



DOI: 10.5846/stxb202207252129

邢文琦, 陈睿山, 卢俊港, 郭晓娜. 生物入侵研究国际进展与中国现状——基于 CiteSpace 的文献计量分析. 生态学报, 2023, 43(16): 6912–6922.

生物入侵研究国际进展与中国现状 ——基于 CiteSpace 的文献计量分析

邢文琦¹, 陈睿山^{1,*}, 卢俊港¹, 郭晓娜²

¹ 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241

² 上海交通大学设计学院, 上海 200240

摘要: 生物入侵是造成全球生物多样性降低和生境变化的重要因素, 并在世界各地造成巨大的经济损失与生态灾害, 然而系统研究生物入侵的研究进展与趋势的文章却较少。基于 Web of Science 核心库、Scopus 以及中国知网, 运用 CiteSpace 知识图谱可视化软件, 分析生物入侵的国内外研究进展。结果表明: (1) 美国对生物入侵的研究起步最早 (1970 年), 国外的文章数量在 1990 年后呈指数增长。国外研究机构及作者间合作强度大, 形成以美国各大高校为中心的合作网络。国外注重生物入侵的驱动因素、压力及入侵状态的研究。近年来国外研究热点涉及入侵物种的种群动态、扩散机制、生态模型、岛屿入侵、风险评估、气候变化及国际贸易等, 并越来越重视气候变化与多元驱动因素相互作用下的生物入侵, 但对外来微生物和无脊椎动物的研究较少。(2) 我国相关研究始于 20 世纪 90 年代, 文章数量在 2000—2010 年间增长迅速。但国内研究机构及作者间合作强度较低, 呈现多核心的分散合作关系。国内注重生物入侵的危害及缓解措施研究。研究热点有入侵途径、机制、危害、防治策略、全球贸易、气候变化与风险评估等, 并越来越关注“一带一路”下的生物入侵及人工智能等科学防治手段。但是近十年, 不同聚类的关注度和热度都在降低, 对入侵驱动机制及预警监测的研究较为薄弱。(3) 未来我国应当突出研究重点, 与国际研究保持同步, 强化全球贸易、气候变化与多元驱动因素相互作用下的生物入侵研究, 构建生物入侵的驱动-压力-状态-响应的综合评估体系。基于对生物入侵研究进展的系统认知, 可为我国科学防治生物入侵提供理论支撑。

关键词: 生物入侵; 研究热点; 启示; CiteSpace; 知识图谱

生物入侵是物种从原生地经自然或人为途径侵入到新环境, 对入侵地的生物多样性、农林牧渔业生产以及人类健康造成经济损失或生态灾难的过程。这些侵入到新环境的物种称为外来入侵物种 (Invasive alien species, IAS)^[1–2]。生物入侵是全球变化的重要因素, 被认为是陆地和淡水生态系统中本土物种灭绝的主要驱动因素之一, 是世界自然保护区的主要威胁之一, 极大改变了世界各地的生境^[3]。由于全球贸易的迅速发展, 伴随着气候变化、土地利用变化、城市化、污染等环境变化, 未来各大洲的外来入侵物种数量将会继续增加^[4]。

我国是世界上外来入侵物种数量最多的国家之一, 外来物种总数已超过 5000 种^[5], 其中成功入侵我国的超过 660 种, 较 10 年前增长了 35%, 较首次记录增长了 135%, 涉及森林、水域、湿地、草地和城市居民区等几乎所有的生态系统。近年来, 我国对于生物入侵的制度建设和管理逐渐重视, 国家分别在 2003 年、2010 年、2014 年和 2016 年发布了四批外来入侵物种名单, 但是仍存在记录在册的入侵物种名录不完整、相关法律体系不健全、跟踪监测和综合评估能力较差及科学防治体系不完善等问题。2021—2022 年我国农业农村部等

基金项目: 国家社科重大项目 (20ZDA085); 国家自然科学基金 (4177111); 中国博士后科学基金 (2022M722055, 2022TQ0205)

收稿日期: 2022-07-25; **网络出版日期:** 2023-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenrs04@gmail.com

部门印发《外来入侵物种普查总体方案》、《外来入侵物种管理办法》与《进一步加强外来物种入侵防控工作方案》等方案。强调要建立外来入侵物种普查和监测制度,每十年组织开展一次全国普查,构建全国外来入侵物种监测网络,开展常态化监测^[6]。我国“十四五”国家重点研发计划中也设立了“重大病虫害防控综合技术研发与示范”、“生物安全关键技术研究”等重点专项,将为我国外来入侵物种防治的基础理论和关键技术提供支撑。

