

应用生态位模型研究外来入侵物种生态位漂移

王运生^{1,2}, 谢丙炎^{1,*}, 万方浩³, 肖启明², 戴良英²

(1. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081; 2. 湖南农业大学生物安全科学技术学院, 长沙 410128;
3. 中国农业科学院植物保护研究所(南院), 北京 100081)

摘要:由于基础生态位和实际生态位的改变, 外来入侵物种在入侵地成功定殖、扩散后常会发生生态位漂移, 而物种生态位漂移往往很难直接证明。生态位模型在假设入侵物种的生态位需求保守的前提下, 以物种在其原产地的生态位需求为基础, 预测其在入侵地的潜在分布, 通过比较预测分布与实际分布的差异可以从一定程度上得到外来入侵物种的生态位是否发生漂移的间接证据。以我国入侵杂草胜红蓟在原产地的生态位需求为基础, 应用生态位模型预测其在其他地区的潜在分布。研究结果表明, 生态位模型可以很好地预测胜红蓟在亚太平洋地区和非洲地区的分布, 但在我国, 其预测分布与实际分布存在较大差别。胜红蓟在我国预测分布主要为云南、海南、台湾部分地区, 而胜红蓟入侵我国后现已广泛分布于长江以南地区, 其实际分布比预测分布广泛得多, 由此推测胜红蓟在入侵我国后其生态位已经产生了漂移。

关键词:胜红蓟; 生态位漂移; 生态位模型; 适生图

文章编号: 1000-0933(2008)10-4974-08 中图分类号: Q145, X171 文献标识码: A

Application of ecologic niche models in explanation of niche shift of invasive alien species

WANG Yun-Sheng^{1,2}, XIE Bing-Yian^{1,*}, WAN Fang-Hao³, XIAO Qi-Ming², DAI Liang-Ying²

1 Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 College of Bio-safety Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

3 Institute of Plant Protection (South Section), Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4974 ~ 4981.

Abstract: Due to the change of the fundamental and realized niche, an invasive alien species (IAS) often shifts niches after it has established successfully and spread widely at the invaded region. Usually the direct evidence of the niche shift is difficult to achieve. The ecological niche models (ENMs) can be employed to predict the potential distribution of an invasive species in the invaded area based on the niche requirement of the species in its origin areas, given that its niche conserved when invaded in another region. Some indirect evidences of niche shift during biological invasion were found by comparing the difference between predicted and actual distribution in the invaded areas. The potential distribution of *Ageratum conyzoides*, a regional serious invaded weed in China, is predicted in non-native regions based on the niches require in its origin area using ENMs. The previous results showed that the distribution of *A. conyzoides* in non-native regions such as Asia-pacific region and Africa region could be well predicted by using ENMs, but there was a remarkable

基金项目: 国家“973”资助项目(2002CB111400); 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD08A15)

收稿日期: 2007-07-12; **修订日期:** 2008-06-25

作者简介: 王运生(1979 ~), 男, 湖南人, 博士生, 主要从事外来入侵生物风险评估研究. E-mail: wyunsheng@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xieby@mail.caas.net.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Program of China (No. 2002CB111400), National Scientific and Technical Supporting Programs Funded by Ministry of Science & Technology of China (No. 2006BAD08A15)

Received date: 2007-07-12; **Accepted date:** 2008-06-25

Biography: WANG Yun-Sheng, Ph. D. candidate, mainly engaged in risk analysis of alien invasive species. E-mail: wyunsheng@163.com

difference between predicted and actual distribution in China. *A. conyzoides* occurs widely in the south area of Yangtze River, but the potential distribution of *A. conyzoides* predicted by ENMs only focuses in a small areas such as Yunan, Hainan and Taiwan provinces. The result of these investigations suggests that the climate niche of *A. conyzoides* has shifted after it invaded to China.

