

外来生物入侵防控体系建设研究

李欣迪¹, 刘刚^{1*}, 杨毅哲², 陈丽丽², 王伟峰³, 刘广振³, 宋兴江¹, 陈瑜¹, 王佳¹,
张献瑞¹, 史岩¹, 安玉霞¹, 杜星瑶¹, 吴明泽¹

¹陕西师范大学生命科学学院, 陕西 西安 710119; ²陕西省耕地质量与农业环境保护工作站,
陕西 西安 710003; ³陕西省自然保护区与野生动植物管理站, 陕西 西安 710082

摘要: 近年来随着我国经济的持续快速发展和进出口贸易量的增加, 外来物种的引入和入侵的风险持续升高, 外来入侵生物已对我国的自然生态系统、经济和社会发展造成了严重危害。如何建立一套完善的外来入侵生物防控体系是摆在相关从业者面前的一个重大研究命题。本研究系统梳理和分析了近年来国内外外来生物入侵现状以及防控措施, 讨论了外来生物入侵防控体系功能特点, 建议应从如下方面着手建设外来入侵生物防控体系: 建立外来入侵生物防控工作协调机制, 完善相关法律法规, 及时建立、完善外来入侵生物数据库, 建立外来入侵生物安全性风险评估和预警体系, 加强海关检验检疫体系建设以及科学研究体系建设, 借助大数据开展智能监测与绿色防控, 并大力开展大众自然教育, 提高全民对外来生物入侵危害的认识和防范意识, 群策群防, 提高防控和治理效率。通过以上建议以期能为我国生物入侵及其相关行业的发展和管理提供参考依据, 早日建立并完善以政府为主导的一套外来生物入侵防控体系, 将外来入侵生物带来的危害降到最低。

关键词: 生物入侵; 入侵风险; 入侵防控; 人为活动; 生态安全



开放科学标识码
(OSID 码)

Construction of an invasive species prevention and control system

LI Xindi¹, LIU Gang^{1*}, YANG Yizhe², CHEN Lili², WANG Weifeng³, LIU Guangzhen³, SONG Xingjiang¹,
CHEN Yu¹, WANG Jia¹, ZHANG Xianrui¹, SHI Yan¹, AN Yuxia¹, DU Xingyao¹, WU Mingze¹

¹College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China; ²Farmland Quality and
Agricultural Environment Protection Workstation of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710003, China;
³Nature Reserve and Wildlife Management Station of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710082, China

Abstract: In recent years, the continuous and rapid development of China's economy, coupled with an escalating volume of import and export trade, has significantly increased the risk of introducing and spreading invasive alien species. The invasion of alien species has inflicted severe damage on China's natural ecosystems, economy, and society. However, establishing a sophisticated system for the prevention and control of invasive alien species remains a paramount research imperative. This study systematically reviews and synthesizes domestic and international experiences in the prevention and control of invasive alien species, proposing the following key aspects for the construction of a comprehensive invasive alien species prevention and control system: establishment of a coordinated mechanism for invasive species prevention and control, refinement of pertinent laws and regulations, timely creation and enhancement of an invasive alien species database, development of a safety risk assessment and early warning system, reinforcement of customs inspection and quarantine systems, substantial investment in scientific research, and promotion of public education on natural ecology. By fostering a collective and vigilant approach, this system aims to heighten awareness and implement preventive measures against the hazards posed by invasive species. This study systematically examined and analyzed the forms of invasive alien species and the corresponding preventive measures implemented both domestically and internationally in recent years. The study discus-

收稿日期(Received): 2023-09-12 接受日期(Accepted): 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32271584); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JM-286); 陕西省哲学社会科学专项(2022HZ1795); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(GK202103072, 202210718052, 2023GAXS14); 陕西省科协决策咨询课题、西安市科协决策咨询课题(202113)

作者简介: 李欣迪, 男, 硕士研究生。研究方向: 外来入侵植物研究。E-mail: 2107384269@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 刘刚, E-mail: 2003liugang@163.com

ses the functional characteristics of invasive alien species prevention and control systems and provides recommendations for their development and construction. The objective was to serve as a reference for the advancement and management of China's biological invasion and related industries, with the ultimate goal of establishing and refining a government-led invasive alien species prevention and control system to minimize the harm caused by foreign invasive organisms.

Key words: biological invasion; invasion risk; invasion prevention and control; human activity; ecological security

随着各国进出口贸易量的持续增加和世界范围旅游业的快速发展,外来生物入侵问题日益凸显,这引起了包括我国在内的世界各国对外来生物入侵的广泛关注。外来入侵生物会对农业生产、社会经济、人类健康、生物多样性与生态安全造成极大的负面影响。

截至2020年,我国已发现660多种外来入侵生物,其中有219种入侵到了国家级自然保护区(中华人民共和国生态环境部,2021),包括动物(57种)、植物(461种)、昆虫(93种)、真菌(20种)、细菌(11种)、病毒(12种)、线虫(8种)和藻类(9种)(周明华等,2023)。早在2009年就有报道,外来入侵生物每年给我国造成的经济损失已超2000亿元(马玉忠,2009),我国已成为受入侵生物危害最严重的国家之一。例如,反枝苋 *Amaranthus retroflexus* L. 会抑制玉米 *Zea mays* L.、大豆 *Glycine max* (Linn.) Merr. 和小麦 *Triticum aestivum* L. 等作物的生长(鲁萍等,2010),通过竞争显著降低玉米的叶面积指数(姜佰文等,2018);我国每年仅用于人工打捞凤眼莲 *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solme 的费用就高达1亿元,化学防治的费用也高达数千万元(中华人民共和国农业农村部,2014);近年来新闻报道的食人鲳(又名食人鱼、水虎鱼,是南美洲河流内一类杂食性淡水鱼的统称,属锯脂鲤科 *Serrasalminidae*)、鳄雀鳝 *Atractosteus spatula* L. 已经危害到了人类的生命健康与安全;入侵植物加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L. 严重威胁入侵地的生态环境和生物多样性(杨韶松等,2022)。

