

前 言

外来入侵物种防控事关国家粮食安全、生物安全、生态安全和人民群众身体健康。我国是全球受外来入侵物种影响最严重的国家之一。据统计，我国外来入侵物种达 660 种，其中超过 80% 为农林业外来入侵物种，造成的经济损失达 2000 亿/年。近年随着气候变化与贸易全球化进程的加速发展，重庆作为长江上游生态屏障核心区和亚热带江岸型农业区的典型代表，上接成渝地区双城经济圈，下联长江经济带，北上作为“渝新欧”国际铁路联运大通道起点，南下接西部陆海新通道，其独特的地理条件和复杂的生境特征，与频繁的人流车流物流活动，使其成为我国受外来物种入侵危害最严重的“敏感区域”之一。笔者在参与全球环境基金（GEF）六期“中国农业可持续发展伙伴关系规划型项目”子项目“外来入侵物种防控体系建设项目”的五年间，目睹了外来物种对当地农业生态系统的严重危害：从福寿螺啃食水稻秧苗到空心莲子草侵占农田湿地，从胜红蓟破坏果园生境到加拿大一枝黄花挤占本土植物生存空间，这些案例无不显示出外来入侵物种的破坏力，也凸显了科学防控的紧迫性。

本书的编撰缘起于一个信念：将实践经验转化为系统知识，让理论与技术真正服务于青年一代和社会公众。作为全球环境基金（GEF）六期“外来入侵物种防控体系建设项目”团队的主要成员单位，我们深知外来入侵物种防控绝非单一部门或单项技术能够解决的问题。本书旨在通过全球环境基金（GEF）六期“外来入侵物种防控体系建设项目”在重庆地区的入侵物种跨部门管理体系优化与防治技术实践探索，结合区域地理气候特征与外来入侵物种发生危害规律构建一系列“因地制宜、可复制、可推广”的省级行政区域防控技术体系，研究结果在服务地方入侵物种科学防控的基础上，为我国高校师生提供兼具理论深度与实践指导的科学参考，最终为国家生物安全战略的落地实施贡献一份力量。

本书根据入侵物种的“地域特殊性”背景，以“问题导向”和“案例驱动”为切入点，经历了“调查-分析-试验-凝练-验证”的五步研究过程：一是调查监测：根据农业农村部统一部署，2021 年起重庆市农业农村委成立了农业外来入侵物种普查办公室，组织西南大学、重庆市农科院、重庆市畜科院、中国科学院重庆绿色智能技术研究院、重庆海关技术中心等单位成立 5 个技术团队，通过对 38 个涉农区县、949 个乡镇开展系统调查，共发现入侵昆虫、入侵动物、入侵病害、入侵植物等农业外来入侵物种 200 余种；二是机制解析：基于生态学、经济学与管理学交叉视角，剖析了亚热带江岸型省区重庆外来物种入侵的驱动因素（如跨境贸易、人员流动、气候变化等）和沿江/沿路/沿人类聚集区等扩散规律；三是试验示范，项目团队通过对空心莲子草、福寿螺、桔小实蝇等农业外来入侵物种在不同生境条件下的典型发生区，根据其发生规律和危害特点进行防治技术体系的试验示范，总结防治经验并提出防治技术体系；四是模式构建：通过对比分析重庆市璧山区、石柱县、长寿区、江津区、渝北区等地对农业重要外来入侵物种在典型发生生境下的

防控案例,提炼出“监测预警-精准阻截-综合防治-生态修复-公众参与”的五维防控模式。五是技术推广:将形成防控技术模式通过农业农村部农业生态与资源保护总站外来入侵物种典型防治技术申报,形成能满足不同利益相关方经济主体且可操作的“技术手册”,向气候相似区域的农业企业、生产合作社、种植大户、广大农户及社会团体和社会公众进行推广,最终实现典型生境集中发生外来入侵物种的有效管控。

全书共六章:第1章重点介绍了入侵物种与生物入侵,包括外来入侵物种概念、危害、入侵过程与引入途径、生物入侵机理与研究框架、外来入侵物种防控管理策略,以及外来入侵物种防治措施;第2章主要介绍了我国外来入侵物种管理现状与发展趋势,包括外来入侵物种发生态势、我国入侵物种防控研究进展、《中华人民共和国生物安全法》解读、《外来入侵物种管理办法》解读、《重点管理外来入侵物种名录》(2022年版)解读;第3章以重庆为例分享了省域外来入侵物种管理经验,包括内陆开放新高地背景下重庆市外来入侵物种防控管理形势分析、重庆市外来入侵物种管理协调机制的建立、重庆市外来物种入侵防控攻坚行动方案的拟定、重庆市外来入侵物种管理战略和行动计划的编制,并以璧山区为例进行了县域农业外来入侵植物调查与生态影响评价,提出璧山区外来入侵物种管理与防控计划;第4章主要介绍了重庆农业重要外来入侵物种发生情况与防治方法,包括外来入侵植物、动物、昆虫与病原微生物;第5章主要分享了重庆典型农业外来入侵物种空心莲子草在不同生境条件下的防控技术与应用方法,包括西南山地果园空心莲子草牧草替代综合防治技术、观光采摘果园空心莲子草草坪草替代防治技术、河岸塘堰湿地水生型空心莲子草生态防治技术、果园空心莲子草中药材套作防治技术、果园空心莲子草绿肥套作防治技术、果园空心莲子草“薯-草-禽”套作防治技术、山地果园空心莲子草“夏秋甘薯+冬春油料”套作防治技术,为不同生境条件下空心莲子草暴发危害的科学防治提供技术储备;第6章主要分享了重庆典型外来入侵物种福寿螺在不同生境条件下的防控技术与应用方法,包括亚热带稻田福寿螺监测与综合防治技术、生态莳田福寿螺监测与综合防治技术、稻田福寿螺“稻-油轮作”综合防治技术、养殖鱼塘福寿螺青鱼生物防治技术、河库塘堰与景观水体福寿螺诱杀防治技术,旨在为我国西南各省农业外来入侵物种福寿螺高效防控,提供技术支撑和经验借鉴。

