)预测的 2050 年全球环境数据,共 19 个生物气候变量(表 1)。地图资料从 DivaGIS 官方网站(<http://www.divagis.org>)下载。

表 1 建模中使用的环境变量

Table 1 Environmental variables used in the models

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 the coldest season
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 建模方法

运用 Maxent 模型对新疆千里光在我国的潜在分布区进行预测,包括当前气候条件下的分布区预测及 2050 年气候条件下的分布区预测。为提高准确性,设

置时随机选取 25% 的分布点作为测试集(test date)、75% 作为训练集(training date)。预测 2050 年新疆千里光在中国的分布区时,为排除边缘值的影响,选择 10% 的训练阈值(10 percentile training presence)。

用全球数据预测新疆千里光分布区时的方法与用中国的分布数据预测方法相同。预测当前气候条件下的分布区时,根据现有的新疆千里光在中国的分布记录点来判断,用中国的分布数据预测新疆千里光结果要好于用全球分布数据预测,因此在预测2050年新疆千里光在中国的分布时,只采用了中国的分布数据。

用欧洲、北美洲、大洋洲和中国的分布数据分别在Maxent中得到气候阈值,温度和降水是决定植物分布的主要因子,所以选取年均温度和年均降水量分析不同分布区的气候差异。

2 结果与分析

2.1 新疆千里光在中国的分布记录

1951—1960年,新疆千里光有42个记录点,分布在新疆的阿尔泰地区、昌吉回族自治州、乌鲁木齐、博尔塔拉回族自治州、塔城地区和伊犁地区(图2A)。1961—1970年巴音郭楞蒙古自治州(图2B)、1971—1980年喀什地区(图2C)、1981—2002年阿克苏地区(图2D)均分别出现一个新分布记录点。从上述变化图可以看出,新疆千里光自1950年至今没有从新疆扩散到中国其他地区,且分布不很广泛,基本集中在北疆地区。

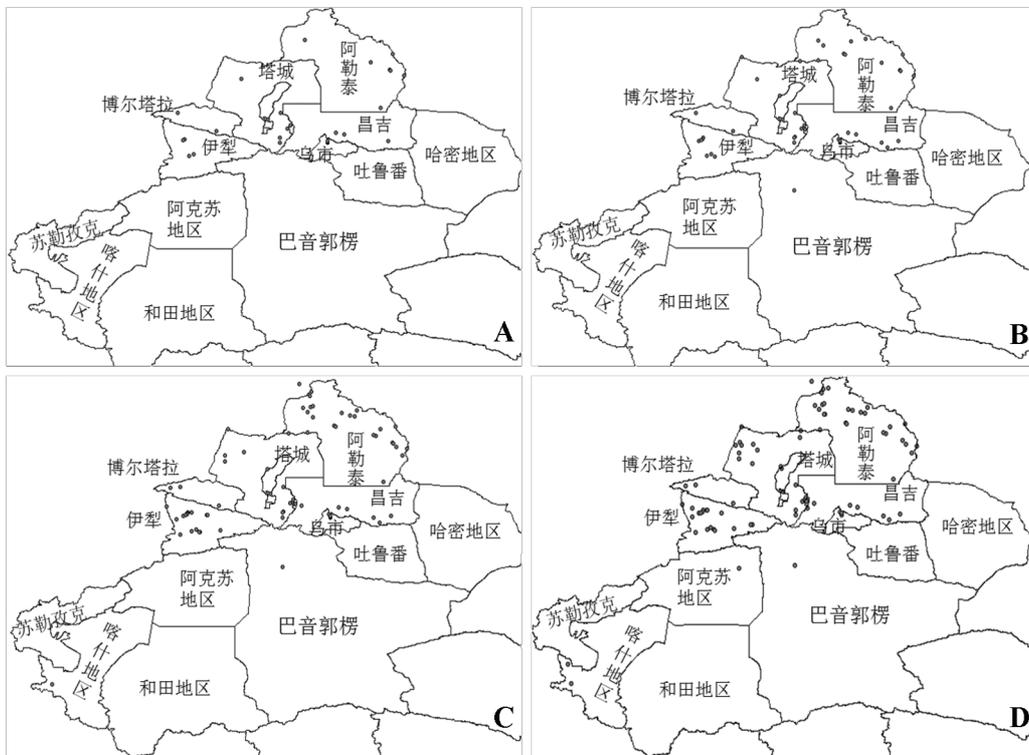


图2 新疆千里光在中国的分布记录(1951—2002年)

