

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2013.04.001

近 10 年外来入侵昆虫风险分析的研究现状及主要进展

陈燕婷^{1,2+}, 黄 离^{1,2+}, 王 瑞³, 彭 露^{1,2}, 尤民生^{1,2*}

¹福建农林大学应用生态研究所,福建 福州 350002; ²农业部闽台作物有害生物综合治理重点实验室,福建 福州 350002; ³中国农业科学院植物保护研究所,植物病虫害生物学国家重点实验室,北京 100193

摘要: 随着经济全球化的加速发展,外来入侵昆虫对世界各国农林业、生态环境、社会经济和人类健康造成的影响日趋严重。近 10 年来,关于外来入侵昆虫风险分析的相关研究备受重视,发展迅速;在研究对象类别中,鞘翅目昆虫居多,占所有入侵昆虫的 32.21%,其次为双翅目和膜翅目,最小的为缨翅目,仅占 1.44%。风险分析主要包括入侵途径、适生范围及风险等级、传播扩散、经济和生态影响等层面;其中以适生性风险分析研究最多,占 43.41%。深入开展入侵昆虫的风险分析,对防范和阻截其传入、扩散和蔓延具有重要的理论意义和应用价值。

关键词: 外来入侵昆虫; 风险分析; 传入途径; 适生范围; 扩散蔓延; 经济影响

Current status and major progress on the risk analysis of invasive alien insects over the last decade

Yan-ting CHEN^{1,2+}, Li HUANG^{1,2+}, Rui WANG³, Lu PENG^{1,2}, Min-sheng YOU^{1,2*}

¹*Institute of Applied Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;* ²*Key Laboratory of Integrated Pest Management for Fujian-Taiwan Crops, Fuzhou, Fujian 350002, China;* ³*State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China*

Abstract: With the rapid development of economic globalization, impacts of invasive alien insects on agriculture and forestry, ecological environment, socio-economy and human health are getting increasingly serious and of great concern. Over the last decade, risk assessment of invasive alien insects has become an important and fast-progressing research area in the invasive biology. The pest risk assessment is a comprehensive area of research, mainly involving invasion pathway, geographical distribution and climate- and host-suitable area, potential range of spread, and economic and ecological impacts, etc. The order-specific data reveal that Coleoptera is the largest taxon of insects with high risks, which accounts for 32.21% of the total studied species, followed by Diptera and Hymenoptera. Thysanoptera and isopteran are the least represented taxa, accounting for less than 2% of the risks. The analytical component of the assessment on the climate- and host-suitable area of invasive insects tends to be the most documented, accounting for 43.41% of the invasive risk assessment on insects. Further research on the risk assessment of invasive pests will be theoretically and practically important in preventing and interdicting the intrusion and spread of the alien pest insects.

Key words: invasive alien insect; pest risk analysis (PRA); invasion pathway; climate- and host-suitable area; spread and expansion; economic impact

随着全球经济一体化的加速发展,外来物种入侵对入侵地区的生态环境、人类健康以及社会与经济发展造成了严重威胁,已经成为 21 世纪五大全球环境问题之一(Millennium Ecosystem Assessment,

收稿日期(Received): 2013-09-20 接受日期(Accepted): 2013-10-30

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903034)

作者简介: 陈燕婷,女,硕士研究生。研究方向: 昆虫生态与害虫综合治理;黄离,男,硕士研究生。研究方向: 入侵生物学

+ 并列第一作者(Joint first author)

* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: msyou@iae.fjau.edu.cn

2005),致使外来有害生物风险分析(pest risk analysis, PRA)备受人们关注。早在 300 年前,人类就已经开始采取植物检疫措施对外来有害生物进行防控。在 20 世纪 80 年代,人们将风险管理与检疫措施相结合,形成了防御外来有害生物入侵的一项重要措施,即 PRA(Kahn, 1979)。随着外来入侵生物问题的日益凸显及其相关科学研究的不断发展,对 PRA 的定义也越来越完善。联合国粮农组织(FAO, 2007)指出有害生物风险分析的内容和程序包括:从科学和经济的角度确证某一种生物是否为有害生物,是否属于检疫对象,应该采取什么检疫措施等。生物入侵风险分析与有害生物风险分析的含义基本一致,只是其研究对象从外来有害生物扩展到外来潜在入侵生物,从传入、定殖、传播等阶段分析入侵生物从来源地到入侵地的过程,评估它在入侵地的风险程度以及应该采取的措施和力度(万方浩等, 2010)。

外来物种入侵会造成巨大的生态风险和经济损失。我国是一个粮食与经济作物种植的大国,外来入侵昆虫对我国农业转型以及经济发展构成了严重威胁。根据国家环保总局公布的数据,目前,在我国造成严重危害的 16 种外来物种每年入侵的农田面积超过 140 万 hm^2 ,林地面积达 150 万 hm^2 ,由此造成的农林业直接经济损失高达 574 亿元·年⁻¹(俞红等, 2009)。据统计,我国外来入侵昆虫有 198 种,其中,种类较多分别为鞘翅目(29 种)、半翅目(19 种)、双翅目(13 种)、鳞翅目(8 种),且近 40 年来,新入侵昆虫的数量总体呈现明显的上升趋势(黄顶成和张润志, 2011; 万方浩等, 2009)。2005~2008 年,在我国大陆口岸每年截获的进境有害生物中,昆虫所占的比例最高,为 50.3%~63.3%(万方浩等, 2011)。入侵昆虫由于个体小,隐蔽性强,往往在暴发后才被发现,在时间上具有一定的滞后性。因此,对外来入侵昆虫进行风险分析以建立早期预报预警体系,并采取科学的防控策略,快速遏制外来入侵昆虫的扩散蔓延是确保我国农林业生产和生态安全的需要。

外来入侵昆虫风险分析已经成为国内外科技工作者研究的热点,它不仅在国际贸易、货物进出口管理、检验检疫等方面具有重要的实践意义,而

且对生态安全、生物多样性保护等方面具有重要的指导意义,同时可以为政府相关工作以及相关政策的制定提供科学依据。本文整理了国内外近 10 年外来入侵昆虫风险分析的研究现状,并分别总结了在传入途径、适生区、扩散蔓延及经济影响等方面的主要研究进展,旨在为从事外来入侵生物研究的科技工作者提供参考,并为完善我国生物入侵的预警和防控提供理论基础。