2021年4月15日,我国正式施行《中华人民共和国生物安全法》。其中,防范外来生物入侵被列为保障国家生物安全的重要内容之一。该法的颁布与实施正凸显了构建外来生物入侵防治体系以防范日益增高的外来物种入侵风险的迫切性。

尽管全球开展了大量关于外来入侵生物治理的研究,但目前效果仍然欠佳。由于外来入侵生物的生长发育繁殖等生物学特性和生态适应性有别于大多数本地物种,导致针对其入侵扩散的治理难

度极大,且往往耗时耗力,开展相关治理的时间成本和经济成本较高。从当前现状看,针对外来生物入侵尚未形成一个完善的管理体系,导致各地的入侵生物相关信息不互通,各自为政,治理效率低下,利益关系复杂化,管理难度大,不能在入侵生物扩散的早期阶段及时发现并进行管控。因此,为了推动未来的研究,结合目前我国外来生物入侵现状,以及国内外的研究成果,针对外来物种的大量入侵与扩散,有必要建立一套完善的外来入侵生物防控体系。本文还总结了国内外常用的外来入侵生物治理措施,认为在未来,外来入侵生物的资源化利用可能是有效降低其危害的一个发展方向。

1 外来生物入侵防控体系

1.1 政府建立外来入侵植物防控工作协调机制

(1) 政府建立外来入侵植物防控工作协调机制,依据国家有关方针政策,组织协调、加速高效推进全国各省及辖下各区县的外来入侵植物防控相关工作部署,对多部门提出的规定进行整合与衔接,尽量能做到各管理部门能够及时交换信息,保证法条的可实施性。

(2) 外来入侵植物防控工作协调机制由政府卫生健康、农业农村、科学技术等主管部门组成,分析判断外来植物入侵形势,组织协调、督促推进外来入侵植物防控相关工作。工作协调机制设立专门负责小组,负责外来入侵植物防控工作协调机制的日常工作运转。

(3) 外来入侵植物防控工作根据职责分工,协调有关责任单位和其他有关部门负责防控相关工作,结合防御保护、风险评估、公众参与、明确责任等多个方面,通过全面防控重大危害入侵物种的扩散,才能使得外来物种入侵风险得到全面控制。

1.2 规章制度的完善与实施

我国尚无统一的专门针对防控生物入侵相关的法律法规体系。《中华人民共和国生物安全法》中已明确提出加强防范和应对外来物种入侵,保护生物多样性。另外,我国农业农村部、自然资源部、

生态环境部、海关总署、国家林草局于 2021 年 2 月份联合发布了“关于印发进一步加强外来入侵防控工作方案的通知”。这些法规和工作方案的出台为外来入侵生物的治理提供了指引。目前全国多个省份均已制订了有关外来物种的规章制度。如,云南省发布了全国首个省级外来入侵生物名录(孙志凡,2018);2010 年《武汉市湿地自然保护区条例》明确规定禁止非法引入外来物种;2011 年全国第一部外来物种管理地方性法规——《湖南省外来物种管理条例》正式颁布,该条例加强了对外来物种的管理、监测和防治(肖顺勇等,2014);福建省厦门市、龙岩市皆制定了关于环境保护的管理条例,其中均对外来物种的管理以及对外来物种的非法引入行为作出了明确规定(苏芸芳,2021);安徽省淮南市以及河南省太康县政府均有印发农业重大有害生物及外来物种突发事件预案;贵州省于 2016 年印发《贵州省林业外来有害生物防控建设规划(2016—2020 年)》。目前仍有一些省份尚未出台关于外来物种防控的地方性法规。为使外来生物防控体系建设得到系统的法律制度保障,应根据《中华人民共和国生物安全法》加强对外来入侵生物法律法规、行政管理和执法监督三大体系建设。同时,对于不同地区的外来生物管理法规,应该有重点的针对当地情况制定地方标准。

1.3 建立外来物种数据库

外来入侵生物数据库系统包括省级外来入侵种数据库、省级口岸截获数据库、省级外来有害物种数据库。

(1) 省级外来入侵种名录数据库:包括物种学名与拉丁名、类别、原产地、省内分布区、传入途径、入侵历史、生物学特性、危害情况、传播途径、插图、参考文献代码等。

(2) 省级口岸截获数据库:包括物种学名与拉丁名、来源、截获时间、携带方式、检疫方法、图片等。

(3) 省级重大危害外来物种数据库:根据国家环保总局先后于 2003、2010、2014、2016 年公布的 4 批中国外来入侵生物名单和省份的实际情况建立省级重大危害外来物种数据库。本数据库可分为重点物种治理和重点物种预防 2 个部分,治理部分包括在当地已造成重大危害的外来种;预防部分包括在我国其他地区造成重大危害但是在当地并未大规模暴发的外来种。例如,加拿大一枝黄花已

给江浙地区造成了巨大的损失,但在陕西省只有零星分布并未造成重大危害,但是这类恶性入侵植物在未来可能会在陕西省显现出其危害性(刘刚,2022)。因此,加拿大一枝黄花应列入陕西省重大危害外来物种数据库的重点物种预防版块。

