

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2019.04.006

进境台湾果蔬主要病虫害风险评估与 早期监测预警

王 瑞^{1*}, 黄蓬英², 傅建炜³, 吴梅香⁴, 蔡鸿娇⁵, 洗晓青¹, 朱春晖⁶, 尤民生⁷

¹ 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害国家重点实验室, 北京 100193; ² 厦门海关技术中心, 福建 厦门 361026; ³ 福建省农业科学院植物保护研究所, 福建 福州 350003; ⁴ 福建农林大学植物保护学院, 福建 福州 350002; ⁵ 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; ⁶ 湖南省农业科学院植物保护研究所, 湖南 长沙 410125; ⁷ 福建农林大学应用生态研究所, 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福建 福州 350002

摘要: 【目的】定量评估进境台湾果蔬主要病虫害在大陆的入侵风险, 为早期监测预警提供依据。【方法】首先, 基于外来物种传入、定殖、扩散和危害的一般过程, 构建了包括 4 个层次 26 个指标的进境台湾果蔬有害生物入侵综合风险评估指标体系, 规范了风险指数的计算方法, 评估了 14 种病虫害随台湾果蔬入侵的综合风险; 其次, 利用气候生态位模型预测了它们在我国适宜的适生区; 最后, 融合进境台湾果蔬到达港口、物流中转站、集散地和主要病虫害的适生区的空间分布, 通过空间叠加分析划定了它们在我国传入并定殖的风险区及其空间异质性。【结果】14 种被评估病虫害在我国的综合风险值均大于 0.7, 属高风险等级。14 种病虫害在我国都存在广阔的适生区, 但不同物种适生区的面积和空间分布存在差异。福建、广东、海南等东部和南部沿海地区是它们适生区的高度重叠区, 超过 95% 的台湾果蔬到达港口、物流中转和集散地的集中分布区, 潜在的入侵风险极高。【结论】进境台湾果蔬贸易能够促进或加剧外来有害生物的入侵。研究进一步证实了台湾已经并将继续成为大陆外来有害生物入侵的踏板。建议进一步加强海关检疫、开展和完善监测预警等措施预防和控制有害生物入侵, 为农业生物安全提供保障。

关键词: 台湾果蔬; 风险评估; 指标体系; 早期监测预警

Invasion risk assessment, early warning and monitoring of major invasive pests introduced with fruit and vegetables from Taiwan to mainland China

WANG Rui¹, HUANG Pengying², FU Jianwei³, WU Meixiang⁴, CAI Hongjiao⁵, XIAN Xiaoqing¹,
ZHU Chunhui⁶, YOU Minsheng⁷

¹ State Key Laboratory for Biology and Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; ² Xiamen Customs Technology Center, Xiamen, Fujian 361012, China; ³ Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China; ⁴ College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; ⁵ Fishery College, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China; ⁶ Institute of Plant Protection, Hunan Academy of Agricultural Science, Changsha, Hunan 410125, China; ⁷ State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Institute of Applied Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract: 【Aim】To quantitatively access the invasion risk of the major pest and disease introduced with fruit and vegetables from Taiwan Island to mainland China. 【Method】We first identified 14 pests as risk assessment objects and proposed a comprehensive risk assessment index system, including 4 different layers, i.e. object, item, factor, index layers. A total of 26 index parameters

收稿日期 (Received): 2019-09-12 接受日期 (Accepted): 2019-10-18

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (200903034)

作者简介: 王瑞, 男, 副研究员, 博士。研究方向: 入侵植物学。

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: wangrcas@163.com

were identified to access their risk level, including introduction, colonization, diffusion and impacts in the risk assessment area. Second, climatic niche modeling was applied to predict suitable habitats. Finally, we delimited their overall invasion risks by overlapping all the predicted suitability, main nodes of imported fruit and vegetable from Taiwan to mainland China. 【Result】 All the comprehensive risk values of 14 pests were >0.7 , which classified them as invasive species of high risk. Although the predicted climatically suitable area of 14 pests was different, southern and eastern parts of China were all identified as suitable region. Additionally, more than 95% of the receiving ports, transfer stations, entrepôts of imported Taiwanese fruit and vegetables were located in this region which can thus vastly increase their invasion risk. 【Conclusion】 It is concluded that import trade of Taiwanese fruit and vegetables can promote or intensify pests invasion risk to mainland of China. Our results further corroborate that the Taiwan Island is steppingstone of pest to invade mainland China. It is recommended that strict quarantine, early monitoring and warning measures should be further strengthened to prevent and control new invasions.

Key words: Taiwanese fruits and vegetables; risk assessment; index system; early monitoring and warning

随着全球化进程的发展,外来有害生物的危害日趋严峻。生物入侵已成为导致物种濒危和灭绝的关键因素(Gurevitch & Padilla, 2004)。基于此,世界各国都给予了高度重视,采取措施控制入侵物种,降低其危害,但成功的案例极少(Myers & Bazley, 2003)。有效地控制外来有害生物入侵、降低其危害是当前全球讨论的焦点。外来物种入侵本质上是一个有序的生态学过程,包括传入、定殖、潜伏、扩散、暴发等阶段(Davies & Sheley, 2007),这决定了外来物种在入侵地的发生与危害存在时空变化,遵循从无到有、从有到多的变化过程(万方浩等, 2010; Bullock & Nathan, 2008)。因此,预防与控制外来物种入侵的关键在于通过风险评估判定哪些外来物种可能入侵、其可能入侵的风险与空间分布,进而制定早期预防预警与控制等措施,在外来物种成功建立种群或大面积扩散之前进行防除。

