

DOI: 10.5846/stxb202105141261

李惠茹, 严靖, 杜诚, 闫小玲. 中国外来植物入侵风险评估研究. 生态学报, 2022, 42(16): 6451-6463.

Li H R, Yan J, Du C, Yan X L. Current status and suggestions of research on invasive risk assessment of alien plants in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6451-6463.

中国外来植物入侵风险评估研究

李惠茹, 严靖, 杜诚, 闫小玲*

上海辰山植物园, 华东野生濒危资源植物保育中心, 上海 201602

摘要: 对外来植物开展入侵风险评估是防止外来植物入侵最经济有效的措施, 能够极大的节约外来种管理的经济和时间成本。研究简述了国内外入侵风险评估系统, 从外来物种基础信息缺乏、外来植物的适生区分析不完善、风险评估体系构建不客观、对新近外来种的关注度不够 4 个方面阐述了我国外来植物风险评估存在的主要问题。并针对存在的问题提出了以下建议: (1) 构建外来植物基础信息数据库是风险评估的基础, 加强外来植物本底资料的调查与考证, 并将外来植物表型数据的积累和分析纳入数据库, 使得风险评估有据可依。(2) 运用生态位模型进行生态风险分析是风险评估的重点, 并将人类活动指标纳入预测模型, 揭示人类活动对入侵植物分布格局的影响。(3) 建立科学的风险评估系统是核心, 包括通过选择风险指标和设置权重来提高评估系统的科学性、构建特定区域或特定生态类型的风险评估体系、根据评估对象的生物学与生态学特征建立符合实际要求的评估标准, 实行差别化的风险评估等。(4) 加强新近外来植物的管理是关键, 应定期野外监测新近外来种的种群动态, 定期审查风险评估结果, 对高风险的新近外来种进行预警研究将为中国外来植物风险评估体系构建提供重要参考, 为入侵植物防控措施的制定提供理论依据。

关键词: 外来植物; 入侵植物; 风险评估; 评估系统; 生态安全

Current status and suggestions of research on invasive risk assessment of alien plants in China

LI Huiru, YAN Jing, DU Cheng, YAN Xiaoling*

Eastern China Conservation Centre for Wild Endangered Plant Resources, Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China

Abstract: Risk assessment of alien plants is the most economical and effective measure to prevent the invasion of alien species, and it can greatly save the economic and time cost of alien species management. In this paper, the risk assessment system of alien plants in China and abroad is briefly introduced. The existing problems in the risk assessment of alien plants in China are expounded on the lacking of the basic information of alien plants, incomplete suitable area analysis, unobjective construction process of risk assessment system, and insufficient attention to risk analysis of newly alien plants. The following suggestions are given for the existing problems. (1) Establishment of the basic information database of alien plants is the basis of risk assessment. In order to provide evidence for risk assessment, the investigation and textual research of background data of alien plants should be strengthened, and the accumulation and analysis of phenotypic data of alien plants should be added into the database, which helps to improve the management of alien species. (2) The application of ecological niche model to ecological risk analysis is the important part of risk assessment, and human activity indicators should be considered in the niche model to reveal its impact on the distribution pattern of invasive plants. The transfer ability of the model should be fully considered when selecting geographical distribution data and environmental variables for

基金项目: 上海市绿化和市容管理局科学技术项目(G212405); 南京海关科研项目(2020KJ10)

收稿日期: 2021-05-14; 网络出版日期: 2022-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sx_yxl@163.com

model construction. The accuracy and reliability of the model are evaluated and the optimal model is selected according to the assessment result. (3) The scientificity is the core of risk assessment system. The measures to improve the scientificity of risk assessment system include selecting the risk index and setting weight, establishment of the risk assessment system for particular area or specific ecological types, establishment of evaluation standards in line with the actual requirements according to the biological and ecological characteristics. (4) Strengthening the management of newly alien plants is the key part. The population dynamics of newly alien species should be monitored regularly. At the same time, the results of risk assessment should be reviewed regularly, and the high-risk newly alien species should be warned. The early stage is the best time to manage alien species. Risk assessment and early warning of alien species that have not caused significant harm can reduce the cost of prevention and control. This study will provide an important reference for the establishment of risk assessment system for alien plants in China and provide a theoretical basis for the formulation of invasive plant prevention and control measures.

Key Words: alien plants; invasive plants; risk assessment; assessment system; ecological security

生物入侵给入侵地的环境和社会经济造成了巨大的损失^[1-4],已成为 21 世纪五大全球性环境问题之一,得到了各国政府、国际组织、社会公众和科学界的广泛重视^[2-3,5]。随着全球化进程的加快,外来种的数量呈上升趋势,世界各国都将面临更加严峻的外来种威胁^[6-7]。

中国的气候类型及生态系统种类多样,生物多样性非常高,很多外来种容易在此定殖^[8-9]。随着经济发展、国际化贸易的增加,外来种入侵中国的数量和频率持续增加^[5,10],重大农业入侵生物导致的新疫情不断爆发,已经严重威胁到我国的粮食安全、经济安全、生物安全、生态安全和农产品贸易安全^[11]。当前“一带一路”倡议的推进,基础设施网络化贯通,都将进一步加速入侵生物的传入频率和扩散速率^[12]。此外,快速的城市化进程推动了我国入侵种的区域性扩张^[13],经济的快速发展已经成为我国生物入侵强度加大的主要因素^[14-16],未来我国生物入侵的趋势将更加严峻^[16-17]。鉴于生物入侵对生态环境、社会经济和人类健康造成的严重威胁,为了更好的对外来种进行管理,避免或减少生物入侵造成巨大的影响,对外来种进行入侵风险评估,是防止生物入侵最经济有效的措施。为了解决这一问题,风险评估系统被相继开发。

入侵风险评估系统是一种用来主动识别对生态或经济造成危害的高风险植物的工具^[18],是开展外来物种风险管理的基础,也是风险分析过程中的关键一环,是防止外来物种入侵的最有效手段之一^[3,19-20],其主要目的是系统分析外来物种对生态安全、社会经济和人类健康可能造成的风险,为风险管理和相关政策的制定提供依据,为外来入侵种的引进和管理服务^[3,20-21]。本文简述了国内外主要的外来生物风险评估系统,全面分析了我国外来植物风险评估研究过程中存在的问题,并提出了建议和对策,以期对我国外来植物的风险评估工作提供参考。

1 国内外主要外来生物风险评估系统

1.1 国外主要外来生物风险评估系统

入侵生物学的关键挑战是弄清哪些外来种即将归化和扩散或者哪些外来种将对生物多样性或者其他资源造成不利影响^[22-23]。为了应对这一挑战,一系列入侵风险评估系统被相继开发出来,所有的方法具有共同的目标,即为外来入侵种的引进和管理服务^[18]。目前应用较多的是多指标综合评分系统,即根据外来种的生物学和生态学信息特征,对每项指标进行赋值,从而获得不同外来种的综合得分情况。一般而言,受外来种影响较为严重的地区风险评估工具的开发和使用水平高于其他地区,例如美国不仅在州和地区范围独立开展风险评估和控制工作,也构建了联邦体系外的有害生物风险评估程序^[24]。世界范围内影响力比较大风险评估系统的主要有以下几种:

1.1.1 澳大利亚杂草风险评估系统(Weed Risk Assessment, WRA)^[25]