我国农业部门已经组织各省开展了多年的外来入侵生物调查,建立中国外来入侵生物数据库。海南省已于 2016 年设计开发“检疫性有害生物信息数据库”和“海南外来有害生物数字标本馆”2 个数据子库(蔡波等,2016)。各地在响应上级相应对策对全省外来物种(尤其是外来动植物)进行摸排排查时,应注意建立本省外来入侵生物数据库,确保本省外来物种数据的可靠性与及时性。

外来物种数据库的建立为从事外来入侵生物研究的科研机构 and 职能部门提供科研成果交流及科研数据支撑,这将提高并加深对外来入侵生物的全方位把控能力与研究。外来物种数据库需要相关部门的专人负责,定期更新,确保数据的及时性。

1.4 建立外来入侵生物安全性风险评估体系

风险评估是预测生物入侵的风险,以便人类根据自身能够接受的风险水平提出预防和控制生物入侵的措施,从而达到早期预警的目的。生物入侵早期预警是指在针对潜在入侵、新入侵及已入侵但局部分布的入侵种进行一系列评估与综合分析的基础上,预测其发生危害的可能性、发生危害的范围和程度,并根据分析结果制订可行的控制预案,其最终目的是规避外来入侵种可能产生的风险。对外来物种的风险性分析主要包括定性分析和定量分析。定性分析主要包括在当地的分布区、潜在危害性、寄主重要性、传播扩散力、管理难度分析等。1998 年,美国农业部的专家使用 @ RISK 软件完成了“中华人民共和国进口美国含有矮腥黑粉菌冬孢子的磨粉用小麦的风险分析”,结果显示中国仅 3.8% 的冬麦区(新疆、甘肃和一些其他地区)可能发病,仅 1.3% 的冬麦区可导致减产;在我国,基于 @ RISK 已分别对橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel) 和番石榴果实蝇 *Bactrocera (Bactrocerac) correcta* (Bezzi) 随进口水果传入我国的可能性进行了评估。结果显示,在对进境水果不实施植物检疫措施的情况下,其传入概率为 0.1049,采取检疫措施后传入的可能性明显降低(万方浩等,2015)。另外,席曼姝等(2022)基于 @ RISK 还对番茄潜叶蛾

Tuta absoluta (Meyrick) 对我国番茄产业造成的经济损失进行了评估。此外,国内外利用最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(GIS)等手段,对一些外来入侵生物的全局适生区进行预测,研究其生态位变化,例如粗毛牛膝菊 *Galinsoga quadriradiata* Ruiz et Pav. (Zhang et al., 2021) 等,提前对其潜在分布区进行监控,做好预防手段采取措施防止其扩散和蔓延。在入侵动物研究方面,研究者对一些外来有害生物动物,如枣实蝇 *Carpomya vesuviana* Costa (阎雄飞等, 2012)、甘薯小象甲 *Cylas formicarius* Fabricius (高鹏等, 2020)、橘小实蝇(张彬等, 2008)、双条杉天牛 *Semanotus bifasciatus* (Motschulsky) (阎雄飞等, 2020)、福寿螺 *Pomacea canaliculate* (Lamarck) (杨叶欣等, 2010) 等的危害风险性进行评估并做出了相应的防控策略。以上均为针对部分外来生物的零散研究,从全国或者省域范围来看,目前尚未形成系统的风险评估体系,亟待建立一套科学的外来生物风险性评估标准。

1.5 构建监测预警网络

生物入侵是一个动态过程,大部分外来物种在大规模暴发并造成危害之前,会在引入地经历相当长的潜伏期,称为时滞阶段(lag phase)。在时滞阶段,外来种通常不会表现出明显的入侵性和危害性,但其一旦顺利渡过时滞阶段,且种群规模增殖到足够大、繁殖和扩散效率达到足够高的水平,并对本地生态系统表现出明显的危害性时,该外来种的入侵便会变得难以防控(刘刚, 2022)。因此,在外来物种大规模暴发之前,对其进行监控并构建完整的外来物种监测预警网络可极大提升防控水平,降低危害。

研究人员通过对互花米草 *Spartina alterniflora* Loise. 在 1990—2015 年的分布区进行监测,发现各省区互花米草的分布地区差异明显,为各省防控互花米草提供了科学依据(刘明月, 2018)。对林业外来有害生物进行监测可极大降低林木受灾的可能性。如,宁夏回族自治区彭阳县设置林业有害生物监测调查标准地 1243 个,实现了对中华鼯鼠 *Eospalax fontanierii* (Milne-Edwards)、沙棘木蠹蛾 *Holcocerus hippophaecolus* Hua, Chou, Fang et Chen、光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky)、臭椿沟眶象 *Eucryptorrhynchus brandti* (Harold)、松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Bubrer)

Nickle 5 个监测对象的全部监测,在各乡镇重点林区、绿地设置美国白蛾 *Hyphantria cunea* (Drury)、沙棘木蠹蛾、松褐天牛 *Monochamus alternatus* Hope、红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* LeConte、苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* L. 等诱捕器 3564 个,实际完成监测面积 1577.3 km², 监测覆盖率达 98.8%, 有效降低了森林病虫害的发生率(杨伟, 2021)。在农业生态系统中,利用灯诱监测、雷达监测、田间调查及卵巢解剖等方法应对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), 起到了较好的监测效果,为虫情监测提供了重要信息(丁奎婷等, 2023)。