随着海峡两岸农业交流与合作的不断深化,大陆从台湾引进优良蔬菜品种的数量和种植面积均呈持续增加趋势,如近 10 多年台湾果蔬贸易量、运转途径、辐射地理范围都在不断地增加和拓展(李乐仁, 2008; 王瑞等, 2016; 吴佳教等, 2016)。这种多途径、多地区常年不间断的台湾果蔬进口贸易势必会促进有害生物的传入、定殖与扩散。如何在发展两岸农产品贸易的同时降低有害生物传入、扩散与危害是当前面临的主要挑战。通过风险评估判定潜在的危险性有害生物种类,明确其风险发生的区域,进而制定早期预防预警措施是最为经济有效的途径。基于此,本研究旨在评估进境台湾果蔬芒果、番石榴、番木瓜、杨桃、莲雾、番荔枝、高丽菜、茄果类、瓜类主要危险性有害生物芒果壮狭普瘿蚊 *Procontarinia robusta* Li, Bu & Zhang 等在大陆的入

侵风险,预测潜在的适生区,并结合进境台湾果蔬到达港口、物流中转站、集散地的空间分布划定它们在我国传入并定殖的风险区,为制定早期监测和预防预警等措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 台湾果蔬病虫入侵大陆风险评估

1.1.1 评估对象 根据准予进口大陆的 23 种台湾果蔬(鲜梨、菠萝、香蕉、番荔枝、木瓜、杨桃、芒果、番石榴、莲雾、槟榔、橘、柚、枣、椰子、枇杷、梅、李、柿子、桃、柠檬、柳橙、火龙果、哈密瓜)在台湾本地有害生物发生情况,结合近年来进境检疫截获有害生物记录初步确定了芒果壮狭普瘿蚊、扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* Tinsley、新菠萝灰粉蚧 *Dysmicoccus neobrevipes* Beardsley、菠萝白粉蚧 *Dysmicoccus brevipes* (Ckll.)、埃及吹绵蚧 *Icerya aegyptiaca* (Douglas)、棕榈蓟马 *Trips palmi* Karny、腹沟蓟马 *Rhipiphorothrips cruentatus* Hood、南洋臀纹粉蚧 *Planococcus lilacius* Cockerell、米尔顿姬小蜂 *Anselmella miltoni* Girault、大洋臀纹粉蚧 *Planococcus minor* (Maskell)、瓜类细菌性果斑病 Bacterial fruit blotch of melons、黄瓜绿斑斑驳花叶病毒 *Cucumber green mottle mosaic virus*、番茄斑萎病毒 *Tomato spotted wilt virus*、番木瓜环斑病毒 *Papaya ring spot virus* 等 14 种病虫为评估对象。

1.1.2 风险评估体系构建 外来生物入侵是一个由复杂链式过程构成的风险事件,一般可以分为传入、定殖、扩散与危害等阶段(鞠瑞亭和李博, 2010; 万方浩等, 2011; Mang *et al.*, 2018)。理论上,有害生物随进境果蔬传入我国的风险是由入侵过程中不同阶段的多重因素决定的。基于此,本研究通过综合分析影响外来物种入侵的生物学和生态学特

征、入侵地环境和人为影响等因素,以进境台湾果蔬主要病虫害有害生物的繁殖体能否进入我国大陆地区为起点,综合贸易全过程中促进外来物种入侵风险形成的来源及后果因子,建立了进境台湾果蔬主要病虫害风险评估指标体系(表 1)。该风险评估指标体系分为 4 个层次。第一层次是目标层即评价的目标,以综合风险指数(R)表达,描述的是被评估有害生物随果蔬贸易传入大陆风险评估的最终结果。第二层次是项目层,根据外来生物入侵的一般过程,即“传入→定殖→扩散→危害”,将所有影响进境台湾果蔬病虫害入侵风险因素分为 3 大类,包括传入风险(P)、定殖与扩散风险(E)、危害风险(I)。第三层次是因素层,即每个项目层的风险由哪些因素决定。第四层次是指标层,即每一个评价因素由哪些具体指标来描述。

指标层的定量方法及赋值。为便于统一计算,根据模糊数学原理,参考已开展生物入侵风险评估研究案例(鞠瑞亭和李博,2012;郑志鑫等,2018),将各参评指标按照风险大小划分为 5 个等级。每个等级设一个概念阈值,依次为 0.25、0.50、0.75、1.00。对于可以定量的指标,设定了指标打分可参考的定量范围,不能定量的指标由专家根据自身经验评估打分。

1.1.3 风险指数的计算 首先,邀请生物入侵、环境评估、植物保护、植物检疫等领域的专家根据已构建的风险评估指标体系及指标赋值标准(表 1),由专家对评估对象的各项指标逐一进行打分;然后,筛选出评分记录完整的打分表,统计出各项指标的综合值;最后,根据层次分析法—模糊综合评价模型计算出指标的权重以及最终的风险指数。

目标层计算。进境台湾果蔬病虫害有害生物的综合风险(R)由传入(P)、定殖扩散(E)和危害(I)的风险共同决定。它们之间相互联系、互相影响,共同决定综合风险,它们之间的逻辑关系符合乘法原理,计算公式可表示为 $R = \sqrt[3]{P \times E \times I}$,计算风险值应在[0~1]之间。

项目层计算。首先,通过分析台湾进境果蔬病虫害有害生物入侵风险的构成条件,判定因素层与项目层之间的逻辑关系;进而确定由因素层计算相对应的传入风险(P)、定殖扩散风险(E)与危害风险(I)的方法。

传入风险(P)和定殖扩散风险(E)分别与其与

因素层(P_i)和(E_i)之间均符合乘法原理,计算公式分别为: $P = \sqrt[3]{\prod P_i} (i=3)$ 和 $E = \sqrt[3]{\prod E_i} (i=6)$ 。危害风险(I)与因素层(I_i)之间符合替代关系,计算公式为: $I = \max(I_i)$ 。