Key Words: *Ageratum conyzoides*; niche shift; ecological niche model; habitat suitability map

物种的生态位需求一般是保守的,而生态位的保守性也正是利用各种生态位模型预测物种潜在地理分布的前提条件^[1],在这一假设条件下,人们可以利用外来入侵物种在其原产地的生态位需求来预测在其他地区的潜在分布^[2,3]。因外来入侵物种一旦成功定殖扩散后要彻底铲除非常困难,所以早期发现和预警对于管理外来入侵物种来说非常重要,应用生态位模型进行潜在地理分布预测有助于决策者制定科学的管理措施。生态位模型已经广泛应用于外来入侵物种潜在地理分布预测分析,包括昆虫^[4],鱼^[5],鸟^[6],植物^[2,7,8],但不同模型预测的结果是有差别的,没有一种模型能适合所有的情况,故目前生态位模型应用有组合应用的趋势,即综合多种模型预测结果以求能综合各模型的优点,避免基于单个模型分析结果决策的片面性^[9]。

但物种的生态位有时会发生漂移(niche shift),尤其入侵物种的生态位漂移现象更为突出^[10],这主要有两个原因,一是外来入侵物种本身的快速进化作用产生了新的生态位适应机制从而影响其“基础生态位(fundamental niche)”,另一方面是入侵物种在入侵地缺少天敌和竞争者和空生态位(empty niche)的存在会导致入侵物种的“实际生态位(realized niche)”发生漂移^[13~16]。获取外来入侵物种生态位漂移的直接证据往往很困难,一些试验^[17~19]虽然为解释生态位漂移提供了一定的理论基础,但问题远还没有解决,发展快速鉴定入侵物种是否已经产生生态位漂移方法成了当务之急。

应用生态位模型研究外来入侵物种生态位漂移的原理是:首先假设该物种的生态位需求是相对保守的,将该物种在原产地的生态位需求投射到入侵地区,如果预测结果与入侵地的实际分布吻合,那么假设成立,表示入侵物种在入侵后其生态位尚未产生漂移;如果预测结果与实际分布有较大出入,则假设不成立,表明该入侵物种在入侵地已经产生了生态位漂移。Broennimann 等^[20]比较了入侵物种斑点矢车菊(*Centaurea maculosa*)在原产地(欧洲)与入侵地(北美)的生态位要求,研究发现斑点矢车菊在两个地区的生态位需求具有明显差异,以其中一个地区的分布数据为训练集,其预测结果与另外一个地区的实际分布相差甚远,认为斑点矢车菊在入侵美洲后其生态位产生了漂移。

胜红蓟(*Ageratum conyzoides* L.)原产于美洲中南部,通过人工引种传入我国,因其花卉观赏价值曾大力推广种植,目前已成为区域性恶性外来入侵杂草,广泛分布于长江以南地区,特别是广东、广西、福建、香港、云南、海南及台湾等地区^[21]。胜红蓟的危害性主要是具有强烈化感作用,能产生和释放多种化感物质,抑制其他植物的生长,对生态、环境和人体健康具有潜在的巨大威胁^[22]。近年来,胜红蓟向北扩散的趋势越来越强,浙江、江苏、湖南等地区均有发现胜红蓟分布为害,最近有报道称在南京中山陵苗圃内也发现有小片分布。为明确胜红蓟在入侵我国后其生态位是否已经产生漂移,本文通过分析胜红蓟在原产地的生态位需求,应用6种常用的生态位模型(BIOCLIM、DOMAIN、ENFA、Mahalanobis、GARP、Maxent)预测了胜红蓟在其他地区的潜在分布,本文所选模型均已广泛应用于物种分布区预测中,且实践证明其准确性均较好。并应用ROC曲线分析法^[23,24]对6种常用的生态位模型预测效果进行了评价,将各模型的预测结果叠加后得到胜红蓟的综合适生指数预测图。比较胜红蓟在我国的预测分布与实际分布是否吻合,分析胜红蓟入侵我国后其生态位是否已经产生漂移。

1 材料与方法

1.1 物种分布信息收集及前处理

胜红蓟分布地点信息来自 GBIF (global biodiversity Information Facility, 网站地址为 <http://www.gbif.org>)。

org/),共收集到胜红蓟在全球分布地点573点,由于GBIF中原始数据中存在重复地点,去掉重复地点后剩457点,原产地中、南美洲共有288点,分布点如图3-A所示。

1.2 环境数据

本文使用的环境数据是广泛应用于生态位模型预测的全球气候数据集(WORLDCLIM)^[25]中的19个生物气候变量(BIO1-BIO19),各变量的含义如表1所示。使用环境数据集的空间分辨率为5 min。数据可从网上免费下载得到,下载地址为<http://www.worldclim.org/>。

