有害生物风险分析定量评估模型及其比较

李志红*， 秦誉嘉

（中国农业大学植物保护学院，北京 100193）

摘要 全球化的进程使有害生物入侵问题日益严重，植物检疫工作备受重视。有害生物风险分析（pest risk analysis，PRA）是植物检疫的支撑技术之一，风险评估是其核心内容，定量评估模型的研究与应用成为近 30 年来该领域的热点。本文在收集、整理国内外 PRA 文献和相关信息的基础上，针对有害生物入侵风险半定量评估模型、定量评估模型及软件的发展进行了系统性的回顾和分析。同时，我们比较了主要模型和软件的特点、优势和局限性，归纳总结出了适用于不同起点的有害生物定量风险评估集成技术体系，并展望了我国有害生物风险分析技术的未来发展。本综述能够为我国生物入侵防控管理机构、推广部门、高等院校及科研单位提供重要的工作参考，对植物检疫工作具有理论和实践意义。

关键词 植物检疫； 有害生物风险分析； 风险评估； 定量评估模型； 技术体系

中图分类号： S 431.9 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2018315

Review on the quantitative assessment models for pest risk analysis and their comparison

LI Zhihong， QIN Yujia

（*College of Plant Protection*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*）

Abstract Plant quarantine has been attracting more and more attention with the development of globalization and the serious problems of pest invasion. Pest Risk Analysis (PRA) is one of the supporting technology of plant quarantine in which risk assessment is regarded as the core stage. In recent thirty years, the study and application of quantitative assessment models have become the hot spot in this field. On the basis of collection and analysis of related literatures and information relating to PRA, the development of semi-quantitative assessment models, quantitative assessment models and relevant software were systematically reviewed. Meanwhile, we showed a comparative analysis on the characteristics, advantages and limitations of the main models and software, presented an integrated technical system of quantitative risk assessment which was suitable for different initiations, and discussed the future development of PRA technology in China. This review can provide important reference for the administration, extension stations, universities and institutes. It is significant for the theory and practice of plant quarantine.

Key words plant quarantine； pest risk analysis； risk assessment； quantitative assessment model； technical system

有害生物风险分析（pest risk analysis，PRA），是植物检疫（plant quarantine）的重要内容，也是植物检疫的支撑技术之一[1-2]。PRA 包括开始（initiation）、风险评估（pest risk assessment）和风险管理（pest risk management）三个阶段，备受生物入侵防控领域的关注。自 1995 年起，植物检疫术语国际标准逐步更新，PRA 的定义也不断加以完善，2007 年被定义为“评价生物学或其他科学、经济学证据，确定某种有害生物是否应予以管制以及管制时所采取的植物卫生措施力度的过程”[3]。PRA 是制订检疫性有害生物名录的基础，也是进出境植物检疫及国内植物检疫工作中对某一植物和植物产品（如粮食、水果、蔬菜、花卉、木材、种子种苗等繁殖材料等）实施具体检疫措施的根据[4-5]。截至目前，国际植物检疫措施标准中已有 4 个与 PRA 直接相关的标准，即第 2 号标准、第 11 号标准、第 21 号标准和第 14 号

收稿日期： 2018-07-17
基金项目： 国家重点研发计划（2018YFF0214905）
* 通信作者 E-mail：lizh@cau.edu.cn

标准。有害生物风险评估是 PRA 的关键阶段,一般认为,风险评估方法包括定性评估(qualitative assessment)(如美国的专家打分法、澳大利亚的合并矩阵法等)和定量评估(quantitative assessment)(如美国的场景分析法等)[6-8]。几十年来,国内外开展了大量 PRA 实践,进行了有害生物风险评估方法、模型及软件的探索[9-13],涉及半定量风险评估模型(如我国的多指标综合评判模型等)和定量风险评估模型(如国内外的潜在地理分布预测模型等)[14]。近十余年来,全球化的进程使外来生物的入侵形势日益严峻,有害生物风险分析定量评估模型的研究与应用取得了诸多新进展[15-18],在植物检疫等生物入侵防控工作中发挥着越来越重要的作用。

本文在收集、分析国内外 PRA 文献等的基础上,针对有害生物风险分析定量评估模型的研究与应用进行了系统性的回顾、比较和总结,并提出了进一步加强我国有害生物风险分析工作的建议。本文能够为我国植物检疫等生物入侵防控管理机构、推广部门、高等院校及科研单位提供参考,具有理论和实践意义。

1　有害生物风险分析半定量评估模型及其应用

1.1　半定量评估模型的初期发展

有害生物入侵(invasion),一般包括进入(entry)、定殖(establishment)、扩散(spread)、暴发(outbreak)四个主要过程。在进行有害生物入侵风险评估时,应分析、预测其入侵全过程的风险大小。在国内外 PRA 实践中,我国于 20 世纪 90 年代初期所创建的针对有害生物危险性评价的多指标综合评判法及模型具有突出的代表性,用于评估外来有害生物入侵全过程的风险[10]。随后,欧洲及地中海区域植物保护组织(EPPO)也建立了多指标综合评估体系并将其应用于有害生物的风险评估[19]。

在我国,蒋青、梁忆冰等于 1994－1995 年首次报道了多指标综合评判法,系统性地介绍了该方法所涉及的有害生物危险性评价指标体系、指标评判标准和评判模型[10,20]。在指标体系中,包括 5 个一级指标和 14 个二级指标,其中一级指标分别为国内分布状况、潜在的危害性、受害栽培寄主的经济重要性、移植的可能性和危险性管理的难度;在评判标准中,每一个二级指标和不设二级指标的一级指标均可根据具体标准确定其风险等级数值;在评判模型中,依据各指标间的数学关系,分别建立了几何平均模型、权重平均模型、算术平均模型及极值模型。1999 年,梁忆冰等报道了多指标综合评判法和计算机 PRA 数据处理系统在进境花卉有害生物风险评估中的应用[21]。

笔者曾于 2017 年请教多指标综合评判法研究团队的骨干成员—梁忆冰先生,她与笔者观点一致,认为多指标综合评判法应归属为有害生物风险半定量评估方法,其评判模型属于半定量评估模型。上述 20 世纪 90 年代的多指标综合评判方法及模型,引起了国内外广泛关注,并为有害生物入侵风险半定量评估模型的后续研究和应用奠定了坚实的基础。

1.2　有害生物风险分析半定量评估模型的后续发展

历经 20 余年,我国的多指标综合评判法及模型成为 PRA 领域开展有害生物风险评估最常用的方法和模型,也被认为是定性评估和定量评估结合应用的良好范例[14]。近十余年来,随着 PRA 研究和应用的不断深入,多指标综合评判模型在我国得到了进一步的完善[22],其应用也得到了进一步的拓展[23]。从相关报道来看,笔者发现多指标综合评判模型的应用呈现出三个较为明显的发展趋势,一是从进境植物检疫到国内植物检疫,二是从全国植物检疫到地方植物检疫,三是从农业植物检疫到林业植物检疫。例如,2016 年北京市植物保护站与中国农业大学合作,以上述多指标综合评判方法为依据,建立了乡镇级有害生物入侵风险指标、多指标评判标准、区县级及市级的多指标综合评判模型,明确了 16 个种(属)的高风险检疫性有害生物,实现了半定量评估模型在北京市农业植物检疫中的应用[24]。

近十余年来,原国家质量监督检验检疫总局国际检验检疫标准与技术法规研究中心一直致力于“中国国家有害生物检疫信息系统”(http://www.pestchina.com)的建设;在梁忆冰先生等的不懈努力下,该系统的 PRA 功能逐步完善,自 2011 年起已开发了风险评估功能模块,实现了多指标综合评判的远程运行,在进境植物检疫工作中发挥着重要作用。自 2018 年 6 月,全国农业技术推广服务中心 PRA 处针对国内农业植物检疫,正在完善有害生物入侵风险多指标综合评判模型,新的模型中进一步强调了有害生物对经济、生态环境和人类健康的影响及其风险。笔者认为,鉴于多指标综合评判方法及其模型能够预测有害生物入侵全过程的风险大小

