

密级

论文编号

中国农业科学院 学位论文

基于 GIS 平台的外来生物风险评估系统

Risk Assessment System of Alien Species Based on GIS Platform

硕 士 研 究 生：王雅男

指 导 教 师：万方浩 研究员

申 请 学 位 类 别：农学硕士

专 业：生物安全

研 究 方 向：外来入侵生物预防与控制

培 养 单 位：植物保护研究所

研究生院

提交日期 2007 年 6 月

Secrecy:

No.

Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation

Risk Assessment System of Alien Species Based on GIS Platform

Candidate: Yanan Wang

Advisor: Prof. Fanghao Wan

Major: Bio-Safety

Specialty: Risk Analysis of Invasive Alien Species

Chinese Academy of Agricultural Sciences

June, 2007

中国农业科学院

硕士学位论文评阅人、答辩委员会名单表

论文题目		基于 GIS 平台的外来生物风险评估系统				
论文作者		王雅男	专 业	生物安全	研究方向	外来入侵生物预防与控制
指导教师		万方浩 研究员		培养单位 (研究所)	植物保护研究所	
姓名		职称	硕 (博) 导师	单 位	专 业	签 名
评 阅 人	沈佐锐	教授	硕导 ☐ 博导 ☒	中国农业大学	昆虫学	
	戈 峰	研究员	硕导 ☐ 博导 ☒	中国科学院动物研究所	昆虫生态学	
答 辩 主 席	郭予元	院士	硕导 ☐ 博导 ☒	中国农业科学院植物保护研究所	植物保护	郭予元
答 辩 委 员	张芝利	研究员	硕导 ☐ 博导 ☒	北京市农林科学院	植物保护	张芝利
	刘杏忠	研究员	硕导 ☐ 博导 ☒	中国科学院微生物研究所	微生物学	刘杏忠
	戈 峰	研究员	硕导 ☐ 博导 ☒	中国科学院动物研究所	昆虫生态学	戈峰
	宋卫宁	教授	硕导 ☐ 博导 ☒	西北农林科技大学	分子生物学	宋卫宁
			硕导 ☐ 博导 ☐			
			硕导 ☐ 博导 ☐			
			硕导 ☐ 博导 ☐			
会议记录 (秘书)		郭建英 副研究员				
论文答辩时间地点		2007 年 6 月 20 日 中国农业科学院研究生院四楼会议室				

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业科学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：



时间：

2007 年 6 月 20 日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国农业科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国农业科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

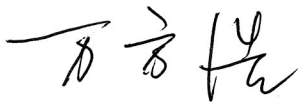
研究生签名：



时间：

2007 年 6 月 20 日

导师签名：



时间：

2007 年 6 月 20 日

基金项目及完成单位

本研究为国家重点基础研究发展计划“农林危险生物入侵机理与控制基础研究”(973计划, 2002CB111400)的部分内容。所有实验在“中国农业科学院植物保护研究所 植物病虫害生物学国家重点实验室”以及“农业部外来入侵生物预防与控制研究中心”完成。

摘 要

对外来生物进行风险分析和建立预警机制是阻止外来生物入侵并发生危害的最经济有效的防止措施，风险评估是风险分析过程中关键的一环，为风险管理提供重要决策依据。为了便于风险评估的数据管理和避免评估者理解复杂的评估模型和进行大量的评估计算，本研究应用 Visual Basic 计算机语言和 MapObjects 地理信息系统二次开发组件开发了外来生物风险评估系统。

外来生物风险评估系统主要应用气候相似性分析法、生物气候相似分析法和多指标综合分析法对任何外来物种进行全球适生性区域分析和入侵概率预测。气候相似性分析法遵循了气候相似原理，应用相似离度法找到与物种目前发生地气候最相似的地方；生物气候相似法使用外来物种的生物学参数与被预测区域的气候数据相比较，找到物种最适合生存的地方；在应用多指标综合分析法时，首先建立了外来生物风险评估指标体系，设立了与传入风险、定殖风险、扩散风险和危害风险相关的 34 个必要指标，同时也允许用户自行增加需要的指标，通过指标体系对外来生物的各种风险进行量化评估，最终得到物种入侵某地区的风险值。多种分析方法的结果为更精确地预测外来生物入侵被评估地的范围和概率提供了多元化思路，为增加结果数据的可读性，涉及到地理分布的结果都用不同符号显示在地图上。

红火蚁是全球 100 种危害最严重的外来入侵物种之一，鉴于此物种研究资料和文献较丰富，并且对于我国来说属于入侵初期的外来生物，所以把红火蚁作为外来生物风险评估系统的研究案例，不仅能验证系统的可应用性，其结果也可为我国防治红火蚁提供科学依据。系统中三种分析方法的预测结果一致表明红火蚁在我国华东和华南地区的入侵概率较高，事实上，红火蚁目前也已经在我国华南地区的广东、广西、福建局部地区严重发生，从而验证了系统原理的可行性。按入侵概率从高到低，把预测区分为四个级别，分别是红色警报区、橙色警报区、黄色警戒区和绿色小风险区。就红火蚁入侵中国这个事件来说，中国的广东、广西两省处于红色警报区，广大的华东和华中地区处于橙色警报区，这两类地区的政府需要实施针对性的防控措施尽量减少或者避免红火蚁入侵造成了危害；大部分西南地区和广大的华北地区处于黄色警戒区，东北、西北地区多处在绿色小风险区，这两类地区进行日常监测工作即可。

关键词：外来生物 风险评估 地理信息系统二次开发 入侵概率 适生区 指标体系

Abstract

Risk analysis and early warning system are critical issues and the most effective and economic measures to prevent invasive alien species and becoming an indispensable part of bio-invasion control. Risk assessment, which supplies information for risk management, is an important part of risk analysis. To facilitate the data management of risk assessment and avoid the complex assessment modules and much data processing, Risk Assessment System of Alien Species were developed in this study using Visual Basic computer language and GIS' secondary developing module—MapObjects.

Climatic analogy analysis, bio-climatic analogy analysis and multi-factors integrated analysis were used in our Risk Assessment System of Alien Species to predict suitable distribution areas of alien species and their invasion probability around the world. Climatic analogy analysis follows the climatic analogy principles and applies analogy deviation to seek sites whose climate matches the alien species current distribution; bio-climatic analogy analysis ascertains the most suitable sites of alien species by comparing their biological characteristics with the climatic data. Regarding the multi-factors integrated analysis, risk assessment index system of alien species was set up firstly, then 34 parameters related to entry risk, establishment risk, spread risk and hazard risk were chosen and additional parameters were allowed as users need, in the end, the risk values were quantified as assessment of entry, establishment, spread and hazard risk through risk assessment index system. Different approaches were used in this study to predict the potential distribution sites, to have invasion probability more precise, to make the predictive results more readable, different symbols reflect risks referring to geographical distribution.

Solenopsis invicta Buren is one of the 100 worst invasive alien species in the world and chosen as a case study of our Risk Assessment System of Alien Species to test its application capability, because there are plenty of research document and references about it and also *S. invicta* is in early invasion period in China. It tested the application capability of our system and also provided scientific foundation to control *S. invicta*. The predicted results of climatic analogy analysis, bio-climatic analogy analysis and multi-factors integrated analysis confirmed that East China and South China had high invasion probability, which matches the current real distribution of *S. invicta* in China. Four classes were made according to the invasion probability with red, orange, yellow and green reflecting high invasion probability to low. The results indicate that Guangdong and Guangxi belong to red level alarm ranges, most areas in East China and Middle China belong to orange where need precaution measures to avoid *S. invicta* invasion, most parts of Southwest China and North China are in yellow, Northeast and Northwest China are almost in green where common quarantine is enough.

Keywords: alien species, risk assessment, GIS' secondary developing, invasion probability, suitable distribution area, index system

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 外来生物风险分析概述.....	1
1.1.1 外来生物风险分析的意义.....	1
1.1.2 外来生物风险分析程序.....	2
1.1.3 外来生物风险评估的主要内容.....	2
1.2 外来生物风险评估理论研究方法.....	3
1.2.1 风险等级评估体系.....	4
1.2.2 物种适生性分布区预测.....	5
1.2.2.1 生态气候评价模型.....	5
1.2.2.2 气候包络模型.....	6
1.2.2.3 模糊包络模型.....	8
1.2.2.4 遗传算法.....	8
1.2.2.5 自组织特征映射网络.....	9
1.2.3 模拟物种扩散行为方法.....	10
1.2.3.1 反应扩散模型.....	10
1.2.3.2 积分差分方程模型.....	11
1.2.3.3 元胞自动机.....	11
1.2.3.4 景观中性模型.....	12
1.3 外来生物风险评估中的地理信息系统技术.....	13
1.3.1 集成式地理信息系统 (Integrated GIS).....	13
1.3.2 组件式地理信息系统 (Components GIS).....	14
1.3.3 万维网地理信息系统 (Web GIS).....	14
1.4 本研究的意义、主要内容和技术路线.....	15
1.4.1 选题依据及意义.....	15
1.4.2 主要研究内容.....	16
1.4.3 技术路线.....	16
第二章 气候相似性分析法预测外来生物潜在适生区.....	17
2.1 材料与方法.....	17
2.1.1 基础数据.....	17
2.1.2 相似离度模型.....	18
2.1.3 预测适生区及入侵概率的方法.....	18
2.1.4 严重发生地与原始产地设置.....	19
2.1.5 预警级别划分.....	20
2.1.6 考虑非气候因素.....	20
2.1.6.1 中国港口.....	20
2.1.6.2 土地利用.....	22
2.2 结果与分析.....	23
2.2.1 相似离度最小值地点确定.....	23
2.2.2 中国整体性分析.....	23

2.2.3 红火蚁入侵中国政区的概率.....	29
2.2.4 红火蚁入侵中国气候区的概率.....	31
2.2.5 重点省份分析.....	34
2.3 结论与讨论.....	36
2.3.1 结论.....	36
2.3.2 关键点.....	36
2.3.3 结果讨论.....	36
第三章 生物气候相似性分析法预测外来生物最适生存区	38
3.1 材料与方法.....	38
3.1.1 原理概述.....	38
3.1.2 红火蚁参数的确定.....	38
3.1.3 各气候指标计算方法.....	40
3.1.3.1 温度指标 (TI)	40
3.1.3.2 湿度指标 (MI)	41
3.1.3.3 海拔指标 (AI)	41
3.1.4 入侵概率计算方法.....	41
3.2 结果与分析.....	42
3.2.1 方法可行性验证.....	42
3.2.2 预警级别划分.....	42
3.2.3 中国整体性分析.....	43
3.2.4 红火蚁入侵中国政区的概率.....	44
3.2.5 红火蚁入侵我国气候区的概率.....	45
3.2.6 红火蚁入侵我国逐月分析.....	47
3.2.7 重点省份分析.....	49
3.3 结论与讨论.....	50
3.3.1 结论.....	50
3.3.2 关键点.....	51
3.3.3 结果讨论.....	51
第四章 外来生物风险评估指标体系构建及分析	54
4.1 材料与方法.....	54
4.1.1 指标体系建立依据.....	54
4.1.2 指标体系的结构.....	55
4.1.3 物种入侵风险值计算方法.....	59
4.1.4 指标权重设置.....	59
4.1.5 三级指标项目风险值确定.....	61
4.1.6 指标定义.....	62
4.1.6.1 传入风险.....	62
4.1.6.2 定殖风险.....	64
4.1.6.3 扩散风险.....	67
4.1.6.4 危害风险.....	68
4.1.7 预警级别划分.....	70
4.2 结果与分析.....	70

4.2.1 指标权重值.....	70
4.2.2 红火蚁入侵中国各政区概率值.....	71
4.3 结论与讨论	73
4.3.1 结论	73
4.3.2 关键点.....	73
4.3.3 结果讨论.....	73
第五章 外来生物风险评估系统开发	75
5.1 地理信息系统二次开发概述	75
5.1.1 GIS开发模式	75
5.1.1.1 独立开发.....	75
5.1.1.2 宿主型二次开发.....	76
5.1.1.3 基于GIS组件的二次开发	76
5.1.2 组件式GIS二次开发工具——Mapobjects组件	77
5.1.2.1 Mapobjects组件概述	77
5.1.2.2 Mapobjects组件相关技术	78
5.2 材料与方法	78
5.2.1 系统需求分析.....	78
5.2.2 系统结构设计.....	79
5.2.3 系统数据库建立.....	80
5.2.4 系统数据流程.....	82
5.3 结果与分析	83
5.3.1 基础数据管理模块.....	83
5.3.2 物种适生分析模块.....	83
5.3.3 指标综合分析模块.....	85
5.3.4 地图操作模块.....	87
5.3.4.1 基本功能.....	88
5.3.4.2 专题图.....	89
5.3.4.3 图层符号化.....	89
5.4 结论与讨论	91
第六章 结论与展望.....	92
6.1 结论	92
6.1.1 外来生物风险评估系统的建立.....	92
6.1.2 外来生物风险评估指标体系的建立.....	92
6.1.3 红火蚁在中国的适生范围.....	92
6.1.4 红火蚁在中国的入侵概率分析.....	93
6.2 本研究的创新之处	93
6.3 展望	93
参考文献.....	94
致 谢.....	105
作者简介.....	106

第一章 绪论

1.1 外来生物风险分析概述

对于特定的生态系统与栖息地来说,任何非本地的生物都叫外来生物(alien organism),因而外来生物或外来种(alien species)通常是指物种出现在它正常的自然分布范围之外的一个相对概念。而外来入侵种(invasive alien species, IAS)是指对生态系统、栖境、物种、人类健康带来威胁的外来种(万方浩等, 2002)。风险(risk)是指引致损失的事件发生并导致损失的不确定性,风险因素产生风险事件,风险事件引起损失可能性,风险具有未来性、损害性、不确定性和可预测性(李尉民, 2003)。

外来生物风险分析可以定义为对外来物种传入过程种产生的不确定事件进行识别、评估和处理,以最小的成本将各种不利后果减少到最低程度的科学管理技术(徐海根, 2002)。在外来物种产生风险的过程中,风险因素可以是某种生物从原来的分布区域扩散到一个新的地区,其后代可以繁殖、扩散并维持种群,即生物入侵(Elton, 1958);风险事件可以是新居者与本地物种争抢食物或者咬伤人类而导致人们无法正常劳作等与新居者有直接或间接关系的事件,但有可能由于措施得当而根本不会产生类似的负面影响事件;这些事件能不能引起损失又是一个未知数,如果本地竞争物种竞争能力弱,就很有可能不敌新居者而使自身种群数量降低甚至灭绝,而与此相反的情况也是可能发生的。因此,尽管风险因素客观存在,人们还是有可能减少或避免风险事件和损失的发生,这就需要对外来物种的入侵进行风险分析,以认识风险从而尽量避免风险。

外来生物可以是对人类有益的,例如引进生物防治当地有害生物,避免化学防治污染环境等,但这种有意的引进如果不做充分的考虑,就会事与愿违。例如,引入的生物防治作用物尽管能间接地减少农药的使用,但是如果它威胁到当地物种的生存,减少生物多样性程度,弊大于益时,这种生物就会演变成成为外来入侵物种。

1.1.1 外来生物风险分析的意义

在自然界,生物的扩散或者迁徙是一个普通的现象,而且生物入侵的种类几乎包括所有的生物类群(王献溥, 1999),外来生物一旦入侵成功,往往造成爆发与流行,难于控制;外来入侵种的危害对环境、大农业生产、人类健康造成了巨大的生态及经济损失。部分外来生物的入侵是由于:(1)不负责任的人为因素(检疫不严或执法不严、淡薄的生态意识与利益驱使、盲目引种)导致其成功入侵;(2)缺乏严格的监测与管理机制;(3)缺乏科学的外来生物的风险-收益评价体系和严格的科学决策程序,看重经济利益,忽视生态利益(万方浩等, 2002)。风险分析研究是为了解决第三方面的矛盾应运而生的,由于人类活动有意或无意地会将一些生物带到新的区域,这种人为因素带来的生物入侵,真正地形成了对自然环境和社会环境的威胁。一个国家解决入侵种问题的能力,最终依赖其对国际信息资源的占有、分类的能力,以及与其他国家的合作,可以看出,建立本国的生物入侵预警系统并以此与国际同行进行交流是至关重要的,而风险分析在建

立预警系统时是重要一环（徐汝梅, 2003）。

生物入侵带来的经济损失是巨大的，同时它所导致的生物多样性丧失是仅次于生境破坏的第二大原因，并且有很大可能会上升到首要位置（Enerink, 1999）。一个新的入侵种，一旦被发现造成重大影响时，它已经在该地区扎住了根，再想消灭它已是很困难、甚至是不可能的。全球入侵物种计划（Global Invasive Species Program, GISP）的前主席 Waage 博士（2001）曾提出过一个论点：对入侵，预防比控制其暴发更为可行，也更为经济。许多入侵种在引入后有个“时滞时期”，这时的小种群可以被根除或予以遏制，在对外来生物存在风险损失与可能带来的收益相比较的基础上，也就是对物种进行风险分析后，提出对不同环境生态系统影响及风险控制对策的分析，依据风险的接受水平和风险出现的程度，作出相应的风险管理措施，最好将有限的资源用于探测和对付新建立的入侵种。而优先防治何种物种和如何着手防治则需要对物种进行风险分析后得出一个可行的方案（万方浩, 1991; Andersen, 2004）。

外来生物风险分析的分析对象可以包括有意或无意引进，具有危害或具有潜在危害的有机体，其中有害生物风险分析（Pest Risk Analysis, PRA）是目前最常用的一类，也是国际上植物检疫决策工作的重要环节，根据 WTO 的多边贸易规则，要按照争端解决机制与其他成员公正地解决贸易摩擦，如果没有做好风险分析，就很难在涉及植物检疫的争端中占据主动地位（沈佐锐, 2000）。

1.1.2 外来生物风险分析程序

目前，国际上还没有一套完备的针对所有外来物种的风险分析程序，大多根据检疫性有害生物来制定，其中影响力比较大的是联合国粮农组织（FAO）/植物保护公约（IPPC）制定的国际植物卫生措施标准（ISPM）：《有害生物风险分析准则（Guidelines for pest risk analysis）》（FAO/IPPC, 1995）和《检疫性有害生物风险分析》（Pest risk analysis for quarantine pests）》（FAO/IPPC, 2004），另一个是欧洲和地中海植物保护组织（EPPO）于 1997 年提出的风险分析方案（EPPO, 1997）。

一般来说，外来物种风险分析可以按照以下程序进行：危害确定（Hazard Identification），风险评估（Risk Assessment），风险管理（Risk Management），风险交流（Risk Communication）。危害确定主要是明确分析的对象和地区；风险评估过程中要根据物种传入、定殖和扩散可能性及危害影响进行预测；风险管理则依据风险评估的结果制定可减少风险的具有针对性和决策性的可行措施和方案；风险交流是对风险信息和分析结果进行双向对边交换和传达的过程。以上四个方面，危害确定是前提，风险评估是核心，风险管理是目的，风险交流是手段并贯穿风险分析始终。

1.1.3 外来生物风险评估的主要内容

生物入侵是一个复杂的链式过程，截断这条链中的任何一个段都会不同程度地降低外来物种的危害影响。根据外来物种传入、建立种群到大面积扩散并造成危害这一过程，万方浩等（2005）提出了外来生物入侵机制的主要研究内容，现在生物入侵机制的研究已不能满足于仅找出那些因素影响入侵过程，而是越来越具体化，要进一步解决这些因子究竟产生什么样的效用，这些效应又是如何影响入侵过程的。生物入侵机制研究主要为四个部分：1）传入前或传入过程中的预防与预警，2）定殖与种群建立过程中的“前适应性”机制，3）潜伏与扩散传播过程中的“后适应性”

机制，4) 暴发成灾过程与生态系统的可入侵性机制。张润志等也总结了 9 个研究外来物种的重要问题，在此经过笔者归纳，总结了外来入侵物种研究中的主要内容（图 1-1）。其中“风险分析与预警”研究内容在阻止物种进入新地区和明确具体风险时起到重要的作用。风险评估是风险分析的核心内容，也是本研究关注的焦点。

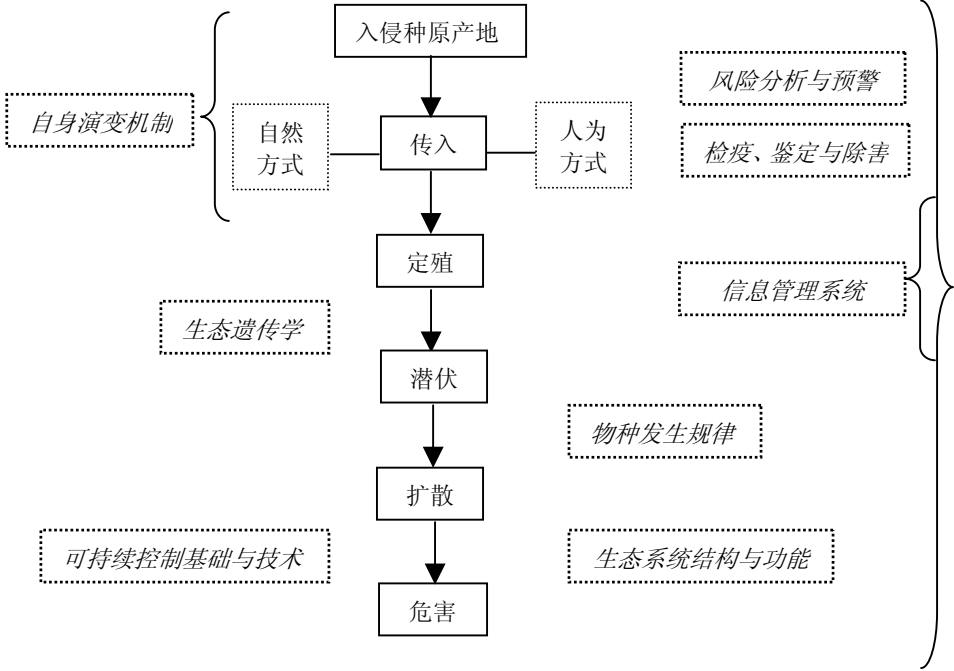


图 1-1 外来入侵物种研究的关键问题

Fig. 1-1 Key research fields of invasive alien species

参照 FAO/IPPC（2004）制定的标准，外来物种风险评估可以包括以下三部分内容：

物种分类：根据收集的物种信息，核实其在风险分析地区的存在和管制状况，定殖和扩散潜力以及经济影响潜力，从而明确该物种是否符合检疫性有害生物的经济标准、地理标准和管理标准。

评估传入、定殖和扩散的可能性：查明有害生物风险分析地区中有利于有害生物定殖、扩散的生态因子（如气候、寄主、竞争物种等）和人为因素（如贸易、耕种等），并用定性和定量的方法进行评估，以文字叙述、图标和概率值等方式输出结果。

评估潜在的经济影响：考虑有害生物的影响，包括商业影响，生态影响，社会影响中的直接和间接的影响。查明有害生物风险分析地区中有害生物的存在将造成重大经济损失的地区。

1.2 外来生物风险评估理论研究方法

风险评估所使用的方法有定性和定量两大类。定性方法一般采用非概率抽样，研究个别或局部事物的特征及规律，依据专家经验等对风险进行评价；定量法则以系统分析及建模为手段，以尽可能科学的方法来模拟现实情况，主要采用数学模型和统计学原理和方法（陈克等, 2002）。由

于定性分析的结果往往具有主观性和含混性，其科学性容易受到质疑，因此定量方法逐渐得到人们的重视，此外，某些重要入侵生物的流行病学研究已较深入，积累了大量的理论及基础数据，使得分析者能够借助数学和计算机建立模型，通过大规模的模拟运算来预测和计算风险的大小（陈克等, 2002）。另外，模型在综述复杂系统方面是一种有用的工具，能揭示客观事物的数学规律（高亮之, 2004），找出我们知识中的薄弱点，确立研究重点；由于模型能模拟生态系统的反应，并可与观测做对比，所以在检验科学家假设中十分有用（Jorgensen et al., 1988）。

在风险评估的每项内容中又会分支出更细致的研究内容，查阅大量资料发现，目前研究得较多的内容是：风险等级评估体系的建立、物种适生性分布区预测、物种扩散行为的模拟等。现就这三部分的国内外研究进展做一简要综述。

1.2.1 风险等级评估体系

外来物种一旦演变成为入侵种，随即会给生态、经济和社会带来巨大损失并且难以逆转。因此，需要建立快速准确的评估工具，其中数学模型是一个理想选择，但由于研制定量和客观模型的时间较长并且需求信息质量较高，所以，定性和定量的风险等级评估体系（Risk Rating System, RRS）应运而生，其功能是判别入侵种，判定优先防控对象，并对评估物种各方面风险进行全局把握，帮助决策者做出合理决策。

目前RRS的应用十分广泛，Smallwood（1992）对美国24种外来鸟类和哺乳类进行风险等级评估；Weber和Gut（2004）评价了中欧47种入侵植物的风险性；Pheloung等（1999）建立了澳大利亚杂草评估系统（Week Risk Assessment, WRA），Daehler等（2004）修改WRA后，针对夏威夷及其他太平洋群岛植物建立了夏威夷杂草评估系统（Hawaii WRA system, H-WRA）；EPPO（EPPO, 1997）于1997年制订了有害生物评估模式，Macleod等（2002）应用该模式对亚洲天牛在美国的风险进行评估，在此基础上，Copp等（2005）对其9级评分标准更改为4级，评价了入侵英国的淡水鱼。笔者认为中国学者研究的多指标综合评判法，从本质上讲也属于RRS的一种，在国内的风险评估研究中占有重要的地位。

RRS是一类方法，不同的组织或者国家会根据不同物种的具体情况，制定不同的指标和评价标准。但总体思路是一致的，根据RRS的评分标准，评估者对其中设置的一系列问题进行回答并赋分，然后累加得分，一般分值越高，物种入侵风险越大。一个理想的RRS模型应该具备以下几个特征（Salisbury et al., 2002）：问题设置要有科学依据，指标体系要清晰，评估过程尽量少夹带主观意见，不同评估者评价同一个物种要得到相似的结果。此外，这种评估方法需要群策群力，判断结果不能取决于个人的评估，需要更多的专家，诸如农业科学家，自然保护学者共同参与评价（Weber & Gut, 2004）。由于各个RRS指标体系和评价标准不同（表1-1），不同物种评价结果难以对比，再者，设置问题的科学性和回答问题的准确性也是此类方法难以把握的地方。

表 1-1 几个风险等级评估体系比较

Table 1-1 Comparison of different risk rating systems

组织/国家	评价物种	指标体系	评分标准	参考文献
EPPO	有害生物	传入 (Entry) 定殖 (Establishment) 经济影响 (Economic impact)	根据资料, 按程度分为 1-9 级	EPPO, 1997 MacLeod, 2003
美国	鸟类, 哺乳类	引入 (Introduction) 定殖 (Establishment) 危害 (Damage)	附有问题 可选答案 及其对应 分数, 分数 在 0-5 之间	Smallwood et.al,1992
澳大利亚	杂草	驯化/栽培历史 (domestication/cultivation) 气候和分布 (climex and distribution) 在其他地区是否为杂草 (weed elsewhere) 不受欢迎程度 (undesirable trait) 植物类型 (plant type) 繁殖 (reproduction) 扩散机制 (dispersal mechanism) 持续生存特征 (persistence attribute)	如果没有 可供选择的 答案, 答案 为“是” 或者“不是”	Pheloung et.al , 1999
瑞典	中欧杂草	气候匹配 (climatic match) 对欧洲是否为外来种 (status) 在欧洲的地理分布 (geographic distribution) 全球分布范围 (global distribution) 入侵历史 (weed elsewhere) 分类 (taxonomy) 种子繁殖力 (seed viability) 生长状况 (vegetative grow) 扩散模式 (dispersal mode) 外形 (lifeform) 生境 (habitats of species) 种群密度 (population density)	附有问题 可选答案 及其对应 分数, 分数 在 0-4 之间	Weber et.al, 2004

1.2.2 物种适生性分布区预测

防止外来物种造成危害的重要手段之一是阻止可能造成入侵的物种进入适合其生存的地区, 为此我们希望探明物种一旦引入将会在什么地方生存及其扩散范围 (徐汝梅, 2003)。要想获得物种分布区的系统资料往往是不可能的, 因此, 更多的是根据有限的的数据, 利用空间模型研究物种的潜在生存区。

1.2.2.1 生态气候评价模型

澳大利亚CSIRO研制了用于生态气候评价的微机分析模型——CLIMEX, 能定量地表征生物种群在不同空间的生长潜力。该模型以气候做为影响物种分布的主要因素, 用物种生物学参数与各地气候参数进行对比, 整合出生态气候指数 (Eco-climatic Index, EI), EI值越大, 物种适生性越强 (Sutherst & Maywald, 1985; Sutherst, 2003)。

自CLIMEX问世至今, 得到了广泛的应用。如马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 和地中海实蝇 *Ceratitis capitata* 在新西兰的适生区分布 (Worner, 1988)、酸模北短尾蚜 *Brachycaudus*

rumexicolens 在世界范围内的分布区 (Scott & Yeoh, 1999)、亚洲长角天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) 在欧洲的适生区 (MacLeod et al., 2002)、苹果蠹蛾 *Laspeyresia pomonella* (L.) (林伟, 1994)、豚草的天敌一豚草卷蛾 *Epiblema strenuana* (马骏等, 2003)、三叶草斑潜蝇 *Liriomyza trifolii* (陈洪俊, 2005)、西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (程俊峰等, 2006) 等在中国的适生区。

但该模型仍旧存在不足, 笔者认为最新版本的CLIMEX包括全球气象站点2000余个, 其中发展中国家的站点较少, 由于很多物种原产于南美洲发展中国家, 位点的缺乏很不利于参数的调试, 其中, 包括中国的气象站点仅80多个, 不足以进行针对我国的适生分析, 需要大量扩充站点信息; 第二, CLIMEX设定每个位点有两个湿度参数, 分别是上午9时代表空气最高湿度, 下午3时代表空气最低湿度, 由于湿度发生不规律, 如此设置需进一步探讨, 可考虑用平均相对湿度代替并对模型进行修改; 第三, 模型计算结果只能以“点”图的形式显示, 缺乏直观性, 必须结合GIS软件进行插值叠加等处理。

1.2.2.2 气候包络模型

气候包络模型 (Climate Envelope Models, CEMs) 是一类能宏观明确物种最可能分布范围的模型 (Walker & Parnell, 1991)。从大尺度区域来讲, 气候因素是预测物种分布最好的环境变量 (Rouget et al., 2004), 用评估地区各个位点与物种原产地或者严重发生地进行气候相似性比较, 相似性高即说明在原产地或严重发生地生存的物种在该位点也可能适生。以下三种度量距离的方法都可以应用到该模型中。

• 欧氏距离

欧氏距离是距离度量方法中常用的一种, 可以计算各个数据对象之间的距离 (董旭和魏振军, 2005), 中国学者在此基础上提出了“生物气候相似距研究方法” (魏淑秋和刘桂莲, 1994), 采用多维空间相似距离 d_{ij} 来度量各地之间的气候, 即将某一个地点的某种气候要素作为一维空间, m 种要素即有 m 维空间, 将每一个地点作为这 m 维空间上的一个点, 计算世界上任意两个地点间的欧氏距离。

物种在A地适生, 在同一时段 a , B地与A地的生态气候相似性低, 似乎该物种在B地就不能适生, 但由于不同地区的气候差异和各地气候季节的交替, 主要是太阳辐射在地球表面分布不均及其随时间变化的结果, 同时太阳高度在不同纬度和不同时间上的差异造成辐射总量因地时而不同 (孙安健, 1986), 所以将B地的适生时段向前或向后推移, A地的 a 时段与B地的 b 时段生物生态气候相似性就可能很好, 因此采用生物气候相似及其推移相似理论, 可以解决南北半球之间、海拔高低之间或局部时段之间的生物气候相似性问题, 使得在全球范围内, 任意两地间寻找生物最佳相似时段成为可能 (魏淑秋和刘桂莲, 1994; 陈雷等, 2005)。一般分段分布推移相似距计算表达式为 (魏淑秋等, 1995):

$$d_{ij} = \min \left\{ d_{\theta_j} = \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{j(k+\theta)})^2 \right]^{1/2} \right\}$$

d_{ij} : 空间第 i 点与第 j 点的气候相似距

X'_{ik} : 空间第*i*点第*k*个要素值标准化后数据

X'_{jk} : 空间第*j*点第(*k* + 0)个要素值标准化后数据

k: 要素序号

m: 要素个数

魏淑秋等(1995)应该此方法预测了小麦矮腥黑穗病 *Tilletia controversa* 在我国不同麦区定殖的潜在可能性, 生物气候指标的确定是决定结果准确性的关键, 要选择能够影响当地气候的主要因素, 如有必要, 还需对不同因素附以权重。此外, 欧氏距离与各指标的量纲有关, 且没有考虑各变量之间的相关性和重要性。

• 相似离度

李开乐(1986)在80年代提出了既能分析样本之间形相似, 又能体现它们之间值差异的相似离度法, 这是一种比较全面的相似衡量标准, 克服了简单相似分析方法(欧氏距离, 相似系数)的不足(康绍军和余卫东, 2002)。相似离度能客观地反映多维空间对象之间的相似性, 它由相似值系数和相似形系数组成, 相似值系数反映空间对象之间的离散程度, 即靠近程度; 相似形系数反映对象之间变化趋势的相似性, 即空间位置方向的趋同性。陈雷等(2005)综合了相似离度和生物气候滑移相似距的优点, 找到了作物引种区与最佳适宜种植区的生态气候相似程度和最佳相似时段。在外来生物适生性分析研究中, 也可以借鉴这种思路, 推算入侵区和原产地物种生存的最佳相似时。