Fig.2 Occurrence records of *S. jacobaea* in China from 1951 to 2002

A: 1951—1960; B: 1961—1970; C: 1971—1980; D: 1981—2002.

2.2 在当前气候条件下新疆千里光的适生区预测

新疆的山脉地形特点是山脉与盆地相间排列,盆地与高山环抱,喻称“三山夹二盆”。北部阿尔泰山,南部为昆仑山系,天山横亘于新疆中部,把新疆分为南北2个部分。新疆千里光的高适生区和适生区基本位于北疆的阿勒泰地区、伊犁地区、塔城地区、博尔塔拉蒙古自治州和昌吉回族自治州,与收集到的目前的分布记录位置和密集程度基本一致。在阿克苏地区、苏勒孜克自治州(克孜勒苏柯

尔克孜自治州)、哈密和吐鲁番分布记录较少,但有低适生区和边缘适生区,甚至有一定面积的高适生区。另外,在甘肃酒泉市和陕西关中地区有新疆千里光的可能分布区,但为低适生区,有新疆千里光的可能性比较小(图3)。

用全球分布数据预测的新疆的总体潜在分布区面积和地区与仅用中国分布数据预测的结果基本一致,但是适应性等级没有仅用中国分布数据预测显示的高。值得注意的是,结果显示在西藏、甘