1.6 海关检验检疫体系建设

随着我国对外贸易及旅游业的快速发展,外来物种随进出口货物以及人为携带入境的风险越来越高。2021 年,全国海关截获有害生物 59.08 万种次、检疫性有害生物 6.51 万种次(常钦等, 2022); 2024 年第一季度,昆明海关截获有害生物 135 种 711 次,其中有害生物种类同比增长 21%(中华人民共和国海关总署, 2024)。以陕西省为例,虽然其地处内陆,但作为“一带一路”重要节点,与国外愈加频繁的直接或者间接的交流增加了外来植物入侵风险(宋兴江等, 2021),近年来相关部门多次在进境的物品中截获外来生物。2016 年,陕西检疫部门从咸阳国际机场入境旅客携带的水果中截获世界危险性检疫害虫——苹果小吉丁虫 3 批次(阎雄飞等, 2017)。截至 2017 年 12 月底,西安粮食口岸在 3 批进境小麦中共检出有害生物 25 种,包括杂草 17 种,病原真菌 7 种,害虫 1 种(梁靛等, 2018)。

加强海关检验检疫体系建设需要各省市部门之间相互协调,要与其他各省市监察部门加强合作,共同监督。利用全国联网系统对通过审批的物种进行备案,便于与其他省市及时联系,对于由本省入境且已经备案的外来物种要定期派专人检查,由于某些物种需要经过很长时间才能入侵成功,在入境后的短时间内并不容易被发现,所以需要每次检测做好详细记录,加强早期监控。此外,检疫技术与方式要与时俱进,不断学习,及时更新。

1.7 科学研究体系建设

建立外来入侵生物防控联动协调机制和外来物种入侵防控专家委员会,涉及各省级农业厅、自然资源厅、生态环境厅、出入境检验检疫局、林业局、教育局、科技厅、财政厅等部门。加强外来物种

入侵的防控政策咨询和技术支撑。进一步落实相关地区外来入侵生物的治理,各县、市级人民政府要加强组织带头作用,完善关于防范外来入侵生物的政策,增加经费支持,加强防控措施的落实。

成立外来入侵生物的防治技术攻关小组,研发对本省有严重危害性的入侵物种的应急处置方法,制定统一的调查监测及防控技术标准,确定适生性风险区域,建立危险与潜在入侵物种的检测与监测技术方法,为外来入侵生物的防控提供技术保障。

1.8 开展大众自然教育,提高全民防范意识

(1)通过多种形式向民众讲解有关外来入侵生物的危害和预防知识,提高广大民众对外来物种入侵危害的知识和自觉意识,群策群防,杜绝随意放生或引种未经入侵风险评估的外来生物。

(2)外来物种在农林业以及渔业最为常见,相关部门需定期组织农牧民及从事渔业海产等相关行业的人员学习,更新知识储备。

(3)加大外来物种入侵危害的宣传,张贴新入侵物种的知识海报,严格管控市场,防止个人为了经济利益私自携带幼体外来物种。

(4)大力发展和建设省级公园和自然馆,有条件的情况下可在馆内专门设置“外来物种生物馆”,对外免费开放,招募具有相关知识背景的爱好者通过培训后定期进行义务讲解,让更多的参观者了解物种入侵;馆内可播放关于入侵物种的影片以及设置标本介绍。在各级中小学的自然科学课上增加相关内容课时,加入外来生物入侵的介绍,说明危险物种的危害,提高自身保护意识,在外出旅游时不随意触摸不明动植物,不携带外来生物入境。

1.9 外来生物入侵防控体系

生物入侵防控的最终目标是“防止入侵、阻止扩散、抑制危害”(赵燕等,2022),因此需要建立一个体系来协调不同的部门或人员实现目标。外来生物入侵防控体系应当是一个完整的、科学的、行之有效的体系,应该包括“建立数据库、政府协调、早期预警、分级防控、合理利用”等部分。

利用无人机遥感、卫星照片等技术手段观测外来入侵生物的分布区域,利用生态位模型等手段预测外来入侵生物的潜在分布区(张哲等,2011)。根据物种不同入侵程度设置高、中、低风险等级,针对外来入侵生物入侵时间长、扩散面积大的高风险区域,组织相关人员通过铲除、刈割、火烧等物理手段

清除,同时采取除草剂、杀虫剂等化学手段;在清除入侵植物后,在原地种植竞争力较强的本地植物,使其成为优势种占据生态位(高尚宾等,2017;王在凌等,2020)。对于入侵动物,在实施人工治理措施之后引入本地的天敌生物,继续清除难以发现的入侵动物。对于外来入侵生物的潜在适生区同样分为高、中、低度适生区,针对高度适生区进行重点监测,在发现外来入侵生物时立即在体系中发出预警,提醒调查人员进行实地踏查,采取治理措施。

外来入侵生物对农业生产、社会经济、人类健康、生物多样性与生态安全等方面带来严重危害,但一些外来入侵生物在某些方面具有积极意义。如互花米草能保滩护岸、促淤造陆等(赵燕等,2022);紫茎泽兰用作动物饲料(王德艳等,2017);很多外来入侵生物的某些成分含量高,应用在食品、医药等领域能降低成本,发挥重要经济价值。因此,针对一些已在我国长时间、大范围入侵的外来入侵生物,在治理的同时进行合理的资源化利用,一方面能够在一定程度上发动群众或企业,自发参与到外来入侵生物的治理工作中,另一方面对其资源化利用产生的经济价值,能够降低其带来的危害和损失。所以外来入侵生物的资源化利用,其实也是一种治理措施。结合外来生物入侵防控体系,在踏查人员发现大面积的外来入侵生物时,在体系中发出预警、并派遣人员前往治理的同时,将信息共享给有能力利用该物种的个人或组织,评估资源化利用的方法和成本,并采取行动。