1 外来入侵昆虫风险分析的研究现状

首先,采用美国信息科学研究所(ISI)提供的 Web of Science 数据库,使用其高级检索功能,以 biological invasion、invasive species、pest risk analysis、potential distribution、spread、economic、entry 等关键词及其派生词进行综合搜索,并对得出的结果进行筛选,得到 2002~2013 年已发表的有关外来入侵昆虫风险分析的文献共 689 篇。其次,在中国知网、维普和万方 3 个数据库以同义的中文关键词搜索,并剔除与上述 Web of Science 数据库重复的文献,2002~2013 年发表的有关外来入侵昆虫风险分析的期刊论文和学位论文共计 395 篇。国内外相关研究均呈逐年上升的趋势,2002 年发表相关文献仅 30 篇,而 2012 年已达到 139 篇(图 1)。由此可见,近 10 年来,外来入侵昆虫风险分析的研究备受重视,发展迅速。风险分析的对象主要集中在鞘翅目、双翅目、膜翅目、半翅目、鳞翅目、等翅目、缨翅目等类群,其中,鞘翅目的相关研究最多,占总数的 32.21%(图 2)。这可能与全球范围内鞘翅目昆虫的入侵数量最多有关,如我国大陆外来入侵昆虫中,鞘翅目昆虫最多,占 57.5%(乔格侠等, 2005)。同样,北美入侵昆虫中鞘翅目昆虫所占比例也最大,为 37.97%(Center for Invasive Species and Ecosystem Health, 2009)。IUCN 发布的世界最具危险的 100 种外来入侵物种中,除四斑按蚊 *Anopheles quadrimaculatus* Say 和大果柏大蚜 *Cinara cupressi* Buckton 外,其他昆虫种类均有关于风险分析的报道(表 1)。其中,关于红火蚁 *Solenopsis invicta* Burren 风险分析的文献数量最多,可能由于其不仅能造成农林业经济损失,还可严重危害人类健康及日常生活。

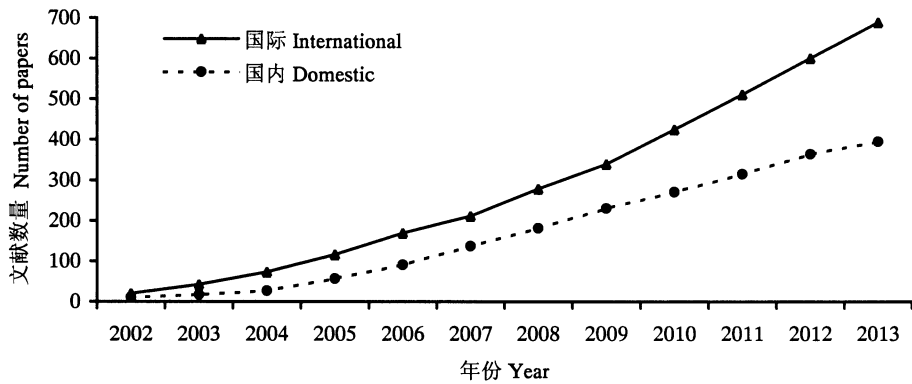


图 1 2002 ~ 2013 年外来入侵昆虫风险分析相关文献发表数量

Fig. 1 Number of scientific papers published on risk assessment of invasive insect species from 2002 to 2013

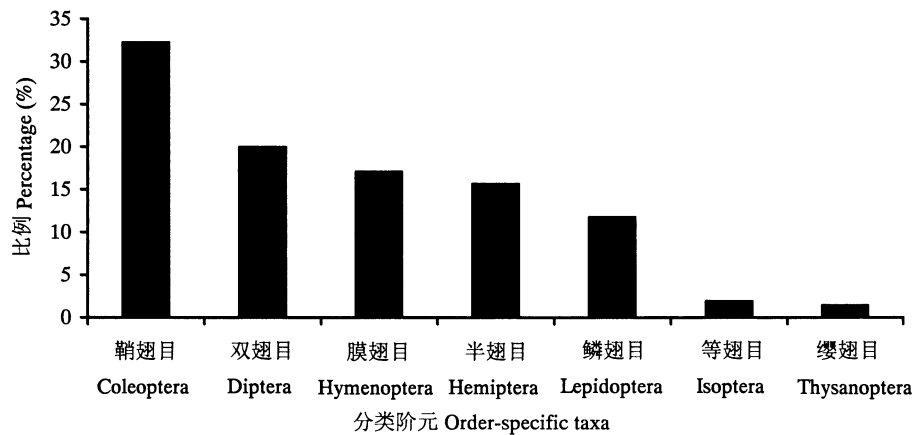


图 2 外来入侵昆虫风险分析研究对象中不同目的比例

Fig. 2 Order-specific percentage of invasive insect species studied on risk assessment

表 1 全球最具危险的 100 种入侵物种中入侵昆虫的风险分析研究案例

Table 1 Documented case studies on the risk assessment of insects listed in 100 world list of worst invasive alien species

物种 Species	相关文献数量 Number of related papers	主要参考文献 Main reference
红火蚁 <i>Solenopsis invicta</i>	49	Morrison,2002; Morrison <i>et al.</i> ,2004、2005; Sutherst & Maywald,2005
阿根廷蚁 <i>Linepithema humile</i>	42	Fitzgerald <i>et al.</i> ,2012; Hartley <i>et al.</i> ,2006、2010; Pitt <i>et al.</i> ,2009; Rodriguez-Cabal <i>et al.</i> ,2009; Roura-Pascual <i>et al.</i> ,2009
白纹伊蚊 <i>Aedes albopictu</i>	34	Beilhe <i>et al.</i> ,2012; Caminade <i>et al.</i> ,2012; Porretta <i>et al.</i> ,2012; Rochlin <i>et al.</i> ,2013
舞毒蛾 <i>Lymantria dispar</i>	29	Gevrey & Worner,2006; Jankovic & Petrovskii,2013; Lippitt <i>et al.</i> ,2008; Logan <i>et al.</i> ,2007
光肩星天牛 <i>Anoplophora glabripennis</i>	12	MacLeod <i>et al.</i> ,2002; Peterson & Scachetti-Pereira,2004; Smith <i>et al.</i> ,2004; Tobin <i>et al.</i> ,2010
小火蚁 <i>Wasmannia auropunctata</i>	8	Foucaud <i>et al.</i> ,2010; Fuentealba <i>et al.</i> ,2013; Wetterer & Porter,2003
大头蚁 <i>Pheidole megacephal</i>	7	Bertelsmeier <i>et al.</i> ,2013; Lach & Thomas,2008; Wetterer <i>et al.</i> ,2006
烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i>	5	Chu <i>et al.</i> ,2006; Oliveira <i>et al.</i> ,2013
家白蚁 <i>Coptotermes formosanu</i>	5	Hochmair & Scheffrahn,2010; Hochmair <i>et al.</i> ,2013
谷斑皮蠹 <i>Trogoderma granarium</i>	5	马平等,2009; Paini & Yemshanov,2012
细足捷蚁 <i>Anoplolepis gracilipes</i>	3	Chen,2008; Mezger & Pfeiffer,2011; Wetterer,2005
普通黄胡蜂 <i>Vespa vulgaris</i>	1	Beggs <i>et al.</i> ,2011

2 外来入侵昆虫风险分析研究的主要进展

在风险分析过程中,需要考虑的因素包括外来生物的重要性、为害对象的经济或生态重要性、外来生物的传播特性、防控手段的有效性以及损失严重程度(万方浩等,2010)。根据外来生物在入侵过程中的不同阶段及其风险分析的内容,我们从传入

