

丛 书 序

习近平总书记反复强调，安全是发展的前提，发展是安全的保障。党的二十大报告指出，要完善国家安全法治体系、战略体系、政策体系、风险监测预警体系、国家应急管理体系，健全生物安全监管预警防控体系。当今时代，人类社会的发展正面临着诸多威胁，而生物威胁无疑是其中最为突出和严峻的挑战之一。从 2001 年美国炭疽邮件生物恐怖袭击事件，到 2003 年的严重急性呼吸综合征（SARS）重大疫情，再到后续一系列如禽流感、甲型 H1N1 流感、埃博拉出血热、寨卡病毒病、非洲猪瘟、新型冠状病毒感染、猴痘等重大疫情的暴发，不仅给民众的生命健康带来了严重危害，更引发了持续的社会动荡，对全球政治、经济、安全、科技、文化格局等产生了深远影响。与此同时，外来有害生物入侵、食品安全等问题长期存在，而生物技术的飞速发展在为全球经济社会带来新机遇的同时，也带来了滥用风险以及新的伦理问题。传统生物安全问题与新型生物安全风险相互交织，使生物安全风险呈现出范围广泛、危害巨大、影响深远、意识形态浓厚等诸多新特点，进而成为国际社会高度重视的治理主题，已成为 21 世纪迫切需要国际社会高度重视的重大安全问题。

2021 年 4 月 15 日，《中华人民共和国生物安全法》正式施行，这一具有里程碑意义的法律，为我国生物安全治理和能力建设奠定了法律基础。该法构建了生物安全风险防控的基本框架，从防控重大新发突发传染病、动植物疫情，到生物技术研究、开发与应用安全管理；从病原微生物实验室生物安全管理，到人类遗传资源与生物资源安全管理等多个维度，全方位地助力我国生物安全防控与治理体系不断完善。在国际舞台上，生物安全问题是全球性挑战，迫切需要各国携手合作、共同应对。习近平总书记提出的“全球发展倡议”“全球安全倡议”，以及构建“人类卫生健康共同体”“地球生命共同体”等理念，为我国积极参与国际生物安全治理提供了行动指南，其“坚持共同、综合、合作、可持续的安全观”的治理理念具有很强的全球共识价值，对维护世界和平与安全、促进人类文明进步具有重要意义。

我国政府历来重视人民生命健康安全，习总书记强调“坚持人民至上、生命至上”。十八大以来，党和政府高度重视生物安全工作，把生物安全纳入国家安全战略体系，生物安全治理成效突出，生物安全科学研究与能力建设取得显著进步，为战胜百年不遇的新冠疫情发挥了重要支持保障作用。在此背景下，科学出版社紧扣国家发展与安全协调大局所需，精心组织我国生物安全领域资深专家和一批优秀一线研究人员，坚持“四个面向”的国家战略，坚持“时代性、科学性、系统性”的内在要求，立足“高层次、高水平、高质量”的学术精品定位，分工合作，全面梳理和研究生物风险威胁的发展趋势与治理策略，彰显了“生物安全风险防控与治理研究丛书”所肩负的时代责任。丛书全面介绍了国内外生物安全形势的现状与趋势，聚焦生物风险防范和威胁应对，内容兼具

知识性、经验性、启发性、可鉴性和前瞻性，是生物安全领域研究与实践高度结合的产物。丛书系统反映了我国在生物安全领域的风险威胁来源演化，总结了生物安全建设的历程与经验，展望了未来的治理路径，对于促进我国生物安全理论研究与学科发展、提升国家生物安全治理水平、推动生物安全能力建设、加强国际合作交流以及构建我国生物安全领域知识体系，都将发挥不可替代的作用。相信本丛书将延续科学出版社此前相关经典著作的学术影响力，在国际上成为生物安全领域研究成果汇辑出版的首创之作，为全球生物安全事业贡献中国智慧和方案。

最后，希望这套丛书能够成为广大读者了解生物安全知识、推动生物安全事业发展的重要参考，也期待更多的有识之士投身于生物安全领域的研究与实践，共同为维护人类的生命健康和全球的安全稳定而努力。

丛书编委会

2025年3月

前 言

在当今全球化加速推进的时代，生物安全问题日益凸显。为应对这一挑战，2020年10月，第十三届全国人民代表大会常务委员会第二十二次会议通过了《中华人民共和国生物安全法》，并于2021年4月正式实施。这是我国总体国家安全领域的一件大事。为积极推进生物安全相关领域的理论与实践建设，保障生物安全战略全面实施，科学出版社启动了生物安全重大出版工程——“生物安全风险防控与治理研究丛书”，邀请中国工程院刘德培院士担任总主编，从医学、农林、食品、环境以及伦理与法律五大领域进行布局，计划出版一批能够系统全面反映生物安全领域重要成果和前沿进展的学术著作。

2021年8月，丛书主编邀请我们编写《全球变化下的生物入侵》分册。当时，我们内心充满热忱，因为我们深知生物入侵是全球变化的一个重要组成部分，与其他要素相互作用，正深刻影响着生态系统结构、功能和生物多样性，对全球生态安全、经济发展以及人类健康构成了严峻的威胁。作为生物入侵领域的工作者，自然肩负着将这个领域进展带给同行和公众的责任。然而，我们也深感犹豫，因为要编写这样一部能反映全球变化背景下生物入侵领域的重要成果和前沿进展的著作，是一个很大的挑战。这个领域涉及的面很广且发展迅速，要完成这样一项任务不是一蹴而就的事，不敢妄为。犹豫之中，我们联系了多位同行，出乎意料的是，大家都非常支持，这给了我们极大的信心，我们便欣然接受了这项任务。就这样，在科学出版社王静副总编辑和李秀伟编辑的参与下，我们很快就开始讨论本书的框架和结构，于2021年底便顺利完成本书的大纲，并邀请到了各个章节的作者。

坦白地说，本书的出版殊为不易，从最初构思到最终付梓，几乎经历了四年时间。本书汇聚了众多生物入侵领域同行的智慧和心血，以全球变化为背景，系统探讨了生物入侵的过程、影响以及防控策略。书中不仅有对入侵科学理论的严谨剖析，还结合了丰富的实际案例，力求使读者能够更加直观地了解生物入侵的复杂性和严峻性。同时，本书也关注生物入侵研究领域的最新动态和发展趋势，旨在为相关领域的科研工作者、政策制定者以及对生态环境问题感兴趣的广大读者提供较为全面且前沿的知识。