在全球范围内,生物入侵的研究历史较长。早在 19 世纪,达尔文就已经探讨了外来种成功定居和归化的决定因素^[7]。1958 年 Charles S. Elton 的开创性著作对生物入侵发出了早期警告^[8]。1992 年以来,《生物多样性公约》是世界上防治生物入侵的最权威的国际文件。2019 年生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)开始的“外来入侵物种及其控制的专题评估”,将是生物入侵的第一份全球综合评估报告^[3]。然而我国对此研究起步于 20 世纪末,尚未将生物入侵作为一个系统进行综合研究,相关研究落后于北美洲和西欧的发达国家。因此,厘清国内外生物入侵研究的演化特征及趋势十分必要,将进一步推动我国生物入侵过程、机理、影响及响应等研究,促进我国生物入侵研究的创新发展。

本文基于可视化知识图谱绘制软件 CiteSpace^[9],对 Web of Science(WOS)核心数据库和 Scopus,以及中国知网(CNKI)中关于生物入侵的文献进行可视化分析,分析国内外研究的演化特点与发展趋势,提出我国生物入侵研究的展望,以最小化生物入侵的负面影响,促进生态、经济及社会可持续发展。

1 数据来源

使用 CiteSpace 软件,选择 WOS 核心数据库和 Scopus 文献搜索库,选取“invasive alien species”或“biological invasion”作为关键词筛选出 24690 篇文章,数据截取时间为 1970 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日,去重后共计 22471 篇文章。

其次,选择 CNKI 作为中文文献搜索库,选取“外来入侵物种”或“生物入侵”作为关键词搜索到 2867 篇中文文章,数据时间参数为 1996 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日,去重后为 2542 篇。

2 生物入侵研究历史与进展

2.1 生物入侵研究历史

英国学者查尔斯·罗伯特·达尔文早在 1859 年出版的《物种起源》一书中,提出看似矛盾的达尔文归化假说和预适应假说^[7]。一方面,与本土物种亲缘关系远的外来种更容易归化。另一方面,和本土物种亲缘关系近的外来种更易成功入侵^[7],打开了生物入侵的研究大门。国际上对外来入侵物种管理的关注较早,其中美国早在 1912 年通过了《植物检疫法》,授权农业部长监管可能携带有害植物病虫害的苗木进口。1958 年 Charles S. Elton 关于生物入侵的开创性著作对生物入侵发出了早期警告,为外来入侵物种的研究奠定了基础^[8]。1980 年,生态学家明确提出“生态入侵”这一概念^[10-11]。但直到 20 世纪 90 年代,入侵生态学的相关论文才呈指数增长,并将在未来呈现整体增加的趋势(图 1)。

世界各国对于生物入侵的相关研究不断增多。1970—2021 年间,在全球范围内,北美洲和欧洲的发达经济体对生物入侵的研究开始时间早,研究成果和论文数量最多。其中,美国对外来入侵物种的研究远超世界各国,文章超过 8000 篇。其次是位于欧洲的英国、法国、意大利、西班牙、捷克等国家,自 20 世纪 80 年代后期逐渐开展生物入侵的研究。值得一提的是,一些发展中国家对于生物入侵的研究也在持续增加,南非、印度、智利等国家都是自 21 世纪以来,文章数量增长迅速。而中国对于生物入侵的研究始于 1996 年,2000 年以来相关研究数量不断增加,目前文章数量超过 1500 篇,居世界前列(图 2)。

2.2 发文作者及机构分析

国外文献数量最多的机构是美国加利福尼亚大学,为 676 篇(图 3)。其次是斯泰伦博斯大学、美国佛罗里达大学、科罗拉多州立大学、林肯大学、华盛顿大学等。国外的研究力量更集中,合作强度大,研究分支更

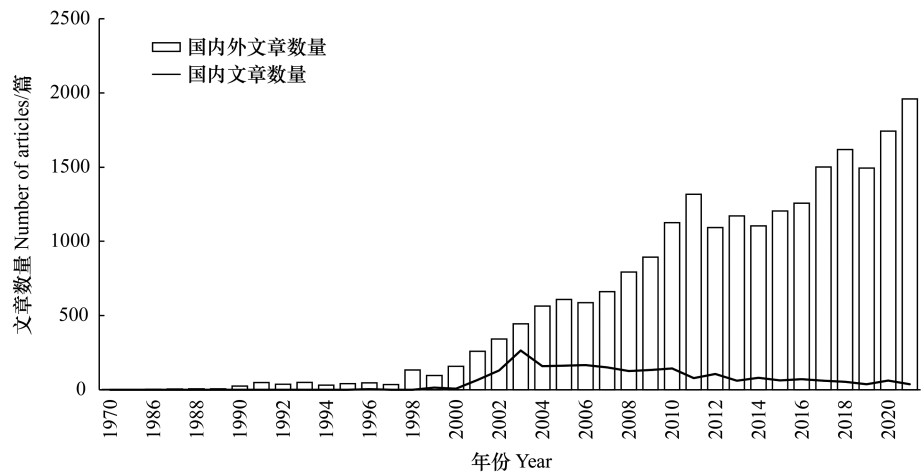


图1 1970—2021 年生物入侵相关研究的文章数量
Fig.1 Number of articles on biological invasions from 1970 to 2021