风险、适生性风险、扩散风险、经济与生态风险 4 个层面整理了已经查找到的相关文献,发现适生性风险分析研究最多(43.41%),经济与生态风险分析(21.75%)和扩散风险分析(20.82%)次之,传入风险分析的研究相对较少(14.02%)(图 3)。

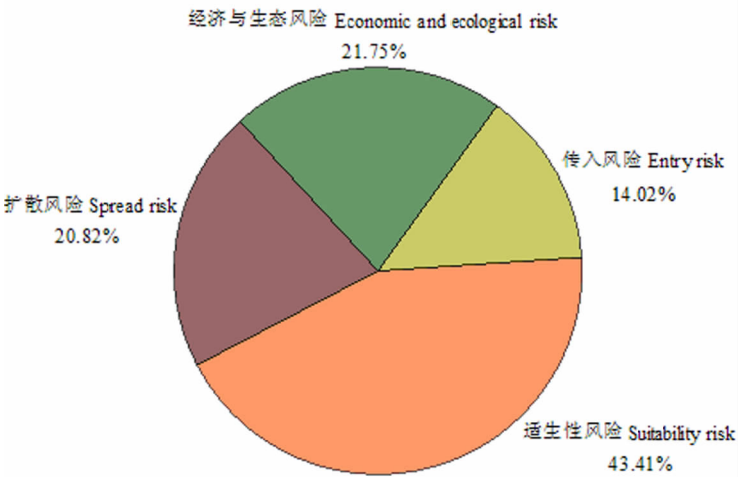


图 3 不同层面的外来入侵昆虫风险分析研究所占比例

Fig.3 Proportional difference in research areas of invasive insect risk assessment

2.1 传入风险分析

传入是生物入侵的第 1 个阶段。分析外来入侵生物的传入风险,应考虑入侵种的现有分布、自然环境条件、可能传入的途径、与来源国的贸易情况以及口岸截获记录等。

在已检索到的文献中传入风险分析占的比例最小,且其研究对象主要集中在林业害虫。这可能与林业害虫极易随苗木、木材、木质包装等途径在全球扩散蔓延有关。在我国截获频次较高的检疫性有害生物中,林业昆虫占了相对大的比例,如材小蠹属 *Xyleborus*、双钩异翅长蠹 *Heterobostrychus aequalis* Waterhouse、咖啡果小蠹 *Hypothenemus hampei* (Ferrari)等,截获疫情较多的货物包括检疫风险极高的植物种苗(万方浩等,2011)。在美国,活体植物的引进是外来入侵森林昆虫的主要传入途径(Liebhold *et al.*, 2012)。而在木质包装上截获到的有害生物批次仅次于货物,它也是有害生物传播和扩散的重要途径,截获的害虫主要包括双钩异翅长蠹、白蚁、材小蠹等(万方浩等,2011)。

除此之外,另一明显的特点是大量文献以贸易为切入点,将其作为影响昆虫传入的一个研究因素。港口、铁路和飞机等是外来入侵生物传入的重

要途径(Carlton, 1996);全球贸易在外来生物传入及建立种群过程中扮演着至关重要的角色(Costello & McAusland, 2003; Jenkins, 1996),它是预测入侵害虫传入的一个重要因子。据报道,入侵物种的数量与贸易和经济总量的增加密切相关(Hulme, 2009)。Marini *et al.* (2011)将进口额作为一个重要因子预测外来食菌蠹虫和树皮甲虫入侵欧洲和美国的数量,结果认为,国际贸易的加速提高了小蠹亚科害虫传入的可能性,并对森林生态系统造成负面影响。Piel *et al.* (2008)结合 1996 ~ 2004 年从俄罗斯和波罗地海诸国进口到比利时的木材运输途径以及数量,对云杉八齿小蠹 *Ips typographus* L. 进行风险分析,认为在这期间木材贸易尤其活跃,为该虫入侵比利时提供了机会。除了贸易情况,入侵地的环境条件对种群定殖具有重要作用。如 Marini *et al.* (2011)分析了环境变量与入侵小蠹亚科害虫种群丰度的关系,结果表明由于美国东南部的气候更适宜,食菌蠹虫在美国的传入风险高于欧洲。

另外,由于生物入侵是一个与时间变化有关的动态变量,许多研究通过建立模型来进行传入风险分析。在这些模型中主要考虑的影响因子包括贸易总额、运输路线、进口商品、昆虫入侵历史、口岸

拦截数等。Koch *et al.* (2011) 以美国进口商品、有害生物入侵历史、口岸拦截数据等作为影响因子进行预测,认为美国每年森林可新增 1.89 个外来入侵森林昆虫。Yemshanov *et al.* (2012) 在 Koch 研究基础上建立了概率运输路径矩阵来预测人类介导的外来森林害虫传入加拿大的速率,结果认为,该速率相对低于美国。Gray (2010) 建立了二维物候模型,该模型结合了舞毒蛾的生活史、货物运输路线、运输时间表以及温度模式来模拟贸易过程中舞毒蛾从来源地到入侵地的过程以及预测其成功传入与定殖的可能性。构建相关模型需要大量的数据作为支撑,可将国际和国内运输网络作为一个评估系统的平台,结合影响因子对外来入侵昆虫进行风险分析。

同时,有些学者还利用相关软件对历史数据进行分析以推测有害昆虫的入侵模式。李军等 (2007) 对高风险入侵区的红火蚁进行 GPS 定位,利用地理信息系统 (geographic information system, GIS) 软件制定入侵区域红火蚁的分布图,由此得出该区域红火蚁的传入途径主要为人为带入,并建议将铁路、公路、码头等列为重点监控区域。Britch *et al.* (2008) 利用地理信息系统与长期的调查数据,研究白纹伊蚊在美国佛罗里达州的入侵模式,并对影响其种群动态的非生物因素进行了分析。

2.2 适生性风险分析

定殖是生物入侵的第 2 个阶段。当一个物种成功进入新的栖息地后,能否再成功建立种群则取决于一系列的生物和非生物因素,如气候、资源、与本地种的互作等 (Holmes *et al.*, 2009)。因此,适生性风险评估是入侵昆虫风险分析的主要研究内容 (图 3)。目前,适生性风险分析主要是结合物种在原产地和入侵地的地理分布、环境条件、扩散特性等,通过模型分析物种在研究地区的适生范围和适生程度 (万方浩等, 2011)。

随着信息技术的快速发展,可用于适生性风险分析研究的技术与方法越来越多,其中, GARP、MaxEnt、CLIMEX、DIVA-GIS、WhyWhere、GIS 等是入侵昆虫风险分析中应用最为广泛的模型和软件系统。GARP 和 MaxEnt 均属生态位模型软件,可以根据物种的已知分布与环境数据预测物种的潜在分布区。由于物种的分布数据可通过文献、标本等途径获取,被广泛用于入侵昆虫的适生性风险分析。