且应用简便，其将在植物检疫等外来入侵生物防控工作中发挥出更大的作用。

2 有害生物风险分析定量评估模型及其应用

国内外高度关注有害生物定量风险评估模型的研究与应用，在有害生物入侵可能性、潜在地理分布和潜在损失方面分别进行了较为深入的探索。澳大利亚、美国等发达国家，在定量评估模型和软件方面开展了更多的工作、做出了更大的贡献，于 20 世纪 80 年代起陆续推出了 CLIMEX、@RISK、MaxEnt、DIVA-GIS、GARP 及 SOM 等模型和软件[9, 11-13, 25-26]，用于有害生物入侵风险的定量评估。我国自 20 世纪 90 年代起陆续引进上述模型和软件[17, 27-29]，同时通过生物学实验结合 GIS 技术建立相关有害生物的潜在地理分布预测模型[30-31]，逐步推进有害生物定量风险评估的研究和应用。尽管国内外在有害生物定量风险评估模型与软件上付出了很多努力，然而，截至目前笔者认为现有的定量评估模型和软件中均不能独立实现涵盖有害生物入侵可能性、潜在地理分布和潜在损失的全方位评估，我们必须将这些模型和软件有机地组合应用于 PRA 实践。自 2012 年起，在'948'项目的支持下，中国农业大学与全国农业技术推广服务中心等合作，在摸索、比较上述定量风险评估模型与软件的基础上，集成建立了有害生物定量风险评估技术体系，实现了有害生物入侵可能性、潜在地理分布和潜在损失的全过程定量风险预测[32]。

2.1 入侵可能性定量评估模型及软件

有害生物入侵可能性评估，是有害生物风险评估的重要内容，其定量评估模型和软件的研发与应用受到国内外更多关注。从国内外有害生物入侵可能性定量评估模型研究与应用来看，基于@RISK 和场景模型的入侵可能性评估以及基于 SOM 的定殖可能性评估具有比较突出的代表性。前者用于一种有害生物的入侵可能性预测，至今已有 20 余年的历史；后者用于同时预测多种有害生物的定殖可能性，仅有十余年的发展历程。

2.1.1 基于@RISK 和场景模型的入侵可能性评估

自 20 世纪 90 年代以来，美国研发的@RISK 软件成为 PRA 领域开展入侵可能性评估的重要工具，例如美国农业部（USDA）利用@RISK 等针对我国进口美国带有小麦矮腥黑穗病菌 *Tilletia controversa* Kühn 的磨粉用小麦开展了入侵风险评估[11]。@RISK 是美国 Palisade 公司开发的 Decision Tools Suite 工具包中的软件，属商业软件，当前版本为 7.5。在有害生物入侵路径分析的基础上，运用@RISK 在 EXCEL 中建立场景模型，并选择适宜的概率分布，然后以随机模拟方法（如 Monte Carlo 模拟、拉丁超立方体抽样等）进行模拟，进而得出风险的发生概率，实现定量评估；同时运用@RISK 可以完成灵敏度分析，确定有害生物入侵风险构成因子中的关键控制点，从而有针对性地采取风险管理措施来降低风险[33]。笔者认为，运用@RISK 进行某一种有害生物入侵可能性分析时，准确划分相关的风险因子以及建立适宜的场景模型是最为关键的。

在国外，@RISK 和场景模型的应用实例主要来自美国，用于多种有害生物的入侵风险评估，涉及传入（包括进入和定殖）、扩散和暴发过程中的风险。除了上述小麦矮腥黑穗病菌的定量风险评估外，自 2001 年起 USDA 利用@RISK 软件和所建立的场景模型对墨西哥'Hass'鳄梨进行了系列评估，其中特别对可能携带的 8 种检疫性有害生物进行了暴发频度的分析[34]，通过评估放宽了墨西哥'Hass'鳄梨输美的限制条件，促进了国际贸易。除了关注本国与别国间的有害生物入侵风险评估，美国也非常关注有害生物在其国内的扩散风险评估。例如，2005 年 Auclair 等运用@RISK 评估了光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 的风险，即该虫随纽约市政固体废弃物从疫区传入疫区外垃圾处理站的可能性，明确了能够存活 1 对可交配的雌、雄虫的概率值[35]，结果发现，非法倾倒垃圾和不进行除害处理将使风险值增加上千倍。此外，USDA 动植物检疫局 CPHIST 专家多次在美国等地举办技术培训，为基于@RISK 和场景模型的入侵可能性评估技术推广做了大量工作，例如 2012 年应中国农业大学邀请，美国专家来京对我国植物检疫工作人员和高校师生进行了@RISK 原理与应用的专题培训。

我国对基于@RISK 和场景模型的入侵可能性评估格外关注，近 20 余年来，先后引进@RISK 软件和相关技术，并不断开展相关研究和应用。自 2002 年起，我国多位学者陆续开展了针对小麦矮腥黑穗病菌[28]、梨火疫病菌 *Erwinia amylovora*[36]、松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus*[37]、橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis*[38-39]、红脂大小蠹 *Dendroctonus valens*[40]、地

中海实蝇 *Ceratitis capitata*[41]、番石榴果实蝇 *Bactrocera correcta*[42]等的入侵风险定量评估。由于有害生物扩散、暴发等过程复杂、基础数据不充分等原因,截至目前,我国基于@RISK 和场景模型的入侵可能性评估多集中在进入或传入可能性上。

2.1.2 基于 SOM 的定殖可能性评估

自组织特征映射网络(self-organising map,SOM),是 1982 年由芬兰专家 Kohonen 提出的一种人工神经网络,它将非线性的高维数据映射到一个二维拓扑网络中,进而通过学习算法达到降维、聚类、可视化的目的,主要用于复杂数据的组织和可视化。由于上述基于@RISK 和场景模型的入侵可能性评估一次只能针对一种有害生物进行分析,所以国内外 PRA 专家们一直在努力探索并试图找到一次可预测多种有害生物入侵可能性的模型和软件。2006 年,新西兰林肯大学生物科研中心学者 Worner 和 Gevery 所提出的基于 SOM 的有害生物定殖可能性评估方法应运而生[13],依托 Matlab 软件中运行 SOM Toolbox 来实现。Matlab 软件可在 MathWorks 中国官网获取试用版(http://cn.mathworks.com/),SOM Toolbox 可从赫尔辛基大学计算机信息科学实验室官网免费下载(http://www.cis.hut.fi/somtoolbox/),当前版本为 2.0。该方法的基本原理体现在:如果两个地区有相似的有害生物集合体,那么这两个地区很可能有同样的环境特征,因此,其中一个地区的有害生物如果进入到另一个地区则很可能定殖下来。截至目前,基于 SOM 的定殖可能性评估在国内外的研究报道尚少,但由于其一次可同时预测大量有害生物在某个地区的定殖可能性,所以在 PRA 领域确实产生了非常大的影响。澳大利亚、美国等国家和地区的学者陆续开展了相关研究和应用,在澳大利亚专家的建议下中国农业大学于 2012 年通过'948'项目引入该技术并应用于实蝇类害虫的定殖可能性评估[32]。