因素层计算。传入途径(P_1)与参评指标 P_{11} 、 P_{12} 之间符合加法原理,它们的结果与 P_{13} 之间符合乘法关系,因此,计算公式为: $P_1 = \sqrt[2]{(w_{11}P_{11}+w_{12}P_{12}) \times P_{13}}$, (w_{11}, w_{12} 为权重值)。

运输风险(P_2)与屏障作用(P_3)只有 1 项评价指标,其值可直接得出。

繁殖能力(E_1)与参评指标(E_{1i})之间符合加法关系,计算公式为: $E_1 = \frac{\sum w_{1i}E_{1i}}{\sum w_{1i}}$,其中, w_{1i} 为各指标对应权重, E_{1i} 为指标。

气候条件(E_2)、基质条件(E_3)、抗性(E_4)均只有 1 项评价指标,可直接计算。

传播能力(E_5)、控制作用(E_6)与它们对应的参评指标(E_{5i} 、 E_{6i})之间符合加法关系。计算公式分别为: $E_5 = \frac{\sum w_{2i}E_{5i}}{\sum w_{2i}}$, $E_6 = \frac{\sum w_{2i}E_{6i}}{\sum w_{2i}}$ 。

社会风险(I_1)、生态风险(I_2)、经济风险(I_3)与参评指标(I_{1i} 、 I_{2i} 、 I_{3i})之间均符合替代关系,它们的计算公式分别为: $I_1 = \max(I_{1i})$; $I_2 = \max(I_{2i})$; $I_3 = \max(I_{3i})$ 。

权重系数。采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定因素层符合加法原理指标层的权重系数(鞠瑞亭和李博,2012;郑志鑫等,2018)。参考各指标专家综合评分值确定因子间的重要性程度(相同、稍强、强、明显强、绝对强)分别设置因子间对风险贡献权重先验值(1 或 2、3 或 4、5 或 6、7 或 8、9),从而构建一个因子间重要性判断矩阵。计算指标层对准则层的组合权向量,并根据公式做组合一致性检验,若检验通过,特征向量(归一化后)即为权向量;若不通过,则需要重新构造一致性比率较大的成对比较矩阵,并进行一致性检验,直至检验通过。最后计算得各指标的权重系数值。

1.2 进境台湾果蔬主要病虫害在我国的适生区预测

1.2.1 基础数据的搜集与处理 获取物种地理分布信息并转化为适生区分析所需要的地理坐标格式。需评估的 14 种主要病虫害在中国的分布数据来源于公开发表的论著(蔡鸿娇等,2012;付海滨等,2008;黄蓬英等,2008;马骏等,2009;吴佳教等,2016;徐梅等,2008)和野外调查记录。全球地理

分布主要源于全球生物多样性信息机构物种分布数据库 (Global Biodiversity Information Facility, GBIF) (<http://www.gbif.org/>)。把获得的分布数据利用 Google earth 等途径转换为经纬度地理坐标,并保存为 Excel 文档以用于适生区模型预测分析。

1.2.2 适生区预测 外来物种的适生区主要是利用物种的已知分布数据和环境数据构建模型来模拟其适应的生态位,进而投影到地理空间生成适生区分布数字地图 (Peterson *et al.*, 2011)。目前,已有多重模型可以用来预测物种的适生区 (Peterson *et al.*, 2011; Phillips *et al.*, 2004)。GARP 和 MaxEnt 是外来物种适生区预测研究中应用最为广泛的模型。本研究中,每个物种均首先分别采用这 2 个模型来预测其适生区,然后利用模型评价指标选择其中一个作为最优模型,预测其在我国的适生区。

本研究中 GARP 和 MaxEnt 生态位模型分别采用 Desktop Garp 1.1.6 ([Http://www.lifemapper.org/desktopgarp](http://www.lifemapper.org/desktopgarp)) 和 MaxEnt (3.3.3k) (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>)。首先,分别利用 GARP 和 MaxEnt 预测适生区;其次,采用无阈值的 ROC 曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 与已知分布点最低预测值 (minimum training presence, MPT) 和 10% 的分布点预测值 (10 percentile training presence) 2 种阈值的误差率 (omission error, OR) 来判别模型模拟的准确性,并据此确定最终运算的模型 (王运生等, 2007; Fielding & Bell, 1997; Marchioro, 2016);最后,利用筛选出的最优模型预测适生区。

GARP 和 MaxEnt 模型都是利用物种分布点和环境数据来模拟其生态位。本研究中环境数据集来自 Worldclim 数据集,包括海拔、气温、降雨等 11 个环境因子,环境数据空间分辨率为 5 min (<http://www.worldclim.org/>) (表 2)。为了降低多环境参数的共线性对模型预测的影响,选取影响物种分布的主要环境参数,首先利用 SDMtool 中的共线性分析和 MaxEnt 中的刀切法 (jackknife) 分析选取用于适生区预测的环境参数 (Brown, 2014; Marchioro, 2016)。

GARP 和 MaxEnt 的模型预测结果均以 ASCII 栅格数据格式输出,并利用 ArcGIS 的空间分析模块把预测栅格数值转换为物种适生区和非适生区。由于 GARP 模型探索物种已知分布区的环境特征与研究区域的非随机关系,因此模型之间均存在差

异。为了选出最优的模型,对模型进行了 100 次重复运算,然后参考 Anderson *et al.*, (2003) 提出的最优模型选择方法从中选出 10 个最优的模型。最优的 10 个模型以栅格的格式输出,然后利用 ArcGIS 的空间扩展模块,将预测结果进行叠加。叠加后为每一个栅格的数值为 0~10 之间,其中 0 代表 10 个模型都预测该栅格不适合物种生长,而 10 代表 10 个模型都预测该栅格适合物种生长。数值越大表示该栅格的环境参数越适合物种的生存。并根据该数值将预测的区域划分为:适生区域 (叠加值 ≥ 6) 和不适宜生存的区域 (叠加值 ≤ 5)。MaxEnt 模型预测结果为连续数值,根据已知分布点模型预测最小值划分适生区和非适生区。并对上述模型预测的结果进行重分类适生区赋值为 1,非适生区赋值为 0。

