

ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用

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, 北京 100081)

摘要: 生态位模型(ecological niche models, ENMs)已广泛应用于物种潜在分布区预测, ENMs的应用也为外来入侵物种的风险分析提供了重要的量化分析工具, 但如何评价不同模型之间的预测效果成了当今研究的热点问题。本文介绍了受试者工作特征(ROC)曲线分析在评价不同生态位模型预测效果中的应用原理和分析方法, 并以一种植物病原线虫—相似穿孔线虫(*Radopholus similis*)为例, 应用ROC曲线分析法对其5种模型(BIOCLIM, CLIMEX, DOMAIN, GARP, MAXENT)的预测结果进行了比较分析。5种模型的ROC曲线下面积AUC(Area Under Curve)值分别为0.810, 0.758, 0.921, 0.903和0.950, 以MAXENT模型的AUC值最大, 表明其预测效果最好; 方差分析结果表明, 除GARP与DOMAIN模型之间AUC值差异不显著外, 其余各模型之间差异显著。

关键词: 受试者工作特征曲线, 外来物种, 模型评价, 适生区, *Radopholus similis*

Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models

Yunsheng Wang^{1,2}, Bingyan Xie^{1*}, Fanghao Wan³, Qiming Xiao², Liangying Dai²

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

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

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

Abstract: Ecological niche models (ENMs), which are widely employed to predict the potential geographic distribution of species, provide an important tool to quantify the risks imposed by invasive alien species. The problem of how to evaluate the performance of different models has attracted more and more attention. In the present paper, we introduced the principle of the method of Receiver Operating Characteristic (ROC) curve analysis in assessing the accuracy of different ENMs. We predicted the suitable distribution area of *Radopholus similis*, an important banana toppling disease nematode, with five widely used ENMs and evaluated the performance of different models by ROC curve analysis. The area under ROC curve (AUC) for BIOCLIM, CLIMEX, DOMAIN, GARP, and MAXENT models was 0.810, 0.758, 0.921, 0.903, and 0.950, respectively. Among these, the biggest value of AUC was assigned to MAXENT, indicating that the result gained by MAXENT should be better than the other four models. According to the results of analysis of variance (ANOVA), there was a remarkable difference in AUC between each model except for DOMAIN and GARP.

Key words: ROC curve, alien species, model evaluation, suitable distribution area, *Radopholus similis*

物种潜在分布区预测模型在濒危物种保护、生物多样性保护区设计的优先性评估、外来入侵物种

扩散潜能以及全球气候变化对物种分布区的影响等研究中得到了越来越广泛的应用(Guisan &

收稿日期: 2006-11-20; 接受日期: 2007-07-03

基金项目: 国家“973”项目(2002CB111400)、“十一五”国家科技支撑计划(2006BAD08A15)、科研院所社会公益性研究专项(2004DIB3J096)和国家基础条件平台项目(2003DIB3J108)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xieby@mail.caas.net.cn

Thuiller, 2005)。近年来生物入侵受到了全球广泛的关注,越来越多的研究者一致地认为外来生物入侵会给当地生态环境的结构和功能带来不可逆转的改变(Wittenberg & Cock, 2001)。入侵生物在目标地区的风险评估是采取合理检疫措施和实施科学防治计划的前提,而入侵物种在目标地区的适生性分析又是入侵物种科学风险评估的基础(Andersen *et al.*, 2004)。

应用生态学的发展为物种潜在分布预测提供了有力的模型,很多模型的算法已实现电脑程序化,并形成了软件工具。应用较广的模型包括 BIOCLIM (Busby, 1991)、BIOMAPPER (Hirzel *et al.*, 2002)、BRT (Friedman *et al.*, 2000)、CLIMEX(Sutherst *et al.*, 1995)、DOMAIN(Carpenter *et al.*, 1993)、GAM(Yee & Mitchell, 1991)、GARP (Stockwell & Peters, 1999)、GLM(Lehmann *et al.*, 2002)、MAXENT(Phillips *et al.*, 2004)等。大部分模型软件预测结果可导入一般的地理信息系统(GIS)软件进行进一步分析,得到直观的适生性地图,而利用合适的模型预测物种的适生指数是整个分析的基础(Elith *et al.*, 2006)。

