

摘要

由于国际间贸易往来逐渐频繁，外来入侵物种快速扩散。目前，生物入侵已被公认为是导致全球生物多样性下降的五大直接因素之一，严重危害了我国生物安全。粤港澳大湾区是我国参与国际合作的重要门户，与世界各国联系紧密，遭受外来物种危害较为严重。在所有的入侵物种中，昆虫占多数，表明我国正面临着外来昆虫带来的入侵压力。然而中国并没有相对全面且公开的潜在入侵昆虫数据库来参考，因此，我国所面临的未知外来入侵物种的防控压力很大，构建一个中国潜在入侵昆虫数据库迫在眉睫。金龟总科 *Scarabaeoidea* 是昆虫中破坏性显著且入侵能力较高的类群，同时也由于时间限制，本研究主要是针对金龟总科昆虫进行分析和讨论。

本研究搜集和整理了世界 138 个国家或地区公开发表的检疫性或入侵昆虫清单，在此基础上整理出了金龟总科检疫性或外来入侵昆虫数据库，按照频次和贸易数据进行加权后筛选得到了 1 种已入侵昆虫和 10 种潜在入侵昆虫。利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件来预测这些物种当前在世界范围内的潜在适生区域，关注在中国，特别是粤港澳大湾区的潜在地理分布。

据模型的预测结果可以看出，所有物种的预测结果都基本包括了实际分布地且受试者工作特征曲线（ROC）下的面积 AUC 值均处于较高水平，这表明模型表现较好。整体来看，1 个已入侵中国的物种和 10 个尚未入侵中国的物种的潜在分布区域较广。具体结果如下：在世界范围内各大洲均面临超过 4 个物种的威胁，其中亚洲的东部和南部国家面临 10 个尚未入侵中国的物种威胁；而在中国范围内，对已入侵物种的预测结果与其实际分布情况（已入侵四川）不一致，这可能与物种分布信息不全或相关信息尚未发表等有关。而尚未入侵中国的 10 个物种的适生区域主要集中在我国中部、东部和西南地区，涉及粤港澳大湾区、云南、四川、西藏、台湾、贵州等多个省区。按在中国的适生面积大小排序为：日本弧丽金龟 *Popillia japonica*、檀香喙丽金龟 *Adoretus versutus*、暴虻犀金龟 *Oryctes boas*、独虻犀金龟 *Oryctes monoceros*、非洲黑甲虫 *Heteronychus arator* 的适生面积 >10%，欧洲鳃金龟 *Amphimallon majale*、白异丽金龟 *Anomala pallida* 和蔷薇刺鳃金龟 *Macroductylus subspinosus* 的适生面积超过 ≥5% 且 <10%，新西兰草金龟 *Costelytra zealandica* 和巴布亚三角犀金龟 *Scapanes australis* 的适生面积 <5%。另外，按照在粤港澳大湾区内具有的潜在适生区域的情况将物种分为一级关注物种和二级关注物种，其中一级关注物种（按适生情况排序）有檀香喙丽金龟、白异丽金龟、日本弧丽金龟、欧洲鳃金龟和蔷薇刺鳃金龟，其它 5 个物种为二级关注物种，

应重点预防一级关注物种并联合地方环境保护部门对一级和二级关注物种进行综合防控。

未来，金龟总科检疫性或外来入侵昆虫数据库也许会成为我国各海关部门和地方农业、林业、环境等部门进行科学预防、合理规划的重要参考。地方也应注重对入侵物种危害的宣传工作，健全群众的生物安全防范意识。