对于广大科研工作者而言，本书是深入研究全球变化背景下生物入侵机制、多维度影响和防治的重要参考资料。对于政策制定者而言，本书提供了大量案例和科学依据，有助于他们制定更加合理有效的生物入侵防控政策和管理措施。而对于普通读者来说，本书能够帮助他们增强对生物入侵问题的认识和理解，提高生态保护意识，进而更加积极地参与到维护地球生态安全的行动中来。

在本书即将出版之时，我们要向丁建清、鞠瑞亭、战爱斌和聂明教授表示特别的感谢，他们额外承担了相关章节的审稿任务。我们更要向本书所有作者致以最诚挚的感谢，

正是他们的辛勤付出，以及扎实的专业知识和严谨的态度，才使得这部著作得以顺利完成。他们在生物入侵领域的深入探索和卓越贡献，为我们更好地应对全球变化下的生物入侵问题提供了宝贵的知识和智慧。我们相信，本书的出版将为推动生物入侵研究的发展、促进生物多样性保护事业做出积极的贡献。由于全球变化背景下的生物入侵复杂多变，书中若有不足之处，责任悉由我们承担，请同行们批评指正。

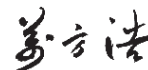
最后但同样重要的是，在本书的整个编辑和出版过程中，科学出版社的王静副总编辑给予了诸多指导；李秀伟和付丽娜两位编辑在近四年的时间里始终参与本书讨论，并提供了耐心和专业的编辑服务。在此，我们谨向科学出版社致以由衷的谢忱。



李 博（云南大学/复旦大学）



吴纪华（兰州大学/复旦大学）



万方浩（中国农业科学院）

2025 年 5 月

目 录

第一篇 绪 论

第一章 全球变化与生物入侵概述	3
第一节 生物入侵	3
第二节 生物入侵是全球变化的重要组成部分	5
第三节 生物入侵与全球变化主要要素的相互作用	9
一、气候变化	10
二、大气 CO ₂ 浓度升高	11
三、氮富集	13
四、土地利用变化	14
五、野火	15
六、国际贸易	16
第四节 本书结构	17
参考文献	18

第二篇 全球变化与生物入侵过程

第二章 气候变暖对入侵植物的影响	25
第一节 我国入侵植物概况	25
一、入侵植物数量特征	25
二、入侵植物分布	27
第二节 气温升高对外来入侵植物的影响	28
一、影响植物入侵的气候假说	29
二、气温升高对外来入侵植物个体的影响	29
三、气温升高对外来入侵植物种群的影响	30
四、气温升高对外来入侵植物群落的影响	31
第三节 全球气候变暖对植物入侵范围的影响	32
一、气候变暖对典型植物入侵范围的影响	32
二、气候变暖对我国外来植物入侵范围的影响	35

第四节 展望	37
一、气候变暖背景下的植物入侵风险	37
二、气候变暖背景下的植物入侵防控	38
参考文献	41
第三章 气候变化下入侵植物的适应	47
第一节 气候变化下植物面临的挑战与应对策略	47
一、气候变化对植物的影响	47
二、植物应对气候变暖的策略	49
第二节 植物适应气候变暖和入侵的共同机制	50
一、表型可塑性	50
二、适应	51
第三节 植物适应气候变暖的研究方法	53
一、生态学方法	53
二、分子生物学方法	54
第四节 外来植物对气候变暖的适应	54
一、外来植物对入侵地气候条件的预适应	54
二、外来植物对入侵地气候的快速适应	55
第五节 展望	56
参考文献	57
第四章 入侵陆栖脊椎动物分布区对气候变化的响应	62
第一节 气候变化与入侵陆栖脊椎动物分布区动态概述	62
第二节 入侵陆栖脊椎动物分布区大小对气候变化的响应	63
一、影响陆栖脊椎动物分布区大小的理论假说	63
二、陆栖脊椎动物入侵过程的气候生态位偏移	67
第三节 入侵陆栖脊椎动物分布区扩张对气候变化的响应	70
一、入侵陆栖脊椎动物在全球化时代的加速扩张	70
二、入侵陆栖脊椎动物分布区扩张过程中对气候变化的跟踪	73
第四节 入侵陆栖脊椎动物生物地理格局对气候变化的响应	77
一、入侵陆栖脊椎动物重塑传统生物地理格局	77
二、塑造入侵陆栖脊椎动物生物地理格局的主要理论假说	80
第五节 总结与展望	82
一、总结	82
二、展望	82
参考文献	83

第五章 气候变化下入侵动物的进化	96
第一节 入侵动物表型可塑性进化	96
一、表型可塑性进化的概念	96
二、入侵动物表型可塑性进化的方式	97
三、诱导表型可塑性进化产生的分子机制	99
四、入侵动物表型可塑性进化案例分析	100
第二节 入侵动物遗传适应性进化	101
一、遗传适应性进化的概念与类型	101
二、遗传适应性进化与表型可塑性进化的关系与相对重要性	102
三、入侵动物遗传适应性进化案例分析	103
第三节 入侵动物进化与气候变化关系的分析方法	104
一、与环境适应相关遗传变异位点的筛选	105
二、预测入侵动物种群的遗传适应性	106
三、全球变化驱动的入侵动物进化与扩散趋势预测案例分析	106
第四节 中国入侵动物案例分析	107
第五节 结论与展望	108
参考文献	108
第六章 气候变暖对入侵物种种间关系的影响	116
第一节 种间关系与生物入侵	116
一、种间竞争与生物入侵	116
二、协同进化与植物入侵	118
三、互利共生与植物入侵	118
第二节 气候变暖对入侵植物与土著植物关系的影响	119
第三节 气候变暖对入侵植物与动物关系的影响	120
一、植食性昆虫	120
二、传粉昆虫	122
三、多级营养	122
第四节 气候变暖对入侵植物与微生物关系的影响	123
第五节 气候变暖对入侵动物及其种间关系的影响	123
第六节 展望	124
参考文献	125
第七章 中国的入侵物种对气候变化的响应	129
第一节 引言	129
一、入侵物种多样性和地理分布	130