多。各大高校成为全球生物入侵研究的主导力量,其次是科研院所,尤其是形成了以美国各大高校为中心的合作力量。具体到作者, Richardson D 的发表量最多,达 280 篇。其次, Pyšek P、Hulme P、Van D 等学者的发文量都位于前列,核心作者群之间的研究集中度和合作强度较大。

国内文献数量最多的机构是海南大学,为 18 篇(图 4)。其次是中国农业科学院、中国科学院大学、中科院动物研究所、中国热带农业科学院、北京林业大学等机构。就发文作者而言, 万方浩、李博、郑金龙、吴伟怀等学者发文数量较多,其中万方浩的发文量最多,为 29 篇。相比国外,国内的合作强度较低,研究分支较少,呈现出双核心、分散式的结构模式,一方面形成了以万方浩为核心的中国农科院及中科院等高校机构的合作,另一方面形成以海南大学为中心的众多学者及机构的合作。在两大研究力量之外,部分研究机构如中国检验检疫科学研究院、滨州学院等也形成了分散的次核心力量,次核心力量之间的合作强度较低。

2.3 国内外关键词共现网络

运用 CiteSpace 可视化软件绘制生物入侵研究的高频关键词共现网络,节点越大表明该关键词出现频率越高,出现时间越早。1970 年以来国外研究围绕着“生物入侵”、“入侵物种”、“生态系统”、“生物多样性”、“本土物种”、“北美洲”等关键词展开(图 5)。1996 年以来国内研究围绕“生物入侵”、“外来物种”、“危害”、“有害生物”、“对策”、“风险评估”等关键词展开(图 6)。

其次,统计出现频次最高的 20 个国内外研究的关键词,这些关键词涉及到入侵物种、生态影响、气候变化等多个维度(表 1),涉及到生物学、生态学、地理学、经济学等交叉学科。国内外研究中频次最高的前两项关



图2 1970—2021 年各国有关生物入侵的文章数量
Fig.2 Number of articles on biological invasions by country from 1970 to 2021