• 马氏距离

马哈拉诺比斯(Mahalanobis)距离, 简称马氏距离(Krusińska, 1987)不用考虑各个特征参数的量纲, 是欧几里德空间中非均匀分布的归一化距离, 它排除了样本之间的相关性影响而且也考虑到了各个观测指标取值的差异程度, 能更好地描述样本间的相似程度(杨涛等, 2005)。

应用马氏距离预测某物种分布的具体步骤为: 首先确定气候特征参数(X_p)和物种现有分布地记录样本(n); 然后计算气候特征参数均值向量(μ)以及由 X_p 和 n 组成矩阵的协方差(C); 之后, 对于一个新样本 x 做判断, 计算它到这个总体(G)的距离, 距离越大则说明 x 位点越适合物种生存。计算公式如下(司马云瑞等, 2005), 设 x 来自均值 μ 、协方差 C (>0)的集合 G , 它们之间的马氏距离定义为:

$$D^2(x, G) = (x - \mu)' C^{-1} (x - \mu)$$

该方法逐步得到人们的重视, Farber 和 Kadmon(2003)对以色列一些木本植物做为试材, 强调说明了马氏距离法优于传统气候包络模型; Rouget 等(2004)也用此方法分析了南非地区71种主要入侵植物的潜在分布。

应用气候包络模型(CEMs)的一个前提是物种的现有分布数据能为预测提供可靠的依据, 并且其准确性高度依赖于气候因素, 在选择气候要素时, 还会用到主成分分析、判别分析等方法。此外, 仅用气候因素判断物种潜在分布区, 常会高估物种的分布范围, 因为人为干扰、种间竞争等因素也可限制物种分布, 这些因素有时比气候要素更加重要, 但是CEMs并不能对其加以考虑。

1.2.2.3 模糊包络模型

模糊包络模型 (Fuzzy Envelope Model, FEM) 可以预测物种的潜在分布区, 判断生境被外来物种入侵的风险程度, 该方法应用了基于模糊集合论的模糊分类法 (Heuvelink & Burrough, 1993)。经典集合论不能研究不具有明确界限的事物和现象, 譬如“物种在某地适生性的高与低”等。为了研究这些模糊概念, 需要用模糊集合论来描述 (徐健华, 2004), 一个模糊子集完全由其隶属函数来刻画。

模糊包络模型 (FEM) 使用物种分布数据和一系列的环境变量, 物种分布数据包括物种已分布数据 (presence data) 和物种未分布数据 (absence data), 由于物种的未分布数据获取困难并且可靠性较低, 所以应用该模型时, 一般只考虑物种现有分布数据或者用假未分布数据

(pseudo-absence data, 通过人为调查确定物种在某地无分布, 但某些客观条件限制其准确性) 代替。收集的分布数据用做模型的训练和检验, 一般分配比例为3:1; 然后选择环境变量, 从气象站取值, 制成点数字地图, 通过插值方法把点数字地图转化成面地图。训练模型时, 选择合适的模糊隶属函数, 对各环境变量图层进行重新分类, 生成各自的模糊分类地图层 (即模糊子集), 每个栅格取值在0~1之间; 之后应用最小值叠加函数 (Minimum overlay function) 把所有图层叠加, 生成物种潜在分布图 (即多元模糊集) (Robertson et al., 2004)。

Robertson等 (2004) 利用FEM对非洲南部的南非、莱索托、斯威士兰地区的三种外来杂草和三种本地蝉进行潜在分布预测, 通过Kappa检验, 得到了较满意的结果。FEM最重要的一个特点是, 构建模型时有多种模糊隶属函数可供选择, 适用于物种对特定环境做出特定的反应, 例如均衡函数 (symmetrical)、单调增函数 (monotonically increasing)、单调减函数 (monotonically decreasing) 等, 其中单调增函数就比较适合描述物种增长率与海拔成正相关的情况。

BIOCLIM是应用包络模型的典型软件 (Sindel & Michael, 1992), 与其明确包络模型 (CEM) 的明确集 (crisp sets) 相比, FEM采用了模糊集 (fuzzy sets), 更加适合建立包络分布模型 (envelope distribution models), 能对连续变量的分类比较敏感, 预测结果更接近真实情况, 误差较小, 但FEM假设了每个环境变量对于预测物种分布是同等重要的, 这明显不符合实际并且会导致预测准确度下降。

1.2.2.4 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是由美国Michigan大学的Holland于20世纪60年代末提出并创立 (Holland, 1975), 是概率搜索算法的一种, 它通过模拟生物在自然界中遗传变异与生存竞争等遗传行为, 让问题的解在竞争中得以改进, 以求得最优解 (艾丽容, 1997), 是解决非线性优化问题的一个重要方法 (金舒, 2002)。遗传算法的应用按其方式可分为基于遗传的优化计算、优化编程和机器学习 (严武军, 2002)。在研究物种适生区的软件中, GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production) 是目前应用遗传算法机器学习比较成功的桌面系统 (Underwood et al., 2004), 其原理是利用已有的物种分布资料和环境数据产生以生态位为基础的物种生态需求, 探索物种已

知分布区的环境特征与研究区域的非随机关系,用人工智能模型方法来建立预测模型(贾文明等, 2005)。

遗传算法(GA)中机器学习的目的是构造一种能就现实环境的实际情况对自身进行调节,以适应环境的变化了的机器。事先给定机器的一些规则,机器通过反馈调整这些规则,使之更适应环境(甄文祥和王文田, 1994)。目前在GARP中有四种规则,即粒子算法(atomic)、逻辑斯谛回归(logistic regression)、生物气候包络(bioclimatic envelope)和非生物气候包络(negated bioclimatic envelope)(<http://biodi.sdsc.edu/Doc/GARP/Manual/manual.html>),通过使用不同的规则从而提高了模型的预测准确性。首先选择一种规则,利用训练数据生成一个模型,最终生成一个由不同规则组成的模型,用独立数据对模型检验后,产生一个复杂的“if-then”序列生态模型,模型再被投影到研究区域的地理空间,形成适合物种分布的数字地图(王瑞, 2006)。

Peterson 和Vieglais (2001)用基于GARP生态位模型对入侵到美国的光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motsch) 等物种的潜在分布区进行了预测, Peterson 等(2002)和Anderson等(2002)分别用该模型研究了墨西哥鸟类和多刺囊鼠 *Perognathus spinatus* Merriam 的地理分布情况, Page和Peterson (2003)和Wang等(2006)分别预测了紫茎泽兰 *Ageratina adenophora* (Asteraceae)在中国入侵分布区,李红梅(2005a, 2005b)采用同种方法预测了日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* (Kuwana) 和椰心叶甲 *Brontispa longissima* (Gestro) 在中国的潜在地理分布。王瑞(2006)选取14种在我国具有较强威胁性的外来入侵植物,通过标本和文献资料获得分布数据,用GARP模型分析它们的中国适生区。此生态模型在海洋环境也得到应用, Wiley等(2003)对美国堪萨斯州的12种淡水鱼的适生性进行探讨。

GARP一般应用在大尺度范围(如一个国家),环境分辨率在4.5km到50km不等,使用物种分布数据大多为几十年的积累。其实,该模型应用在小尺度范围(如森林公园)和窄数据集(两年的数据累积)时也能达到令人满意的效果(Underwood et al, 2004)。GARP预测准确性取决于物种分布信息的数量和质量,数据的获得对于研究者来说是一项艰巨的任务。此外,遗传算法与其他的算法的有效结合,也是GA理论研究的主要方向之一。

1.2.2.5 自组织特征映射网络

自组织特征映射网络(Self-Organising Map, SOM)是由芬兰赫尔辛基大学神经网络专家 Kohonen (1995)提出的一种人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN),它可以模拟动物和人大脑皮层中具有自组织信号处理的特征,根据样本自身的规律,自动提取样本内在的重要统计特征,是一种无监督学习的神经网络(吴建生, 2005)。目前广泛地应用于系统分析、统计模式识别和通信等领域,近几年,也逐渐被生物领域的学者所重视(Worner & Gevrey, 2006)。

自组织特征映射网络(SOM)将非线性的高维数据投到一个预先定义好的二维拓扑网络中,通过学习算法达到了降维、聚类、可视化的目的,使得一个复杂系统从开始的完全混乱调整到最终的整体有序。学习算法包括竞争、合作和更新三个过程:竞争是对每个输入模式,网络中的神经元计算它们各自的判别函数值,具有判别函数最大值的特定神经元成为竞争的胜利者;合作是指获胜神经元决定兴奋神经元的拓扑邻域空间位置,从而提供给乡邻神经元合作的基础;更新是

对兴奋神经元通过对它们权值的适当调节以增强它们关于该输入模式判别函数值,使得对以后相似模式输入的响应增强(程勘等, 2005)。

SOM的结构分为简单的两层,即输入层(Input Layer)和输出层(Output Layer)。设输入层有 n 个节点,输出层由 m 个神经元组成的二维平面阵列,两层之间完全连接,每个输入层节点通过连接权向量与每个输出层神经元连接(涂晓芝等, 2005),具体步骤如下(晋琳琳等, 2005): (1) 输入层数据准备: N 个向量 $X_1, X_2, \dots, X_N$, 每个 X_i ($i=1, 2, \dots, N$) 向量由 n 维组成,即 n 个节点; (2) 确定输出层神经元个数 m , 一般 $m = 5\sqrt{N}$ (Gevrey et al., 2006); (3) 输出层神经元权向量 W_j ($j=1, 2, \dots, M$) 的各元素在一定区间内随机产生,并进行归一化处理成单位向量 $\hat{w}_j$; (4) 将向量 X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 施于输出层网络,找出 X_i 与距离最近的权向量 W_k , 式中下标 k 是当输入向量为 X_i 时取胜神经元的序号; (5) 选择恰当的学习速率,对获胜神经元权向量进行修改,其原则是使以后同样或类似向量的输入时,该神经元取胜的概率更大,经过多次调整权值,就能将取胜神经元的权向量不断推进输入向量 X_i ; (6) 将下一个向量 X_i 施于输出层网络,循环第(4)到(6)步。

Gevrey等(2006)运用SOM把844种(n)植食昆虫在新西兰459个(N)地点的分布信息做为输入层数据,对844种昆虫进行适生区预测,先对所有位点进行聚类分析,确定每个输出层神经元所代表的具体国家或地区,再将最终每个物种对应神经元的连接权重视为物种在该神经元所代表地区的适生程度,该值越大,适生性越高。他们以分析地中海实蝇 *C. capitata* 来对模型进行检验, SOM预测的区域包括了大部分实际分布地区,尽管此方法效果良好,但应用SOM研究物种适生分布的例子相对匮乏,国内研究学者涉及不多。

这种方法也存在一些局限,比如该网络的学习结果是二维神经元阵列的输出层,不能进一步更加详细地描述样本模式相互间的距离信息,使样本在原始空间中的位置信息更加直观地显示。此外在SOM网络学习过程中,如何调整学习效率,以及充分利用连接权重,以提高网络的收敛速度,得到良好的拓扑保留效果,仍未有能普遍使用的方法(涂晓芝等, 2005)。

1.2.3 模拟物种扩散行为方法

扩散是外来物种入侵过程中一个非常重要而且具有特色的环节,只有通过扩散行为,才能达到高密度和大尺度的空间分布。入侵种本身的特点和新环境的特点都能使扩散的形式和速度形成差异(徐汝梅和成新跃, 2005),通过建立模型我们可以预知种群在新生境的时空动态变化,对追踪监测、防治铲除入侵物种都有着重要的作用。

1.2.3.1 反应扩散模型

生态学家常用简单确定性模型(simple deterministic models),例如反应扩散模型(reaction-diffusion model, RD)研究种群的扩散和其他空间现象(Kot et al., 2004),它的数学理论基础是偏微分方程,一般写成:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = rN + D \left[\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right]$$

其中 $N(x,y,t)$ 表示 t 时刻物种在地点 x, y 的种群密度, r 代表种群生长速率, D 为微分系数。扩散速率为 $2\sqrt{rD}$ (Pysek & Hulme, 2005)。这个模型是假设种群足够大, 随机效应不重要。用该模型对植物外来种入侵预测时, 由于植物与环境之间的相互作用和随机效应对植物外来种入侵的速率和格局影响很大, 而它未考虑植物的特性、环境异质性和随机效应, 因此, 这影响了RD模型预测的准确性 (向言词等, 2002)。Fisher在RD模型的基础上增加考虑的环境承载量 K (environmental carrying capacity), 具体方程为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = rn(1 - \frac{n}{K}) + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

其中, $n(x,t)$ 表示物种在 t 时刻 x 位点的种群密度。该方程广泛应用于外来物种扩散速率的研究 (Andow et al., 1990), 但是 Fisher 方程存在一些缺点, 它假设种群中个体的扩散速率是相同的, 这显然不够合理, 因为个体处于不同的生活史的阶段, 扩散速率是不同的 (Neubert & Parker, 2004)。

1.2.3.2 积分差分方程模型

外来物种以定殖地为中心, 向四周扩散, 这个阶段包括两个重要的过程——个体的繁殖和繁殖体的散布 (Neubert & Parker, 2004), 这两个过程在时间上是不连续的, 而积分差分方程很适合描述这种离散的过程。积分差分方程 (Integrodifference equation, IDE) 模型包括两个部分: 积分方程说明种群扩散过程, 差分方程描述物种在景观尺度上每个位点种群增长状况, 方程如下:

$$N_{t+1}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x,y) f[N_t(y)] dy$$

其中, $N_{t+1}(x)$ 为在 $(t+1)$ 世代扩散终点 (x) 的种群密度, $f[N_t(y)]$ 是 t 世代在扩散起点 (y) 的种群增长函数 (Pysek & Hulme, 2005), 增长函数可选择补充曲线 (stock-recruitment curve) 和逻辑斯蒂差分方程 (the logistic difference equation) 等。在扩散阶段, 密度概率函数 $k(x,y)$ 的形状决定种群个体从 y 地扩散到 x 地的运动规律, 它描述了分散核心 (即父辈物种) 所散布繁殖体的新的空间分布, 而分散核心的性质决定了物种进入新生境的扩散速度, 常用的 $k(x,y)$ 可以是高斯分布 (Gaussian), 拉普拉斯分布 (Laplace) 和柯西分布 (Cauchy) (Kot et al., 1996; Kot et al., 2004)。应用IDE的最大限制是, 很难判断 $k(x,y)$ 的形状, 特别是长距离扩散时, 而IDE可以整合不同的分散核心, 也能在一定程度上弥补这个缺点 (Pysek and Hulme, 2005)。IDE已经越来越广泛地应用于各类物种的扩散行为模拟, 比如, 鸟类、植物、蜜蜂, 其中对一年生无世代重叠的植物模拟效果较为理想 (Hastings et al., 2005; Mistroa et al., 2005)。

需要指出的是, IDE 模型是一类表征空间上连续分布的工具模型 (Cuddington & Hastings, 2004), 不仅能模拟物种扩散行为, 也能对种间竞争、种群年龄组配、阿利效应、物种控制进行了描述 (Kot et al., 2004), 笔者认为, IDE 是建立生物入侵各阶段模型的重要基础。

1.2.3.3 元胞自动机

元胞自动机 (Cellular Automata, CA), 是一类模型的总称 (Wolfram, 1984), 它是用一系列模型构造的规则构成, 是时间、空间和状态都离散的动力系统 (傅伯杰等, 2001)。CA 由有限个相同而分立的元胞 (Cell) 组成, 它们等间距地排列在一维直线上, 或者分布在二维平面或多维空

间中规则网格上, 每一个元胞都有几种可能的状态 (吕晓阳等, 1996), 各元胞单元下一时刻的转移状态根据相应的邻域函数规则和各时间阶的领域状态配置进行同步更新 (张传武, 2004)。

元胞自动机 (CA) 模型广泛地应用于植物群落动态研究 (Wang et al., 2003), 刘迎湖等 (2006) 对具化感作用的外来杂草对本地种群落的入侵过程和入侵规律进行模拟研究, 模型由产生化感物质的外来种和两个对化感物质敏感性不同的本地种组合成不同类型的群落, 利用化感物质作用下受体物种生物活性响应模型及种子扩散负指数分布模型, 模拟外来杂草和本地种分布格局的时空动态变化。

Arii 和 Parrott (2006) 应用元胞自动机 (CA) 分析了外来物种和本地种的扩散及竞争关系。该模型设计了二维 50×50 规则网格, 假设外来种和本地种均是一年生植物, 每个元胞里只存在一个植株, 其每个世代经历两个基本过程——种子扩散和竞争, 两物种竞争结果取决于扩散种子的数量和竞争函数, 竞争函数利用外来种与本地种扩散种子的数量比 ($R_{e/n}$) 计算外来种占领元胞的概率 (P_e), 也就是外来种成功在新地区定殖 (successful colonization) 的概率或者竞争能力。

$$P_e = \beta + \alpha \log_{10}(R_{e/n})$$

其中, α 、 β 分别代表线性方程的斜率 (slope) 和截距 (intercept)。

第一次传入模拟时元胞随机分布为 10 个外来物种, 2490 个本地种, 固定 α (或者 β), 变化 β (或者 α), 每个个体每个世代散播 5 粒种子, 散播种子后个体立即死亡, 不同 α 、 β 组合分别进行 200 个世代的拟合, 但在到达 200 世代前, 如果外来物种所占元胞数量已经为零或到达总数的一半, 则停止拟合, 该种模拟方式的结论表明 α 的减少或者 β 的增大均有利于增加外来种的竞争力。Arii 等又提出, 外来物种的成功定殖并不能说明其可以完全取代本地种, 有可能与其共存, 另一个模拟方式即说明了 α 、 β 组合对两类物种之间的关系的影响, 分别固定 α 、 β 值, 不同的 α 、 β 组合进行世代模拟直到其中一物种灭绝或者达到最大值, 结果证明了竞争力强的外来种可能不能完全取代本地种, 反之, 竞争力弱的外来种也可能在新栖息地成功定殖。

需要强调的是该模型不针对某个物种, 而是适用于外来和本地这两类物种, 当然, 模型也存在一些问题, 首先, $R_{e/n} = 1/1=1$ 和 $R_{e/n} = 100/100=1$ 这两种情况的竞争结果肯定是有所不同的, 但模型并不能给予解释; 第二, 在实际的生态系统中, 模型不能充分分析多个物种参与竞争的情况, 而在实际的生态系统中这类现象是普遍存在的 (Arii & Parrott, 2006)。

1.2.3.4 景观中性模型

景观中性模型 (Neutral Landscape Models, NLMs) 源于景观生态学渗透理论 (percolation theory), 做为在破碎化景观中评估外来物种入侵扩散风险的工具 (With, 2004)。渗透理论认为当媒介的密度达到某一临界值时, 渗透物突然能够从媒介的一端到达另一端, 这种因为影响因子或环境条件到达某一阈值而发生的从一种状态过渡到另一种截然不同状态的过程称为临界阈现象, 显示出由量变到质变的特征。生物多样性衰减与生境破碎化程度之间的关系就属于广义的临界阈现象, 而外来物种入侵过程也表现出临界阈限特征 (邬建国, 2000)。

自 20 世纪 80 年代以来, 渗透理论在景观生态学研究中的应用日益广泛, 并逐渐地作为一种景观中性模型 (NLMs) 而著称 (邬建国, 2000)。生态学中性模型是指不包含任何具体生态学过程

或机理的, 只产生数学上或统计学上所期望的时间或空间格局的模型(刘茂松和张明娟, 2004)。其最大的作用是为研究景观格局和过程的相互作用提供一个参照系统, 通过比较真实景观和随机渗透系统的结构和行为特征, 检验有关景观格局和过程关系的假设。渗透理论基于简单随机过程, 并有显著的而且可预测的阈限特征, 因此是非常理想的 NLM(肖笃宁等, 2003)。它已经被用于研究景观连接度和干扰(如火)的蔓延, 种群动态等生态学过程。

而景观结构的改变和外来物种入侵扩散的关系则少有人研究, With(2004)应用 NLMs 预测生境破碎化达到某一阈值后, 入侵扩散程度就会加剧, 这种生物群落在景观中“渗透”的现象不仅依赖景观被干扰后的格局情况, 还取决于物种行为生态学特征(Wiens et al., 1997), 能力弱的扩散者在斑块聚集的空间更易扩散, 能力较强的入侵者则可以跳过一个或几个非生境斑块, 达到扩散的目的。这体现了渗透理论对实际研究的指导意义, 而且会促进对景观格局和生态学过程之间的相互作用的理解。

1.3 外来生物风险评估中的地理信息系统技术

地理信息系统(Geographical Information System, GIS), 是 20 世纪 60 年代开始迅速发展起来的集地理空间数据处理与计算机技术于一体的一门边缘技术学科, 是指在计算机软硬件下, 进行采集、存储、管理、处理、检索、分析和显示空间物体的地理分布以及与之相关的属性(刘南和刘仁义, 2002)。在几乎所有与空间信息相关的, 诸如资源管理、城市规划、环境管理、设施管理等领域得到了广泛应用, 形成了多层次和不同尺度的应用格局, 并成为一个快速增长的产业, 与此同时, GIS 软件技术体系(GIS Software Technology System)也得到很大发展, GIS 的技术发展在软件模式上经历了以下的发展过程: GIS 模块、集成式 GIS、模块化 GIS、核心式 GIS、组件式 GIS 和 WebGIS。其中集成式 GIS 是 GIS 发展的一个重要的里程碑, 组件式 GIS 和 WebGIS 是当前 GIS 的发展趋势。

1.3.1 集成式地理信息系统(Integrated GIS)

各种 GIS 模块走向集成, 逐步形成大型的 GIS 软件包(GIS Package), 如 ESRI 的 ArcGIS Desktop(可分为三个层次 ArcView、ArcEditor 和 ArcInfo), Genasys 的 GenaMap 等均为集成式 GIS 的典型代表。其优点在于其集成了 GIS 的各项功能, 形成独立完整的系统; 而其缺点在于系统过于复杂、庞大, 从而导致成本高, 也难于与其它应用系统集成。主要功能有地图的各类显示和分析、高级的地理编辑和数据的创建、进行空间处理、在复杂的信息模型和框架下进行地理数据管理等(ESRI, 2005)。

由于外来生物入侵问题涉及很多地学和物候学的因素, 国内外很多学者已经把集成式 GIS 系统出色地应用到研究中, GIS 的可视功能、模拟功能、建立统计模型和动态显示动态信息(如环境、生物、社会人类活动等)无论是在适生性分析还是在定殖扩散分析方面都发挥了常规方法所不可比拟的优势。还可以根据集成式 GIS 软件内部提供的函数模型, 用已知数据直接在 GIS 中建模, 进行动态分析或者模拟预测, 比如, 通过空间叠加分析物种分布的影响因素, 通过点数据的插值分析无数据地区的情况(李红梅等, 2006)。

我国学者从 20 世纪 90 年代起运用适生分布软件与 GIS 工具相结合的方法预测了诸如苹果蠹蛾（林伟, 1994）、梨火疫病（赵友福和林伟, 1995）、小麦印度腥黑穗病菌（陈克, 2002）、西花蓟马（程俊峰, 2006）等的适生性分析。法国人利用地理信息系统开发了一个林木虫害损失自动评估系统，在评估云杉蚜虫（*Choristoneura fumiferana*）所引起的林木损失时获得成功（Power, 1991）。美国多家公司利用“3S”技术联合开发的农作物病害预警系统在美国西部得到广泛的应用（Thomas & Gubler, 2000）。

1.3.2 组件式地理信息系统（Components GIS）

随着计算机和地理信息技术的飞速发展，GIS 理论与应用的逐渐成熟，组件式技术已逐渐成为 GIS 软件的主流，改变了传统集成式 GIS 平台的工作模式，更适合用户进行二次开发，建立具有独立版权的专业软件。所谓组件式 GIS（ComGIS），是指基于组件对象平台，以一组具有某种标准通信接口的、允许跨语言应用的组件提供的 GIS。ComGIS 的基本思想是把 GIS 的各大功能模块划分为几个控件，每个控件完成不同的功能各个 GIS 控件之间，以及 GIS 控件与其他非 GIS 控件之间，可以方便地通过可视化的软件开发工具集成起来，形成最终的 GIS 应用系统（张宏群等, 2004）。

ComGIS 基于标准的组件式平台，各个组件之间不仅可以进行自由、灵活的重组，而且具有可视化的界面和使用方便的标准接口。组件式平台主要有 Microsoft 的 COM（Component Object Model，组件对象模型）/ DCOM（Distributed Component Object Model，分布式组件对象模型）和 OMG 的 CORBA（Common Object Request Broker Architecture，公共对象请求代理体系结构），目前 Microsoft 的 COM/DCOM 占市场领导地位。基于 COM/DCOM，Microsoft 推出了 ActiveX 技术，ActiveX 控件是当今可视化程序设计中应用最为广泛的标准组件（邱群勇等, 2001）。

国际上大多数 GIS 软件公司把开发组件式软件作为重要的发展战略，其中比较著名的有 Intergraph 公司推出的 GeoMedia 组件式 GIS 软件，ESRI 公司的 MapObjects, ArcObjects 和 MapInfo 公司的 MapX。我国也正在研制国产的组件式 GIS 软件—ActiveMap（其升级版本现更名为 SuperMap）。我国学者应用这些软件已经在“地籍信息系统”（张金亭, 2001）、“水稻种植信息系统”（王卷乐, 2004）、“地下水动态管理系统”（杨旭, 2004）等系统中成功应用并得到实践检验，而与外来生物有关的信息系统作者还未见到公开报道。

1.3.3 万维网地理信息系统（Web GIS）

几乎在开发组件式 GIS 的同时，出现了万维网 GIS（WebGIS），WebGIS 是 Internet 技术与 GIS 相结合的产物，GIS 通过 WWW 功能得以扩展，真正成为一种大众使用的工具。从 WWW 的任意一个节点，Internet 用户可以浏览万维网 GIS 站点中的空间数据、制作专题图，以及进行各种空间检索和空间分析，WebGIS 拥有更广泛的访问范围，更简单的操作并且可以大规模地降低系统成本，从而使 GIS 进入千家万户。已有一些公司推出了万维网 GIS 产品，比如：MapInfo 公司的 MapInfo ProServer 和 MapXtreme、Intergraph 公司的 GeoMedia Web Map、ESRI 的 Internet Map Server(IMS) for ArcView & MapObjects、Autodesk 的 MapGuide 以及 Bentley 的 ModelServer/Discovery 等。

我国学者用 WebGIS 完成了“土壤参比查询系统”(杨国祥等, 2007)、“农业环境信息系统”(刘光媛等, 2007)、“配电网系统”(赵强和赵建涛, 2006)等。在外来物种研究方面, 沈文君(2004)研究了分布式 WebGIS 在外来有害生物风险分析中的关键技术, 从系统应用模型分析、数据库建设、网络信息发布方案、系统安全技术等几个方面进行了深入探讨, 为开发外来物种风险分析系统提供了思路, 也为高效传播外来入侵生物知识提供了一种解决方案。

1.4 本研究的意义、主要内容和技术路线

1.4.1 选题依据及意义

为了减小外来生物给国家或地区经济及环境和人们生活带来的损失, 有效地利用外来生物, 就要提高预防与预测准确性。发展早期预警系统则是关键科学问题, 而风险评估是其重要的参考依据, 可辅助确定外来物种的危险等级, 辅助决策是否对某种生物采取防治等活动和资金的安排, 而且风险评估也可以在解决相关贸易争端事务上起到重要作用。

通过研究国内外外来生物风险评估的体系, 发现多针对某类外来物种做评估, 而少有可以囊括所有外来物种的框架。虽然外来生物的种类多种多样, 引入机制也各不相同, 但与引入及危害过程相关的无外乎环境、自身和人为因素, 其中的决定性要素是有共同点的。本研究要总结这些共同点定制出一个针对外来生物的风险评估指标框架, 那么在评估任何一种外来物种时都可以以此为参考。

在国内外研究中定性的风险分析占多数, 定量分析相对不足。从方法学来看, 定量评估更注重风险事件的时空关系, 常以模拟的方法来预测风险出现的情况, 而定性评估则将风险事件分解为多个风险要素, 并将这些要素按某种方式进行多维向量运算后得到整体的风险评估值(陈克等, 2002)。从结果来看, 定量风险评估得出的结果是数量化的, 一般是概率分布; 定性风险评估的结果常用风险等级来表示。不确定性是风险的最根本特性, 概率分布能够更准确地描述这种不确定性, 从这一角度来看, 定量方法更为科学。因此在风险分析时引进定量分析是必要的。本研究主要攻克如何应用定量和图形手段进行分析, 以达到分析结果精确和直观的目的。

生物入侵问题是一个国际化焦点, 地区之间的交流尤为重要, 但是由于地域的障碍, 这种交流不很畅通。另外, 生物风险分析时所需要的数据是因物而异, 在定量分析更是需要复杂繁琐的计算。针对这个问题, 该课题最终通过数据库和地理信息系统技术开发出一个评估系统, 一是应用电子技术简化和精确分析过程, 二是为今后研究网络远程物种信息服务做铺垫。

本研究把近几年传入我国的红火蚁(*Solenopsis invicta* Buren; red imported fire ant, RIFA)作为个案来检测系统的应用效果, 用红火蚁作为典型案例进行分析有以下几个原因: 第一, 红火蚁是目前在生物学和生态学研究得比较透彻的昆虫之一(Wojcik et al., 2000), 到目前为止, 已经积累了很多有价值的资料, 如红火蚁扩散的数学模型(Korzukhin et al., 2001), 入侵历史, 生物防治物种类等。本课题的焦点在于研究外来生物风险分析的基础平台, 选择一个资料充分的物种做案例分析, 可对平台使用效果做出相对准确的判断; 第二, 红火蚁是一种经济性害虫(Thompson et al., 1995), 对其进行分析后, 结果即可以应用到实际预防操作中。除了美国, 其他地区的红火蚁入

侵情况尚属初始阶段，该地区的政府一方面要根除已入侵的个体和种群，另一个重要方面是防止其进一步扩散，在有可能入侵的地区严格监控，发现疫情马上采取措施，预防和根除同时进行，才有可能遏制入侵初期的外来物种。

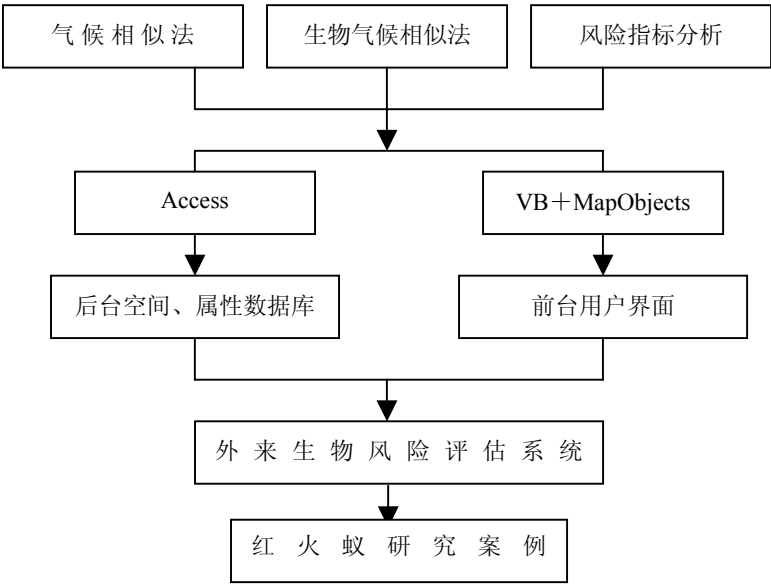
1.4.2 主要研究内容

主要研究了三种预测红火蚁入侵概率的方法，并应用数据库技术和组件式地理信息系统的思想开发了外来生物风险评估系统。主要研究内容是：

- 1) 依据气候相似理论，利用相似离度法预测外来生物的适生性及入侵概率，以红火蚁为例。
- 2) 利用生物气候相似性法预测外来生物的适生性及入侵概率，以红火蚁为例。
- 3) 根据文献资料总结、归纳外来生物风险评估指标框架，收集指标的相关数据，评估物种入侵某地区的概率，以红火蚁为例。

4) 以上三部分作为外来生物风险评估系统的开发原理，利用 Visual Basic 6.0 和 MapObjects 组件进行系统研制，该系统的主要功能是运算前三部分内容中的模型并将数字图形化显示，

1.4.3 技术路线



第二章 气候相似性分析法预测外来生物潜在适生区

气候相似理论是人类为寻找生物引种驯化的规律而提出的。20 世纪初,德国著名林学家迈耶尔在研究树木引种问题时认为,木本植物引种成功的关键要看原产地气候条件是否于新产地气候条件相似;40 年代,美国生态学家应用列表思路和方法研究比较世界各地针对某种作物的农业气候相似情况;60 年代,苏联生态学家找出一些关于农作物生长发育有关的农业气候指标,并在世界范围采用等值线图方法,对几种主要作物划分了相似地区。但他们的工作尚不能定量地度量两地间的相似程度,也未充分考虑气候要素值的年内分配问题。针对这些不足,我国魏淑秋等于 70 年代末提出了农业气候相似距分析方法,用空间距离来定量、综合、有序地度量两地的相似程度(Wei, 1993; 魏淑秋, 1994),这种方法对危险性病虫害的适生地分析提供了有力的气候背景,划分它们的严重发生区、一般发生区和不发生区以控制它们的蔓延(魏淑秋, 1994),刘桂莲(1994)通过运用农业气候相似距对我国气候条件的相似性分析,说明相似距较好地反映了不同地区间气候的相似程度,从而论证了农业气候相似距应用的可靠性和可行性。假如以平面直角坐标系的 x 轴和 y 轴分别表示因子序号和因子数值,那么一个气象样本可以在该坐标系中被点绘成一条样本曲线,要全面比较两个样本的相似程度,不但要看两样本曲线的靠近程度(简称值相似),还要看它们形状的相似程度(简称形相似),基于欧氏距离的农业气候相似距度量法和相似系数、海明距离等其他常用的气候相似比较的数学衡量标准都不能很好地描述样本间的值相似和形相似,因此李开乐(1986)提出了一种比较全面的相似衡量标准——相似离度,它则同时满足值相似和形相似这两个要求。相似离度法已在气象预报领域得到广泛应用(廖木星等,1999; 何小娟, 2002; 张丰启等, 2002; 李一平和康玲, 2004)。