肃、四川、陕西、重庆、湖北、湖南、云南、台湾也有潜在分布区,大部分为低适生区,但在甘肃和四川的交界处还有一些较高的适应性等级区域(图 4)。

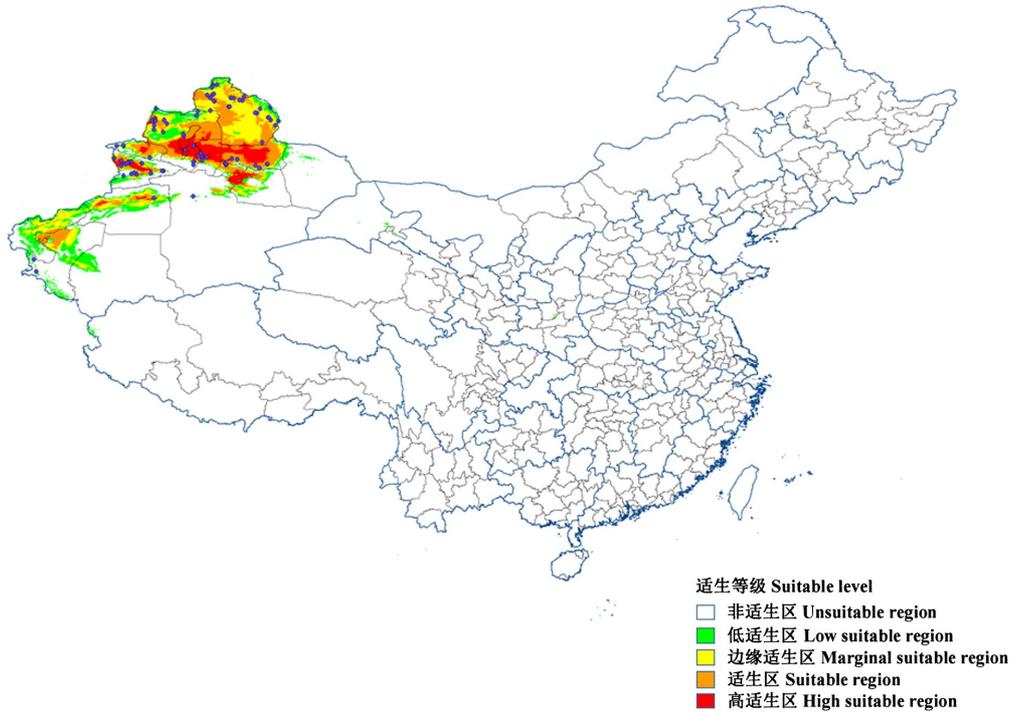


图 3 用中国分布记录数据在 Maxent 模型中预测的新疆千里光在中国的潜在分布区
Fig.3 Prediction of potential distribution of *S. jacobae* in China with occurrence records in China by Maxent

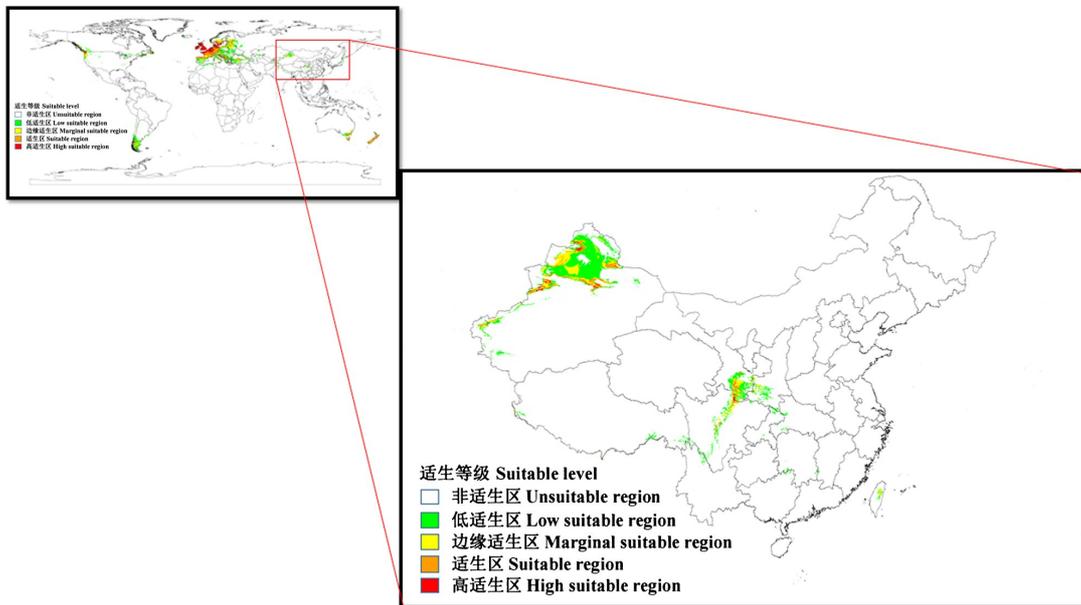


图 4 用全球分布记录数据在 Maxent 模型中预测的新疆千里光在世界的潜在分布区
Fig.4 Prediction of potential distribution of *S. jacobae* with the global occurrence records by Maxent

2.3 2050 年全球气候条件下新疆千里光的适生区预测

2050 年新疆千里光未来在中国的分布区略有增大,总的分布位置和目前保持一致,阿克苏地区

和苏勒孜克自治州的适应区面积变大,且部分地区表现为高适应性,表明未来扩散到该地可能性大。在新疆以外其他地方的适应性等级减小,在其他地区分布的可能性更小(图 5)。