表1 19个生物气候环境变量

Table 1 The 19 bioclimatic variables

气候变量 Climatic variables	简要描述 Description
BIO1	年平均温 Annual mean temperature
BIO2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range (Mean of monthly (max temp-min temp))
BIO3	昼夜温差与年温差比值 Isothermality ($\times 100$)
BIO4	温度变化方差 Temperature seasonality (standard deviation $\times 100$)
BIO5	最热月份最高温 Max temperature of warmest month
BIO6	最冷月份最低温 Min temperature of coldest month
BIO7	年温变化范围 Temperature annual range
BIO8	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter
BIO9	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter
BIO10	最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter
BIO11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter
BIO12	年平均湿度 Annual precipitation
BIO13	最湿月份湿度 Precipitation of wettest month
BIO14	最干月份湿度 Precipitation of driest month
BIO15	湿度变化方差 Precipitation seasonality (Coefficient of Variation)
BIO16	最湿季度湿度 Precipitation of wettest quarter
BIO17	最干季度湿度 Precipitation of driest quarter
BIO18	最暖季度平均湿度 Precipitation of warmest quarter
BIO19	最冷季度平均湿度 Precipitation of coldest quarter

1.3 使用的生态位模型及工具

本文共使用了常用的6种生态位模型,分别为BIOCLIM^[26], DOMAIN^[27], ENFA^[28], GARP^[29,30], Maxent^[31,32], Mahalanobis^[33],应用工具如表2所示。ROC曲线分析使用SPSS统计软件包(V11.5),GIS数据处理使用ArcInfo(V9.1)。

表2 使用的模型及其描述

Table 2 Description of the models employed in this paper

模型 Model	软件版本 Software	简要描述 Description	来源 Source
BIOCLIM	DIVA-GIS (v5.4)	环境包络 Environmental envelope	www.diva-gis.org
DOMAIN	DIVA-GIS (v5.4)	高氏距离 Gower distance	www.diva-gis.org
ENFA	Biomapper (v3.2)	生态位因子分析 Ecological niche factor analysis	http://www.unil.ch/biomapper
GARP	Desktop GARP (v1.1.6)	基于遗传算法的规则组合 Genetic algorithm for rule-set production	http://nham.ku.edu/desktopgarp
Maxent	Maxent (v2.3)	最大熵模型 Maximum entropy	http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/
Mahalanobis	IDRISI (v15.01)	马氏距离 Mahalanobis distance	Clark Labs, Clark University

1.4 研究方法

1.4.1 训练数据集与验证数据集

随机选取胜红蓟在原产地中、南美洲288个分布点的70%作为训练集(train dataset),剩下30%的分布点与从背景中随机选取的拟不存在点(pseudo-absence)形成本地验证集(native test dataset),分5次重复共得到5组训练-测试数据。另外以亚太洋地区的分布点(共68点)和从该地区随机选取的随机背景点作为异地

验证集(non-native test dataset)。

1.4.2 模型预测及结果综合

用训练数据进行模型参数训练、预测,以 MaxKappa 统计量所对应的预测值作为阈值进行重分类 (reclass),此时的阈值能最大程度地将物种已知分布点与拟不存在点分开,将值大于阈值的地区归为 1(适生区),低于阈值的地区归为 0(非适生区),将 5 次重复的结果相加后得到单个模型的预测结果,最后将 6 种模型的预测结果相加得到值变化范围为 [0,30] 的综合适生图,各点值的含义是代表预测结果为阳性(适生)的次数,如值为 30,则表示 6 种模型 5 次重复均预测为阳性,值为 1 时表示有 1 次预测为阳性,为 0 则表示预测均为阴性(非适生)。

1.4.3 本地预测与异地预测效果比较

本文以常用的 *AUC* 值 (area under curve) 来判断模型的总体预测效果, *AUC* 值是受试者工作特征曲线 (ROC 曲线) 与 x 轴所围成的面积值,而 ROC 曲线是以假阳性率为横坐标,真阳性率为纵坐标形成的曲线。*AUC* 值变化范围是 [0,1],值越靠近 1 时表示预测效果越好,等于 1 时为理想分布,表示理论分布与实际分布完全一致,随机分布模型的 *AUC* 值为 0.5,一般又将随机分布模型作为参考模型 (reference model),如果模型的 *AUC* 值小于 0.5,则表示模型预测结果与实际分布相反^[34]。抽取各模型的验证点集的预测值并计算 *AUC* 值,比较在本地(中、南美洲)和异地(亚太太平洋地区)的预测效果。