WRA 是一个以问题为基础对拟引入外来植物的杂草潜力进行风险评估的系统,采用问卷调查的方法设置了 49 个问题,内容涉及外来种的现状、气候和分布、生物学特性、繁殖特征、传播特点等。根据最终得分确定是否引种或者需要进行进一步评估。若进一步评估不仅需要更深入的研究和经济成本/效益分析,而且需要在必要的条件下进行种子发芽等生物学实验。对于信息不全的物种,WRA 系统允许知识缺口,无需回答所有条目的问题,但针对每一模块需要回答问题的最低数量进行了限制,提高了该系统对信息量较少或者新近发现的外来种的风险预测能力,为风险管理者提供了科学的依据^[26]。WRA 系统可操作性比较强,已经用于多种外来植物的评价,并且在多个国家和地理区域进行了测试,被广泛认为是预测植物引种风险的一种方法,在引进新植物时其可作为一种普遍采用的评估系统^[27],经过改良后用于新西兰、夏威夷等多地区的杂草风险评估^[28]。

1.1.2 南非外来植物专家系统(Alien Plant Expert System, APES)^[29]

APES 是 Richardson 等^[30]、Richardson 和 Cowling^[31]、Richardson 等^[32]工作的扩展和延伸。通过理论论证和实证分析,他们开发了一套基于非洲南端独有的硬叶木本环境特征和成功入侵生物特征的风险评估方案,共包括 6 个模块 24 个问题,主要用于评价南非硬叶灌木系统中的潜在外来入侵种。该系统用流程图的形式将外来植物入侵的过程概念化,首先展示了已经入侵的物种是如何克服多种障碍成功入侵的,并对尚未引进或已引进但未显示入侵迹象的一系列外来物种进行了评估^[29]。

APES 系统最显著的优点之一是它的透明度,此外,推理过程简单明确,得出结论(高风险/低风险)的步骤可追溯,能够在数据缺乏或者不确定的情况下完成评估过程,不仅在识别高入侵风险外来种方面可以应用,在生物建模方面也具有较大潜力,有望在外来种入侵的关键阶段实在防控资源的优化配置^[29]。APES 的缺点是重点关注南非天然植被(硬叶林)的环境和可能引进种特征之间的特定相互作用,设置的问题和规则不具有普遍性。由于不同外来种入侵的屏障和窗口在不同的环境中表现不同,一般不建议普遍应用该系统。

1.1.3 联合国粮食及农业组织有害生物风险分析(Pest Risk Analysis, PRA)^[33-34]

联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)《国际植物保护公约》秘书处编纂了一系列《国际植物检疫措施标准》,其中,第 11 号修订 1 标准是“包括环境风险分析在内的检疫性有害生物风险分析”。该标准详细介绍了有害生物风险分析工作程序,以确定其是否为检疫性有害生物,共分为 3 个阶段:第一阶段:开始阶段,主要目的是查明需要进行风险分析的有害生物和传播途径。第二阶段:有害生物风险评估,大致分为 3 个步骤:有害生物分类、评估传入和扩散的可能性、评估潜在的经济影响。第三阶段:有害生物风险管理,针对上述 2 个阶段的评估结果,确定是否需要进行风险管理以及采取措施的力度。联合国粮食及农业组织有害生物风险分析是比较基础和重要的风险评估方法,为世界许多国家和地区提供了参考。

1.1.4 中欧地区环境杂草入侵潜力评价程序^[35]

该系统分为预评估系统和评估系统两部分,预评估系统首先排除了官方控制或已经被列为检疫对象的外来种、广泛存在的或者仅计划栽培保护的种类,这可以确保不会对具有可观经济利益的物种引进造成影响。符合风险评估条件的物种进入评估系统,该系统包括气候匹配度、物种在欧洲的状态等 12 个问题或指标,并针对每个问题答案设置了不同的分值,最后根据评估结果,将符合风险评估条件的物种分为三类(高风险、需要进一步观察和低风险)。该系统简单易操作,是对欧洲外来植物评估的首次尝试,但是,生态基础数据的缺乏是影响其评估结果的主要因素。未来该系统应在实践中继续测试并在必要时修正,其可行性还需要入侵管理专家及风险评估专家应用并进一步评估^[35]。

1.1.5 德国-奥地利黑名单信息系统(German-Austrian Black List Information System, GABLIS)^[36]

GABLIS 系统采用 5 个基本标准和 6 个补充标准来评估外来种的影响,评估结果分为白名录、灰名录和黑名单 3 个主要类别,迄今已在鱼类、维管植物、哺乳动物、鸟类和大型底栖动物中进行了测试,也用于评估一个国家尚未出现的外来物种(黑名单-警告名单)。GABLIS 是一个跨国家、在分类学上具有普遍性意义的风险

评估系统,具有足够的灵活性,微小调整即可对不同环境下(陆生和水生)的外来种进行评估,未来有望纳入更多的分类群,扩大其适用性。作为一个跨国风险评估工具,GABLIS 还测试了一些规则,未来可能会为欧洲外来种管理的总体战略提供有价值的参考。但是,GABLIS 仅考虑外来种对生物多样性的影响,没有考虑其对社会经济的影响,具有一定的局限性^[36]。

1.2 国内主要外来生物风险评估系统

我国对外来生物风险评估的研究起步较晚,面对入侵种对我国造成的生态、经济和社会等方面的问题,国家急需掌握外来种的入侵风险及管理依据,从源头上严格控制外来种的入侵风险^[3,9]。20 世纪 80 年代,原农业部植物检疫实验所开展了“危险性病虫害杂草的检疫重要性评价”研究,根据不同类群有害生物的特点,按照为害程度、受害作物的经济重要性、分布、传播和扩散的可能性、防止难易程度进行了综合评估,依据评价分数进行检疫重要性评价。此项工作是我国外来生物风险评估工作的首次探索,评估结果为 1986 年和 1992 年及以后制定和修订进境植物危害性有害生物名单及有关检疫措施提供了科学依据^[37-38]。这项工作意味着我国检验检疫领域有害生物风险分析(PRA)工作的开始,对于开展外来种的风险评估具有重要的参考价值。

1.2.1 全国性的入侵风险评估系统

在研究有害生物风险的各个相关因素的基础上,1994 年,蒋青等^[39]基于我国的检疫情况及专家咨询,建立了以生物因子为起点的综合指标评估体系,主要包括 5 方面的内容:国内是否有分布、潜在的危害性、受害作物的经济重要性、移植的可能性、危险性管理的难度,初步确立了我国有害生物危害性评价指标体系;随后,1995 年,蒋青等^[40]运用逻辑关系和数学表达式对各指标体系进行了定量化分析,并确定了各指标的评判标准。梁忆冰等^[41]运用该系统对入境我国的 48 种花卉携带的 400 多种有害生物进行了风险分析,并根据风险值高低进行排序。这对我国后续的风险评估工作起到了积极的作用,但是该评估体系并没有设置各个指标的权重,评估指标之间存在一定的重复,指标体系中生态、社会影响涉及较少。此后,1997 年,范京安和赵学谦^[42]利用模糊数学的方法,在蒋青等^[39-40]的基础上,对各风险指标进行了调整,将风险因子的评判等级分为 5 级,利用层次分析法计算了一级指标和二级指标的权重。

2002 年,李振宇和解焱^[43]基于外来物种的繁殖和扩散、遗传特性、有害特征、适应性特征、物种类型、被控制特点、入侵历史 7 个方面建立了外来物种入侵风险指数评估体系。该系统根据专家对外来种具体情况的判定设定指标分值,每个单项赋值的高低反映了该单项风险程度的高低以及引起入侵可能性的权重大小。该评估系统参考澳大利亚杂草风险评价系统,并结合两位专家的认知构建而成,但是指标设置比较简单,评估对象范围比较大,涉及植物、动物、微生物,设置的指标针对性不强。该系统尽管受限于专家的判断,缺乏生物学实验和指标定量研究,但是为后来的评估系统构建提供了参考。