本章研究遵循气候相似原理,应用相似离度法预测外来物种在中国的适生区域和入侵中国各省市及其部分地级行政区域和气候区的概率,以红火蚁为案例,并分等级建立预警级别。尽管还有诸如生物学特性、植被和人为等因素限制物种的潜在分布区,但气候条件始终是制约物种陆地分布的最基本的因素(Willis & Whittaker, 2002; Sutherst & Maywald, 2005),又鉴于气候数据易于获得和定量,只要采用恰当的模型,其预测结果对于决策工作是很具参考价值的并且任何物种都可以从气候因素着手分析其入侵区域和概率,是一种易于推广的方法。调查物种在全球的现实分布区是用该法预测准确程度的关键,直接从文献中查找分布数据或实地考察是解决此问题的有效途径。需要说明的是,本章的方法将作为“外来生物风险评估系统”中的重要原理,但鉴于 MapObjects 制图功能有限,本章所有制图将采用 ArcGIS Desktop 软件完成以达到最佳显示效果。

2.1 材料与方法

2.1.1 基础数据

基础数据包括全球站点地理数据(经度、纬度和海拔)和气象数据(1971-2000 年 30 年月平均值,字段包括:最高温度、最低温度、降水和空气相对湿度,见表 2-1)。由于 CLIMEX 自带数

数据库中的气象数据没有年份出处，为了使气象数据具有可比性，本研究假定各地气候常年稳定。此外，CLIMEX 数据库使用上午 9 时和下午 3 时空气湿度，本文仅取上午 9 时湿度值与中国各站点空气相对湿度值相对应。

表 2-1 全球气象站点个数及数据来源

Table 2-1 Quantity of meteorology stations and information sources in the world

区域	站点个数	数据来源
中国大陆	706 个	国家气象信息中心气象资料室
中国香港	1 个	香港天文台网站 (gb.weather.gov.hk)
中国澳门	1 个	地球物理暨气象局网站 (www.smg.gov.mo)
中国台湾	25 个	中央气象局网站 (www.cwb.gov.tw)
中国以外	2414 个	CLIMEX V2 自带数据库

2.1.2 相似离度模型

相似原理认为，相似的天气形势反映了相似的物理过程，因而会出现相似的天气现象（李一平等, 2004），本文采用相似离度方法推算*i*点与*j*点气候相似性，具体方法如下：

$$C_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m C_{ijk} \quad C_{ijk} = 0.5(D_{ijk} + S_{ijk})$$
$$D_{ijk} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n |X'_{ikl} - X'_{jkl}| \quad S_{ijk} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n |X'_{ikl} - X'_{jkl} - E_{ijk}| \quad E_{ijk} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n (X'_{ikl} - X'_{jkl})$$

- k: 第 *k* 个气候因子，*k*=1,2,...*m*
- l: 每个气候因子的样本长度，*l*=1,2,3,...*n*（这里的 *l* 即为李开乐所指“因子序号”）
- C_{ij}*: 两个样本的相似离度，该值越小，两地气候相似性越大
- C_{ijk}*: 两个样本第*k*个气候因子的相似离度
- S_{ijk}*: 两样本间第*k*个气候因子*l*个数值对*E_{ijk}*的离散程度，称为形系数
- D_{ijk}*: 两样本间第*k*个气候因子*l*个数值间的差异程度，称为值系数
- E_{ijk}*: 两样本间第*k*个气候因子*l*个数值间的平均差值

本文中采用 4 个气候因子（最大温度、最小温度、降水和空气相对湿度）的 1971-2000 年 30 年月平均值，即 *m*=4，*n*=12。数据经标准化后进行加和处理，*X_k'* 为标准化后的样本值。

2.1.3 预测适生区及入侵概率的方法

在自然环境下生活的生物，其生长状况很大程度上取决于当地的气候条件，一般认为，如果入侵地气候与严重发生地或原产地的气候越相似，那么物种入侵的可能性就越大（Scott & Panetta, 1993）。用严重发生地或者原产地（*i*点）的气候数据与中国站点（*j*点）数据逐一对比，相似离度（*C_{ij}*）越小，*j*点与*i*点的气候相似性越大。由于*C_{ij}*没有上限，无法确切得出相似程度，因此笔者假定*C_{ij}*最小的*j*点与*i*点百分之百相似，通过标准化计算，即可得到其它点与*i*地的百分制相似程度，计算公式为：

$$C_{ij}' = \frac{C_{ij\max} - C_{ij}}{C_{ij\max} - C_{ij\min}}$$

$C_{ij\max}$, $C_{ij\min}$ 分别为所有参与计算 C_{ij} 中的最大值和最小值。相似离度值转化为百分制后 (C_{ij}') , 既可以认为是气候相似性的符合程度, 也可以认为是只在气候因素影响下的入侵该地的概率。

仅一个严重发生地或原产地不足以反应出物种的分布情况, 所以本研究建立了原产地集合和严重发生地集合。中国 733 个位点均与集合中的每个位点进行相似离度计算并标准化, 然后取集合平均值, 即得到每个站点相对这个集合的气候相似程度, 取各行政区站点和各气候区内站点的平均值, 即为该地区相对于这个集合的气候相似程度即入侵概率。由于每个地区内的气候状况也会存在差异, 还需利用 ArcView GIS 软件对标准化后的相似离度值进行插值处理, 得到跨区域和重点研究省份的气候相似程度图, 即适生区分布图和入侵概率图。

需要说明的是, 南美原产地国家与中国分处于南北半球, 冬夏季节在时间上是错位的, 必须将原产地国家气候数据进行适当时段滑移, 才能与中国位点进行比较。本文采用检索方法确定滑移距离 (魏淑秋, 1994), 对不同的滑移距离一一进行计算, 选择中国站点相似离度平均值最小值时的距离, 经计算, 本文采用滑移半年的处理办法。

2.1.4 严重发生地与原始产地设置

根据各种文献记录的红火蚁目前全球分布数据建立的地点集合为中国站点集合 (Chinese Locations Set, CLS)、美国站点集合 (American Locations Set, ALS) 和原产地站点集合 (Native Locations Set, NLS)、中美原站点集合 (CLS&ALS&NLS), 后者为前三个集合内站点的合并, 即全球红火蚁重要发生地集合。图 2-1 至 图 2-3 中的 A 图均是文献记录的红火蚁分布区, B 图是本研究选择的集合中的各个站点。

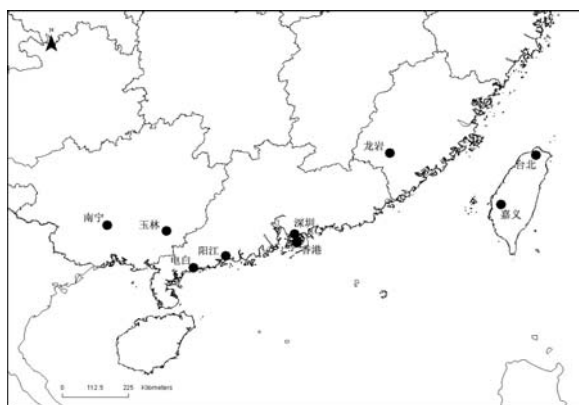


图 2-1-A 红火蚁在中国的实际分布 (GISP, 2006)

Fig. 2-1-A The real distribution of RIFA in China

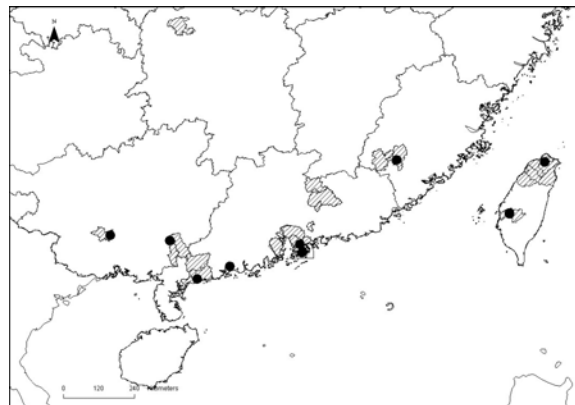


图 2-1-B 中国站点集合中的各点分布

Fig. 2-1-B Distribution points in Chinese Locations Set (CLS)

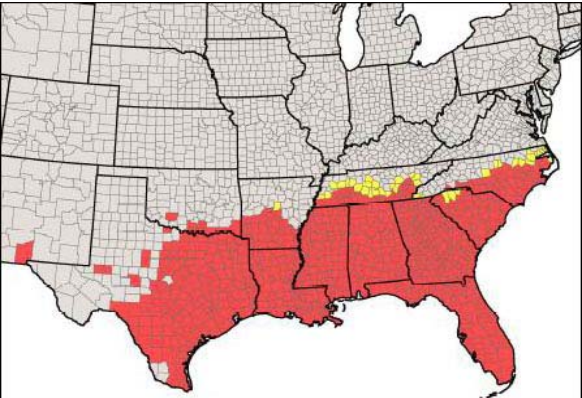


图 2-2-A 红火蚁在美国的分布 (USDA, 2006)



图 2-2-B 美国站点集中的各点分布

Fig. 2-2-A The real distribution of RIFA in America Fig. 2-2-B Distribution points in American Locations Set (ALS)



图 2-3-A 红火蚁在原产地分布 (DE H, 2006)



图 2-3-B 原产地站点集中的各点分布

Fig. 2-3-A The real distribution of RIFA in South America Fig. 2-3-B Distribution points in Native Locations Set (NLS)

2.1.5 预警级别划分

依据相似离度值转化后的百分制值 (C_{ij}'), 即入侵概率值, 将红火蚁入侵中国的地区划分成四个预警级别, 即红色警报区 (100.0%-80.1%)、橙色警报区 (80.0%-50.1%)、黄色警戒区 (50.0%-30.1%) 和绿色小风险区 (30.0%-0)。红色警报区和橙色警报区要积极采取预防或防治措施, 只是在资源投入上有所差别; 黄色警戒区则主要以监测和预防措施为主; 绿色小风险区不需要采取针对性措施。

2.1.6 考虑非气候因素

将中国重要港口分布图, 中国土地利用图分别与本章预测的红火蚁适生区结果相重叠, 为找出重点预防与防治的地区提供更多的线索。

2.1.6.1 中国港口

众多文献记载, 红火蚁于 20 世纪 30 年代由美国阿拉巴马州的莫比尔港口传入美国 (Li et al., 2005), 港口作为一个国家或某地区的大门, 提供船舶靠泊, 旅客上下船, 货物装卸、储存、驳运

以及相关服务,港口通常位于江、河、湖、海沿岸商业贸易活动频繁的城镇或临近地区,是水陆运输的枢纽,旅客和货物的集散地,是国内外贸易物资转运的联结点,也是沟通城乡物资交流的场所。这就为外来生物的传入和扩散创造了良好的条件。据报道,澳大利亚的红火蚁疫情均发生在昆士兰州,主要集中在布里斯班市港口地区(Natrrass & Vanderwoude, 2001; McCubbin & Weiner, 2002; Moloney & Vanderwoude, 2002)。这就启示我们需要关注中国港口的地理位置和运营情况在生物入侵过程中的作用。

根据《中华人民共和国港口法》第十一条的有关规定,交通部于2004年10月26日发布全国沿海主要港口和内河主要港口名录,中国国际海运网(www.shippingchina.com)也公布了中国重要港口,综合两部分资料,归纳中国主要港口名录(表2-2)。

表 2-2 中国主要港口在各政区的分布

Table 2-2 Distribution of main ports in China districts

港口名称	所属政区	纬度	经度	港口名称	所属政区	纬度	经度
哈尔滨港	黑龙江省	45.8	126.663	舟山港	浙江省	30.083	122.1
佳木斯港	黑龙江省	46.817	130.367	温州港	浙江省	28.016	120.633
大连港	辽宁省	38.929	121.655	杭州港	浙江省	30.433	120.317
营口港	辽宁省	40.683	122.25	嘉兴港	浙江省	30.5	121
锦州港	辽宁省	40.8	121.067	湖州港	浙江省	30.86	120.1
丹东港	辽宁省	40.116	124.4	台州港	浙江省	28.683	120.45
秦皇岛港	河北省	29.901	119.607	福州港	福建省	25.966	119.466
京唐港	河北省	39.2	119	厦门港	福建省	24.489	118.071
天津港	天津市	38.983	117.75	泉州港	福建省	24.833	118.7
烟台港	山东省	37.547	122.398	江阴港	福建省	31.917	120.233
青岛港	山东省	36.067	120.318	漳州港	福建省	23.733	117.55
日照港	山东省	35.383	119.55	东山港	福建省	23.75	117.45
龙眼港	山东省	37.417	122.64	汕头港	广东省	23.354	116.672
龙口港	山东省	34.75	119.45	深圳港	广东省	22.516	114.067
莱州港	山东省	37.412	119.947	广州港	广东省	23.1	113.6
岚山港	山东省	35.5	119.25	珠海港	广东省	21.933	113.283
威海港	山东省	37.45	122.2	湛江港	广东省	21.186	110.406
马山港	山东省	23.383	116.667	中山港	广东省	22.572	113.48
上海港	上海市	31.238	121.484	阳江港	广东省	21.7	111.8
连云港港	江苏省	34.733	119.45	赤湾港	广东省	22.476	113.861
南通港	江苏省	32	120.8	贵港港	广东省	23.1	109.6
南京港	江苏省	32.083	118.733	防城港	广西省	21.616	108.333
镇江港	江苏省	32.217	119.433	钦州港	广西省	21.733	108.733
太仓港	江苏省	31.65	121.2	北海港	广西省	21.469	109.07
张家港港	江苏省	31.967	120.4	梧州港	广西省	23.3	111.2
泸州港	四川省	28.9	105.4	海口港	海南省	20.016	110.267
重庆港	重庆市	30.067	106.583	八所港	海南省	19.1	108.616
武汉港	湖北省	30.567	114.283	三亚港	海南省	18.233	109.483
黄石港	湖北省	30	115	洋浦港	海南省	19.733	109.2
南昌港	江西省	28.667	115.917	基隆港	台湾省	25.133	121.733
九江港	江西省	29.717	115.967	台中	台湾省	24.288	120.533
芜湖港	安徽省	31.366	118.366	高雄港	台湾省	22.616	120.266
马鞍山港	安徽省	31.8	118.367	花莲	台湾省	24	121.633
合肥港	安徽省	31.133	117.05	香港	香港	22.5	114.333
宁波港	浙江省	29.941	121.85	澳门	澳门	22.166	113.566

2.1.6.2 土地利用

土地利用是指在特定的时期和地区条件下,人们根据土地资源的特性和功能,围绕一定的目的,实施对土地资源的开发、利用、保护和改造(赵敏, 2005)。人类的对土地利用的行为深刻地影响着生物的栖息环境,尤其是土栖生物,对土地利用的分析有助于了解红火蚁对栖息环境的喜好。根据中国科学院地理科学与资源研究所提供的土地利用GIS电子地图,按流域把全国分成长江流域、海河流域、淮河流域、黄河流域、内陆河、松花江辽河流域、西南诸河流域、浙闽流域、珠江流域;把全国土地利用情况分成以下几个类型:

耕地:指种植农作物的土地,包括熟耕地、新开荒地、休闲地、轮歇地、草田轮作地;以种植农作物为主的农果、农桑、农林用地;耕种三年以上的滩地和滩涂。

- 水田:指有水源保证和灌溉设施,在一般年景能正常灌溉,用以种植水稻,莲藕等水生农作物的耕地,包括实行水稻和旱地作物轮种的耕地。
- 旱地:指无灌溉水源及设施,靠天然降水生长作物的耕地;有水源和浇灌设施,在一般年景下能正常灌溉的旱作物耕地;以种菜为主的耕地,正常轮作的休闲地和轮歇地。

林地:指生长乔木、灌木、竹类、以及沿海红树林地等林业用地。

- 有林地:指郁闭度>30%的天然木和人工林。包括用材林、经济林、防护林等成片林地。
- 灌木林:指郁闭度>40%、高度在2米以下的矮林地和灌丛林地。
- 疏林地:指疏林地(郁闭度为10%-30%)。
- 其他林地:未成林造林地、迹地、苗圃及各类园地(果园、桑园、茶园、热作林园地等)。

草地:指以生长草本植物为主,覆盖度在5%以上的各类草地,包括以牧为主的灌丛草地和郁闭度在10%以下的疏林草地。

- 高覆盖度草地:指覆盖度在>50%的天然草地、改良草地和割草地。此类草地一般水分条件较好,草被生长茂密。
- 中覆盖度草地:指覆盖度在20%-50%的天然草地和改良草地,此类草地一般水分不足,草被较稀疏。
- 低覆盖度草地:指覆盖度在5%-20%的天然草地。此类草地水分缺乏,草被稀疏,牧业利用条件差。

水域:指天然陆地水域和水利设施用地

- 河渠:指天然形成或人工开挖的河流及主干渠常年水位以下的土地,人工渠包括堤岸。
- 湖泊:指天然形成的积水区常年水位以下的土地。
- 水库坑塘:指人工修建的蓄水区常年水位以下的土地。

- 滩地：指河、湖水域平水期水位与洪水期水位之间的土地。

城乡、工矿、居民用地：指城乡居民点及县镇以外的工矿、交通等用地。

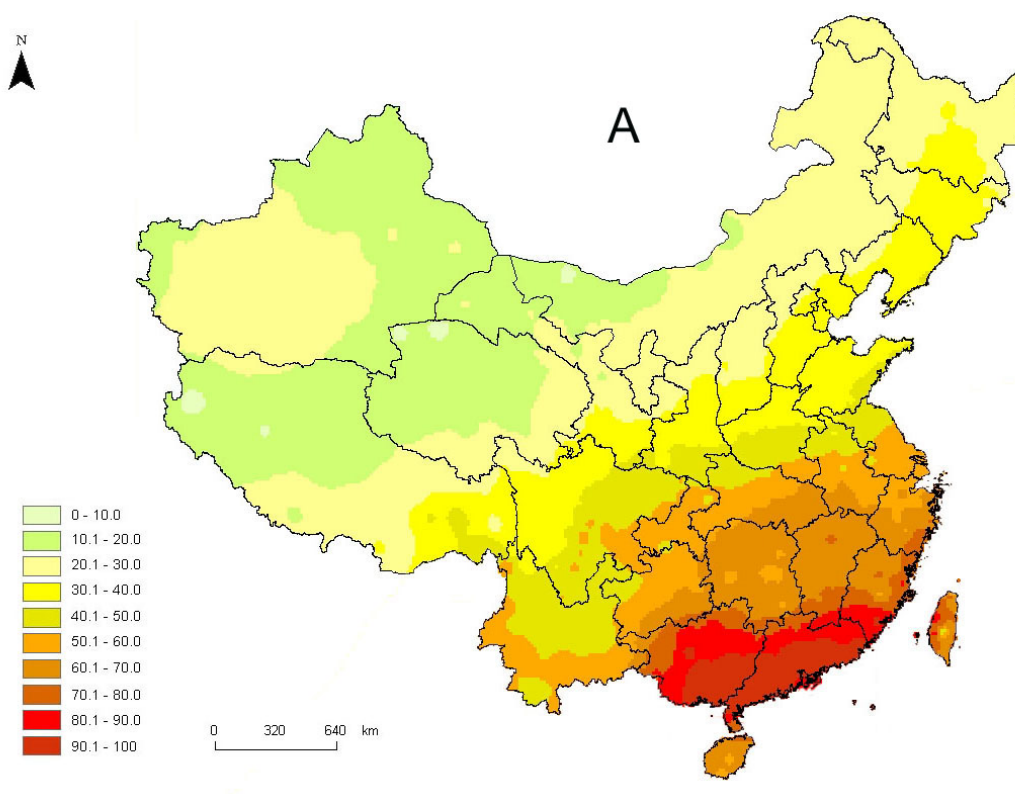
- 城镇用地：指大、中、小城市及县镇以上建成区用地
- 农村居民点：指农村居民点
- 其他建设用地：指独立于城镇以外的厂矿、大型工业区、油田、盐场、采石场等用地、交通道路、机场及特殊用地。

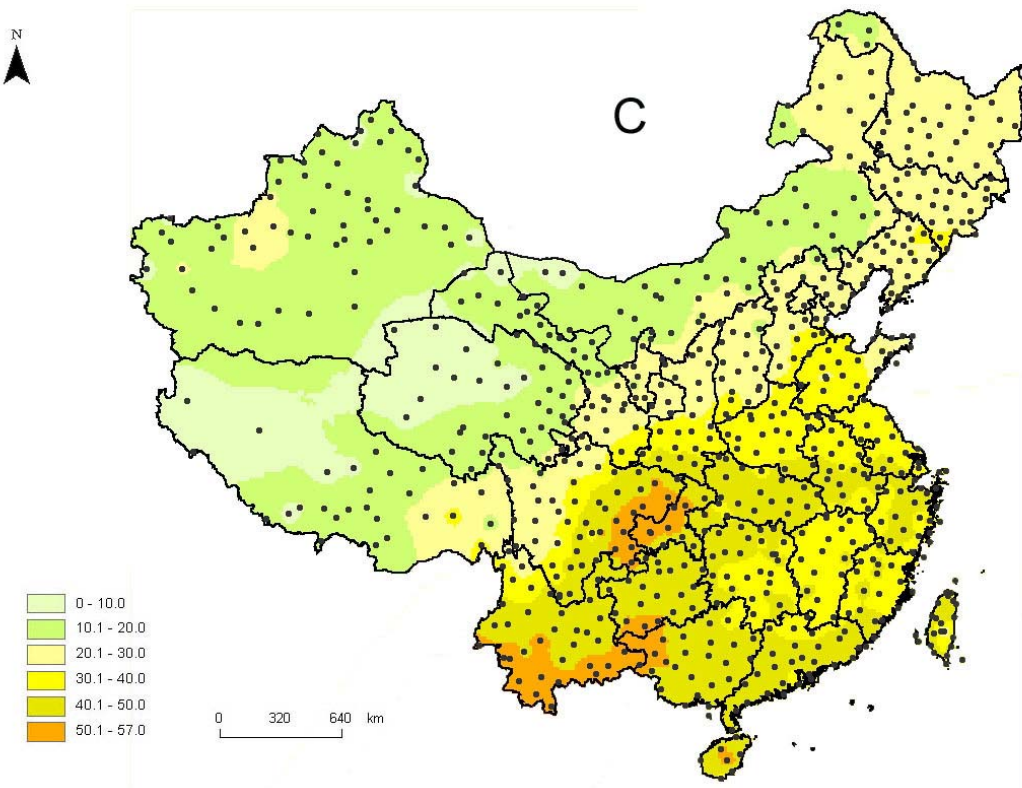
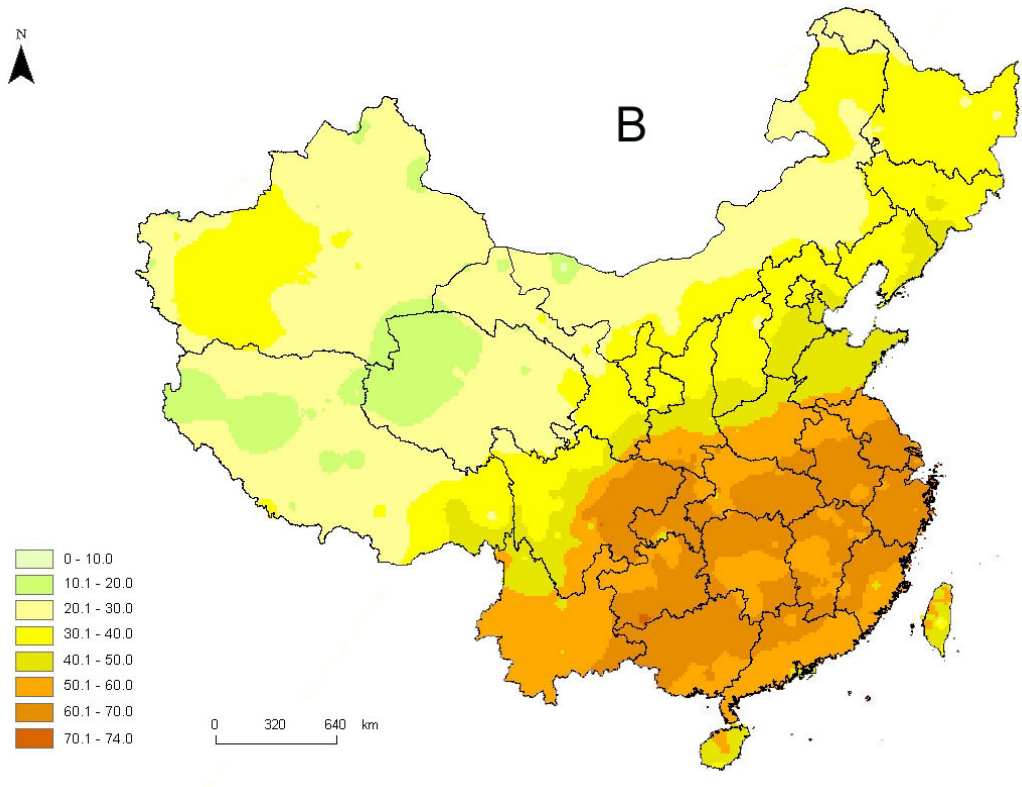
2.2 结果与分析

2.2.1 相似离度最小值地点确定

中国所有站点分别与 CLS、ALS、NLS 和 CLS&ALS&NLS 进行比较，这四组数值同时进行百分制转化。相似离度最小值出现在与 CLS 比较时的广东深圳站点 ($C_{ij}=0.094$)，最大值出现在与 NLS 比较时的西藏狮泉河站点 ($C_{ij}=0.378$)，则 $C_{ijmin} = 0.094$ ， $C_{ijmax} = 0.378$ ，根据 2.1.3 节中的公式，得到其他站点与不同集合比较的百分制数值。

2.2.2 中国整体性分析





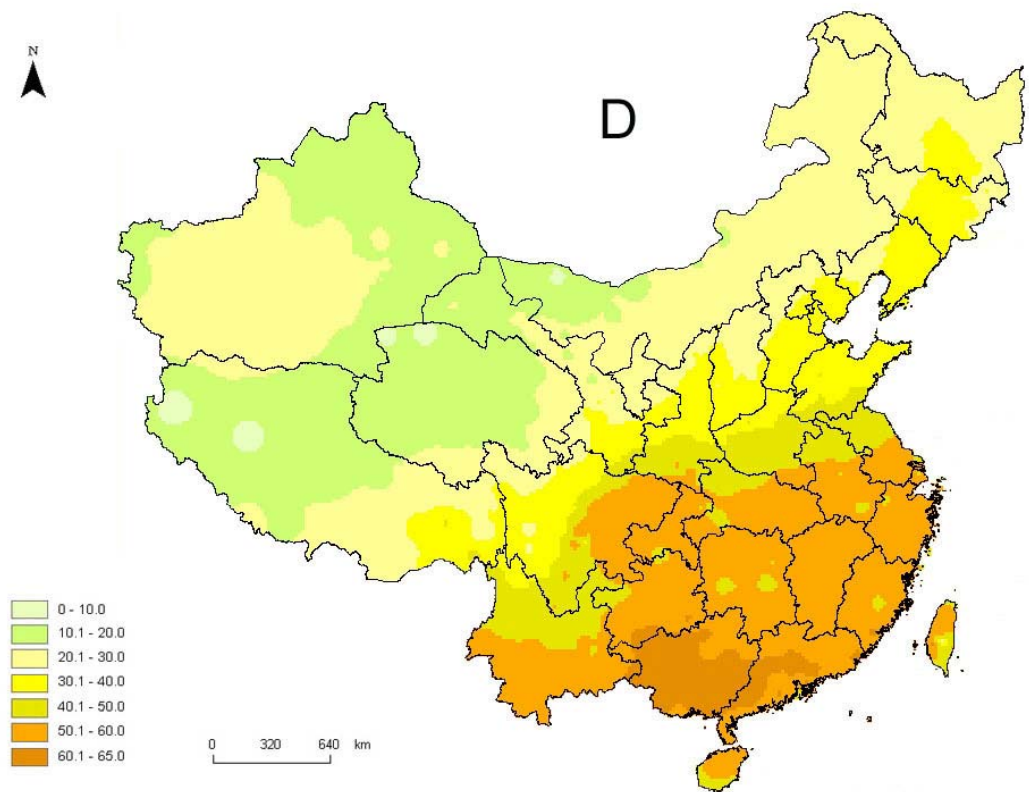


图 2-4 中国政区与各气候站点集合气候相似程度

Fig. 2-4 Climate analogy between China districts and the climate sets

A.中国政区与 CLS 气候相似程度; B. 中国政区与 ALS 气候相似程度; C. 中国政区与 NLS 气候相似程度; D. 中国政区与 CLS&ALS&NLS 气候相似程度
A. China districts vs. CLS; B. China districts vs. ALS; C. China districts vs. NLS; D. China districts vs. CLS&ALS&NLS

中国与 CLS、ALS 气候相似区集中在华南、华东、华中地区和贵州、云南东南部、四川东部等西南地区，但由图 2-4-A 与图 2-4-B 比较可发现中美气候也存在差异。中国地区与 NLS 气候相似性大多较低，只有四川重庆交界处、云南贵州和广西的交界处、云南南部相似性在 50%-60%之间。图 2-4-D 反映了中国地区与 CLS&ALS&NLS 的相似性，相似程度介于 CLS、ALS 与 NLS 之间。假设中国还没有被红火蚁入侵或是处于不易被人发现的入侵初期，那么只能用 ALS 和 NLS 作为预测气候相似程度的依据，图 2-4-B 和图 2-4-C 表明 ALS 和 NLS 分别与中国站点比较后的气候相似区域存在较大差异，即美国和原产地的气候相似程度也不高，又可看出红火蚁严重发生的中国地区（图 2-1-A）并不是与 ALS、NLS 气候最相似的地方。

综上可以说明红火蚁已经适应了 ALS、CLS 和 NLS 这三种气候相似性存在一定差异的地区生存，那些与 ALS、NLS 气候相似性高的地区需予以关注，一旦这些地区被红火蚁入侵，很有可能成为该物种的严重发生地。