面对众多的模型,研究者应该选择哪些?选择的标准是什么?模型预测效果可用什么指标来衡量?有些研究人员是用其中一个或几个模型按软件默认的参数运行后得到结果,然后直接把预测结果呈现给读者,而没有说明预测结果的准确性;有的虽然给出了预测结果的评价,但大多是根据经验加以描述,缺乏定量化。

一般预测模型会产生两类错误:一类是过低估计,将实际的阳性区预测为阴性区,为假阴性;另一类错误是过高估计,将实际的阴性区预测为阳性区,为假阳性。这两类错误都与判断阈值密切相关。模型评价指标计算一般是基于下述4类数据(表1):真阳性(a)为模型正确预测物种存在的单元数;假阳性(b)为实际物种不存在,但模型预测为存在的单元数;假阴性(c)为实际物种存在而模型预测为不存在的单元数;真阴性(d)为模型正确预测为物种不存在的单元数。

常用的模型评价指标有总体准确度(overall accuracy)、灵敏度(sensitivity)、特异度(specificity)、Kappa统计量(Cohen, 1960)、TSS(true skill statistic)(Allouche *et al.*, 2006)和AUC (Hanley & McNeil,

表1 用于评价模型准确性的2×2四格表

Table 1 An error matrix used to evaluate the predictive accuracy of models

| | | 实际 Actual | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 存在 Presence | 不存在 Absence |
| 预测 Predicted | 存在 Presence | a | b |
| | 不存在 Absence | c | d |

a: 真阳性; b: 假阳性; c: 假阴性; d: 真阴性

a, true positive; b, false positive; c, false negative; d, true negative

1982), 它们的计算方法如表2所示。

总体准确度是正确预测物种存在和不存在单元总数占总预测区的百分比,它很大程度上依赖于物种分布率。如某物种在研究区域的分布率为5%,即使不用模型预测,将所有研究区域归为阴性,也可得到95%的总体准确度。灵敏度是实际有分布且被预测为阳性的概率,即为真阳性率,反映了预测出物种分布的能力,但不能排除假阳性率的影响。特异度是指实际没有该物种分布且被正确预测为阴性的概率,即真阴性率,反映了预测该物种没有分布的能力,但不能排除假阴性率的影响。Kappa统计量(Cohen, 1960)虽然综合考虑了物种分布率(prevalence)、灵敏度、特异度,但有研究者认为Kappa统计量因受物种分布率的影响,会带来偏差(Lantz & Nebenzahl, 1996)。近期有研究者提出用TSS(true skill statistic)作为模型评价的指标(Allouche *et al.*, 2006)。TSS计算公式简单,易于理解,但同上述几种指标一样,也不可避免地会受到阈值的影响,选择不同的阈值会得到不同的结果,不便于模型之间进行比较。因为不同的模型预测结果所表示的内容并不一样,相同的判断阈值在不同的模型中含义不一样。

受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC曲线)分析方法最初是应用于雷达信号接收能力的评价(Leshowitz, 1969),后广泛应用于医学诊断试验性能的评价(Goodenough *et al.*, 1974; Metz, 1978; Zweig & Campbell, 1993)。ROC曲线分析通过改变诊断阈值,可获得多对真(假)阳性率值。以假阳性率为横坐标,真阳性率为纵坐标,绘制而成的曲线称之为ROC曲线,ROC曲线下的面积即为AUC值(area under curve),以此反映诊断试验的价值。一般认为AUC值为0.5-0.7时诊断价值较低;为0.7-0.9时诊断价值中等;大于0.9时诊断价值

表2 常用模型评价指标的计算公式(方法)

Table 2 Measures of predictive accuracy indicators calculated from a 2×2 error matrix (Table 1)

| 指标 Measure | 计算公式 Formula |
|-----------------------------|---|
| 总体准确度 Overall accuracy | $\frac{a+d}{n}$ |
| 灵敏度 Sensitivity | $\frac{a}{a+c}$ |
| 特异度 Specificity | $\frac{d}{b+d}$ |
| Kappa统计量 Kappa statistic | $\frac{(\frac{a+d}{n}) - \frac{(a+b)(a+c) + (c+d)(d+b)}{n^2}}{1 - \frac{(a+b)(a+c) + (c+d)(d+b)}{n^2}}$ |
| TSS True skill statistic | 灵敏度+特异度-1 Sensitivity+specificity-1 |
| AUC Area under curve | 以假阳性(1-特异度)为横坐标, 灵敏度为纵坐标绘制成的曲线为ROC曲线, ROC曲线下面积即为AUC值 ROC curve is created by plotting sensitivity against the corresponding proportion of false positives (equal to 1-specificity), the area under the ROC curve is AUC. |

a, b, c, d含义同表1 a, b, c, d are the same as in Table 1. n=a+b+c+d

较高(宇传华, 2002)。AUC因不受患病率和诊断阈值的影响, 可对两个诊断试验的准确度进行综合比较, 因而成为目前公认的诊断试验最佳评价指标(Vanagas, 2004)。