本书全文所涉及的相关植物、昆虫与微生物等物种拉丁学名分别按“中国生物物种名录”(2025版)与“中国植物分类与代码”(GB/T 14467-2021)进行校正。

本书的出版得到了全球环境基金(GEF)六期“外来入侵物种防控体系建设”项目资助,在为期五年的项目执行期内得到了联合国开发计划署驻华代表处、农业农村部、生态环境部和海关总署、重庆市农业农村委员会、重庆市璧山区农业农村委员会,国家项目办、重庆市项目办与璧山区项目办的的大力支持,本书的撰写得到了中国农科院生物入侵团队首席科学家万方浩研究员、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所张国良研究员等国内外同行专家的鼎力帮助,本书也得到了海南省农业生态与资源保护总站、中国热科院环植所、海南大学等兄弟省份相关单位,以及西南大学相关兄弟学院和同行专家的关心和支持,在此表示由衷的感谢并致以崇高的敬意!本书在编撰过程中还参阅了相关科研单位和国内同行专家的技术资料,以及农业农村部农业生态与资源保护总站公布的外来入侵物种防控技术资料,特此说明并一并致谢!

然而，本书仍存在未竟之问：如何让基层治理更具韧性？如何让利益相关方与社会公众实现从外来入侵物种被动防治向主动防控的观念转变？如何平衡防控成本与经济效益之间的关系？这些问题仍需后续研究深入探讨。我们期待本书能成为青年学者与社会相关领域利益相关方从业者的一块“垫脚石”，在今后的实践中不断修正与完善。由于编者水平有限，本书尚有不足和不当之处，敬请各位同行专家和广大读者批评指正！

最后，谨以此书献给所有奋战在农业生态保卫战一线的工作者们——你们的坚守，让我们的农业生态更加安全，让绿水青山更有希望！

本书编写组

2025 年夏于重庆北碚

目 录

前言

第 1 章 入侵物种与生物入侵	1
1.1 相关概念辨析	1
1.2 外来入侵物种危害	4
1.3 外来入侵物种的入侵过程	7
1.4 生物入侵机理与研究框架	9
1.5 外来入侵物种防控管理策略	20
1.6 外来入侵物种防治措施	24
第 2 章 我国外来入侵物种管理现状	26
2.1 外来入侵物种发生态势	26
2.2 我国入侵物种防控进展	30
2.3 《中华人民共和国生物安全法》的颁布与实施	33
2.4 《外来入侵物种管理办法》的颁布与实施	35
2.5 《重点管理外来入侵物种名录》(2022 年版) 的颁布与实施	37
第 3 章 省域外来入侵物种防控管理体系构建	44
3.1 内陆开放新高地背景下重庆市外来入侵物种防治形势	44
3.2 重庆市外来入侵物种防控管理需求分析	58
3.3 重庆市外来物种入侵防控攻坚行动方案	64
3.4 重庆市外来入侵物种管理战略和行动计划	67
3.5 璧山区县域农业外来入侵植物调查分析与生态影响评价	76
3.6 璧山区外来入侵物种管理与防控计划	95
第 4 章 重庆农业重要外来入侵物种发生与防治	101
4.1 外来入侵植物	101
4.2 外来入侵昆虫	179

4.3 外来入侵植物病原微生物	230
第5章 外来入侵物种空心莲子草典型防治技术与应用	247
5.1 西南山地果园空心莲子草牧草替代综合防治推荐技术	247
5.2 观光采摘果园空心莲子草草坪草替代防治推荐技术	253
5.3 河岸塘堰湿地水生型空心莲子草生态防治推荐技术	260
5.4 果园空心莲子草中药材套作防治推荐技术	265
5.5 果园空心莲子草绿肥套作防治推荐技术	272
5.6 柑橘果园空心莲子草“薯-草-禽”复合防治推荐技术	277
5.7 山地果园空心莲子草“夏秋甘薯+冬春油料”套作防治推荐技术	282
第6章 外来入侵物种福寿螺典型防治技术与应用	289
6.1 亚热带稻田福寿螺监测与综合防治推荐技术	289
6.2 生态莳田福寿螺监测与综合防治推荐技术	296
6.3 稻田福寿螺“稻-油轮作”综合防治推荐技术	300
6.4 养殖鱼塘福寿螺青鱼生物防治推荐技术	305
6.5 河库塘堰与景观水体福寿螺诱杀防治推荐技术	309
参考文献	315

第 1 章 入侵物种与生物入侵

1.1 相关概念辨析

物种引进与物种入侵关系着不同生物种群的发展乃至整个生态系统的运行，合理的物种引进与防止外来物种入侵作为保障生态安全的必要环节，对于生态系统的完整性与稳定性具有决定性影响（田佳文和李家鑫，2025）。但是截至目前，学界对于“物种”这一本体概念及其在生态系统中的“入侵”行为，尚未形成统一的定义和理论，概念上的多样性和模糊性导致了在物种分类、生态功能评估以及入侵物种管理等方面的差异（杜红，2023）。笔者结合国内外近年相关权威文献，对物种、土著物种、外来物种及外来入侵物种等相关概念进行辨析。