关键词： 检疫性或入侵； 适生区分析； 粤港澳大湾区； MaxEnt

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 前言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外入侵昆虫研究现状.....	2
1.3 外来入侵物种数据库.....	3
1.4 研究类群及研究区域.....	4
1.5 研究目标及内容.....	5
1.6 技术路线.....	6
第二章 材料与amp;方法.....	7
2.1 数据库信息和贸易数据来源.....	7
2.2 地理分布和环境信息来源.....	7
2.3 建模方法.....	9
2.4 研究对象.....	9
2.4.1 研究对象筛选原则.....	9
2.4.2 金龟总科检疫性或外来入侵昆虫数据库已入侵中国的物种.....	10
2.4.2.1 五月鳃金龟 <i>Melolontha melolontha</i>	10
2.4.3 金龟总科检疫性或外来入侵昆虫数据库未入侵中国的物种.....	11
2.4.3.1 日本弧丽金龟 <i>Popillia japonica</i>	11
2.4.3.2 非洲黑甲虫 <i>Heteronychus arator</i>	12
2.4.3.3 独蛀犀金龟 <i>Oryctes monoceros</i>	12
2.4.3.4 暴蛀犀金龟 <i>Oryctes boas</i>	13
2.4.3.5 欧洲鳃金龟 <i>Amphimallon majale</i>	13
2.4.3.6 史氏食叶鳃金龟 <i>Phyllophaga smithi</i>	14
2.4.3.7 巴布亚三角犀金龟 <i>Scapanes australis</i>	14
2.4.3.8 檀香喙丽金龟 <i>Adoretus versutus</i>	15

2.4.3.9	新西兰草金龟 <i>Costelytra zealandica</i>	15
2.4.3.10	庭院蔗齿爪鳃金龟 <i>Holotrichia serrata</i>	16
2.4.3.11	白异丽金龟 <i>Anomala pallida</i>	16
2.4.3.12	蔷薇刺鳃金龟 <i>Macrodactylus subspinosus</i>	17
第三章 结果		18
3.1	潜在重要外来入侵昆虫筛选结果	18
3.2	潜在重要外来入侵昆虫适生区分布情况	19
3.2.1	已入侵中国的种类—五月鳃金龟 <i>Melolontha melolontha</i>	19
3.2.1.1	环境变量选择及模型评价	19
3.2.1.2	五月鳃金龟的适生区分布	19
3.2.1.3	五月鳃金龟的分布与环境变量间的关系	20
3.2.2	尚未入侵中国的种类	22
3.2.2.1	日本弧丽金龟 <i>Popillia japonica</i>	22
3.2.2.1.1	环境变量选择及模型评价	22
3.2.2.1.2	日本弧丽金龟的适生区分布	22
3.2.2.1.3	日本弧丽金龟的分布与环境变量间的关系	24
3.2.2.2	非洲黑甲虫 <i>Heteronychus arator</i>	25
3.2.2.2.1	环境变量选择及模型评价	25
3.2.2.2.2	非洲黑甲虫的适生区分布	26
3.2.2.2.3	非洲黑甲虫的分布与环境变量间的关系	27
3.2.2.3	欧洲鳃金龟 <i>Amphimallon majale</i>	29
3.2.2.3.1	环境变量选择及模型评价	29
3.2.2.3.2	欧洲鳃金龟的适生区分布	29
3.2.2.3.3	欧洲鳃金龟的分布与环境变量间的关系	31
3.2.2.4	独蛀犀金龟 <i>Oryctes monoceros</i>	32
3.2.2.4.1	环境变量选择及模型评价	32
3.2.2.4.2	独蛀犀金龟的适生区分布	33
3.2.2.4.3	独蛀犀金龟的分布与环境变量间的关系	34