二、外来入侵物种的地理起源地分布	132
三、外来物种的入侵生境及影响	133
第二节 中国的生物入侵和气候变化	134
一、气温升高的影响	135
二、降水格局改变的影响	137
三、极端气候事件的影响	139
四、大气 CO ₂ 浓度升高的影响	141
第三节 展望	144
第四节 小结	146
参考文献	146
第八章 CO ₂ 浓度增加对入侵物种的影响	155
第一节 CO ₂ 浓度增加对入侵植物的影响	155
一、对入侵植物个体和种群的影响	155
二、对植物种间竞争的影响	157
第二节 CO ₂ 浓度增加对入侵动物的影响	159
第三节 CO ₂ 浓度增加对群落和生态系统的影响	161
一、对群落的影响	161
二、水生陆生生态系统的差异	164
第四节 结论与预测	165
参考文献	166
第九章 海平面上升与盐沼生物入侵	173
第一节 海平面上升概况	173
一、全球海平面上升趋势	173
二、海平面上升的驱动因素	175
三、海平面上升背景下盐沼湿地的演变	176
第二节 海平面上升对盐沼生物入侵主要过程的影响	177
一、盐沼生物入侵概况	177
二、潮汐过程	178
三、水盐过程	180
四、水沙过程	180
五、生物互作	181
第三节 海平面上升对主要盐沼入侵生物类群的影响	182
一、入侵植物	182
二、入侵动物	185

三、其他入侵生物	186
第四节 结论与展望	187
参考文献	189
第十章 环境污染与植物入侵	197
第一节 与植物入侵相关的环境污染类型概述	197
一、土壤污染	197
二、水体污染	198
三、大气污染	200
四、新兴污染物	201
第二节 环境污染对入侵植物的影响	202
一、入侵植物具有更强的耐受环境污染能力	202
二、污染物提高了入侵植物的抗虫性与抗病能力	203
三、环境污染增强了入侵植物的竞争能力	204
第三节 入侵植物对环境污染的响应	205
一、入侵植物富集和转移污染物	205
二、入侵植物对长期低剂量持续污染的响应	206
三、入侵植物对土壤污染的响应	208
四、入侵植物对水体污染的响应	210
五、入侵植物对大气污染的响应	210
六、入侵植物对新兴污染物的响应	211
七、入侵植物对复合污染的响应	212
第四节 中国入侵植物与环境污染研究案例分析	213
一、美洲商陆	213
二、紫茎泽兰	215
参考文献	216
第十一章 土地利用变化与生物入侵	224
第一节 土地覆盖与土地利用变化	224
一、人类活动与土地利用变化	224
二、气候/气象与土地利用变化	225
三、土地利用变化的根源及复杂性	225
第二节 土地利用变化加剧生物入侵	226
一、农业生产用地改变与生物入侵	228
二、城市用地变化与生物入侵	228
三、景观变化与植物入侵	229

四、以土地利用史预测入侵植物分布.....	230
第三节 生物入侵促进土地利用变化	230
一、多年生木本植物入侵放牧生态系统.....	231
二、桉柳对美国西南部河岸恢复的影响.....	231
三、银荆入侵南非对景观的塑造作用.....	232
四、欧洲青蟹入侵与新英格兰南部滩涂恢复.....	233
第四节 展望	233
一、土地利用变化为入侵创造机会之窗.....	233
二、土地利用和气候变化的综合影响.....	234
三、土地利用规划如何减少入侵	234
四、栖息地恢复中的入侵物种控制	235
五、生物入侵的文化层面及积极影响.....	235
参考文献	235
第十二章 城市化与生物入侵	239
第一节 城市化	239
一、城市化概念	239
二、城市化发展现状	239
三、城市化导致的环境问题	240
第二节 城市化过程中驱动生物入侵的因素.....	243
一、环境因素	243
二、人为因素	245
三、生物因素	245
第三节 城市化对不同入侵阶段的影响	246
一、引入阶段	246
二、定殖阶段	247
三、建群阶段	248
四、扩散阶段	248
第四节 生物入侵对城市生态系统的影响.....	249
一、城市生物区系	249
二、城市环境	251
三、基础设施	251
四、人类健康	251
第五节 结论与展望	252
参考文献	252

第十三章 国际贸易和入侵物种的扩张	259
第一节 国际贸易与生物入侵概述	259
一、国际贸易引起生物入侵	259
二、国际贸易引起生物入侵的特点	260
三、国际贸易引起生物入侵的危害	263
第二节 国际贸易与生物入侵的关系	264
一、国际贸易对生物入侵的直接影响	264
二、国际贸易对生物入侵的间接影响	265
三、生物入侵对国际贸易的影响	266
第三节 国际贸易引致生物入侵的途径	267
一、人为有意引入	267
二、人为无意引入	269
第四节 国际贸易引致生物入侵对我国的影响	272
一、对生态系统功能的影响	272
二、对经济社会发展的影响	273
三、对人类健康的影响	275
第五节 国际贸易引致的入侵物种扩张管理	276
一、入侵物种的预防策略	276
二、入侵物种的治理策略	278
第六节 面临的挑战	279
参考文献	281
第十四章 全球变化与海洋生物入侵	285
第一节 气候变化和人类活动与海洋生物入侵现状	286
一、海洋生物入侵现状	286
二、全球变暖与海洋热浪	288
三、海平面上升	290
四、海岸带人工建筑	291
五、海洋运输	293
六、海水养殖	295
第二节 气候变化和人类活动影响下海洋生物入侵的过程与机制	297
一、气候变化和人类活动对海洋生物扩散与种群连通性的影响	298
二、海洋生物入侵中的跳板作用与避难所效应	299
三、海洋生物入侵中的生理生化机制	300

第三节 气候变化和人类活动影响下海洋生物入侵的后果.....	301
一、气候变化和人类活动影响下海洋生物入侵的生态效应.....	301
二、海洋生物入侵对滨海产业的影响.....	303
第四节 案例分析.....	304
一、黄海大型藻类暴发.....	304
二、潮间带底栖生物分布变化.....	305
参考文献.....	307