由于 GARP 模型开发的时间较早 (1999 年) 且易于使用,许多研究都利用该模型预测物种的适生区,如预测日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* (Kuwana) 与阿根廷蚁等在中国的适生区 (李红梅等, 2005; 王艳平等, 2007)。随后, 2004 年贝尔实验室开发出了 MaxEnt 模型软件系统,与 GARP 相比其运算能力更强大,同时融入了模型评价模块,以便于最优模型的选择,且预测效果有时会优于 GARP 模型 (Peterson *et al.*, 2007)。近年来,越来越多的学者开始使用 MaxEnt 模型预测有害昆虫的潜在分布,如栗苞蚜 *Moritziella castaneivora* Miyazaki 在全球的分布范围,稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* Kuschel 和苹果绵蚜 *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) 在我国的适生区预测 (齐国君等, 2012; 王兴亚等, 2011; Wang *et al.*, 2010)。此外, CLIMEX 软件也被广泛应用于有害生物适生性预测,如苹果浅褐卷叶蛾 *Epiphyas postvittana* Walker、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* Pallas 在全球的潜在地理分布 (He *et al.*, 2012; Poutsma *et al.*, 2008)。该分析系统的优点是可综合考虑气候和生物的相互关系 (郭晓华等, 2007)。有害生物潜在分布区的影响因素除了气候因子和生物因子以外,还受寄主植物分布、土壤类型、土地利用等因子影响,而 GIS 的叠加分析功能可以综合考虑这些因子。因此,大多数学者通常把 GIS 与 CLIMEX 模型结合使用,使分析模型更加完善准确,结果更加科学化与可视化 (马骏等, 2011; 倪文龙等, 2010; 姚剑等, 2011)。例如, Zheng *et al.* (2012) 使用 CLIMEX 模型的地点比较方法和 GIS 的克里金插值法预测得到甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 在我国的潜在越冬区域,其南、北界限分别为北回归线和长江流域。

开展适生性风险分析常常要面临模型及方法的选择,这时通常综合考虑物种的生物学特性、已知地理分布、寄主植物分布等数据。应用不同模型进行物种潜在适生区的预测,由于其原理及分析方法不尽相同,得到的结果可能存在一定的差异。在实际工作中,可以使用受试者工作特征 (ROC) 曲线分析评价不同模型的预测结果,选出最优模型或者把各模型预测结果进行叠加分析得出最后的预测结果 (王运生等, 2007; Araújo & New, 2007)。

2.3 扩散风险分析

扩散是生物入侵过程中一个非常重要的环节,

如何准确预测入侵种的扩散趋势是风险分析的一项重要内容。研究物种在已知入侵地的扩散动态与分布格局,预测入侵物种潜在的扩散趋势是制定其管理措施的关键(Wang & Wang, 2006)。扩散风险分析是通过分析物种的繁殖特性、扩散特性、环境条件、人类活动等来评价物种在入侵地的扩散潜力(万方浩等, 2010)。

昆虫的扩散方式分为依靠自身活动能力的短距离扩散以及借助风力、水力或者人类活动的长距离扩散。后者被认为是物种全球化以及快速向两极移动的主要因素,且与人类活动密切相关(Ruiz *et al.*, 2000; Suarez *et al.*, 2001)。近年来,许多学者运用长距离扩散模型对外来入侵昆虫进行扩散风险分析。其中,引力模型(gravity model)常被用于预测物种由于人类活动引起的远距离传播,该模型类似于万有引力定律,以人口密度、经济活动、交通路线等为“引力”,对入侵地与非入侵地之间的距离进行加权(Bossenbroek *et al.*, 2001; Järemo, 2009)。Muirhead *et al.* (2006)基于人类活动所引起的木柴转移情况的数据,利用引力模型预测白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* Fairmaire 在美国密歇根州、俄亥俄州、印第安纳州和加拿大安大略省的长距离扩散动态。Carrasco *et al.* (2010)利用负指数(negative exponential)和负幂律散布内核函数(negative power law dispersal kernels)以及引力模型预测了玉米根萤叶甲 *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte 自然扩散和人为扩散的情况,指出该虫长距离扩散范围与国际贸易紧密相关,并认为高海拔是限制该虫传播的一个重要因素。

除了人类活动引起的长距离扩散外,昆虫借助风传播的研究也越来越多,且结合运用各种数学理论与数学模型以及计算机运算法则,利用模型预测出的结果与实际情况的拟合程度也越来越好。Westbrook *et al.* (2011)建立了 HYSOLIT 大气扩散模型,并结合 GIS 模拟墨西哥棉铃象 *Anthonomus grandis* (Boheman) 从德克萨斯州南部的约格兰德谷低谷地带(Lower Rio Grande Valley)随风扩散到墨西哥东北部的情况,在时空上对棉铃象通过季风大范围扩散进行了风险分析。Kehlenbeck *et al.* (2012)将一系列生态学原则(逻辑斯蒂增长、径向范围扩张、种群增长、核函数)与玉米根萤叶甲的扩散过程相结合以评估其在欧洲的扩散范围以及速

率,且预测结果与欧洲野外调查实际相似。

全球气候变暖则成为关于短距离扩散风险分析中的研究热点,如气温升高增加了松异舟蛾 *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller) 雌成虫的飞行能力,扩大了其分散范围(Battisti *et al.*, 2006)。Robinet *et al.* (2011)使用由媒介昆虫松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 自身的短距离扩散与由人类运输引起的长距离扩散建立模型,确定了从各港口进入欧洲的松材线虫可迅速地扩散到欧洲大部分地区,并且预测 2030 年松材线虫将入侵 19% ~ 60% 的欧洲地区。

寄主的空间分布也是影响入侵害虫扩散方向、模式以及速度的一个重要因素。因为寄主植物存在与否是决定昆虫能否在一个地区存活的关键因素之一。Yemshanov *et al.* (2009a)构建了云杉蓝树蜂 *Sirex noctilio* Fabricius 的寄主植物 *Pinus* spp. 分布图以预测该虫在北美的扩散趋势。Koch & Smith (2008)利用豚草甲虫 *Xyleborus glabratus* Eichhoff 的历史扩散数据预测该虫的扩散速率,并建立“时间—扩散”模型,结合寄主植物密度、气象条件,使用 GIS 的成本加权距离得到豚草甲虫随着时间推移在美洲东部的扩散风险分布图。

在扩散风险分析中还常常应用昆虫历史扩散数据。昆虫在入侵地的历史扩散数据是预测其未来扩散情况的一个主要依据。通过结合入侵害虫的生物学特性、历史分布数据、扩散方式等建立与扩散有关的模型或者利用相关软件,对未来的扩散动态进行预测、分析。Liebhold *et al.* (1993)利用 GIS 分析舞毒蛾的历史扩散范围与地理气候变化之间的关系,建立了舞毒蛾在未发生地扩散的预测模型。Knapič *et al.* (2009)用 GIS 技术分析 2003 ~ 2007 年玉米根萤叶甲在斯洛文尼亚的扩散动态分析,发现该虫在入侵后第 1 年的速度最低,且在东部的扩散速度高于西部,据此建议在入侵的第 1 年采取控制措施能显著抑制该虫的扩散速度。