14 种主要病虫在我国的适生性风险重叠分析。为了进一步探明 14 种主要病虫在我国适生性风险的分布,明确重点管理区域,把上述从分类后的适生区预测值 (0, 非适生; 1, 适生) 进行了叠加分析。如果一个地区的叠加值为 14, 表明所有被评估病虫都适合生存, 风险极高; 如果值为 0, 表明所有被评估对象均不适合, 风险极低。

2 结果与分析

2.1 主要病虫的风险评估

根据构建的风险评估指标体系以及各指标的评分标准及其风险指数算法, 确定了符合加法原理的指标权重系数, 计算了 14 种主要病虫在我国的综合风险值和风险等级 (表 3)。极易随台湾进境果蔬传入的 14 种主要病虫的综合风险值均大于 0.7, 属高风险等级物种。

2.2 适生区预测

环境因子刀切法分析显示, 14 种病虫的主要环境因素各不相同 (表 2), 这些因子被用于构建模型预测其在我国的适生区。模型评估结果显示, 芒果状缺普癭蚊等 9 种害虫的 GARP 生态位模型预测模型性评价指标 AUC 值高于 MaxEnt 模型, 误差率低于 MaxEnt 模型, 其余 5 种病虫的 MaxEnt 模型预测相比较于 GARP 模型, 其 AUC 值高、误差率低。因此, 采用 GARP 模型来预测芒果状缺普癭蚊等 9 种害虫在我国的适生区, 采用 MaxEnt 模型来预测其余 5 种病虫在我国的适生区 (表 4)。

表 1 进境台湾果蔬主要病虫害风险评估指标体系及其指标赋值参考标准

Table 1 Risk assessment index system and indicator assignment reference standards of important invasive pests introduced with fruit and vegetables from Taiwan to mainland China						
项目层 Project level	因素层 Factor level	指标层 Index level	指标赋值参考标准 Indicator assignment reference standards			
			0~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~1.00
传入风险 Introduction risk (P)	传入途径 Introduction pathway(P_1)	可负载体的调运频次 Introduction frequency of vectors contaminated with pest (P_{11})	每年小于 4 次 Less than 4 times per year	每年 4~12 次 4~12 times per year	每年 13~48 次 13~48 times per year	每年大于 48 次 More than 48 times per year
		载体的来源地 Source of the introduction vectors (P_{12})	0~20%载体来自被评估物种发生区 Less than 20% from distribution range of the target species	20%~50%以上载体来自被评估物种发生区 20%~50% from distribution range of the target species	50%~80%载体来自被评估物种发生区 50%~80% from distribution range of the target species	80%以上载体来自被评估物种发生区 More than 80% from distribution range of the target species
		生物自然扩散入侵的可能性 Invasion probability with natural vector or disperse (P_{13})	不能自然传入 Natural dispersal cannot occur	/	/	能主动传入或通过自然因素被动传入 Natural dispersal occur
	运输风险 Transportation risk (P_2)	运输途中的存活率 Survival rate during transportation process (P_{21})	0~10%	10%~20%	20%~50%	50%~100%
	屏障作用 Barrier function(P_3)	检疫屏障的阻碍效果 Quarantine efficiency (P_{31})	效果较明显 High	效果中等 Moderate	效果不明显 Low	无效果 No
定殖扩散风险 Colonization and diffusion risk(E)	繁殖能力 Reproduction ability (E_1)	繁殖世代 Reproduction generation (E_{11})	1 年 1 代 One generation per year	1 年 2 代 Two generation per year	1 年 3~4 代 Three or four generation per year	1 年 4 代以上 More than four generation per year
		繁殖方式 Reproduction mode (E_{12})	不具有孤雌生殖特性 Insect cannot reproduce with parthenogenesis	/	/	具有孤雌生殖特性 Insect can reproduce with parthenogenesis
	气候条件 Climatic conditions (E_2)	单母体最大繁殖量 Maximum fecundity of one female (E_{13})	10~50	50~100	100~200	>200
		温度、光照、降水等非生物因子的适合度 Suitability of abiotic factors e.g. temperature, light, precipitations etc(E_{21})	不太适合 Slightly favourable	中等适合 Moderately favourable	较适合 High favourability	非常适合 Very high favourability
	基质条件 Substrate conditions (E_3)	食料和寄主等的适合度 Survival suitability in varied food and host (E_{31})	0~10%	10%~50%	50%~80%	>80%
	抗性 Tolerance to stresses (E_4)	对逆境抗性能力 Tolerance to adverse conditions (E_{41})	弱 Weak	中等 Moderate	较强 High	极强 Very high
	传播能力 Dispersal ability (E_5)	自主飞行能力或依靠自然条件传播能力 Ability of active flight and passive disperse with natural vectors (E_{51})	弱 Weak	中等 Moderate	较强 High	极强 Very high