参照 FAO/IPPC 制定的《有害生物风险分析指南》和《检疫性有害生物风险分析指南》,周国梁等^[44]对以往评估体系中存在的不同层次指标间的相互交叉问题进行了归类和修改,从外来种入境的可能性、定殖扩散的可能性及入侵后果方面构建了有害生物风险评估体系。该系统设置了相对详细的评估标准,并对外来种造成的经济、社会、生态影响设置了指标和评估标准。此外,丁晖等^[19]制定了外来种的风险评估体系,并设置了目标层(外来植物的风险)、准则层(入侵性、适应性、建立种群及扩散的可能性、危害性)、指标层及指标层参数,并提出了指标量化、权重设置、综合模型建立和风险等级划分的方法。

1.2.2 区域性的入侵风险评估系统

随着全国性风险评估研究的深入,区域性、省市级的风险评估系统也逐渐建立,欧健^[45]基于生物入侵过程及各阶段关键特性的分析和归纳,结合厦门市的自然环境、生态系统特点、外来植物入侵现状和经济行业特点,构建了厦门市外来植物入侵风险评估的指标体系。通过设置一组轮换指标,使得该系统包括 2 部分内容:引入型风险评估系统(用于引进种的风险评估)和存在型风险评估系统(用于已分布外来种的风险评估),可以同时满足尚未进入的外来种和已定殖外来种的风险评估。

郑美林和曹伟^[46]通过设置地理分布、传播与繁殖方式、入侵途径、适应性特征、危害性和影响程度 6 个一

级指标,12个二级指标构建了东北地区外来种的风险评估体系。李明丽^[47]基于5个一级指标,27个二级指标构建了江浙沪地区的风险评估体系。此外,以市为单位的风险评估也逐渐开展^[48-51]。同时,针对单个外来入侵种的风险评估研究日渐增多^[52-54]。这些小尺度范围和基于具体外来种的评估是对我国风险评估研究的有益补充,但是存在指标不完善、权重设置主观性强、分级标准有待优化等问题。

2 我国外来植物风险评估研究存在的问题

虽然我国已经有全国性和区域性的外来植物风险评估系统,但都没有广泛应用,主要存在以下问题:

2.1 物种基础信息缺乏

2.1.1 物种信息记录不足

本底资料、表型可塑性等基础信息可以反映外来植物入侵的过程和生态适应性,是构建风险评估系统的重要指标,其信息的可靠性直接关系到评估结果的准确性,但是在我国现有的风险评估系统中,这些基础信息却经常被忽视。中国对外来种入侵信息收集和管理比较滞后,植物检疫名录更新缓慢,本底资料相对匮乏^[55],相关文献和植物志书对其收录不全,《中国植物志》(1959—2004)和《Flora of China》(1994—2013)缺乏外来植物传入时间、传入方式、归化/入侵时间、扩散历史、原产地信息等关键资料,对于潜在入侵种的预警缺乏可靠的信息支持,而这些资料是深入研究外来植物入侵风险评估的重要基础。此外,我国入侵植物的调查不均衡,缺乏全面细致的普查工作,目前大量的研究集中在东部及南部沿海,如上海的外来植物调查是以25平方千米的网格为单元,发现了大量的外来植物新纪录^[51],而西北地区的调查相对薄弱,基础数据及标本数量较少,尤其没有详细的分布记录,阻碍了入侵风险评估工作的开展。

2.1.2 错误鉴定时有发生

物种的准确鉴定是风险评估的第一步,对外来植物的错误鉴定会因对入侵种的疏于防控而导致不良的生态效应。我国外来植物的错误鉴定时有发生,例如,南美天胡荽的学名应为 *Hydrocotyle verticillata*,而不是国内文献普遍记载的 *Hydrocotyle vulgaris*,后者在中国并没有分布,也未见引种栽培,但是由于两者形态相近而相互混淆。另外,反枝苋 *Amaranthus retroflexus* 和绿穗苋 *Amaranthus hybridus* 之间也存在混淆,国内大部分的期刊文献、部分植物图鉴甚至地方植物志都错误的将绿穗苋鉴定为反枝苋。其实,反枝苋在华东及华南地区极少见,而绿穗苋在北至内蒙古、新疆等地均发现有分布,两者也是因为形态特征相近而被错误鉴定^[56]。

2.1.3 表型可塑性未纳入评估体系

外来植物的成功入侵往往伴随着一系列的表型变化,这是外来物种适应异质生境的重要策略,在快速适应入侵地环境过程中起了关键作用^[57]。外来种哪些表型的可塑性更强,从而更有利于成功入侵^[58]? 哪些入侵种借助表型变异快速适应环境,而近缘种却被淘汰? 这些信息的准确程度直接关系到风险评估的客观性,值得我们深入的研究。虽然目前我国已经具有全国范围内的入侵植物调查资料,但是大多是对前人工作的总结,缺乏外来植物的本底资料和表型数据的积累和分析,在设置评估指标时难以对其量化。

在实际的评估过程中,由于基础数据缺乏,关于外来物种某一具体方面的危害或者影响通常会被包含在更高一级的指标中进行评估,从而忽略了真正影响^[59],这是我国风险评估系统构建过程中存在的主要障碍。

2.2 适生区分析不完善

适生区分析是利用物种已知的分布数据和相关环境变量,根据一定的算法来推算物种的生态需求,然后将运算结果投射至不同的空间和时间中来预测物种的实际分布和潜在分布^[60-61],可为物种地理分布区的预测和外来入侵生物的风险分析提供重要的量化分析工具^[62]。对生态学家和入侵种风险管理者而言,获得气候变化下物种范围变化的可靠预测是一项重要的挑战^[63]。1984年,魏淑秋等^[64]建立的“农业气候相似距库”最早应用于检验检疫领域,开展了小麦矮腥黑穗病在中国的适生区研究^[65]。1989年,原农业部植物检疫实验所引进的 CLIMEX 系统对美洲白蛾等进行了适生性研究^[66]。蒋青^[67]通过气候相似比较,结合生态气候下限指标分析出假高粱 *Sorghum halepense* 在世界的可能分布区及在我国的适宜分布区,这是我国首次运用现

代信息技术对外来植物进行的适生区分析。

近年来,随着全球性物种分布数据库的共享及地理信息系统的快速发展,在大尺度上,生态位模型(Ecological Niche Models, ENMS)被广泛用于预测气候变化对全球物种分布的潜在影响^[63]。常见的生态位模型有:MAXENT 最大熵模型^[68]、BIOCLIM 模型^[69]、GARP 遗传算法规则模型、DOMAIN 模型^[70]、CLIMEX 生态气候模型^[71]和 ENFA 生态位因子分析模型等^[72]。

适生区分析是风险评估的重要量化指标,对于风险评估结果的可靠性影响较大。尽管生态位模型越来越多的应用于外来种的适生区分析中,但是很少有将外来种的适生区分析结果作为评估指标纳入评估体系构建的案例。此外,地理分布数据和环境变量是影响模型转移能力的重要因素,但是在实际操作中,构建模型所选用的分布点有时并不能反映外来种的分布范围,且存在采样偏差。选择环境变量时并没有充分考虑其对具体物种的限制作用,从而降低了模型的转移能力,导致分布区预测的范围不准确。

我国对外来种的分布区预测主要是限于单个模型进行分析,缺乏多个模型预测的综合比较分析,而多个模型的综合分析有利于选择最优模型进行准确的预测;同时,我国的适生区分析相关研究主要集中在入侵比较严重的个别种,缺乏属级或者科级下全部外来植物的适生区分析。除目标种外,同属或同科其他外来植物的适生区分析是构建评估系统的重要指标,而忽视这些可能会在将来造成新的生态问题。