2.4 经济与生态风险分析

入侵生物对于经济和生态所造成的影响包括直接的经济损失、防治成本以及难以计算的损失。经济和生态风险分析主要是在已造成损失的基础上,评估对其采取不同防治措施的成本以及进一步扩散所造成的经济和生态风险程度。

目前,经济与生态风险分析存在定性和定量评

估2种方法。大部分经济评估都是使用定性的方法,如专家打分法(Brunel *et al.*, 2009; Sansford, 2002),根据专家的知识与经验对物种的风险等级给予评价。定量分析方法则是以系统分析和建立数学模型对研究对象进行模拟,得出量化的研究结果(Betters & Schaefer, 1981)。由于定量的生态经济影响评估需要大量入侵昆虫发生与危害的数据,目前已开展的定量经济与生态风险分析主要集中在少数经济作物害虫上,如Bolda *et al.* (2010)评估了新入侵害虫斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* Matsumura 对加利福尼亚州、俄勒冈州和华盛顿所造成的经济损失;Goodhue *et al.* (2011)分析了斑翅果蝇对加利福尼亚覆盆子和草莓产业在没有管理措施和喷洒农药的情况造成的经济损失;Cacho (2005)比较了澳大利亚为防止螺旋蝇 *Chrysomya bezziana* Villeneuve 大规模暴发采取不同防治方法的成本。

定量分析方法主要包括局部预算(partial budgeting)、局部均衡模拟(partial equilibrium modeling)、投入产出分析(input-output analysis)、可计算一般均衡模型(computable general equilibrium modeling)等(de Melo, 1989; Leontief, 1986; Mas-Colell *et al.*, 1995; Pemsil *et al.*, 2004)。在这些经济评估模型中所用变量主要为寄主产量、损失、产品价值、防治费用,以及害虫入侵导致的预期需求减少量等(Soliman *et al.*, 2010)。例如,MacLeod *et al.* (2004)利用局部预算模型评估了棕榈蓟马 *Thrips palmi* Karny 在英国的潜在经济危害。

大尺度的经济和生态风险分析要求综合昆虫的传入、定殖和扩散信息(Baker *et al.*, 2005)。目前,只有少数定量分析结合了昆虫的扩散情况(Kovacs *et al.*, 2010, 2011; Yemshanov *et al.*, 2011)。Kovacs *et al.* (2010)预测了2009~2019年白蜡窄吉丁对美国社区危害的潜在经济成本,模拟出该虫将扩散到大部分地区,如果需要治疗、移除和更换超过17万亿株寄主植物——白蜡树,将花费107亿美元。Matošević & Pernek (2011)评估了欧洲克罗地亚森林生态系统中7种入侵昆虫的进一步扩散以及所造成的损失。

3 结论与展望

近10年,外来入侵昆虫风险分析研究发展迅速。但是,风险分析的4个层面发展不平衡,大部

分研究集中在适生性风险分析,而有关传入、扩散、经济和生态影响的风险分析的研究相对较少。笔者认为,外来生物入侵是一个动态过程,未来的研究应该从不同的层面系统开展风险分析,从而构建包含整个入侵过程不同阶段或层面的风险分析报告。

目前,对外来物种进行系统风险分析的研究极少。已开展的系统风险分析研究也主要是采用综合评判指标体系法,根据专家对各指标的赋值计算物种的风险值,判定风险等级。虽然相关研究结果在国际贸易谈判及防控外来生物入侵等方面发挥了作用,但是这种定性的评估分析方法存在一定的主观性。未来的研究应该着重于开发定量风险分析方法,可先对入侵过程的每个阶段进行模块化的定量风险分析,然后整合各个模块构建害虫定量风险分析系统,以获得更加科学、准确的结果来指导外来入侵物种的防控。

风险分析是防范及阻截外来有害生物传入、扩散和蔓延的重要环节与有效方法,对保护生态环境和保障农作物的安全生产具有十分重要的意义。但是外来入侵生物风险分析所需要的数据通常涉及多个学科和不同部门,如外来有害生物口岸截获情况、寄主植物种类以及分布、气象资料、进出口贸易情况等(Magarey *et al.*, 2007; Yemshanov *et al.*, 2009b),因此需要相关部门高度重视、密切配合和通力协作,才能提高有害入侵生物风险分析的效率。

全球气候变化成为入侵昆虫风险分析的一个新热点,其与风险分析的4个层面均密切联系。大气CO₂等温室气体浓度升高从而导致全球温度上升(Pachauri & Reisinger, 2007)。而温度是影响昆虫生命活动、地理分布等行为的重要因素之一。气温升高使物种在非适生区成功建立种群的机会增大(Walther *et al.*, 2007),且对外来昆虫的入侵过程及其与寄主植物、天敌之间的互作关系产生影响。因此,在外来入侵风险分析中应考虑全球气候变化的影响过程及效应。全球气候变化已成为各国政要、媒体、学者甚至公众最为关注的环境问题,可以预见它将是外来入侵昆虫风险分析研究中的热点。

致谢:感谢福建农林大学应用生态研究所陈李林讲师和柯富士博士对本文提出的宝贵意见;感谢福建农林大学植物保护学院陈韶萍同学在外来入侵昆虫风险分析文献查找过程中给予的帮助。