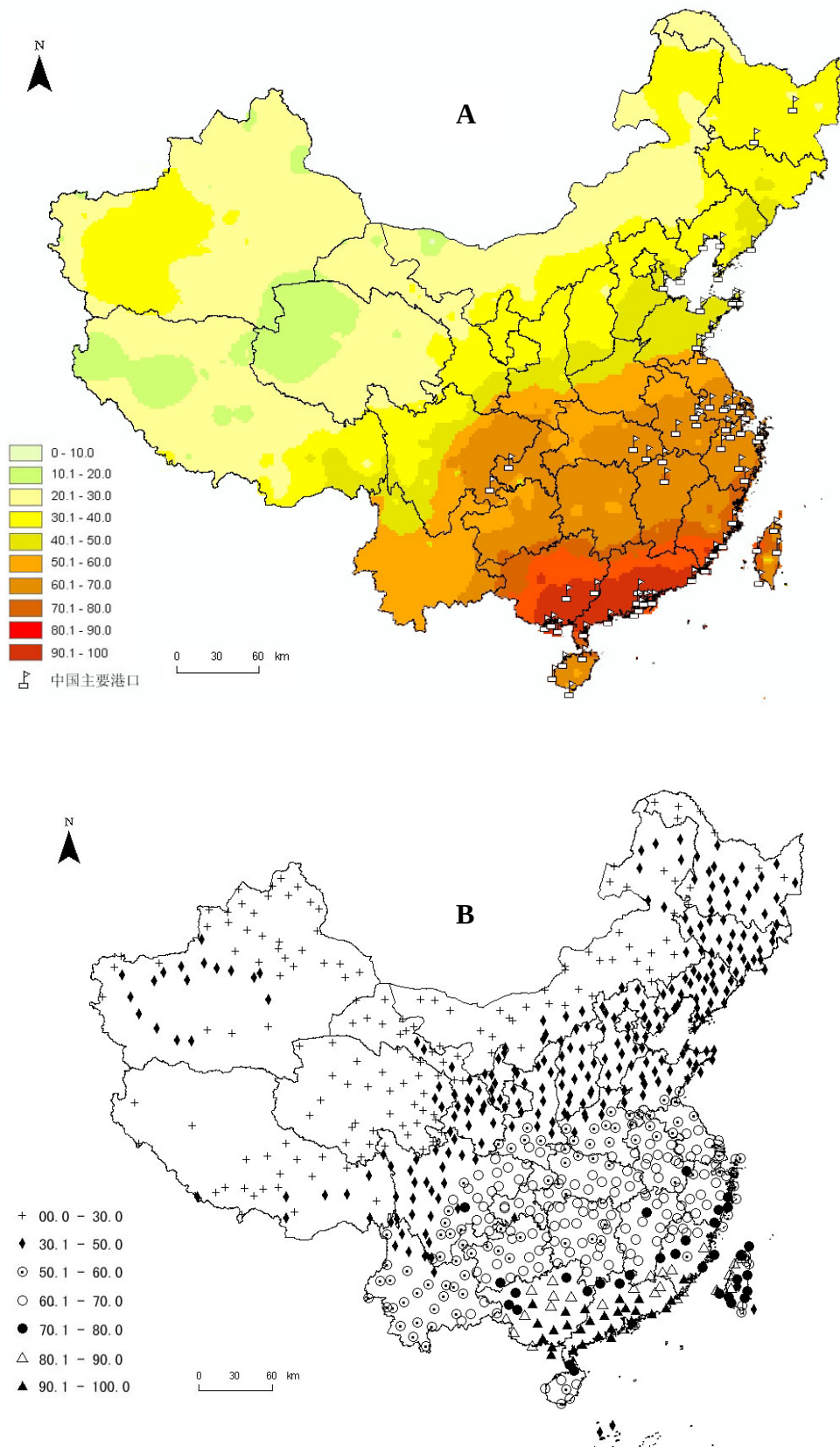
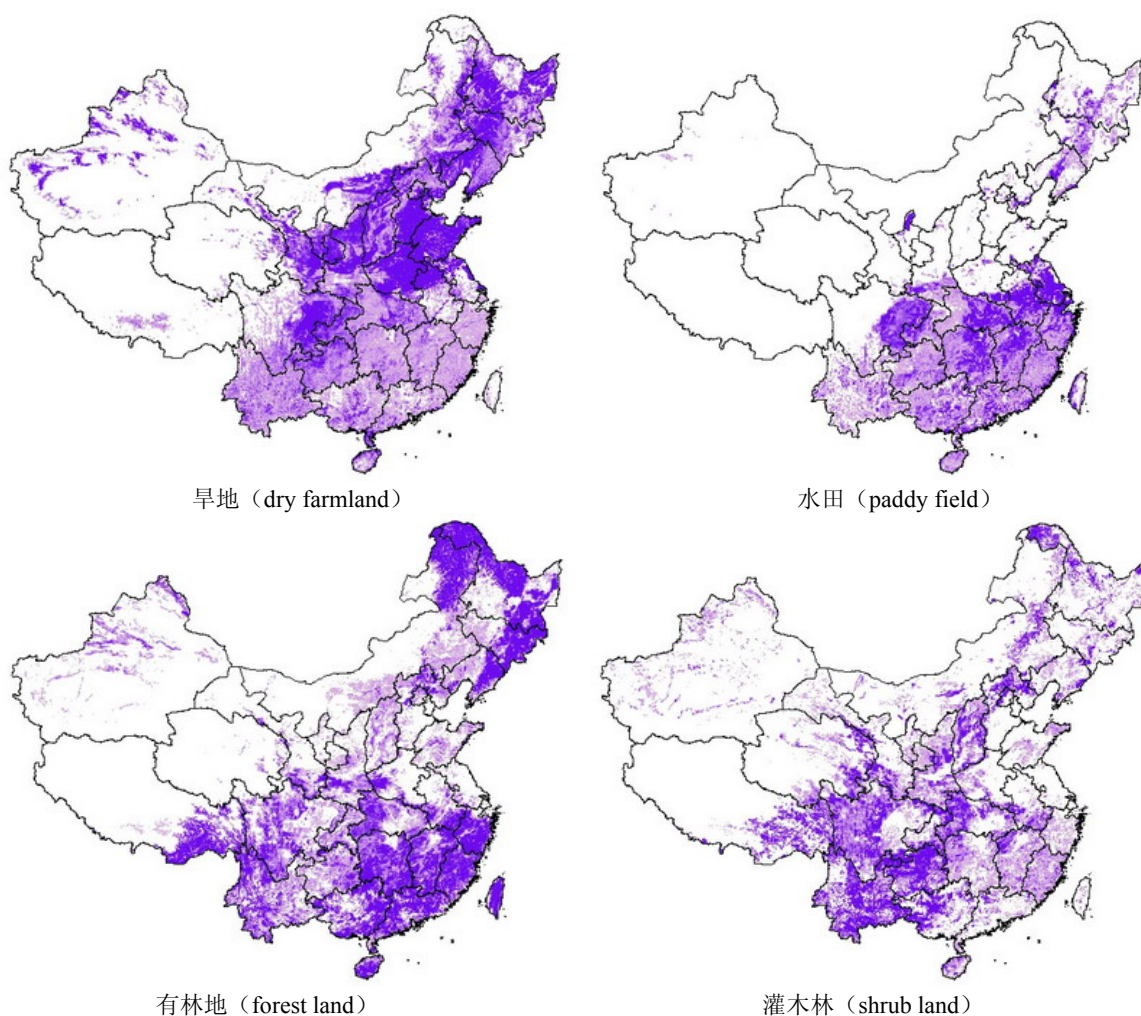
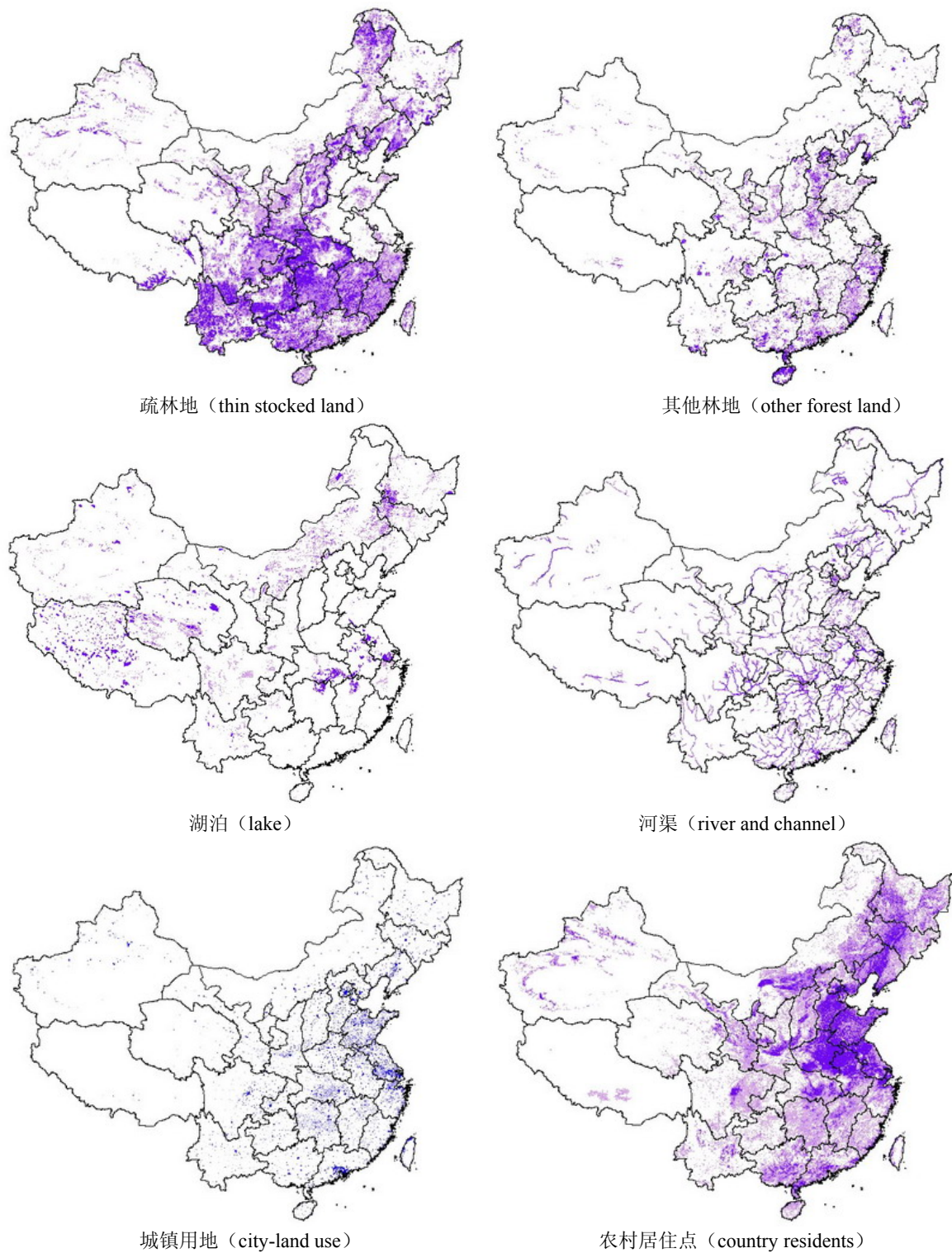


图 2-5 红火蚁在中国的适生区和入侵概率

Fig. 2-5 The potential distribution and invasion probability of RIFA in China

图 2-4 综合反映了红火蚁对不同气候的适应性，但为了更直接地表明红火蚁在中国的潜在分布和入侵概率状况，在此将图 2-4 中的 A、B、C 图整合在一起，将中国每个站点的入侵概率值，即与 CLS、ALS、NLS 气候相似程度值中的最大值（分析见 2.2.3 节），通过 ArcView 软件插值后得到图 2-5-A 结果，并加入中国主要港口位点。可以看出，我国广大的南方地区入侵概率均处于 50% 以上，广东广西地区更是达到了 80% 以上，中国的主要沿海港口集中地辽东半岛处于黄色警戒区、港口集中地江浙沿海处于橙色警报区，港口集中地珠江流域处于红色警报区；内河港集中地川渝地区和湖北江西地区处于橙色警报区。图 2-5-B 显示了中国 733 个站点各自所属的入侵概率范围。





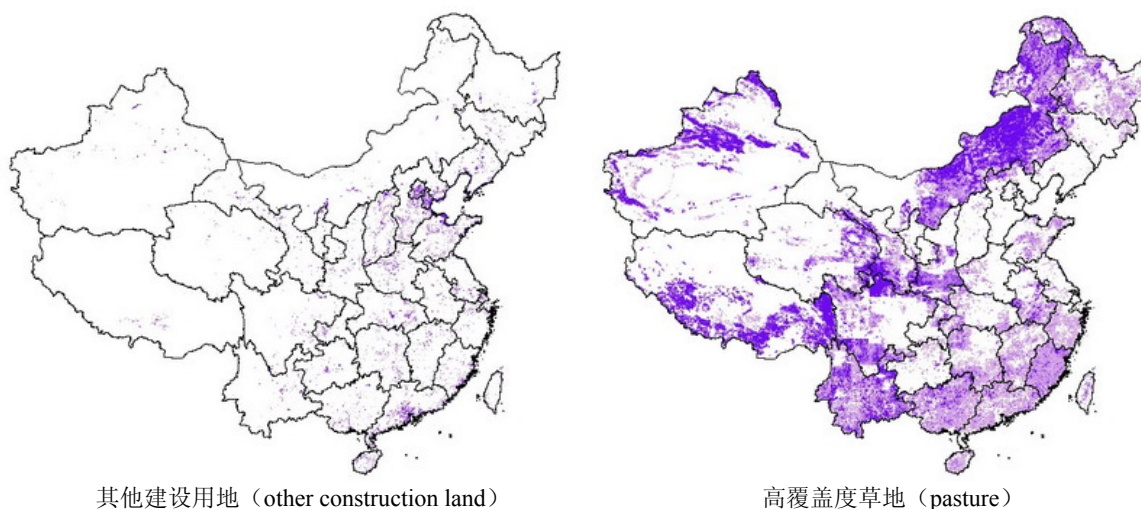


图 2-6 中国土地利用情况

Fig. 2-6 Different land usage in China

我国南方具有大量的耕地面积，有红火蚁分布的华南地区耕地的密度并不及华中地区，但高覆盖度草地面积却相对丰富，同时南方也存在着丰富的有林地，包括用材林、经济林、防护林等成片林地，无论有林地密度如何都存在发现红火蚁分布的地区，所以林地的丰富程度与红火蚁的分布关系可能还要视具体情况而定。但红火蚁出现的地区大多是“其他林地”高密度地区，其他林地可包括苗圃及各类园地，这些正是红火蚁经常出没的环境，所以“其他林地”图可作为预测红火蚁分布的一个参考。

红火蚁的存活离不开水，人们常常在小溪、沟渠、川流、江河、池塘和湖泊的附近发现红火蚁的蚁丘（张润志等, 2005）。湖泊和河渠图反映了我国的部分水域情况，河渠图中显示广东近港澳地区密度较高，虽然湖泊图中密集的地区还没有红火蚁发生，但结合本研究的上述结果，应该严防湖泊附近的地区。

已有红火蚁分布的广东近港澳地区明显存在高密度的城镇用地、农村居住地和其他建设用地，其中其他建设用地包括交通道路，而道路周边和交通设施又是红火蚁易于筑巢的地方，城镇和农村居住区人口密集并且人口流动性大，给红火蚁的传带制造了条件，而且红火蚁带来的社会危害会涉及更多的人口。

2.2.3 红火蚁入侵中国政区的概率

中国按省、自治区、直辖市和特别行政区共分为 34 个地区。由于 CLS、ALS 和 NLS 这三个气候站点集合均有红火蚁长期发生，中国政区只要与其中任何一个集合气候相似性程度高，都有被红火蚁入侵的可能，CLS&ALS&NLS 对应值只能反映各政区与 CLS、ALS、NLS 匹配后的平均气候相似程度，不宜做政区的入侵概率值。因此，考虑气候因素时，红火蚁入侵政区概率值为该政区所有点与 CLS、ALS、NLS 气候相似程度平均值中的最大值。

表 2-3 我国各政区与三种气候站点集合的相似程度即入侵概率值 (%)

Table 2-3 Climate analogy between every district in China and ALS, CLS and NLS respectively (%)

所属区域	政区名称	ALS	CLS	NLS	所属区域	政区名称	ALS	CLS	NLS
东北	黑龙江	32.0*	28.2	23.1	西北	宁夏	33.2*	25.1	20.5
	吉林	36.1*	32.1	25.6		甘肃	31.4*	24.4	19.2
	辽宁	38.2*	34.1	26.3		青海	23.4*	20.1	13.0
华北	北京	39.6*	32.7	26.7	华东	新疆	26.2*	18.5	15.0
	天津	42.5*	35.4	28.0		山东	45.5*	38.7	29.6
	山西	36.7*	29.5	25.0		安徽	62.0*	52.0	40.0
	河北	38.8*	32.0	26.3		江苏	61.0*	51.0	37.8
	内蒙古	27.9*	22.4	17.7		上海	60.5*	57.0	37.2
华南	陕西	45.5*	34.9	32.4	西南	江西	60.2	68.0*	38.0
	香港	40.6	82.3*	29.5		浙江	62.0	63.4*	39.0
	澳门	41.7	81.9*	28.8		福建	60.0	74.2*	39.1
	广东	57.3	91.6*	41.8		台湾	46.6	68.7*	39.7
	广西	62.1	86.3*	45.0		重庆	55.1*	48.5	44.1
华中	海南	42.7	57.1*	43.6	四川	四川	50.2*	42.6	37.5
	河南	52.4*	41.6	35.7		云南	53.4*	49.0	45.8
	湖北	60.1*	55.0	42.0		贵州	61.9*	56.7	46.5
	湖南	61.0	62.3*	40.3	西藏	西藏	26.9*	25.2	15.3

说明：“*”表示选取的政区入侵概率值

从表 2-3 可知各政区的入侵概率值都没有出现在 NLS 列中，从数值上说明中国气候与红火蚁原产地气候的不相似性，并把全国各地区分为两大类，第一类是入侵概率取 ALS 列值的地区，主要分布在长江以北；第二类是入侵概率取 CLS 列值的地区，主要在长江以南。根据 2.1.5 节的划分标准，处于红色警报区的有广东、广西、香港和澳门，所有地域需全面关注；处于橙色警报区的有福建、台湾、江西、浙江、湖南、贵州、江苏、安徽、上海、湖北、河南、四川、重庆、云南；处于绿色小风险区的有内蒙古、青海、新疆和西藏；其他地区均处于黄色警戒区。

由于各政区土地面积大小不等，有些政区的所有地域并不是都处于上述所指的预警级别，根据图 2-4-A 和图 2-4-B，橙色警报区需要关注的具体区域是：福建全省、台湾西部、江西南部、浙江全省、湖南除中部、贵州南部、江苏南部、安徽南部、湖北南部、河南南部；根据图 2-4-C，需关注具体区域为橙色警报区的云南南部、四川东部、重庆西部，黄色警戒区的陕西南部，绿色小风险区的西藏东部等。

此外，还有一些需要特别关注的区域。首先，川渝地区的入侵概率值仅为 50%左右，但四川东部可达到 70%左右；第二，广东、广西、港澳地区、台湾和福建的 ALS 列值比 CLS 列值低，即这些地区与 ALS 的气候相似性比与 CLS 的低，这些目前已有红火蚁分布的省份与 CLS 气候相似程度居全国最高，而与 ALM 比较达不到气候相似性最高值，这在一定程度上说明，红火蚁对不同气候类型的适应性。

2.2.4 红火蚁入侵中国气候区的概率

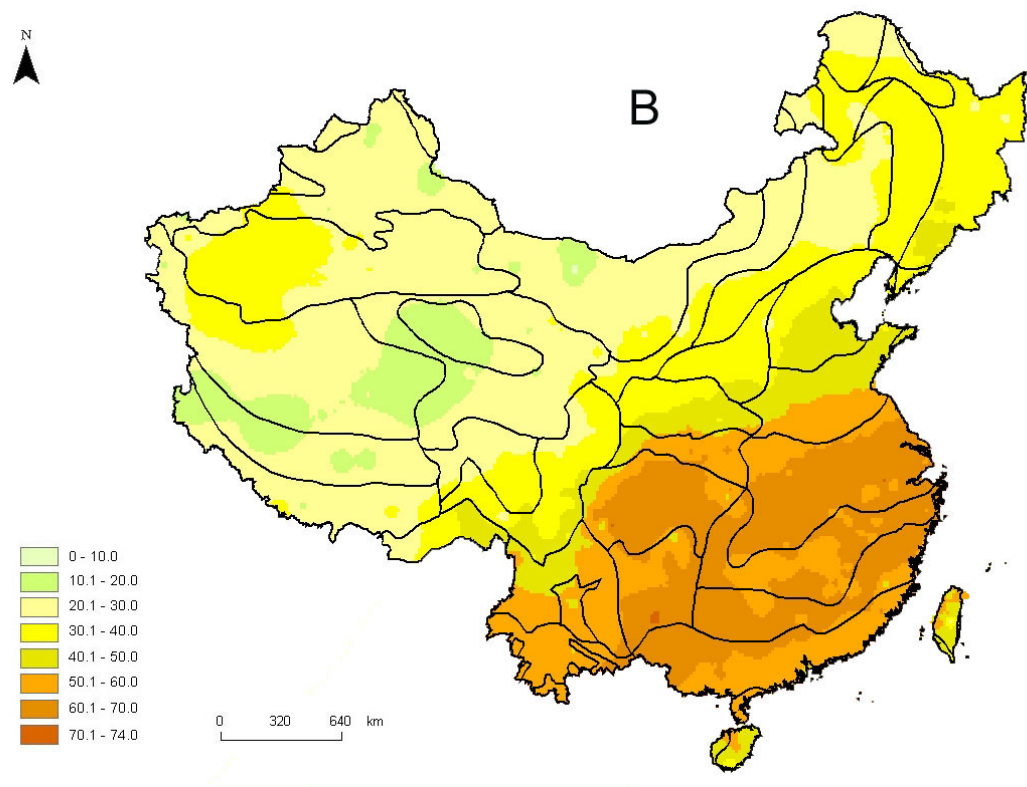
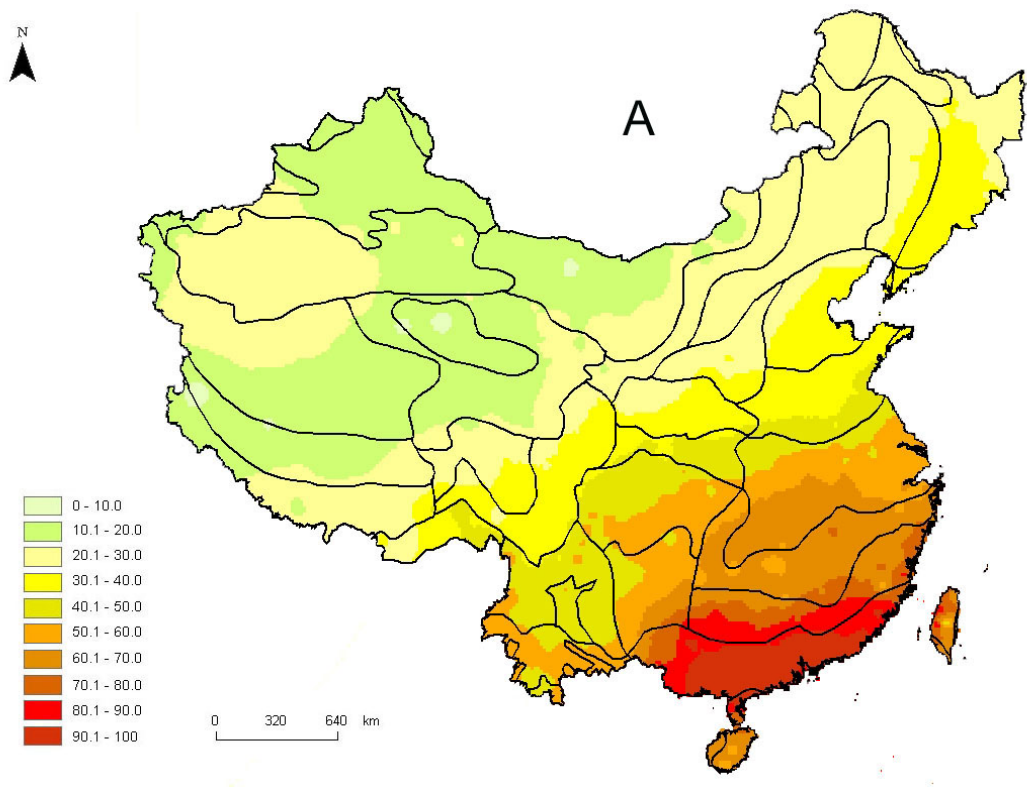
根据中国科学院地理科学与资源研究所提供的中国气候区矢量底图,我国大致分为 36 个气候区(表 2-4),红火蚁入侵各气候区概率选择方法同 2.2.3 节。

表 2-4 我国各气候区与三种气候站点集合的相似程度即入侵概率值(%)

Table 2-4 Climate analogy between every climate region in China and ALS, CLS and NLS respectively (%)

	气候区	湿度带	温度带	ALS	CLS	NLS
1.	闽南-珠江区	湿润带	南亚热带	58.4	89.8*	42.8
2.	葡江-闽江-南岭区	湿润带	中亚热带	61.3	74.2*	39.4
3.	雷琼区	湿润带	北热带	47.5	69.6*	46
4.	台北区	湿润带	南亚热带	47.8	69.1*	39.1
5.	台南区	湿润带	北热带	43.6	67.5*	41.3
6.	江南区	湿润带	中亚热带	60.1	63.4*	40
7.	江北区	湿润带	北亚热带	62.2*	57.2	40
8.	四川区	湿润带	中亚热带	62.1*	51	48.1
9.	贵州区	湿润带	中亚热带	61*	54.8	46.8
10.	秦巴区	湿润带	北亚热带	55.4*	42	40
11.	滇南区	湿润带	南亚热带	55*	52	52
12.	滇北区	湿润带	中亚热带	52.4*	47	41.4
13.	金沙江-楚雄玉溪区	亚湿润带	中亚热带	51.8*	48.9	46.8
14.	鲁淮区	亚湿润带	南温带	48.8*	39.2	32.3
15.	辽东-胶东半岛区	湿润带	南温带	41.8*	38.7	26.9
16.	达旺-察隅区	湿润带	高原气候区域	41.3	41.6*	26.2
17.	渭河区	亚湿润带	南温带	40.6*	31.3	27.8
18.	河北区	亚湿润带	南温带	39.5*	32.6	26.7
19.	晋陕甘区	亚干旱带	南温带	36.3*	30	24.6
20.	三江-长白区	湿润带	中温带	36.2*	32.4	25.9
21.	波密-川西区	湿润带	高原气候区域	35*	32.3	23.3
22.	松辽区	亚湿润带	中温带	33.8*	29.3	24.4
23.	小兴安岭区	湿润带	中温带	31.8*	27.8	23
24.	大兴安岭区	亚湿润带	中温带	31.1*	27.1	22.1
25.	蒙中区	亚干旱带	中温带	30*	23	18.8
26.	蒙东区	亚干旱带	中温带	29.8*	25	19.6
27.	昌都区	亚湿润带	高原气候区域	29.2*	26.7	18.6
28.	南疆区	干旱带	南温带	29.3*	21.7	17.1
29.	根河区	湿润带	北温带	28.8*	24.7	20
30.	藏南区	亚干旱带	高原气候区域	27.4*	25.8	15.5
31.	蒙甘区	干旱带	中温带	25.7*	18.3	14
32.	青南区	亚湿润带	高原气候区域	24.4*	19.3	13
33.	藏北区	干旱带	高原气候区域	24.4*	17.4	11.2
34.	北疆区	干旱带	中温带	23.3*	15.4	13
35.	藏中区	亚干旱带	高原气候区域	18.7*	15.7	8.1
36.	柴达木区	干旱带	高原气候区域	17.4*	11.6	4.7

说明:“*”表示选取的气候区入侵概率值



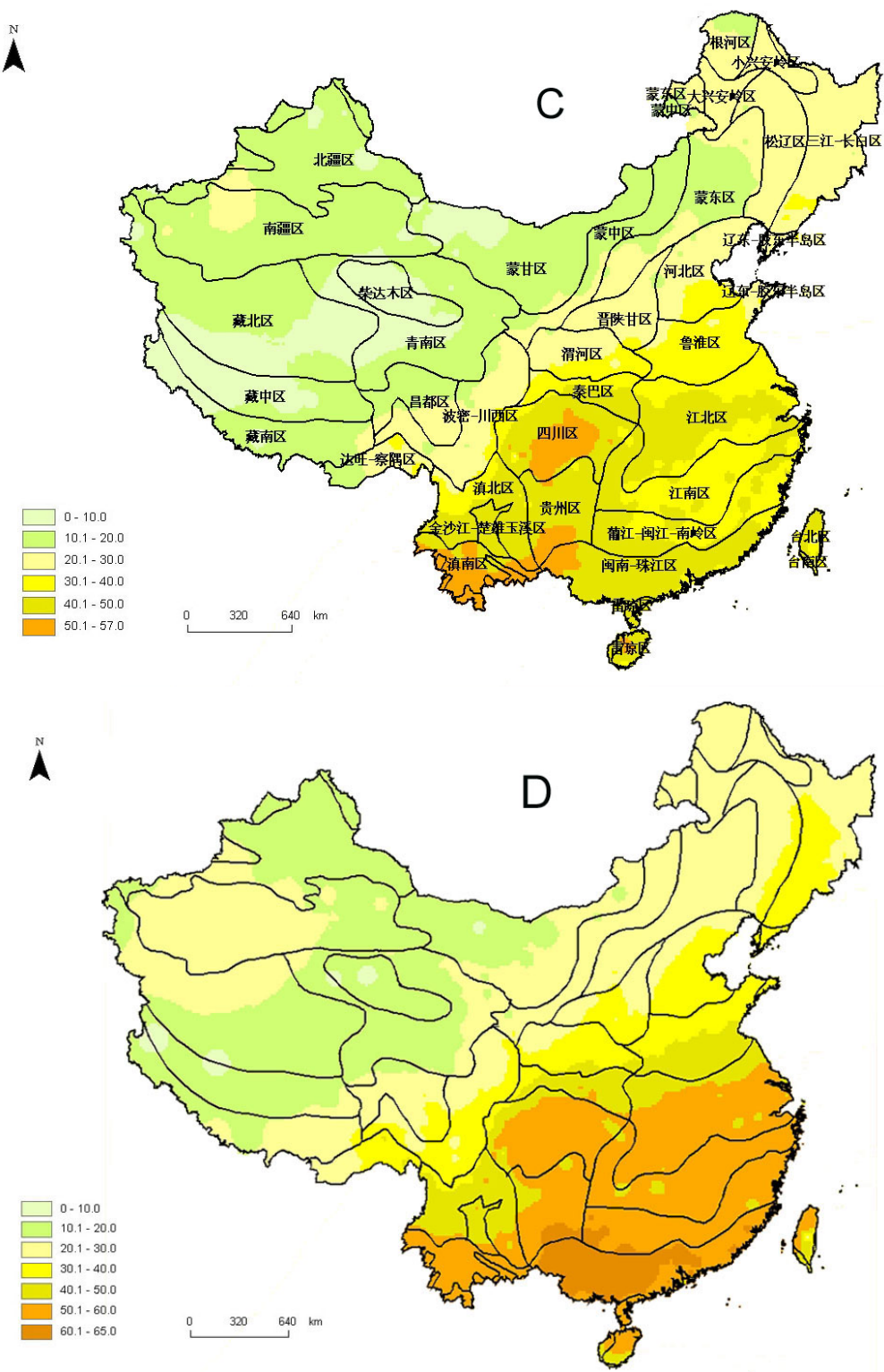


图 2-7 中国气候区与各气候站点集合的气候相似程度

Fig. 2-7 Climate analogy between China climate regions and the climate sets

A.中国气候区与 CLS 气候相似程度; B. 中国气候区与 ALS 气候相似程度; C. 中国气候区与 NLS 气候相似程度; D. 中国气候区与 CLS&ALS&NLS 气候相似程度
A. China climate regions vs. CLS; B. China climate regions vs. ALS; C. China climate regions vs. NLS; D. China climate regions vs. CLS&ALS&NLS

图 2-7-A 和 图 2-7-B 的高风险区集中在雷琼区、闽南-珠江区、葡江-闽江-南岭区、江南区、江北区和贵州区；从图 2-7 的 A、B、C 图中可以看到只有四川区和滇南区有大面积的橙色分布，而这两个区至今没有发现红火蚁分布。从表 2-4 可以看出处于红色警报区的仅有闽南-珠江区，包括两广的大部分地区和福建的东南部，入侵概率高达 90%左右，这个地区同时也是目前红火蚁的高发区；处于橙色警报区的有葡江-闽江-南岭区、雷琼区、台北区、台南区、江南区、江北区、四川区、贵州区、滇南区、秦巴区、滇北区和金沙江-楚雄玉溪市，其中葡江-闽江-南岭区和台北区已有红火蚁发生，江南区中的湖南张家界市曾发现过红火蚁踪迹，现已防除；处于绿色小风险区的有蒙中区、蒙东区、昌都区、南疆区、根河区、藏南区、蒙甘区、青南区、藏北区、北疆区、藏中区和柴达木区，这些气候区涵盖了我国广大的西北地区；其他气候区处于黄色警戒区。

2.2.5 重点省份分析

本文选取了目前已发现红火蚁分布的两广地区、福建、湖南和未发现红火蚁但预测风险程度较高的川渝地区作为重点分析案例。

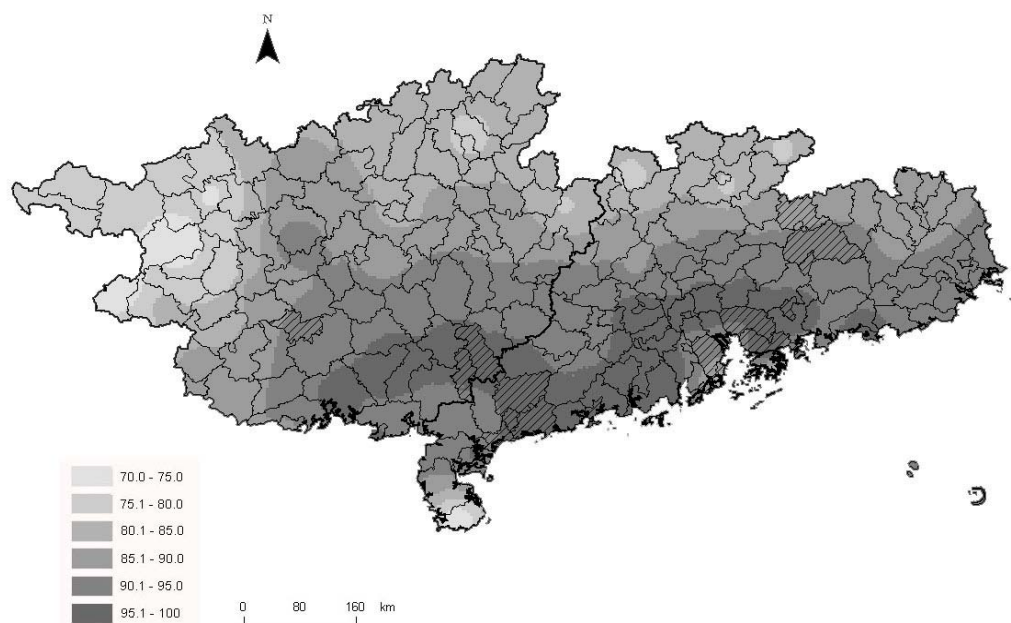


图 2-8 红火蚁入侵两广地区的概率

Fig. 2-8 Invasion probability of RIFA in Guangdong and Guangxi

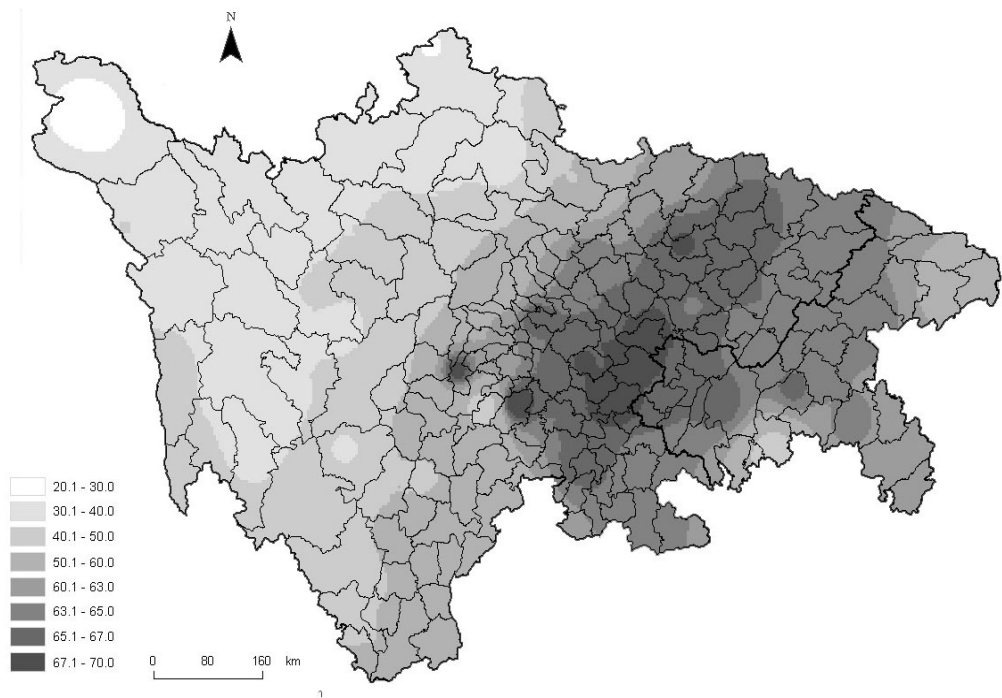


图 2-9 红火蚁入侵川渝地区的概率

Fig. 2-9 Invasion probability of RIFA in Sichuan and Chongqing

图 2-8 显示两广地区的红火蚁入侵概率均在 70%以上，大部分地域属于红色警报区，广西西部和广东徐闻地区在橙色警报区内，两广地区需要当地政府高度重视，现记录的红火蚁分布区（阴影部分）大多包含在入侵率 90%以上的区域，也说明了本方法预测的准确度。图 2-9 显示川渝地区的东西部界限明显，西部地区的入侵概率均在 50%以下，东部则都在 50%以上，安岳县、遂宁市、内江市、雨城区和乐山市的概率值可达 70%左右，可能是由于以盆地丘陵为主的东部地区与以高原山地为主的西部地区在地貌上的巨大差异造成的。再者，川渝西部也是与原产地气候较为相似的区域，尽管此地至今未发现红火蚁踪迹，但应该成为重点监控地区。