续表 1

项目层 Project level	因素层 Factor level	指标层 Index level	指标赋值参考标准 Indicator assignment reference standards			
			0~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~1.00
繁殖体随交通、旅游等人为因素无意传播的频率 Frequency of propagule dispersed with human activities e.g. transportation, tourism etc (E_{32})	控制作用 Control effect (E_6)	生物因子的控制作用 Control effects of biotic factors (E_{61})	低 Low	中等 Moderate	较高 High	极高 Very high
		监控难度 Monitoring difficulty (E_{62})	有效 Effective	中等 Moderate	较差 Low	差 Very low
		防治及根除难度 Eradication and control difficulty (E_{63})	容易 Easy	中等 Moderate	较难 Difficulty	差 Very difficulty
			容易 Easy	中等 Moderate	较难 Difficulty	差 Very difficulty
危害后果 Damage effect (I)	社会风险 Social risk (I_1)	对景观美学价值的影响 Impacts on landscape aesthetic values (I_{11})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对政治、文化、宗教等活动的影响 Impacts on politics, culture and religions etc (I_{12})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对人类、野生动物、家养动物健康的影响 Impacts on human health, wild and domestic animals etc (I_{13})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对居民生活和工作秩序的影响 Impacts on resident life and sequence work (I_{14})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
生态风险 Ecological risk (I_2)		对土壤、空气、地表和地下水、气候影响 Impacts on soil, atmosphere, surface and ground water, microclimate (I_{21})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对土著物种及当地生物多样性影响 Impacts on interspecific interaction of native species and biodiversity (I_{22})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		携带其他重要有害生物载体的能力 Ability to act as vectors carrying with other pests (I_{23})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对林业、旅游业带来的经济损失 Economic loss to forest, tourism (I_{31})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
经济风险 Economic risk (I_3)		对农产品带来的经济损失 Economic loss to agricultural products (I_{32})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对贸易及其他方面带来的经济损失 Economic loss to trade and others (I_{33})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high

表 2 生态位模型环境参数

Table 2 Environmental parameters for the employed ecological niche model

种 Species	海拔 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect	霜日频率 Frost days	年降雨量 Annual precipitation	太阳辐射 Solar radiation	年均温 Mean annual temperature	最热月最高温 Maximum temperature of warmest month	最冷月最低温 Minimum temperature of coldest month	水汽压 Water vapour pressure	雨日频率 Wet days
柑果状缺普瘿蚊 <i>Procontarinia robusta</i>				✓	✓			✓		✓	✓
扶桑绵粉蚧 <i>Phenacoccus solenopsis</i>			✓	✓			✓		✓	✓	✓
新菠萝灰粉蚧 <i>Dysmicoccus neobrevipes</i>	✓		✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓
菠萝白粉蚧 <i>Dysmicoccus brevipes</i>					✓	✓	✓		✓	✓	✓
埃及吹绵蚧 <i>Icerya aegyptiaca</i>			✓		✓	✓		✓			
棕榈蓟马 <i>Trips palmi</i>				✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
腹钩蓟马 <i>Rhipiphorothrips cruentatus</i>				✓	✓	✓			✓		✓
南洋臀纹粉蚧 <i>Planococcus lilacinus</i>				✓	✓	✓		✓		✓	✓
米尔顿姬小蜂 <i>Aniselmella miltoni</i>				✓	✓	✓				✓	✓
大洋臀纹粉蚧 <i>Planococcus minor</i>	✓		✓	✓	✓		✓		✓		✓
瓜类细菌性果斑病 Bacterial fruit blotch of melons				✓	✓		✓	✓		✓	✓
黄瓜绿斑驳花叶病毒 <i>Cucumber green mottle mosaic virus</i>				✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
番茄斑萎病毒 <i>Tomato spotted wilt virus</i>				✓	✓		✓	✓		✓	✓
番木瓜环斑病毒 <i>Papaya ring spot virus</i>				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ 表示该参数被用于构建模型预测适生区。
✓ indicates that the parameter was used to construct ecological niche model to predict potential distribution range.

表 3 进境台湾果蔬主要病虫害风险评估指标权重系数和综合风险值

Table 3 The index weight coefficient and integrated values of important invasive pests introduced with fruit and vegetables from Taiwan to mainland China											
种 Species	符合加法原理指标权重系数 The index weight coefficient values in line with additive principle of the invasive plant for risk assessment										综合风险值 Integrated risk value
	P_{11}	P_{12}	E_{11}	E_{12}	E_{13}	E_{51}	E_{52}	E_{61}	E_{62}	E_{63}	
杧果状缺普瘿蚊 <i>Procontarinia robusta</i>	0.50	0.50	0.40	0.40	0.20	0.75	0.25	0.33	0.41	0.26	0.722
扶桑绵粉蚧 <i>Phenacoccus solenopsis</i>	0.58	0.42	0.40	0.40	0.20	0.75	0.25	0.54	0.30	0.16	0.753
新菠萝灰粉蚧 <i>Dysmicoccus neobrevipes</i>	0.50	0.50	0.40	0.40	0.20	0.75	0.25	0.33	0.41	0.26	0.729
菠萝白粉蚧 <i>Dysmicoccus brevipes</i>	0.67	0.33	0.33	0.41	0.26	0.67	0.33	0.33	0.41	0.26	0.723
埃及吹绵蚧 <i>Icerya aegyptiaca</i>	0.75	0.25	0.54	0.30	0.16	0.50	0.50	0.54	0.30	0.16	0.724
棕榈蓟马 <i>Trips palmi</i>	0.67	0.33	0.40	0.40	0.20	0.67	0.33	0.33	0.41	0.26	0.735
腹钩蓟马 <i>Rhipiphorothrips cruentatus</i>	0.50	0.50	0.49	0.31	0.20	0.75	0.25	0.40	0.40	0.20	0.786
南洋臀纹粉蚧 <i>Planococcus lilacius</i>	0.67	0.33	0.33	0.41	0.26	0.67	0.33	0.33	0.41	0.26	0.795
米尔顿姬小蜂 <i>Anselmella miltoni</i>	0.67	0.33	0.33	0.41	0.26	0.67	0.33	0.54	0.30	0.16	0.719
大洋臀纹粉蚧 <i>Planococcus minor</i>	0.67	0.33	0.54	0.30	0.16	0.50	0.50	0.33	0.41	0.26	0.761
瓜类细菌性果斑病 Bacterial fruit blotch of melons	0.67	0.33	0.54	0.30	0.16	0.58	0.42	0.33	0.41	0.26	0.736
黄瓜绿斑驳花叶病毒 Cucumber green mottle mosaic virus	0.75	0.25	0.33	0.41	0.26	0.50	0.50	0.33	0.41	0.26	0.752
番茄斑萎病毒 Tomato spotted wilt virus	0.75	0.25	0.40	0.40	0.20	0.67	0.33	0.33	0.41	0.26	0.739
番木瓜环斑病毒 Papaya ring spot virus	0.75	0.25	0.40	0.40	0.20	0.75	0.25	0.33	0.41	0.26	0.740