第三篇 全球变化与生物入侵相互作用的后果

第十五章 植物入侵、气候变化和生态系统过程.....	319
第一节 生态系统过程.....	320
一、碳循环.....	320
二、氮循环.....	321
三、其他循环.....	322
第二节 植物入侵对生态系统过程的影响.....	324
一、植物入侵对初级生产力的影响.....	324
二、植物入侵对土壤呼吸的影响.....	330
三、植物入侵对生态系统碳库的影响.....	330
四、植物入侵对净生态系统碳交换的影响.....	331
五、植物入侵对固氮的影响.....	332
六、植物入侵对生态系统氮库的影响.....	333
七、植物入侵对生态系统氮输出的影响.....	334
第三节 气候变化对生态系统过程的影响.....	334
一、气候变化对碳循环的影响.....	334
二、气候变化对氮循环的影响.....	336
第四节 气候变化与植物入侵相互作用的潜在影响.....	336
第五节 展望.....	338
参考文献.....	339
第十六章 全球变化下生物入侵对生物多样性的影响.....	347
第一节 外来生物入侵对土著生物多样性的影响.....	347
一、生物入侵对遗传多样性的影响.....	348
二、生物入侵对物种多样性的影响.....	349
三、生物入侵对生态系统多样性的影响.....	349

第二节 生物入侵对生物多样性影响的文献计量分析.....	350
第三节 不同全球变化要素影响下生物入侵对生物多样性的影响.....	351
一、气候变暖背景下生物入侵对生物多样性的影响.....	351
二、氮沉降背景下生物入侵对生物多样性的影响.....	354
三、干旱背景下生物入侵对生物多样性的影响.....	355
四、土地利用方式改变背景下生物入侵对生物多样性的影响.....	357
第四节 生物入侵影响生物多样性的机制.....	358
一、直接影响机制.....	358
二、间接影响机制.....	362
第五节 未来研究方向.....	364
一、生物快速进化.....	364
二、多营养级联系.....	365
三、本地生态系统的敏感性及反馈.....	365
参考文献.....	365
第十七章 生物入侵对生态系统服务的影响.....	373
第一节 生态系统服务概述.....	373
一、生态系统服务概念.....	373
二、生态系统服务类型.....	375
第二节 生物入侵影响生态系统服务的作用机制.....	379
一、生物入侵对生态系统供给服务的影响.....	380
二、生物入侵对生态系统调节服务的影响.....	384
三、生物入侵对生态系统文化服务的影响.....	386
四、生物入侵对生态系统支持服务的影响.....	388
第三节 展望.....	391
参考文献.....	392
第十八章 全球变化下生物入侵对滨海湿地生态系统的影响.....	398
第一节 滨海湿地生态系统生物入侵现况.....	398
一、滨海湿地入侵生物概况.....	398
二、入侵植物.....	398
三、入侵动物.....	400
第二节 全球变化要素与滨海湿地生物入侵的相互作用及其后果.....	402
一、气候变暖.....	402
二、极端气候事件.....	403

三、海平面上升	404
四、污染	404
五、土地利用变化	405
第三节 案例分析	406
一、互花米草在滨海盐沼湿地的入侵	406
二、木本红树植物的入侵	411
第四节 展望	419
参考文献	420
第十九章 全球变化下生物入侵对农业生态系统与粮食安全的影响	434
第一节 全球变化下我国重要农业外来入侵物种的发生趋势	434
一、入侵植物	434
二、入侵害虫	436
三、入侵病原微生物	438
第二节 全球变化下生物入侵对农业生态系统的影响	441
一、生物入侵对农业生态系统的影响	441
二、生物入侵对农业生产的影响	445
第三节 全球变化下生物入侵对粮食安全的影响	447
一、生物入侵对粮食生产的影响	447
二、全球变化下生物入侵对粮食安全的新挑战	448
第四节 加强全球变化下农业生物入侵管控	450
一、农业入侵物种野外智能化监测	451
二、农业入侵物种大数据平台建设	452
参考文献	455
第二十章 全球变化下生物入侵的经济影响	459
第一节 全球变化下生物入侵对经济的影响方式	459
一、全球生物入侵经济影响的动态变化	459
二、全球外来物种入侵经济损失评估	460
三、外来入侵物种资源化利用的经济效益	463
第二节 全球变化背景下的生物入侵经济学	464
一、基于 InvaCost 数据库的外来入侵物种经济损失核算	464
二、外来入侵物种防控的货币化评估体系	467
第三节 结论与展望	467
参考文献	468

第四篇 全球变化下生物入侵的应对

第二十一章 全球变化背景下生物入侵的应对对策及防控措施	473
第一节 将生物入侵管理纳入全球变化应对的整体框架	473
一、生物入侵与全球变化关系	473
二、完善生物入侵防控与全球变化应对法制建设	475
三、全球变化应对与生物入侵管理架构完善	480
四、全球变化背景下生物入侵全民防控网络建设	482
第二节 结合全球变化影响完善生物入侵风险分析体系	483
一、生物入侵风险分析概述	483
二、生物入侵风险分析进展	484
三、全球变化背景下生物入侵风险分析面临的挑战与对策	491
第三节 加强全球变化背景下入侵生物预警防控技术研发及应用	493
一、开展全国性普查,完善国家重点管控对象	493
二、结合传统技术与新兴技术,加强入侵物种的有效监测	494
三、结合传统技术与新兴技术,加强入侵物种的科学预警及防控	496
四、结合全球变化框架,建设入侵物种预警防控技术标准化体系	502
五、制定国家和地方行动计划,推进生物入侵预警防控方案落实	505
六、加强国际合作,建设生物入侵防控区域协作网络	505
第四节 缓解全球变化对入侵的影响,加强受损生境生态修复与效益评估	506
一、结合全球变化影响,厘清生态系统入侵受损趋势	506
二、入侵受损生境生态修复技术及应用	507
三、制定国家和地方行动计划,持续推进入侵受损系统重大生态修复工程实施	509
四、结合全球变化影响,开展生物入侵治理与生态修复工程的效果及效益评估	510
第五节 将全球变化应对和生物入侵防控纳入公民生态科学教育体系	511
一、结合全球变化与生物入侵科学,加强转化科学家人才培育体系建设	511
二、应对全球变化,防控生物入侵,加强公民生态科学教育	511
参考文献	512