纵览国外相关报道,基于 SOM 的有害生物定殖可能性评估涉及多类植物有害生物,如昆虫、病原物、杂草和线虫等。针对昆虫,Worner 和 Gevrey 2006 年在全球首次运用 SOM 研究了 844 种植食性昆虫在 459 个地区的定殖可能性,并以地中海实蝇为例详细展示了相关结果,使 SOM 作为一种新的方法被 PRA 领域所关注[13];澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)Paini 等 2010 年运用该方法为美国及其 48 个州分析出了最可能定殖的前 100 种昆虫的名单,而这 100 种昆虫在美国都有分布,证明近期的威胁来自于美国的内部[43]。针对病原物,Paini 等研究了 486 种世界广泛分布的真菌病原物,并证明了 SOM 的高效性[44]。针对杂草,基于 SOM,Morin 等研究了 6 690 种植物在 187 个地区的定殖可能性及成为杂草的可能性[45]。针对线虫,Singh 等利用 SOM 研究了 43 属 250 种植物寄生线虫,分别得到了澳洲、澳洲各州以及澳洲北部的植物寄生线虫定殖风险排序表[46]。此外,澳大利亚专家 Paini 博士应邀于 2012 年来华进行 SOM 专题技术培训和合作,取得了良好效果。

在国内,中国农业大学与全国农业技术推广服务中心、中国检验检疫科学研究院等合作,率先引进了 SOM 方法与技术并进行了应用探索。2013 年,马兴莉利用 SOM 研究了东盟的 43 种重要经济实蝇在我国的定殖可能性[32];2014 年,王聪等针对 SOM 在植物检疫性有害生物名单制修订中的作用进行了论述[47];2015 年,Qin 等研究了全球 180 种重要经济实蝇在 118 个国家的定殖风险[17];2016 年,雷鸣研究了玉米上的 644 种昆虫、251 种病原微生物、287 种杂草以及 69 种病原线虫在全球以及我国各省的定殖可能性,为我国玉米检疫性有害生物名单的修订提供了科学依据[48]。近来,笔者从海关总署获悉,我国已启动新一轮进境植物检疫性有害生物名录的修订工作,相信基于 SOM 的有害生物定殖可能性评估将会发挥必要的作用。

2.2 潜在地理分布定量预测模型及软件

国际上所称谓的有害生物潜在地理分布(potential geographical distribution),我国习称适生区;潜在地理分布预测,我国称为适生性分析,是有害生物风险评估的主要内容。通过潜在地理分布预测,能够确定一旦有害生物入侵其定殖和扩散的地理范围与具体地点。纵观国内外研究进展,潜在地理分布预测是有害生物定量风险评估最先开展的工作。综合自 20 世纪 80 年代以来的相关研究报道,潜在地理分布定量预测模型和软件主要包括气候相似距模型及数据库系统[49]、地点比较模型与 CLIMEX[9]、BIOCLIM 模型与 DIVA-GIS[25]、MaxEnt 模型与软件[50-51]、GARP 模型与软件[26]以及有害生物实验模型及 GIS 软件[31]等。这些模型建立的时间虽有早有晚,但至今仍都有研究和应用的报道,其中

以 CLIMEX 地点比较模型和 MaxEnt 模型的相关报道为多;随着气候数据的完善,近年来预测当前及未来气候变化条件下的有害生物潜在地理分布已成为研究热点[8,16]。

2.2.1 基于 CLIMEX 地点比较模型的潜在地理分布预测

CLIMEX,也称微机生态气候分析系统,是 1985 年由澳大利亚昆士兰大学 Sutherst 教授和 Maywald 博士所研发的商业化软件,其地点比较模型通过分析有害生物已知分布区的气候条件来预测有害生物的潜在地理分布和种群的相对丰度[9]。该软件陆续推出了升级版本,最新版为 CLIMEX 4.0.2,该版本优化了算法、大幅度提高了运行速度,优化了半自动参数拟合、新增了自动参数灵敏性以及模型不确定性分析等功能[52]。自 CLIMEX 问世 30 余年来,国内外应用其开展了大量的有害生物潜在地理分布预测工作,成为全球最具影响力的定量预测工具。

在国外,澳大利亚、新西兰等国家和地区的学者首先应用 CLIMEX 地点比较模型进行了植食性昆虫的潜在地理分布研究,随后将其应用到其他有害生物的潜在地理分布预测。例如,针对马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata*[53]、地中海实蝇 *Ceratitis capitata*[53-54]、银胶菊 *Parthenium hysterophorus*[55]、三叉针茅 *Nassella neesiana*[56]等先后进行了潜在地理分布研究。近三年来,CLIMEX 的应用多有报道,特别预测了未来气候变化条件下的多种害虫的潜在地理分布,如橘小实蝇 *B. dorsalis*[57]、茶翅蝽 *Halyomorpha halys*[18]、德国黄胡蜂 *Vespula germanica*[58]、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*[59]和樱桃绕实蝇 *Rhagoletis cerasi*[60]。

在我国,自 20 世纪 90 年代起引入 CLIMEX,并开展了大量的基于 CLIMENX 地点比较模型的有害生物适生性研究。期间,澳大利亚学者 Sutherst 博士于 1994 年、Kriticos 博士于 2012 年分别访问中国农业大学,针对 CLIMEX 及其使用开展专题培训,并就重要经济害虫进行了合作研究。早期的代表性文献中,林伟于 1991 年完成了对美国白蛾 *Hyphantria cunea* 在我国的适生性分析[27];十余年后,针对大豆锈病菌 *Phakopsora pachyrhizi*[61]、相似穿孔线虫 *Radopholus similis*[62]、西花蓟马 *Frankliniella occidentalis*[63]、墨西哥按实蝇 *Anastrepha ludens*[64]、枣实蝇 *Carpomya vesuviana*[65]陆续报道;近年来,针对 42 种重要经济实蝇进行了当前及未来气候条件下的潜在地理分布研究[16],最新报道研究了考虑灌溉及气候变化条件下的葡萄花翅小卷蛾 *Lobesia botrana* 在我国的潜在地理分布[66],同时我国学者在国际期刊上陆续发表苹果实蝇 *Rhagoletis pomonella*[29]、桃果实蝇 *Bactrocera zonata*[67]、西印度按实蝇 *Anastrepha obliqua*[68]、小圆胸小蠹 *Euwallacea fornicates*[69]等农林有害生物的潜在地理分布的研究报道。

2.2.2 基于 MaxEnt 模型的潜在地理分布预测

最大熵(maximum entropy)原理,最早由 Jaynes 于 1957 年提出,是根据物种已知分布样本信息对未知分布做出推断的一种数理统计方法[70],可用于概率分布的预测。2004 年,美国普林斯顿大学 Phillips 等应用最大熵原理建立了 MaxEnt 模型并用 Java 语言编写了 MaxEnt 软件,用于预测物种在给定环境变量约束下的熵最大情况下的地理分布[12, 51]。与上述 CLIMEX 软件不同,MaxEnt 是非商业软件,2017 年发布的版本为 3.4.1,可免费下载(http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/);MaxEnt 不需对参数进行过多的设置和调整,更便于操作,所以一经推出便受到了国内外的特别关注。

自 2006 年至 2013 年,利用 MaxEnt 软件的研究成果已超过 1000 余篇[71]。其中,Petitpierre 等于 2012 年在《Science》期刊发表论文,首次运用 50 种在欧亚大陆、北美和澳洲分布的陆地入侵植物,验证了生态位的保守性,并证明 MaxEnt 模型适合生物入侵以及对气候变化反应的研究[72]。从近年的文献报道看,国外学者更为关注 MaxEnt 使用方法的研究,例如利用 ROC 曲线的 AUC 值来评判模型的预测[73],在收集已知分布数据过程中改正样点偏差的重要性[74-75],GBIF 数据库中的空间偏差对模型物种的地理分布的影响[76]等。通过这些研究,进一步规范了 MaxEnt 的使用,从而使有害生物潜在地理分布预测更为科学。