我国的适生区相关研究主要集中在气候变化对外来入侵种潜在分布区的影响,极少将人类活动因子纳入外来种分布区预测模型及风险评估体系的研究。然而,人类活动如道路修建、土地开垦等对生境产生较大的干扰,已经大大加速了生物入侵的速率,使许多生物能够到达自然传播无法到达的生境^[6,73-74]。因此,将人类活动作为重要指标纳入生态模型构建是社会经济发展的需求,可以研究外来植物在中国未来的分布格局及高适生区,揭示人类活动对入侵植物的分布格局的影响。

2.3 风险评估体系构建不客观

操作简单、结果可靠的风险评估系统对于保护国家生物安全与构建防控策略至关重要,能够极大的节约外来种管理的经济和时间成本。然而,我国已经建立了多个风险评估系统,但一直没有得到有效的运用,主要存在以下问题:

风险评估系统相关研究大多基于专家判断,主观性较强。我国的风险评估体系构建过程中普遍存在“聚焦偏差”,即过于重视某些与侵犯性相关的先入为主的属性,这些往往来源于具体案例研究或个人经验,而不是反映普遍现象,评估的可重复性和客观性受到一定的限制。

部分风险评估系统适用范围太广,在针对某一具体外来植物开展风险评估时,许多指标并不适用。评估体系所涵盖的物种范围越大,其设计就越难以做到准确和灵活^[21]。我国一些评估系统的评估对象不仅包括植物,还包外来动物及微生物^[75],评估系统中没有专门设立与外来种入侵能力显著相关的指标,指标设置缺乏针对性,在实际操作过程中,评估对象的入侵特征并不能与具体的指标相吻合,导致评估系统不能广泛运用。此外,我国自然地理状况复杂,同一外来种在我国不同地区生态学习性差别较大,而且外来种在我国分布呈现明显的区域分化,因此,我国亟需构建某一生境类型、某一分类等级或某一地区的风险评估系统,实行差别化的风险评估,可以更明确的反映生态系统和分类群的特殊性,使得风险评估准确性更高。

我国的风险评估的研究和实践主要集中在检验检疫领域,评估内容主要针对口岸病虫害和杂草检疫方面。由于外来种入境后存在不确定的“滞后期”,面临的生态环境更加复杂,用于检验检疫系统的评价标准并不具有普遍适用性。此外,此类评估系统主要关注外来种的“入境的可能性”,对外来植物入侵后造成的经济、社会、生态影响的相关内容涉及较少,而对经济或人类健康的影响是入侵风险分析的关键,直接影响人民福祉的提高。

2.4 对新近外来种的关注度不够

中国生物安全的压力不仅来自于已经造成严重危害的种类,还来自于目前尚未造成明显危害的潜在入侵种。在全球生物入侵严峻形势的影响下,我国对入侵植物的认识和警惕有了明显的提高,马金双和李惠茹^[76]

报道我国共有外来入侵植物 239 种,有待观察种(潜在入侵种)多达 225 种,涉及不同的生物型和生态型。除此之外,新的入侵植物不断被报道^[9,77-79],过去 20 年全国范围内归化或入侵植物新纪录超过 60 种^[9,80],这一数字还在持续增加中,部分新近发现的外来植物扩散速度很快,对生态环境及经济发展已经产生明显危害,如假刺苋 *Amaranthus dubius*、鲍氏苋 *Amaranthus powellii* 和白花金纽扣 *Acmella radicans* var. *debilis* 等^[77],这些植物并没有受到广泛关注。目前大多数研究关注互花米草 *Spartina alterniflora*、飞机草 *Chromolaena odorata*、紫茎泽兰 *Ageratina adenophora*、薇甘菊 *Mikania micrantha* 等恶性入侵植物,且主要针对生理生态、危害及防治措施方面的研究,缺乏对于新近外来种的监测及风险分析,相关的入侵风险评估研究十分有限。而对新近外来植物的风险分析是早期风险预警的必要条件,对于保护我国生态安全具有重要意义。

3 建议与对策

3.1 构建外来植物基础信息数据库是风险评估的基础

外来植物基础资料的调查与考证是预防和控制外来植物入侵的基础工作之一,构成了风险评估系统的指标体系。对评估指标量化会使评估体系更加客观,然而定量数据的获得并非易事,需要外来植物大量的基础数据作为支撑。我国外来植物的基础信息严重缺乏,针对这一问题,应尽快开展外来植物基础信息的详细考证及野外调查工作,构建外来植物基础信息数据库,这是深入研究外来植物入侵风险评估的重要基础,更是科学普及与科学管理的基准指南。

外来植物的基础资料不仅包括学名、异名、原产地、入侵分布边界、最早文献记载、模式标本信息、早期标本信息、近缘种信息、报道文献、图像信息、相似种等本底资料,还应包括生物量、生长速率、株高、开花时间、种子千粒重、表型变异等数据。我国入侵植物文献资料严重不足,改革开放以前的资料极少,针对早期入侵时间和地点的考证,应通过查阅大量记录中国植物采集状况的外文文献,尤其是记录中国台湾和香港地区的文献 *A list of plants from formosa*、台湾农家便览、*Flora hongkongensis*、*Flora of Kwangtung and Hongkong* 及 CABI 网站提供的文献目录等获得;针对原产地有异议的入侵种,利用 *Flora of North America*、*Flora of China*、*Flora of Pakistan* 等资料进行综合判断;分布信息通过查阅中国数字植物标本馆(CVH: <http://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本馆平台(NSII: www.nsii.org.cn)等数据平台及国内主要标本馆获得。表型数据的获取应建立在长期野外调查的基础上,设立固定样地,并结合同质园实验统计表型变异数据。

由于大多外来植物具有较高的生态多样性和分类上的复杂性,这使得外来植物的鉴定并非易事,尽管存在这些限制,外来物种数量的迅速增加迫切需对其进行准确的鉴定,这是进一步开展风险分析的基础。然而,外来种尤其是茄属、苋属等表型变异较大,且存在属内杂交,国内已有文献资料并没有对其进行详细记载,对其进行准确鉴定并非易事,针对这一问题,除了查阅最新的分类学成果之外,还需查阅 Tropicos、IPNI、The Plant List 等权威分类学数据库及原产地的分类学文献资料综合分析,并结合分子生物学手段有望解决其分类学问题。

外来种基础资料的积累和搜集是一个长期的过程,但是外来物种数量的迅速增加迫切需要构建包括上述信息在内的本底资料和表型数据的基础信息数据库,使得风险评估有据可依,这有利于加快我国植物检疫名录更新速度,提高外来种的管理水平。Genovesi 和 Shine^[81]认为,在生物多样性丧失或者受到显著降低的威胁时,不应该将缺乏确定性当做推迟采取措施的理由。换言之,基础数据不完善的情况时有发生,数据集永远不会完整,但风险评估不能因为数据不完善而停止,对各类外来入侵种进行风险评估并加强管理势在必行。

3.2 运用生态位模型进行生态风险分析是风险评估的重点

利用生态位模型对外来植物的适生区进行分析是风险评估的重要组成部分。近年来,随着全球性物种分布数据库的共享及地理信息系统的快速发展,生态位模型越来越多的用于预测在当前和未来气候条件下外来入侵植物的潜在分布。