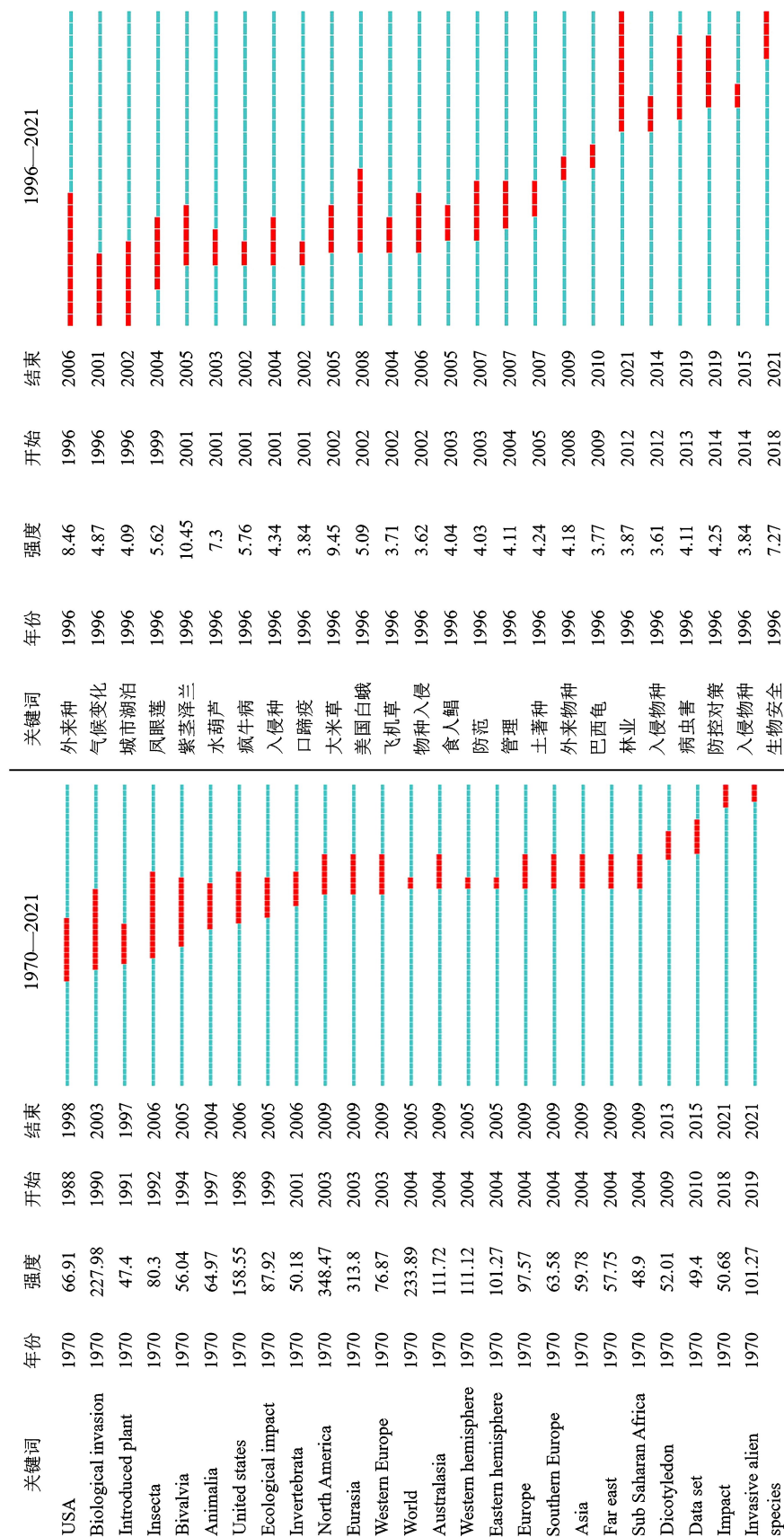


图7 国内外生物入侵研究的突现词(左图是1970—2021年国内文献突现词,右图是1996—2021年国外文献突现词)
 Fig. 7 Emergent words of biological invasion research at home and abroad (the left figure is the emergent words of domestic literature from 1970 to 2021, and the right figure is the emergent words of foreign literature from 1996 to 2021)

表 1 高频关键词统计表
Table 1 Statistics of high-frequency keywords

序号 Serial number	被引频次 Total cites	国外文献关键词 Keywords of Foreign literature	序号 Serial number	被引频次 Total cites	国内文献关键词 Keywords of Domestic literature
1	15125	Biological invasion	1	6886	生物入侵 Biological invasion
2	7074	Invasive species	2	164	外来物种 Alien species
3	3630	Introduced species	3	142	危害 Hazard
4	2671	United States	4	101	对策 Measures
5	2526	Native species	5	89	有害生物 Pest
6	2352	Biodiversity	6	83	外来种 Exotic species
7	1977	Animal	7	80	入侵物种 Invasive species
8	1803	Ecosystem	8	79	入侵 Invasion
9	1645	North America	9	68	生物安全 Biosafety
10	1225	Abundance	10	66	紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i>
11	1218	Europe	11	60	气候变化 Climate change
12	1197	Climate change	12	60	防治 Prevention
13	1122	Dispersal	13	56	生态安全 Ecological safety
14	1116	Physiology	14	51	风险评估 Risk assessment
15	1094	Species richness	15	47	入侵生物 Invasive species
16	1085	Ecological impact	16	45	防控对策 Prevention and control measures
17	1078	Nonhuman	17	45	中国 China
18	1038	Species diversity	18	45	外来植物 Alien plant
19	1036	Plant	19	37	生态系统 Ecosystem
20	989	Population dynamics	20	37	水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>

3.2 国外阶段性特征

国外生物入侵的研究以地方和国家尺度最多,区域尺度较少。文章数量在 1988 年后急速增加,20 世纪 90 年代到 21 世纪初的研究数量增长最快,也是关键词最多的阶段。从不同的阶段特征来看(图 8):