自 2007 年起,国内学者使用 MaxEnt 模型和软件开展了多种有害生物的潜在地理分布研究,涉及病原物、害虫和杂草,如相似穿孔线虫 *R. similis*[77]、甜菜孢囊线虫 *Heterodera schachtii*[78]、橡胶南美叶疫病菌 *Microcyclus ulei*[79]、白蜡枯梢病菌 *Chalara fraxinea*[80]、锈色棕榈象 *Rhynchophorus*

ferrugineus[81]、斑翅果蝇 *Drosophila suzukii*[82]、沙棘绕实蝇 *Rhagoletis batava*[83]、辣椒果实蝇 *Bactrocera latifrons*[84]、节节麦 *Aegilops tauschii*[85]等。最新报道显示,Wang 等运用 MaxEnt 对马铃薯甲虫 *L. decemlineata* 及其野生寄主刺萼龙葵 *Solanum rostratum* 进行了潜在地理分布的预测,并分析了未来气候变化的影响[86];同时,Zhu 等以日本金龟子 *Popillia japonica* 为例针对 MaxEnt 使用方法进行了进一步的探究[87],对今后 MaxEnt 的应用具有一定的指导作用。

2.3　潜在损失定量预测模型及软件

1994 年,曾士迈先生曾指出有害生物所造成的损失,包括产量、品质、防治费用等方面的直接损失和对环保、商贸、加工等方面的间接损失;包括对农业生产者的原生损失和对消费者、社会、国家的次生损失[88]。作为有害生物潜在损失(potential loss),笔者认为可包括潜在经济损失和潜在非经济影响,在潜在经济损失中涉及直接经济损失、间接经济损失和防治费用,在非经济影响中主要涉及生态影响、人身安全影响及心理影响等。在上述潜在地理分布预测的基础上,可利用确定模型或随机模型进行有害生物潜在损失预测,这是定量风险评估的重要内容。基于确定模型的有害生物潜在损失预测,通常是先分析有害生物可能造成的各项损失,进而建立一个综合的评价指标体系和确定模型,然后再预测有害生物的潜在损失;基于随机模型的有害生物潜在损失预测,一般需要借助软件系统(如@RISK),首先分析有害生物可能造成损失的场景和节点,随后确定这些场景的概率分布和随机模型,最后模拟出有害生物的潜在损失。进入 21 世纪以来,国内外开始关注有害生物潜在损失的研究,包括基于确定模型[89]和随机模型[90-91]的相关报道。笔者认为基于随机模型的有害生物潜在损失预测比基于确定模型的预测更具优势,将对今后相关研究和应用产生更大的影响。

2.3.1　基于确定模型的潜在损失预测

在国外,美国学者 Pimentel 等于 2000 年预测了该国外来入侵物种的潜在经济损失,包括环境危害、控制费用两方面,并估算得出该国每年因外来入侵生物而带来的潜在经济损失高达 1 370 亿美元[92]。澳大利亚 CSIRO 的 Kriticos 等于 2013 年研究了松毛虫对新西兰森林的潜在经济损失,将其潜在危害与气候适宜性、传播速率和寄主影响联系起来,结果显示:20 年内,在无控制、少控制和优良控制三种情况下,松毛虫可分别扩散至新西兰 99%、83%和 20%的适生区;在无控制的情况下,潜在经济损失达 1 550 万~2 560 万新西兰元[89]。

在我国,在外来有害生物损失评估的理论研究上,杨昌举和韩蔡峰于 2005 年探讨了外来入侵物种对经济发展的影响,分析了对其所造成的潜在经济损失进行科学合理评价的原理和步骤,并指出对生物入侵所造成的损失进行评估属于环境价值评估内容[93]。2005 年,赵铁珍对美国白蛾造成的潜在经济损失做了比较系统的研究,且对其景观美学损失及心理影响损失也做了估算,进一步完善了评估体系[94-95]。2010 年,饶玉燕等针对玉米褪绿斑驳病毒 *Maize chlorotic mottle virus* 对我国玉米的潜在经济损失建立了评估指标体系,并根据其危害情况、在中国潜在地理分布及其介体在中国适生范围、我国玉米实际生产情况等,估算出该病毒的潜在直接经济损失为 140.95 亿元[96];2011 年,饶玉燕等评估了棉花曲叶病毒 *Cotton leaf curl virus* 对我国棉花的潜在经济损失,结果显示该病毒对棉花的潜在经济损失为 77.27 亿~498.61 亿元[97]。2013 年,马兴莉等对实蝇类潜在经济损失评估进行了探索,并预测了橘小实蝇、瓜实蝇 *Bactrocera cucurbitae*、南亚果实蝇 *Bactrocera tau* 对广东省瓜果蔬菜生产及相关产业的潜在经济损失,结果显示,三种实蝇对广东省的潜在经济损失在 33.67 亿元至 129.87 亿元之间[98]。2016 年,刘萍等构建了一套包括 3 个一级指标、14 个二级指标和 30 个三级指标的林业有害生物灾害损失评估指标体系,对潜在损失评估具有一定的意义[99]。

2.3.2　基于随机模型的潜在损失预测

在国外,近年来针对基于随机模型的有害生物潜在损失预测逐渐受到关注,澳大利亚学者进行了卓有成效的探索。2011 年,澳大利亚学者 Cook 等运用@RISK 针对梨火疫病菌 *Erwinia amylovora* 可能造成的病害,从市场损失、控制成本、检查成本和根除成本四个方面,评估了澳大利亚进口新西兰苹果的潜在经济损失,结果表明,每年梨火疫病的潜在经济损失为 2 378 万±1 506 万美元[15];这是全球首次将@RISK 用于有害生物潜在损失评估,具有引领作用。2012 年,Cook 等从损益平衡式的收益成本角度出发,利用@RISK 对香蕉束顶病毒 *Banana bunchy*

top virus 进行了潜在经济损失分析，并预测该病毒每年对澳大利亚的潜在经济损失为 15.9 万～270 万澳元[90]。最新的针对医学昆虫的研究报道显示，Darbro 等于 2017 年通过@RISK 预测每年防治白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 需要投入的费用，研究结果表明，一旦该虫定殖，政府每年投入公共卫生的费用为 0.5 澳元/头到 1.3 澳元/头之间[100]。

近 5 年来，我国学者开展了基于随机模型的有害生物潜在损失预测探索。中国农业大学从澳大利亚引进相关技术，在 Cook 博士的指导下，采用@RISK 针对实蝇类害虫、入侵杂草等进行了潜在损失研究。2015 年，方焱等建立了南亚果实蝇对我国南瓜产业的潜在经济损失评估模型，从直接经济损失、间接经济损失（包括籽用、种用及食品加工产业）和防治费用进行了评估，结果显示，该虫每年对我国适生区南瓜产业造成的潜在经济损失总值在 3 741.50 万～2 315 783.08万元之间[91]；这是我国学者运用@RISK 进行基于随机模型的有害生物潜在损失预测的首次报道。随后，吴志刚等针对刺萼龙葵对中国玉米产业的潜在经济损失进行了评估[101]、方焱等针对紫茎泽兰对我国花生产业的潜在经济损失进行了预测[102]。2017－2018 年，全国农业技术推广服务中心与中国农业大学合作，基于@RISK 及随机模型，正在开展针对国外玉米种子输华可能带来的重要病害的潜在损失分析，将有利于检疫管理措施的制订。

3 有害生物风险分析定量评估模型比较及集成技术体系

综上所述，30 余年来，国内外研究、报道了多种有害生物风险分析定量评估模型和软件，主要包括用于入侵可能性评估的多指标综合评判模型、@RISK 场景模型以及 SOM 模型，用于潜在地理分布预测的 CLIMEX 地点比较模型、MaxEnt 模型、DIVA-GIS 之 BIOCLIM 模型、GARP 模型以及生物实验模型，用于潜在损失评估的@RISK 场景模型[5]。为了进一步提高对有害生物风险分析定量评估模型和软件的认识，笔者从类别、用途、模型/软件、来源、基本原理、数据需求、使用注意事项、优势及局限性等方面，比较了主要模型和软件的特点（表 1）。从表中可以看出，这些模型和软件均有其产生的时代背景和技术基础，针对有害生物风险分析定量评估的不同内容，各具特色、各有优势和不足。