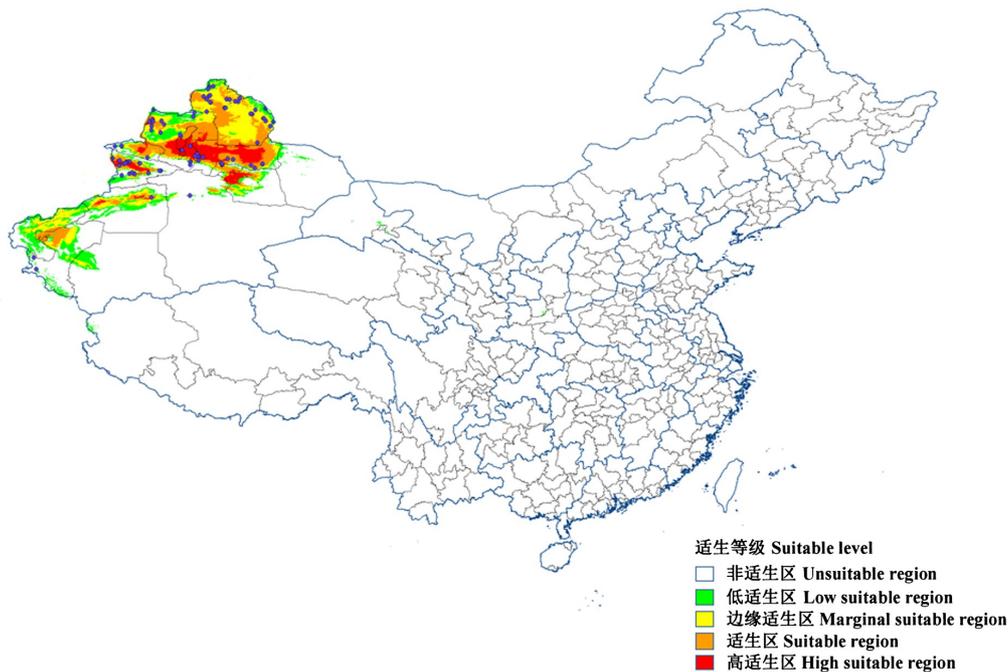


图 5 用中国分布记录数据在 Maxent 模型中预测的 2050 年新疆千里光在中国的适生区

Fig.5 Prediction of potential distribution of *S. jacobaea* in China with Chinese occurrence records by Maxent in 2050

2.4 气候阈值

新疆千里光在中国分布区的年均温阈值为 $-10 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右存在概率最大(图 6A)。在欧洲、北美洲和大洋洲的年均温阈值基本在 $0 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;在欧洲 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右存在概率最大,大洋洲为 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$,北美洲为 5 和 $11 \text{ }^{\circ}\text{C}$,可能因为新疆千里光在北美洲的分布是在东西海岸,东海岸和西海岸存在气候差异(图 6B、C、D)。

新疆千里光在中国分布区的年均降水量阈值为 $0 \sim 1000 \text{ mm}$,在 $100 \sim 300 \text{ mm}$ 时存在概率较大(图 7A);欧洲分布区的年均降水量的阈值基本在 $500 \sim 2500 \text{ mm}$ 之间, 700 mm 左右时存在概率最大(图 7B);北美洲分布区的年均降水量的阈值为 $0 \sim 5000 \text{ mm}$, 1100 mm 时存在概率最大(图 7C);大洋洲分布区的年均降水量在 2100 mm 时对新疆千里光分布有抑制,超过 2100 mm 后随降水量增加新疆千里光存在概率增大(图 7D)。

3 讨论

标本记录、调查报告和发表的文献都为一个物种在给定时间和地点的存在提供了明确的证据。虽然这些数据来源并不能表明物种在被发现之前存在了多久,但是植物的标本记录相对于其他方式可以提供一个物种出现的更准确的地点和时间(Wang & Wang, 2006)。本试验使用的当前中国的

分布记录数据来源于 CHV,基本为植物标本记录,全球的分布数据来源于 GBIF,记录包括标本记录、人为观察、文献记录和机器记录等。另外,对数据进行了筛选与整理,将不准确的记录删除,所以使用的分布记录可靠,预测的结果也较可靠。