3.2.2.5	暴虻犀金龟 <i>Oryctes boas</i>	35
3.2.2.5.1	环境变量选择及模型评价	35
3.2.2.5.2	暴虻犀金龟的适生区分布	36
3.2.2.5.3	暴虻犀金龟的分布与环境变量间的关系	37
3.2.2.6	蔷薇刺鳃金龟 <i>Macrodactylus subspinosus</i>	39
3.2.2.6.1	环境变量选择及模型评价	39
3.2.2.6.2	蔷薇刺鳃金龟的适生区分布	39
3.2.2.6.3	蔷薇刺鳃金龟的分布与环境变量间的关系	40
3.2.2.7	檀香喙丽金龟 <i>Adoretus versutus</i>	42
3.2.2.7.1	环境变量选择及模型评价	42
3.2.2.7.2	檀香喙丽金龟的适生区分布	43
3.2.2.7.3	檀香喙丽金龟的分布与环境变量间的关系	45
3.2.2.8	巴布亚三角犀金龟 <i>Scapanes australis</i>	46
3.2.2.8.1	环境变量选择及模型评价	46
3.2.2.8.2	巴布亚三角犀金龟的适生区分布	47
3.2.2.8.3	巴布亚三角犀金龟的分布与环境变量间的关系	48
3.2.2.9	新西兰草金龟 <i>Costelytra zealandica</i>	49
3.2.2.9.1	环境变量选择及模型评价	49
3.2.2.9.2	新西兰草金龟的适生区分布	50
3.2.2.9.3	新西兰草金龟的分布与环境变量间的关系	51
3.2.2.10	白异丽金龟 <i>Anomala pallida</i>	53
3.2.2.10.1	环境变量选择及模型评价	53
3.2.2.10.2	白异丽金龟的适生区分布	53
3.2.2.10.3	白异丽金龟的分布与环境变量间的关系	55
第四章	讨论	57
4.1	预测结果讨论及物种分级	57
4.2	分析结果对比与共性讨论	59
4.3	其他应受关注的物种	60

第五章 结论与展望.....	61
参考文献.....	62
附 录.....	73
致 谢.....	i
关于学位论文原创性/使用授权的声明.....	ii
在学期间的科研情况.....	iii

Abstract

With the frequent trade and the alien invasive species rapid spread in the world, biological invasion are recognized as one of the five direct factors leading to the decline of global biodiversity, which endangers the biosecurity of our country. As an important gateway for China, the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area is connect with other countries in the world closely and suffers more serious harm from invasive species. Insects are the majority of invasive species indicating that China is facing invasive pressure from alien insects. But China does not have a comprehensive and publicly available database of potential invasive insects, which is also facing great pressure on the prevention and control of unknown invasive alien species. Scarabaeoidea (scarab beetles) are a highly destructive and invasive group of insects. Due to time constraints, this study will focus on the scarab beetles.

In this study, we collected and collated a preliminary database of quarantine or invasive species from 138 countries or regions, and based on it, a database of quarantine or invasive scarab beetles was established. Finally, one invasive insect and 10 potential invasive insects were obtained. The MaxEnt model and ArcGis software were used to predict the potential suitable areas of these species in the world, with attention to the potential distribution in China, especially in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

According to the predicted results, it showed that all species' potential distribution include the actual distribution and the AUC (Area Under ROC Curve) values are at a high level, indicating that the model performed well. Overall one invasive species and 10 species which have not invaded China have a widely potential distribution. The specific results are as follows: Every continent faces more than four species threaten worldwide, among them Asia faces 10 species invasion. Within China, there is no suitable areas for *Melolontha melolontha* (have invaded), and the predicted results are inconsistent with the actual distribution, which might be related to incomplete distribution data or unpublished information. The suitable areas of the 10 species that have not invaded China were mainly concentrated in central, eastern and southwest China, involving the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Yunnan, Sichuan, Tibet, Taiwan, Guizhou, Jiangsu and other provinces. Ranking according to the size of

suitable areas in China are *Popillia japonica*, *Adoretus versutus*, *Oryctes boas*, *Oryctes monoceros*, *Heteronychus arator* (the suitable areas for the top five species are >10%), *Amphimallon majale*, *Anomala pallida*, *Macroductylus subspinosus* (these three species are >5% and <10%), *Costelytra zealandica* and *Scapanes australis* (these two species are <5%). Within the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, species were classified into primary concern species and secondary concern species. Primary concern species (in order of their suitability) included *Adoretus versutus*, *Anomala pallida*, *Popillia japonica*, *Amphimallon majale* and *Macroductylus subspinosus*, while the other five species were considered secondary concern species. It is necessary to focus on the prevention of primary concern species and cooperate with local environmental protection departments to prevent the primary and secondary concern species.

In the future, the database of quarantine or invasive scarab beetles may become an important reference for scientific prevention and rational planning by customs and environmental protection departments. And localities departments should also pay more attention to strong the masses awareness of biosecurity prevention.