不同的生态模型机理不同,在实际操作和应用中存在显著差异,预测结果往往不同,这就需要对模型的准

准确性和可信度进行评估,避免出现“假阳性”或“假阴性”情况,这是确定模型预测结果可信度的重要环节^[62]。常用的模型评价指标有灵敏度、特异度、Kappa 统计量、AUC 值,其中 AUC 值不受阈值的限制,是一种广泛用于评价预测模型准确率的方法^[82-83]。模型选择时一般是用不同模型对同一物种的潜在分布范围进行模拟,然后根据模型评价指标选择最优模型。目前使用较多是最大熵 MAXENT 模型预测当前和未来气候条件下外来植物的分布范围,该模型主要是通过物种的已知样本分布数据和环境数据找出物种概率分布的最大熵,从而对物种的分布进行估计和预测^[68],即使分布数据较少时也能获得较好的预测结果^[84]。Hernandez 等^[85]对美国加州 18 种动物在 6 个样本量等级下的模型模拟效果进行研究,认为 MAXENT 模型在每个样本量下均能稳定、准确的预测。同样,Wisz 等^[86]针对不同样本规模对物种分布模型性能影响的研究表明:与其他模型相比,MAXENT 模型在所有样本规模下均能很好的预测物种的潜在分布区。

模型的转移能力对于潜在分布区预测的准确性至关重要,而地理分布数据和环境变量选择是影响模型转移能力的重要因素。由于生态位的保守性,构建模型时所选用的物种分布点要尽量反映物种的地理分布范围,同时要降低物种的采样偏差;环境变量的选择要充分考虑其对物种的限制作用、各环境变量之间的空间相关性以及不同地理种群间生态空间是否一致,同时要降低环境变量的空间维度,提高生态模型的转移能力,从而准确模拟物种的分布范围^[61,87]。

此外,高强度的生产和经济活动给外来种的传入和扩散创造了有利条件,应尽快将人类活动强度指标纳入分布区预测模型,研究环境因素和人类活动加剧背景下外来植物在中国未来的分布格局及高适生区,揭示人类活动对入侵植物的分布格局的影响。人类活动数据一般来源于国际地球科学信息网络中心(CIESIN)的人类足迹数据层,由基础设施建设、人类土地利用、人口密度、铁路、公路等 8 个全球数据层生成,能够客观、全面的反应人类活动的强弱及其空间分布状态。

3.3 建立科学的风险评估系统是核心

3.3.1 指标设定和权重设置

一个评估系统的科学性在于是否包括全面、相互独立、与入侵能力显著相关的指标^[88]。入侵风险评估指标不是越多越好,应该建立在全面分析风险产生过程的基础上,选取决定风险产生的关键因素;指标选择不仅要反映整个入侵过程、定义明确、测度方式标准,还应该能够全面反映外来种的入侵特征,避免重叠^[19]。同时,指标应该具有可操作性和可比性,在使用过程中可以根据评估对象的不同进行适当的调整,并不会影响评估体系的整体效能^[19]。小尺度范围内,外来种在局部环境中的生理生态指标对于是否能够成功入侵更为重要^[89],在构建评估体系时应该重点考虑。

构建评估体系需要重点考虑指标权重的设置。评估系统的指标以不同方式加权会影响评估结果和准确性,未来应该探索如何通过设置不同的权重来提高评估的客观性。由于外来植物风险事件的复杂性和模糊性,用精确数学模型设置评价指标的权重难度较大。层次分析法(Analysis Hierarchy Process, AHP)是一种定性和定量相结合的多层次权重分析方法,可以用来确定各指标的主观权重,是评估风险的一种有效办法^[90-91],近年来被广泛用于风险评估,但是,层次分析法在确定权重时主观性较大。熵权法是确定客观权重的方法之一^[92-93],指标的熵值越小,表明指标值的变异程度越大,权重越大^[94]。主客观综合权重法能减少权重设置的主观性,结合两种方法特点,李帅等^[95]采用主客观相结合的方法确定宁夏城市人居环境评价体系的指标权重;刘媛媛等^[94]结合层次分析法和熵权法评估了孟印缅地区的洪水灾害风险。近年来,研制定量化的入侵风险评价系统受到各国的广泛关注,但是,其可行性^[96]、透明度^[97]、指标如何量化^[98]等方面均面临挑战。

3.3.2 构建分类别的入侵风险评估系统

入侵风险评估体系的设计是评估的重点和难点^[19]。我国自然地理状况复杂,气候类型多样,同一外来植物在我国不同地区的生态学习性差别较大。例如凤眼蓝 *Eichhornia crassipes* 在我国长江以南入侵严重,但在东北地区则是温室栽培植物;马缨丹 *Lantana camara* 在我国华南地区已经造成了严重的入侵,但是在华东地区则是观赏花卉;此外,外来植物的入侵特征与传入方式多样,难以用统一的评估体系对外来植物进行评价。

选择某一区域,或选取特殊生态系统如水体生态系统、城市及人工生态系统等,或者选取不同类群如旋花科、苋科开展分类别的风险评估研究,并针对不同评估对象选取合适的评估指标,可以更明确的反映生态系统和分类群的特殊性,有利于获得更准确的评估结果。Tucker 和 Richardson^[29]对南非高山硬叶林的外来植物进行风险评估时,将外来种对硬叶灌木火灾的适应性(外来种的幼年期长度、成株火后存活率、土壤种子库有效持续时间)作为重要的指标进行评估。Olenin 等^[99]开发了欧洲咸水及海水环境的风险评估系统,并在波罗的海进行了测试。张帅等^[88]对我国入侵植物多样性的区域分异研究结果表明,外来入侵植物在我国分布呈现明显的区域分化,应建立具有区域特点的外来植物入侵风险评估系统。综上,我国亟需构建特定区域、特定生态类型或不同类群的风险评估体系,根据评估对象的生物学与生态学特征建立符合实际要求的评估标准,实行差别化的风险评估,为我国入侵植物防控措施的制定提供理论依据。

3.4 加强新近外来植物的管理是风险评估的关键

入侵的早期阶段是管理外来种的最佳时段^[100]。在外来植物入侵的早期(甚至在进入新区域之前)评估外来植物的影响是早期预警的关键,也是有效应对新入侵者的必要条件^[36]。为了防止新的植物入侵,迫切需要构建入侵风险评估及早期预警系统,以确定某一特定物种成为入侵种的可能性^[101-102]。

“风险”是风险评估程序中的重要因素,由未来潜在负面影响的程度和预后的不确定性构成^[103]。尽管近年来进行了大量研究,但是对于外来种尤其是新近外来种未来的影响进行精确的评估仍存在很大困难^[104-105]。德国—奥地利黑名单信息系统(GABLIS)将对生物多样性负面影响尚未充分了解的外来物种列入灰色名录,这得到了《生物多样性公约》(2000)预防原则的支持。我国也进行了一些探索性的工作,马金双和李惠茹^[76]基于野外调查和文献考证,将 225 种外来植物划分为潜在入侵种,这些物种的未来的发展趋势有待进一步的观察。基于事前预防比事后控制成本低得多的原则,对于新近外来种,假阳性(认定为一个外来种是入侵种,尽管它不是)是可以接受的,但假阴性(认定为一个外来种不是入侵种,尽管它是)不能被接受,这与 Mack 等^[104]对外来种坚持“证明清白之前有罪”的原则一致。此外,定期审查评估结果,在获得充分数据的情况下允许物种在不同名录间的迁移。