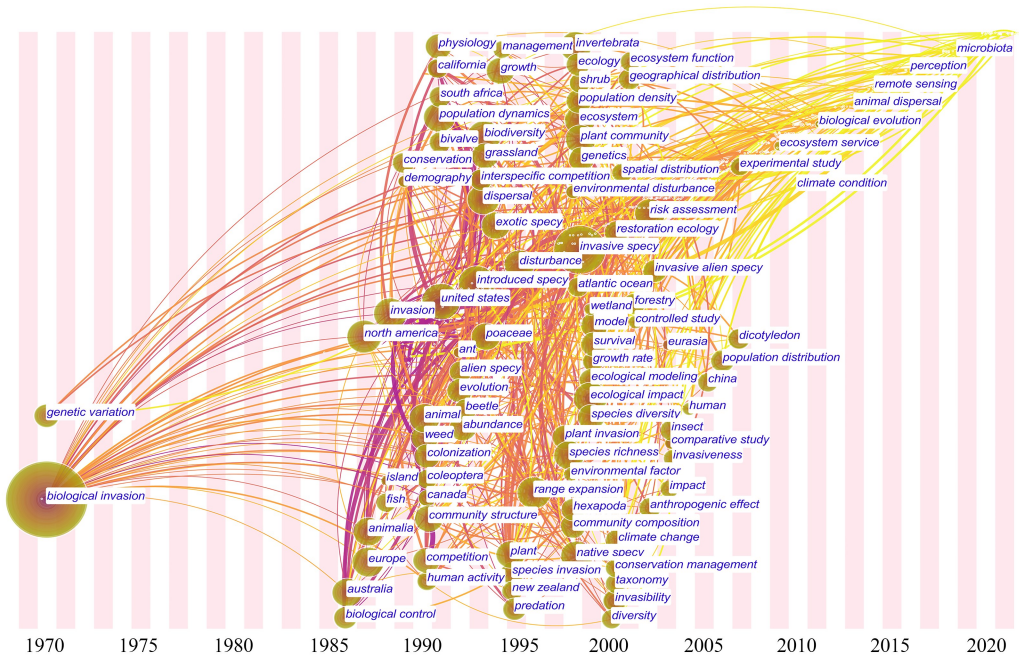


图 8 1970—2021 年国外生物入侵研究的时空分区图谱

Fig.8 Temporal and spatial map of foreign biological invasion research from 1970 to 2021

(1) 1970 年处于起步阶段,国外尤其是美国开始关注生物入侵,以及物种灭绝、基因变化等^[13]。

(2) 1988 年以来,北美洲、欧洲和澳大利亚对于外来动植物的研究最多,这期间岛屿生物入侵也被广泛关注^[14]。

(3) 1992 年以来,主要关注入侵物种的种群动态^[15]、扩散机制^[16–17]及管理。

(4) 2000 年以来,重点关注生物入侵驱动机制^[18]、生态预测模型^[19]、气候变化^[20]、土地利用变化^[21]、风险评估及恢复生态学^[22]。其中亚洲、欧洲南部及南美洲的研究增多,主要关注淡水生态系统中的外来物种。

(5) 2010 年以来,注重外来微生物,生态系统服务^[23]、入侵物种分布模型^[24]、国际贸易及全球气候变化研究^[4,20]。

(6) 2015 年以来,遥感建模与深度学习^[25]、人工智能、环境 DNA^[26]、经济成本、及城市生态系统^[27–28]是其研究热点。

近年来,越来越重视全球气候变化与多元驱动因素相互作用下的生物入侵^[4],并利用技术手段监测与防治生物入侵。其中,对外来动植物的关注多,对外来微生物和无脊椎动物的研究仍存在不足。

3.3 国内阶段性特征

国内生物入侵的研究以地方和区域尺度较多。文章数量在 2000 年后迅速增加,2000—2010 年是研究数量增长最快的阶段。从不同的阶段特征来看(图 9):

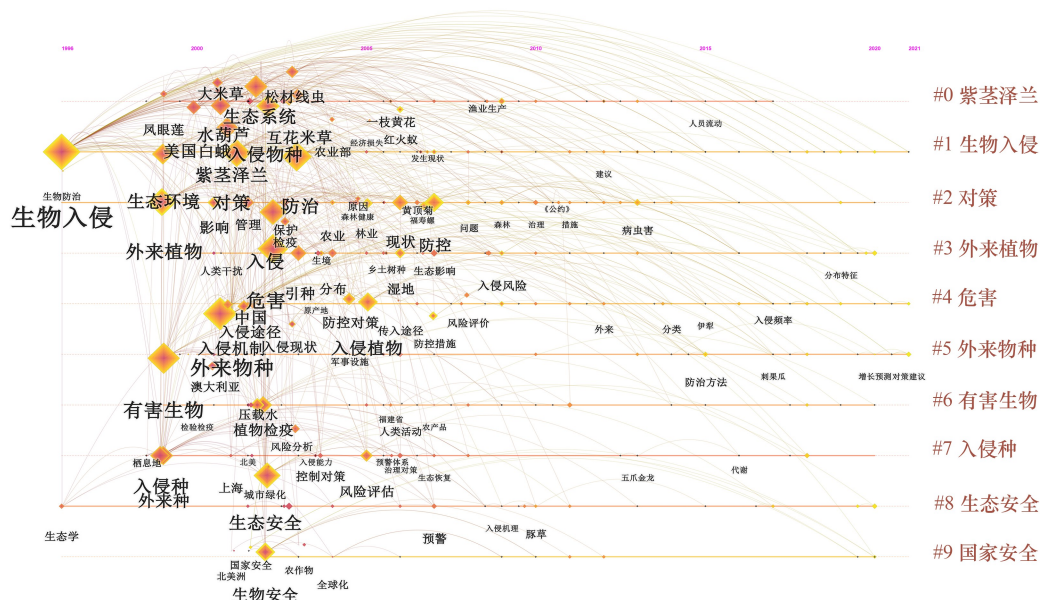


图 9 1996—2021 年中国生物入侵关键词年度变化及聚类分析

Fig.9 Annual changes and cluster analysis of biological invasion keywords in China from 1996 to 2021