参考文献

- 郭晓华, 齐淑艳, 周兴文, 孙晓扬. 2007. 外来有害生物风险评估方法研究进展. *生态学杂志*, 26(9): 1486 – 1490.
- 黄顶成, 张润志. 2011. 中国外来入侵种的类群、原产地及变化趋势. *生物安全学报*, 20(2): 113 – 118.
- 李红梅, 韩红香, 薛大勇. 2005. 利用 GARP 生态位模型预测日本松干蚧在中国的地理分布. *昆虫学报*, 48(1): 95 – 100.
- 李军, 韩诗畴, 吴华, 李志刚, 何淑琼, 黄鸿, 吴志雄, 欧剑峰. 2007. 红火蚁防控技术研究与应用. *广东农业科学*, (6): 54 – 56.
- 马骏, 胡学难, 彭志强, 刘海军, 梁帆, 陆永跃. 2011. 基于 CLIMEX 模型的扶桑绵粉蚧在中国潜在地理分布预测. *植物检疫*, 25(1): 5 – 8.
- 马平, 蒋小龙, 李正跃, 杜宇, 笱庆安. 2009. 基于 GIS 与气候相似性的谷斑皮蠹在云南适生区的预测. *植物保护*, 35(4): 44 – 48.
- 倪文龙, 陈洪俊, 曲伟伟, 万方浩, 阿梅, 普仓, 李志红. 2010. 基于 CLIMEX 的橘实锤腹实蝇在中国的适生性分析. *植物检疫*, 24(4): 20 – 25.
- 齐国君, 高燕, 黄德超, 吕利华. 2012. 基于 MAXENT 的稻水象甲在中国的入侵扩散动态及适生性分析. *植物保护学报*, 39(2): 129 – 136.
- 乔格侠, 陈洪俊, 肖晖. 2005. *昆虫学研究进展*. 北京: 中国农业科技出版社.
- 万方浩, 郭建英, 张峰. 2009. *中国生物入侵研究*. 北京: 科学出版社.
- 万方浩, 彭德良, 王瑞. 2010. *生物入侵: 预警篇*. 北京: 科学出版社.
- 万方浩, 冯洁, 徐进. 2011. *生物入侵: 检测与监测篇*. 北京: 科学出版社.
- 王兴亚, 蒋春廷, 许国庆. 2011. 外来入侵种——苹果绵蚜在中国的适生区预测. *应用昆虫学报*, 48(2): 379 – 391.
- 王艳平, 陈乃中, 陈洪俊, 陈岩, 罗开喜. 2007. 利用 GARP 生态位模型初步预测阿根廷蚁在中国的适生区. *植物检疫*, 21(2): 73 – 74.
- 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.
- 姚剑, 杜宇, 马平, 李生贵, 蒋小龙, 陈雪娇, 张萍, 李云飞. 2011. 基于 CLIMEX 和 GIS 的南松大小蠹在中国的适生性分析. *应用昆虫学报*, 48(4): 1017 – 1023.
- 俞红, 王红玲, 王兆锋. 2009. 外来生物入侵对社会经济的影响及经济影响评价. *统计与决策*, (13): 104 – 105.
- Araújo M B and New M. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in ecology & evolution*, 22: 42 – 47.
- Baker R, Cannon R, Bartlett P and Barker I. 2005. Novel strategies for assessing and managing the risks posed by invasive alien species to global crop production and biodiversity. *Annals of Applied Biology*, 146: 177 – 191.
- Battisti A, Stastny M, Buffo E and Larsson S. 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12: 662 – 671.
- Beggs J R, Brockerhoff E G, Corley J C, Kenis M, Masciocchi M, Muller F, Rome Q and Villemant C. 2011. Ecological effects and management of invasive alien Vespidae. *BioControl*, 56: 505 – 526.
- Beilhe L B, Arnoux S, Delatte H, Lajoie G and Fontenille D. 2012. Spread of invasive *Aedes albopictus* and decline of resident *Aedes aegypti* in urban areas of Mayotte 2007 – 2010. *Biological Invasions*, 14: 1623 – 1633.
- Bertelsmeier C, Luque G M and Courchamp F. 2013. Global warming may freeze the invasion of big-headed ants. *Biological Invasions*, 15: 1561 – 1572.
- Bettters D R and Schaefer J C. 1981. A generalized Monte Carlo simulation model for decision risk analysis illustrated with a Dutch elm disease control example. *Canadian Journal of Forest Research*, 11: 343 – 351.
- Bolda M P, Goodhue R E and Zalom F G. 2010. Spotted wing drosophila: potential economic impact of a newly established pest. *Agricultural and Resource Economics Update*, 13: 5 – 8.
- Bossenbroek J M, Kraft C E and Nekola J C. 2001. Prediction of long-distance dispersal using gravity models: zebra mussel invasion of inland lakes. *Ecological Applications*, 11: 1778 – 1788.
- Britch S C, Linthicum K J, Anyamba A, Tucker C J and Pak E W. 2008. Long-term surveillance data and patterns of invasion by *Aedes albopictus* in Florida. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 24: 115 – 120.
- Brunel S, Petter F, Fernandez-Galiano E and Smith I. 2009. Approach of the European and Mediterranean Plant Protection Organization to the evaluation and management of risks presented by invasive alien plants // Inderjit. *Management of Invasive Weeds*. Netherlands: Springer, 319 – 343.
- Cacho O. 2005. Invasive species in aquatic ecosystems: economics and matrix population models // Armidale. *Working Paper Series Agricultural Resource Economics*. Australia: University of New England, 17 – 29.
- Caminade C, Medlock J M, Ducheyne E, McIntyre K M,

- Leach S, Baylis M and Morse A P. 2012. Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: recent trends and future scenarios. *Journal of the Royal Society Interface*, 9: 2708 – 2717.
- Carlton J T. 1996. Pattern, process, and prediction in marine invasion ecology. *Biological Conservation*, 78: 97 – 106.
- Carrasco L R, Mumford J D, MacLeod A, Harwood T, Grabenweger G, Leach A W, Knight J D and Baker R H A. 2010. Unveiling human-assisted dispersal mechanisms in invasive alien insects: integration of spatial stochastic simulation and phenology models. *Ecological Modelling*, 221: 2068 – 2075.
- Center for Invasive Species and Ecosystem Health. 2009. *Invasive and Exotic Insects*. <http://www.invasive.org/species/insects.cfm>.
- Chen Y H. 2008. Global potential distribution of an invasive species, the yellow crazy ant (*Anoplolepis gracilipes*) under climate change. *Integrative Zoology*, 3: 166 – 175.
- Chu D, Zhang Y J, Brown J K, Cong B, Xu B Y, Wu Q J and Zhu G R. 2006. The introduction of the exotic Q biotype of *Bemisia tabaci* from the Mediterranean region into China on ornamental crops. *Florida Entomologist*, 89: 168 – 174.
- Costello C and McAusland C. 2003. Protectionism, trade, and measures of damage from exotic species introductions. *American Journal of Agricultural Economics*, 85: 964 – 975.
- de Melo J. 1989. Computable general equilibrium models for trade policy analysis in developing countries: a survey. *Journal of Policy Modeling*, 10: 469 – 503.
- FAO. 2007. *Glossary of Phytosanitary Terms. International Standards for Phytosanitary Measures*. Rome: FAO.
- Fitzgerald K, Heller N and Gordon D M. 2012. Modeling the spread of the Argentine ant into natural areas: habitat suitability and spread from neighboring sites. *Ecological Modelling*, 247: 262 – 272.
- Foucaud J, Orivel J, Loiseau A, Delabie J H C, Jourdan H, Konghouleux D, Vonshak M, Tindo M, Mercier J L, Fresneau D, Mikissa J B, McGlynn T, Mikheyev A S, Oetler J and Estoup A. 2010. Worldwide invasion by the little fire ant: routes of introduction and eco-evolutionary pathways. *Evolutionary Applications*, 3: 363 – 374.
- Fuentealba A, Alfaro R and Baucé E. 2013. Theoretical framework for assessment of risks posed to Canadian forests by invasive insect species. *Forest Ecology and Management*, 302: 97 – 106.
- Gevrey M and Worner S P. 2006. Prediction of global distribution of insect pest species in relation to climate by using an ecological informatics method. *Journal of Economic Entomology*, 99: 979 – 986.
- Goodhue R E, Bolda M, Farnsworth D, Williams J C and Zalom F G. 2011. Spotted wing drosophila infestation of California strawberries and raspberries: economic analysis of potential revenue losses and control costs. *Pest Management Science*, 67: 1396 – 1402.
- Gray D R. 2010. Hitchhikers on trade routes: a phenology model estimates the probabilities of gypsy moth introduction and establishment. *Ecological Applications*, 20: 2300 – 2309.
- Hartley S, Harris R and Lester P J. 2006. Quantifying uncertainty in the potential distribution of an invasive species: climate and the Argentine ant. *Ecology Letters*, 9: 1068 – 1079.
- Hartley S, Krushelnycky P D and Lester P J. 2010. Integrating physiology, population dynamics and climate to make multi-scale predictions for the spread of an invasive insect: the Argentine ant at Haleakala National Park, Hawaii. *Ecography*, 33: 83 – 94.
- He S Q, Worner S P and Ikeda T. 2012. Modeling the potential global distribution of light brown apple moth *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae) using CLIMEX. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 15: 479 – 485.
- Hochmair H H and Scheffrahn R H. 2010. Spatial association of marine dockage with land-borne infestations of invasive termites (Isoptera: Rhinotermitidae: *Coptotermes*) in urban South Florida. *Journal of Economic Entomology*, 103: 1338 – 1346.
- Hochmair H H, Tonini F and Scheffrahn R H. 2013. The role of geographic information systems for analyzing infestations and spread of invasive termites (Isoptera: Rhinotermitidae and Termitidae) in urban South Florida. *Florida Entomologist*, 96: 746 – 755.
- Holmes T P, Aukema J E, Von Holle B, Liebhold A and Sills E. 2009. Economic impacts of invasive species in forests. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162: 18 – 38.
- Hulme P E. 2009. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology*, 46: 10 – 18.
- Järemo J. 2009. Evaluating spread of invaders from gravity scores — A way of using gravity models in ecology. *Mathematical Biosciences*, 222: 53 – 58.
- Jankovic M and Petrovskii S. 2013. Gypsy moth invasion in North America: a simulation study of the spatial pattern and the rate of spread. *Ecological Complexity*, 14: 132 – 144.
- Jenkins P T. 1996. Free trade and exotic species introductions.