1.1.1 物种、土著物种与外来物种

1. 物种（species）的概念界定

“物种”是生物分类学的最基本单元和最小单位。但由于人们对物种认识的差异，形成了众多的物种概念，因此很难对物种给出一个准确而又统一的定义。目前比较有代表性的物种概念包括分类学物种、达尔文物种、生物学物种以及系统发育物种，它们各自从物种的分类、进化、生殖隔离以及祖先与后裔关系等属性，对物种概念进行了解析和阐述（葛颂，2017）。林奈在其《自然系统》（*Systema Naturae*）中描述：“物种是由具有相似形态特征的个体所组成的”，这一物种概念强调物种形态的间断性和性状的差异，因此形态学特征在划分物种中具有非常重要的意义（Linnaeus, 1758）。达尔文在其《物种起源》（*The Origin of Species*）中，用了大量的篇幅来描述生物的变异，在达尔文看来，变异是生物的核心特征，在自然选择的作用下“适合”的变异得到了保存，即为“物种”（Charles, 1929）。受达尔文进化思想的影响，生物学物种概念的关键要点是引入了生殖隔离作为划分物种的标准，其中最具有代表性的学者是 Dobzhansk（1937）和 Mayr（1940）等，Dobzhansk 提出：物种是一群可以交配并繁衍后代的个体，一个物种的个体与其他物种的个体却不能进行交配或交配后产生的杂种不能再进行正常繁衍。系统发育物种概念认为，物种是最小的可鉴别的单系生物类群，在该单系类群中存在祖先与后裔的亲本模式（戎俊等，2015），与生物学物种概念相比，系统发育种在一定程度上解决了无性繁殖生物的划分问题，但是以“独特衍征”作为划分物种的依据一直以来遭到诸多质疑。综上所述，我们认为，物种是生物有机体分类的最基本单元，是指在特定时空内，来源于共同祖先而具有相似形态和生理特征的个体集，相同物种的个体之间可以进行自由交配和繁殖，

但是不同物种的个体之间具有不同程度的生殖隔离（卢宝荣和王哲，2016）。中国地域辽阔，气候多样，拥有丰富的物种资源，仅高等植物（包括苔藓植物、蕨类植物和种子植物）就多达 35784 种，是公认的北半球植物种类最多的国家之一，且特有类群丰富（马金双，2020）。

2. 土著物种（native species）概念界定

在学术上“土著物种”与“外来物种”的概念是相对的，非“土著”即“外来”。在生态学和生物地理学的研究中，“土著物种”与“外来物种”的界定是重要内容。

“土著物种”（native species），又称本地物种，从自然起源且无人类干预的角度来看，多数观点认为本土物种是在某一地区自然起源，经自然生长、演化，未经人类引入的物种（Xu et al., 2023）。它们经过长期的自然选择，与当地的生态环境形成了紧密的适应性和相互依存关系，是当地生态系统的重要组成部分，对维持生态平衡、提供生态服务具有关键作用（Xie et al., 2022）。

土著物种是地球生态系统的重要组成部分，对于维持生态平衡、促进生物多样性以及确保地球生态系统的健康运行，与维持地方传统文化传承具有至关重要的作用，也是农业科技原始创新和现代种业发展的物质基础，是保障粮食安全、建设生态文明、支撑农业可持续发展的战略性资源（颜伟，2020）。我国地域广阔，拥有丰富的土著物种资源，如水稻（*Oryza sativa*）、小米（粟）（*Setaria italica* var. *germanica*）、大黄米（黍）（*Panicum miliaceum*）、大豆（*Glycine max*）等粮食作物，白菜（*Brassica rapa*）、甘蓝（*Brassica oleracea*）等蔬菜作物，枣（*Ziziphus jujuba* var. *jujuba*）、荔枝（*Litchi chinensis*）、猕猴桃（*Actinidia chinensis*）、香菇（*Lentinula edodes*）等经济作物资源等。银杏（*Ginkgo biloba*）是我国特有的土著果树，其果实（白果）可食用，同时也是古老的孑遗植物；茶（*Camellia sinensis* var. *sinensis*）是我国重要的本土经济作物，茶叶不仅是我国传统饮品，茶文化更是源远流长，成为我国传统文化的重要符号。粟和黍是我国重要的土著农业作物，在我国有着悠久的种植历史，西安高陵区杨官寨遗址 H85 出土植物遗存显示，粟、黍是当时重要的日常口粮，反映出其在早期农业生产中的重要地位（闵庆文等，2022）。

3. 外来物种（alien species）界定

从人类介导跨越生物地理屏障的角度来看，外来物种通常指因人类活动介导，个体被扩散到超出其原有生物地理分布范围，即跨越了一定生物地理屏障的物种（石云涛，2021）。

从建立自我维持种群的角度来看，外来物种不仅是被引入新区域，还需在引入地建立起能够自我维持的种群（褚世海，2023）。意味着它们能在新环境中正常繁殖、生长，形成稳定的种群结构和数量。例如，福寿螺（*Pomacea canaliculata*）被引入中国后，在南方许多水域大量繁殖，建立起自我维持种群，成为外来物种典型代表（殷颖璇等，2022）。

从可能造成影响角度来看，许多外来物种作为“传入种”（introduced species）引进以后，适应引入地的自然环境和气候特征，建立种群后进而形成“归化种”（naturalized species），即成为已经建立能够自我维持的种群并与当地生态系统形成稳定关系的外来种