那么，在我们开展 PRA 实际工作中，如何选用相关的模型和软件呢？笔者认为，应注意三个方面，一是要根据 PRA 工作的要求和需求，二是要把握各个定量评估模型和软件的特点，三是要依据对各个定量评估模型和软件的熟练程度。同时，笔者根据 20 余年从事 PRA 研究和应用的经验，综合考虑有害生物入侵过程、现有定量风险评估模型和软件的适合性以及定量风险评估的现实需求，提出现阶段适合于我国的有害生物风险分析定量评估集成技术体系的构想（图 1）。如图所示，这一技术体系包括 5 个定量评估模块（针对多种有害生物的定殖可能性评估模块、针对某种有害生物的入侵可能性评估模块、针对某种有害生物的潜在地理分布预测模块、针对某种有害生物的潜在损失模块、针对有害生物的入侵风险综合评估模块），第 1 至第 5 模块依次相接，每一模块均有可供选择的定量评估模型和软件作为技术支撑，第 1 至第 4 模块的评估结果为第 5 模块提供具体风险信息，同时 7 个基础数据库（有害生物地理分布数据库、有害生物检疫截获数据库、有害生物生物学和危害数据库、有害生物寄主数据库、地图数据库、交通运输数据库以及气象数据库）为各评估模块提供必要的数据支撑。如果 PRA 的起点是某一植物或植物产品，笔者建议选择第 1 至第 5 模块依次进行评估；如果 PRA 的起点是某一有害生物，则建议选择第 2 至第 5 模块依次完成评估。上述集成技术体系贯穿了有害生物入侵的全过程，能够对两个起点的 PRA 实现全方位的定量风险评估。

4 展望

4.1 关于国际有害生物风险分析技术的发展

国际有害生物风险研究组（International Pest Risk Research Group，IPRRG），是一个由专门从事有害生物风险分析的科学家和应用者所组成的非盈利组织，目的是通过严谨、创新的研究，发展、提高有害生物风险建模和制图的方法。IPRRG 由美国、澳大利亚等发起成立，吸引了 PRA 领域著名专家、学者参与，国际地位突出。IPRRG 每年举行 1 次年会，自 2007 年至 2017 年，已举办了 11 次年会。中国农业大学作为我国第一家单位，自 2010 年起参加、跟踪 IPRRG 年会；在 2017 年于加拿大渥太华召开的年会上，来自中国大陆及台湾地区的多位代表展示了我国在有害生物风险分析定量评估研究与应用

表 1　有害生物风险分析主要定量评估模型与软件的比较

Table 1　Comparative analysis of main quantitative assessment models and software of PRA

类别 Type	用途范围 Use scope	模型/软件 Model/Software	来源 Origin	基本原理 Principle	数据需求 Data requirement	使用注意事项 Note for application	优势 Advantage	局限性 Limitation
半定量评估模型	入侵可能性评估	多指标综合评判模型，中国国家有害生物检疫信息系统可支持运行	中国	指标间通过数学关系构成有害生物入侵风险，通过评判标准为各级指标赋值，通过评判模型计算出各指标风险值及总风险值	需要某一种有害生物的国内分布状况、潜在的危害性、受害栽培寄主的经济重要性、移植的可能性、危险性管理难度的相关数据	需针对有害生物风险评估的具体要求，调整、完善指标体系、评判标准和评判模型	能够对有害生物入侵的全过程进行评估	仅能针对一种有害生物进行评估，且输出结果不是概率值
定量评估模型	定殖可能性评估	SOM，Matlab 和 Som Toolbox 2.0	芬兰	两个有相似有害生物集合体的地区，利于有害生物的相互定殖；利用有害生物已知分布通过聚类分析预测其在其他地区的定殖可能性	需要所有有害生物的地理分布数据	有害生物需分为病原物、害虫、杂草等类别分别进行分析	能够同时对多种有害生物进行评估	仅能评估定殖可能性
	潜在地理分布预测	地点比较模型，CLIMEX	澳大利亚	气候是影响有害生物地理分布和种群数量的主要因素，利用有害生物已知分布确定一系列参数并预测潜在分布	需要有害生物的生物学数据、实际分布数据，以及地图数据和气候数据等	注意参数调试的合理范围，干旱地区应考虑灌溉情景	考虑了有害生物的生物学参数	仅考虑了气候影响，参数调试有人为影响，GIS 功能不强
		MaxEnt	美国	最大熵理论，环境是影响有害生物地理分布的主要因素，利用有害生物已知分布预测潜在分布	需要有害生物分布数据、地图数据以及环境数据	模型运行前需对分布点和环境变量进行筛选	仅需要有害生物分布经纬度数据，操作简便	仅考虑了环境影响，GIS 功能不强
		BIOCLIM，DIVA-GIS	国际马铃薯中心	生态位因子分析，环境是影响有害生物地理分布的主要因素，利用有害生物已知分布预测潜在分布	需要有害生物分布数据、地图数据以及环境数据	模型运行前需对分布点和环境变量进行筛选	只需要有害生物分布经纬度数据，操作简便，自带 GIS 功能	仅考虑了环境影响
		GARP	美国	遗传算法，环境是影响有害生物地理分布的主要因素，利用有害生物已知分布预测潜在分布	需要有害生物分布数据、地图数据以及环境数据	模型运行前需对分布点和环境变量进行筛选	仅需要有害生物分布经纬度数据，操作简便	仅考虑了环境影响，GIS 功能不强
		生物实验模型，GIS 软件	—	有害生物的分布受到各种生物和非生物因子的影响，在室内可测试主要因子对有害生物的影响，从而建立模型并进行潜在分布预测	需要地图数据和影响因子数据	需要将模型、基础数据输入 GIS 软件进行预测	模型基于有害生物实验，结果可信度高	仅针对某一种有害生物，仅考虑主要影响因子
	入侵可能性评估和潜在损失评估	场景模型，@Risk	美国	基于 Monte Carlo 随机模拟方法，利用各种概率分布对各种可能出现的结果进行模拟，最后统计得出构成风险的各种事件的发生概率	需要进入、定殖、扩散、暴发过程的基础数据进行入侵可能性评估，需要潜在经济损失（直接经济损失、间接经济损失、防治费用）、潜在非经济损失的基础数据进行潜在损失评估	科学合理构建场景和节点，并选择适宜的概率分布	随机模拟，操作简便，功能较强大	对基础数据要求高，否则只能评估局部风险