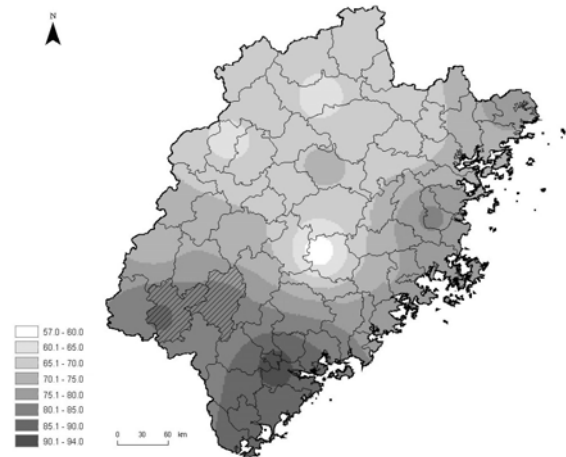


图 2-10 红火蚁入侵福建地区的概率

Fig. 2-10 Invasion probability of RIFA in Fujian

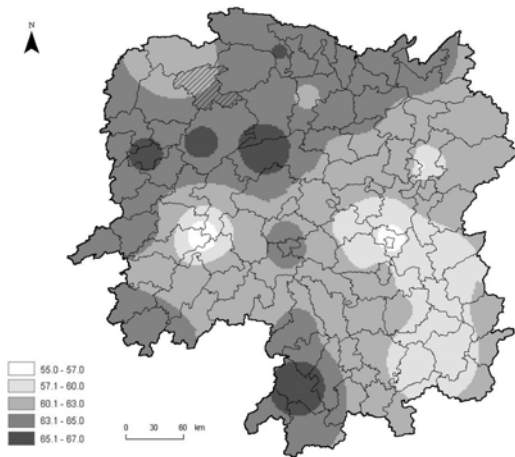


图 2-11 红火蚁入侵湖南地区的概率

Fig. 2-11 Invasion probability of RIFA in Hunan

图 2-10 显示福建南部地区入侵概率均在 80%以上，包括目前有红火蚁记录的龙岩市和上杭县，

以龙海市、漳州市为中心周边地区需要更多关注。图 2-11 显示湖南整体的入侵概率低于福建省，主要是北部的吉首市、阮陵县、安化县，南部的道县达到 65%左右，中部地区入侵概率明显低于南北地区，可能是高海拔地区不太适合红火蚁的适生。

2.3 结论与讨论

2.3.1 结论

相似离度可作为一种预测物种潜在分布区的方法，应用此法说明红火蚁是一种气候适应力很强的物种，这为它在全球散布提供了很大的优势。就中国来说，目前已发生红火蚁的广东省入侵概率高达 90%以上，在所有政区之首，需实施严密的防治计划。广西省和福建省尽管红火蚁目前只是局部发生，但通过预测，两省的广大地区入侵概率很高，都在 75%左右，也需要采取预防和监测措施。川渝地区西部和云南南部至今虽未有红火蚁发生的记录，但由于它们与物种原产地气候相似程度相对其它地区要高，当地政府也需提高警惕。

2.3.2 关键点

本章方法的有效实施是建立在物种分布信息丰富的基础上，关键在于建立严重发生地和原产地气象站点集合，首先集合内的站点一般要属于一个地理区域，气候大致相同，本文建立了 CLS、ALS 两个严重发生地点集合和 NLS 原产地地点集合，而不是整合成一个集合，因为由图 2-4 可以看出，D 反映的仅是 A、B 和 C 的平均值结果，难以推断物种对不同地理气候的适应性；第二，物种分布调查数据多以点和面的形式体现在地图上，所以在选择气候站点时，尽量与调查的分布位点相吻合，或者气象站点要尽量平均散布在所调查的分布区。

2.3.3 结果讨论

中国政区与 CLS、ALS 气候相似程度在 50%以上的地区都集中在长江以南的大部分地区，导致该结果的部分原因是中国和美国大致处于同一地理纬度，而控制气候的地理因素中以纬度最为重要（孙安健, 1986），而这些区域的具体相似程度又存在差异，笔者认为这和两地气候类型的不同有关。CLS 属于副热带季风气候，夏热湿，雨水较集中，冬温干，无明显干季；ALS 属于副热带湿润气候冬夏温差比季风区小，降水的季节分配比季风区均匀（刘南威, 2005）。中国气候区中处于红、橙警报区的温度带均为热带、亚热带，湿度带为湿润带、亚湿润带，而干旱带、亚干旱带气候区的入侵概率值大多处于 30%以下，由此可看出温暖潮湿的气候条件对红火蚁的生存十分有利。此外，中国主要港口大多集中在红火蚁气候适宜地区，这种天时地利的条件给红火蚁的入侵带来很大的便利，所以港口的检疫部门必须重视外来入侵物种的监察工作。

考虑不同的入侵因素会产生不同的入侵概率值，本文把相似离度 C_{ij} 折合后气候百分制相似程度认为是入侵概率值的目的是与采用其他方法时产生的概率值进行比较（可与第三章的结果进行比较），概率值的可比性有助于对不同预测方法中考虑的不同因素进行综合分析。插值使用的数值是气候百分制相似程度即入侵概率值，这就允许了各地区在数量上互相比，但在进行行政区分析

时,对面积大地形复杂的地区,如果仅是统计该政区所有站点的平均值,并不能准确地说明该政区的入侵情况,例如上文所分析的川渝地区,所以必须采用数值图形相结合的方法,预测外来物种入侵某地区的概率才更具说服力。此外,本文的气候区分析可以从另一个角度弥补因政区气候条件差异较大而产生概率偏差的缺点,气候区的划分不需考虑了政区边界,每个政区可能处于不同的气候区,也就是说每个政区的不同区域的入侵情况是不同的。

本文详细分析了红火蚁入侵六个省市的概率,可以从插值图上清楚地看到哪些县需要高度关注此类害虫,哪些县则不需要投入过多的资源进行防治,这样则给省市的害虫防治工作提供了明确的切入点。同样可按此类方法分析其他省市,这种插值法的最大优点是在数据点有限的情况下,估计邻近区域的数值,能够充分反映出气候相似区和非气候相似区的过渡(程俊峰等, 2006),可以明确地按重要级别划分地域,插值准确度客观上取决于软件的运算原理,主观上取决于所收集数据点的密度,尽管本研究已使用了全国 733 个位点,但在分析省市时,气象站点还是显得不够丰富,有待补充。

如果被预测地区已有外来物种稳定分布,由于物种已经逐渐适应本地的气候,很有可能向周边地区扩散,应使用本地的气象站点集合与之匹配,这样对周边地区的气候形似性的预测才最有指导意义,但同时要与多种气象站点集合比较,因为物种也有可能适应一个待预测区的不同类型气候。如果被预测地还不曾调查清楚外来入侵物种的分布,仅用气候相似性方法就会存在预测准确度的偏差,本文中的红火蚁案例就可以证明仅用 ALS 和 NLS 是无法预测出广东和台湾是红火蚁的目前发生最严重的中国地区,这就可以说明红火蚁对入侵地气候有适应能力,也可以表明红火蚁分布区不仅仅由气候因素决定,笔者认为很可能是人为传带因素起了更大的作用,但这样的结果则可以在一定程度上说明与 ALS、NLS 最匹配的地方一旦被红火蚁入侵,危害程度也会比较严重。

很多情况下,外来生物在被预测地没有任何分布,我们就无法像红火蚁案例所述的一样判断物种是否对不同气候有很强的适应性,所以可以结合考虑用物种的生物学参数数据与预测地的气候数据相匹配(详见第三章),找出物种最理想的生存区域,但不难看出此法和本文的方法只考虑了气候因子,其他的自然因素如种间竞争、寄主范围等和非自然因素如人为携带、贸易往来等都没有提及,而这些因素对与外来物种入侵概率的影响都是不容忽视的,所以笔者认为,尽管非气候因素可变性大,规律性不强,但加强对其定性定量研究是非常有必要的,并在第四章做了相关的研究。

第三章 生物气候相似性分析法预测外来生物最适生存区

第二章的主要方法只考虑各地的气候因素,本章不仅要考虑气候对生物生长发育的影响,而且考虑了生物对气候条件的反映,从另一个角度评估了生物在不同地区的适生能力。应用此原理比较成熟的是 CLIMEX 软件,它能够根据气候因素来预测某种动物或植物的潜在的相对丰盛度和地理分布区。CLIMEX 最初的版本发布于 1985 年,2007 年发布最新版,即 CLIMEX for Windows 3.0 (<http://www.hearne.co.uk/products/climex/edition/climex3>)。它包括了世界上大约 2400 个地区的气象数据和某些物种对气候条件的要求。CLIMEX 可根据某物种的已知地理分布及相对丰盛度来估计该物种所需的气候条件,或者可以直接使用物种生长发育的生物学参数,对物种的分布区进行预测。

本章研究主要探索了 CLIMEX 原理并对其进行改造,在保证预测效果的前提下为开发“外来物种风险评估系统”提供重要原理,但鉴于 MapObjects 制图功能有限,本章所有制图将采用 ArcGIS Desktop 软件完成以达到最佳显示效果。为了检验此方法的使用效果,应用红火蚁作为分析案例。

3.1 材料与方法

3.1.1 原理概述

用物种的生物学参数(例如适温等)与被预测区域的气候数据相比较(具体方法见 3.1.3 节),得出生态气候指数(Eco-climatic Index, EI),EI 值越大,说明物种越适宜在此地生存,EI 计算公式:

$$EI_A = 100 \sum_{w=1}^{52} EI_w / 52$$

EI_A : 以年为单位物种的 EI 值; EI_w : 以周为单位物种的 EI 值

EI_w 是各项指标指数的乘积,指标依不同物种而不同。程俊峰(2006)指出,由于受 CLIMEX 软件的限制,其只能预测全年的 EI 值,而不能预测一年中某一时间区段内的 EI 值,为考察物种每月的适生能力,本章研究预得到以月为单位的物种 EI 值,将每周的 EI 值累计成每月 EI 值,在此需要人为制定每个月的周个数,现约定如下:五月、八月、十一月和十二月计做 5 个星期,其他月份计做 4 个星期。EI 值分别以点图和经过 ArcView 软件插值后的面图形式显示。此外,物种参数和气候因子要求彼此对应,才能相比较,但不需要设定固定因子,一般情况下会考虑温湿情况。

3.1.2 红火蚁参数的确定

温度湿度是能决定动植物在自然环境中能否生存的重要条件,是决定其生长发育速度的主要因子(高亮之, 2002)。有专家认为低温(平均气温-12℃)可以限制红火蚁在美国的向北扩散(Allen

et al., 1995)，而干旱的条件可能阻止红火蚁向西的扩散（Vision, 1997），Korzukhin（2001）对红火蚁在美国的潜在分布和扩散情况进行了定量化的研究，其中明确对红火蚁定殖和扩散的主要影响因素或风险因子是：土壤温度、空气最高温度、最低温度。当土壤表面温度超过 10℃ 时，红火蚁工蚁开始觅食，但是只有到空气和土壤温度达 19℃ 时，它们才会持续觅食（Markin et al., 1974）；红火蚁觅食的土壤表面温度范围为 12-51℃，工蚁在土壤温度（2cm 深处）15-43℃ 之间觅食，最大的觅食率是在 22-36℃（Porter & Tschinkel, 1987）；当春天土壤一周平均温度（5cm 深处）上升到 10℃ 以上时，繁殖活动就开始，工蚁和有性蛹在 20℃ 出现，在 22.5℃ 长出翅；新的蚁后需要成功地找到平均土壤温度 24℃ 的场所；未成熟个体仅见于土壤温度在 25-30℃ 之间的蚁巢中（Pranschke & Hooper-Bùi, 2003）；所有的婚飞资料表明，婚飞全部发生在周围空气温度在 24-32℃ 时。由于此方法借鉴了 CLIMEX 的思想，参数的意义大致与其相同，所以公开发表的关于用 CLIMEX 预测红火蚁分布的数据具有一定参考价值，Sutherst（2005）认为红火蚁生存的限制性高温是 35℃、发育起点温度是 17℃，适宜温度上下限分别是 26℃ 和 30℃。

红火蚁的生活环境离不开水，所以常在池塘、河流、沟渠旁边发现蚁巢，远离水体的地方也常有蚁巢发现，是因为它们可以向下构筑隧道获取水，就实际观察到的婚飞活动，一天中婚飞时的相对湿度均在80%或更高。

红火蚁的原产地是南美洲的低地地区（Jetter et al., 2002），根据图2-2、图2-3可以是目前红火蚁已长期定居的美国南部和原产地南美以及美国学者预测的美国加州（Jetter et al., 2002）适生地区海拔普遍处于1000m以下（图3-1、图3-2），低海拔地区，也有报道称超过1000m的海拔高度不利于红火蚁的生存（薛大勇等, 2005），也有学者将海拔高度纳入预测因子中（陈晨等, 2006）。综上，本章选择温度、湿度和海拔作为预测红火蚁分布因子，所以EI_w值应该是：

$EI_w = TI_w \times MI_w \times AI_w$

TI(Temperature Index): 温度指数; MI(Moisture Index): 大气湿度指数; AI(Altitude Index): 海拔指数

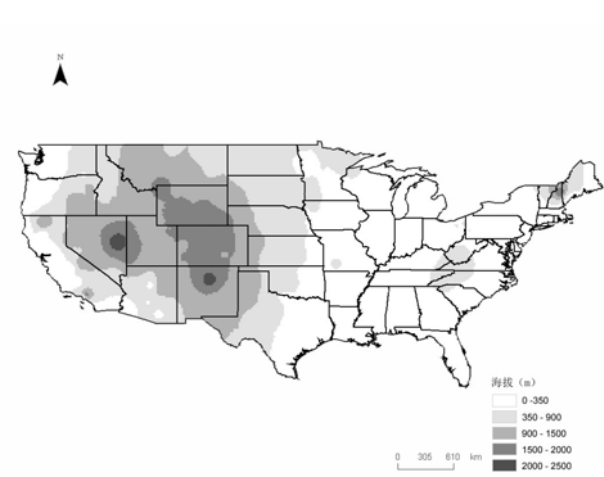


图 3-1 美国各地区海拔

Fig. 3-1 Elevation of different areas in America



图 3-2 南美各地区海拔

Fig. 3-2 Elevation of South America areas

具体参数如表 3-1。

表 3-1 红火蚁生物学参数

Table 3-1 Biological characteristics of RIFA

参数	参数值	参数说明
发育起点温度 (DV0)	17℃	温度低于 DV0 时, 种群增长为零
适宜温度上限 (DV1)	25℃	温度低于 DV1 时, 种群增长将会降低
适宜温度下限 (DV2)	39℃	温度高于 DV2 时, 种群增长将会降低
限制性高温 (DV3)	51℃	温度高于 DV3 时, 种群增长为零
限制性最低湿度 (RH0)	65%	湿度低于 RH0 时, 种群增长为零
适宜湿度上限 (RH1)	75%	湿度低于 RH1 时, 种群增长将会降低
适宜湿度下限 (RH2)	99%	湿度高于 RH2 时, 种群增长将会降低
限制性最低湿度 (RH3)	100%	湿度高于 RH3 时, 种群增长为零
限制性最低海拔 (AL0)	0m	海拔低于 AL0 时, 种群增长为零
适宜海拔上限 (AL1)	1m	海拔低于 AL1 时, 种群增长将会降低
适宜海拔下限 (AL2)	350m	海拔高于 AL2 时, 种群增长将会降低
限制性最高海拔 (AL3)	900m	海拔高于 AL3 时, 种群增长为零

说明: 这里的湿度指大气湿度

3.1.3 各气候指标计算方法

本章使用的气候数据和第二章相同 (见 2.1.1 节)。

3.1.3.1 温度指标 (TI)

站点数据库中的与温度相关的有两个字段——30 年月平均最高温度和最低温度, 首先一个问题是如何把月值推导成周值来参与计算。基本思路是, 由于温度具有周期变化规律, 利用谐波分析法根据 1-12 个月的温度常年平均值来模拟温度周年变化 (高亮之, 2002), 高亮之、金之庆、黄耀等在水稻和小麦模拟优化决策系统中成功地应用四阶谐波分析法模拟其周年的逐日变化 (高亮之等, 1992), 从而验证了此法的可行性。将月值推导成日值后, 再以 7d 为单位相加整合成 52 个周值。四阶谐波分析的公式是:

$$Y_i(t) = A_0 + \sum_{n=1}^4 [a_n * \cos(n * \omega * t) + b_n * \sin(n * \omega * t)] , A_0 = \sum_{J=1}^{12} Y_i(J) / 12$$
$$a_n = \left(\sum_{J=1}^{12} [Y_i(J) * \cos(n * \omega * t_j)] \right) / 6 , b_n = \left(\sum_{J=1}^{12} [Y_i(J) * \sin(n * \omega * t_j)] \right) / 6$$

i: 气候要素 (即为最高最低气温); J: 月序, J=1,2,...12

Y_i(t): 要素 i 在日序(t)的常年模拟。t=1,2,...365

Y_i(J): 要素 i 在各月的常年平均值 (数据源自气候数据库)

n: 谐波个数, 此为 4; w: 圆频率, W=2Π/365, Π=3.1416; t_j: J月的 15 日离 1 月 1 日的天数

得到各站点周值后，与红火蚁温度参数计算的具体公式为：

$$TI_W = TI_{min} \times TI_{max}$$

$$TI_{min} = \begin{cases} 0 & T_{min} < DV0 \\ \frac{T_{min} - DV0}{DV1 - DV0} & DV0 \leq T_{min} < DV1 \\ 1 & DV1 \leq T_{min} \leq DV2 \end{cases} \quad TI_{max} = \begin{cases} 1 & DV1 \leq T_{max} \leq DV2 \\ \frac{DV3 - T_{max}}{DV3 - DV2} & DV2 \leq T_{max} \leq DV3 \\ 0 & T_{max} > DV3 \end{cases}$$

此时的 T_{min} 和 T_{max} 是推导后的周值。

3.1.3.2 湿度指标 (MI)

湿度指标同样存在一个有月值推导成周值的问题，但大气湿度不像温度那样存在较稳定的周期变化，不能用谐波分析法，或者说很难有一种方法可以模拟湿度的发生，最理想的办法是对湿度进行每天的监测记录，再累加成周值，但是这样又不符合目前气象数据的标准，本研究中用月值直接与物种生物学参数计算，得到月湿度指数 (MI_m)，按 3.1.1 中约定的每月周数把 MI_m 值赋给相应的周。

$$MI_w = \begin{cases} \frac{M - RH0}{RH1 - RH0} & RH0 \leq M \leq RH1 \\ 1 & RH1 \leq M \leq RH2 \\ \frac{RH3 - M}{RH3 - RH2} & RH2 \leq M \leq RH3 \end{cases} \quad \text{M: 某地的相对湿度}$$

3.1.3.3 海拔指标 (AI)

海拔指数并不随时间的变化而变化，因此，一个位点只有一个 AI 值，计算公式是：

$$AI = \begin{cases} \frac{A - AL0}{AL1 - AL0} & AL0 \leq A \leq AL1 \\ 1 & AL1 \leq A \leq AL2 \\ \frac{AL3 - A}{AL3 - AL2} & AL2 \leq A \leq AL3 \end{cases} \quad \text{A: 某地的海拔高度}$$

3.1.4 入侵概率计算方法

与第二章相同的是概率计算方法需要确定入侵概率为 100%的基准值，即 EI_{max} ，不同的是这个值要根据原产地和严重发生地的EI值来确定，然后按如下公式进行百分制换算：

$$EI' = \frac{EI_{max} - EI_x}{EI_{max} - EI_{min}}$$

EI_x ：每个位点的EI值； EI_{max} ：入侵概率为 100%的EI值； EI_{min} ：入侵概率为 0 的EI值；

3.2 结果与分析

3.2.1 方法可行性验证

本研究借鉴了CLIMEX的原理，在算法上还是存在区别，因此两种方法的绝对数值不具有可比性，即图 3-3 和图 3-4 中的A、B图的图例不相同。只要本方法的结果与CLIMEX结果具有相同的趋势，则说明本方法的可行性。为说明趋势， EI_A 值只要不为零，均用颜色标记，从图 3-3 和图 3-4 可以看出，两种方法的结果大致相同，说明本研究方法的可行性。

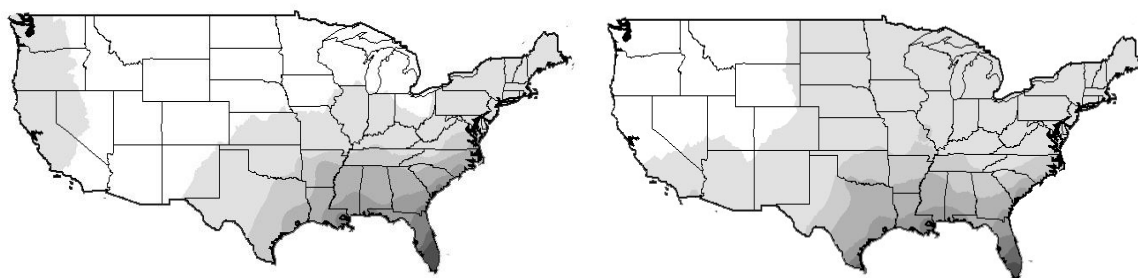


图 3-3 两种方法预测红火蚁在美国的适生区（左：CLIMEX，右：本章方法）

Fig. 3-3 Suitable distribution of RIFA in America predicted by CLIMEX (Left) and method proposed in this study (Right)

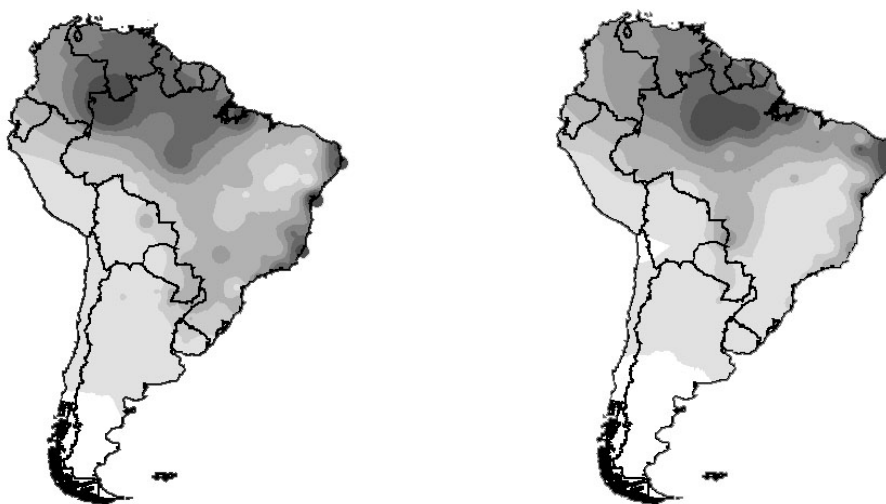


图 3-4 两种方法预测红火蚁在南美洲的适生区（左：CLIMEX，右：本章方法）

Fig. 3-4 Suitable distribution of RIFA in South America predicted by CLIMEX (Left)

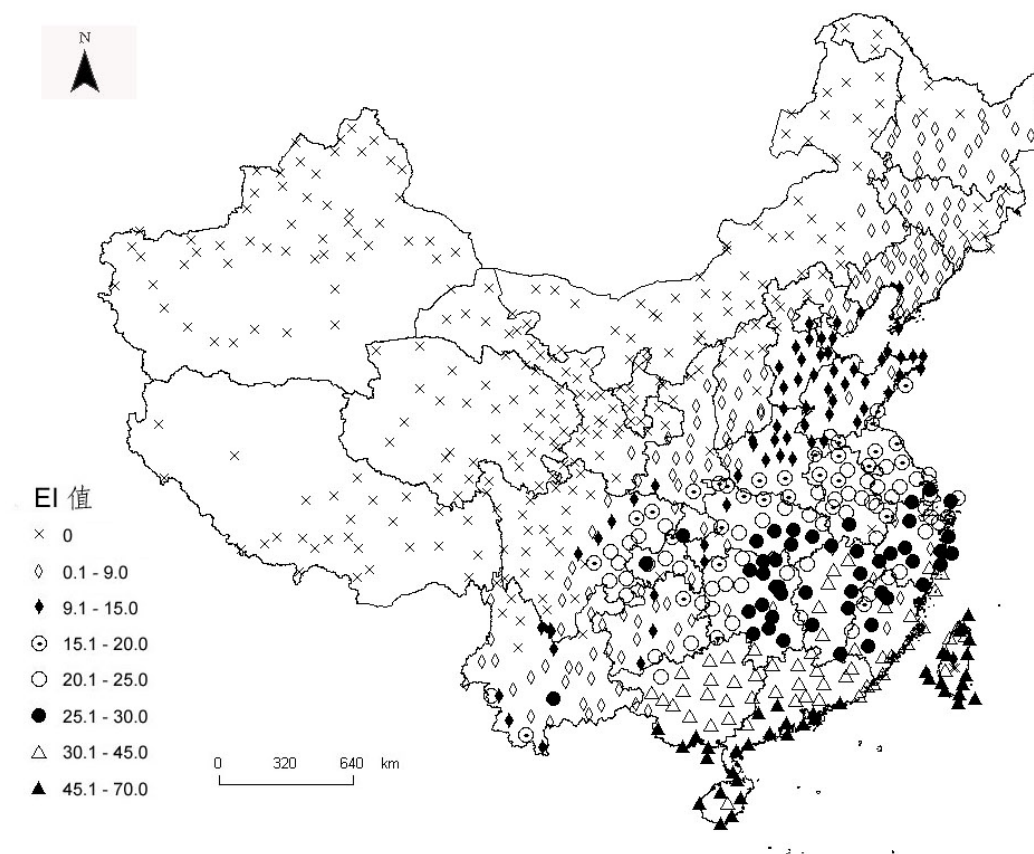
and method proposed in this study (Right)

3.2.2 预警级别划分

巴西西部是红火蚁的重要原产地，美国佛罗里达州是红火蚁的高发区，这两个区域的最小

EI 值在 30 左右, 因此本研究中入侵概率为 100% 的 EI 值定为 30, 凡 EI 值大于 30 的点的入侵概率均约定为 100%, 处于红色警报区。按照这种换算关系, 当 EI 为 15 时, 入侵概率为 50%, 概率值在 100%-50% 的区域为橙色警报区; 当 EI 为 9 时, 入侵概率为 30%, 概率值在 50%-30% 的区域为黄色警戒区, EI 值小于 9, 即入侵概率在 30%以下的区域为绿色小风险区。

3.2.3 中国整体性分析



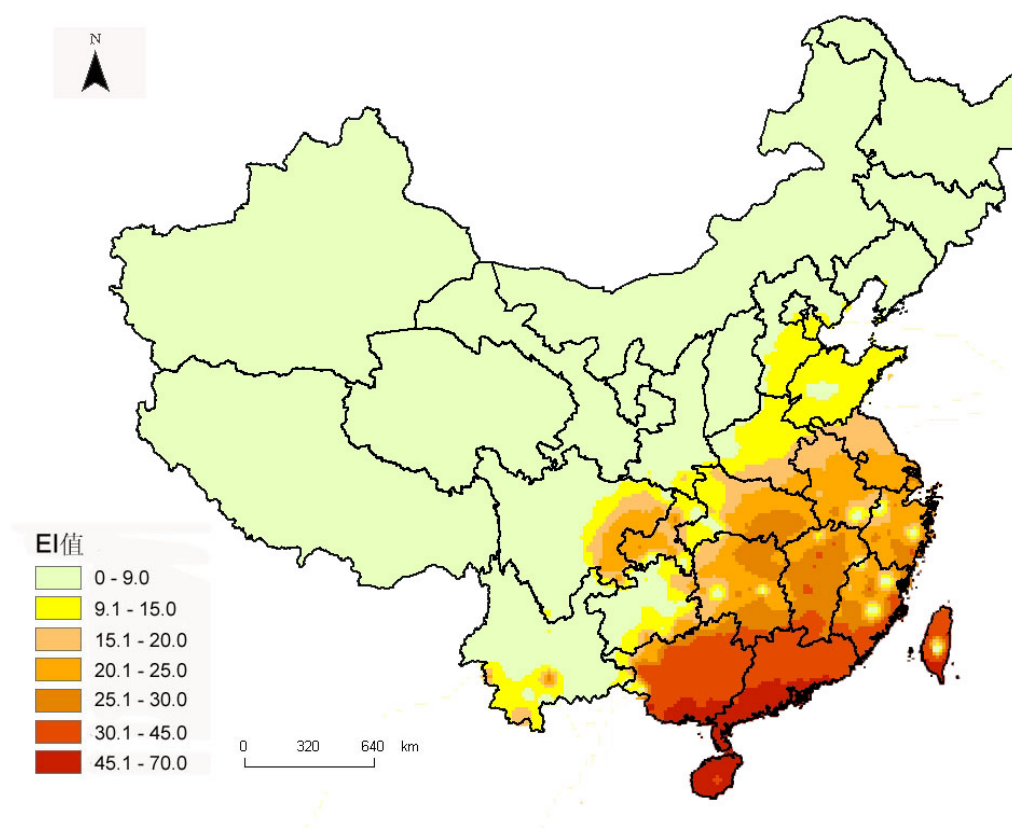


图 3-5 红火蚁入侵中国政区的潜在适生分布区

Fig. 3-5 Potential suitable distribution of RIFA in China districts

从图 3-5 可看出, 广东、广西、海南、台湾大部分地区 and 福建南部的 EI_A 值在 30 以上, 按 3.2.2 节约定, 红火蚁入侵这些地区的概率为 100%, 处于红色警报区, 由实际情况可知, 除海南外, 其他四个地区均有红火蚁发生。湖南、江西、福建大部分地区、浙江、湖北、重庆、四川东部、安徽、江苏等地区的 EI 值在 15-30 之间, 红火蚁入侵这些地区的概率为 50% 以上, 处于橙色警报区。云南南部、河南、山东、河北南部、天津等地区 EI 值在 9-15 之间, 红火蚁入侵这些地区的概率为 30%-50%, 处于黄色警戒区。广大的东北、西北地区的 EI 值小于 9, 入侵概率在 30% 以下, 处于绿色小风险区。

图 3-5 暴露了几个在湖南、福建、安徽、浙江、台湾等省的高海拔地区, 这些地区的 EI 值明显比周边地区要低, 是因为 EI 公式中考虑海拔的缘故, 如果一个物种对海拔高度不敏感, 则可以酌情删除该因子, 鉴于红火蚁的目前分布基本在低海拔地区, 所以本方法需要考虑海拔因素, 结果表明尽管上述几省的预警级别较高, 但应该重点选择预防与防治区域。

3.2.4 红火蚁入侵中国政区的概率

中国按省、自治区、直辖市和特别行政区共分为 34 个地区, 每个政区的入侵概率为范围内所有站点 EI' 的平均值, 每个站点的 EI' 计算方法见 3.1.4 节。

表 3-2 红火蚁入侵我国各政区的概率 (%)

Table 3-2 Invasion probability of RIFA in district of China (%)

所属区域	政区名称	入侵概率(%)	所属区域	政区名称	入侵概率(%)
东北	黑龙江	2.1	西北	宁夏	0
	吉林	5.5		甘肃	0
	辽宁	18		青海	0
华北	北京	32.3	华东	新疆	0
	天津	44.6		山东	36.4
	山西	3.2		安徽	65.2
	河北	21.3		江苏	66.7
华南	内蒙古	0.3		上海	86.1
	陕西	10		江西	83
	香港	100		浙江	77.2
	澳门	100		福建	83
	广东	100		台湾	86.3
	广西	92	西南	重庆	55
华中	海南	100		四川	22
	河南	41.3		云南	18.5
	湖北	62.4		贵州	31
	湖南	77.3		西藏	0