第一篇

绪论

第一章 全球变化与生物入侵概述

第一节 生物入侵

纵观人类发展的历史长河，其发展史可以说是一部对地球资源包括生物多样性资源利用的历史，也是一部对地球生态系统改造的历史，所以地球上无处不留下人类的足迹，且当今的地球已成为一个以人类为“关键种”（key species）的巨型生态系统（Vitousek et al., 1997），甚至被认为已进入“人类世”（Anthropocene）。目前，世界人口已突破 81 亿，而且还在快速增长。如果用国内生产总值和人均消费来评价世界的财富，那么我们人类的财富正在不断地增长；但如果我们用生物圈的健康状况来衡量世界的财富，那么我们所拥有的财富正在不断地减少，以至于严重影响到人类的福祉（IPBES, 2019）。所以，今天的我们比过去任何时候都会感到不踏实。原因很简单，我们所居住行星的水圈、大气圈和生物圈等正在经历着快速的变化，而且这种变化的速率比过去任何时候都快得多；更令人担忧的是，这种变化已对我们人类的福祉和地球生态系统的完整性和健康产生了深刻而不可逆转的影响。化石燃料的燃烧改变了大气中的化学组成，从而导致全球气候的变化；人类活动造成了环境污染、土地利用方式的改变、生境丧失或破碎化，最终导致生物多样性的丧失；人类活动带来的生物地理区之间生物区系的交换导致了生物物种种群的重新分布，从而导致生物入侵（biological invasion）等。

简单地说，生物入侵是由生物有机体在生物地理区之间的非自然交换造成的，即由外来物种在其非自然分布区内的种群暴发所导致。在正式定义生物入侵之前，我们先定义外来物种，以及与外来物种相对的土著物种。

土著物种（native species 或 indigenous species）：是指出现在其自然分布区及其自然传播范围内（即在其自然占领的或无须人类的直接或间接引种也能占领的分布区内）的物种、亚种或更低的分类群。我国领土从北到南 5500 km，从东到西 5200 km，跨越约 50 个纬度，从南到北包含热带、亚热带、暖温带、中温带、寒温带等多个气候带，而且生态系统多种多样，因而蕴藏着非常丰富的土著物种。《中国生物物种名录》2022 版共收录物种及种下单元 13.8 万多个，其中物种 12.5 万多个。人们熟知的土著物种如银杏（*Ginkgo biloba*）、稻（*Oryza sativa*）、大熊猫（*Ailuropoda melanoleuca*）、川金丝猴（*Rhinopithecus roxellana*）等。丰富的土著物种构成了我国独特的生态系统类型，实现各种生态系统功能与服务，成为我国得以可持续发展的环境基础和自然资本。

外来物种（alien species）：是指由于直接或间接的人类活动致使其分布区发生改变而出现在本来不存在的地区或生态系统内的分类群（包括其种子、卵、孢子或其他形式的能使其种族繁衍的生物材料），文献中常用的其他英文名称还有：exotic species、introduced species、non-native species 或 non-indigenous species 等。生态系统中外来物种

的存在与人类活动密切相关,是人类有意和无意引入的结果。据统计,美国的外来物种数量非常之巨,达 53 000 种之多(Pimentel, 2001),但到目前为止,我国尚缺乏外来物种的完整清单,因此具体的数量还不得而知。

事实上,许多“外来物种”是人类的宝贵财富,如玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、稻(*Oryza sativa*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、家鸡(*Gallus gallus domesticus*)、黄牛(*Bos taurus*)等重要的经济植物或动物,对大多数国家或地区来说也是外来物种,但它们提供了世界 98% 以上的食物资源(Pimentel, 2001),仅 15 种广泛栽培的植物便为世界人口提供了 90% 左右的食物,为人类社会的可持续发展做出了巨大贡献。然而,也有许多外来物种已对所到国家或地区的环境和经济造成了巨大的损失,如凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、微甘菊(*Mikania micrantha*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)、非洲大蜗牛(*Achatina fulica*)、烟粉虱(*Bemisia tabaci*)、松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)、草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)就是典型的有害外来物种。

文献中,生物入侵的定义比较混乱。由于生物入侵是相对于人类行为的现象,也是人类活动的结果,我们所关心的常常是那些对生态系统结构、功能和服务以及人类经济活动造成影响的外来物种。这里,我们综合不同的观点提供如下的生物入侵定义:当外来物种进入一个过去不曾分布的地区,并能存活、繁殖,形成野化种群(feral population),其种群的进一步扩张已经或将造成不可忽视的生态环境、经济和社会后果,这一过程称为生物入侵;而导致生物入侵的物种称为外来入侵物种(invasive alien species, IAS)(李博和陈家宽, 2002)。所以,根据这一定义,一个外来入侵物种应同时满足如下 4 个基本条件:①地理属性:不属于所考虑国家或生物地理区域原产的物种;②种群趋势:已在新分布区归化(naturalization)且正在逐渐增加其多度或分布越来越广;③对入侵地的影响:在某种程度上已成为有害物种,或至少给所在区域的生态环境或人类的某些经济活动带来严重的负面影响或麻烦;④人类在其中的地位:人类往往是这些物种最初的有意或无意引种的责任者。另一个值得考虑的方面是,外来物种的入侵能力不仅由一个物种的生物学特征所决定,生境的有效性、气候和土壤类型等非生物因素以及竞争和捕食等生物因子等均起着非常重要的作用。

生物入侵影响被入侵区的生态系统结构与功能、生物多样性、经济和人类健康,所以有关其研究已形成了一个重要的生态学分支——入侵生态学,甚至将其冠以“入侵科学”(invasion science)的名称(Ricciardi et al., 2017)。入侵生态学主要研究如下 3 个方面(Davis, 2009)。