21世纪以来,以互联网为标志的现代信息技术一路高歌猛进,全球各国的联系日益紧密,外来生物传播并形成入侵的几率大大增加。随着智能手机和平板电脑等移动设备的广泛普及,以及深度学习技术在图像识别领域的显著进步,基于互联网、物联网开发的生物自动识别技术已被应用于识别和分类外来入侵生物。通过移动设备的便携性、易用性以及强大的图像处理能力,用户可以在任何时间和地点拍摄可疑物种的照片并上传,应用程序能够利用深度学习模型进行分析,几乎实时提供物种鉴定结果。这不仅为科研人员提供了一种快速鉴定入侵物种的手段,也极大方便了公众参与到生物多样性保护的行动中。另外,程序还可以将用户上传的物种发生分布信息进行分析,发掘信息之间的关联关系(吴鸿飞,2023)。例如,一款名为“红火蚁

云采集”的程序,在开展红火蚁 *Solenopsis invicta* Burren 监测普查、防控扑杀、防控反馈等工作中发挥了重要作用(宋侦东等,2022;管云等,2023)。因此,若能建立一套科学的、行之有效的体系,可极大提升我国应对外来生物入侵的能力,降低其带来的危害和损失,能在第一时间发现有害外来生物,上传数据库,协调各部门对该物种做出预警,并提出治理方法,在第一时间做出应对。

2 外来入侵生物的治理方法与措施

针对已经入侵成功的外来入侵种,应及时地、因地制宜地采取合理措施(如生态防治等)开展治理,以尽可能减少其带来的生态和经济损失。现在国内外最常用的外来物种防治措施主要有手工和机械治理、物理治理、化学治理、生物防治、生态治理、遗传控制、综合治理等。

2.1 人工和机械治理

人工和机械治理适宜于那些引入不久、种群处于建立或停滞期,还没有形成大面积入侵的物种。在我国人工和机械治理具有悠久的历史,比如,上海市对崇明东滩的互花米草进行刈割,治理成果显著(鞠瑞亭等,2012)。

2.2 物理治理

物理治理是借助各种物理因子(光、色、声、温湿度等)对有害生物的生长、发育、繁殖等过程进行干扰。比如,通过翻耕、覆盖遮荫、火烧、碎根、淹水、刈割等方法对互花米草进行物理去除(谢宝华和韩广轩,2018);火力防治对某些入侵种起到有效的控制作用,但根据不同的物种生物学特性,火作用的时间、频度、强度都不同,且消耗大量有机物,需谨慎应用。也可以通过一些物理手段影响入侵植物花期昆虫的授粉过程。例如,在河流内设置栅栏可以防止凤眼莲漂移,起到一定的控制效果(钟超等,2023);采用火烧处理遭松材线虫入侵危害的林木(叶建仁,2019)等。

2.3 化学治理

化学治理是指使用化学药剂来防治病虫害,是植物保护最常用的方法,也是入侵种综合治理中的一项重要措施。化学防除见效快且使用方便,相对物理防治更易于大面积推广。然而,在采用化学手段防除入侵植物时,往往容易杀灭许多本地植物,对当地环境以及人类健康造成危害,甚至会产生抗药性,因此必须合理适度地使用化学防除剂

(强胜等,2010)。例如,高效氟吡甲禾灵、氟氰草酯和草甘膦能抑制互花米草的有性繁殖能力(乔沛阳等,2019)。

2.4 生物防治

生物治理是以一种或一类生物抑制另一种或另一类生物的方法。2015年起,徐州市开始建立生物防治示范区,释放美国白蛾天敌白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang。白蛾周氏啮小蜂会追踪并寄生在美国白蛾的蛹中。目前,上海、大连、青岛、烟台等几个疫点的美国白蛾通过生物防治已经得到了较好控制(杨忠岐和张永安,2007),在山东、辽宁进行的大规模人工繁殖和防治推广中也取得了较好的效果(郑雅楠等,2012)。如,利用链格孢菌 *Alternaria alternata* (Fr.) Keissler 防治紫茎泽兰(李丽萍等,2008);玉黍螺 *Littoraria irrorata* Say.、麦角菌 *Ciavieps purpurea* (Fr.) Tul.和稻飞虱 *Prokelisia marginata* (Van Duzee) 可用来进行互花米草的生物防治(谢宝华和韩广轩,2018);利用豚草条纹叶甲 *Ophraella communa* LeSage 和豚草卷蛾 *Epiblema strenuana* (Walker) 治理豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L.(孙燕等,2017)。因为植物之间的化感作用非常普遍,利用本地物种的次生代谢物抑制外来入侵植物的萌发和生长,也是治理外来物种的有效方法。研究表明,从番薯 *Ipomoea batatas* (L.) Lamarck 中提取的5种化合物显著抑制了4种入侵杂草种子的萌发和幼苗的生长(Shen *et al.*,2022)。

各地可以借鉴其他地区对外来生物进行生物防治并取得重大成效的案例,但是,此方法需要对入侵种的习性和引入的天敌进行多方面了解,且需要进行严格的风险评估。

2.5 生态治理

生态治理的策略是:通过激素防治,从激素的角度出发,制造人工信息激素来防治入侵生物并将其进行杀灭。除利用激素外,还可利用微生物进行防治。林业人员还可以使用抗菌素,如灭瘟素等,并按照一定的比例配制成药液,这种药液能快速发挥作用,并且有一定程度的无污染性,使用价值较高(万方浩等,2015)。

2.6 遗传控制

遗传控制是指通过改变或移换有害生物的遗传物质,降低其繁殖势能,达到控制或消灭一个种群的目的,是一种有害生物参与削减其自身密度的

防治技术。近年来,利用遗传控制技术进行防治外来入侵生物取得了一定的进展。例如,将经过辐射处理的不育雄蚊释放到野外,使其与野生雌蚊交配,造成雌蚊不能繁育子代,达到降低蚊媒病发病率的目的(吴春燕和李建平,2021)。此外,在关于入侵鱼类的控制方面,Teem & Gutierrez (2014)将含有 2 条 Y 染色体的雌鱼添加到目标种群中与雄性交配,抑制入侵鱼类的种群繁衍;或在雄鱼的常染色体中添加芳香酶抑制基因(该基因会导致这些雄鱼的后代发育为雄性),并将这些雄鱼释放到目标种群中,与野生雌鱼交配得到的后代也均为雄性,导致性别比例的失衡,以达到治理外来入侵鱼类的目的。