Key Words: Quarantine or invasive; Suitable areas; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; MaxEnt

第一章 前言

1.1 研究背景

外来入侵物种是生态学领域近年来的研究热点之一，是全球经济一体化过程中不可避免的问题，对全球生物多样性都存在着威胁^[1]。近年来，由于国际间贸易往来逐渐频繁，外来入侵物种快速扩散，世界各国都深受其害。中国是一个开放的国家，是经济全球一体化快速发展的国家之一，与世界各国特别是“一带一路”沿线国家都存在友好的贸易关系^[2]。随着全球各国贸易的飞速发展和“一带一路”倡议的友好推进，我国的外来入侵物种数与入境人数、进出口总额等成正比，整体上呈频率增加，种类增多的特点和趋势^[3]，经万方浩（2009）等人统计后发现外来入侵物种在中国的地理分布呈由东南向西北逐渐减少的格局，这与中国东南部经济的快速发展、生态环境多样化及适宜的气候条件紧密相关^[4,5]。

自然因素和人为干扰是构成入侵的重要原因。当一个生物入侵原生地以外的区域后，能否成功建群并造成危害（即构成入侵）受生物因素和非生物因素的影响^[6]。如当地的生物多样性、气候和天敌等自然因素，还有森林绿地、人为携带等人为影响。虽然自然因素是外来物种构成入侵的根本条件，但人类活动是外来物种得以生存并泛滥的关键。客观来看，人类活动在一定程度上加快了物种的迁移，经人类干扰的区域更易受到外来物种的侵袭，如城镇绿化带、道路边缘、乡村农田等地^[7,8]；主观来看，近年来人类以宠物等为借口，为了满足个人的精神需求而从国外携带非本土物种进境，甚至放生至我国自然环境中的事件时有发生，这也是外来物种在我国造成严重威胁的原因之一。

外来物种通过自然扩散，人为扩散和随海关进出口货物、包装、运输工具等扩散进入原生地以外的地区^[9,10]。海关口岸是外来物种特别是外来昆虫进入我国的第一道防线^[11]。截至 2017 年，已知构成入侵的农林外来物种达 640 余种，其中外来昆虫就超过了 130 种，由此而带来的经济损失超过 500 亿元/年^[12,13]。另外，我国海关总署动植物检疫司（<http://dzs.customs.gov.cn/>）发布的《中华人民共和国进境植物检疫性有害名录》中共 446 种检疫性有害生物，其中昆虫数量约占总数的 33%（148 种）；更需要注意的是统计发现，近年来我国每年各口岸检疫出的物种大部分来自货物检疫且昆虫占多数^[14-17]，表明我国正面临着生物入侵，特别是昆虫入侵带来的威胁^[13]。一般情况下，一旦外来昆虫已经爆发危害，便很难再进行控制^[18]，而最有效的方式就是在最初入侵或尚未入侵时就加以限制，即早期预防比后期控制更为有效。

随着外来入侵昆虫研究的不断深入，生态学、生物学等领域的专家学者开始利用统计学方法进行物种的（潜在）适生区分析。常用于适生区预测的生态位模

型主要有 CLIMEX 模型，Genetic Algorithm for Rule-set Production (GARP 算法模型)，Maximum Entropy Species Distribution Modeling (MaxEnt 最大熵模型) 等。MaxEnt 模型是在进行(潜在)适生区分析的过程中使用最为广泛的模型，可通过使用有限的地理分布信息和气候环境因素，在二者相关性不明的情况下，定量的预测物种的地理分布^[19]。其预测结果在一定程度上描绘出了预测物种的基本生态位，并投影到地理区域中，最终得到物种的潜在适生区^[9]。本文将使用 MaxEnt 模型来进行潜在适生区的分析^[20]。通过探索生态维度，估算潜在入侵风险，可为管理具有潜在入侵风险的物种提供参考。如齐国君等人^[21]和 Wan 等人^[22]利用 Maxent 模型对目标物种的适生情况进行预测和分析，为后期制定检疫和预防措施提供了依据。