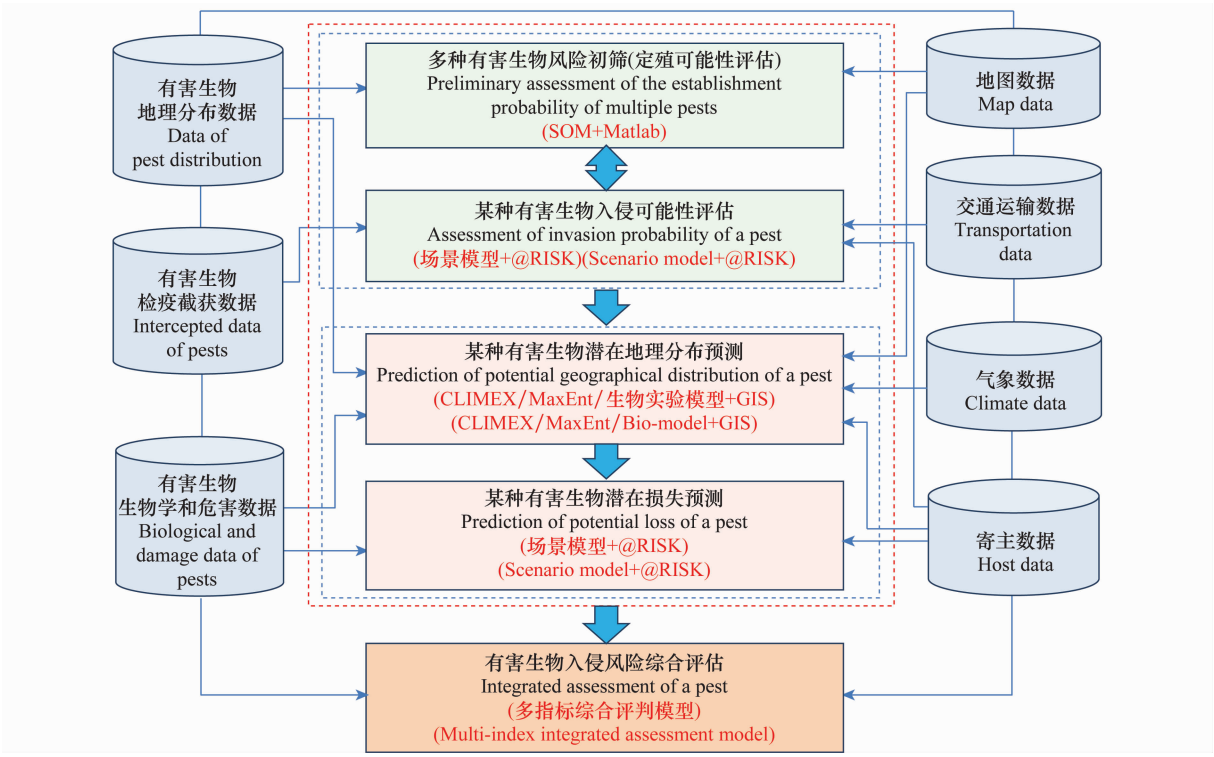


图 1 有害生物风险分析定量评估集成技术体系

Fig. 1 The integrated technical system of quantitative risk assessment of PRA

方面的新进展，受到与会者特别关注。近年来，IPRRG 已建有网站(https://www.pestrisk.org/)，可免费注册为会员并及时分享 PRA 相关信息。笔者建议我国有关部门和人员通过参会等方式及时跟踪 IPRRG 年会，重点归纳、总结国际 PRA 研究与应用的新动态，特别是美国、澳大利亚、新西兰等发达国家的新动向、新进展，并分析、提出我国的相应对策。

4.2 关于我国有害生物风险分析技术的研发

随着全球化、气候变化等的发展，有害生物入侵形势日益严峻[103]。我国高度重视有害生物风险分析技术的研发工作，自 2017 年以来，已分别资助 2 个国家重点项目开展有害生物风险评估等相关研究。中国农业科学院植物保护研究所主持国家重点研发计划项目“生物安全关键技术研发”专项的“重大/新发农业入侵生物风险评估及防控关键技术研究”(2017FYC1200600)，项目执行时间为 2017 年 7 月至 2020 年 6 月；该项目在把握入侵生物学学科发展前沿的基础上，以农业生态系统中新发/重大的入侵物种为靶标，研究围绕入侵生物“风险预警—检测监测—全程控制”关键防控环节的关键技术。中国检验检疫科学研究院主持国家重点研发计划“国家质量基础的共性技术研究与应用”重点专项(NQI 专项)的“跨境多载体隐存高危生物因子风险识别、预测和控制技术研究”，项目执行时间为 2018 年 7 月至 2021 年 6 月，其中课题 5“跨境隐存高危因子智能风险分析和控制技术研究”(2018YFF0214905)，将开发跨境人群及携带物、货物、交通工具和环境多载体隐存高危因子数据库，建立基于贝叶斯判定的风险等级识别和预测方法，构建基于关键控制点的跨境风险控制体系。笔者相信，通过上述两个重点项目的研究，我国有害生物风险分析技术水平将进一步提升，并将在有害生物风险分析方法、模型和软件工具上取得新的突破。

4.3 关于我国有害生物风险分析技术的应用

毋庸置疑，我国 PRA 工作历经几十年的发展、几代人的努力，业已创建、集成了国际先进的技术体系，摸索、积累了较为成熟的应用经验，受到国际关注[2]。面对未来全球植物检疫等生物入侵防控的实际需求，笔者建议我国有关部门进一步加强有害生物风险分析定量评估集成技术体系的推广应用工作。一是要协调、组织全国力量，针对亟需加强 PRA 工作的植物或植物产品(如粮食、水果、木材及

繁殖材料等)及有害生物(如国外严重危害但在我国尚未发生的有害生物、已入侵我国但分布局限的有害生物等),将 SOM 模型、CLIMEX 地点比较模型/MaxEnt 模型/生物实验模型、@RISK 场景模型以及多指标综合评判模型等系统性地应用于 PRA 工作中,促进我国各类植物检疫性有害生物名录的修订工作,进一步提升我国有害生物入侵防控的水平;二是要协调、组织有关机构和人员,针对"一带一路"沿线国家和地区等的生物入侵防控需求,通过技术培训、短期互访及长期合作等方式,进一步促进我国有害生物风险分析定量评估集成技术体系走向国际,指导、帮助西亚、东南亚、非洲等主要贸易国家和地区做好有害生物入侵防控工作,为今后 PRA 相关国际标准的制修订奠定基础,进一步发挥我国《国际植物保护公约》签约国的作用,提升全球生物入侵防控的能力。

参考文献

[1] KAHN R P. A concept of pest risk analysis [J]. EPPO Bulletin, 1979, 9(1): 119 - 130.

[2] GORDH G, MCKIRDY S. The handbook of plant biosecurity [M]. Dordrecht: Springer, 2014.

[3] FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations). International standards for phytosanitary measures. ISPM No. 2 Framework for pest risk analysis (2007)[R]. Secretariat of the International Plant Protection Convention, 2008.

[4] 李尉民. 有害生物风险分析[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

[5] 李志红,姜帆,马兴莉,等. 实蝇科害虫入侵防控技术研究进展[J]. 植物检疫,2013,27(2):1 - 10.

[6] 陈克,范晓虹,李尉民. 有害生物的定性与定量风险分析[J]. 植物检疫,2002,16(5):257 - 261.

[7] 孙楠,黄冠胜,林伟,等. 主要贸易国家有害生物风险分析研究方法比较[J]. 植物检疫,2007,21(2):87 - 91.

[8] 万方浩,彭德良,王瑞. 生物入侵:预警篇[M]. 北京:科学出版社,2010.

[9] SUTHERST R W, MAYWALD G F. A computerised system for matching climates in ecology [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1985, 13(3/4): 281 - 299.

[10] 蒋青,梁忆冰,王乃扬,等. 有害生物危险性评价指标体系的初步确立[J]. 植物检疫,1994,8(6):331 - 334.

[11] USDA. Risk assessment for the importation of U. S. milling wheat containing teliospores of *Tilletia controversa* (TCK) into the People's Republic of China [R]. Washington DC, 1998.

[12] PHILLIPS S J, DUDIK M, SCHAPIRE R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling[C]// Proceedings of the twenty-first international conference on machine learning. ACM, 2004: 83.

[13] WORNER S P, GEVREY M. Modelling global insect pest species assemblages to determine risk of invasion [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(5): 858 - 867.

[14] 吕飞,杜予州,周奕景,等. 有害生物风险分析研究概述[J]. 植物检疫,2016,30(2):7 - 12.

[15] COOK D C, CARRASCO L R, PAINI D R, et al. Estimating the social welfare effects of New Zealand apple imports[J]. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2011, 55(4): 599 - 620.

[16] 李志红. 生物入侵防控:重要经济实蝇潜在地理分布研究[M]. 北京:中国农业大学出版社,2015.

[17] QIN Y J, PAINI D R, WANG C, et al. Global establishment risk of economically important fruit fly species (Tephritidae) [J/OL]. PLoS ONE, 2015, 10(1): e0116424.