(万方浩等, 2015), 很多归化种对当地生态系统、经济和社会发展起到了积极作用, 但也有少数外来物种归化建群以后造成了生态危害。

历史上很多外来农业归化种曾经对我国农业产业、社会经济与历史文化发挥了重要作用。如大宗农作物玉米 (*Zea mays*), 原产于中南美洲, 如今在全球亚热带地区均有栽培, 在明朝时期传入我国, 凭借其适应性强、产量高的特点, 迅速在我国各地广泛种植 (杨虎, 2011)。《域外植物的输入与中古社会》提到大量域外植物入华丰富了中国农作物种类, 不仅玉米的传入改变了我国部分地区的种植结构, 成为重要的粮食作物之一 (石云涛, 2021), 原产于南美洲安第斯山区的马铃薯 (*Solanum tuberosum*), 自 17 世纪时已在我国多地种植, 其高产且易于种植, 能适应多种地形和气候条件, 对保障我国粮食安全起到重要作用 (罗夏梓平, 2025); 原产于南美洲的番茄 (*Solanum lycopersicum*)、原产于墨西哥的辣椒 (*Capsicum annuum*) 等蔬菜作物, 原产于西亚地区的葡萄 (*Vitis vinifera*)、原产于中亚地区的苹果 (*Malus pumila*) 等果树作物, 原产于印度和阿拉伯地区的棉花 (*Gossypium hirsutum*)、原产于南美洲的烟草 (*Nicotiana tabacum*) 等经济作物, 均具有清晰的归化史, 经过人们有意识地引入并经过栽培和驯化, 最终适应新环境成为归化物种, 极大地丰富了我 国农作物的种类, 为农业生产提供了更多的选择, 使得我国农业生态系统更加多样化, 提高了农业生态系统的稳定性和抗逆性 (王星光, 2024), 在促进农业产业发展、丰富我国传统饮食结构和助推地方特色饮食文化形成等方面, 发挥了重要作用。

但并不是所有的外来归化种都具有积极的正面作用, 少量外来物种对引入地的经济、生态和社会安全等方面造成严重威胁, 形成了外来入侵物种。

1.1.2 外来入侵物种

外来入侵物种 (invasive alien species, IAS) 是一个具有国家疆域、国家政策、经济主体结构等的综合性概念, 不同组织、不同主体、不同国家给出的概念不一样 (陆轶青, 2022)。外来入侵物种的界定是一个富有争议的话题, 准确界定外来入侵物种, 明确防控对象, 是开展外来入侵物种防控的首要条件 (褚世海, 2023)。

目前全国共有 40 多项涉及外来入侵物种的国际性公约。2002 年《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity, CBD) 第六次缔约方大会定义: 外来物种是指被引入到其过去或现在的自然分布区 (natural past or present distribution) 之外的物种、亚种或更低的分类等级, 包括该物种可能存活并随后繁殖的任何部分, 如配子、种子、卵或繁殖体; 外来入侵物种是指其引进或扩散威胁生物多样性的外来物种^①。世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 将外来物种定义为“出现在其过去或现在的自然分布范围及潜在扩散潜力范围以外的种、亚种或以下的分类单元, 包括该物种可能存活并随后繁殖的任何部分, 如配子、种子、卵或繁殖体”; 外来入侵物种是指在本 地自然或半自然生态系统中形成了自我再生能力, 可能或已经对生态环境、人类生产或生活造成明显损害或不利影响的外来物种, 这些入侵导致栖息地的改变和自然生态系统过程

^① CBD Secretariat. COP 6 Decision VI/23: Alien Species That Threaten Ecosystems, Habitats or Species. [2019-0306]. <https://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=7197>.

的破坏,其危害对于本地种来说往往是灾难性的(胡亚萍等,2020)。生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)对外来入侵物种的界定是:由人类直接或间接地引入至原有自然分布区域之外并能成功定殖和扩散,对当地生态环境和本地种造成威胁的动物、植物和其他生物(胡亚萍等,2020)。Policy-Oriented Research in Invasion Science: Trends, Status, Gaps, and Lessons(2020年)认为:外来入侵物种是在全球化进程中,借助国际贸易和长途运输等方式传播,对引入地造成生态、经济及社会文化等多方面影响的物种(Pinto,2022),其强调全球化背景下外来物种传播及其多方面影响。

西方发达国家的定义主要注重对生态的影响与生物多样性的危害,而发展中国家的定义则着眼于社会经济、农业生态、粮食安全等问题,对“外来入侵物种”所采用的概念不同,确定外来入侵物种名录的标准也各不相同。我国定义主要强调“对农林牧渔业可持续发展和生物多样性的损害”。2011年我国发布了《外来物种环境风险评估技术导则》(HJ624—2011),该导则对外来物种的界定采用IUCN的定义,在述及外来入侵物种的危害时主要考虑对生态环境、生产或生活的损害或不利影响^①。2015年出版的《入侵生物学》对外来入侵物种的定义为“在原产地以外建立了能够自我维持的种群,并对当地的经济、生态和社会安全造成威胁的生物”(万方浩,2015)。2022年5月我国农业农村部、自然资源部、生态环境部、海关总署联合公布《外来入侵物种管理办法》中明确指出:外来入侵物种是指传入定殖并对生态系统、生境、物种带来威胁或者危害,影响我国生态环境,损害农林牧渔业可持续发展和生物多样性的外来物种^②。由此可见,我国对于外来入侵物种的定义在不同阶段虽表述略有差异,但核心始终围绕对生态环境、生物多样性以及农林牧渔业可持续发展的影响。这既与国际上如IUCN的相关理念接轨,又紧密结合我国作为发展中国家自身的国情和实际需求,定义方式体现了我国在生态保护与社会经济发展之间寻求平衡的决心。随着时代发展和对生物入侵问题认识的深入,未来我国对外来入侵物种的定义或许会更加精准、完善,相关管理办法和评估技术规范也将不断优化,以更有效地应对外来物种入侵带来的挑战,守护我国的生态安全、经济安全和社会稳定。

1.2 外来入侵物种危害

外来入侵物种是全球生物多样性丧失的五大直接驱动因素之一,对生态环境、人类福祉具有极大的负面影响^③。我国地域辽阔、气候多样,生态系统类型众多,是遭受外来物种入侵危害最严重的国家之一。党的二十大报告中强调了“加强生物安全管理,防治外来物种侵害”(唐书培等,2024)。中国作为一个生物多样性极为丰富的国家,在全球一体化背景下,面临着日益严峻的外来物种入侵问题,这不仅影响到生态系统的稳定性,还对经济、社会乃至人民健康构成了潜在威胁(李伟华,2023)。

① 外来物种环境风险评估技术导则: HJ 624—2011, 2011.