(1) 1996 年逐步关注入侵生物的繁殖生长、危害^[29]、有害生物、国家安全及其防治策略^[30]。

(2) 2002 年以来,重点研究生物入侵的危害、入侵途径^[31]、入侵机制^[32]及生态安全^[33]、应对措施^[34]。

(3) 2010 年以来,主要关注全球贸易与经济发展、气候变化下的生物入侵^[35–36],生物入侵模型、入侵机理以及风险评估^[37]。

(4) 2015 年以来,“一带一路”下的生物入侵^[38],入侵物种分布格局^[39]及其增长预测^[40],3S 技术、图像识别等技术手段及综合防控体系^[41]是其研究热点。总体来看,近十年来我国生物入侵的研究重点不够突出,研究内容较分散,且不同聚类的关注度和热度都在降低。

综合来看,目前国内外在生物入侵的多元驱动机制、技术监测及生态恢复等方面还存在不足。例如,在已发表的关于生物入侵的研究中,大约只有 16% 的研究考察了与至少一个驱动因素的相互作用,若考虑到与两

个或更多驱动因素的关联时,这一比例不到 3%^[42]。然而我国对生物入侵的研究落后于美国以及欧洲的发达国家^[43],目前对生物入侵造成的危害及防控建议的关注较多,而驱动机制及预警监测的研究相对薄弱。

4 结论与展望

4.1 结论

本文基于 CiteSpace 知识图谱可视化软件,分析了 1970—2021 年国外和 1996—2021 年国内生物入侵研究的发文量、发文作者与机构、研究热点、进展及趋势。结论表明:

(1) 从发文量和国家看,1990 年后国内外的发文量不断增加,2000 年后我国发文量增长迅速。美国对生物入侵的研究最早,其次是西欧的发达国家及澳大利亚,近年来我国发文量也跃居世界前列。

(2) 从发文作者和机构看,国外研究机构的合作关系更密切,尤其是形成了以美国各大高校如加利福尼亚大学、佛罗里达大学、科罗拉多州立大学等为中心的合作力量。其中,Richardson D、Pyšek P、Hulme P 等学者构成核心作者群,其研究集中度和合作强度较大。而国内的研究机构合作强度相对较低,以中国农科院和海南大学为主体,呈现出双核心、分散式的结构。其中,万方浩、李博、郑金龙、吴伟怀等形成核心作者群,而非核心作者群间的合作交流较少。

(3) 从关键词共现分析看,国外关键词出现频次显著高于国内,研究主题多样化,而国内关键词较为单一。国外生物入侵突现词的整体突现强度大,并且各突现词之间强度差异大,国内突现强度小,差异小。国外文献更注重生物入侵的驱动因素、压力及入侵状态,而国内文献注重危害及防控措施。

(4) 从研究热点和阶段性特征看,近年国外研究热点较广,涉及入侵物种的种群动态、扩散机制、生态模型、岛屿入侵、风险评估、气候变化及国际贸易等。国内研究热点有入侵途径、机制、危害、防治策略、全球贸易、气候变化等。近年来,国外研究越来越重视全球气候变化与多元驱动因素相互作用下的生物入侵,但对外来微生物和无脊椎动物的研究较少。而近十年国内研究重点不突出,研究内容较分散,且不同聚类的关注度和热度都在降低,对入侵驱动机制及预警监测的研究还较薄弱,这也是未来需要关注的重点。

4.2 研究展望

随着全球经济体一体化与国际贸易的飞速发展,我国生物入侵形势十分严峻。我国在入侵物种的分布格局^[44]、动态模拟^[45]、控制与恢复等方面取得了重要进展,综述了生物入侵的入侵机制^[46]、存在的问题及对策^[47—48]等内容。万方浩指出,我国目前已逐渐形成了应对生物入侵的中国方案,从早期的预防预警和检测监测,到中期的扑灭拦截,再到后期联控减灾^[49],对一些重要入侵种进行了初步控制。然而,目前我国在国际研究中的影响力仍较弱,与美国、澳大利亚、日本、英国等国的国家入侵理事会专业机构相比,我国防治生物入侵的机构较分散。研究重点仍在地方或区域尺度上,在生物入侵的遗传学、基因组学^[50]、预防预警等方面仍存在不足。

综合以上分析,我国的生物入侵研究在合作力量、研究深度、研究前沿等方面与国外相比仍有一定差距,未来我国生物入侵研究还需进一步深入探讨的方面包括:

(1) 加强研究机构及研究者之间的合作。国内的发文作者及机构较国外更为分散,研究机构跨区域合作较弱,未来应适度地通过政策引导、核心机构带头等方式,促进跨区域、跨国的研究机构及作者之间的合作。充分发挥跨学科优势,融合生物学、生态学、地理学、社会学、经济学等学科前沿,拓宽生物入侵的研究力量。