[18] KRITICOS D J, KEAN J M, PHILLIPS C B, et al. The potential global distribution of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, a critical threat to plant biosecurity [J]. Journal of Pest Science, 2017, 90(4): 1033 - 1043.

[19] European and Mediterranean Plant Protection Organization. Pest risk assessment scheme [J]. EPPO Bulletin, 1997, 27: 281 - 305.

[20] 蒋青,梁忆冰,王乃扬,等. 有害生物危险性评价的定量分析方法研究[J]. 植物检疫,1995,9(4):208 - 211.

[21] 梁忆冰,潘国祈. 进境花卉有害生物风险初步分析[J]. 植物检疫,1999,13(1):17 - 22.

[22] 周国梁,印丽萍,黄晓藻. 外来生物风险分析指标体系的建立[J]. 植物检疫,2006,20(S1):14 - 19.

[23] 孙楠. 进口水果果实有害生物风险分析实用方法的研究与实践[D]. 北京:中国农业大学,2007.

[24] 赵朔,丁建云,李志红,等. 有害生物风险评估方法在北京市农业植物检疫工作中的应用[J]. 植物检疫,2016,30(4):51 - 56.

[25] NIX H A. A biogeographic analysis of Australian elapid snakes [J]. Atlas of Elapid Snakes of Australia, 1986, 7: 4 - 15.

[26] STOCKWELL D. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(2): 143 - 158.

[27] 林伟. 美国白蛾在中国适生性的初步研究[D]. 北京:中国农业大学,1991.

[28] 陈克,章正. 小麦矮腥黑穗病在中国定殖风险分析及区划研究[J]. 植物病理学报,2002,32(4):312 - 318.

[29] GENG J, LI Z H, RAJOTTE E G, et al. Potential geographical distribution of *Rhagoletis pomonella* (Diptera: Tephritidae) in China [J]. Insect Science, 2011, 18(5): 575 - 582.

[30] 邵刚,李志红,张祥林,等. 苜蓿黄萎病菌在我国的适生性分析研究[J]. 植物保护,2006,32(5):48 - 51.

[31] QIN Yujia, NI Wenlong, WU Jiajiao, et al. The potential geographic distribution of *Bactrocera correcta* (Diptera: Tephritidae) in China based on eclosion rate model [J]. Applied Entomology and Zoology, 2015, 50(3): 371 - 381.

[32] 马兴莉. 东盟重要经济实蝇入侵我国的定量风险分析[D]. 北

京:中国农业大学,2013.

[33] 马兴莉,李志红,陈克,等.@RISK 在有害生物定量风险评估中的应用[J].植物检疫,2010,24(6):1-6.

[34] USDA APHIS PPQ CPHST. Importation of avocado fruit (*Persea americana* Mill. var.'Hass') from Mexico: A risk assessment [R]. Raleigh, NC, 2004: 19.

[35] AUCLAIR A N D, FOWLER G, HENNESSEY M K, et al. Assessment of the risk of introduction of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in municipal solid waste from the quarantine area of New York City to landfills outside of the quarantine area: A pathway analysis of the risk of spread and establishment [J]. Journal of Economic Entomology, 2005, 98(1): 47-60.

[36] 周国梁,胡白石,印丽萍,等.利用 Monte-Carlo 模拟再评估梨火疫病病菌随水果果实的入侵风险[J].植物保护学报,2006,33(1):47-50.

[37] 汤宛地.松材线虫病入侵黄山风景区的风险性评估[D].北京:北京林业大学,2008.

[38] 周国梁,印丽萍,李尉民,等.利用概率模型定量评估橘小实蝇传入我国的可能性[J].植物检疫,2006(S1):10-13.

[39] 李白尼,侯柏华,郑大睿,等.基于 PERT 与仿真技术的橘小实蝇传入定量风险评估[J].2008,34(5):32-39.

[40] 汤宛地,石娟,骆有庆.运用@risk 软件评价红脂大小蠹风险初探[J].中国森林病虫,2008,27(4):7-9.

[41] LI B, MA J, HU X, et al. Risk of introducing exotic fruit flies, *Ceratitis capitata*, *Ceratitis cosyra*, and *Ceratitis rosa* (Diptera: Tephritidae), into southern China [J]. Journal of Economic Entomology, 2010, 103(4): 1100-1111.

[42] MA Xingli, LI Zhihong, WU Jiajiao, et al. Using decision tools suite to estimate the probability of the introduction of *Bactrocera correcta* (Bezzi) into China via imported host fruit [J]. Sensor Letters, 2012, 10(1/2): 586-591.

[43] PAINI D R, WORNER S P, COOK D C, et al. Threat of invasive pests from within national borders [J]. Nature Communications, 2010, 1(8): 115.

[44] PAINI D R, BIANCHI F J J A, NOREHFIELD T D, et al. Predicting invasive fungal pathogens using invasive pest assemblages: testing model predictions in a virtual world [J/OL]. PLoS ONE, 2011, 6(10): e25695.

[45] MORIN L, PAINI D R, RANDALL R P. Can global weed assemblages be used to predict future weeds? [J/OL]. PLoS ONE, 2013, 8(2): e55547.

[46] SINGH S K, PAINI D R, ASH G J, et al. Prioritising plant-parasitic nematode species biosecurity risks using self organising maps [J]. Biological Invasions, 2014, 16(7): 1515-1530.

[47] 王聪,郑明慧,王振华,等.植物检疫性有害生物名单发展综述与制订方法探讨[J].植物检疫,2014,28(3):1-7.

[48] 雷鸣.基于 SOM 的玉米有害生物在我国的定殖可能性研究[D].北京:中国农业大学,2016.

[49] 魏淑秋.农业气候相似距简介[J].北京农业大学学报,1984,10(4):427-428.

[50] DUDIK M, PHILLIPS S J, SCHAPIRE R E. Performance guarantees for regularized maximum entropy density estimation [C] // International Conference on Computational Learning Theory. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004: 472-486.

[51] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.

[52] KRITICOS D J, MAYWALD G F, YONOW T, et al. CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases [M]. Canberra: CSIRO, 2015.

[53] WORNER S P. Ecoclimatic assessment of potential establishment of exotic pests [J]. Journal of Economic Entomology, 1988, 81(4): 973-983.

[54] VERA M T, RODRIGUEZ R, SEGURA D F, et al. Potential geographical distribution of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae), with emphasis on Argentina and Australia[J]. Environmental Entomology, 2002, 31(6): 1009-1022.

[55] MCCONNACHIE A J, STRATHIE L W, MERSIE W, et al. Current and potential geographical distribution of the invasive plant *Parthenium hysterophorus* (Asteraceae) in eastern and southern Africa [J]. Weed Research, 2011, 51(1): 71-84.

[56] BOURDOT G W, LAMOUREAUX S L, WATT M S, et al. The potential global distribution of the invasive weed *Nassella neesiana* under current and future climates [J]. Biological Invasions, 2012, 14(8): 1545-1556.

[57] DE VILLIERS M, HATTINGH V, KRITICOS D J, et al. The potential distribution of *Bactrocera dorsalis*: considering phenology and irrigation patterns [J]. Bulletin of Entomological Research, 2016, 106(1): 19-33.

[58] DE VILLIERS M, KRITICOS D J, VELDTMAN R. Including irrigation in niche modelling of the invasive wasp *Vespula germanica* (Fabricius) improves model fit to predict potential for further spread [J/OL]. PLoS ONE, 2017, 12(7): e0181397.

[59] YONOW T, KRITICOS D J, KIRICHENKO N, et al. Considering biology when inferring range-limiting stress mechanisms for agricultural pests: a case study of the beet armyworm [J]. Journal of Pest Science, 2018, 91(2): 523-538.

[60] WAKIE T T, YEE W L, NEVEN L G. Assessing the risk of establishment of *Rhagoletis cerasi* (Diptera: Tephritidae) in the United States and globally [J]. Journal of Economic Entomology, 2018, 111(3): 1275-1284.