1.4.4 胜红蓟在我国的模型预测分布与实际分布差异比较

比较由 1.4.2 得到的我国预测分布图与实际分布之间的差异,分析胜红蓟入侵我国后其生态位是否发生漂移。总体试验路线如图 1 所示。

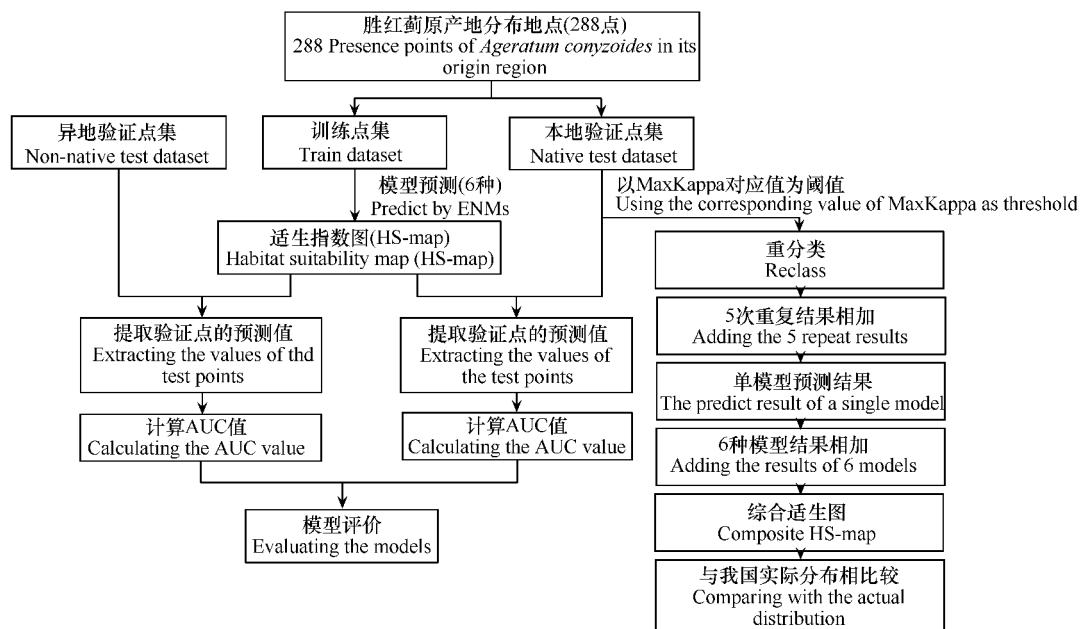


图 1 技术路线图

Fig. 1 Diagram of analysis process

2 结果与分析

2.1 预测胜红蓟在原产地与异地的分布及预测效果评价

以胜红蓟在中、南美洲的分布地点信息为训练数据,预测在其他地区的潜在分布。本文基于 ROC 曲线分析法计算模型预测在本地(中南美洲)和异地(亚太太平洋地区)的 *AUC* 值。结果如图 2 所示,模型 Mahalanobis 在本地的 *AUC* 值较高,均值为 0.843,而在异地的 *AUC* 值则较低,均值为 0.601,说明在本地预测结果能与实际预测较好吻合,但其推广性能较差,在异地预测效果不好,而 GARP 与 ENFA 与 Mahalanobis 相反,本地 *AUC*

值不太高(但并不表明这两种模型在本地预测效果不好,原因分析见讨论部分),但在异地的AUC值较高。*Maxent*模型在本地和异地的AUC值均较高,说明模型的稳定性与扩展性均较好。结果表明,几种模型大多数情况下是能够利用胜红蓟在其原产地的分布信息准确预测在异地的分布的,预测结果如图3-C, D所示,胜红蓟在非洲地区和亚太平洋地区的预测分布与实际分布均能很好吻合。