- Conservation Biology*, 10: 300 – 302.
- Kahn R P. 1979. A concept of pest risk analysis. *EPPO Bulletin*, 9: 119 – 130.
- Kehlenbeck H, Robinet C, van der Werf W, Kriticos D, Reynaud P and Baker R. 2012. Modelling and mapping spread in pest risk analysis: a generic approach. *EPPO Bulletin*, 42: 74 – 80.
- Knapčič M, Urek G and Modič Š. 2009. GIS analysis of the spread and population density of *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte and its impact on agricultural practice in Slovenia during the period from 2003 to 2007. *Cereal Research Communications*, 37: 227 – 236.
- Koch F H and Smith W D. 2008. Spatio-temporal analysis of *Xyleborus glabratus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) invasion in eastern US forests. *Environmental Entomology*, 37: 442 – 452.
- Koch F H, Yemshanov D, Colunga-Garcia M, Magarey R D and Smith W D. 2011. Potential establishment of alien-invasive forest insect species in the United States: where and how many? *Biological Invasions*, 13: 969 – 985.
- Kovacs K F, Haight R G, McCullough D G, Mercader R J, Siegert N W and Liebhold A M. 2010. Cost of potential emerald ash borer damage in US communities, 2009 – 2019. *Ecological Economics*, 69: 569 – 578.
- Kovacs K F, Mercader R J, Haight R G, Siegert N W, McCullough D G and Liebhold A M. 2011. The influence of satellite populations of emerald ash borer on projected economic costs in US communities, 2010 – 2020. *Journal of Environmental Management*, 92: 2170 – 2181.
- Lach L and Thomas M L. 2008. Invasive ants in Australia: documented and potential ecological consequences. *Australian Journal of Entomology*, 47: 275 – 288.
- Leontief W. 1986. *Input-Output Economics*. New York: Oxford University Press.
- Liebhold A M, Bockerhoff E G, Garrett L J, Parke J L and Britton K O. 2012. Live plant imports: the major pathway for forest insect and pathogen invasions of the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10: 135 – 143.
- Liebhold A M, Rossi R E and Kemp W P. 1993. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annual Review of Entomology*, 38: 303 – 327.
- Lippitt C D, Rogan J, Toledano J, Saylgermano F, Eastmana J R, Mastro V and Sawyer A. 2008. Incorporating anthropogenic variables into a species distribution model to map gypsy moth risk. *Ecological Modelling*, 210: 339 – 350.
- Logan J A, Regniere J, Gray D R and Munson A S. 2007. Risk assessment in the face of a changing environment: gypsy moth and climate change in Utah. *Ecological Applications*, 17: 101 – 117.
- MacLeod A, Evans H F and Baker R H A. 2002. An analysis of pest risk from an Asian longhorn beetle (*Anoplophora glabripennis*) to hardwood trees in the European community. *Crop Protection*, 21: 635 – 645.
- MacLeod A, Head J and Gaunt A. 2004. An assessment of the potential economic impact of *Thrips palmi* on horticulture in England and the significance of a successful eradication campaign. *Crop Protection*, 23: 601 – 610.
- Magarey R D, Fowler G A, Borchert D M, Sutton T B, Colunga-Garcia M and Simpson J A. 2007. NAPPFAST: an internet system for the weather-based mapping of plant pathogens. *Plant Disease*, 91: 336 – 345.
- Marini L, Haack R A, Rabaglia R J, Toffolo E P, Battisti A and Faccoli M. 2011. Exploring associations between international trade and environmental factors with establishment patterns of exotic Scolytinae. *Biological Invasions*, 13: 2275 – 2288.
- Mas-Colell A, Whinston M D and Green J R. 1995. *Microeconomic Theory*. New York: Oxford University Press.
- Matošević D and Pernek M. 2011. Alien and invasive insects in Croatian forest ecosystems and estimate of their damage. *Šumarski List*, 135: 264 – 270.
- Mezger D and Pfeiffer M. 2011. Influence of the arrival of *Anoplolepis gracilipes* (Hymenoptera: Formicidae) on the composition of an ant community in a clearing in Gunung Mulu National Park, Sarawak, Malaysia. *Asian Myrmecology*, 4: 89 – 98.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being*. Washington, DC: Island Press.
- Morrison L W. 2002. Long-term impacts of an arthropod-community invasion by the imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Ecology*, 83: 2337 – 2345.
- Morrison L W, Korzukhin M D and Porter S D. 2005. Predicted range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*, in the eastern United States based on the VEMAP global warming scenario. *Diversity and Distributions*, 11: 199 – 204.
- Morrison L W, Porter S D, Daniels E and Korzukhin M D. 2004. Potential global range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*. *Biological Invasions*, 6: 183 – 191.
- Muirhead J R, Leung B, van Overdijk C, Kelly D W, Nandakumar K, Marchant K R and MacIsaac H J. 2006. Modelling local and long-distance dispersal of invasive emerald ash borer *Agrilus planipennis* (Coleoptera) in North America.