从表 3-2 中可以看出，属于红色警报区的政区是香港、澳门、广东和海南，属于橙色警报区的有广西、湖北、湖南、安徽、江苏、江西、浙江、福建、台湾和重庆，属于黄色警戒区的有北京、天津、河南、山东和贵州，属于绿色小风险区的有东三省、陕西、山西、河北、宁夏、青海、新疆、四川、云南和西藏。可以看出广大的中国南方地区仍是红火蚁的较为适生的区域。经 2.2.3 节分析，本章也要选取几个省份进行重点分析，为了与第二章结果进行比较，本章仍旧选取两广地区、川渝地区、福建和湖南作为分析案例。

3.2.5 红火蚁入侵我国气候区的概率

依照温度指标，从南到北可划分为赤道带、热带、亚热带、暖温带、温带、寒温带六个温度带；根据水分条件，从华东到西北可划分为湿润、半湿润、半干旱、干旱四类地区，分别占全国陆地总面积的 32%、15%、22%、31%。根据中国科学院地理与资源环境研究所提供的中国气候区矢量底图，我国大致分为 36 个气候区（表 3-3），每个气候区的入侵概率为范围内所有站点 EI' 的平均值，每个站点的 EI' 计算方法见 3.1.4 节。

表 3-3 红火蚁入侵我国各气候区的概率值 (%)

Table 3-3 Invasion probability of RIFA in different climate regions of China (%)

气候区	湿度带	温度带	入侵概率(%)
雷琼区	湿润带	北热带	100
台南区	湿润带	北热带	100
闽南-珠江区	湿润带	南亚热带	95.6
葡江-闽江-南岭区	湿润带	中亚热带	87.3
台北区	湿润带	南亚热带	81
江南区	湿润带	中亚热带	74
江北区	湿润带	北亚热带	72.6
四川区	湿润带	中亚热带	50
鲁淮区	亚湿润带	南温带	40
滇南区	湿润带	南亚热带	34
贵州区	湿润带	中亚热带	26
秦巴区	湿润带	北亚热带	24.7
辽东-胶东半岛区	湿润带	南温带	28.4
河北区	亚湿润带	南温带	25.3
金沙江-楚雄玉溪区	亚湿润带	中亚热带	20.4
松辽区	亚湿润带	中温带	7.8
渭河区	亚湿润带	南温带	6
晋陕甘区	亚干旱带	南温带	2.3
滇北区	湿润带	中亚热带	4.7
三江-长白区	湿润带	中温带	4.7
蒙东区	亚干旱带	中温带	1.6
小兴安岭区	湿润带	中温带	0
大兴安岭区	亚湿润带	中温带	0
蒙中区	亚干旱带	中温带	0
波密-川西区	湿润带	高原气候区域	0
达旺-察隅区	湿润带	高原气候区域	0
昌都区	亚湿润带	高原气候区域	0
藏南区	亚干旱带	高原气候区域	0
蒙甘区	干旱带	中温带	0
青南区	亚湿润带	高原气候区域	0
南疆区	干旱带	南温带	0
根河区	湿润带	北温带	0
藏北区	干旱带	高原气候区域	0
北疆区	干旱带	中温带	0
藏中区	亚干旱带	高原气候区域	0
柴达木区	干旱带	高原气候区域	0

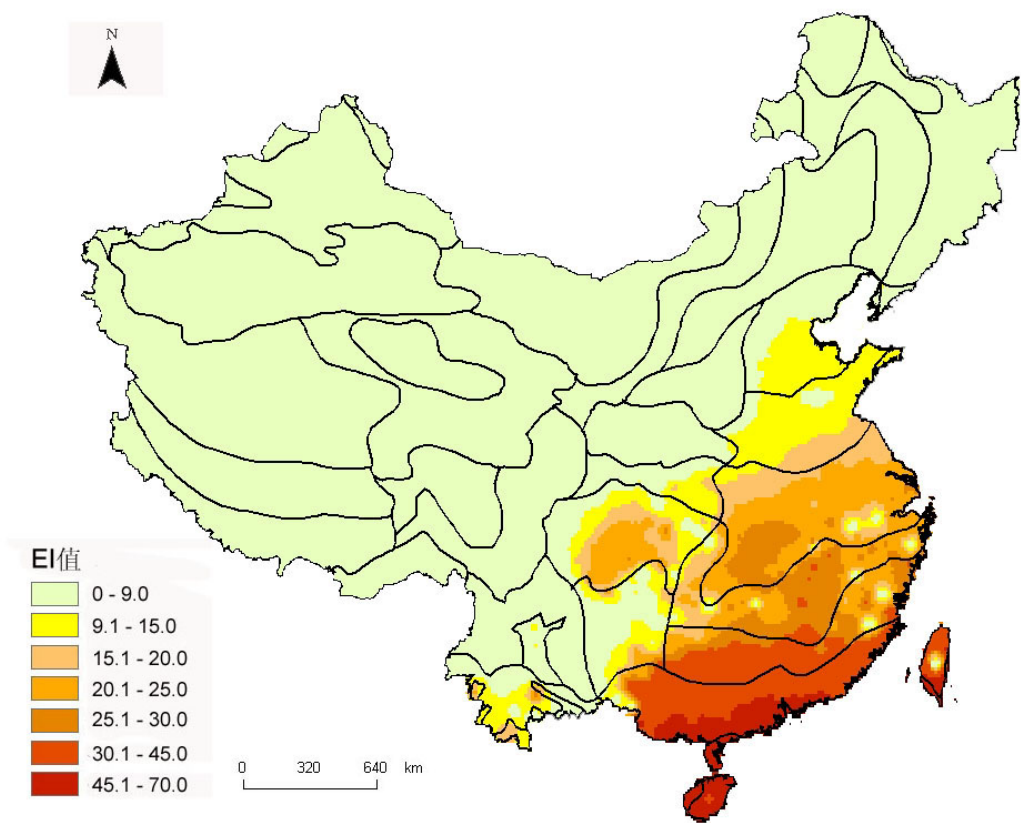


图 3-6 红火蚁入侵中国气候区的潜在适生分布区

Fig. 3-6 Potential suitable distribution of RIFA in different climate regions of China

从图 3-6 中可以看到红色警报区集中在雷琼区、闽南-珠江区、葡江-闽江-南岭区、台南区和台北区，橙色警报区集中在江南区、江北区和四川区，黄色警戒区主要在贵州省南部、滇南区、鲁淮区和河北区南部，其它气候区大多处于绿色小风险区。入侵概率在 50% 以上的气候区，即红色、橙色警报区的湿度带均属于湿润带，温度带均属于热带、亚热带，而干旱带和高原气候区的入侵概率大多为 0，可看出温暖潮湿的气候条件对红火蚁的生存十分有利。

3.2.6 红火蚁入侵我国逐月分析

本节结果用插值后的面图表示，每个预警级别（红色[EI=30-70，70 为中国 EI 最大值]、橙色[EI=15-30]、黄色[EI=9-15]、绿[EI=0-9]）不再分级。如果 EI 超过 70，设为灰色；如果 EI 值为 0，设为白色。

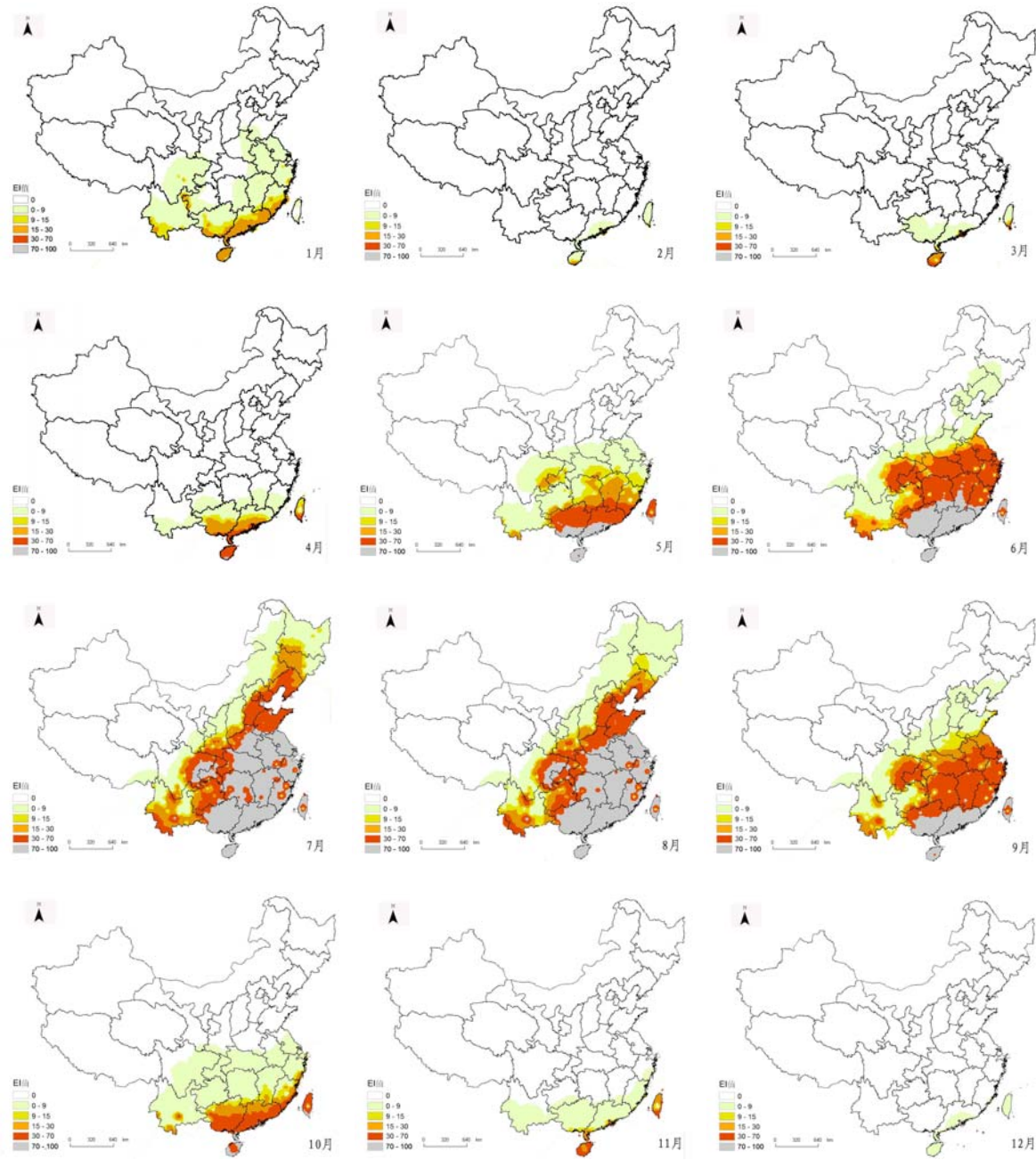


图 3-7 红火蚁在中国逐月的 EI 值

Fig. 3-7 Monthly EI value of RIFA in China

从图 3-7 中可以清楚地看出，从 11 月到 3 月，全中国很少分布红火蚁的红、橙警报区，4 月到 8 月，高风险区面积从我国南部逐渐向北增加，其中在 7、8 月 EI 值超过 70 的地区占了华东和华南的大部分地区，红、橙警报区北部可延伸到吉林，西部可达到四川中部，尽管如此，却不能说红火蚁可以在东北适生，还是需要用全年的数值来判断；从 8 月到 12 月，高风险区面积又由北向南逐渐减少。但无论在哪个月份广东、海南和台湾省始终拥有相对高的 EI 值，说明这些地方与其他地方相比更适合红火蚁生存。

3.2.7 重点省份分析

本章仍旧选取了目前已发现红火蚁分布的两广地区、福建、湖南和未发现红火蚁但预测风险程度较高的川渝地区作为重点分析案例。

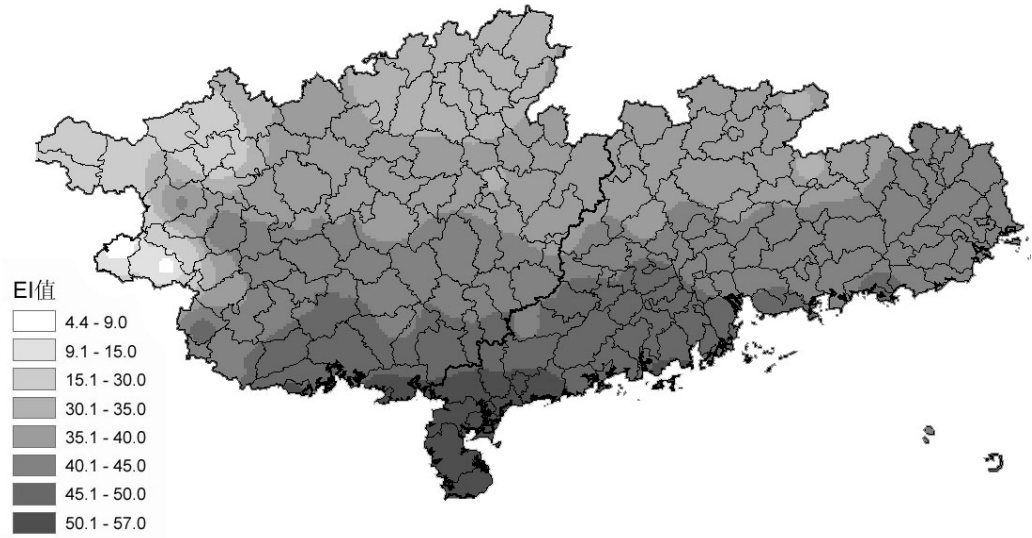


图 3-8 红火蚁在两广地区的 EI 值

Fig. 3-8 EI value of RIFA invasion in Guangdong and Guangxi

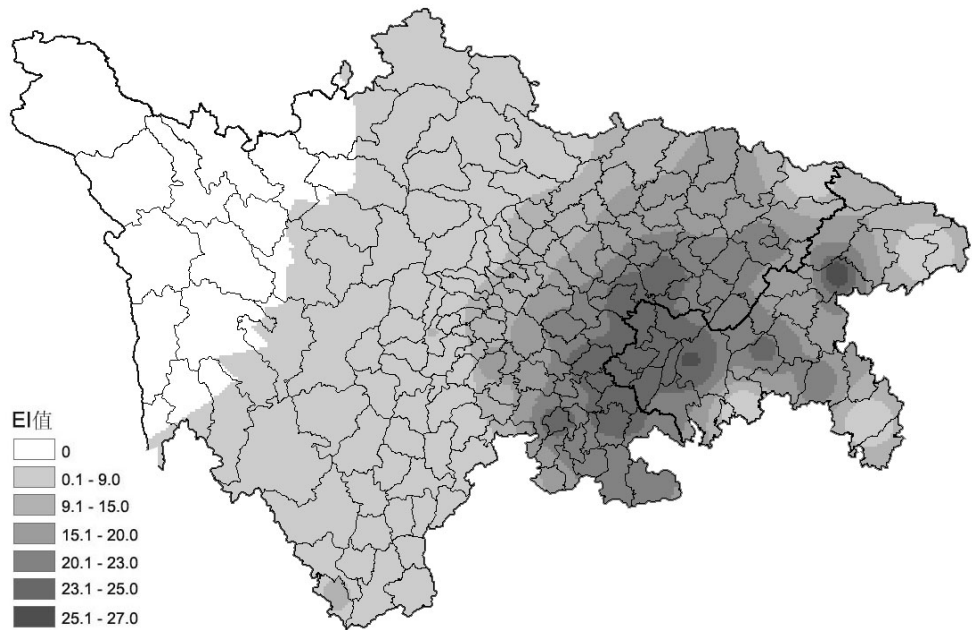


图 3-9 红火蚁在川渝地区的 EI 值

Fig. 3-9 EI value of RIFA invasion in Sichuan and Chongqing

图 3-8 显示红火蚁入侵两广地区的 EI 值,除了广西西部的小部分地区外,其他地域的 EI 值均在 30 以上,由北向南逐级增加,处于红色警报区,目前已发生红火蚁的县市均在这个范围内。图 3-9 显示了目前没有发生红火蚁的川渝地区的东部西部差异明显,西部的 EI 值大多在 15 以下,入侵概率均在 50% 以下;东部的 EI 值大多在 15 以上,入侵概率均在 50% 以上,处于橙色警报区,严重程度(EI 值大小)以重庆的大足县、荣昌县和四川的内江市、安岳县为中心向四周逐级递减。

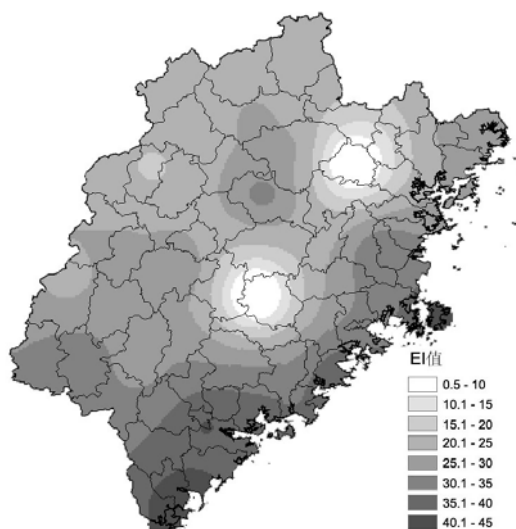


图 3-10 红火蚁在福建地区 EI 值

Fig. 3-10 EI value of RIFA in Fujian

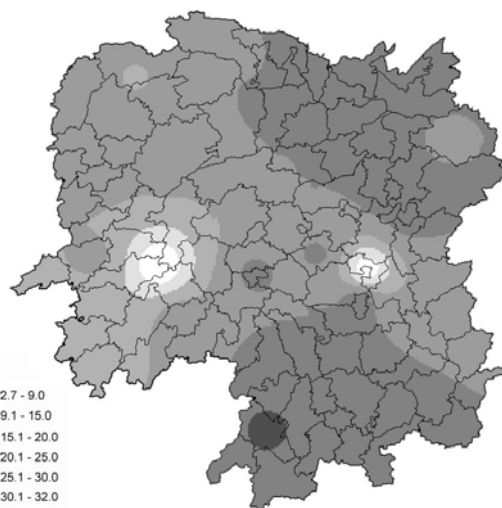


图 3-11 红火蚁在湖南地区 EI 值

Fig. 3-11 EI value of RIFA in Hunan

图 3-10 显示福建南部地区 EI 值均在 30 以上,包括目前有红火蚁记录的上杭县,除了德化县和屏南县周边 EI 值在 15 以下,其他地区均大于 15,即入侵概率在 50%以上,尤以云霄县周边为高。图 3-11 显示湖南整体的 EI 值低于福建省,并且呈中部低南北部高的趋势,在南部以道县最高超过 30,以中部怀化市、洪江市、溆浦县、洞口县周边和衡山县周边为低,其他地区均也超过 15。

3.3 结论与讨论

3.3.1 结论

红火蚁在我国南方拥有大面积的适生区(红、橙警报区),对南方气候尤其是香港、澳门、广东、广西、台湾和海南更加适合红火蚁的生存,入侵概率均达到 85% 以上,其中海南省还没有遭到红火蚁的入侵,应严加防范。华东地区大多处于橙色警报区,除福建南部和湖南局部地区,均没有发现过红火蚁入侵状况,当地政府需加强检疫和实施相应的预防措施。中国西南地区滇南区和四川区分属云南南部和川渝西部,并处于橙色警报区和黄色警戒区,与其他西南地区相比,具有红火蚁适宜的生存条件。综上,本章结果与第二章基本一致。

3.3.2 关键点

经研究发现在 CLIMEX 使用的数据库中,所有站点的气象数据均是月值,而结果却以周值和年值的形式表示,所以这就涉及到气候月值数据如何推导成周值的问题。在本研究中可以考虑直接建立气候周值数据库,但这样的数据库在第五章建立评估系统时会给用户添加数据造成较大的工作量,从而影响系统的友好性,所以必须找到一种月值拟合周值的方法,并保证精准度,在 3.1.3 节中详述了这个问题。

应用于插值的 EI_A 值要剔除南沙和珊瑚岛两个位点,因为这两个点的预测值达到 85 左右,明显高于其他位点(其他位点的最高值仅在 70),实际上,这样的高值出现在远离大陆的海岛是不会对大陆造成边际影响,而插值运算不会考虑海陆因素,会把插值的结果扩散到水域,这显然是不合理的。尽管已经剔除了两个海岛高值点,但这样的 EI 高值也说明,如果南沙群岛被红火蚁入侵,会给该物种的蔓延提供优越的气候条件,加之岛屿生态多样性不高,如果红火蚁蔓延,则会对岛屿生态造成重大的影响。

只要能得到足够的物种的生物学参数和相应的位点气象数据, EI 中的因素是可以增加的。由于数据有限,红火蚁的研究只采用大气温度、大气湿度和海拔这三个因素,如果有条件可以考虑土壤温湿度,尽管土壤温湿度会受大气温湿的影响,鉴于红火蚁是土栖物种,最好使用能直接反映土壤状况的参数。笔者虽然已经得到国内 0cm 土壤温度的数据,但是国外站点的这方面数据很难获取,这样就缺乏进行 EI 值等级划分的国外数值。

3.3.3 结果讨论

第二章与第三章方法结果比较:第三章(图 3-5)整体结果与第二章(图 2-5)相比,红色警报区的位置大致相同,主要位于两广地区;橙色警报区和黄色警戒区的范围有所缩小,尤其是云南和贵州大多处于黄色警戒区和绿色小风险区范围,而不是第二章预测的橙色警报区。究其原因,第二章的方法是寻找与物种目前发生地气候最相似的地方,第三章方法则寻找的是物种适应生存的地方,由图可知两类区域中红、橙警报区的包含关系,即红火蚁适合生存的地方一定是与已发生地气候较相似的地方,反之则不一定。

第三章政区入侵概率结果与第二章的相比,可以看出两条曲线的趋势是一致的,即华东和华南地区的入侵概率值均高于其他地区;但“ EI 值转换的入侵概率”曲线(B 曲线)比“相似离度值转换的入侵概率”曲线(A 曲线)波动大,即 A 线的华东华南西南的概率值大多超过 B 线,有的概率值为百分之百,而西北东北概率则小于 B 线,甚至有的概率值为零。在广大的南方地区,考虑生物学因素会增加入侵概率值,在广大的北部地区,考虑生物学因素会降低入侵概率值,这就更加可以说明南方适合红火蚁的生存。

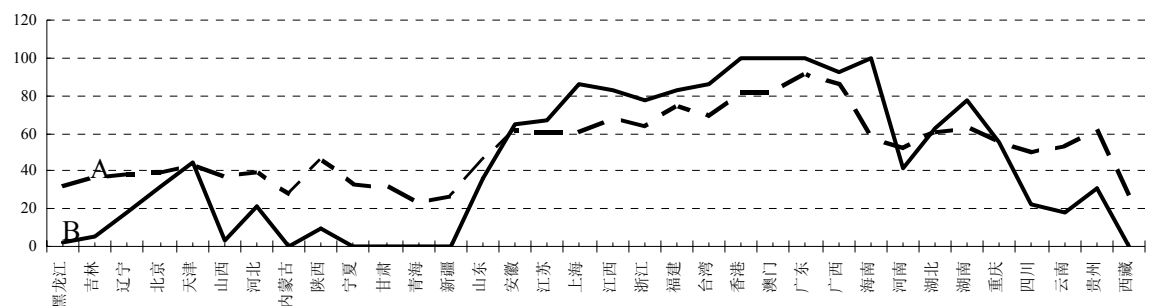


图 3-12 两种方法预测红火蚁入侵中国各政区的概率值比较

Fig. 3-12 Comparison of RIFA predicted invasion probability in different China districts by A and B method

第三章气候区入侵概率结果与第二章的相比大抵一致，红色、橙色警报区都主要集中在雷琼区、闽南-珠江区、莆江-闽江-南岭区、江南区、江北区、台北区、台南区。最主要的区别在于云南和贵州部分地区在第三章的结果处于绿色小风险区，而用第二章的方法预测两省大部分地区都属于橙色警报区，图 3-13 显示了中国的海拔分布，可以看出，区别最大的云贵地区比其它红、橙警报区有更高的海拔，图 3-14 是不考虑海拔的 EI 值分布，笔者分析导致这样结果的原因是第三章中的方法着重考虑了海拔，而海拔属于限制因素，对低海拔地区（如两广地区）有无海拔因素对 EI 值结果影响不大。

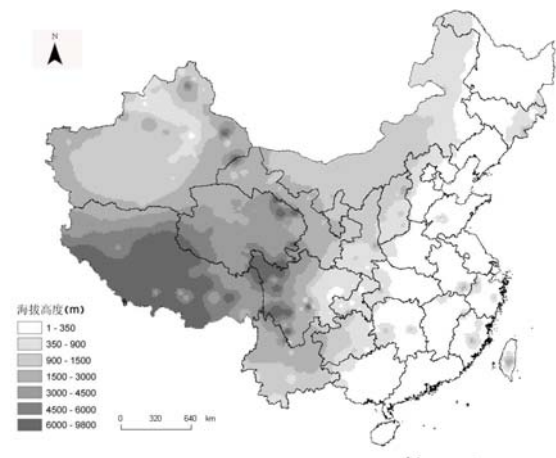


图 3-13 中国海拔高度示意图

Fig. 3-13 Elevation of different areas in China

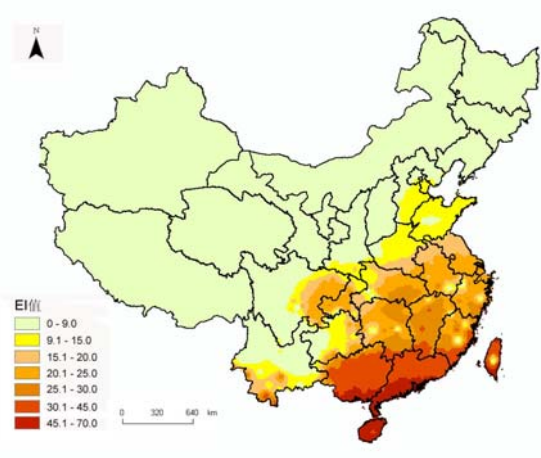


图 3-14 红火蚁入侵中国的适生分布区(不考虑海拔)

Fig. 3-14 Suitable distribution of RIFA in China (regardless of elevation)

第三章重点省份入侵概率结果与第二章的相比，得到了趋势相同的结果，但在细节上还是存在差别，这需要根据实际应用，综合考虑。

经过以上四段的对比分析，说明气候相似距法和生物气候相似法对于预测红火蚁适生区和入侵概率可以得到类似的结果，在实际应用中，可以根据获得数据的具体情况选择适当的方法，而两种方法的不同结果的结合考虑又可以精确物种的适生范围。

逐月 EI 值分析：我国位于世界最大的大陆-欧亚大陆的东南部，东临世界最大水域太平洋，

由于海洋和陆地热力性质的差异以及太阳辐射随季节的变化,导致冬夏间海洋与陆地上气压的季节变化。夏季(6、7、8月份)大陆形成低气压,海洋形成高气压;冬季(12、1、2月份)则相反,大陆气压高,海洋气压低,于是我国冬季盛行西北风,夏季盛行东南风。每年9月到次年4月间,干寒的冬季风从西伯利亚和蒙古高原吹来,由北向南势力逐渐减弱,形成寒冷干燥、南北温差很大的状况。夏季风影响时间较短,每年的4至9月,暖湿气流从海洋上吹来,形成普遍高温多雨、南北温差很小的状况。因此形成了我国冬冷夏热、冬干夏雨的季风性气候特征(王炳庭, 1992)。所以在红火蚁入侵中国的逐月结果中,夏季红火蚁EI值高,冬季EI值低,说明此物种对寒冷并不适应,而对炎热具有一定的耐受性。

对CLIMEX的改造: 第一,与CLIMEX相比,本章原理拥有更灵活的因子选择组合, EI_w 是各项指标指数的乘积,指标依不同物种而不同,而不是对计算EI值公式中的乘数指标加以固定,只要一项指标为零, EI就为零,如果能由用户自由选择乘积组合,结果更具可分析性。第二,在湿度因子方面,本章原理考虑了大气相对湿度来替代CLIMEX中的土壤湿度,在CLIMEX中土壤湿度并不是实测值,是用大气相对湿度、蒸发量和相关系数整合而来(Sutherst et al., 2007),并且该软件设定每个位点有两个湿度参数,分别是上午9时代表空气最高湿度,下午3时代表空气最低湿度,由于湿度不像温度有规律地发生,所以如此设置需进一步考证;此外,笔者认为对于大部分物种来说,适宜的相对的湿度是比较好通过实验和资料获得的,这就给数据获得提供了便利。第三,CLIMEX根据已报道发生地,调试参数后,有时会遇到未报道地区也出现或大或小的EI值,一旦经过调试消除此地EI值后,一些已报道地区的EI也会同时消失,由于物种的现有分布不仅仅取决于气候因素,如果地区人为管理严格,防治措施得力,也可以抑制物种定殖扩散,尽管本章原理也允许调试功能,但笔者认为最好开始就能根据有力的生物学参数来确定参数,可通过文献和实验获得物种生物学数据,酌情使用调试功能。第四,首先最新版的CLIMEX包括全球站点 2000 余个,其中发展中国家的站点较少,由于很多物种原产于南美洲发展中国家,位点的缺乏很不利于参数的调试,此外中国站点仅有 80 多个,不足以进行针对我国的适生分析,本章扩增中国站点至 733 个,为更精确地预测物种入侵中国情况提供了硬件条件。

第四章 外来生物风险评估指标体系构建及分析

无论是用气候相似距法还是用生物气候相似法预测物种的适生范围和入侵概率,均主要考虑的是气候因素,鉴于气候因子的规律性和易获得性,它在预测中起着举足轻重的作用,但物种入侵风险评估的因子中气候因子只是一个组成部分,还有诸如人为传带、竞争物种等其他因子在物种入侵过程中起着重要的作用,对它们进行评估同样是外来物种风险评估工作中的重要部分,但这些指标不如气候因子易于量化和评价,所以目前在这方面的研究还比较有限,本章将对非气候因素进行探讨并建立一套风险评估的指标体系,探讨定量评估的方法,并最终综合各方面的因素,得到物种入侵某地的概率值。本章方法为“外来生物风险评估系统”提供重要原理,为了检验此方法的使用效果,应用红火蚁作为分析案例。

4.1 材料与方法

4.1.1 指标体系建立依据

指标体系是被评价系统的结构框架,指标名称和指标数值是其质和量的规定,通过对外来生物各种特性、环境因素和人为因素等指标的分析,评价和预测外来生物对本地人类健康、经济活动、生态环境和社会活动等产生的影响(徐海根等,2004),为了从整体上反映评价对象的价值和便于操作,建立指标体系的原则是:(1)科学性:要在对外来生物入侵充分认识、深入研究的基础上,客观真实地反映物种入侵风险产生的过程,定义明确准确,计算方法规范。(2)重要性:指标不是越多越好,应建立在科学分析风险产生过程基础上,选取决定风险产生的关键因素,与风险的有无、大小之间具有直接联系。(3)系统性:指标体系作为一个有机整体,应能全面反映外来物种入侵各要素的特征、状态及各要素之间的关系,但要避免指标之间的重叠,使评价目标与指标有机联系为一个层次分明的整体。(4)实用性:指标体系运行过程中应具有很强的可操作性和可比性,可以用定量指标,也可以用定性指标。(5)灵活性:根据评估对象和使用者的不同,可对指标体系进行相应调整。由于指标体系涉及领域广泛,其评估对象也具有不确定性,并且使用者专业知识和使用目的也会有所差异,因此,指标体系在使用过程中应根据具体情况做相应调整,并且不影响指标体系整体效能。

本章中指标体系的构建参考了众多文献,并根据这些体系的优点制定的本研究的体系内容,现简要列出其中重要文献的框架体系和主要思想:国际植物保护措施标准(International Standards for Phytosanitary Measures, ISPM)(2004)认为有害生物风险评估可包括有害生物分类、评估传入和扩散的可能性和评估潜在经济影响;万方浩等(2005)认为在外来种生态风险评估体系中应该包括的内容有起源地和分布范围、外来种繁殖和扩散特性、适应性特征、遗传特性、危害特性、协同入侵、检疫的难易与可靠性和被防治特点。徐海根等(2004)认为,影响外来物种入侵成功的因素主要有外因和内因两大类,内因包括物种适应性、生长特性、繁殖特性等,外因包括环境因子、自然控制机制和人类活动。李志红等(2004)从五个方面评估了有害生物危险性,即国内

分布状况、潜在的危害性、受害栽培寄主的经济重要性、移植的可能性和危险性管理的难度；田家怡（2004）认为对外来有害生物入侵危害与经济损失评估应主要从四个方面着手，即对生态系统的影响、对生物多样性的影响、对农林牧渔业的影响和对人类健康的影响。李振宇和解炎（2002）认为，外来物种入侵风险指数评估体系中应该包括的指标有繁殖扩散、遗传特性、有害特征、适应性特征、物种类型、被控制特点和入侵历史。

4.1.2 指标体系的结构

根据 4.1.1 节中所述的建立指标体系的原则，本研究在参阅大量文献的基础上采用三级指标结构模式，按照外来生物的入侵过程，确定了四个一级指标，分别是传入风险、定殖风险、扩散风险和危害风险。每个一级指标下设立三个二级指标，每个二级指标下设立数个三级指标，由于建立指标体系时需要灵活性，每个三级指标下会根据评估对象和掌握资料的不同，由用户自定义三级指标项目，鉴于指标需要实用性，三级指标项目可以根据用户资料的掌握程度有不同的量化方法。