入侵机制:研究外来物种成为入侵物种所经历的一系列过程(即抵达、建群、归化、扩张、成灾)及其影响因素,进而认识外来物种入侵成功的生态与进化机制。

入侵影响:评价入侵物种对所入侵区域的生态环境(如生物多样性、生态系统结构、过程和服务以及环境要素)、经济和社会的影响。

入侵管理:研究针对入侵物种的管理对策,达到预防、早期诊断、控制与根除入侵物种,从而使区域面临的入侵压力及生态环境、经济和健康影响最小化的目的。

第二节 生物入侵是全球变化的重要组成部分

早在 1958 年, 英国的动物生态学之父查尔斯·埃尔顿 (Charles Elton) 就在其力作《动植物入侵生态学》(*The Ecology of Invasions by Animals and Plants*) 中警告: 一定不能犯糊涂, 我们正在目睹一场世界动植物区系的重大的历史性灾变。Vitousek 等 (1996, 1997) 认为生物入侵是全球变化的一个重要组成部分, 这有几方面的原因。首先, 生物入侵现象无处不在, 是全球性的, 世界各大洲无论是陆地、海洋还是岛屿均在发生, 就连保护区生物多样性独特性和完整性的自然保护地也未能幸免, 只是其分布呈现出均匀的格局 (表 1-1)。其次, 尽管单个入侵物种所造成的影响可能是局部的, 但是将生物入侵作为一个整体来看, 它对生物多样性、生态环境、经济和社会的影响是全球性的; 例如, 最近的一项研究 (Diagne et al., 2021) 表明, 过去几十年 (1970~2017 年) 全球各国报告的生物入侵治理总成本至少有 1.288 万亿美元, 年平均耗资为 268 亿美元, 到 2017 年估计耗资 1627 亿美元, 而这些成本显然被大大低估, 且其增长趋势没有任何放缓的迹象, 每 10 年约增长 3 倍。最后, 生物入侵与全球变化的其他要素之间存在强烈的相互作用 (图 1-1), 例如, 国际贸易和交通的发展加速了生物入侵过程, 大气中 CO₂ 浓度的升高和全球气候变化、火灾频率和强度的变化、环境污染等也会影响生物入侵过程; 生物入侵也反过来影响这些全球变化过程的规模和速率, 如入侵植物的扩张可能改变生态系统的野火特征 (如火灾发生的时令、频度、强度和影响等)。

表 1-1 部分国家/地区/岛屿植物区系中已定居的外来维管植物多样性、占总区系的百分比 (据此排序) 和外来物种密度 (数据来自 Vitousek et al., 1997; Pimentel, 2011)

国家/地区/岛屿	土著 物种数	外来 物种数	外来物种数 百分比	外来物种密度 (面积对数)
国家				
新西兰	2000	1800	47.4	331.5
挪威	1195	580	32.7	105.3
加拿大	3270	940	22.3	134.3
巴哈马	1104	246	18.2	59.1
芬兰	1250	247	16.5	44.7
秘鲁	1790	314	14.9	51.4
智利	4437	678	13.3	115.3
波兰	2250	275	10.9	50.1
法国	4350	480	9.9	83.6
澳大利亚	25000	2681	9.7	389.4
吉布提	641	44	6.4	10.1
古巴	5790	376	6.1	74.3
埃及	2015	86	4.1	14.3
斯威士兰	2715	110	3.9	25.9
巴拿马	7123	263	3.6	53.8

续表

国家/地区/岛屿	土著 物种数	外来 物种数	外来物种数 百分比	外来物种密度 (面积对数)
卢旺达	2500	93	3.6	21.1
圭亚那	8030	287	3.5	50.6
乌干达	4848	152	3.0	28.3
纳米比亚	3159	60	1.9	10.1
地区				
纽约 (美国)	1940	1083	35.8	210.7
维多利亚 (澳大利亚)	2773	1190	30.0	222.3
安大略 (加拿大)	2056	805	28.1	133.5
珀斯 (澳大利亚)	1510	547	26.6	136.1
密苏里 (美国)	1920	634	24.8	121.1
新南威尔士州 (澳大利亚)	4677	1253	21.1	212.4
不列颠哥伦比亚 (加拿大)	2048	547	21.1	91.5
布宜诺斯艾利斯 (阿根廷)	1369	363	21.0	74.1
佛罗里达中部 (美国)	1746	440	20.1	90.9
明尼苏达 (美国)	1618	392	19.5	73.5
蒙得维的亚区 (乌拉圭)	843	180	17.6	63.8
加利福尼亚 (美国)	4844	1025	17.5	182.6
昆士兰 (澳大利亚)	7535	1161	13.4	186.3
波多黎各 (美国自治邦)	2449	356	12.7	90.1
美国大陆 (美国)	17300	2100	10.8	304.6
阿拉斯加 (美国)	1229	144	10.5	23.3
得克萨斯 (美国)	4498	492	9.9	84.2
墨西哥谷 (墨西哥)	1910	161	7.8	41.5
摩尔曼斯克 (俄罗斯)	983	82	7.7	16.1
北领地 (澳大利亚)	3293	262	7.4	42.8
加利福尼亚半岛 (墨西哥)	2480	183	6.9	35.5
俄罗斯北极地区 (俄罗斯)	1,403	104	6.9	15.9
好望角 (南非)	8270	441	5.1	88.9
加拿大西北地区 (加拿大)	1055	53	4.8	8.1
恰帕斯 (墨西哥)	6650	206	3.0	42.3
乔科 (哥伦比亚)	3818	48	1.2	10.4
岛屿				
阿森松岛 (南大西洋, 英属)	25	>120	>82.8	>60.8
罗得里格斯岛 (毛里求斯)	132	305	69.8	190.4
特里斯坦-达库尼亚群岛 (南大西洋, 英属)	58	119	67.2	59.3
百慕大群岛 (北大西洋, 英属)	165	303	64.7	174.9
不列颠群岛 (英国和爱尔兰)	1500	1642	52.3	304.8
洛德豪岛 (澳大利亚)	206	173	45.6	63.1
夏威夷 (美国)	1143	891	43.8	210.9
关岛 (美国)	327	185	36.1	66.8