② 外来入侵物种管理办法. 中华人民共和国国务院公报, 2022, (21): 18-21.

③ 生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台全体会议第十届会议(IPBES 10).《外来入侵物种及其控制专题评估报告》(thematic assessment of invasive alien species and their control), 2023-09-04.

1.2.1 造成入侵地生态系统失衡和生物污染

外来入侵物种通常具有较强的适应能力和繁殖能力，它们在新环境中快速扩散，占据生长空间与水热光照资源，从而与当地物种发生竞争，对生态系统的稳定性和健康造成损害。如凤眼蓝（*Pontederia crassipes*）又名水葫芦，本为原产于南美洲巴西的浮水草本植物，在1901年因其观赏价值以及可用作畜禽饲料而被引入中国，后逃逸为野生，因其强大繁殖能力，种群数量在野外爆发式增长，现已广泛分布于华北、华东、华中、华南和西南的29个省（区、市），以长江流域和珠江流域危害最为严重（符丽妹等，2024）。长江流域数以千计的浅水湖泊通过闸口与长江相连，在这种河湖一体的生态系统中，水流对凤眼蓝的传播和种群维持具有主导作用，同时也因堤坝闸口的隔离建立了较高的遗传分化（符丽妹等，2024）。凤眼蓝的增殖速度极快，可以迅速覆盖水体表面，限制水体的流动并阻塞河道，居群形成后使水体中的溶氧量减少，致使水生生物和鱼类缺氧致死，导致水体发臭变黑水质下降（周晴和潘晓云，2014）。紫茎泽兰（*Ageratina adenophora*）原产于中美洲，1935年首次被发现于我国云南南部，此后逐渐向北扩散蔓延。该物种根系发达，能够深入土壤，吸取大量水分和养分，具有极强的生命力和繁殖能力，能够迅速占领林地、草地和农田，排斥其他本土植物生长，导致生态系统多样性和群落结构破坏。所形成的单一种群具有化感作用，能够抑制周围植物的生长，进一步加剧了生态系统的失衡（吴佳伟，2024；曹尘等，2024）。据统计，2021年我国紫茎泽兰累计发生面积已达1.11万 hm^2 ，在贵州西南部、云南南部等地区危害尤其严重（李硕等，2022）。

1.2.2 造成入侵地生物多样性下降甚至丧失

一些外来物种能够通过快速扩散形成单一优势种群，压缩本地物种的生存空间，从而降低生物多样性。恶性杂草微甘菊（*Mikania micrantha*），原产中南美洲，现已广泛分布于亚洲和太平洋热带地区；微甘菊为藤本植物，节节生根，蔓延速度极快，适宜季节茎节每日伸长高达20cm，而且开花数量繁多，能够产生大量小而轻的种子，极易扩散；微甘菊还具有化感作用，极易形成单优种群，在海南与云南等省造成大片林地生长不良、植被退化，森林生态系统发生逆行演替（农业农村部农业资源与保护总站，2024）。鳄雀鳝（*Atractosteus spatula*）原产于北美，2022年我国多地发现鳄雀鳝并发起围剿行动，如一些公园、小区池塘等水域发现鳄雀鳝，为避免其对本地水生生物造成严重破坏，相关部门采取抽水等方式进行捕捞。鳄雀鳝生性凶猛，几乎没有天敌，在自然水域会大量捕食本土鱼类、虾蟹等水生生物，严重破坏当地水生生物多样性和生态平衡，原本丰富的本土鱼类种群在鳄雀鳝出现后数量急剧减少，对水域生态系统的食物链结构产生了极大冲击（杨宗辉，2023）。近年，在法国、德国、荷兰等欧洲国家的部分水域也发现鳄雀鳝入侵，在入侵水域迅速繁殖，挤压当地鱼类生存空间，导致一些湖泊和河流冷水鱼类种群数量减少，影响了当地河流、湖泊生态系统的稳定（Aguirre et al., 2021）。

1.2.3 入侵地粮食安全保障受到威胁

许多外来物种不仅干扰自然生态系统，同时也对农业生产构成重大威胁，甚至危害粮食

安全。如草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) 是联合国粮农组织全球预警的迁飞性重大农业害虫, 于 2019 年由东南亚传入我国后, 仅用半年时间已侵入至我国 18 个省 (区、市), 其幼虫的食性广泛, 可取食超过 76 个科、350 种植物, 其中又以禾本科、菊科与豆科为主, 造成入侵地玉米 (*Z. mays*)、甘蔗 (*Saccharum officinarum*) 等受损严重 (郝进良等, 2022)。稻水象甲 (*Lissorhoptrus oryzophilus*) 起源于美国密西西比河流域, 国际公认毁灭性水稻虫害之一, 也是我国二类检疫性害虫。1976 年传入亚洲稻区日本进而蔓延到朝鲜半岛和中国, 在 2015 ~ 2020 年, 日本部分水稻主产区因稻水象甲危害, 产量出现不同程度下滑达 15% 以上 (Ghosh and Lal, 2023)。2020 年, 沙漠蝗虫 (*Schistocerca gregaria*) 在东非地区大规模暴发, 虫群从非洲之角出发, 迅速蔓延至肯尼亚、埃塞俄比亚、索马里等国家, 甚至扩散到印度和巴基斯坦等亚洲国家。沙漠蝗虫具有强大的迁徙能力, 一天能飞行超过 150 km, 所到之处大量农作物被啃食, 严重威胁当地农业生产, 导致其粮食供应遭受重创, 给当地粮食安全带来极大挑战。据联合国粮食及农业组织 (FAO) 称, 该次蝗虫灾害是 70 年来最严重的一次, 对索马里和埃塞俄比亚约 7 万 hm^2 农田造成影响 (Peng et al., 2020)。