近年来, ROC曲线分析法在物种潜在分布预测模型评价中的应用越来越广泛(Manel *et al.*, 2001; Brotons *et al.*, 2004; McPherson *et al.*, 2004; Elith *et al.*, 2006), 将有某种物种分布的地区视为“患病”, 没有分布的作为“对照”, 物种分布模型预测为“试验诊断”, 这样便可以借用试验诊断评价的方法来评价物种分布模型(Wiley *et al.*, 2003)。一些模型软件(如MAXENT)在预测结果中直接绘制出了ROC曲线并给出了模型的AUC值, 为模型预测效果的判断提供了方便。但有些模型(如GARP)的预测结果不是连续值, 为0,1离散值, 这类模型可通过一定的变换再进行ROC曲线分析(Phillips *et al.*, 2006)。

本文选用的5种生态位模型(BIOCLIM、CLIMEX、DOMAIN、GARP和MAXENT)已广泛应用于物种潜在分布区预测, 预测结果均能较好地吻合物种的实际分布。但不同的物种其分布模式是不相同的, 用不同模型预测得到的效果也会不一样。以往研究者往往只是应用一种模型对某物种进行预测, 由于模型不同得到的预测结果不一样。本文以相似穿孔线虫(*Radopholus similis*)为例, 同时应用上述5种生态位模型对相似穿孔线虫进行潜在分布区预测, 应用ROC曲线分析法对多种模型预测结果进行了评价, 选择预测效果较好的模型进行最后

预测, 为类似的外来入侵物种潜在分布区模型预测进行评价提供参考方法。

1 方法

1.1 应用ROC曲线分析评价外来物种分布模型原理介绍

ROC曲线是以预测结果的每一个值作为可能的判断阈值, 由此计算得到相应的灵敏度和特异度。以假阳性率即(1-特异度)为横坐标, 以真阳性率即灵敏度为纵坐标绘制而成, 其曲线下面积(AUC)的大小作为模型预测准确度的衡量指标, 其取值范围为[0, 1], 值越大表示模型判断力越强。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。

因为对于入侵物种已知的分布数据往往只有物种“存在”(presence)的数据, 而没有“不存在”(absence)数据, 故真正的假阳性率无从得知。往往是假设除物种已知分布单元外的所有单元均为背景“拟不存在”(pseudo-absence)单元(Wiley *et al.*, 2003), 用背景“拟不存在”代替物种“不存在”数据来计算模型的假阳性率, 这样便可用ROC曲线分析来进行模型评价。随机分布模型常作为一种物种分布的“背景模型”, 表示物种在某地是否“存在”完全是随机的, 即“存在”与“不存在”的概率各为0.5。一般将“随机分布模型”作为参照(reference)模型, 参照模型的ROC曲线则为对角线(图2), 其AUC值为0.5。如果分布模型的ROC曲线向左上方偏

离参照曲线越远, 曲线下的面积值就越大, 表示越有理由相信模型预测出来的物种“存在”单元不是随机性的“存在”, 而是有规律的非随机性的“存在”。

1.2 ROC曲线分析的一般步骤

绘制ROC曲线的一般步骤可参照图1所示的流程。首先是随机生成训练集(train)与验证集(test), 方法是随机选取部分物种“存在”点(如75%)作为训练集, 剩下的物种“存在”点与随机抽取的背景物种“拟不存在”点作为验证集。用训练集进行模型预测, 得到适生指数图, 提取验证集中各点的预测值, 按设定的系列阈值计算灵敏度与假阳性率(1-特异度), 并计算出AUC值, 用SPSS软件包进行ROC分析。

计算AUC的方法有多种, 最简单的可用梯形法, 如图2所示。将曲线上相邻两点以直线相连与横轴围成的各小梯形面积相加便可得到AUC值, $AUC=S_1+S_2+\dots+S_n$ 。