续表

国家/地区/岛屿	土著 物种数	外来 物种数	外来物种数 百分比	外来物种密度 (面积对数)
加那利群岛 (西班牙)	1254	680	35.2	176.2
圣胡安群岛 (美国)	546	283	34.1	109.2
马尔维纳斯群岛 (南大西洋, 英国称福克兰群岛)	163	83	33.7	20.4
马里恩岛 (南非)	21	10	32.3	4.1
天使岛 (美国)	282	134	32.2	280.9
加拉帕戈斯群岛 (厄瓜多尔)	604	260	30.1	66.7
圣克鲁斯岛 (美国)	462	157	25.4	65.8
纽芬兰岛 (加拿大)	906	292	24.4	56.6
火地岛 (阿根廷和智利)	417	128	23.5	27.3
夏洛特皇后岛 (加拿大)	469	116	19.8	29.3
奥克兰 (新西兰)	187	41	18.0	15.5
瓜达卢佩岛和马提尼克岛 (加勒比海, 法属)	1668	360	17.8	105.3
格什姆岛/霍尔木兹岛 (伊朗)	230	49	17.6	15.8
格陵兰 (丹麦)	427	86	16.8	15.6
开曼群岛 (西加勒比海, 英属)	536	65	10.8	26.9
麦夸里岛 (澳大利亚)	44	5	10.2	2.6
萨哈林岛 (库页岛) (俄罗斯)	1081	92	7.8	18.9
扬马延岛 (北冰洋, 挪威)	57	4	6.5	1.6
克里特岛 (希腊)	1586	92	5.5	23.4

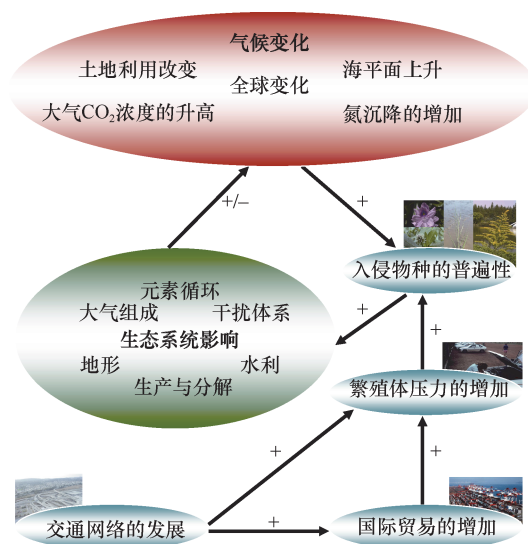


图 1-1 全球变化对生物入侵的影响以及入侵物种对全球变化的反馈 (引自李博等, 2013)

不同全球变化要素可能影响入侵物种的多样性与多度, 图中全球变化的多个要素包括交通和贸易对外来物种有利, 导致入侵物种的数量以及所入侵区域的增加; 由于入侵物种越来越普遍, 它们将改变生态系统结构、过程以及性质, 而且这些变化还将与全球变化的要素之间存在强烈的相互作用。入侵物种的反馈可以是正 (+) 也可以是负 (-), 取决于入侵物种与全球变化要素相互作用的性质

然而，生物入侵作为全球变化要素的观点提出之时，支持这一观点的学者并不多，甚至连研究生物入侵的学术群体也是如此。这一方面表明个人空间观的自然局限，另一方面又反映了对全球变化理解的片面性，即他们强调全球的气候变化而排斥可能同等重要的、人类导致的全球变化的其他方面。现在，越来越多的学者开始接受生物入侵是全球变化组成部分的观点，并强调全球变化的其他要素与生物入侵的相互作用。特别值得注意的是，全球变化领域的旗舰刊物 *Global Change Biology* 将“全球变化”定义为“过去、现在或预计的任何持续的环境趋势，这些趋势影响到地球的大部分地区”；该刊物所涵盖的范围包括但不限于如下 17 个方面 (<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/13652486?journalRedirectCheck=true>)。

- 对流层臭氧、CO₂、SO₂ 浓度的升高 (rising tropospheric ozone, carbon dioxide and sulphur dioxide concentrations)
- 全球辐射的变化与平流层臭氧的消耗 (changing global radiation and stratospheric ozone depletion)
- 生态系统与生物群系崩溃 (ecosystem and biome collapse)
- 物种与生态系统韧性机制 (mechanisms of species and ecosystems resilience)
- 具有全球影响的污染物及污染源影响 (contaminant and pollutant impacts of global relevance)
- 生物适应与进化过程 (biological adaptations and evolutionary processes)
- 面向气候变化的管理 (management in the face of climate change)
- **入侵物种 (invasive species)**
- 城市化 (urbanisation)
- 野火 (wildfire)
- 全球气候变化 (global climate change)
- 大气微量气体的生物汇和源 (biological sinks and sources of atmospheric trace gases)
- 生物地球化学循环的扰动 (perturbations of biogeochemical cycling)
- 土地利用变化与系统连通性 (land use change and system connectivity)
- 生物多样性丧失 (loss of biodiversity)
- 气候变化的生物反馈 (biological feedback on climate change)
- 大气变化的生物减缓 (biological mitigation for atmospheric change)

上面的清单表明，入侵物种是 *Global Change Biology* 这一旗舰刊物所关注的重要议题之一。通过 Web of Science 检索发现，该刊物自 1995 年创刊至 2024 年，以生物入侵为主题的论文（共 455 篇）占到该刊物所发表论文总数的 5.4%，这显然是一个不小的比重。进一步分析发现，该刊物在 1995 年创刊以后的头 10 年里，发表的与生物入侵有关的论文数的确相对较少，之后所发表的论文数量呈现出快速增长的趋势，2024 年达到了 53 篇（图 1-2）。这些均说明生物入侵现象作为全球变化研究的一个重要组分已得到了同行的广泛认可，且越来越受关注；这可能也是生物入侵研究领域发展迅猛的重要原因之一。

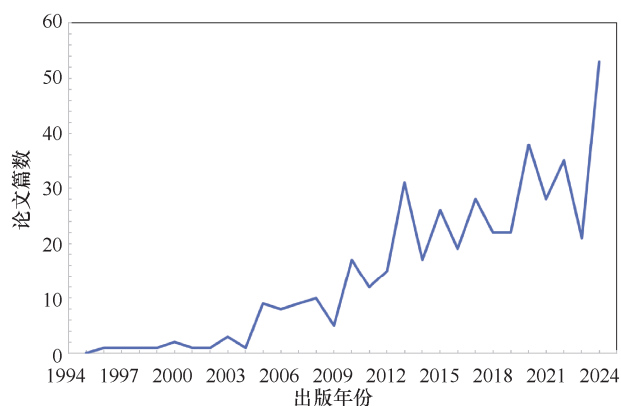


图 1-2 期刊 *Global Change Biology* 发表的与生物入侵相关的论文数随时间的变化

第三节 生物入侵与全球变化主要要素的相互作用

生物入侵是全球变化的重要要素之一，还与其他要素之间存在强烈的相互作用（图 1-1），即受到其他要素的影响，从而使全球变化影响生物入侵的全过程（图 1-3），生物入侵也对其他要素具有不同程度的反馈效应（Hobbs and Mooney, 2005; Ricciardi et al., 2020; IPBES, 2023），所以当今的生物入侵科学最好能在全球变化的框架下进行研究。前面提到，全球变化的要素很多，而且随着对全球变化问题认识的深入，其内容将可能进一步拓展；但这里我们根据早期的综述（李博等，2013），只对生物入侵与全球变化主要要素之间的相互作用做一简要的概述，本书的其他章节将对这一问题做详细的