2.7 综合治理

综合治理是指将机械、物理、生物、遗传等单项防控外来物种的技术融合起来,发挥单项技术的优势、弥补各自劣势,达到综合治理入侵生物的目的,具有速效性、持续性、安全性、经济性等特点。例如,利用化学除草剂和本地种群落改造及替代控制的综合方法处理微甘菊 *Mikania micrantha* H.B.K. (徐高峰等,2017);针对互花米草的入侵提出了刈割+翻耕、刈割+遮荫、刈割+农药、刈割+淹水和刈割+翻耕+生物替代等综合防治方法(谢宝华和韩广轩,2018)。需要指出的是,综合治理并不是将各种技术简单相加,而是将它们有机融合,彼此相互协调、相互促进。

3 外来入侵生物的资源化利用

任何一种防治方法都有局限性,例如物理方法人工去除水葫芦,不适用于大范围的治理,且治标不治本;喷洒除草剂治理农田入侵杂草,不能灭除种子,还可能对农作物造成影响;引入天敌进行生物防治,时间跨度大,且易造成二次入侵,破坏原有的生态平衡。因此,对入侵生物进行合理的资源化利用,不仅能“废物利用”,对冲一部分入侵种造成的经济损失,为人类创造价值,而且在一定程度上还是一种治理入侵生物的手段。

非洲大蜗牛 *Achatina fulica* (Ferussac) 是世界 100 种恶性外来入侵生物之一,也是首批被列入入侵中国的 16 种危害极大的外来物种之一。但非洲大蜗牛蛋白质、维生素含量丰富,作为禽类饲料可以提高产蛋量(郭靖等,2015);从其消化液中提取的酶已广泛应用于细胞生物学的研究(陈德牛和高

家祥,1980)。而克氏原螯虾 *Procambarus clarkii* (Girard),即小龙虾,在我国 2021 年的产业总产值已达 4221.95 亿元,养殖面积 173.3 万 hm^2 (于秀娟等,2022),已成为我国一项重要的经济产业;反枝苋是我国农业生态系统最常见的外来入侵杂草之一,可用作重金属污染土壤的修复(刘婕等,2015),富含皂苷以及甾体黄酮类化合物,种子及全株均可入药,有清热解毒的功效(魏莹等,2020),处理得当的话,反枝苋作为动物饲料,能提供 20%~30% 的蛋白质和 40% 以上的碳水化合物(Wesche-Ebeling *et al.*, 1995);入侵植物银叶茄 *Solanum elaeagnifolium* Cav. 含有丰富的木质纤维素,是分离木质素和纤维素的潜在材料,可为新材料的开发提供便利(Boussetta *et al.*, 2012)。在未来,外来入侵生物的资源化利用可能是有效降低其危害的一个重要发展方向。

4 结论

我国对外来入侵生物的研究起步较晚,开展相关治理的时间成本和经济成本极高,因此,针对外来物种的大量入侵与扩散应该以防为主,应及时建立外来生物入侵防控体系;建立外来入侵生物防控工作协调机制,形成以相关管理部门统筹规划,专家指导普及农业外来入侵生物危害及防治措施,基层调查人员和大众掌握外来入侵生物识别和防控等技能的多位一体外来入侵生物管理体系;完善相关法律法规,为已经和即将开展的一系列外来入侵生物防治措施提供制度保障;建立外来物种数据库,为广大科研人员提供科研数据支撑;及时推进相关科学研究,探究入侵生物的入侵机制和扩散机制,为探寻入侵生物防治方法提供理论依据;重视外来入侵生物的生物和生态防治研究,为已造成入侵的外来物种寻找生态环境友好型的治理方法;建立外来入侵生物安全性风险评估和预警体系,提前预测入侵生物潜在分布区、发生危害的范围和程度;加强海关检验检疫体系建设,在源头上断绝外来物种入侵可能性;开展大众自然教育,提高全民防范意识,形成“入侵生物,人人喊打”的舆论氛围,并自发开展入侵生物防治活动;加强科研投入,积极探索外来入侵生物的入侵机理、防治方法,以及资源化利用的途径等。在全球化的当下,外来生物传播并形成入侵的几率大大增加,因此,一套科学的、行之有效的体系可以极大提升我国应对外来生物入侵的能力,能在第一时间发现有害外来生物,