1.3 案例应用: 相似穿孔线虫潜在地理分布模型评价

相似穿孔线虫是一类极其重要的植物病原线

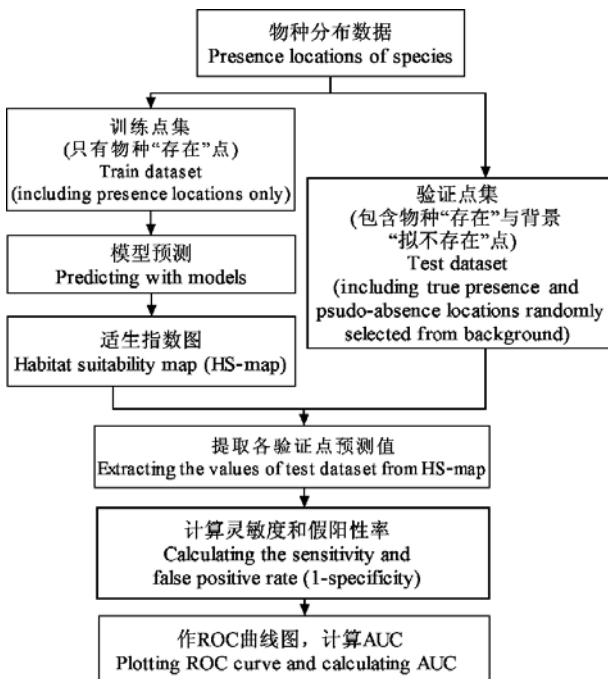


图1 ROC曲线分析的一般步骤

Fig. 1 General procedure of ROC curve analysis

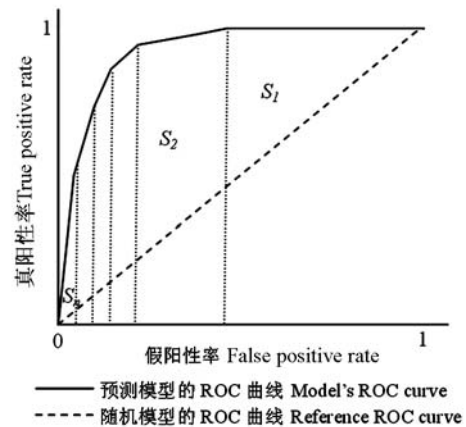


图2 梯形法计算AUC值示意图

S_1, S_2, S_n 为ROC曲线与X轴围成的小梯形的面积, $AUC=S_1+S_2+\dots+S_n$ 。

Fig. 2 Demonstration of calculating AUC by trapezoid method. S_1, S_2, S_n denote the area of the trapezoid bounded by ROC curve and X axes, $AUC=S_1+S_2+\dots+S_n$.

虫, 最初是在斐济发现并证实, 1890–1920年间传入澳大利亚。目前是亚热带香蕉生产上最主要的威胁之一, 是我国I类危险性检疫对象。近年来, 由于对外交流和旅游业的发展, 相似穿孔线虫传入我国的风险也日益加大, 在广州、上海、厦门、深圳等口岸曾多次在来自新加坡、荷兰、马来西亚、菲律宾等国家的香蕉苗、水溶苗、红掌、火鹤苗等苗木中检测到相似穿孔线虫(彭德良和谢丙炎, 2005), 亟需对其进行风险评估。

本文应用ROC曲线分析对相似穿孔线虫的5种潜在地理分布模型(BIOCLIM, CLIMEX, DOMAIN, GARP, MAXENT)的预测结果进行了定量评价。

1.3.1 物种分布数据、基础地理数据及环境数据

通过查阅国内外公开发表的相关论文获取相似穿孔线虫的分布数据, 找出其已报道的分布地点, 在地名数据库(Geographic Names Database (GNDB))查找相应的经纬度, 核对位置后得到99个参考点, 然后按软件要求的格式录入到相应的输入文件。从国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)下载1: 400万的中国矢量地图作为分析底图。环境数据采用WORLDCLIM中的19个生物气候变量(Hijmans *et al.*, 2005), 空间分辨率为5 min。