(2) 突出研究重点,深化研究内容。进一步深化对我国外来物种入侵的驱动机制及预警监测的研究,加强气候变化与全球贸易对生物入侵的影响机制研究。更多关注生物入侵综合评估,加强外来入侵物种普查与监测,完善生物入侵风险评价体系,强化跨区域的引入-扩散-成灾全程风险预测与定量评估技术。加强科学防治技术研究,综合运用人工智能、机器学习、基因组学、5G、物联网和大数据应用等交叉学科优势,研发外来入侵物种的智能筛查装备,开发高效精准快速检测和监测预警技术,形成适用性强、易推广的综合防治技术。

(3) 与国际研究保持同步,强化全球贸易、气候变化与多元驱动因素相互作用下的生物入侵研究,重视对

外来微生物和无脊椎动物的研究,关注“一带一路”下的生物入侵及恢复生态学等内容。未来应借鉴 IPBES 外来入侵物种评估报告,摸清家底,发挥跨学科优势,深入研究生物入侵的驱动-压力-状态-响应的综合评估体系,逐步完善我国生物入侵的研究体系,维护国家生态安全。

参考文献 (References):

- [1] The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Information on scoping for a thematic assessment of invasive alien species and their control (deliverable 3 (b) (ii)). Medellin, Colombia: IPBES, 2018.
- [2] García-Díaz P, Cassey P, Norbury G, Lambin X, Montti L, Pizarro J C, Powell P A, Burslem D F R P, Cava M, Damasceno G, Fasola L, Fidelis A, Huerta M F, Langdon B, Linardaki E, Moyano J, Núñez M A, Pauchard A, Phimister E, Raffo E, Roesler I, Rodríguez-Jorquera I, Tomasevic J A. Management policies for invasive alien species: addressing the impacts rather than the species. *BioScience*, 2021, 71 (2) : 174-185.
- [3] Islar M. Policy options and tools for decision makers.: IPBES, Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn, Germany: IPBES, 2019.
- [4] Hulme P E. Unwelcome exchange: international trade as a direct and indirect driver of biological invasions worldwide. *One Earth*, 2021, 4 (5) : 666-679.
- [5] 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-Gradow 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: 14435.
- [6] 农业农村部, 自然资源部, 生态环境部, 海关总署.《外来入侵物种管理办法》. (2022-05-31) [2022-07-01]. http://www.fgs.moa.gov.cn/flfg/202207/t20220712_6404546.htm.
- [7] Darwin C R. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. London: John Murray, 1859.
- [8] Elton C S. The Ecology of Invasions by Animals and Plants. Boston, MA: Springer US, 1958: 15-32.
- [9] Chen C M. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57 (3) : 359-377.
- [10] Ludsins S A, Wolfe A D. Biological invasion theory: Darwin's contributions from the origin of species. *BioScience*, 2001, 51 (9) : 780-789.
- [11] 林培群, 余雪标. 生物入侵的现状及其危害与防治. *华南热带农业大学学报*, 2006 (2) : 61-65.
- [12] 万方浩, 郭建英, 王德辉. 中国外来入侵生物的危害与管理对策. *生物多样性*, 2002, 10 (1) : 119-125.
- [13] Hays J D. Geological Investigations of the North Pacific. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 1970: 185-218.
- [14] Usher M B. Biological invasions of nature reserves: a search for generalisations. *Biological Conservation*, 1988, 44 (1/2) : 119-135.
- [15] Ricciardi A, Neves R J, Rasmussen J B. Impending extinctions of North American freshwater mussels (Unionoida) following the Zebra mussel (Dreissena polymorpha) invasion. *Journal of Animal Ecology*, 1998, 67 (4) : 613-619.
- [16] Shigesada N, Kawasaki K, Takeda Y. Modeling stratified diffusion in biological invasions. *The American Naturalist*, 1995, 146 (2) : 229-251.
- [17] Human K G, Gordon D M. Exploitation and interference competition between the invasive Argentine ant, *Linepithema humile*, and native ant species. *Oecologia*, 1996, 105 (3) : 405-412.
- [18] Mack R N, Simberloff D, Evans H, Clout M, Bazzaz F A. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, 2000, 10 (3) : 689-710.
- [19] Gilbert M, Guichard S, Freise J, -C GRÉGOIRE J, Heitland W, Straw N, Tilbury C, Augustin S. Forecasting *Cameraria ohridella* invasion dynamics in recently invaded countries: from validation to prediction. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42 (5) : 805-813.
- [20] Hulme P E. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46 (1) : 10-18.
- [21] Vilà M, Burriel J A, Pino J, Chamizo J, Llach E, Portierias M, Vives M. Association between *Opuntia* species invasion and changes in land-cover in the Mediterranean region. *Global Change Biology*, 2003, 9 (8) : 1234-1239.
- [22] Drake J M. Allee effects and the risk of biological invasion. *Risk Analysis*, 2004, 24 (4) : 795-802.
- [23] Vicente J R, Pinto A T, Araújo M B, Verburg P H, Lomba A, Randin C F, Guisan A, Honrado J P. Using life strategies to explore the vulnerability of ecosystem services to invasion by alien plants. *Ecosystems*, 2013, 16 (4) : 678-693.