我国对外来植物的风险评估主要集中在近年来已经造成严重危害的入侵植物,但是,野外调查发现部分新近的外来植物扩散速度很快,更应该提高警惕性,如长芒苋于 1985 年首次在北京丰台区路边发现,目前在我国京津冀部分地区已经形成单优群落。2015 年,白花金纽扣在安徽南部被发现时,种群规模已经较大^[106]。中国归化植物的新纪录在不断增加中,然而这些植物并没有受到广泛关注,相关的入侵风险评估研究十分有限。外来物种数量的迅速增长迫切需要决策工具进行入侵种的管理和植物贸易的规范化,以减少新引进植物的入侵风险。对新近外来植物的忽视可能使其成为下一个恶性入侵种,尤其是在一些大型建设项目中,需要在环境影响评价中增加有关外来种引进和扩散的风险评价内容,确保这些活动引发的外来种入侵风险最小化。

4 展望

面对外来入侵植物造成的严重生态、经济和社会等方面的问题,国家急需外来植物管理的基础依据。对外来种进行风险评估的目的是决定哪些外来种应该列入国家有害杂草清单,并决定哪些新近外来物种应该被优先控制或消除,从而合理的调配资源。我国环境保护部联合中国科学院先后发布了 4 批外来入侵物种名单,为我国外来入侵种的管理提供了依据。然而,这些外来入侵种具体分布于我国哪些地区?未来的扩散趋势如何?哪些地区是重点管理区域?近缘种中是否存在潜在入侵种?如何科学有效的对这些外来种进行防控?这些问题尚需深入研究。

在我国目前已知的外来植物中,超过一半的种类是作为观赏植物、牧草、药用或者食用植物等人为引入的^[80]。这些植物在引种的初期对于经济、观赏、环保等起到过积极作用,但是随着经济的发展、社会需求的改变以及外来种在引入地的适应性变化,这些有意引入的外来种角色发生了很大变化,从能够“解决问题的植

物”变成了“问题植物”,从有益植物变为要花费大量人力和财力来治理的有害植物。为了解决这一问题,不仅需要对外来植物进行引入前的入侵风险评估,以确定该物种是否适合被引入,如果评估为高风险,则禁止引入,这就从源头上消除了入侵的风险;还需要建立外来植物引入后的监测和快速反应体系,制定切实可行的快速反应计划;加强外来种引入后对本土物种和生态系统影响的监测,一旦有爆发或者扩散趋势,迅速采取控制措施。早期发现和快速反应是预防和控制新疫情的关键,这就需要多部门、多行业的分工协作和国际合作交流,将在临近国家或地区造成危害但尚未进入我国的外来种列入警惕名单,并保持与这些国家的入侵信息的交流和沟通。

入侵风险评估报告是风险评估结果的输出形式,基于外来种的风险评估结果,有望形成每个外来种的风险评估报告,包括评估的详细过程、评估指标分值及评估结果讨论等信息,这将是外来植物的完整档案,是对其入侵风险的客观评价,也是对我国外来种入侵风险、预警和管理策略制定的积极探索。此外,绝大多数的风险评估体系在我国法律上不具有约束力,因此评估结果在外来种管理执行中受到限制,未来需要提高评估结果及与入侵相关的环境政策的接受程度。

2017年,国家重点研发计划项目“重大/新发现农业入侵生物的风险评估及防控关键技术研究”立项,这说明风险评估与防控方面的研究已经引起学术界的高度重视。2020年8月,“如何实现农业重大入侵生物的前瞻性风险预警和实时控制?”入选中国科协2020年十大工程技术难题,反映了我国学术界对生物入侵问题的高度重视和广泛共识。目前,我国在入侵生物的传入后的防控方面取得显著进展,但在潜在和新发入侵生物的风险评估及检测预警方面仍存在不少问题,对于已经建群的入侵种如何建立防控的优先级,国内研究还相对薄弱。抵御入侵生物于国门之外,推动生物入侵的防控由被动转为主动,促进我国入侵生物早期预警平台的搭建与检验检测技术的快速发展,是对我国入侵风险管理水平的挑战,对于保障我国生态安全具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Pimentel D, Zuniga R, Morrison D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, 2005, 52(3): 273-288.
- [2] Bellard C, Cassey P, Blackburn T M. Alien species as a driver of recent extinctions. *Biology Letters*, 2016, 12(2): 20150623.
- [3] Bacher S, Blackburn T M, Essl F, Genovesi P, Heikkilä J, Jeschke J M, Jones G, Keller R, Kenis M, Kueffer C, Martinou A F, Nentwig W, Pergl J, Pyšek P, Rabitsch W, Richardson D M, Roy H E, Saul W C, Scalera R, Vilà M, Wilson J R U, Kumschick Sabrina. Socio-economic impact classification of alien taxa (SEICAT). *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 9(1): 159-168.
- [4] Masood E. The battle for the soul of biodiversity. *Nature*, 2018, 560(7719): 423-425.
- [5] 李博, 马克平. 生物入侵: 中国学者面临的转化生态学机遇与挑战. *生物多样性*, 2010, 18(6): 529-532.
- [6] Seebens H, Blackburn T M, Dyer E E, Genovesi P, Hulme P E, Jeschke J M, Pagad S, Pyšek P, Winter M, Arianoutsou M, Bacher S, Blasius B, Brundu G, Capinha C, Celesti-Grapow L, Dawson W, Dullinger S, Fuentes N, Jäger H, Kartesz J, Kenis M, Kreft H, Kühn I, Lenzner B, Liebhold A, Mosena A, Moser D, Nishino M, Pearman D, Pergl J, Rabitsch W, Rojas-Sandoval J, Roques A, Rorke S, Rossinelli S, Roy H E, Scalera R, Schindler S, Štajerová K, Tokarska-Guzik B, Van Kleunen M, Walker K, Weigelt P, Yamanaka T, Essl F. No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 14435.
- [7] Vaz A S, Kueffer C, Kull C A, Richardson D M, Schindler S, Muñoz-Pajares A J, Vicente J R, Martins J, Hui C, Kühn I, Honrado J P. The progress of interdisciplinarity in invasion science. *Ambio*, 2017, 46(4): 428-442.
- [8] 鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 李博. 近十年中国生物入侵研究进展. *生物多样性*, 2012, 20(5): 581-611.
- [9] Yan X L, Wang Z H, Ma J S. *The Checklist of the Naturalized Plants in China*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2019: 1-2, 118-124.
- [10] 许光耀, 李洪远, 莫训强, 孟伟庆. 中国归化植物组成特征及其时空分布格局分析. *植物生态学报*, 2019, 43(7): 601-610.
- [11] Wan F H, Yang N W. Invasion and management of agricultural alien insects in China. *Annual Review of Entomology*, 2016, 61: 77-98.
- [12] Seebens H. Invasion ecology: expanding trade and the dispersal of alien species. *Current Biology*, 2019, 29(4): R120-R122.
- [13] 鞠瑞亭, 李博. 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*, 2012, 20(1): 12-23.
- [14] Lin W, Zhou G F, Cheng X Y, Xu R M. Fast economic development accelerates biological invasions in China. *PLoS One*, 2007, 2(11): e1208.