表3 模型及工具描述

Table 3 Description of models and softwares

| 模型 Model | 软件工具(版本) Software (version) | 来源 Sources |
|-------------|--------------------------------|---|
| BIOCLIM | DIVA-GIS (V5.4) | http://www.diva-gis.org/ |
| CLIMEX | CLIMEX (V2) | 本实验室购买 Purchased by the lab. |
| DOMAIN | DIVA-GIS (V5.4) | http://www.diva-gis.org/ |
| GARP | Desktop GARP (V1.1.6) | http://www.lifemapper.org/desktopgarp/ |
| MAXENT | MAXENT (V2.3) | http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/ |

1.3.2 预测模型及软件来源

应用BIOCLIM, CLIMEX, DOMAIN, GARP和MAXENT等上述5种模型分别对相似穿孔线虫的适生区进行预测, 软件版本及来源如表3所示。GIS软件采用Arc/Info 9.0, 统计软件为SPSS 11.5。

1.3.3 5种模型的AUC值比较

相似穿孔线虫CLIMEX模型参数设置参照周立群(2006)研究结果^①, 因CLIMEX预测结果为点数据, 用反距离加权法(IDW)进行插值得到面数据后, 以环境数据集BIOCLIM 5 min相同空间分辨率进行栅格化。

按1.2节所述方法从已有分布记录的99个参考点中随机选取75%的点作为训练集, 剩下的参考点和随机选取的背景“拟不存在”点作为验证集, 这样生成的训练集与验证集是对应的。为比较各模型AUC值之间的差异是否显著, 随机选取10组训练集与验证集作为10次重复。以训练集进行模型预测, BIOCLIM、DOMAIN和MAXENT模型参数按软件默认设置, GARP模型以默认参数运行50次, 然后将结果相加。以训练集相对应的验证集提取各验证点的预测值, 然后将数据导入SPSS, 绘制ROC曲线并计算AUC值, 并对不同模型的AUC值进行方差分析, 比较其差异是否显著。

1.3.4 模型的AUC值与Kappa统计量之间的关系

Kappa统计量也广泛用作模型评价参数(Shao & Halpin, 1995; Manel *et al.*, 2001; Segurado & Araújo, 2004)。Kappa统计量与判断阈值紧密相关, 一般是比较系列阈值中最大的Kappa值(MaxKappa)的大小。Kappa统计量取值范围为[-1, +1], 值越靠近1, 表示模型的预测效果越理想, 等于或小于0时表示模型预测效果不比随机分布模型效果好。

按1.3.3节所述的方法取得各验证集中各点的预测值后导入SPSS软件, 参考Allouche等(2006)中Kappa统计量的计算公式(表2)计算系列阈值下Kappa统计量, 并计算出MaxKappa统计量, 然后以MaxKappa为横坐标、AUC为纵坐标绘制双向标准误差散点图(scatter plot of bi-direction error bars), 根据模型在AUC–MaxKappa图中的位置便可直观地判断出不同模型的两个统计量之间的关系。在AUC–Maxkappa图中, 位置越处于右上角, AUC与MaxKappa值越大, 表示模型的预测效果越好。

2 结果

2.1 5种模型的AUC值及其比较

BIOCLIM、CLIMEX、DOMAIN、GARP和MAXENT 5种模型的AUC均值分别为0.810, 0.758, 0.921, 0.903, 0.950, 均显著大于随机分布模型的AUC值(0.5), 表明应用5种模型对相似穿孔线虫的适生区进行预测的效果均好于随机分布模型。其中以MAXENT模型的AUC值最大, 说明它可以更准确地预测相似穿孔线虫的潜在地理分布。经F检验, 5种模型AUC之间的差异显著, 多重比较结果(图3)表明: 除GARP与DOMAIN之间差异不显著($P=0.215$)外, 其他模型均两两之间差异显著。

2.2 模型AUC值与Kappa统计量之间的关系

将5种模型的AUC值与对应的MaxKappa作AUC–MaxKappa双向标准误差散点图, 结果如图4所示。二者总体变化趋势是MaxKappa值越大, 对应的AUC值也越大; 但也有个别不一致的, 如DOMAIN的AUC值较GARP的略大, 但其MaxKappa却比GARP的略小。在AUC–MaxKappa图中, 越往右上角的点表示模型预测结果与实际分布吻合度越大。从图中可以看出, 5种模型中MAXENT位于最右上角, 说明其预测效果最好。

^①周立群(2006). 相似穿孔线虫在中国适生区的预测及其快速分子鉴定研究. 硕士学位论文. 湖南农业大学, 长沙.