1.2 国内外入侵昆虫研究现状

自然保护联盟(IUCN)定义外来物种的概念为出现在其原本或当前的自然生存及潜在扩散范围之外的种/亚种/以下的分类阶元，包括该物种可能存活并随后繁殖的任何部分；对外来入侵物种的定义是在本地的生态系统中形成了自我再生能力，或许已经对环境和人类的生产生活构成危害或消极影响的外来物种^[23~25]。万方浩(2009)在《中国生物入侵研究》一书中对外来入侵生物的定义为指非本地的(非中国原产)，对农林牧渔业生产、生物多样性、生态环境和人类健康构成威胁与危害，能在自然界自然繁殖的生命有机体^[5]。因此，并非所有的外来物种进入原生地以外的地区都能成为入侵物种。外来入侵物种是国际社会共同关注的生态学问题。外来物种入侵常常降低本地种的遗传和物种多样性，会导致群落结构变得简单，甚至导致生态环境的结构和功能被破坏，威胁人类健康与社会安全^[26,27]。

“生物入侵”的概念出现的较晚，但是相关研究却由来已久。20世纪80年代以前，查理斯·埃尔顿(Charles S. Elton)在1958年出版的专著 *The Ecology of Invasions by Animals and Plants* 中就提出了多个理论和假说来对生物入侵进行解释，被认为是入侵物种研究的开端^[28]。但当时人们并未重视这一问题，随着人类社会的快速发展和国际贸易合作越来越频繁，生物入侵已经成为了一个世界性的问题^[29]。到20世纪80年代，越来越多的生态学家、生物学家意识到了这个问题并着重对外来入侵植物的研究，在这一期间国际环境问题科学委员会(Scientific Committee on problems of the Environment)提出了有关生物入侵的3大核心问题，即什么因素能决定一个物种成为外来入侵种；什么样的特征决定了生态系统能被入侵；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^[5]。20世纪90年代后，随着各国之间的联系愈加紧密，外来物种的入侵在全球范围内呈现出了快速增长的趋势，生物安全、外来物种入侵也成为了国际社会共同关注的问题^[26]。

生物安全是国家安全体系的重要组成部分^[30]，而外来入侵物种是生物安全问题的主要来源^[31]。随着世界各国相互联系程度的不断加深，不同领域的专家学者越来越重视国际合作，其中外来入侵昆虫对于国内外的政治经济发展、社会和人类发展的影响日趋加强^[32,33]。目前，外来入侵物种在世界各国已经造成了巨大的经济损失，经过估算，仅入侵昆虫造成的损失就超过了 700 亿美元/年，由此产生的相关卫生成本超过 69 亿美元/年^[34]。外来入侵昆虫的数量仍在不断的增加，目前仍是全球首要关注的问题之一。2000 年以前，国外学者已经开始了对外来入侵昆虫的生物学信息、入侵建群的影响因素、入侵动态等的初步研究^[25,35-37]。近几年，国外学者对外来入侵昆虫的研究集中在外来有害物种的习性、与寄主植物关系、被入侵地的环境、对濒危物种和有害物种的适生区进行预测等方面^[38,39]，强调对不同时空尺度进行研究的价值，强调与国际同行的合作，以及考虑入侵物种与环境因素的相互作用等^[32,40]，这也将会是外来入侵昆虫未来的研究方向。

我国是世界上受外来物种入侵危害最严重的国家之一^[41]。外来入侵物种，特别是入侵昆虫在我国呈物种种类多，蔓延速度快、危害重等特点。建国以来，我国农林生态系统外来入侵昆虫新增 131 种，约以 1-2 种/年的速度不断新增，2005-2013 年是快速增长期，约以 4-5 种/年的速度不断增加；而 2013 年以后，以入侵昆虫的新增种类逐渐减少，约以 2-3 种/年的速度不断增加^[42]，尽管如此，我国仍面临着外来昆虫不断入侵的风险^[43]。我国对外来入侵昆虫的研究起步较晚，2000 年之前主要集中在对入侵昆虫的生态学、防控等方面进行研究^[44-46]；但从 2002 年开始，在国家科技支撑计划、国家重点研发计划等一系列项目的重点关注和支持下，与入侵昆虫有关的基础性研究和防控技术均取得了一定的成果^[13,42,47,48]。除此之外，我国相关领域的专家学者还提出了一些与生物入侵有关的基础理论和假说，揭示了红火蚁 *Solenopsis invicta*、草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 等重大入侵害虫的入侵机制和危害^[49-55]，创新了对外来入侵昆虫的早期预警、绿色防控等技术和产品^[47,56,57]。当前，我国有关入侵昆虫的风险评估的内容研究方面，以适生区预测的研究最多^[58]。