[61] 张振铎.大豆锈病抗病品种筛选及基于 CLIMEX 的发病适合区评估[D].北京:中国农业大学,2005.

[62] 周国梁,陈晨,戚龙军,等.基于 CLIMEX 的相似穿孔线虫在中国可能适生区域的初步预测[J].植物检疫,2006(S1):22-26.

[63] 程俊峰,万方浩,郭建英.西花蓟马在中国适生区的基于 CLIMEX 的 GIS 预测[J].中国农业科学,2006(3):525-529.

[64] 耿建,李志红,万方浩,等.墨西哥按实蝇在我国的适生性分析[J].植物保护,2008,34(4):93-98.

[65] 吕文刚,林伟,李志红,等.枣实蝇在中国适生性初步研究[J].植物检疫,2008,22(6):343-347.

[66] 秦誉嘉,吕文诚,赵守歧,等.考虑灌溉及气候变化条件下葡萄

花翅小卷蛾在中国的潜在地理分布[J]. 植物保护学报,2018,45(3):599 - 605.

[67] NI W L, LI Z H, CHEN H J, et al. Including climate change in pest risk assessment: the peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Diptera: Tephritidae) [J]. Bulletin of Entomological Research, 2012, 102(2): 173 - 183.

[68] FU Liao, LI Zhihong, HUANG Guansheng, et al. The current and future potential geographic range of West Indian fruit fly, *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae)[J]. Insect Science, 2014, 21(2): 234 - 244.

[69] GE Xuezhen, JIANG Chao, CHEN Linghong, et al. Predicting the potential distribution in China of *Euwallacea fornicates* (Eichhoff) under current and future climate conditions [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 906.

[70] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics [J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620.

[71] MEROW C, SMITH M J, SILANDER JR J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter[J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058 - 1069.

[72] PETITPIERRE B, KUEFFER C, BROENNIMANN O, et al. Climatic niche shifts are rare among terrestrial plant invaders [J]. Science, 2012, 335(6074): 1344 - 1348.

[73] JIMENEZ-VALVERD A. Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling [J]. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21(4): 498 - 507.

[74] KRAMER-SCHADT S, NIEDBALLA J, PILGRIM J D, et al. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models[J]. Diversity and Distributions, 2013, 19(11): 1366 - 1379.

[75] SYFERT M M, SMITH M J, COOMES D A. The effects of sampling bias and model complexity on the predictive performance of MaxEnt species distribution models[J/OL]. PLoS ONE, 2013, 8(2): e55158.

[76] BECK J, BOLLER M, ERHARDT A, et al. Spatial bias in the GBIF database and its effect on modeling species' geographic distributions [J]. Ecological Informatics, 2014, 19: 10 - 15.

[77] 王运生,谢丙炎,万方浩,等. 相似穿孔线虫在中国的适生区预测[J]. 中国农业科学,2007,40(11):2502 - 2506.

[78] 李建中,彭德良,刘淑艳. 潜在外来入侵甜菜孢囊线虫在中国的适生性风险分析[J]. 植物保护,2008,34(5):90 - 94.

[79] 曾辉,黄冠胜,李志红,等. 利用 MaxEnt 预测橡胶南美叶疫病菌在全球的潜在地理分布[J]. 植物保护,2008,34(3):88 - 92.

[80] 罗志萍,潘绪斌,王聪,等. 基于 MaxEnt 和 DIVA-GIS 的白蜡枯梢病菌在中国的潜在适生区分析[J]. 湖南农业科学,2015(10):83 - 87.

[81] 冯益明,刘洪霞. 基于 Maxent 与 GIS 的锈色棕榈象在中国潜在的适生性分析[J]. 华中农业大学学报(自然科学版),2010,29(5):552 - 556.

[82] 孙宏禹,李志红,杨普云,等. 基于最大熵模型的斑翅果蝇适生性研究[J]. 中国植保导刊,2016(12):66 - 73.

[83] 何佳遥,赵继羽,赵紫华,等. 基于最大熵模型的沙棘绕实蝇适生性研究[J]. 植物检疫,2017,31(2):22 - 29.

[84] 黄振,吴淇铭,黄可辉. 应用 MaxEnt 模型预测辣椒果实蝇在中国的潜在地理分布[J]. 武夷科学,2017,33:28 - 34.

[85] 房锋,张朝贤,黄红娟,等. 基于 MaxEnt 的麦田恶性杂草节节麦的潜在分布区预测[J]. 草业学报,2013,22(2):62 - 70.

[86] WANG Cong, HAWTHORNE D, QIN Yujia, et al. Impact of climate and host availability on future distribution of Colorado potato beetle [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4489.

[87] ZHU Gengping, LI Huiqi, ZHAO Li. Incorporating anthropogenic variables into ecological niche modeling to predict areas of invasion of *Popillia japonica*[J]. Journal of Pest Science, 2017, 90(1): 151 - 160.

[88] 曾士迈. 植保系统工程导论[M]. 北京:北京农业大学出版社,1994.

[89] KRITICOS D J, LERICHE A, PALMER D J, et al. Linking climate suitability, spread rates and host-impact when estimating the potential costs of invasive pests [J/OL]. PLoS ONE, 2013, 8(2): e54861.

[90] COOK D C, LIU S, EDWARDS J, et al. Predicting the benefits of banana bunchy top virus exclusion from commercial plantations in Australia [J/OL]. PLoS ONE, 2012, 7(8): e42391.

[91] 方焱,秦萌,李志红,等. 南亚果实蝇对我国南瓜产业的潜在经济损失评估[J]. 植物检疫,2015,29(3):28 - 33.

[92] PIMENTEL D, LACH L, ZUNIGA R, et al. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States [J]. Bioscience, 2000, 50 (1): 53 - 65.

[93] 杨昌举,韩蔡峰. 外来入侵物种造成经济损失的评估[J]. 环境保护,2005(7):29 - 33.

[94] 赵铁珍. 美国白蛾入侵对我国的危害分析与损失评估研究[D]. 北京:北京林业大学,2005.

[95] 赵铁珍,高岚,柯水发,等. 美国白蛾入侵损失评估指标体系的构建[J]. 北京林业大学学报,2007,29(2):156 - 160.

[96] 饶玉燕,尤扬,朱水芳,等. 玉米褪绿斑驳病毒入侵损失指标体系及直接经济损失评估[J]. 植物检疫,2010,24(2):5 - 8.

[97] 饶玉燕,沈玲丽,朱水芳,等. 棉花曲叶病毒对棉花造成的经济损失评估[J]. 植物检疫,2011,25(3):12 - 16.

[98] 马兴莉,李志红,胡学难,等. 橘小实蝇、瓜实蝇和南亚果实蝇对广东省造成的经济损失评估[J]. 植物检疫,2013,27(3):50 - 56.

[99] 刘萍,梁倩玲,陈梦,等. 林业有害生物灾害损失评估指标体系构建[J]. 林业科学,2016,52(6):101 - 107.

[100] DARBRO J, HALASA Y, MONTGOMERY B, et al. An economic analysis of the threats posed by the establishment of *Aedes albopictus* in Brisbane, Queensland [J]. Ecological Economics, 2017, 142: 203 - 213.

[101] 吴志刚,方焱,秦萌,等. 刺萼龙葵对中国玉米产业造成的潜在经济损失评估[J]. 中国农业大学学报,2015,20(6):138 - 145.

[102] 方焱,秦萌,李志红,等. 紫茎泽兰对我国花生产业造成的潜在经济损失评估[J]. 中国农业大学学报,2015,20(6):146 - 151.

[103] 潘绪斌,王聪,严进,等. 经济全球化与气候变化对生物入侵的影响浅析[J]. 中国植保导刊,2018,38(4):65 - 69.

(责任编辑:田　喆)