首先制定了外来生物风险评估的基本框架，即只制定到三级指标（表 4-1）。为了做到从客观上对物种的各方面入侵能力进行评估，需要每个物种的一、二、三级指标都是相对固定的，所以每个二级指标下的三级指标分为必要和非必要两大类，在评估物种入侵某地时，无论资料可获得性如何，都要考虑必要指标，非必要指标是选择项，用户也可以自行添加指标（这是评估系统建立时的一项重要功能，详见第五章）。

表 4-1 外来生物风险评估的指标框架

Table 4-1 Index used in the framework of alien species risk assessment

一级指标	二级指标	三级指标
传入风险	源地	在源地采用的该物种管理或商业等程序*
		外来物种在源地的分布范围*
		外来物种在源地的危害程度*
		外来生物对于目标地的价值
	途径	自然传入途径*
		人为传入途径*
		运输环境条件下的繁殖可能性*
		运输或储存期间对货物采取商业程序
	目标地	自然传播途径的携带量和频率
		人为传播途径的携带量和频率
定殖风险	环境	是否为检疫对象*
		在入境检查时检出外来生物危害性的难易程度*
		入境旅游人口*
		从传播途径转移到适宜寄主的传播媒介
	自身	入境点、过境点和终点离适宜寄主的距离
		商品的预定用途
		气候适应性*
		食物，寄主情况*
	自身	生态环境*
		土壤类型、面积的相似性
扩散风险	自身	地形（其他无生命因素）类型、面积的相似性
		目标地已存在的外来物种分布*

扩散风险	人为	引入或入侵历史*
		遗传适应性*
		有效繁殖的特性对定殖的影响*
		该物种抗逆性
		相对低的种群能够引起定殖
		监测物种难易程度*
		根除物种难易程度*
		人为干扰*
		土地利用
		开始引进或入侵的数目（量）
扩散风险	环境	气候适应性*
		食物，寄主情况*
		天敌制约*
		竞争物种*
		自然传播媒介*
		生态环境*
		土壤类型、面积的相似性
		地形（其他无生命因素）类型、面积的相似性
		目标地已存在的外来物种分布*
		遗传适应性*
危害风险	自身	有效繁殖的特性对扩散的影响*
		外来生物自身可移动性，扩散能力*
		该物种抗逆性
		监测物种难易程度*
		控制物种难易程度*
		干扰*
		人为传播的方式*
	人为	农林业
		畜牧业
		旅游业
		娱乐业
		交通运输业
		贸易
		生态影响
		是否对其他物种表现抑制特征
		产生一个新的、具有入侵性的杂交基因型可能性
		产生不育的杂交后代可能性
危害风险	行业影响	大量杂交和广泛基因渗入可能性
		作为其他有害生物的一个传播媒介的能力
		防治措施的负面影响
		防治措施是否会扰乱防治其他害虫的措施
		对非生物因素影响
		社会影响
		人类健康重要性
		社会稳定、文化传统

说明：带“*”表示必选指标

制定三级指标项目时，不仅要依据前人研究探讨过的因素，还要考虑数据是否容易获得和是否便于定量（详见 4.1.3 节），综合考察后，制定了红火蚁入侵中国三级指标的具体项目（表 4-2 到表 4-5）（“数据来源”中 C-中国区域经济统计年鉴，D-中国统计年鉴，E-中国环境统计年鉴）。在外来生物风险评估指标框架的危害风险指标中没有设立必要指标，尽管需考虑的因素要包括损害类别、出口市场的损失、控制费用的增加、对正在执行的有害生物综合控制计划的影响、环境影响、已认识到的社会代价（如失业）等，这些影响因子能考虑全面是最理想的，但是在实际情

况中,即使能对这些因素给予文字的描述,在定量评估上也很难查找并累积完整的、具有分析性的数值资料,所以在制定危害风险的三级指标和项目时,要根据掌握资料情况具有制定,只要有确实的证据或者间接评价的数据,就可以评价,但可以看出危害风险评价可能是不全面的。

表 4-2 红火蚁入侵中国的传入风险 (A) 指标

Table 4-2 Index used in the framework of RIFA entrance risk assessment in China

二级指标	编号	三级指标	项目	类型	单位	数据来源
源地 a	Aa01	源地的危害程度	源地的危害程度	定性		
	Aa02	源地分布	源地分布	定性		
	Aa03	源地采用的管理程序	源地采用的管理程序	定性		
途径 b	Ab01	自然传入途径	自然传入途径重要性	定性		
	Ab02	人为传入途径	从美国进口货物价值	效益型	万美元	各省年鉴
	Ab03		从中国台湾进口货物价值	效益型	万美元	各省年鉴
	Ab04		从巴西进口货物价值	效益型	万美元	各省年鉴
	Ab05		从澳大利亚进口货物价值	效益型	万美元	各省年鉴
	Ab06		植物及植物产品入境检验 检疫批次	效益型	次	D. p850
	Ab07		进口塑料橡胶价值	效益型	万美元	各省年鉴
	Ab08		进口纸木制品价值	效益型	万美元	各省年鉴
	Ab09		进口贱金属制品价值	效益型	万美元	各省年鉴
	Ab10	运输环境下繁殖可能		效益型		
目标地 c	Ac01	运输线路	铁路营业里程	效益型	Km/km ²	D. p631
	Ac02		公路里程	效益型	10 ⁻⁴ Km/km ²	D. p631
	Ac03	运输量	铁路客运量	效益型	万人	D. p636
	Ac04		公路客运量	效益型	万人	D. p636
	Ac05		铁路货运量	效益型	万吨	D. p638
	Ac06		公路货运量	效益型	万吨	D. p638
	Ac07	旅游人口	入境旅游人数	效益型	万人	C. p149
	Ac08	进口商品总值		效益型	万美元	C. p146
	Ac09	是否为检疫对象		定性		
	Ac10	入境查获难易程度		定性		

表 4-3 红火蚁入侵中国的定殖风险 (B) 指标

Table 4-3 Index used in the framework of RIFA establishment risk assessment in China

二级指标	编号	三级指标	项目	类型	单位	数据来源
环境 a	Ba01	气候适宜性		效益型		
	Ba02	食物, 寄主情况	蔬菜播种面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁴	D. p478
	Ba03		薯类播种面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁴	D. p477
	Ba04		花生播种面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁴	D. p477
	Ba05	生态环境	水灾受灾面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁴	C. p105
	Ba06		受火灾森林面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁷	D. p440
	Ba07		水土流失治理面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁴	E. p84
	Ba08		森林覆盖率	成本型	%	E. p85
	Ba09		湿地覆盖率	成本型	%	E. p101
自身 b	Bb01	目标地已存在的外来物种分布		定性		
	Bb02	遗传适应性		定性		
	Bb03	有效繁殖的特性对定殖的影响		定性		
	Bb04	引入或入侵历史		定性		
人为 c	Bc01	干扰	农作物总播种面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁴	D. p476
	Bc02		城市园林绿地面积/地区面积	效益型	10 ⁻⁴	D. p402

Bc03		公园面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p402
Bc04		水库数/地区面积	效益型	10^{-4} 座/km ²	C. p89
Bc05		牧草地/地区面积	效益型	10^{-4}	E. p79
Bc06	监测物种难易程度		定性		
Bc07	根除物种难易程度		定性		
Bc08	地区宣传力度	国家财政性教育经费情况	成本型	亿元	D. p823

表 4-4 红火蚁入侵中国的扩散风险（C）指标

Table 4-4 Index used in the framework of RIFA spread risk assessment in China

二级指标	编号	三级指标	项目	类型	单位	数据来源
环境 a	Ca01	气候适宜性		效益型		
	Ca02	寄主，取食	蔬菜播种面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p478
	Ca03		薯类播种面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p477
	Ca04		花生播种面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p477
	Ca05	天敌制约	天敌种类	定性		
	Ca06	竞争物种	竞争物种种类	定性		
	Ca07	自然传播途径		定性		
	Ca08	生态环境状况	森林覆盖率	成本型	%	E. p85
	Ca10		湿地覆盖率	成本型	%	E. p101
	Cb01	目标地已存在的外来物种分布		定性		
自身 b	Cb02	遗传适应性		定性		
	Cb03	有效繁殖的特性对扩散的影响		定性		
	Cb04	竞争能力		定性		
	Cb05	自身可移动性		定性		
	Cc01	干扰	农作物总播种面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p476
	Cc02		城市园林绿地面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p402
	Cc03		公园面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p402
	Cc04		淡水产品	效益型	万吨	D. p490
人为 c	Cc05	监测物种难易程度		定性		
	Cc06	控制物种难易程度		定性		
	Cc07	人为传播途径		定性		
	Cc08	地区宣传力度	国家财政性教育经费情况	成本型	亿元	D. p823

表 4-5 红火蚁入侵中国的危害风险（D）指标

Table 4-5 Index used in the framework of RIFA hazard risk assessment in China

二级指标	编号	三级指标	项目	类型	单位	数据来源
行业影响 a	Da01	电器设备	全社会施工房屋面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p198
	Da02		城镇施工房屋面积/地区面积	效益型	10^{-4}	D. p219
生态影响 b	Da03	畜牧业（部分）	禽蛋产量	效益型	万吨	D. p488
	Db01	是否对其他物种表现抑制特征	影响其它物种种群稳定性	定性		
	Db02		可以影响几类物种	效益型		
	Db03	防治措施的负面影响	农药使用影响，按毒性	效益型		
	Db04	该物种是否是传播媒介		定性		
	Db05	进化角度	可以演变成新物种	定性		
	Db06	对非生物因素影响	如土壤	定性		
社会影响 c	Dc01	人类健康	卫生机构数/地区面积	成本型	10^{-4} 个/km ²	D. p877
	Dc02		城市人口密度	效益型	人/km ²	D. p396
	Dc03		全社会人口密度	效益型	人/km ²	
	Dc04	社会稳定	学校个数/地区面积	效益型	10^{-4} 个/km ²	

4.1.3 物种入侵风险值计算方法

本章依据了“多指标综合评价方法”计算了外来生物的入侵风险值，该评价方法根据建立起来指标体系和实际情况，运用了层次分析法确定各指标的权重，通过不同的方法对三级指标项目进行定量，根据如下算法，得到二级指标、一级指标的风险值以及最后的物种入侵总风险值，即入侵概率值。

三级指标项目之间和二级指标之间互不依赖，独立地为上一级指标的数值大小作出贡献，这些指标之间为累加关系。因此，

二级指标风险值算法： $R_{2\text{级}} = \frac{\sum W_{3\text{级}} R_{3\text{级}}}{\sum W_{3\text{级}}}$ ；其中， $R_{3\text{级}}$ 表示二级指标风险值， $W_{3\text{级}}$ 表示三级

指标项目权重。一级指标风险值算法： $R_{1\text{级}} = \frac{\sum W_{2\text{级}} R_{2\text{级}}}{\sum W_{2\text{级}}}$ 其中， $R_{2\text{级}}$ 表示二级指标风险值，

$W_{2\text{级}}$ 表示二级指标权重。

一级指标之间互相依存，共同对总风险值作出贡献，这些指标之间为连乘的关系，因此，

物种入侵风险值算法： $R_{\text{入侵}} = \sqrt[4]{R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_4}$ 其中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别是 4 个一级指标。入侵风险指物种进入并对本地造成危害的概率，即入侵概率值。

4.1.4 指标权重设置

层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）根据问题的性质和要达到的目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照指标间的相互关联影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合，形成一个多层次的分析结构模型，从而最终使问题归结为最底层（供决策的方案、措施等）相对于最高层（目标）的相对重要权值的确定或相对优劣次序的排定。目前在系统评价、环境评价、项目遴选、成矿预测和规划决策等模糊判断及数据挖掘等方面有较多的应用（陈永宁等, 2004）。应用 AHP 法计算指标权重系数，实际上是建立有序递阶的指标系统的基础上，通过指标之间的两两比较对系统中各指标予以优劣评判，并利用这种评判结果来综合计算各指标的权重系数。

层次分析法（AHP）确定权重的计算程序如下：

（1）通过两两比较，得到判断矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{ij} & \vdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

其中， a_{ij} 是采用一定的标度规则确定的，在 AHP 法中，传统做法是采用 Saatty 最初设计的比例 9

标度（1-9 比例标度）（表 4-6）， a_{ij} 实际意义是第*i*指标的重要性是第*j*指标重要性的倍数，

表 4-6 AHP 比例 9 标度的评分标准

Table 4-6 Rating criterion of 9 indexes in Analytic Hierarchy Process

重要性分数 a_{ij}	意 义
1	i 与 j 一样重要
3	i 与 j 略为重要
5	i 与 j 明显重要
7	i 与 j 强烈重要
9	i 与 j 极端重要
2, 4, 6, 8	介于上述相邻重要程度之间
上述各数的倒数	上述j与i的比较，即 a_{ji}

（2）计算判断矩阵每一行元素的乘积

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i=1,2,\cdots,n)$$

（3）计算 M_i 的 n 次方根

$$\overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i} (i=1,2,\cdots,n)$$

（4）将向量 $\overline{W} = [\overline{W}_1, \overline{W}_2, \cdots, \overline{W}_n]$ 归一化，指标权重值为

$$W_i = \overline{W}_i / \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} (i=1,2,\cdots,n)$$

（5）计算最大特征根

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \text{ (AW)}_i \text{为向量AW的第}i\text{个分量}$$

（6）一致性检验 如果一个判断矩阵的不一致性过于严重，则所构成的权重系数将出现明显的不合理情况。因此，对判断矩阵一致性进行检验，

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

其中， CI 称为判断矩阵一致性指标， n 为判断矩阵的阶数， RI 为同阶次的平均随机一致性指标（表 4-7），一般情况下 CR 不超过 10%时，认为 A 的一致性好的，否则，认为 A 中的不一致情况较严重，需要调整判断矩阵直到满意为止。

表 4-7 平均随机一致性指标

Table 4-7 Index of average random consistency

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

4.1.5 三级指标项目风险值确定

三级指标项目可分为两大类型：定性指标和定量指标，但无论何种类型，为了能够形成概率值，三级指标项目的风险值需要是一个在 0-1 之间的数值。其中定性指标缺乏明确的测度方法，至今还没有一个公认的量化模式，一般采用分级评分法，本章根据文字描述制定评分标准，通过 9 级评分法（MacLeod et al., 2002）把风险分值赋在 0-1 之间，数值越接近 1，带来的风险越高或者项目事件发生的可能性越大。

表 4-8 定性指标 9 级的评分标准

Table 4-8 9 classes rating criterion of qualitative index

重要性分数 $R_{3\text{级}}$	意 义
0.1	项目事件对风险值基本没有贡献
0.3	项目事件对风险值较低贡献
0.5	项目事件对风险值有一般贡献
0.7	项目事件对风险值有较高贡献
0.9	项目事件对风险值有重要贡献
0.2, 0.4, 0.6, 0.8	介于上述相邻重要程度之间

定量指标间由于没有统一的度量标准，因而无法直接对比，所以需要无量纲化和归一化。属性归一化是根据不同属性指标对总体风险的影响方向不同，对全部指标属性进行正向化处理，对全部三级指标项目原始数据进行标准化计算，使所有数据转化为 0-1 之间的数值，属性归一化后全部数据的大小变化趋势反映了总体风险相同的大小变化趋势（徐海根等, 2004）。定量指标可分为区间型指标、效益型指标和成本型指标这三种类型。区间型指标是属性值以落在某个固定区间内为最佳的指标，无量纲化和归一化标准函数为：

$$r = \begin{cases} \frac{X - m}{c_1 - m} & m \leq X \leq c_1 \\ 1 & c_1 \leq X \leq c_2 \\ \frac{M - X}{M - c_2} & c_2 \leq X \leq M \end{cases} \quad c_1 < c_2, \text{ 且 } c_1 \in [m_i, M_i], c_2 \in [m_i, M_i]$$

效益型指标是指属性值越大越好的指标，无量纲化和归一化标准函数为：

$$r = \begin{cases} 1 & X \leq m \\ \frac{M - X}{M - m} & m \leq X \leq M \\ 0 & M \leq X \end{cases}$$

成本型指标是指属性值越小越好的指标，无量纲化和归一化标准函数为：

$$r = \begin{cases} 1 & M \leq X \\ \frac{X - m}{M - m} & m \leq X \leq M \\ 0 & X \leq m \end{cases}$$

其中，r：三级指标项目风险值，X：待评估数值，M：指标的最大值，m：指标的最小值。

评估定量指标的风险值时有两种方法：第一，通过年鉴查到全国各省的完全数据，确定指标项目类型，标准化后得到相应指标的风险值；第二，通过查阅资料可以找到相应的 X 、 M 、 m 、 c_1 和 c_2 ，确定项目类型后，得到风险值。

4.1.6 指标定义

本节根据 4.1.2 节的项目编号，分别简要论述选择该项目的缘由，并对定性指标的量化做相关说明。为检验该体系的应用性，以红火蚁作为研究案例。

4.1.6.1 传入风险

Aa01（源地的危害程度）：指物种在非评估地区的危害程度。如果物种在原产地已经发生较严重的危害，就会引起国内外的关注，传入他国的可能性会变小。由于红火蚁在原产地受到天敌和竞争物种的制约，与当地生态环境达到平衡状态，并且它在其原产地的危害报道也很少。虽然美国并不是红火蚁的原产地，但入侵美国近一个世纪的历史，让红火蚁适应了美国南部的气候并逃逸天敌的制约，给当地带了生态和经济的损失。红火蚁可以从原产地入侵中国，也可以从美国入侵中国，因此，该项目的评分为 0.5。

Aa02（源地分布）：指物种在非评估地区的分布情况。如果物种在原产地分布得越广，可以说明它可能对气候适应力较强，也给物种的扩散行为带来便利。根据第二章描述的红火蚁在南美和美国的分布和红火蚁世界其他地区的现实分布，说明该物种分布很广泛。该项目的评分为 0.8。

Aa03（源地采用的管理程序）：指在已发现物种的地区采取控制该物种的措施等。除了南美国家，其他已经发生红火蚁的国家都会采取相应的监测措施，这就可以在一定程度上防止红火蚁随货物在该国中转后传入中国。但又不能排除已有红火蚁的国家出口货物到中国，这种情况下只有我国的检疫部门严格把关才能防止火蚁传入。该项目的评分为 0.6。

Ab01（自然传入途径）：指靠自然因素和自身因素传入的途径，如风力或者自身迁移，但这种传入途径一般在短距离内是奏效的，如果发生跨国家或者跨海洋入侵事件，根据文献记载大多都是人力协助造成的。对红火蚁而言，雌蚁的单次飞行能力最多在 5km 左右，想达到长距离迁移还是很困难的，此外，红火蚁在 20 世纪 30-40 年代就是随从南美运载农产品船只上的压仓沙土不慎带入美国的（Vision, 1997）。所以自然传入途径对红火蚁的入侵没有重要的作用，该项目的评分为 0.2。

Ab09（人为传入途径）：指在人类活动的帮助下成功传入的途径。人员流动和物资交流可以充当外来种的引入媒，有意或无意间将外来种从原生地带到遥远的别的地区，相当一部分入侵种是由这种方式带入的。红火蚁会主要通过受蚁巢污染的贸易货物以及货物包装中粘附带有蚁巢的土壤进入新的地区。自 2005 年 3 月 9 日广东增城出入境检验检疫局从澳大利亚进口废纸中首例截获红火蚁后，截止 8 月 2 日，广东省各地和张家港市、上海市和厦门市等地检疫部门又不断有截获火蚁类有害蚂蚁的报告，我国广东省的多个口岸、张家港口岸等从来自澳大利亚、美国、喀麦隆、英国、德国、越南、泰国、马来西亚、台湾的货物上截获了红火蚁，检疫物是废纸、原木、木包装和集装箱。国农业部（USDA）在 1958 年颁布了一项禁令严格限制从红火蚁疫区向非疫区

转运土壤、草皮、干草、盆栽植物、带土植物、运土设备,同时设立了相应的检疫措施(Canter, 1981)。2005 年中国农业部发布第 453 号公告,对在广东省吴川市等部分地区发生的入侵红火蚁定为中华人民共和国进境植物检疫性有害生物和全国植物检疫性有害生物,并加以封锁控制(中华人民共和国农业部公告, 2005)。自广东省部分地区发现红火蚁以来,广东检验检疫部门及时组织了红火蚁检疫鉴定和除害处理的培训,明确要求对南美、美国、新西兰、澳大利亚、波多黎各等国家和地区,以及我国台湾的入境种苗、栽培介质、废品(包括废纸、废金属、废塑料)、集装箱、船舶等加强检疫。本节从年鉴中分别查到中国各行政区从美国、中国台湾、巴西、澳大利亚进口货物价值和进口塑料、纸木制品和贱金属的价值,用这些指标来评价人为传入途径因素。由于广东省年鉴的项目与中国年鉴有所出入(缺少记录或项目有更换),项目变动见表中所述,此外,广东省是沿海省份,拥有更多的港口,再者红火蚁入侵美国就是从阿拉巴马州摩尔比尔港(Mobile)进入的,所以加入考虑广东各市港口货物吞吐量的项目。

Ab10 (运输环境下繁殖的可能性):指随货物运输或人为途径时是否能不影响其繁殖。如果繁殖不易受外界的干扰,那么物种有可能污染更多的货物,或者留在载体中为远距离扩散提供便利。虽然红火蚁在美国成功侵入并快速扩散,致使每英亩土地的红火蚁密度是南美洲的 5 倍,主要是由于其强大的环境适应能力和繁殖能力(Porter et al., 1997),但是在运输途中是否可以繁殖并没有确实的考证,所以该项目的评分为 0.4。

Ac01 - Ac06 (运输路线和运输量):评价各地交通状况对物种传入的影响,交通的便利和运输量越大,越能协助物种搭“顺风车”传入、扩散到更远的地方。红火蚁后能通过爬行、通过木头随水流漂行或通过货车、火车等交通工具到处扩散,有时整个蚁巢还会通过运输感染的苗木或土壤而扩散。高速公路的兴建更加速了扩散的速度,甚至使其跳过原本不适合生存的美国中西部沙漠地区,于 1998 年入侵南加州(郑剑宁等, 2005)。虽然世界各国极力防止红火蚁入侵,但随着交通的便利和世界贸易的全球化,红火蚁已逐渐向世界各地扩散。

Ac07 (旅游人口):评价旅游人口流动性对物种传入的影响。旅游人口一般是非本地人口,他们的频繁流动可能会携带物种进入新的地区。

Ac08 (进口商品总值):物种会随进口商品传入新的地区,假定进口总价值越高,物种接触进口商品的机会越高。目前的文献表明,红火蚁会随苗木、土壤、集装箱、废品中进入他地,但进口商品包括所有类型的商品货物,也需要假定,进口商品越多,能携带红火蚁的商品就越多。

Ac09 (是否为检疫对象):2004 年红火蚁在我国发现后,引起农业部门的高度关注,农业部在组织专家风险分析的基础上,根据《中华人民共和国进出境动植物检疫法》和《植物检疫条例》的规定,发布第 453 号公告,将红火蚁定为进境植物检疫性有害生物和全国植物检疫性有害生物,要求加以封锁控制,并制定了《红火蚁疫情防控应急预案》(王福祥等, 2005)。在 google 里输入“红火蚁疫情防控应急预案”(2007 年 4 月 9 日搜索),分别可以搜索到全国很多省市已经印发了相关预案,下发各部门,很容易搜索到省市为:重庆市、江苏省、河北省、江西省、黑龙江省、广西省、福建省,广东省、安徽省、四川省、浙江省、贵州省、湖南省、台湾省、吉林省,这些省市的评分为 0.1;其他省市的评分为 0.4。

Ac10 (入侵查获难易程度):指当物种入境时检疫部门查获难易程度。就红火蚁来说,使用

实时荧光 PCR 检测方法, 通过 1 对通用引物和 1 条特异探针可将红火蚁和热带火蚁分开, 红火蚁样品可被成功地检测到, 而近似种热带火蚁没有被检测到, 同种不同虫态的个体得到一致结果 (陈岩等, 2005)。此外, 通过肉眼观察也是能够较容易地发现红火蚁蚁巢的。该项目的评分为 0.3。

4.1.6.2 定殖风险

Ba01 (气候适应性): 指物种对评估地区的气候适应能力, 数值来自第三章结果。气候 (如温度、湿度) 是影响物种分布的一个很重要的因素, 物种对气候适应力越强, 定殖和扩散成功的机会越高。

Ba02 - Ba04 (食物、寄主情况): 评估的食物丰富度对物种的分布影响是十分重要的。红火蚁是一种杂食性害虫, 它们随机取食, 会吃遇到的任何植物 (包括根、茎、叶、果实等) 和动物 (包括野生动物等) (Lofgren et al., 1975)。因此, 红火蚁在取得食物来源方面比其他物种更加具有优势, 但其主要食物是昆虫和其他小型无脊椎动物, 包括棉铃甲象 (*Anthonomus grandis*)、蔗螟 (*Diatraea saccharalis*)、美洲烟夜蛾 (*Heliothis virescens*) 等农作物害虫, 它们也吃腐烂的动物尸体。在红火蚁严重危害的地区, 红火蚁成为优势种后, 需要的食物与日俱增, 它们会攻击地栖性脊椎动物, 如地栖性鸟类的蛋与雏鸟、蜥蜴蛋与幼体及小型哺乳动物、啮齿动物等 (Porter & Savignano, 1990; Wojcik et al., 2001; Morrison, 2002)。红火蚁属于重要的农业害虫。红火蚁通过取食农作物的幼芽、根、茎等对许多农作物的产量有影响 (Vinson, 1991), 这些作物包括大豆、玉米、柑橘、黄秋葵、黄瓜、茄子、豆类、甘蓝、白薯、花生、马铃薯、高粱、向日葵等 (Drees et al., 1991; Drees, 1994)。鉴于红火蚁取食广泛, 而年鉴中的数据有限, 只能选择几类作物做为评估项目。

Ba05 - Ba09 (生态环境): 指评价生态环境优劣对物种定殖的影响。“多样性阻抗假说”认为结构比较简单的植物和动物群落, 其所达到的平衡更容易被打破 (Elton, 1958), 小的岛屿易于被入侵是由于本地种甚少, 农田是人为的简化了的群落, 也是入侵和暴发最容易发生的地方。本研究支持这个假说, 用水、火灾受灾情况面积、水土流失治理面积、森林和湿地的覆盖度来衡量生态环境的优劣, 其实, 人为活动导致的生态环境恶化也可以看作是一种干扰。

Bb01 (目标地是否已存在该物种): 目标地即所评价的地区, 如果已经存在该物种, 被引入的次数多, 可说明这个地区的自然条件是适合物种生存的, 也对该物种的建立、扩散。以至成功的入侵有重大的促进作用, 因为多次被引入不但增加了种群的数量, 并且增加了不同入侵区域, 从而增大了存活的可能性, 更重要的是, 由于从不同地区引入的种群遗传多样性有所不同, 以及着陆于不同区域的种群经过适应性进化, 都可以增大总体的遗传多样性 (徐汝梅, 2003)。目前已发生过红火蚁的地区评分为 0.7, 还未发生过的地区评分为 0.5。

Bb02 (遗传适应性): 物种到达新的地区, 为了适应新的环境而改变了原先的遗传特性, 如果物种的遗传适应性很强, 则更能在新地域稳定地生存下来。红火蚁入侵美国之后, 在两个方面表现出了引人注目的遗传变异。首先, 红火蚁获得了更强的耐寒性 (James et al., 2002)。红火蚁与黑火蚁 (*Solenopsis richteri* Forel) 杂交之后, 所产生的后代耐寒性明显增强。黑火蚁比红火蚁

较早入侵美国。但是不久，红火蚁表现出的生态学优势便远远超过了黑火蚁。两者在美国的广泛杂交使得他们的后代获得了更多的遗传多样性。由于限制红火蚁生长和扩散的因素是干燥条件和低温，所以红火蚁抵抗零度以下寒冷的能力逐渐增强，使得对红火蚁的防治变得更加困难。红火蚁还在另一个方面表现出遗传变异，即红火蚁有时候会接纳来自蚁巢外部的蚁后（Taber, 2000）。虽然多蚁后型种群在红火蚁的原产地也同样存在，但是他们在社会结构上的不同是非常明显的，即在入侵地的蚁巢中亲缘关系接近的蚁后相对很少。在美国，红火蚁的种群中有大量没有亲缘关系的蚁后共存于同一个蚁巢内（Ross et al., 1996）。可见红火蚁的遗传适应性是比较强的，该项目评分为 0.8。

Bb03（繁殖的特性对定殖的影响）：繁殖能力指单位时间内外来物种产生后代的数量，成功的入侵者应该有比当地种以及非入侵的引用种具有更强的开发、利用当地资源的能力来提升自身的繁殖能力和生长能力。红火蚁的群体繁殖力极强，数量增长迅速。红火蚁的婚飞多发生在晚春及夏季，有的地方全年均可发生（如美国南乔治亚州），交配后雄蚁很快就死亡，雌蚁则寻觅适宜筑新巢的地点，降落后做土室准备产卵，一般 24 h 内即开始产卵，脱落膜翅后成为蚁后。一个蚁巢每年可生产 3-5 千只蚁后，但只有很少的新蚁后能成功筑建新巢。蚁后可以繁殖 5 到 7 年。蚁后在开始的 3-4 周内，每日可产卵 100 -200 粒，并逐渐增加，可多达 5000 粒（Tschinkel, 1987）。通常情况下，卵经 7-10 d 后孵化成幼虫。经 1-2 周后，幼虫蜕皮成蛹。再经 1-2 周，蛹变成红棕色的成虫。繁殖力强一只成熟的蚁后，每天可产生出 1500-5000 个卵，且每年可产生 4000-5000 只生殖雌蚁（郑剑宁等, 2005）。该项目评分为 0.8。

Bb04（引入或入侵历史）：指物种从原产地入侵其他地区历史，入侵历史越丰富，说明该物种入侵风险越高，这就增加了物种在入侵地建立种群的可能性。红火蚁原分布于南美洲的巴拉那河（Parana）流域，包括巴西、巴拉圭和阿根廷（Vision, 1997）。由于检疫工作上的疏忽，于 1918-1930 年间跨过大西洋，经墨西哥湾入侵美国阿拉巴马州的摩比地区（Drees & Williams, 2002; Dowell, 1997）。在 1940-1960 年间，红火蚁已从阿拉巴马州扩展到阿肯色州、佛罗里达州、佐治亚州、路易斯安那州、密西西比州、南卡罗来纳州和得克萨斯州。1953 年的调查数据表明，以上 8 个州已有 102 个县被红火蚁入侵，面积超过 2430 万公顷（Canter, 1981）。80 年代早期，红火蚁又占领了北卡罗来纳州、俄克拉荷马州、亚利桑那州、新墨西哥州和波多黎各，1998 年发现南加利福尼亚州又被红火蚁入侵。最新的调查表明，红火蚁已经入侵至堪萨斯州和马里兰州，被红火蚁入侵的面积在美国已超过 1.35 亿公顷，分布在美国 15 个州和波多黎各。2001 年，红火蚁更是成功的跨越太平洋，入侵新西兰和澳大利亚，在当地建立起新的族群，并且已经对当地的农业和环境造成危害。2003 年 9-10 月于我国台湾的桃园与嘉义地区发现疑似火蚁入侵农地案例（林立丰等, 2005），2004 年在广东省吴川市竹城村等发现红火蚁的危害，目前在香港、澳门、广东、广西、福建都有分布，可见红火蚁入侵历史是很丰富的，但欧洲、非洲还没有入侵的报道。该项目评分为 0.8。

Bc01 - Bc05（干扰）：指人为活动对物种入侵的影响。在这里主要指人为建设用地对红火蚁的影响。“干扰假说”认为人或者人们驯化和迁移的植物和动物，可以对环境造成突然的、剧烈的干扰，有可能促进入侵（Mack, 1996）。著名的昆虫行为学家 Tschinkel 对红火蚁肆虐的现象提出了一个权威性的看法：红火蚁喜欢那些在生态上已经被人类干扰破坏的生境。例如废弃的田地、

牧场、草坪、路边和其他阳光充足的生境都有大量的红火蚁出现，他们和其他的动物以及杂草型植物一起生活在这些生境中（Tsutsui & Suarez, 2003）。此外，红火蚁对环境的适应力很强，据调查，红火蚁可入侵水稻田、菜地、果园、竹林、空地、荒坡、水源保护区，也可入侵公园绿地、高尔夫球场、行道树、草地、铁轨，甚至学校和社区中的民居、校舍，尤其以近 2 年栽种的向阳性较好的成熟草坪较多，绿篱和垃圾桶下也十分常见，垃圾堆附近的蚁巢由于食物丰富较其他地方显得更大，有时也可见红火蚁成群活动在温暖或食物丰富的地方，如冬季散热的电器设备表面，炒完菜的油锅内部，甚至拖把柄部和取暖杯的表面，造成对人类的危害（江世宏, 2005）。本研究对土地的干扰主要考虑农田、园林建设、水库、池塘、耕地等，这些人类建造的土地利用形式对定殖风险和扩散风险都是做出贡献，本节也考虑了淡水养殖产量，意想间接地评估池塘鱼塘因素。

Bc06（监测物种难易程度）：监测工作如能及时并且奏效，可以有效地防止外来物种进一步扩散。国外在红火蚁传播、发生危害情况调查、预防与治理等实践工作中，逐渐形成了一套较为完整的调查与监测技术体系，结合我国在红火蚁发生调查和防治的实际经验，华南农业大学曾玲等（2005）初步制定了适合我国红火蚁的监测技术，供各地参考施行。所以根据国内外的重视程度，对红火蚁监测方法比较成熟，难度不大，该项目评分为 0.3。