表 4 进境台湾果蔬病虫害适生区预测模型评价指标汇总

Table 4 Summary of performance statistics of models for important invasive pests introduced with fruit and vegetables from Taiwan to mainland China						
种 Species	GARP 模型 GARP model			MaxEnt 模型 MaxEnt model		
	AUC	MPT omission rate	10% omission rate	AUC	MPT omission rate	10% omission rate
杧果状缺普瘿蚊 <i>Procontarinia robusta</i>	0.92	0.04	0.14	0.76	0.11	0.28
扶桑绵粉蚧 <i>Phenacoccus solenopsis</i>	0.81	0.11	0.28	0.74	0.27	0.33
新菠萝灰粉蚧 <i>Dysmicoccus neobrevipes</i>	0.91	0.02	0.17	0.79	0.11	0.25
菠萝白粉蚧 <i>Dysmicoccus brevipes</i>	0.92	0.01	0.14	0.76	0.27	0.33
埃及吹绵蚧 <i>Icerya aegyptiaca</i>	0.90	0.01	0.12	0.74	0.11	0.25
棕榈蓟马 <i>Trips palmi</i>	0.91	0.02	0.10	0.73	0.18	0.36
腹钩蓟马 <i>Rhipiphorothrips cruentatus</i>	0.89	0.16	0.24	0.89	0.09	0.12
南洋臀纹粉蚧 <i>Planococcus lilacius</i>	0.94	0.04	0.08	0.70	0.14	0.24
米尔顿姬小蜂 <i>Anselmella miltoni</i>	0.89	0.06	0.16	0.76	0.18	0.41
大洋臀纹粉蚧 <i>Planococcus minor</i>	0.90	0.04	0.14	0.76	0.18	0.41
瓜类细菌性果斑病 Bacterial fruit blotch of melons	0.73	0.18	0.36	0.91	0.02	0.14
黄瓜绿斑驳花叶病毒 Cucumber green mottle mosaic virus	0.69	0.24	0.38	0.89	0.04	0.12
番茄斑萎病毒 Tomato spotted wilt virus	0.71	0.12	0.24	0.91	0.03	0.14
番木瓜环斑病毒 Papaya ring spot virus	0.73	0.18	0.36	0.88	0.07	0.18

黑色加粗字体表示用于适生区预测的最终模型。

The selected best models are highlighted in bold.

模型预测结果显示,14 种病虫害在我国都存在适生区,不同物种的适生区范围不同,但我国东部和南部沿海地区的热带和亚热带地区都是它们的高适生区(图 1)。14 种主要病虫害在我国适生区的重叠分析表明,除台湾外,大陆地区的福建、广东、海南等热带、亚热带地区是其适生的高重叠区。此外,95%的进境台湾果蔬集散地、98%接受港口、100%台湾果蔬种植基地位于其适生区的高重叠区(图 2)。

3 讨论

在当前全球化背景下,外来生物入侵呈持续增长趋势,地区间的贸易等人类活动是外来物种扩散蔓延的驱动力(Bullock *et al.*, 2018; Garcia *et al.*, 2013; Kaplan *et al.*, 2014)。如何预防外来有害生物传入、抑制其扩散和危害是当前生物入侵管理面临的主要问题。近年来,海峡两岸贸易频繁,入境的台湾果蔬每年超过 4000 批次,截获的有害生物

的批次和种类均呈增加趋势(王瑞等,2016; 吴佳教等,2016)。为了预防和降低台湾果蔬贸易携带的有害生物入侵造成的危害,本研究构建了包括 4 个层次 26 个指标的进境台湾果蔬有害生物入侵综合风险评估指标体系,规范了风险指数的计算方法,系统评估了进境台湾果蔬极易携带传入的 14 种主要病虫害在大陆的风险,结果表明,它们在我国都属于高风险等级。

由于被评估的对象也是东南亚和全球热带地区主要病虫害,应该加强它们通过其他途经、从别的国家或地区传入的可能。台湾也可能在其入侵大陆过程中起踏板的作用(Lu *et al.*, 2018)。由于这些有害生物近年来不断地在我国被发现,而且扶

桑绵粉蚧等已经开始在多个地区扩散蔓延。因此,急需制定针对性的早期风险管理措施,实现早发现、早治理,以预防传入、抑制其扩散蔓延。

判定外来物种的入侵危害的时空异质性对早期监测预警等管理措施具有重要意义。本研究利用物种气候环境生态位模型预测分析了 14 种病虫害在我国的适生区,并通过叠加寄主植物的分布和进境台湾果蔬贸易的接受港口、中转站、集散地等物流的节点,明确了它们在我国极易传入且适宜其生存、能够繁殖增长并造成危害的高风险区域。据此,建议我国东部和南部沿海地区的港口、物流中转站、集散地、种植园等地建立监测预警网络。