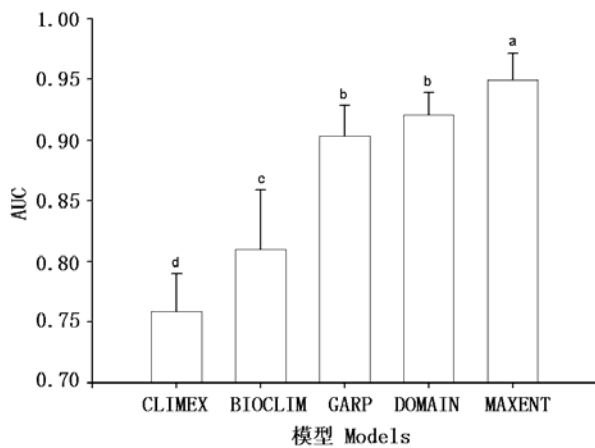


图3 5种模型的AUC值比较

Fig. 3 AUC value comparison among the five ecological niche models

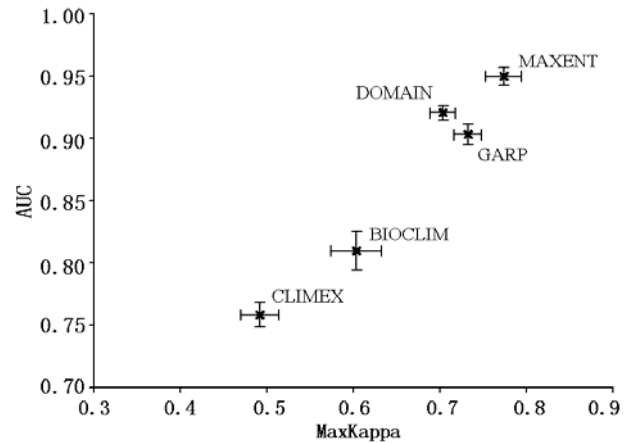


图4 5种模型AUC–MaxKappa关系图

Fig. 4 Relationship between AUC and MaxKappa of the five ecological niche models

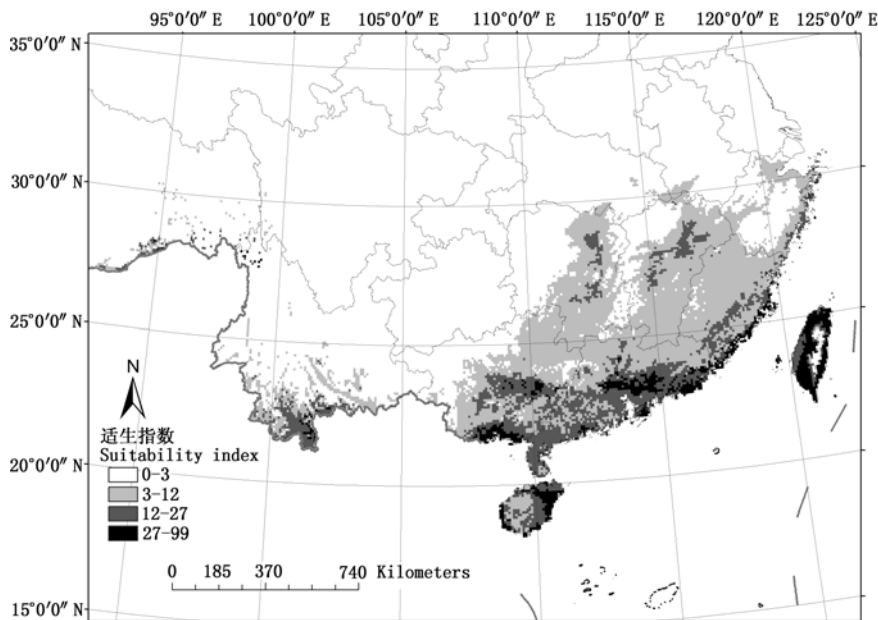


图5 相似穿孔线虫在中国的适生区—MAXENT预测结果

由于环境数据集WORLDCLIM中未包括我国南海群岛的数据，所以这部分地区没有预测值。

Fig. 5 Potential distribution of *R. dipholis* in China predicted by MAXENT model. The area of the islands of South China Sea has no results due to lacking climate data in WORLDCLIM.