1.2.4 入侵地人类生命健康受到威胁

有些外来入侵物种能直接或间接地危害人类健康。如豚草 (*Ambrosia artemisiifolia*) 和三裂叶豚草 (*Ambrosia trifida*) 原产于北美洲, 8 ~ 9 月花期产生大量花粉, 能引发过敏性鼻炎和支气管哮喘等反应症状, 严重时危及生命 (徐强等, 2023)。红火蚁 (*Solenopsis invicta*) 原分布于南美洲巴拉那河流域, 对人有攻击性和重复蜇刺的能力, 叮蜇时从毒囊中释放毒液, 人被叮蜇后奇痒无比, 且有如火灼般的疼痛感, 其后会出现水泡, 少数人对毒液中的有毒蛋白过敏, 会产生过敏性休克, 有死亡的危险 (周宁等, 2023)。研究发现, 截至 2021 年红火蚁已扩散至华南、华中、华东和西南地区 12 个省份的 579 个县, 在扩散过程中形成了空间聚集型分布格局, 新入侵县与 324 国道和沪昆高速以及相邻县之间的公共边界在空间上呈现显著相关性 ($P < 0.05$)。这种分布格局是由红火蚁婚飞主导的邻近区域间连续式或填充式扩散, 及苗木运输等人为因素驱动的沿 324 国道和沪昆高速跨区域跳跃式扩散共同导致的 (温宏伟等, 2024)。研究表明 2024 年在贵阳市红火蚁的风险综合评价 R 值为 2.35, 属于高度危险, 危害程度等级达到 II 级 (杨芮等, 2024)。

1.2.5 造成入侵地生物基因资源受损

外来物种与本地近缘物种发生杂交时, 可能会改变后者原有的遗传特性, 从而使本土物种基因型在生物群落基因库中的比例发生变化, 造成一些植被的近亲繁殖和遗传漂变, 影响整个生态系统的遗传多样性。如原产于南美洲的南美蟛蜞菊 (*Sphagneticola trilobata*) 原是以景观绿化而引种, 其定居后便迅速向周围的群落蔓延扩展, 又因具有强烈的化感作用而迅速蔓延, 与本地蟛蜞菊 (*Sphagneticola calendulacea*) 杂交形成新种杂交蟛蜞菊, 挤占本地蟛蜞菊基因型在基因库的比例, 造成本地蟛蜞菊基因资源锐减 (李伟华, 2023)。加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*) 原产于北美洲, 因其花序美丽和易于栽培被引入我国, 植株具有极强的繁殖能力, 能够迅速占领荒地、路边和农田, 排斥其他植物生长 (董梅等, 2006)。加拿大一枝黄花与本地一枝黄花 (*Solidago decurrens*) 杂交, 形成新种杂交黄花, 改变了本土

一枝黄花的基因型，降低了其遗传多样性。互花米草 (*Spartina alterniflora*) 引入后与本地近缘物种杂交，改变了本地物种的基因组成，使得本地米草的遗传多样性降低 (Xia et al., 2020)。福寿螺 (*P. canaliculata*) 原产于南美洲亚马逊河流域，引入我国后，与本地一些螺类物种杂交，杂交后代的基因特性与本地螺类不同，改变了本地螺类种群的基因频率，影响了本地螺类的遗传多样性 (Feng et al., 2020)。巴西龟 (*Trachemys scripta elegans*) 作为外来物种，在野外与本地龟类杂交，其强大的繁殖能力和适应能力，使得杂交后代数量增多，逐渐改变本地龟类基因库中原有基因的比例，威胁本地龟类的遗传多样性。

1.2.6 外来物种入侵造成经济损失巨大

外来物种入侵对全球生态环境与经济发展构成严峻挑战，其经济损失规模已引发国际社会高度关注。外来入侵物种防控事关国家粮食安全、生物安全、生态安全和人民群众身体健康。据统计，我国已确认外来入侵物种达 660 余种，数量多、分布广，防控形势严峻。多年来，如何科学评估入侵物种造成的经济损失一直是行业的难点和痛点。研究发现，自 1980 年以来至 2020 年，我国 11 个重大入侵物种造成的总经济损失达 2363.5 亿美元，其中隐性损失达 2232.5 亿美元，占比 87%；而显性损失仅 103.3 亿美元，占 13% (Wang, et al., 2025)。早期研究显示，在 2001 年 12 月至 2003 年 10 月的首次全国外来入侵物种调查中，国家环境保护总局联合南京环境科学研究所组织专家对 4 个国民经济行业门类的 200 余种入侵物种进行系统评估，发现入侵物种年均导致我国 GDP 损失约 1.36% (1198.76 亿元)，其中农林牧渔业直接损失达 160.05 亿元，其他间接生态损失逾千亿元 (国家环境保护总局和南京环境科学研究所，2004)。防控投入方面，中国农业农村部 2022 年专项拨款 12 亿元用于长江流域外来物种入侵防控，地方政府亦同步加大入侵物种防治力度。以广东省为例，2022 年红火蚁防治预算达 5000 万元，而 2019 年统计数据显示，该省红火蚁防控年度支出已超 2 亿元^①。全球视角下，联合国《生物多样性公约》2023 年报告指出，外来入侵物种年均造成全球经济损失逾 4230 亿美元，且过去十年呈年均 12% 的增长趋势^②。美国农业部 2022 年估算，外来病虫害每年导致农业损失约 400 亿美元 (约合 2800 亿元人民币)，仅亚洲鲤鱼治理累计投入即超过 3 亿美元^③。澳大利亚 2019 年研究进一步表明，野兔与野猫等入侵动物引发的生态修复成本高达 135 亿澳元/年 (约合 620 亿元人民币)^④。综上，外来物种入侵的经济损失已远超直接农业损害范畴，其生态修复与防控投入正成为各国可持续发展的重要挑战。