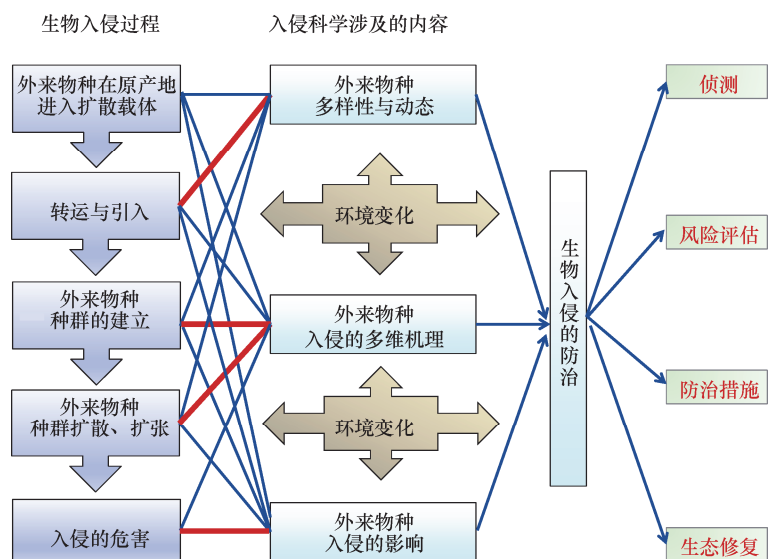


图 1-3 当今的生物入侵科学应在全球变化的大背景下开展研究

全球变化对外来物种入侵过程的影响：图中中间 3 项研究内容受左边的多个生物入侵过程的影响（以蓝线与红线连接，其中红线代表主要过程），而这些过程均又受到全球变化的影响

介绍。值得注意的是, 尽管本书试图概述生物入侵与全球变化主要要素的相互作用, 但已有的研究大多强调全球变化对生物入侵的影响, 而有关生物入侵对全球变化反馈的研究相对较少。因此, 我们也主要强调气候变化、大气 CO_2 浓度增加、氮富集、土地利用变化、野火和国际贸易对生物入侵的影响。

一、气候变化

人类活动引起的气候变化是全球变化的最重要因素。气候变化将影响生物入侵过程的各个阶段 (Hellmann et al., 2008; Theoharides and Dukes, 2007; Ricciardi et al., 2020; 亦见第二至第七章)。在引入 (introduction) 阶段, 外来物种需越过物理障碍从原产地到达目的地。通常情况下, 外来物种借助人类活动来完成这一阶段。未来气候变化可能改变人类活动的各个方面, 如农林牧业、贸易和旅游, 从而影响外来物种的引入 (Hellmann et al., 2008), 但也有研究表明气候变化会减小繁殖体压力从而降低入侵风险 (Gray, 2017)。在拓殖 (colonization) 阶段, 外来物种受到各种非生物因子如温度、水分、空间等的限制, 未来的气候变化若倾向于移除这些限制, 则有利于外来物种的拓殖, 若倾向于产生或加剧这些限制, 则不利于外来物种的拓殖。在建成 (establishment) 阶段, 外来物种要成功地在此区域建成, 需要较快地生长并在与土著物种的竞争中取得优势。气候变化可能直接促进外来物种生长, 增加外来物种竞争力; 也可能使土著物种在改变的环境下竞争力降低, 从而间接使外来物种成功建成。在扩张 (spread) 阶段, 当气候的改变能够增加外来物种的竞争力或扩张速度时, 将有助于已建成的外来物种成为入侵物种, 或使已入侵成功的外来物种的分布区扩展。然而, 当某些地区的气候条件超出外来物种的适应范围时, 也会使它们丧失已有的分布区。

气候变化对生物入侵产生深刻影响的 3 个重要维度是气候变暖、降水格局变化以及极端气候事件的增加。温度是影响生物生长、发育和分布的最重要的环境因子, 温度的升高, 使得低温的限制得到缓解, 生长季长度增加, 冰雪的覆盖减少, 从而使生物能够更好地生长, 具有更强的竞争力, 进而成功拓殖、建成或使原有的分布区向纬度更北、海拔更高的区域扩展 (Hellmann et al., 2008; Walther et al., 2009; Ziska et al., 2011)。温度的升高可以通过遗传和代谢的变化, 促进外来物种的生长、发育与繁殖, 甚至影响其繁殖体的传播, 从而促进植物入侵 (Sun et al., 2022)。当然, 全球变暖并非总是有利于外来物种。此外, 对于植物入侵者而言, C_3 和 C_4 植物对气候变暖的响应会有所不同, C_3 入侵植物的分布区在气候变暖的未来情景下收缩, 而 C_4 入侵植物的分布区可能会总体表现出扩张趋势 (Parker-Allie et al., 2009)。

水分是另一个影响生物生长和分布的重要环境变量, 未来的气候变化将可能使各个区域的降水格局发生改变。在水分限制的干旱半干旱生态系统中, 降雨量的增加无疑会促进物种的存活和生长, 从而有利于某些外来物种的入侵, 增加入侵物种的优势度 (Dukes and Mooney, 1999)。尽管许多研究认为降雨的增加会有助于外来物种入侵 (Ratcliffe et al., 2023), 但相反的结果也同时存在: 更加干旱的气候并不会促进入侵或改变相应的生态系统过程 (Larson et al., 2017), 而在美国西部, 较干旱的气候条件可