并上传数据库,协调各部门对该物种做出预警,并提出治理方法,在第一时间做出应对。

参考文献

- 蔡波,高雯雯,韩玉春,林明光,2016.海南外来有害生物数据库的开发与应用.植物检疫,30(2):45-49.
- 常钦,杜海涛,何宇澈,2022.多方协同维护生态安全(美丽中国).人民日报.(2022-04-12)[2024-06-15].<http://data.people.com.cn/rmrb/20220412/14>.
- 陈德牛,高家祥,1980.褐云玛瑙螺及其利用.动物学杂志,15(1):40-42,65.
- 陈瑜,杨毅哲,陈丽丽,宋兴江,李欣迪,张献瑞,史岩,王佳,宋雅琪,刘刚,2024.基于生态位模型的多花黑麦草入侵风险分析.陕西师范大学学报(自然科学版),52(1):70-78,72.
- 丁奎婷,杜素洁,杨念婉,刘万学,郭建洋,2023.草地贪夜蛾综合防控技术研究进展.生物安全学报,32(4):291-302.
- 高鹏,胡婕,龚伟荣,杜予州,2020.甘薯小象甲在江苏的潜在入侵风险评估.应用昆虫学报,57(4):963-972.
- 高尚宾,张宏斌,孙玉芳,张国良,2017.植物替代控制3种入侵杂草技术的研究与应用进展.生物安全学报,26(1):18-22,102.
- 管云,罗雪桃,欧继喜,李慎磊,林小军,崔灿,陈美云,宋侦东,2023.红火蚁云采集系统的建立与应用.植物检疫,37(5):41-46.
- 郭靖,章家恩,吴睿珊,赵本良,杨慧荣,2015.非洲大蜗牛在中国的研究现状及展望.南方农业学报,46(4):626-630.
- 姜佰文,李静,陈睿,鲁萍,李琦,肖同玉,白雅梅,张险峰,李亦奇,2018.降雨年型变化及竞争对反枝苋和黄豆生长的影响.生物多样性,26(11):1158-1167.
- 鞠瑞亭,李慧,石正人,李博,2012.近十年中国生物入侵研究进展.生物多样性,20(5):581-611.
- 李丽萍,杨明嘉,谢响明,2008.紫茎泽兰的微生物防治研究进展.中国农学通报,24(5):348-350.
- 梁靓,刘玮琦,李兰,李毅然,2018.西安粮食口岸外来有害生物传入预防对策.陕西林业科技,46(3):68-70.
- 刘刚,2022.陕西外来植物.西安:陕西科学技术出版社.
- 刘婕,朱宇恩,刘娜,王翠红,吴山,2015.EDTA和柠檬酸对反枝苋(*Amaranthus retroflexus* L.)Cu迁移富集影响研究.生态环境学报,24(8):1399-1405.
- 刘明月,2018.中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析.博士学位论文.哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所).
- 鲁萍,梁慧,王宏燕,白雅梅,高凤杰,宋戈,吴岩,田秋阳,2010.外来入侵杂草反枝苋的研究进展.生态学杂志,29(8):1662-1670.
- 马玉忠,2009.外来物种入侵中国每年损失2000亿.中国经济周刊(21):43-45.
- 强胜,陈国奇,李保平,孟玲,2010.中国农业生态系统外来种入侵及其管理现状.生物多样性,18(6):647-659,674-675.
- 乔沛阳,王安东,谢宝华,王丽,韩广轩,梅宝玲,张希涛,2019.除草剂对黄河三角洲入侵植物互花米草的影响.生态学报,39(15):5627-5634.
- 宋兴江,张文刚,陈晓艳,刘芮伶,姚鑫,马婧昊,王佳宁,史岩,冉俊杰,安玉霞,刘刚,2021.陕西省外来植物组成与分布现状.生态学杂志,40(12):3800-3809.
- 宋侦东,陈美云,管云,许益鏊,李慎磊,张明亮,2022.用于红火蚁监测的小程序——红火蚁云采集.农业与技术,42(20):32-37.
- 苏芸芳,2021.风险预防背景下的外来物种入侵法律规制.资源开发与市场,37(3):273-280.
- 孙燕,周忠实,王瑞,MÜLLER-SCHÄRER H,2017.气候变化预计会减少东亚地区豚草的生物防治效果.生物多样性,25(12):1285-1294.
- 孙志凡,2018.外来物种入侵的法律问题(英文).中国农学通报,34(6):104-108.
- 万方浩,侯有明,蒋明星,2015.入侵生物学.北京:科学出版社.
- 王德艳,张大才,胡世俊,闫晓慧,2017.云南菊科入侵植物入侵机制及其利用研究进展.生物安全学报,26(4):259-265.
- 王在凌,徐婧,张润志,2020.中国重要检疫性实蝇的全球分布和入侵情况.生物安全学报,29(3):164-169.
- 魏莹,李倩,李阳,毛祝新,王宇超,岳明,2020.外来入侵植物反枝苋的研究进展.生态学杂志,39(1):282-291.
- 吴春燕,李建平,2021.中山大学用核技术灭蚊子.光明日报.<https://m.gmw.cn/baijia/2021-09/02/1302529617.html>.
- 吴鸿飞,2023.外来入侵生物智能识别与监测系统的研究和实现.硕士学位论文.杭州:浙江理工大学.
- 席曼姝,王振霖,刘孝贤,李志红,张鑫,吕昭智,韩鹏,2022.基于@RISK番茄潜叶蛾对我国番茄产业造成的经济损失评估.生物安全学报,31(4):300-308.
- 肖顺勇,陈欣欣,周建成,尹丽辉,张梦,2014.湖南省外来物种入侵形势及其防控对策.湖南农业科学(20):45-47.
- 谢宝华,韩广轩,2018.外来入侵种互花米草防治研究进展.应用生态学报,29(10):3464-3476.
- 徐高峰,岳英,申时才,郭晋,金桂梅,张付斗,张玉华,2017.薇甘菊防除后抑制其再次入侵的几种防治措施初探.生态环境学报,26(6):911-918.
- 阎雄飞,李刚,冯永宏,刘永华,晁遵淇,亢福仁,2020.双