1.3 外来入侵物种的入侵过程

外来物种形成入侵是一个极其复杂的过程，通常可以分为传入、定植、潜伏、扩散和

① 广东省林业局. 红火蚁防控工作报告 (2019 年度). 广州: 广东省林业局, 2020.

② 联合国《生物多样性公约》秘书处. 全球外来物种入侵影响评估报告 (2023). 日内瓦: 联合国环境规划署, 2023.

③ 美国农业部经济研究服务局. 外来物种对农业经济影响分析 (2022). 华盛顿: 美国农业部, 2022.

④ 澳大利亚环境与能源部. 入侵物种生态成本研究报告 (2019). 堪培拉: 澳大利亚政府出版局, 2019.

暴发五个主要阶段（万方浩，2015），每个阶段都对该物种的成功入侵均具有重要作用。

1.3.1 物种传入

外来物种传入本地生态系统存在三种主要途径。

1) 自然扩散（natural introduction）：风媒传播和水流等自然力量可助力物种迁移。例如，一些植物的种子体态轻盈，能借助风力飘散到远方，如微甘菊（*M. micrantha*）能够通过气流从东南亚迁移到香港再到我国广东省（陈佳铭等，2006）；紫茎泽兰（*A. adenophora*）和飞机草（*Chromolaena odorata*）则可能是先通过交通工具被带至中国与越南、缅甸接壤的边境地区，随后再随风或者水流自然扩散进入我国境内（白永华等，2020）；三叶鬼针草（*Bidens pilosa*），因其瘦果带有倒钩刺，容易附着于动物皮毛甚至是人类衣物上进行远距离传播（邓玲姣和邹知明，2012）。

2) 无意引入（unintentional introduction）：指那些伴随人类活动而发生但未被充分意识到的外来物种传入事件。这类情况往往发生在国际贸易、旅游等活动过程中，由于缺乏对潜在入侵物种的认识与相应的防控措施而导致物种入侵。如假高粱（*Pseudosorghum fasciculare*），该物种在20世纪70年代随进口粮食混杂进入中国（卢永星，2021）；红火蚁（*S. invicta*）也是通过货物及运输工具长途跋涉后进入我国（Li et al., 2023）；非洲大蜗牛（*Lissachatina fulica*）可能是因为幼体和卵随观赏植物贸易或是木材运输而传入我国（CABI, 2020）。

3) 有意引入（intentional introduction）：通常是出于某些特定目的，如因经济利益、美学价值或生态修复需要等因素而主动实施的，由于评估不足导致引种不当形成入侵，也是外来入侵物种传入的重要途径之一。例如，空心莲子草（*Alternanthera philoxeroides*）最初是作为优质的牧草资源被引进（杨凤梅等，2022）；凤眼莲（*E. crassipes*）则是为了美化水域环境而特意引种（符丽妹等，2024）；马缨丹（*Lantana camara*）本是作为观赏园艺植物被引入和广泛栽培扩散（李焰焰等，2022）。尽管这些植物在短期内可能带来了一定的好处，但随着时间推移，逐渐显示出较强的竞争性和适应性，最终发展为难以控制的外来入侵物种。

综上所述，了解外来物种入侵过程和途径对于制定有效的预防和管理策略至关重要。通过对每个物种不同入侵阶段特征的深入研究，能够更准确地预测未来可能出现的风险，并提前采取措施减少此类事件发生。同时，这也提醒我们在推动国际化交流与发展的同时，必须加强对进出口物品的检疫力度，提高公众对生物安全问题的认识，从而保证本土生态系统健康与稳定目标的共同维护。

1.3.2 种群定植

外来物种一旦成功踏入新环境，便要直面一系列适应性难题。那些能够突破重重障碍并开启自我繁殖进程的个体，标志着种群定植阶段正式拉开帷幕。这一阶段堪称整个入侵过程的核心关键，毕竟唯有外来物种在新环境中站稳脚跟并成功繁衍后代，才具备进一步发展并对当地生态构成威胁的可能。例如，巴西龟（*T. scripta elegans*）引入我国后，凭借强大的适应能力，在许多自然水域成功繁殖；牛蛙（*Lithobates catesbeiana*）被引入多地

后，能在当地自然环境中生存并繁衍，逐渐形成稳定种群。

1.3.3 种群潜伏

在初步完成定植后，外来物种会经历一段潜伏期。在此期间，该物种或许不会即刻展现出显著的生态影响，而是悄然进行自我调整，以更好地契合当地环境条件。潜伏期的时长差异较大，在此期间，种群数量可能维持相对稳定，甚至出现一定程度的下滑，直至物种完全适应新环境。外来种从建立种群到扩散迁移前的这段时间积累，被称作“时滞效应 (time-delaying)”或“潜伏期 (latent time)”。例如，加拿大一枝黄花 (*S. canadensis*) 刚引入我国时，在相当长一段时间内未大面积扩散，处于潜伏状态；微甘菊 (*M. micrantha*) 最初引入时，也有一段相对平稳的发展阶段，种群数量增长不明显。