利用 Maxent 模型计算的 ROC 曲线可以检验预测的精确度。AUC (areas under curve, ROC 曲线下面积)值为 ROC 曲线与横坐标围成的面积值,AUC 值大于 0.5 时,AUC 值越大,表示输入的环境变量与该物种的地理分布相关性越大,模型判断物种在该区域有无分布的能力就越强,其预测效果也就越好(雷军成和徐海根, 2010)。在预测新疆千里光在中国的分布时的训练数据和验证数据的 AUC 值分别为 0.977 和 0.967 ,说明模型与实际拟合度很好,能更好地模拟新疆千里光在我国分布,结果可靠。用全球分布数据预测新疆千里光的分布区时的训练数据和验证数据的 AUC 值分别为 0.858 和 0.856 。该结果没有仅用中国的分布数据预测的精度高,但结果仍较好。预测结果显示新疆千里光在中国的入侵风险性较小,基本分布在新疆地区。但是如果其成为入侵种则会给当地的生态系统和人类健康带来一定危害,所以应该加大监管力度,在适生区进行合理防治以防止其扩散,在非适生区也要进行监控,将其控制在一定范围内。

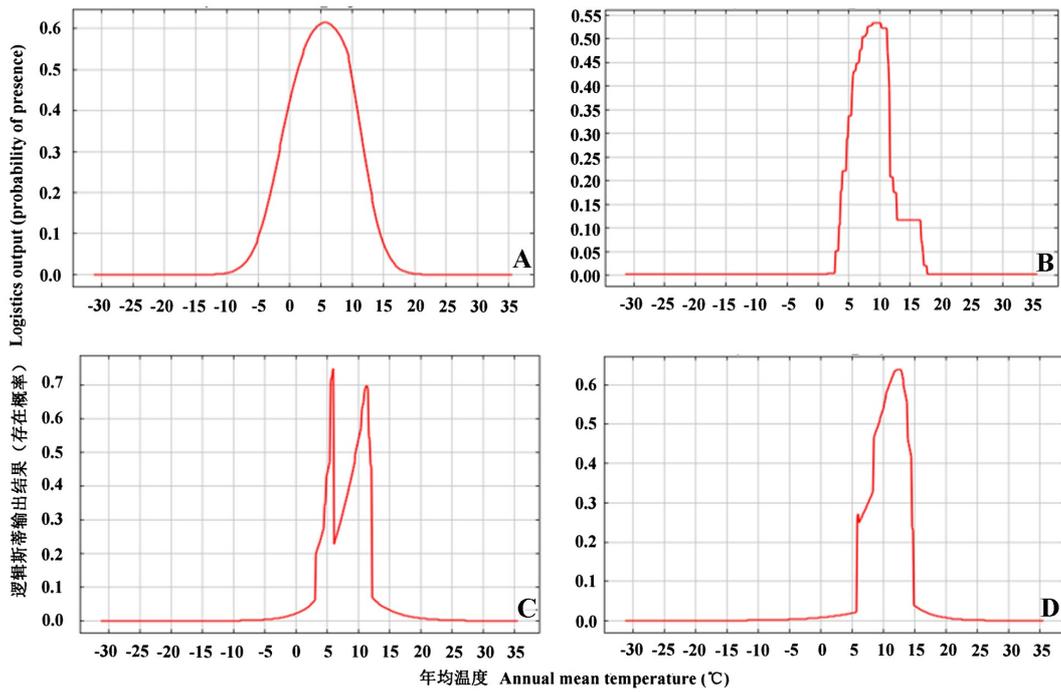


图 6 影响新疆千里光地理分布的年均温度与新疆千里光在不同地区分布概率的关系

Fig.6 Relationship of annual mean temperature and the distribution probability of *S. jacobaea* in different regions

A: 中国; B: 欧洲; C: 北美洲; D: 大洋洲。

A: China; B: Europe; C: North America; D: Oceania.