- Diversity and Distributions*, 12: 71 – 79.
- Oliveira C M, Auad A M, Mendes S M and Frizzas M R. 2013. Economic impact of exotic insect pests in Brazilian agriculture. *Journal of Applied Entomology*, 137: 1 – 15.
- Pachauri R and Reisinger A. 2007. *IPCC Fourth Assessment Report*. Geneva: IPCC.
- Paini D R and Yemshanov D. 2012. Modelling the arrival of invasive organisms via the international marine shipping network: a khapra beetle study. *PLoS ONE*, 7: e44589.
- Pemsl D, Waibel H and Orphal J. 2004. A methodology to assess the profitability of Bt-cotton: Case study results from the state of Karnataka, India. *Crop Protection*, 23: 1249 – 1257.
- Peterson A T, Papeş M and Eaton M. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, 30: 550 – 560.
- Peterson A T and Scachetti-Pereira R. 2004. Potential geographic distribution of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in North America. *American Midland Naturalist*, 151: 170 – 178.
- Piel F, Gilbert M, De Canniere C and Gregoire J C. 2008. Coniferous round wood imports from Russia and Baltic countries to Belgium. A pathway analysis for assessing risks of exotic pest insect introductions. *Diversity and Distributions*, 14: 318 – 328.
- Pitt J P W, Worner S P and Suarez A V. 2009. Predicting Argentine ant spread over the heterogeneous landscape using a spatially explicit stochastic model. *Ecological Applications*, 19: 1176 – 1186.
- Porretta D, Mastrantonio V, Bellini R, Somboon P and Urbanelli S. 2012. Glacial history of a modern invader: phylogeography and species distribution modelling of the Asian Tiger Mosquito *Aedes albopictus*. *PLoS ONE*, 7: e44515.
- Poutsma J, Loomans A J M, Aukema B and Heijerman T. 2008. Predicting the potential geographical distribution of the harlequin ladybird, *Harmonia axyridis*, using the CLIMEX model. *BioControl*, 53: 103 – 125.
- Robinet C, Van Opstal N, Baker R and Roques A. 2011. Applying a spread model to identify the entry points from which the pine wood nematode, the vector of pine wilt disease, would spread most rapidly across Europe. *Biological Invasions*, 13: 2981 – 2995.
- Rochlin I, Ninivaggi D V, Hutchinson M L and Farajollahi A. 2013. Climate change and range expansion of the Asian Tiger Mosquito (*Aedes albopictus*) in north eastern USA: implications for public health practitioners. *PLoS ONE*, 8: e60874.
- Rodriguez-Cabal M A, Stuble K L, Nunez M A and Sanders N J. 2009. Quantitative analysis of the effects of the exotic Argentine ant on seed-dispersal mutualisms. *Biology Letters*, 5: 499 – 502.
- Roura-Pascual N, Brotons L, Peterson A T and Thuiller W. 2009. Consensual predictions of potential distributional areas for invasive species: a case study of Argentine ants in the Iberian Peninsula. *Biological Invasions*, 11: 1017 – 1031.
- Ruiz G M, Rawlings T K, Dobbs F C, Drake L A, Mullady T, Huq A and Colwell R R. 2000. Global spread of microorganisms by ships. *Nature*, 408: 49 – 50.
- Sansford C. 2002. *Quantitative Versus Qualitative: Pest Risk Analysis in the UK and Europe Including the European and Mediterranean Plant Protection (EPPO) System*. Mexico: NAPPO International Symposium on Pest Risk Analysis Puerto Vallarta.
- Smith M T, Tobin P C, Bancroft J, Li G H and Gao R T. 2004. Dispersal and spatiotemporal dynamics of Asian longhorned beetle (Coleoptera: Cerambycidae) in China. *Environmental Entomology*, 33: 435 – 442.
- Soliman T, Mourits M C M, Oude Lansink A G J M and Van der Werf W. 2010. Economic impact assessment in pest risk analysis. *Crop Protection*, 29: 517 – 524.
- Suarez A V, Holway D A and Case T J. 2001. Patterns of spread in biological invasions dominated by long-distance jump dispersal: insights from Argentine ants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98: 1095 – 1100.
- Sutherst R W and Maywald G. 2005. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): implications for invasion of new regions, particularly Oceania. *Environmental Entomology*, 34: 317 – 335.
- Tobin P C, Diss-Torrance A, Blackburn L M and Brown B D. 2010. What does "local" firewood buy you? Managing the risk of invasive species introduction. *Journal of Economic Entomology*, 103: 1569 – 1576.
- Walther G R, Gritti E S, Berger S, Hickler T, Tang Z and Sykes M T. 2007. Palms tracking climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 16: 801 – 809.
- 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: 397 – 408.
- Wang X Y, Huang X L, Jiang L Y and Qiao G X. 2010. Predicting potential distribution of chestnut phylloxera (Hemiptera: Phylloxeridae) based on GARP and Maxent ecological

- niche models. *Journal of Applied Entomology*, 134: 45 – 54.
- Westbrook J K, Eyster R S and Allen C T. 2011. A model for long-distance dispersal of boll weevils (Coleoptera: Curculionidae). *International Journal of Biometeorology*, 55: 585 – 593.
- Wetterer J K. 2005. Worldwide distribution and potential spread of the long-legged ant, *Anoplolepis gracilipes* (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology*, 45: 77 – 97.
- Wetterer J K, Espadaler X, Wetterer A L, Aguin-Pombo D and Franquinho-Aguiar A M. 2006. Long-term impact of exotic ants on the native ants of Madeira. *Ecological Entomology*, 31: 358 – 368.
- Wetterer J K and Porter S D. 2003. The little fire ant, *Wasmannia auropunctata*: distribution, impact, and control. *Sociobiology*, 42: 1 – 42.
- Yemshanov D, Koch F H, Ducey M and Koehler K. 2012. Trade-associated pathways of alien forest insect entries in Canada. *Biological Invasions*, 14: 797 – 812.
- Yemshanov D, Koch F H, McKenney D W, Downing M C and Sapio F. 2009a. Mapping invasive species risks with stochastic models: a cross-border United States-Canada application for *Sirex noctilio* Fabricius. *Risk Analysis*, 29: 868 – 884.
- Yemshanov D, McKenney D W, Pedlar J H, Koch F H and Cook D. 2009b. Towards an integrated approach to modelling the risks and impacts of invasive forest species. *Environmental Reviews*, 17: 163 – 178.
- Yemshanov D, McKenney D W, de Groot P, Haugen D, Pedlar J, Sidders D and Joss B. 2011. A harvest failure approach to assess the threat from an invasive species. *Journal of Environmental Management*, 92: 205 – 213.
- Zheng X L, Wang P, Cheng W J, Wang X P and Lei C L. 2012. Projecting overwintering regions of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* in China using the CLIMEX model. *Journal of Insect Science*, 12: 1 – 13.

(责任编辑:郭莹)