- [15] Ding J Q, Mack R N, Lu P, Ren M X, Huang H W. China's booming economy is sparking and accelerating biological invasions. *BioScience*, 2008, 58(4): 317-324.
- [16] 蒙彦良, 陈凤新. 贸易视角下中国外来植物的变化及其增长预测. *植物检疫*, 2020, 34(2): 1-8.
- [17] Weber E, Li B. Plant invasions in China: what is to be expected in the wake of economic development? *BioScience*, 2008, 58(5): 437-444.
- [18] Bartz R, Kowarik I. Assessing the environmental impacts of invasive alien plants: a review of assessment approaches. *NeoBiota*, 2019, 43: 69-99.
- [19] 丁晖, 石碧清, 徐海根. 外来物种风险评估指标体系和评估方法. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(2): 92-96.
- [20] Blackburn T M, Essl F, Evans T, Hulme P E, Jeschke J M, Kühn I, Kumschick S, Marková, Mrugała, Nentwig W, Pergl J, Pyšek P, Rabitsch W, Ricciardi A, Richardson D M, Sendek A, Vilà M, Wilson J R U, Winter M, Genovesi P, Bacher S. A unified classification of alien species based on the magnitude of their environmental impacts. *PLoS Biology*, 2014, 12(5): e1001850.
- [21] 赵彩云, 李俊生, 柳晓燕. 中国主要外来入侵物种风险预警与管理. 北京: 中国环境出版社, 2016: 9-9.
- [22] Richardson D M, Pyšek P, Rejmánek M, Barbour M G, Panetta F D, West C J. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 2000, 6(2): 93-107.
- [23] Tollington S, Turbé A, Rabitsch W, Groombridge J J, Scalera R, Essl F, Shwartz A. Making the EU legislation on invasive species a conservation success. *Conservation Letters*, 2017, 10(1): 112-120.
- [24] 杨博. 中国外来陆生草本植物[D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [25] Pheloung P C, Williams P A, Halloy S R. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions. *Journal of Environmental Management*, 1999, 57(4): 239-251.
- [26] 陈良燕, 徐海根. 澳大利亚外来入侵物种管理策略及对我国的借鉴意义. *生物多样性*, 2001, 9(4): 466-471.
- [27] McClay A, Sissons A, Wilson C, Davis S. Evaluation of the Australian weed risk assessment system for the prediction of plant invasiveness in Canada. *Biological Invasions*, 2010, 12(12): 4085-4098.
- [28] Rouget M, Richardson D M, Milton S J, Polakow D. Predicting invasion dynamics of four alien *Pinus* species in a highly fragmented semi-arid shrubland in South Africa. *Plant Ecology*, 2001, 152(1): 79-92.
- [29] Tucker K C, Richardson D M. An expert system for screening potentially invasive alien plants in South African fynbos. *Journal of Environmental Management*, 1995, 44(4): 309-338.
- [30] Richardson D M, Cowling R M, Le Maitre D C. Assessing the risk of invasive success in *Pinus* and *Banksia* in South African mountain fynbos. *Journal of Vegetation Science*, 1990, 1(5): 629-642.
- [31] Richardson D M, Cowling R M. Why is mountain fynbos invulnerable and which species invade? //van Wilgen B W, Richardson D M, Kruger F J, van Hensbergen H J, eds. *Fire in South African Mountain Fynbos: Ecosystem, Community and Species Response at Swartboskloof*. Berlin: Springer-Verlag, 1992: 161-181.
- [32] Richardson D M, Macdonald I A W, Holmes P M, Cowling R M. Plant and animal invasions//Cowling R M, ed. *The Ecology of Fynbos: Nutrients, Fire and Diversity*. Cape Town: Oxford University Press, 1992: 271-308.
- [33] FAO/IPPC. ISPM No. 11 Pest Risk Analysis for Quarantine Pests. Rome: FAO, 2001.
- [34] FAO/IPPC. No. 2. Guidelines for Pest Risk Analysis. Rome: FAO, 1996.
- [35] Weber E, Gut D. Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe. *Journal for Nature Conservation*, 2004, 12(3): 171-179.
- [36] Essl F, Nehring S, Klingenstein F, Milasowszky N, Nowack C, Rabitsch W. Review of risk assessment systems of IAS in Europe and introducing the German-Austrian Black List Information System (GABLIS). *Journal for Nature Conservation*, 2011, 19(6): 339-350.
- [37] 周国梁. 有害生物风险定量评估原理与技术. 北京: 中国农业出版社, 2013: 138-139.
- [38] 梁忆冰. 有害生物风险分析工作回顾. *植物检疫*, 2019, 33(6): 1-5.
- [39] 蒋青, 梁忆冰, 王乃扬, 姚文国. 有害生物危险性评价指标体系的初步确立. *植物检疫*, 1994, 8(6): 331-334.
- [40] 蒋青, 梁忆冰, 王乃扬, 姚文国. 有害生物危险性评价的定量分析方法研究. *植物检疫*, 1995, 9(4): 208-211.
- [41] 梁忆冰, 詹国平, 徐亮, 潘国祈, 王跃进, 赵杰, 王新. 进境花卉有害生物风险初步分析. *植物检疫*, 1999, 13(1): 17-22.
- [42] 范京安, 赵学谦. 农作物外来有害生物风险评估体系与方法研究. *植物检疫*, 1997, 11(2): 75-81.
- [43] 李振宇, 解炎. 中国外来入侵种. 北京: 中国林业出版社, 2002: 43-45.
- [44] 周国梁, 印丽萍, 黄晓藻. 外来生物风险分析指标体系的建立. *植物检疫*, 2006, 20(S1): 14-19.
- [45] 欧健. 厦门外来物种入侵风险评估研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [46] 郑美林, 曹伟. 中国东北地区外来入侵植物的风险评估. *中国科学院大学学报*, 2013, 30(5): 651-656.
- [47] 李明丽. 江浙沪地区外来植物入侵性风险评估系统的构建[D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.
- [48] 彭宗波, 蒋英, 蒋菊生. 海南岛外来植物入侵风险评价指标体系. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2029-2034.