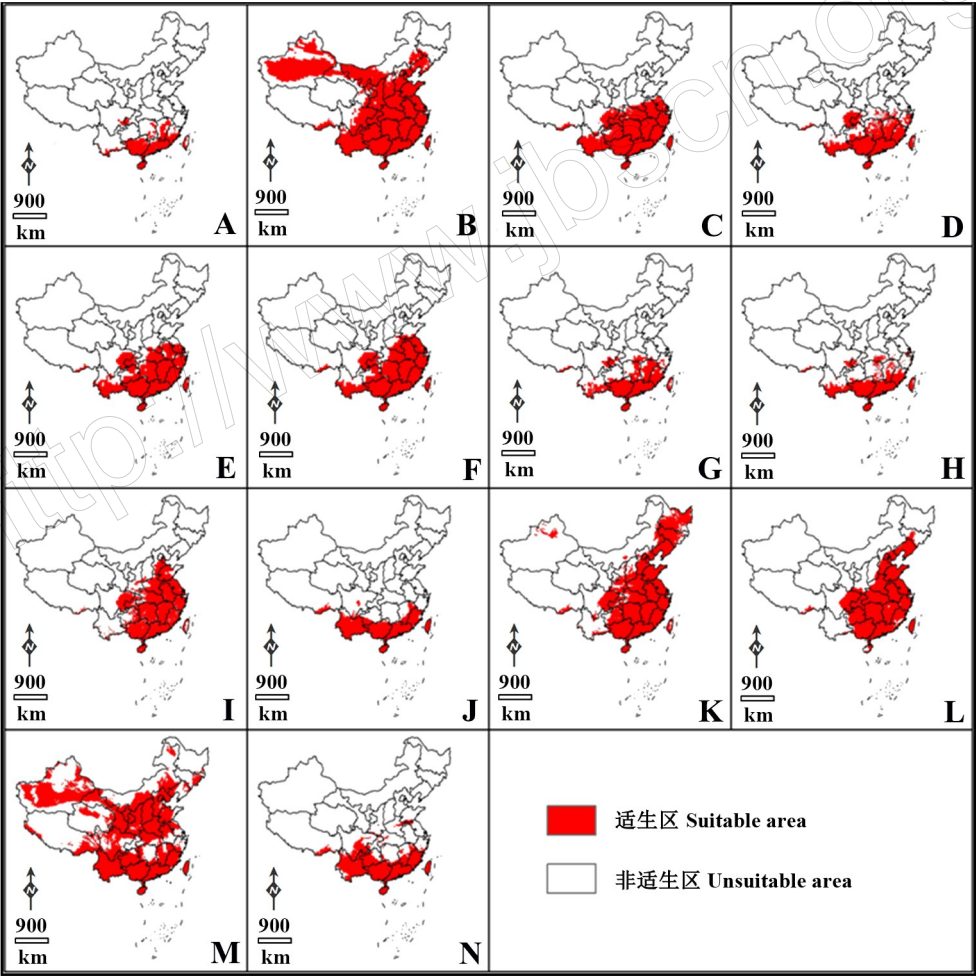


图 1 进境台湾果蔬 14 种主要病虫害在我国的适生区预测

Fig.1 Predicted potential distribution range of 14 important invasive pests introduced with fruit and vegetables from Taiwan to mainland China

A: 杧果状缺番瘿蚊; B: 扶桑绵粉蚧; C: 新菠萝灰粉蚧; D: 菠萝白粉蚧; E: 埃及吹绵蚧; F: 棕榈蓟马; G: 腹钩蓟马; H: 南洋臀纹粉蚧; I: 米尔顿姬小蜂; J: 大洋臀纹粉蚧; K: 瓜类细菌性果斑病; L: 黄瓜绿斑驳花叶病毒; M: 番茄斑萎病毒; N: 番木瓜环斑病毒。

A: *Procontarinia robusta*; B: *Phenacoccus solenopsis*; C: *Dysmicoccus neobrevipes*; D: *Dysmicoccus brevipes*; E: *Icerya aegyptiaca*; F: *Trips palmi*; G: *Rhipiphorhrips cruentatus*; H: *Planococcus lilacius*; I: *Anselmella miltoni*; J: *Planococcus minor*; K: Bacterial fruit blotch of melons; L: *Cucumber green mottle mosaic virus*; M: *Tomato spotted wilt virus*; N: *Papaya ring spot virus*.

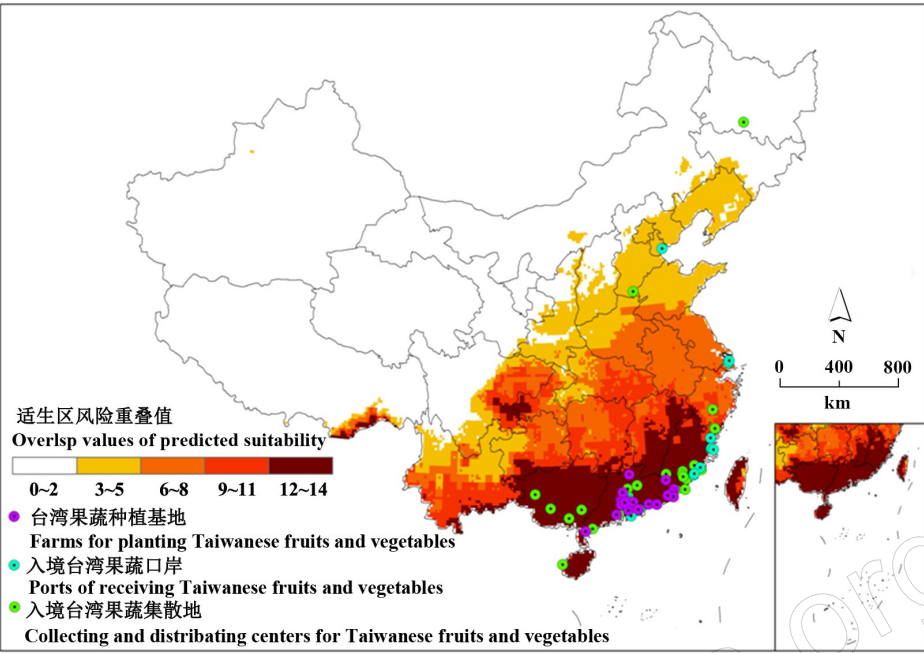


图 2 进境台湾果蔬 14 种主要病虫在我国适生性重叠风险
Fig.2 Predicted suitability overlap risk of 14 important invasive pest introduced with fruit and vegetables from Taiwan to mainland China