2.3 相似穿孔线虫在中国的适生性分析

根据AUC分析结果，选取AUC最大的MAXENT模型对相似穿孔线虫的中国适生区进行了预测，预测时使用了全部的99个已有分布点数据。结果显示，相似穿孔线虫在我国适生区主要集中在南方各省区，如广东、广西、福建、海南、台湾、云南等省，西藏东南部有小部分地区也可能适合相似穿孔线虫发生，如图5所示。分级显示的阈值是根据99个已知分布点的预测值的区间分布设置的，按90%(>27，注：已知分布点预测值90%以上大

于27)、99%(>12)和100%(>3)设置。

3 讨论

Elith等(2006)利用包括GARP和MAXENT在内的16种生态位模型对226个物种进行了比较研究，指出这类模型均能较好地用来预测物种分布，但最近提出的如BRT、GDM、MAXENT等模型相对于其他模型具有更好的预测效果。本文研究结果也得到了相似的结论，在本文应用环境中，MAXENT模型比BIOCLIM、CLIMEX、DOMAIN、GARP等模

型预测效果要好;但这并不能说明MAXENT模型在其他环境下的预测效果也较其他几个模型好。不同物种分布模式不一样,对环境变量的响应也不一样,所以应用不同物种、不同的环境变量其预测结果可能不一样。但本文所述用ROC曲线分析进行模型评价的方法是可以通用的。

AUC值与最大Kappa统计量(MaxKappa)都可用来评价模型预测效果,本文研究结果也表明两者判断结果基本上是一致的,即MaxKappa值越大,AUC值也越大;但也有个别不一致的,如DOMAIN的AUC值较GARP的略大,但其MaxKappa则比GARP的略小,这是因为MaxKappa统计量是系列阈值判别能力的最大值,反映的是点判别能力,而AUC值反映的是系列阈值判别能力的综合值。模型在某一阈值的判别能力强并不表示在其他阈值的判别能力也一定强。AUC因不受判断阈值影响,可用于不同模型比较研究:模型的AUC值越大,表示环境变量与预测的物种地理分布模型之间相关性越大,越能将该物种有分布和无分布判别开,其预测效果也就越好。

但同时我们在应用时必须注意其应用范围。因为ROC曲线分析是用背景“拟不存在”代替“不存在”数据,所以“不存在”的单元不但包括真正“不存在”单元(true absence),还包括有物种存在但没有调查到的即“假不存在”单元(false absence),因此假阳性率会偏高,ROC曲线右移,相应地AUC值会偏小。物种实际分布区越广,ROC曲线右移越多,AUC偏差越大。不同的物种分布率对应不同的偏移量,如果物种真实分布率是 a ,则 $AUC \approx AUC_{(真)} - a/2$ 。但物种真实分布率往往是未知的,因此无法得到真实的AUC值(Phillips *et al.*, 2006)。因为不同的物种其真实分布率是不相同的,所以即使计算得到的AUC值相同,并不意味着真实的AUC值是一样的,故比较不同物种之间分布模型的AUC值并没有多大意义。

本文所用环境数据只使用了WORLDCLIM中生物气候变量,没有考虑如土壤类型、植被类型、全球气候变暖以及生物互作等其他因素对相似穿孔线虫分布的影响;另外也未包括我国南海群岛的气候数据,所以这部分地区没有预测值。但根据相似穿孔线虫在全球范围内的预测分布趋势,南海群岛很可能也适合相似穿孔线虫发生。由于相似穿孔线虫的寄主范围相当广,有很多寄主属于园艺植

物,所以可随花卉苗木的远距离运输传播;如果考虑温室气候影响的话,相似穿孔线虫的适生区范围还会往北移,所以本文对相似穿孔线虫在中国适生区进行的预测也还只是一个初步的结果,如能综合考虑其他因素的话,预测结果将会更加准确。