1.3 外来入侵物种数据库

外来入侵物种数据库是开展入侵物种早期预警、应急防控、阻截引入等工作的基础数据，同时也是各个政府的管理部门制定预防措施，规划未来发展和普及相关入侵物种知识的重要平台。数据库应包含全面充足且可靠的数据信息及快捷方便的查询、分类和管理的功能，便于后期补充更新物种的分布数据^[59]。

1990 年之后，各个国家的政府部门才开始建立与外来入侵物种相关的数据库。1991 年，美国的农业动植物健康检察服务局(<https://www.aphis.usda.gov/aphis/home/>)

建立了入侵生物信息管理系统，系统中包括有关害虫和外来节肢动物等的数据库^[60]。到了1997年，国际科学联合环境问题科学委员会、世界自然保护联盟物种生存委员会入侵生物专家组和联合国环境规划署共同发起了全球入侵物种项目，建成了第一个专业的全球生物入侵数据库（Global Invasive Species Database, GISD, <http://www.iucngisd.org/gisd/>）^[59,60]。GISD数据库着重关注威胁生物多样性的外来入侵物种，涉及了动物、植物和微生物^[60]。数据库是进行科学研究的基础，目前加拿大、美国、澳大利亚、意大利等国家已经陆续开发了入侵物种数据信息系统和持续开展数据库构建和完善的相关工作，如欧洲外来入侵物种数据库、加拿大野生动物联盟。此外，为了有效防止外来入侵昆虫的传播，许多国家已开始编制本国的检疫性或侵入性昆虫清单。如意大利农业、食品和林业政策部（<https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/202>）于2016年公布了欧盟检疫害虫清单。

我国对外来入侵物种数据库方面的研究起步较晚，但却发展迅速。2001年，“中国生物入侵网”作为我国的第一个与生物入侵有关的专业网站正式被建立，是我国生物入侵进行早期预警、信息交流和提高公众认识的重要平台^[61]。之后又有中国农业有害生物信息系统、环保部外来入侵物种数据库^[60,62]、中国国家有害生物检疫信息平台等正式对外公开的网站，和中国蓟马网、实蝇预警系统等以某类入侵生物为主的网站，以及城市绿地外来潜在危险性有害生物数据库^[63]、云南省外来入侵生物网络数据库^[64]、外来生物入侵预警网络平台^[65]、中国外来入侵物种信息系统等以论文的形式公开发表的系统。这些数据库基本包含了物种拉丁名、异名、分类地位、生物学特性、危害等信息，但是每个数据库内都存在入侵物种种类不全且数量少，每个物种的基本信息缺失等问题^[60]。随着外来物种数量的不断增加，急需一些针对某个类群且适时更新，相对完善统一的数据库和数据搜集标准^[66,67]。

1.4 研究类群及研究区域

鞘翅目是昆虫纲中最大的类群，具有种类繁多、食性广泛、飞行能力强等特点，存在入侵其他地区并进一步扩散的可能性，而金龟总科 Scarabaeoidea（俗称金龟子）是鞘翅目中在行为和物种方面高度分化的类群^[70,71]，具有食性丰富，种类和数量多，分布广泛，破坏性显著等特点^[71]，而这些恰是可能构成入侵并造成危害的重要特征。因此，为了更好地预防外来金龟子的入侵，探索具有潜在入侵可能的金龟子在全球范围内、在中国，特别是在粤港澳大湾区内的潜在适生区，搜集和整理具有潜在入侵可能的金龟子的地理分布信息、入侵信息、生物学信息等并构建金龟总科检疫性或入侵昆虫数据库进而评估入侵风险，对于之后制定控制

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/988036032020006044>