1.3.4 种群扩散

当外来物种已深度适应新环境，且种群规模发展到一定程度，便会开启向外扩散的进程。其扩散方式丰富多样包括：①短距离移动：以种子传播为例，许多植物的种子可通过自身弹射、动物取食后排泄等方式在周边区域扩散。如凤仙花 (*Impatiens balsamina*) 的种子成熟后会自动弹射到植株附近；苍耳 (*Xanthium strumarium*) 的瘦果表面带有倒钩，可附着在动物皮毛上，实现就近传播。②长距离迁移：人类活动在其中扮演重要角色。如互花米草 (*S. alterniflora*)，通过船只运输等人类活动，从原产地扩散到世界多个沿海地区 (严雪洁和赵文元, 2025)；松材线虫 (*Bursaphelenchus xylophilus*) 借助木材及其制品的运输，在不同地区传播，造成大量松树死亡 (陈婷婷等, 2025)。③分层扩展：一些植物会先在地面蔓延，然后逐渐向高处攀爬扩展。如地锦 (*Parthenocissus tricuspidata*) 会沿着墙壁、树木等向上生长，不断扩大分布范围；凌霄 (*Campsis grandiflora*) 也会借助攀援根提高攀爬能力，在不同层次空间进行扩展。不同类型的生物会采取各异的扩散策略，一般而言，植物多依赖被动方式扩散，而动物则更倾向于主动探寻新的栖息地。

1.3.5 种群暴发

最终，在特定条件下，已广泛散布于多个区域的外来物种可能会出现数量的急剧飙升，引发“暴发现象”。此时，入侵物种往往会对当地原有的生态系统带来沉重打击，不仅严重破坏生物多样性，还可能对农业、林业以及其他经济活动产生诸多负面影响。暴发期的显著特征为高密度分布与快速扩张，这使得防控工作难度大增。例如，非洲大蜗牛 (*L. fulica*) 在适宜环境下大量繁殖，对农作物、园林植物造成严重破坏 (李绍钦等, 2025)；红火蚁 (*S. invicta*) 暴发时，会攻击其他生物，破坏生态平衡，对农业生产和人类健康都构成威胁 (杨志刚等, 2023)。

1.4 生物入侵机理与研究框架

自 1982 年国际环境问题科学委员会 (Scientific Committee on Problems of the Environment, SCOPE) 提出生物入侵的三大核心问题以来，即什么因素能够决定一个物种

成为外来入侵物种、什么样的特征决定一个生态系统能够被入侵以及如何将外来种的入侵性和生态系统的可入侵性研究结果应用于管理中,这一领域已经成为全球环境保护和生态学研究的重要课题。国内外众多研究表明,并非所有外来物种都会发展成为入侵物种。入侵物种的形成主要取决于三个关键环节:物种的生物学特性(biological attribute)、生态系统的可入侵性(invasibility)、入侵物种与入侵生态系统之间的相互作用(万方浩等, 2015)。

1.4.1 外来入侵物种的入侵特性

1. 生物学适应特性

外来物种之所以能够成功入侵并扩散,其强大的生物学适应能力是关键因素之一。

1) 适应能力强。如福寿螺(*P. canaliculata*)原产于南美洲亚马孙河流域,这种淡水螺通过水族贸易途径进入亚洲多个国家和地区。由于生命力顽强及食性广泛,它能在多种水域环境中生存并迅速扩散,对当地水生植物构成严重威胁(谢咸亮, 2025)。

2) 生长速度快。如空心莲子草(*A. philoxeroides*),又名水花生,是一种快速生长的多年生草本植物。它原产于南美洲,作为牧草引入我国后迅速逸生成为恶性杂草。其旺盛的分蘖能力和快速增长特性使其难以得到有效控制(江燕东等, 2024),给农业生产带来巨大挑战。

3) 光合效率高。如钻叶紫菀(*Conyza canadensis*)、假高粱(*P. fasciculare*)及刺苋(*Amaranthus spinosus*)等入侵植物展示了高效的光合作用能力(He et al., 2023)。凭借这一优势,它们能够在竞争中占据上风,更容易占领新栖息地,从而加速了扩张步伐。

2. 繁殖适应特性

外来物种在繁殖方式上表现出极大的灵活性和高效性,主要包括无性繁殖、有性繁殖以及兼性繁殖三种类型。

1) 无性繁殖适应。如凤眼蓝(*E. crassipes*),俗称水葫芦,是一种典型的通过无性生殖方式进行大规模繁殖的水生植物。它可以通过节间断茎或匍匐茎产生新的植株,且每株每天可增殖数倍,因此在适宜条件下容易泛滥成灾。

2) 有性繁殖适应。如豚草(*A. artemisiifolia*)和小蓬草(*Xanthium sibiricum*)等植物则展示了较强的种子生产能力(温耀辉, 2025)。这些植物不仅能够产生大量的花粉进行远距离传播,还能结出数量庞大且存活率高的果实,确保了其后代能够在新的环境中成功定居。例如,豚草的花粉可以随风传播数百公里,而其种子能够在土壤中长期保存并萌发。

3) 兼性繁殖适应。如紫茎泽兰(*A. adenophora*)和加拿大一枝黄花(*S. canadensis*)则是既能通过根系发出新芽实现无性繁殖又能通过种子进行有性繁殖的典型代表,这种双重繁殖方式极大地提高了它们在新领地上扎根立足的可能性(孙晓方, 2020)。

3. 遗传适应特性

外来物种能够成功入侵并在新环境中迅速扩散,除了强大的繁殖能力和广泛的生态适