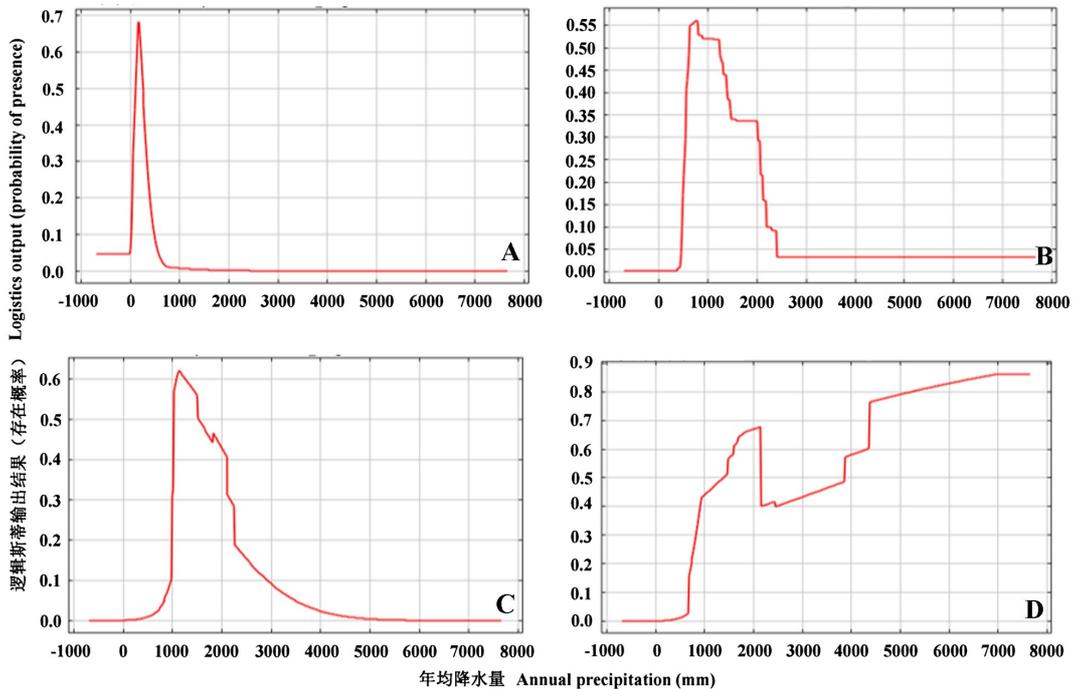


图 7 影响新疆千里光地理分布的年均降水量与新疆千里光在不同地区分布概率的关系

Fig.7 Relationship of annual precipitation and the distribution probability of *S. jacobaea* in different regions

A: 中国; B: 欧洲; C: 北美洲; D: 大洋洲。

A: China; B: Europe; C: North America; D: Oceania.

中国分布数据和全球分布数据的预测结果均表示新疆千里光目前和未来都还在新疆大量分布,虽然用全球分布数据预测一些其他省份有潜在分布

区,但适应性等级较低,显示的一些可能分布区并没有发现有新疆千里光的存在。用全球分布数据预测的 AUC 值没有仅用中国分布数据高,所以对于预测

的新疆千里光在中国的潜在分布区,用中国分布数据预测的结果更可靠。不过 2 个结果都显示在陕西和甘肃有潜在分布区,且用全球分布数据预测的结果显示,在甘肃、四川有较高的适应性等级,可以重点到陕西、甘肃、四川进行考察确认其是否有分布。

用世界分布数据和中国数据预测结果的差异一方面可能由于全球数据太多导致预测精度不高,另一方面可能由于中国的新疆千里光和其他国家地区的新疆千里光存在差异。新疆千里光在世界范围内分布广泛,但在中国仅分布在新疆。另外,通过气候阈值比较的结果可以看出,新疆分布区的年均温度和年均降水量与其他 3 个分布区差异较大,年均温度较低,年均降水量较少(图 6、7),进一步说明在中国的新疆千里光与其他地区的新疆千里光可能存在差异。Hodálová *et al.*(2010、2015)曾用 AFLP 分析比较在欧洲采集的新疆千里光的细胞型,鉴定出新的亚种。在以后的研究中,可以通过形态比较、细胞型比较、DNA 序列信息学分析及 PAs 多样性分析等方法进一步确认分布于中国的新疆千里光和其他地区新疆千里光的不同。