- [49] 冯幼义, 董晓慧, 胡仁勇, 柯倩倩, 丁炳扬. 温州外来入侵植物风险评价体系研究——以黑荆为例. 植物资源与环境学报, 2010, 19(3): 79-84.
- [50] 梁宇轩, 张丹, 汪小飞. 黄山市城区外来入侵植物调查与风险评估研究. 滁州学院学报, 2015, 17(5): 27-31.
- [51] 汪远, 李惠茹, 马金双. 上海外来植物及其入侵等级划分. 植物分类与资源学报, 2015, 37(2): 185-202.
- [52] 魏守辉, 曲哲, 张朝贤, 李咏军, 李香菊. 外来入侵物种三裂叶豚草(*Ambrosia trifida* L.)及其风险分析. 植物保护, 2006, 32(4): 14-19.
- [53] 魏守辉, 张朝贤, 刘延, 黄红娟, 孟庆会, 崔海兰, 李香菊. 外来杂草刺萼龙葵及其风险评估. 中国农学通报, 2007, 23(3): 347-351.
- [54] 林敏, 郝建华. 苏州外来植物入侵风险评估体系及牛膝菊的入侵风险. 生态科学, 2011, 30(5): 507-511.
- [55] 闫小玲, 寿海洋, 马金双. 中国外来入侵植物研究现状及存在的问题. 植物分类与资源学报, 2012, 34(3): 287-313.
- [56] 严靖, 闫小玲, 王樟华, 李惠茹, 马金双. 安徽省外来入侵植物的分布格局及其等级划分. 植物科学学报, 2017, 35(5): 679-690.
- [57] Barrett S C H. Foundations of invasion genetics: the Baker and Stebbins legacy. *Molecular Ecology*, 2015, 24(9): 1927-1941.
- [58] Ehrlich P R. Attributes of invaders and the invading processes: vertebrates//Drake J A, Mooney H A, di Castri F, Groves R H, Kruger F J, Rejmánek M, Williamson M, eds. *Biological Invasions: A Global Perspective*. New York: John Wiley and Sons, 1989: 315-328.
- [59] Downey P O. Managing widespread, alien plant species to ensure biodiversity conservation: a case study using an 11-step planning process. *Invasive Plant Science and Management*, 2010, 3(4): 451-461.
- [60] Soberón J. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1115-1123.
- [61] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [62] 蔡静芸, 张明明, 粟海军, 张海波. 生态位模型在物种生境选择中的应用研究. 经济动物学报, 2014, 18(1): 47-52, 58-58.
- [63] Morin X, Thuiller W. Comparing niche - and process - based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology*, 2009, 90(5): 1301-1313.
- [64] 魏淑秋. 《农业气候相似距库》简介. 北京农业大学学报, 1984, 10(4): 427-428.
- [65] 魏淑秋, 章正, 郑耀水. 应用生物气候相似距对小麦矮化腥黑穗病在我国定殖可能性的研究. 北京农业大学学报, 1995, 21(2): 127-131.
- [66] 林伟. 美国白蛾在中国适生性的初步研究[D]. 北京: 北京农业大学, 1991.
- [67] 蒋青. 应用农业气候相似距分析假高粱在我国的适生范围. 植物检疫, 1994, 8(5): 257-262.
- [68] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning. Banff, Alberta, Canada: ACM, 2004: 83.
- [69] Nix H A. A biogeographic analysis of Australian elapid snakes//Longmore R, ed. *Atlas of Elapid Snakes of Australia*. Australian Flora and Fauna (Series Number7). Canberra: Australian Government Publishing Service, 1986: 415.
- [70] Carpenter G, Gillison A N, Winter J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity & Conservation*, 1993, 2(6): 667-680.
- [71] Maywald G F, Sutherst R W. User's guide to CLIMEX: A Computer Program for Comparing Climates in Ecology. Canberra: CSIRO Division of Entomology, 1985: 1-28.
- [72] Hirzel A H, Hausser J, Chessel D, Perrin N. Ecological - niche factor analysis: how to compute habitat - suitability maps without absence data? *Ecology*, 2002, 83(7): 2027-2036.
- [73] 李博, 陈家宽. 生物入侵生态学: 成就与挑战. 世界科技研究与发展, 2002, 24(2): 26-36.
- [74] Chapman D, Purse B V, Roy H E, Bullock J M. Global trade networks determine the distribution of invasive non-native species. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(8): 907-917.
- [75] 张川红, 郑勇奇. 外来树种对自然生态系统入侵风险评价指标体系. 林业科学, 2008, 44(10): 88-93.
- [76] 马金双, 李惠茹. 中国外来入侵植物名录. 北京: 高等教育出版社, 2018: 1-299.
- [77] 李惠茹, 汪远, 闫小玲, 王樟华, 严靖, 马金双. 上海植物区系新资料. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2017, (1): 132-138.
- [78] 严靖, 汪远, 马金双. 中国2种归化植物新记录. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(5): 541-544.
- [79] 徐哈, 李振宇. 中国苋科苋属新记录种——鲍氏苋和布氏苋. 广西植物, 2019, 39(10): 1416-1419.
- [80] 严靖, 闫小玲, 李惠茹, 马金双. 华东地区归化植物的组成特征、引入时间及时空分布. 生物多样性, 2021, 29(4): 428-438.
- [81] Genovesi P, Shine C. *European Strategy on Invasive Alien Species; Convention on the Conservation of European Wildlife and Habitats*. Strasbourg: Council of Europe, 2004: 60.
- [82] Manel S, Williams H C, Ormerod S J. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of applied Ecology*, 2001, 38(5): 921-931.
- [83] Metz C E. Basic principles of ROC analysis. *Seminars in Nuclear Medicine*, 1978, 8(4): 283-298.
- [84] van Proosdij A S J, Sosef M S M, Wieringa J J, Raes N. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution

- models. *Ecography*, 2016, 39(6): 542-552.
- [85] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, Albert D L. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 2006, 29(5): 773-785.
- [86] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, Peterson A T, Graham C H, Guisan A, NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [87] Araújo M B, Peterson A T. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 2012, 93(7): 1527-1539.
- [88] 张帅, 郭水良, 管铭, 印丽萍, 张若轩. 我国入侵植物多样性的区域分异及其影响因素——以 74 个地区数据为基础. *生态学报*, 2010, 30(16): 4241-4256.
- [89] Frappier B, Eckert R T. Utilizing the USDA PLANTS database to predict exotic woody plant invasiveness in New Hampshire. *Forest Ecology and Management*, 2003, 185(1/2): 207-215.
- [90] Dyer J S. Remarks on the analytic hierarchy process. *Management Science*, 1990, 36(3): 249-258.
- [91] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1): 83-98.
- [92] Chen T, Jin Y Y, Qiu X P, Chen X. A hybrid fuzzy evaluation method for safety assessment of food-waste feed based on entropy and the analytic hierarchy process methods. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(16): 7328-7337.
- [93] Wang T, Chen J S, Wang T, Wang S. Entropy weight-set pair analysis based on tracer techniques for dam leakage investigation. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 747-767.
- [94] 刘媛媛, 王绍强, 王小博, 江东, Ravindranath N H, Rahman A, Htwe N M, Vijiapan T. 基于 AHP 熵权法的孟印缅地区洪水灾害风险评估. *地理研究*, 2020, 39(8): 1892-1906.
- [95] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 顾艳文, 李昌晓. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2700-2708.
- [96] Tanner R, Branquart E, Brundu G, Buholzer S, Chapman D, Ehret P, Fried G, Starfinger U, van Valkenburg J. The prioritisation of a short list of alien plants for risk analysis within the framework of the Regulation (EU) No. 1143/2014. *NeoBiota*, 2017, 35: 87-118.
- [97] Vanderhoeven S, Branquart E, Casar J, D'hondt B, Hulme P E, Shwartz A, Strubbe D, Turb e A, Verreycken H, Adriaens T. Beyond protocols: improving the reliability of expert-based risk analysis underpinning invasive species policies. *Biological Invasions*, 2017, 19(9): 2507-2517.
- [98] Kumschick S, Gaertner M, Vilà M, Essl F, Jeschke J M, Pyšek P, Ricciardi A, Bacher S, Blackburn T M, Dick J T A, Evans T, Hulme P E, Kühn I, Mrugała A, Pergl J, Rabitsch W, Richardson D M, Sendek A, Winter M. Ecological impacts of alien species: quantification, scope, caveats, and recommendations. *BioScience*, 2015, 65(1): 55-63.
- [99] Olenin S, Minchin D, Daunys D. Assessment of biopollution in aquatic ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(7/9): 379-394.
- [100] Shirley S M, Kark S. Amassing efforts against alien invasive species in Europe. *PLoS Biology*, 2006, 4(8): e279.
- [101] Panetta F D, Scanlan J C. Human involvement in the spread of noxious weeds: what plants should be declared and when should control be enforced? *Plant Protection Quarterly*, 1995, 10(2): 69-74.
- [102] Andow D A. Pathways-based risk assessment of exotic species invasions//Ruiz G M, Carlton J T, eds. *Invasive Species: Vectors and Management Strategies*. Washington: Island Press, 2003: 439-455.
- [103] Kowarik I, Heink U, Starfinger U. How to assess non-indigenous species? A risk assessment procedure for secondary releases of alien plants. *BMVEL-Schriftenreihe Angewandte Wissenschaft*. 2003, 498: 131-144
- [104] Mack R N, Simberloff D, Lonsdale W M, Evans H, Clout M, Bazzaz F A. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, 2000, 10(3): 689-710.
- [105] Pyšek P, Richardson D M. Traits associated with invasiveness in Alien Plants: where do we stand? //Nentwig W, ed. *Biological Invasions*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 97-125.
- [106] Wang Z H, Yan J, Yan X L, Li H R, Ma J S. *Acmella radicans* var. *debilis* (Kunth) R.K. Jansen (Asteraceae), a newly naturalized plant in China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2015, 23(6): 643-646.