2.2 胜红蓟在我国的预测分布与实际分布之间的差异

在我国,胜红蓟已广泛分布于长江以南地区(如图4-B所示),特别是广东、广西、福建、云南、海南及台湾等地区普遍发生,在湖南、江西、浙江和江苏等地部分发生。而模型预测胜红蓟在我国的潜在分布区只存在于

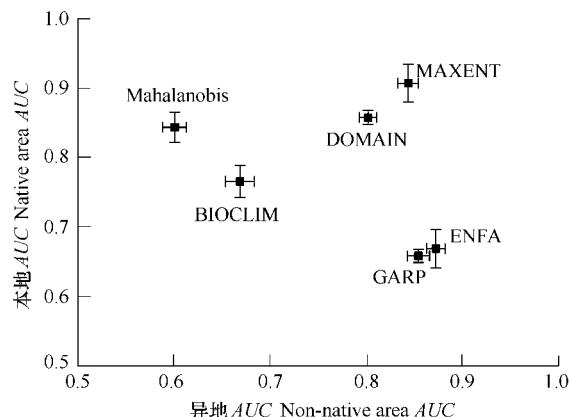


图2 模型预测在本地与异地的AUC值

Fig. 2 The models' AUC value in native and non-native area

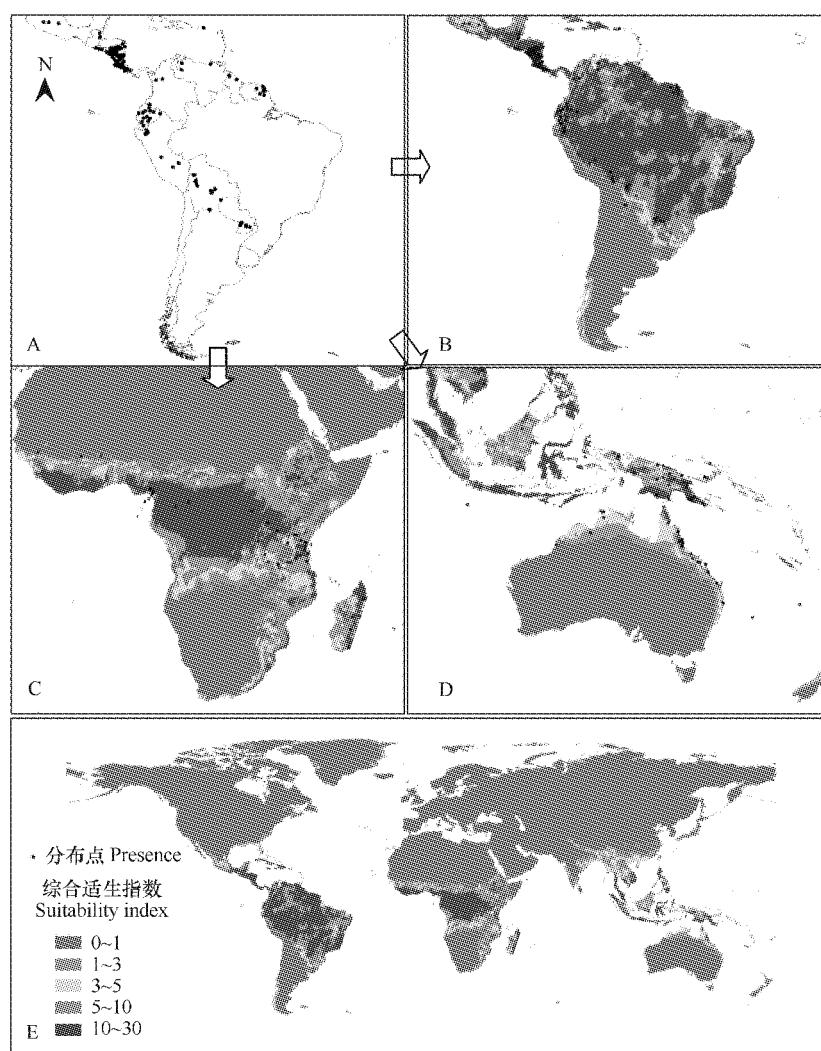


图3 以胜红蓟原产地分布数据为训练集的生态位模型预测结果

Fig. 3 The potential distribution of *A. conyzoides* in its origin areas (B), in Africa areas (C), in Asia-Pacific region (D) and in the global areas (E), predicted by niche models based on the presence locations in its origin areas (A)