- [24] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [25] Vaz A S, Alcaraz-Segura D, Campos J C, Vicente J R, Honrado J P. Managing plant invasions through the lens of remote sensing: a review of progress and the way forward. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 1328-1339.
- [26] Hawes N A, Fidler A E, Tremblay L A, Pochon X, Dunphy B J, Smith K F. Understanding the role of DNA methylation in successful biological invasions: a review. *Biological Invasions*, 2018, 20(9): 2285-2300.
- [27] Gaertner M, Wilson J R U, Cadotte M W, Zenni R D, Richardson D M. Non-native species in urban environments: patterns, processes, impacts and challenges. *Biological Invasions*, 2017, 19(12): 3461-3469.
- [28] Wang C Y, Jiang K, Zhou J W, Wu B D. *Solidago canadensis* invasion affects soil N-fixing bacterial communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 702-713.
- [29] 陆庆光. 生物入侵的危害. *世界农业*, 1999, (4): 38-39.
- [30] 范晓虹, 李尉民. 保护我国生物安全的检疫对策研究. *生物多样性*, 2001, 9(4): 439-445.
- [31] 黄建辉, 韩兴国, 杨亲二, 白永飞. 外来种入侵的生物学与生态学基础的若干问题. *生物多样性*, 2003, 11(3): 240-247.
- [32] 高增祥, 季荣, 徐汝梅, 谢宝瑜, 李典谟. 外来种入侵的过程、机理和预测. *生态学报*, 2003, 23(3): 559-570.
- [33] 郭传友, 王中生, 方炎明. 外来种入侵与生态安全. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(2): 73-78.
- [34] 林雯, 韩雪梅, 徐岩, 徐汝梅. 介绍中国生物入侵网. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(2): 189-194.
- [35] 邓自发, 欧阳琰, 谢晓玲, 清华, 肖燕, 安树青. 全球变化主要过程对海滨生态系统生物入侵的影响. *生物多样性*, 2010, 18(6): 605-614.
- [36] 王静, 黄正文, 王寻. 全球环境变化与生物入侵. *成都大学学报: 自然科学版*, 2012, 31(1): 29-34.
- [37] 孙文涛, 刘雅婷. 生物入侵风险分析的研究进展. *中国农学通报*, 2010, 26(7): 233-236.
- [38] 郭文超, 张祥林, 吴卫, 张伟, 付开赞, 吐尔逊·阿合买提, 丁新华, 依米提·热苏力. 新疆农林外来入侵生物的发生现状、趋势及其研究进展. *生物安全学报*, 2017, 26(1): 1-11.
- [39] 冼晓青, 王瑞, 陈宝雄, 张宏斌, 李垚奎, 万方浩, 张桂芬, 刘万学. “世界 100 种恶性外来入侵物种”在我国大陆的入侵现状. *生物安全学报*, 2022, 31(1): 9-16.
- [40] 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.
- [41] 章家恩, 郭靖, 赵本良, 秦钟. 福寿螺的全方位综合防控技术体系构建与开发利用. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3831-3838.
- [42] Hulme P E. Importance of greater interdisciplinarity and geographic scope when tackling the driving forces behind biological invasions. *Conservation Biology*, 2022, 36(2): e13817.
- [43] 陈宝明, 彭少麟, 吴秀平, 王鹏龙, 马建霞. 近 20 年外来生物入侵危害与风险评估文献计量分析. *生态学报*, 2016, 36(20): 6677-6685.
- [44] 王国欢, 白帆, 桑卫国. 中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素. *植物科学学报*, 2017, 35(4): 513-524.
- [45] 齐相贞, 林振山, 刘会玉. 竞争和景观格局相互作用对外来入侵物种传播影响的动态模拟. *生态学报*, 2016, 36(3): 569-579.
- [46] 徐承远, 张文驹, 卢宝荣, 陈家宽. 生物入侵机制研究进展. *生物多样性*, 2001, 9(4): 430-438.
- [47] 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.
- [48] 陈宝雄, 孙玉芳, 韩智华, 黄宏坤, 张宏斌, 李垚奎, 张国良, 刘万学. 我国外来入侵生物防控现状、问题和对策. *生物安全学报*, 2020, 29(3): 157-163.
- [49] 万方浩. 生物入侵防控的中国方案. *光明日报*, 2022-09-20(07) [2022-11-06]. https://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2022-09/20/nw.D110000gmrb_20220920_2-07.htm.
- [50] 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.