参考文献

- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Ecology*, **43**, 1223–1232.
- Andersen MC, Adams H, Hope B, Powell M (2004) Risk assessment for invasive species. *Risk Analysis*, **24**, 787–793.
- Brotons L, Thuiller W, Araújo MB, Hirzel AH (2004) Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability. *Ecography*, **27**, 437–448.
- Busby JR (1991) BIOCLIM—a bioclimate analysis and prediction system. In: *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis* (eds Margules CR, Austin MP), pp. 64–68. CSIRO, Melbourne.
- Carpenter G, Gillison AN, Winter J (1993) DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, **2**, 667–680.
- Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, **20**, 37–46.
- Elith J, Graham HC, Anderson PR, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick RJ, Lehmann A, Li J, Lohmann GL, Loiselle AB, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton MJ, Peterson AT, Phillips JS, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire ER, Soberon J, Williams S, Wisz SM, Zimmermann EN (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, **29**, 129–151.
- Friedman JH, Hastie T, Tibshirani R (2000) Additive logistic regression: a statistical view of boosting. *Annals of Statistics*, **28**, 337–407.
- Goodenough DJ, Rossmann K, Lusted LB (1974) Radiographic applications of receiver operating characteristic (ROC) curves. *Radiology*, **110**, 89–95.
- Guisan A, Thuiller W (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, **8**, 993–1009.
- Hanley JA, McNeil BJ (1982) The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, **143**, 29–36.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **25**, 1965–1978.
- Hirzel AH, Hausser J, Chessel D, Perrin N (2002) Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data. *Ecology*, **83**,

- 2027–2036.
- Lantz CA, Nebenzahl E (1996) Behavior and interpretation of factors affecting the performance of climatic envelope models. *Journal of Clinical Epidemiology*, **49**, 431–434.
- Lehmann A, Overton JM, Leathwick JR (2002) GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling*, **157**, 189–207.
- Leshowitz B (1969) Comparison of ROC curves from one- and two-interval rating-scale procedures. *The Journal of Acoustical Society of America*, **46**, 399–402.
- Manel S, Williams HC, Ormerod SJ (2001) Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, **38**, 921–931.
- McPherson JM, Jetz W, Rogers DJ (2004) The effects of species' range sizes on the accuracy of distribution models: ecological phenomenon or statistical artefact? *Journal of Applied Ecology*, **41**, 811–823.
- Metz CE (1978) Basic principles of ROC analysis. *Seminars in Nuclear Medicine*, **8**, 283–298.
- Peng DL (彭德良), Xie BY (谢丙炎) (2005) Burrowing nematode, *Radopholus similis* (Cobb) Thorne. In: *Biology and Management of Invasive Alien Species in Agriculture and Forestry* (重要农林外来入侵物种的生物学与控制) (eds Wang FH (万方浩), Zheng XB (郑小波), Guo JY (郭建英)), pp. 640–649. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**, 231–259.
- Phillips SJ, Dudik M, Schapire RE (2004) A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: *Proceedings of 21st International Conference on Machine Learning* (eds Brodley C, Cavazos J, Chan P, Jacob N, Kak A, Lippman R, Moss E, Pavlopoulou C, Precup D, Scheeff D, Stefanovic D, Utgoff P, Yurcik B), pp. 655–662. ACM Press, New York.
- Segurado P, Araujo MB (2004) An evaluation of methods for modelling species' distributions. *Journal of Biogeography*, **31**, 1555–1568.
- Shao G, Halpin PN (1995) Climatic controls of eastern North American coastal tree and shrub distributions. *Journal of Biogeography*, **22**, 1083–1089.
- Stockwell D, Peters D (1999) The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Systems*, **13**, 143–158.
- Sutherst RW, Maywald GF, Skarratt DB (1995) Predicting insect distributions in a changed climate. In: *Insects in Changing Environment* (eds Harrington R, Stork NE), pp. 59–91. Academic Press, London.
- Vanagas G (2004) Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, **3**, 319–322.
- Wiley EO, McNyset KM, Peterson AT, Robins CR, Stewart AM (2003) Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm. *Oceanography*, **16**, 120–127.
- Wittenberg R, Cock MJW (2001) *Invasive Alien Species: A Toolkit of Best Prevention and Management Practices*. CAB International, Wallingford.
- Yee TW, Mitchell ND (1991) Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science*, **2**, 587–602.
- Yu CH (余传华) (2002) Evaluation on diagnostic test. In: *Medical Statistics* (医学统计学) (ed. Yu SL (余松林)), pp. 164–178. People's Medical Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Zweig MH, Campbell G (1993) Receiver operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*, **39**, 561–577.

(责任编辑: 张大勇; 责任编辑: 周玉荣)