总之，针对进境台湾果蔬主要病虫的风险评估结果，建议进一步加强海关检疫、开展和完善监测预警等措施，预防和控制有害生物入侵，为农业生物安全提供保障。同时，本研究基于明确的外来物种入侵媒介，系统构建基于传入、定殖、扩散、危害的对指标综合风险快速评估判定体系融合影响传入定殖和扩散的关键因素的叠加分析，划定外来物种入侵的高风险区和空间异质性的研究思路，可为其他物种入侵风险评估所借鉴。

参考文献

蔡鸿娇, 王宏毅, 侯有明, 黄蓬英, 傅建炜, 杨广, 2012. 厦门市入侵害虫芒果壮钗普瘦蚊(双翅目:瘦蚊科)为害情况调查. *生物安全学报*, 21(1): 46–51.

付海滨, 王芳, 林颖, 赵晓军, 2008. 我国首次截获检疫性有害生物——大洋臀纹粉蚧. *植物检疫*, 22(6): 382–384.

黄蓬英, 林玲玲, 叶正青, 徐梅, 吴媛, 2008. 台湾莲雾上截获的米尔顿姬小蜂. *植物检疫*, 22(3): 178–179.

鞠瑞亭, 李博, 2012. 城市绿地外来物种风险分析体系构建及其在上海世博会管理中的应用. *生物多样性*, 20(1): 2–23.

李乐仁, 2008. 台湾果蔬零关税的原因及其对两岸农业的影响. *湖南科技学院学报*, 29(2): 125–127.

马骏, 胡学难, 刘海军, 梁帆, 赵菊鹏, 冯黎霞, 陈乃中, 2009. 广州扶桑上发现扶桑绵粉蚧. *植物检疫*, 23(2): 35–36.

万方浩, 彭德良, 王瑞, 2010. *生物入侵: 预警篇*. 北京: 科

学出版社.

王瑞, 万方浩, 2010. 入侵植物意大利苍耳在我国适生区预测. *草业学报*, 19(6): 222–230.

王瑞, 赵健, 尤民生, 2016. 入境台湾果蔬主要病虫风险评估. 北京: 中国农业科学出版社.

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.

吴佳教, 黄蓬英, 尤民生, 2016. 入境台湾果蔬病虫口岸检疫. 北京: 中国农业出版社.

徐梅, 黄蓬英, 安榆林, 陈乃中, 2008. 检疫性有害生物——南洋臀纹粉蚧. *植物检疫*, 22(2): 100–102.

郑志鑫, 王瑞, 张凤娟, 冼晓青, 万方浩, 2018. 重要外来入侵植物随南水北调工程传入京津冀受水区的风险评估. *生物安全学报*, 27(4): 300–308.

ANDERSON R P, LEW D, PETERSON A T, 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162: 211–232.

BROWN J L, 2014. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Method in Ecology and Evolution*, 5: 694–700.

BULLOCK J M, BONTE D, PUFAL G, CAROLINA D S C, CHAPMAN D S, GARCÍA C, MATTHYSEN E, DELGADO M M, 2018. Human-mediated dispersal and the rewiring of spatial Networks. *Trends in Ecology & Evolution*, 33: 958–970.

BULLOCK J M, NATHAN R, 2008. Plant dispersal across multiple scales: linking models and reality. *Journal of Ecolo-*

gy, 96: 567–697.

DAVIES K W, SHELEY R L, 2007. A conceptual framework for preventing the spatial dispersal of invasive plants. *Weed Science*, 55: 178–184.

FIELDING A H, BELL J F, 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1): 38–49.

GARCIA C M, HAACK R A, MAGAREY R D, BORCHERT D, 2013. Understanding trade pathways to target biosecurity surveillance. *NeoBiota*, 18: 103–118.

GUREVITCH J, PADILLA D, 2004. Are invasive species a major cause of extinctions? *Trends in Ecology and Evolution*, 19: 470–474.

KAPLAN H, VAN NIEKERK A, LE ROUX J J, RICHARDSON D M, WILSON J R U, 2014. Incorporating risk mapping at multiple spatial scales into eradication management plans. *Biological Invasions*, 16: 691–703.

LU J B, LI S P, WU Y J, JIANG L, 2018. Are Hong Kong and Taiwan stepping-stones for invasive species to the mainland of China? *Ecology and Evolution*, 8: 1966–1973.

MANG T, ESSL F, MOSER D, KLEINBAUER I, DULLINGER S, 2018. An integrated, spatio-temporal modelling framework for analysing biological invasions. *Diversity and Distributions*, 24: 652–665.

MARCHIORO C A, 2016. Global potential distribution of *Bactrocera carambolae* and the risks for fruit production in Brazil. *PLoS ONE*, 11: e0166142.

MYERS J H, BAZLEY D, 2003. *Ecology and control of introduced plants*. New York: Cambridge University Press.

PETERSON A T, SOBERON J, PEARSON R G, 2011. *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

PHILLIPS S J, DUDIK M, SCHAPIRE R E, 2004. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190: 231–259.

(责任编辑:郭莹)