参考文献

- 安争夕,魏岩,地立夏提,沈观冕,翟大彤,1999. 新疆植物志(第五卷)(菊科). 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社.
- 曹向锋,钱国良,胡白石,刘凤权,2010. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 21(12): 3063-3069.
- 董旭,陈秀芝,姜玉霞,郭水良,2013. 外来入侵植物草胡椒在我国的潜分布范围预测. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 39(6): 621-628.
- 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.
- 林容,陈艺林,1985. 中国植物志第 74 卷,菊科(一). 北京:科学出版社.
- 刘刚,2007. 《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》发布. 农药市场信息(13): 38-39.
- 刘欣,2012. 基于 GARP 和 MAXENT 的空心莲子草在中国的入侵风险预测. 硕士学位论文. 济南:山东师范大学.
- 刘勇涛,戴志聪,薛永来,孙见凡,朱方,杜道林,2013. 外来入侵植物南美蟛蜞菊在中国的适生区预测. 广东农业科学, 40(14): 174-178.
- 万方浩,刘全儒,谢明,2012. 生物入侵:中国外来入侵植物图鉴. 北京:科学出版社.
- 王翀,林慧龙,何兰,曹焯程,2014. 紫茎泽兰潜在分布对气候变化响应的研究. 草业学报, 23(4): 20-30.
- 王跃虎,司红丽,王建华,2002. 含双稠吡咯啉生物碱的植物及其对畜牧业的危害. 饲料博览(9): 30-33.
- 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.
- 王运生,谢丙炎,万方浩,肖启明,戴良英,2009. 应用生态位模型研究外来入侵物种生态位漂移. 生态学报, 28(10): 4974-4981.
- 徐海根,强胜,2004. 中国外来入侵物种编目. 北京:中国环境科学出版社.
- 徐海根,强胜,2011. 中国外来入侵生物. 北京:科学出版社.
- 徐小伟,泽桑梓,杨斌,季梅,2014. 薇甘菊的分布危害、生物防治及资源化利用研究现状与展望. 热带农业科学, 34(12): 75-84.
- 闫小玲,寿海洋,马金双,2012. 中国外来入侵植物研究现状及存在的问题. 植物分类与资源学报, 34(3): 287-313.
- 闫小玲,刘全儒,寿海洋,曾宪锋,张勇,陈丽,刘演,马海英,齐淑艳,马金双. 2014. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析. 生物多样性, 22(5): 667-676.
- 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.
- 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.
- 张路,2015. 基于 MAXENT 模型预测齿裂大戟在中国的潜在分布区. 生物安全学报, 24(3): 194-200.
- Bain J F, 1991. The biology of Canadian weeds. 96. *Senecio jacobaea* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 71(1): 127-140.
- Cameron E, 1935. A study of the natural control of ragwort (*Senecio jacobaea* L.). *The Journal of Ecology*, 23: 265-322.
- Coombs E M, Bedell T E and McEvoy P B, 1991. Tansy ragwort (*Senecio jacobaea*): importance, distribution, and control in Oregon // James L F, Evans J O, Ralphs M H and Child R D. *Noxious Range Weeds*. San Francisco, California, USA: Westview Press: 419-428.
- Hartmann T, 1999. Chemical ecology of pyrrolizidine alkaloids. *Planta*, 207(4): 483-495.
- Hodálová I, Jun P M, Vinikarová A, Grulich V and Rotreklová O, 2010. A new cytotype of *Jacobaea vulgaris* (asteraceae): frequency, morphology and origin. *Nordic Journal of Botany*, 28(4): 413-427.
- Hodálová I, Mere'a Jr P, Kučera J, Marhold K, Kempa M, Olšavská K and Slovák M, 2015. Origin and systematic position of *Jacobaea vulgaris* (Asteraceae) octoploids: genetic