A 胜红蓟在原产地已知分布点(训练集),B 预测在原产地的分布,C 预测在非洲地区的分布,D 预测在亚太平洋地区的分布,E 预测在全球的分布

我国云南、台湾和海南少部分地区(如图 4-A 所示),这一预测结果与我国的实际分布有较大出入。在亚太平洋地区(图 3-D)和非洲地区(图 3-C),模型预测结果与实际分布能很好吻合,说明模型能很好反映胜红蓟的生态位需求,但在我国其预测分布与实际分布相差较大,由此推测胜红蓟在入侵我国后其生态位已经产生了漂移。

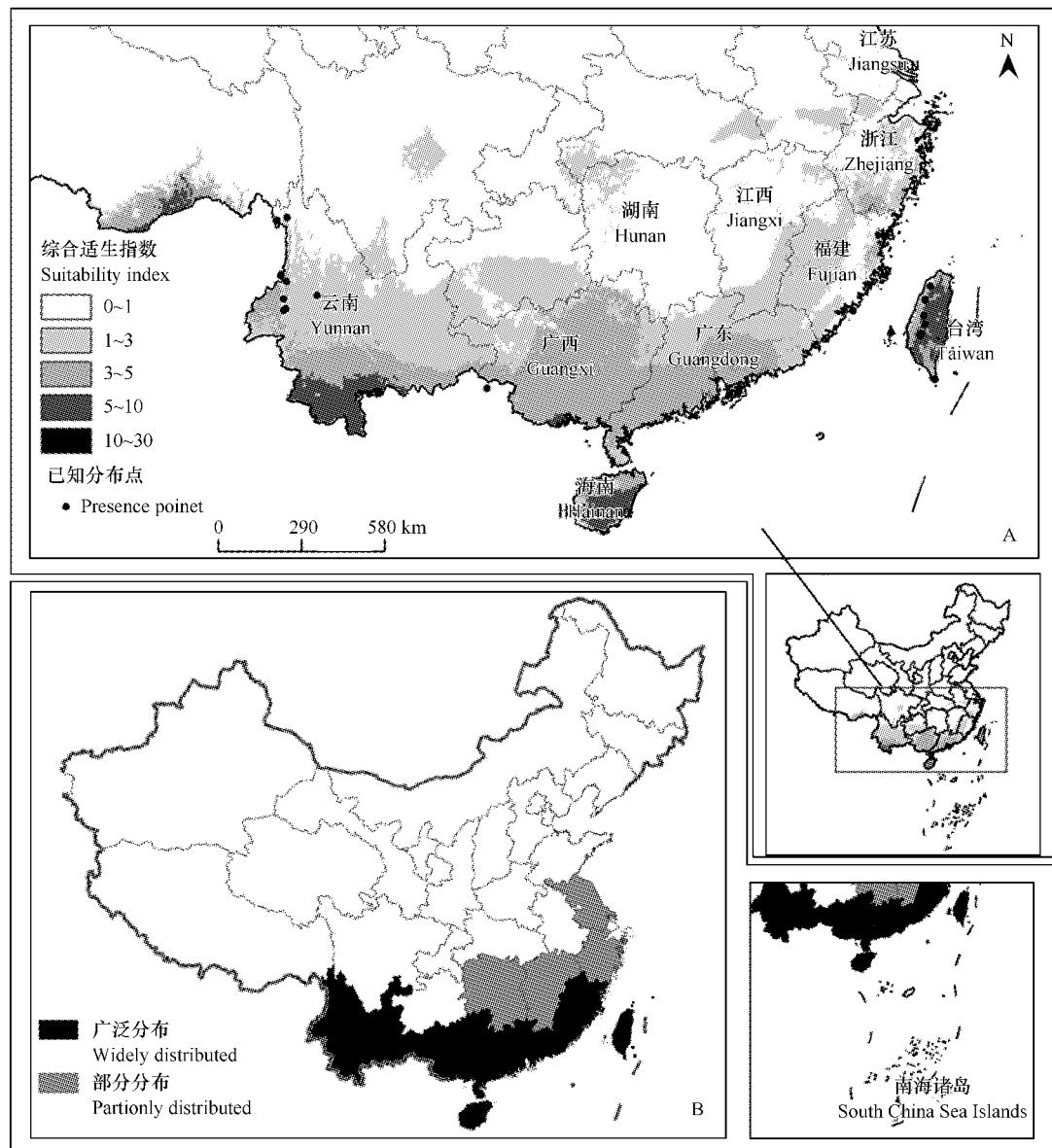


图 4 胜红蓟在中国的预测分布与实际分布的差异比较,A 预测分布,B 实际分布示意图

Fig. 4 The difference between the actual and predicted distribution of *Ageratum conyzoides* in China, A the predicted distribution map of *A. conyzoides* in China, B schematic diagram of actual distribution of *A. conyzoides* in China

3 结论与讨论

本文所用环境数据均来自 WORLDCLIM 中的生物气候因子集的 19 个环境变量,该套环境数据集中并未包括如土壤类型、植被情况、人类活动等影响外来入侵物种分布的一些因素,如能将这些因素考虑进来的话,预测的结果将会更准确,但目前尚缺乏这些因素高分辨率的分布图。实践证明基于温度和降水等生物气候因子的生态位模型能很好的反映物种生态位需求,物种的自然分布往往也是取决于这些生物气候因子。