- 条杉天牛在陕西省的风险分析和管理的对策. 植物检疫, 34(1): 61-66.
- 阎雄飞, 刘博, 刘永华, 杨奇, 2012. 枣实蝇在陕西省的风险性分析及检疫对策. 中国农学通报, 28(31): 265-270.
- 阎雄飞, 张彦龙, 刘永华, 相微微, 亢福仁, 2017. 苹果小吉丁虫在陕西省潜在危害性风险分析和管理对策. 植物检疫, 31(3): 46-52.
- 杨韶松, 郑凤萍, 申时才, 徐高峰, 温丽娜, 金桂梅, 陶琼, 张付斗, 2022. 加拿大一枝黄花在云南省的入侵现状及防控策略. 中国农学通报, 38(35): 83-89.
- 杨伟, 2021. 彭阳县外来林业有害生物防控工作调研报告. 农业灾害研究, 11(5): 182-183.
- 杨叶欣, 胡隐昌, 李小慧, 汪学杰, 牟希东, 宋红梅, 王培欣, 刘超, 罗建仁, 2010. 福寿螺在中国的入侵历史、扩散规律和危害的调查分析. 中国农学通报, 26(5): 245-250.
- 杨忠岐, 张永安, 2007. 重大外来入侵害虫——美国白蛾生物防治技术研究. 应用昆虫学报, 44(4): 465-471, 622.
- 于秀娟, 郝向举, 党子乔, 杨霖坤, 王雪光, 张远华, 蔡俊, 张寅, 2022. 中国小龙虾产业发展报告(2022). 中国水产(6): 47-54.
- 张安盛, 于毅, 李丽莉, 张思聪, 2007. 东亚小花蝽(*Orius sauteri*)成虫对入侵害虫西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*)成虫的捕食作用. 生态学报, 27(5): 1903-1909.
- 张彬, 刘映红, 赵岚岚, 周旭, 2008. 桔小实蝇研究进展. 中国农学通报, 24(11): 391-397.
- 张哲, 李志红, 万方浩, 倪文龙, 曲伟伟, 2011. 利用 CLIMEX 预测纳塔尔实蝇在中国的潜在地理分布. 生物安全学报, 20(1): 43-49.
- 赵燕, 王森, 杨文清, 李悦, 孔范龙, 2022. 中国互花米草防治措施研究进展及展望. 生物安全学报, 31(3): 210-216.
- 郑雅楠, 祁金玉, 孙守慧, 杨长成, 2012. 白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 的研究和生物防治应用进展. 中国生物防治学报, 28(2): 275-281.
- 中华人民共和国海关总署, 2024. 筑牢西南国门生物安全屏障——昆明海关不断提升防控外来物种入侵能力. 海关总署. (2024-04-29) [2024-06-15]. <http://www.customs.gov.cn/customs/ztlz86/302414/302415/gmfc40/2813466/5850772/index.html>.
- 中华人民共和国生态环境部, 2021. 2020 中国生态环境状况公报. (2021-05-26) [2023-08-16]. <https://www.mee.gov.cn/hj-zl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>.
- 中华人民共和国农业农村部, 2014. 我国每年人工打捞水葫芦费用高达 1 亿元. (2014-07-25) [2023-08-16]. http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/201407/t20140725_3980876.htm.
- 钟超, 李伟, 柳城, 李娟, 江晴, 2023. 沉湖湿地自然保护区外来入侵物种现状与风险评估. 湖北林业科技, 52(6): 74-76.
- 周明华, 丁志平, 王明生, 朱君, 陆军, 2023. 我国外来物种入侵防控工作现状综述. 植物检疫, 37(2): 1-7.
- BOUSSETTA A, BENHAMOU A A I T, BARBA F J, IDRISSE M E L, GRIMI N, MOUBARIK A, 2023. Valorization of *Solanum Elaeagnifolium* Cavanilles weeds as a new lignocellulosic source for the formulation of lignin-urea-formaldehyde wood adhesive. *The Journal of Adhesion*, 99(1): 34-57.
- SHEN S C, MA G Z, XU G F, LI D Y, JIN G M, YANG S S, CLEMENTS D R, CHEN A D, WEN L N, ZHANG F D, YE M, 2022. Allelochemicals identified from sweet potato (*Ipomoea batatas*) and their allelopathic effects on invasive alien plants. *Frontiers in Plant Science*, 13: 823947.
- SONG X J, LIU G, QIAN Z Q, ZHU Z H, 2023. Niche filling dynamics of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) during global invasion. *Plants*, 12(6): 1313.
- TEEM J L, GUTIERREZ J B, 2014. Combining the Trojan Y chromosome and daughterless carp eradication strategies. *Biological Invasions*, 16(6): 1231-1240.
- WESCHE-EBELING P, MAITI R, GARCÍA-DÍAZ G, GONZÁLEZ D I, SOSA-ALVARADO F, 1995. Contributions to the botany and nutritional value of some wild *amaranthus* species (Amaranthaceae) of Nuevo leon, Mexico. *Economic Botany*, 49(4): 423-430.
- XU H G, QIANG S, GENOVESI P, DING H, WU J, MENG L Z, HAN Z M, MIAO J L, HU B S, GUO J, SUN H Y, HUANG C, LEI J C, LE Z F, ZHANG X P, HE S P, WU Y H, ZHENG Z, CHEN L, JAROŠÍK V, PYŠEK P, 2012. An inventory of invasive alien species in China. *Neo-Biota*, 15: 1-26.
- YANG Y B, LIU G, SHI X, ZHANG W G, CAI X W, REN Z L, YAO N N, ZHU Z H, NIE H, 2018. Where will invasive plants colonize in response to climate change: predicting the invasion of *Galinsoga quadriradiata* in China. *International Journal of Environmental Research*, 12(6): 929-938.
- ZHANG W G, CHEN X Y, LIU R L, SONG X J, LIU G, ZOU J B, QIAN Z Q, ZHU Z H, CUI L J, 2021. Realized niche shift associated with *Galinsoga quadriradiata* (Asteraceae) invasion in China. *Journal of Plant Ecology*, 15(3): 538-548.