- and morphological evidence. *Plant Systematics and Evolution*, 301(5): 1517–1541.
- Leiss K A, 2011. Management practices for control of ragwort species. *Phytochemistry Reviews*, 10(1): 153–163.
- McLaren D A, Ireson J E and Kwong R M, 2000. Biological control of ragwort (*Senecio jacobaea* L.) in Australia//Spencer N R. *Proceedings of the X International Symposium on Biological Control of Weeds*. Bozeman, Montana, USA: Montana State University: 67–79.
- Pyšek P, Richardson D M, Rejmánek M, Webster G L, Williamson M and Kirschner J, 2004. Alien plants in checklists and floras: towards better communication between taxonomists and ecologists. *Taxon*, 53(1): 131–143.
- Wang R and Wang Y Z, 2006. Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China. *Diversity and Distributions*, 12(4): 397–408.
- Xu H G, Qiang S, Genovesi P, Ding H, Wu J, Meng L, Han Z M, Miao J L, Hu B S, Guo J Y, Sun H Y, Huang C, Lei J C, Le Z F, Zhang X P, He S P, Wu Y, Zheng Z, Chen L and Jarošík V, 2012. An inventory of invasive alien species in China. *NeoBiota*, 15: 1–26.

(责任编辑:郭莹)

(上接第 98 页)

- Russell J A and Moran N A, 2006. Costs and benefits of symbiont infection in aphids: variation among symbionts and across temperatures. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273: 603–610.
- Sandström J P, Russell J A, White J P and Moran N A, 2001. Independent origins and horizontal transfer of bacterial symbionts of aphids. *Molecular Ecology*, 10(1): 217–228.
- Scarborough C L, Ferrari J and Godfray H C J, 2005. Aphid protected from pathogen by endosymbiont. *Science*, 310: 1781.
- Shigenobu S, Watanabe H, Hattori M, Sakaki Y and Ishikawa H, 2000. Genome sequence of the endocellular bacterial symbiont of aphids *Buchnera* sp. APS. *Nature*, 407: 81–86.
- Simon J C, Carré S, Boutin M, Prunier-Leterme N, Sabater-Muñoz B, Latorre A and Bournoville R, 2003. Host-based divergence in populations of the pea aphid: insights from nuclear markers and the prevalence of facultative symbionts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270: 1703–1712.
- Tsuchida T, Koga R, Shibao H, Matsumoto T and Fukatsu T, 2002. Diversity and geographic distribution of secondary endosymbiotic bacteria in natural populations of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*. *Molecular Ecology*, 11(10): 2123–2135.
- Tsuchida T, Koga R and Fukatsu T, 2004. Host plant specialization governed by facultative symbiont. *Science*, 303: 1989.
- Turak E, Talent R, Sunnucks P and Hales D F, 1998. Different responses to temperature in three closely-related sympatric cereal aphids. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 86(1): 49–58.
- Unterman B M, Baumann P and McLean D L, 1989. Pea aphid symbiont relationships established by analysis of 16S rRNAs. *Journal Bacteriology*, 171(6): 2970–2974.
- van der Wilk F, Dulleman A M, Verbeek M and van den Heuvel J F J M, 1999. Isolation and characterization of APSE-1, a bacteriophage infecting the secondary endosymbiont of *Acyrtosiphon pisum*. *Virology*, 262(1): 104–113.
- Weldon S R, Strand M R and Oliver K M, 2013. Phage loss and the breakdown of a defensive symbiosis in aphids. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280: 2012–2103.
- Wilkinson T L, Koga R and Fukatsu T, 2007. Role of host nutrition in symbiont regulation: impact of dietary nitrogen on proliferation of obligate and facultative bacterial endosymbionts of the pea aphid *Acyrtosiphon pisum*. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(4): 1362–1366.

(责任编辑:郭莹)