利用胜红蓟在原产地的生态位需求预测在其他地区,如亚太平洋地区和非洲地区的分布与实际分布均获得了较好的效果,说明在假设胜红蓟的生态位需求保持稳定的前提条件下,利用生态位模型能够很好地预测

胜红蓟的潜在分布。但在我国地区预测分布与实际分布有较大差别,说明胜红蓟入侵我国后其生态要求已经发生了改变,这种改变可能是由于进化的原因产生了新的适应机制,即改变了基础生态位,也可能是由于入侵地缺乏天敌等生物因子的相互作用产生的实际生态位改变,而这些都可引起生态位漂移,至于是哪种原因导致的需作进一步研究。由于缺少胜红蓟在我国具体的分布地点信息,不能以我国的分布数据为训练方,反过来预测在原产地的分布并比较其实际分布与预测分布的差异,以完成应用生态位模型分析入侵物种生态位漂移现象全过程。但本文的分析结果至少可说明胜红蓟在原产地的生态位需求不能正确反映出入侵我国后其生态位需求,也就意味着不能简单以原产地的分布数据为训练方,应用生态位模型来预测胜红蓟在我国的潜在分布区。而要得知胜红蓟入侵我国后其生态位漂移了多少,还需知道胜红蓟在我国目前的具体分布信息。

本文的研究结果同时也说明了在利用诸如 GARP、GLM、Maxent 等基于生态位模型进行外来入侵生物适生区预测时要特别注意其生态位漂移现象,因为应用这类模型的一个前提条件便是物种的生态位需求要保持稳定。但这并不是说这类模型在外来入侵生物适生性分析中就没有应用价值,从本文的研究结果中也可以看出,模型能预测出胜红蓟在我国云南、海南以及台湾地区适合生长,这与入侵物种最初入侵地点是一致的,我国胜红蓟最初也是在这几个地区蔓延开的,从这个意义上说,应用模型预测入侵物种在入侵地的潜在分布对于发现其潜在的初始定殖地区具有重要的参考价值,这对于及早发现和早期预警具有重要意义。

References:

- [1] Wiens J J, Graham C H. Niche conservatism: integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 2005, 36: 519–539.
- [2] Peterson A T. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Quarterly Review of Biology*, 2003, 78 (4): 419–433.
- [3] Peterson A T. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor*, 2001, 103 (3): 599–605.
- [4] Peterson A T, Vieglais D A. Predicting species invasions using ecological niche modeling. *BioScience*, 2001, 51: 363–371.
- [5] Chen P F, Wiley E O, McNyset K M. Ecological niche modeling as a predictive tool: silver and bighead carps in North America. *Biol. Invasions*, 2007, 9: 43–51.
- [6] Brotons L, Thuiller W, Araújo M B, et al. Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography*, 2004, 27 (4): 437–448.
- [7] Peterson A T, Papes M, Kluza D A. Predicting the potential invasive distributions of four alien plant species in North America. *Weed Sci.*, 2003, 51: 863–868.
- [8] Thuiller W, Richardson D M, Pysek P, et al. Niche-based modelling as a tool for predicting the risk of alien plant invasions at a global scale. *Global Change Biol.*, 2005, 11: 2234–2250.
- [9] Araújo M B, New M. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends Ecol. Evol.*, 2007, 22 (1): 42–47.
- [10] Eastwood M M, Donahue M J, Fowler A E. Reconstructing past biological invasions: niche shifts in response to invasive predators and competitors. *Biological Invasions*, 2007, 9 (4): 397–407.
- [11] Muller-Scharer H, Schaffner U, Steinger T. Evolution of invasive plants: implications for biological control. *Trends Ecol. Evol.*, 2004, 19: 417–422.
- [12] Dietz H, Edwards P J. Recognition that causal processes change during plant invasion helps explain conflicts in evidence. *Ecology*, 2006, 87: 1359–1367.
- [13] Mitchell C E, Power A G. Release of invasive plants from fungal and viral pathogens. *Nature*, 2003, 421: 625–627.
- [14] Mitchell C E, Agrawal A A, Bever J D, et al. Biotic interactions and plant invasions. *Ecol. Lett.*, 2006, 9: 726–740.
- [15] Torchin M E, Lafferty K D, Dobson A P, et al. Introduced species and their missing parasites. *Nature*, 2003, 421: 628–630.
- [16] Callaway R M, Maron J L. What have exotic plant invasions taught us over the past 20 years? *Trends Ecol. Evol.*, 2006, 21: 369–374.
- [17] Sexton J P, McKay J K, Sala A. Plasticity and genetic diversity may allow saltcedar to invade cold climates in North America. *Ecol. Appl.*, 2002, 12: 1652–1660.
- [18] DeWalt S J, Denslow J S, Ickes K. Natural-enemy release facilitates habitat expansion of the invasive tropical shrub *Clidemia hirta*. *Ecology*, 2004, 85: 471–483.
- [19] Maron J L, Vila M, Bommarco R, et al. Rapid evolution of an invasive plant. *Ecol. Monogr.*, 2004, 74: 261–280.

- [20] Broennimann O, Treier U A, Muller-Scharer H, et al. Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecological Letters*, 2007, 10.
- [21] Hao J H, Qiang S. The alien invasive weed-Ageratum conyzoides. *Weed Science*, 2005, 4: 54~58.
- [22] Kong C H, Huang S S, Hu F. Allelopathy of Ageratum conyzoides V. biological activities of the volatile oil from ageratum on fungi, insects and plants and its chemical constituents. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (4): 584~587.
- [23] Zweig M H, Cambell G. Receiver operating characteristic (ROC) plots:a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*, 1993, 39 (4): 561~577.
- [24] Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4):365~372.
- [25] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25 (15): 1965~1978.
- [26] Busby J R, BIOCLIM — a bioclimate analysis and prediction system. In: C. R. Margules and M. P. Austin, eds. *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO: Melbourne, 1991. 64~68.
- [27] Carpenter G, Gillison A N, Winter J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, 1993, 2: 667~680.
- [28] Hirzel A H, Hausser J, Chessel D, et al. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data. *Ecology*, 2002, 83 (7): 2027~2036.
- [29] Stockwell D, Peters D. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1999, 13 (2): 143~158.
- [30] Stockwell D R B, Beach J H, Stewart A, et al. The use of the GARP genetic algorithm and Internet grid computing in the Lifemapper world atlas of species biodiversity. *Ecological Modelling*, 2006, 195 (1-2): 139~145.
- [31] Phillips S J, Dudik M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling. in *Proceedings of 21st International Conference on Machine Learning*. New York: ACM Press, 2004.
- [32] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190 (3-4): 231~259.
- [33] Foody G M, Campbell N A, Trodd N M, et al. Derivation and applications of probabilistic measures of class membership from the maximum likelihood classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58 (9): 1335~1341.
- [34] Hughes G, Madden L V. Evaluating predictive models with application in regulatory policy for invasive weeds. *Agricultural Systems*, 2003, 76 (2): 755~774.

参考文献:

- [21] 郝建华, 强胜. 外来入侵性杂草——胜红蓟. *杂草科学*, 2005, 4: 54~58.
- [24] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. 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*, 2007, 15 (4): 365~372.