Bc07（根除物种难易程度）：从根本上讲，对于外来种的防治目的在于彻底灭除，但是当外来物种已经扩散，根除的机会是很渺茫的，因此在物种定殖阶段，结合监测措施，把握根除入侵种的较好时机。澳大利亚和新西兰是根除红火蚁比较成功的两个国家。澳大利亚农林渔业部在外来有害生物咨询委员会基础上专门成立了红火蚁咨询委员会，该委员会组织专家，历时近 3 个月时间，对红火蚁在澳大利亚的潜在风险进行了详细评估。根据评估结果，决定在 6 年内予以根除，并制定了详细的红火蚁根除、企业风险管理、公众宣传等计划。新西兰农林部在发现红火蚁后，同样制定了红火蚁根除的详细计划（王守聪等, 2006）。但是，两国的根除花费相当高，澳大利亚这 6 年的预算达到 1.75 亿澳元，澳大利亚红火蚁防控资金快速、足额到位是红火蚁根除计划得以顺利实施的基本保障，从制订根除计划到全部资金到位仅用了 1 周时间，根据联邦政府的规定，项目预算资金联邦政府负担 50%，各州按人口比例数负担剩余的 50%经费，所以虽然只是在昆士兰州发现红火蚁，其他州也要负担红火蚁根除计划的部分经费，昆士兰州按人口比例只负担全部费用的 8%，这种共同分担项目经费的做法是澳大利亚在控制外来有害生物工作中的一贯做法。所以根除红火蚁是一项高消费项目，该项目评分为 0.8。

Bc08（地区宣传力度）：外来入侵种的问题和人类活动有着密切的关系，人类日常生活起居、工作等都会涉及到运输，而许多生物入侵正是沿着运输途径传播，所以这种人类日常生活习惯也是入侵物种问题的一部分，因此，防止生物入侵，需要全社会共同努力，应充分调动公众的积极性，提高全社会防范意识（万方浩等, 2005）。所以政府和科研部分有义务向公众以各种方式宣传入侵物种的概念、危害和防治措施，达到提高大众思想认识的功用。在此，应用科研教育经费的数据来间接衡量地区宣传能力，假定经费越充足，在宣传上会投入更多的力量。

4.1.6.3 扩散风险

Ca05（天敌制约）：“天敌逃逸假说”认为一个外来种在被引入到一个新区域后，天敌的压力会减少，从而导致它在数量上增长和空间分布上扩张。有人认为红火蚁在美国的数量之所以远比它在南美洲本地的数量多的多，是因为它在南美洲有大量的天敌（Porter et al., 1997）。美国对红火蚁研究和防治工作已持续 70 多年，人们使用了一切可以采用的防治方法，然而红火蚁不但没有灭绝，相反其危害范围还在不断扩大。生物防治作为害虫治理的一种手段而受到研究者的重视。在美国，利用自然天敌防治红火蚁已开展多年。红火蚁的寄生性天敌、捕食性天敌及病原微生物能直接杀死红火蚁或间接影响红火蚁与当地蚂蚁的竞争，从而达到控制红火蚁种群的目的。目前，对入侵红火蚁生物防治方法的研究，主要集中在资源调查、效果评价、以及风险性评估等方面。目前已经查明，对入侵红火蚁制约的生物因子众多，天敌昆虫主要有寄生蚤蝇 *Pseudacteon* spp.、蚁小蜂 *Orasema* spp.、蚜茧蜂 *Lipolexis scutellaris*、捻翅目昆虫 *Caenocholax fenyesi* 以及其它蚂蚁 *Solenopsis dagerrei* 等，寄生线虫主要为斯氏线虫类 *Steinernema* spp. 和异小杆线虫类 *Heterorhabditis* spp.，捕食性螨类主要有虱状蒲螨 *Pyemotes tritici*，致病微生物主要有火蚁微孢子虫 *Thelohania solenopsae* 和球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*。另外，蜻蜓、鸟类、蜥蜴、蜘蛛、蟾蜍、犴獭等对红火蚁都会造成威胁（刘晓燕等, 2005）。尽管目前有许多生物防治物，但是我国目前并没有很好地调查过红火蚁的本地天敌情况，所以在这里似乎无从判断，所以全部省份都认为没有可以抑制红火蚁的天敌作用物，但考虑到有可能存在潜在的，该项目评分为 0.8。

Ca06（竞争物种）：如果入侵地有与入侵物种相竞争的生物存在，在很大程度上能够制约入侵种的扩散能力。如果本地蚂蚁种群有足够的抵抗能力，红火蚁就可能不会侵入这些地方。在通常情况下，和其他蚂蚁的内部竞争常常是制约蚂蚁数量的重要因素（Holldobler & Wilson, 1990），也有人提出，在南美洲红火蚁的数量被那些与北美洲的蚂蚁种群相比具有更多种类和更具侵略性的蚂蚁种群所制约着（Buren, 1983）。很少有文献记录红火蚁的在入侵地的竞争物种情况，该项目评分为 0.8。

Ca07（自然传播途径）：指靠自然因素和自身因素进行种群的扩散。此项目和传入风险中的“自然传入途径”相似，在此更强调定殖后的扩散。红火蚁主动扩散的方式包括：第一，自然迁飞，雌雄蚁会飞到约 90-300 m 的空中婚飞，完成配对与交配后，雌蚁可以飞行到 3-5 km 远的地方寻觅新的筑巢地点，婚飞的蚁后飞行的速度与风速、降雨量和环境温度有关，通常以每年 8-19km 的速度向四周自然扩散。第二，洪水扩散，洪水可把有生殖能力的雌蚁从河流上游带到下游，使红火蚁得以长距离扩散（周祥和陈泽坦, 2005；郑剑宁等, 2005）。但自然途径对红火蚁的扩散仍就十分有限，该项目评分为 0.3。

Cb03（繁殖的特性对扩散的影响）：红火蚁有很强的繁殖能力（见 Bb03），有学者认为快速繁殖对物种扩散是不利的，因为很容易被发现而被铲除，该项目的评价较定殖风险中的稍低，为 0.6。

Cb04（竞争能力）：生态学研究表明，红火蚁具有明显的种群竞争优势，在红火蚁入侵的地

区,其种群密度远远大于其他本土近缘种,且捕食其他无脊椎动物,降低单位面积内的其他生物的数量和多样性(Allen et al., 1994; Allen et al., 1995)。有记录表明,美国本土的近缘种热带火蚁种群,竞争不过入侵红火蚁,在得克萨斯的一项试验表明,3 a 时间内,180 个热带火蚁种群就被 1100 个入侵红火蚁的蚁丘所取代,替换比率是 6:1。同样在入侵红火蚁定居的地区,蚁类的多样性指数也是比较低的(Porter, 1996)。而且红火蚁攻击性极强,并且攻击人类,稍受侵扰,如在草地上散步不小心踩在蚁窝上,或在草地上躺卧碰到蚁窝上,或者是触碰到蚁群活动的地方,它就会成群涌出,以极快的速度蜂拥而上,找到适合的位置,并立即用其有力的上颚咬住皮肤作为支撑点,然后弯曲身体用腹部的毒针将毒液注射到人体内,并能更换地方,不断叮蛰,多者可达 7~8 次。该项目评分为 0.9。

Cb05 (自身可移动性): 此项目说明参考“自然传播途径”。该项目评分为 0.5。

Cc06 (控制物种难易程度): 物种进入扩散阶段后,已经很难根除,控制其不再继续扩散成为更主要的目的。只要及时地采取监测和化学防治措施,红火蚁并不难被控制在一定区域内。该项目评分为 0.5。

Cc07 (人为传播途径): 指在人类活动的帮助下成功扩散的途径。此项目和传入风险中的“人为传入途径”相似,在此更强调定殖后的扩散。许益镬等(2006)调查实验证实红火蚁虽然能依赖飞行而扩散至数公里外的远处,但通过这种形式的扩散和定殖会受到复杂环境因素的影响,扩散距离和速度往往非常有限,河流等外界因素明显影响了红火蚁的自然扩散。红火蚁的筑巢很大程度上影响着人为传播,由于红火蚁占据较广泛的筑巢材料,因此沙土、垃圾及苗圃储物等便成了红火蚁“远行”的重要交通工具。大小不一的蚁巢很容易随着草皮或盆栽树苗中的泥土被长途转运,用于公路、输油管道和电子与通讯线路的建筑机械,以及处理垃圾的运输车辆是常见的其他传播途径(Vision, 1997)。新近交配的雌虫喜欢潮湿或反光的表面,如池塘,同时,它们对小汽车、卡车、火车和拖车也感兴趣(张润志等, 2005)。大量文献记载红火蚁的传播途径大多由人为造成,该项目评分为 0.9。

4.1.6.4 危害风险

Da (行业影响): 指各行各业受到物种危害的评估,如果数据充足可以自行构造指标项目。红火蚁在危害是多方面的。在干旱季节,红火蚁会进入喷淋系统管道,阻塞水流和喷淋出口。此外,红火蚁还会增大滴灌管道的出水孔,并在水管上咬出许多孔洞。在洪水来临时,巢中的红火蚁能浮出地面,形成大型蚁筏并随水飘流,在到达陆地或进入船只后,该蚁筏能寻找地势较高的地方着陆,这往往会阻碍对洪水受害者的抢救。事实上,洪水暴发时,红火蚁可能进入家居、汽车和其他较干燥的地方。红火蚁喜欢在非绝缘的电器设备附近聚集。在非绝缘的电线、接头、保险丝和开关附近,它们的数量不断增加,引起短路或干扰电闸的正常工作。红火蚁经常造成电话交换设备、交通控制箱、空调开关、电力公司变压器和电表、机场指示灯、高速公路测速仪、洪水控制设备、水井和油井的电泵、计算机、家居墙壁插头甚至汽车电子系统等多种设备的问题。红火蚁群集引的电器设备短路可导致火灾,更严重的是某些设备的功能失灵会导致重大危害和生命财产的损失人行道、公路和地基下面的空蚁丘会导致地面的下沉和损害,这种状况下还会引起

严重的赔偿纠纷 (Vinson, 1997)。此外, 红火蚁能使小牛、小猪和家养动物等家畜致死, 它还捕食为植物传粉的蜜蜂个体。本研究用房屋面积来间接评价对电器设备的损害, 认为房屋越多, 相应的电器设备越多受威胁程度也越大。用家禽数目指标间接评价红火蚁对畜牧业的部分影响。

Db01, GDb01 (影响其它物种种群稳定性): 入侵物种本身形成优势种群, 使本地物种的生存受到影响, 最终导致本地物种灭绝, 破坏了生物多样性, 使物种单一化; 或是通过压迫和排斥本地物种, 导致生态系统的物种组成和结构发生改变, 最终导致生态系统受到破坏。外来物种对生物多样性所带来的危害, 无论是现实的或潜在的, 都不能低估。国际上已经把外来入侵物种列为除栖息地破坏外, 生物多样性丧失的第二大因素 (田家怡, 2004)。在美国, 有报道称红火蚁袭击树鸭、水鸟、长腿兀鹰、崖燕和濒临绝种的小燕鸥的卵和幼雏。一些海龟和蜥蜴的卵和幼仔、一些小型哺乳动物如啮齿类动物等也受到了红火蚁的攻击。红火蚁其极强的竞争力不仅对无脊椎动物和脊椎动物捕食, 同时也会给植物造成影响。红火蚁大量的捕食会导致入侵地区共生的蚂蚁和其他无脊椎动物以及脊椎动物在生物量、数量与多样性上的锐减, 它对生物多样性的严重影响正在不断扩展和加剧, 已成为危害严重的害虫。但目前笔者还没有看到何种物种是因为红火蚁的单独作用而导致灭绝, 所以该项目的评分为 0.7。

Db02, GDb02 (可以影响几类物种): 通过上述相关描述, 可知红火蚁可以危害几乎大部分的陆地动物——哺乳动物、鸟类、两栖动物、爬行动物、昆虫, 一份报告表明 (Jetter et al., 2002) 受到红火蚁危害的濒危物种有至少 58 种。此外, 已证实可以取食 57 种栽培作物 (Adams, 1986)。该项目的评分为 0.9。

Db03, GDb03 (农药使用影响): 用使用农药的毒性间接评价防治措施的负面影响。目前美国常用的防治红火蚁的药物有以下几种: 溴氰菊酯 (deltamethrin)、氟氯氰菊酯 (cyfluthrin)、s-氰戊菊酯 (esfenvalerate)、氯菊酯 (permethrin)、联苯菊酯 (bifenthrin)、乙酰甲胺磷 (acephate)、毒死蜱 (chlorpyrifos)、二嗪农 (diazinon)、苯氧威 (Fenoxycarb)、吡丙醚 (pyriproxyfen)、烯虫酯 (methoprene)、氟虫腈 (fipronil)、伏蚁脬 (hydramethylnon)、阿维菌素 (abamectin)、赐诺杀 (spinosad)、西维因 (carbaryl) 等 (曾玲等, 2005; 郑剑宁等, 2005)。其中大多数数据中低毒性。该项目的评分为 0.5。

Db04 (该物种是否是传播媒介): 如果入侵物种同时还做为其他生物的传播媒介, 则会给新环境带来更大的影响。就目前的文献报道中, 还未见红火蚁这方面的作用。该项目的评分为 0.1。

Db05 (进化角度): 外来入侵物种可与同属近缘种、甚至不同属的种杂交 (红火蚁与黑红火蚁杂交) 可能导致后者的遗传侵蚀, 造成遗传资源的污染, 增加了红火蚁的遗传多样性 (董慧和杨定, 2005)。此外, 红火蚁多蚁后型比单蚁后型的种群结构具有更强的生态毁灭性。在入侵地红火蚁多蚁后型种群的出现, 不但取代了其入侵地的蚂蚁种类和早期的入侵生物, 还同样取代了红火蚁的单蚁后型种群 (Porter et al., 1990)。该项目评分为 0.6。

Db06 (对非生物因素影响): 红火蚁属杂食性, 食物范围广, 而且具攻击性。土壤中的所有生物, 都是它可能攻击的目标, 因而可造成土壤生态失衡 (周祥和陈泽坦, 2005), 这样就很可能造成土壤性质的变化。但是红火蚁对于非生物生态范畴因素的影响报道得比较少, 该项目评分为 0.5。

Dc (社会危害): 社会危害是比较难评估的, 指标具有一定的抽象性, 目前评估最多的是物种的入侵给人畜带来的健康影响。传染性疫病是外来物种入侵的典型例证, 大凡新型的传染病, 一些是直接通过旅行者无意带进来的, 还有一些则是间接地从人们有意或无意引进的动物体上传染的。一些外来动物如大瓶螺, 是人畜共患的寄生虫病的种间宿主, 巴西龟也是疫病的传播媒介, 豚草所产生的花粉是引起人类花粉过敏症的主要病原物, 可导致“枯草病”等, 可见, 外来入侵有害物种对人类健康已经构成了威胁(田家怡, 2004)。就对红火蚁而言, 红火蚁严重危害人类健康, 被红火蚁叮咬后, 皮肤出现红斑、红肿、痛痒, 变粗畸形, 或发高烧, 疼痛、休克。一些体质敏感的人可以产生过敏性的休克反应, 严重者会死亡(张润志等, 2005)。此外, 广东吴川出现红火蚁伤人事件, 曾一度造成社会恐慌, 一项调查显示, 居住在红火蚁入侵地区或在这些地区有临时度假屋的人中, 89%的人曾经遭受红火蚁的叮蜇。本研究用间接的手段评价社会影响: 卫生医疗机构密度可以评价地区救助伤患的能力, 有的专家建议要继续建立健全应对突发公共卫生事件机构, 组织专门队伍加强调查追踪和处理, 全面做好红火蚁伤人情况的监测、报告和病人救治工作(容剑东, 2005); 人口密度越高说明如果发生危害, 涉及人口也可能越多; 已有报道说红火蚁出现在学校校园(李德山和李建光, 2005), 用学校密度指标项目评价社会稳定指标。

4.1.7 预警级别划分

与第二章相似, 将红火蚁入侵中国的地区划分成四个预警级别, 即红色警报区(100.0% - 80.1%)、橙色警报区(80.0% - 50.1%)、黄色警戒区(50.0% - 30.1%)和绿色小风险区(30.0% - 0)。红色警报区和橙色警报区要积极采取预防或防治措施, 只是在资源投入上有所差别; 黄色警戒区则主要以监测和预防措施为主; 绿色小风险区不需要采取针对性措施。

4.2 结果与分析

4.2.1 指标权重值

根据 4.1.4 节的方法, 得到各三级指标项目和二级指标的权重值(表 4-9)。

表 4-9 二级指标和三级指标的权重值

Table 4-9 Weight of the 2-level and 3-level index

指标	权重值	指标	权重值	指标	权重值	指标	权重值
Aa	0.2	Ac08	0.052	Bc05	0.12	Cc03	0.166
Aa01	0.569	Ac09	0.38	Bc06	0.114	Cc04	0.074
Aa02	0.333	Ac10	0.265	Bc07	0.114	Cc05	0.146
Aa03	0.097	Ba	0.4	Bc08	0.048	Cc06	0.146
Ab	0.4	Ba01	0.355	Ca	0.4	Cc07	0.097
Ab01	0.013	Ba02	0.03	Ca01	0.255	Cc08	0.033
Ab02	0.15	Ba03	0.03	Ca02	0.035	Da	0.4
Ab03	0.13	Ba04	0.03	Ca03	0.035	Da01	0.333
Ab04	0.089	Ba05	0.123	Ca04	0.035	Da02	0.333
Ab05	0.072	Ba06	0.123	Ca05	0.234	Da03	0.333
Ab06	0.15	Ba07	0.057	Ca06	0.198	Db	0.4
Ab07	0.08	Ba08	0.114	Ca07	0.028	Db01	0.166

Ab08	0.13	Ba09	0.133	Ca08	0.08	Db02	0.166
Ab09	0.08	Bb	0.3	Ca10	0.094	Db03	0.166
Ab10	0.101	Bb01	0.285	Cb	0.3	Db04	0.166
Ac	0.4	Bb02	0.285	Cb01	0.097	Db05	0.166
Ac01	0.018	Bb03	0.285	Cb02	0.097	Db06	0.166
Ac02	0.018	Bb04	0.142	Cb03	0.097	Dc	0.2
Ac03	0.045	Bc	0.3	Cb04	0.458	Dc01	0.076
Ac04	0.045	Bc01	0.176	Cb05	0.25	Dc02	0.307
Ac05	0.045	Bc02	0.176	Cc	0.3	Dc03	0.307
Ac06	0.045	Bc03	0.176	Cc01	0.166	Dc04	0.307
Ac07	0.083	Bc04	0.07	Cc02	0.166		

4.2.2 红火蚁入侵中国各政区概率值

根据 4.1 节的方法，得到中国各政区的红火蚁入侵概率（表 4-10）。

表 4-10 红火蚁入侵中国政区的风险值

Table 4-10 Risk value of RIFA invasion in China district

所属区域	政区名称	传入风险	定殖风险	扩散风险	危害风险	入侵概率(%)
东北	黑龙江	23.7	39.6	49.4	27.0	33.4
	吉林	21.3	38.3	50.5	27.6	32.7
	辽宁	32.0	41.7	53.0	32.6	39
华北	北京	24.6	50.4	61.3	37.2	41
	天津	24.0	48.0	59.6	33.7	39
	山西	23.8	40.5	52.0	27.3	34.2
	河北	26.4	45.0	55.7	40.5	40.5
	内蒙古	24.1	39.8	49.4	23.3	32.4
西北	陕西	25.7	39.2	51.2	28.1	34.7
	宁夏	23.8	40.4	51.4	24.2	33.1
	甘肃	25.0	38.7	50.5	30.2	34.8
	青海	23.4	39.6	49.6	25.4	32.9
	新疆	21.4	38.4	50.0	24.3	31.6
华东	山东	44.5	54.2	60.7	41.0	49.5
	安徽	24.0	53.2	62.3	30.2	39.4
	江苏	43.0	58.6	69.7	35.2	49.8
	上海	40.5	56.1	67.0	63.8	55.8
	江西	21.3	53.4	59.2	28.6	37.3
华南	浙江	30.3	53.2	58.1	30.5	41.1
	福建	25.4	50.8	59.0	27.6	38.1
	广东	62.5	56.2	65.5	28.8	50.7
	广西	22.8	55.4	60.7	25.5	37.4
	海南	24.4	52.0	60.5	27.7	38.2
华中	河南	27.6	55.9	61.7	42.6	44.9
	湖北	26.0	54.3	60.9	28.7	39.6
	湖南	23.2	59.4	60.8	28.3	39.2
西南	重庆	20.8	44.2	55.3	26.5	34.1
	四川	23.6	43.9	53.5	28.7	35.5
	云南	26.7	40.1	50.7	24.8	34.1
	贵州	20.6	46.9	55.6	25.3	34.2
	西藏	23.2	38.9	49.3	24.6	32.3

通过风险评估指标的综合分析，中国大陆各政区的红火蚁入侵概率值都在 30% 以上，东北、华北、西北、西南各政区在 30-40% 之间，华东、华南、华中地区大部分在 40-50% 之间，都处于黄色警戒区，只有江苏、上海和广东的入侵概率值达到 50% 以上，处于橙色警戒区。

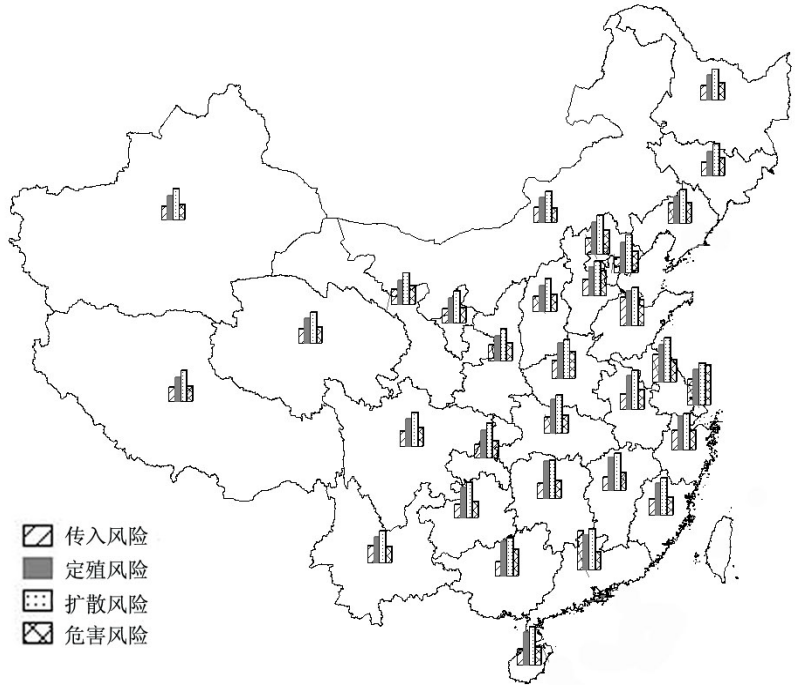


图 4-1 红火蚁入侵中国各政区的一级指标风险值

Fig. 4-1 1-level risk value of RIFA invasion in different China district

图 4-1 可以很直观地看出各个政区中 4 种风险为入侵风险值的贡献程度。各政区的定殖风险和扩散风险的贡献大抵相同，大多明显高于传入风险和危害风险，广东、山东、江苏、上海的传入风险和上海的危害风险明显高于其他政区，说明红火蚁较易传入鲁粤苏沪四省，而且一旦在上海稳定种群，会造成不小的危害。

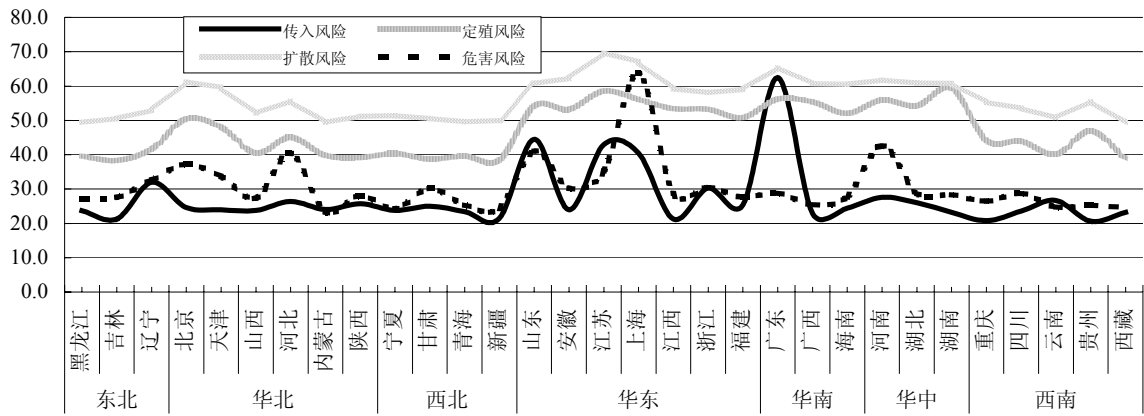


图 4-2 红火蚁入侵中国各政区一级指标风险值分析

Fig. 4-2 The analysis of the 1-level index risk value of RIFA invasion in district of China

在传入风险中华东、华南政区的数值明显高于其他地区，尤以山东、江苏、上海和广东为高。在定殖和扩散风险中，华东、华南和华中政区的数值明显高于其他地区，并且数值基本相同。在危害风险中，高值的分布区并不集中，主要有北京、河北、山东、上海和河南。

可以看出定殖风险和扩散风险曲线比较平缓，传入风险和危害风险曲线中都出现了突出高值，而其他政区的数值明显较低，究其原因，是三级指标项目量化时出现了几个明显高值，也就是说项目数值间差值悬殊，由于采取了标准化算法，所以使其他政区的绝对值变小，这也是传入、危害风险值大都低于定殖、扩散风险值的原因。但无论绝对值的大小如何，同一指标中的各政区值之间是可互相比较的，值越大说明此类风险在这个地区越大。

4.3 结论与讨论

4.3.1 结论

本章建立了外来生物风险评估指标体系，又针对红火蚁建立其风险评估体系。该物种入侵中国的指标风险评估结果表明，我国华南、华东地区存在较大的入侵风险，尤以沿海省市山东、江苏、上海、浙江、广东入侵概率值相对较高，在 50% 左右，且有较高的传入风险，其中前四个省市还不曾发现有红火蚁踪迹，所以最主要的防止办法应是严格检疫、科学管理，阻止红火蚁传入。由于缺乏港澳台数据，本章不对这些地区做出评估。

4.3.2 关键点

本研究的关键点在于三级指标项目的选定要建立在大量阅读相关文献和实际调查的基础上，也要兼顾可获得数据的种类，因为我们很有可能得不到最理想项目的数据（文字或数字）；指标项目评价的量化方法要能够反应出入侵概率值，以作出预警级别的判断；权重的设置仍旧需要阅读大量资料做出判断，有些三级指标项目是间接评价指标，不同间接指标的准确程度是不同的，例如评价“地区宣传程度”时使用的“科研经费”项目，我们并不能保证那些经费会用做科普和外来生物的宣传，甚至是红火蚁危害的宣传，只能假定科研经费越高的地区能够做宣传的可能性要大，所以进行权重设置时，不要把这类因素设为过高的权重。

4.3.3 结果讨论

三种方法预测入侵概率比较：从大趋势上讲，第二章气候相似法、第三章的生物气候相似本章中综合指标评估，都得出红火蚁在我国华东和华南地区的入侵概率值较高（图 4-3），事实上，红火蚁目前也已经在我国华南地区的广东、广西、福建局部地区严重发生。这就说明这三种方法在实际应用中的可行性。

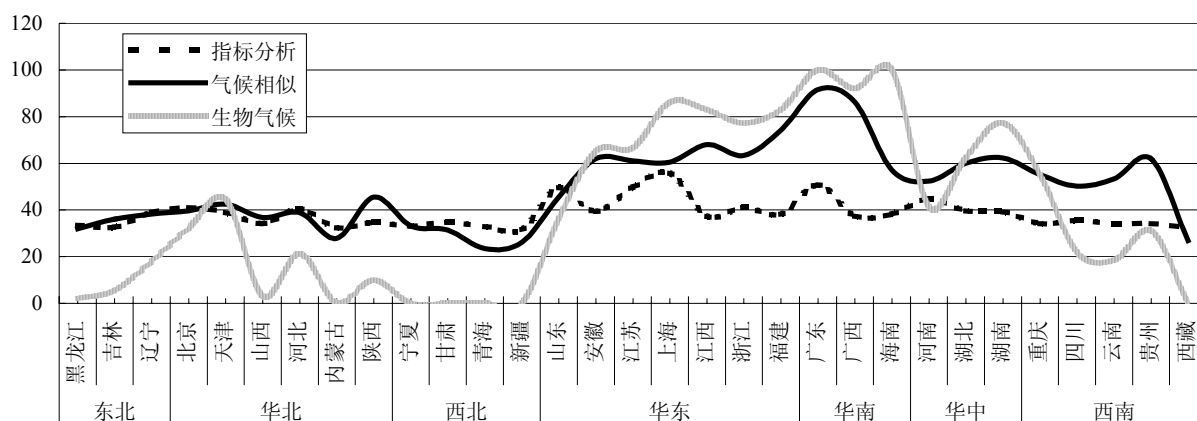


图 4-3 三种方法预测红火蚁入侵中国概率值比较

Fig. 4-3 Comparison of RIFA invasion probability by using different methods

三种方法预测结果在细节上又有所不同，着重考虑气候因素的第二、三种方法的结论表明除华南、华东区外，还要特别关注川渝和云南南部地区，而各种因素综合考虑的本章结果说明山东江苏上海一带需要严防传入风险。从预测目的上讲，三种方法都希望得到红火蚁入侵中国各地区的概率，从而可以判断优先防治地区。但它们的重点却不同：气候相似法为找到与物种目前发生地气候最相似的地方，生物气候相似法为找到物种最适宜生存的地方，这两种方法都可以得到一个范围性的结果；综合指标评估法则重点考虑更多的人为因素、社会因素在入侵中的作用，只能就特定地区得到一个概率值，需求的数据量比较大，是该方法应用的瓶颈。相对来说，我国南方较适合红火蚁的适生，在这些气候相对较适合的省份，考虑更多的非气候因素时（多指标综合分析）会减小红火蚁的入侵概率值，而北方那些气候相对不适合的省份，考虑更多非气候因素反而会增加红火蚁的入侵概率值，可以说明非气候因子，诸如指标项目中的人为因素、社会因素对物种的入侵过程和成功概率具有一定的影响。

在方法上，每个二级指标下的三级指标项目不宜设置过多，否则缺乏针对性，本章规定不得多于 10 个，并且三级指标项目内容会根据评价对象的不同而不同，也会根据评估者掌握数据的不同而不同，例如，如果更换数据或更具说服力的指标，红火蚁入侵中国政区概率绝对值会有所变化，但无论是绝对值是否精确，概率值之间的比较不应该造成趋势性的错误。

严格地讲，造成危害并不是外来物种入侵的过程，而是最终入侵的结果，在入侵概率中之所以考虑危害因素，是因为如果外来种只是建立种群而并没有给当地带来重大损失，也就不能算是真正的入侵。评价外来生物对评估地的潜在危害几乎没法使用直接评价项目，因为直接评价的项目定性和定量数据只可能在已经发生该物种的地区得到，所以为了使各地区的危害风险具有可比性，多数情况下，需要使用间接项目进行评价，例如，物种喜食花生，我们最多能调查到已发生物种的地区花生生产受到多大的损失，但是对于其他地方就无从调查，因此要收集诸如地区花生的种植面积和产量等间接指标的数值来评价物种对花生作物可能造成的危害。此外，在危害风险评估时，最理想的评估结果是以货币形式表示的经济损失，但这又涉及到更多经济学方法，有待进一步研究。

第五章 外来生物风险评估系统开发

外来生物风险评估中不少内容都与地理相关,例如适生分布区域分析、扩散行为分析等,而目前地理信息系统(GIS)正是一种可以辅助解决与地理相关问题的实用工具,地理信息系统是一种特定的而又十分重要的空间信息系统,支持空间数据的采集、管理、处理、分析、建模和显示,以解决复杂的规划和管理问题,已广泛应用于资源管理、区域规划、国土监测和辅助决策等领域(黄杏元和马劲松,2001)。与一般的管理信息系统相比,地理信息系统具有以下特征:(1)地理信息系统在分析处理问题中使用了空间数据与属性数据,并通过数据库管理系统将两者联系在一起共同管理、分析和应用,从而提供了认识地理现象的一种新的思维方法;而管理信息系统则只有属性数据库的管理,即使存储了图形,页往往以文件形式等机械形式存储,不能进行有关空间数据的操作,如空间查询、检索、相邻分析等,更无法进行复杂的空间分析。(2)地理信息系统强调空间分析,通过利用空间解析式模型来分析空间数据,地理信息系统的成功应用依赖于空间分析模型的研究与设计。

在研究外来生物时使用 GIS 技术已经逐渐被重视起来,本课题的第二章至第四章的制图部分全部是由集成式 GIS 软件完成,本章则应用组件式 GIS 的思想和方法建立针对外来生物的应用型地理信息系统,系统的原理基于以上章节的内容,各章的结果数据又均由系统产生。

5.1 地理信息系统二次开发概述

5.1.1 GIS 开发模式

地理信息系统根据其内容可分为两大基本类型:一是应用型地理信息系统,以某一专业、领域或工作为主要内容,包括专题地理信息系统和区域综合地理信息系统;二是工具型地理信息系统,也就是 GIS 工具软件包,如 ARC/INFO 等,具有空间数据输入、存储、处理、分析和输出等 GIS 基本功能。随着地理信息系统应用领域的扩展,应用型 GIS 的开发工作日益重要。二次开发目的是极大限度的利用 GIS 软件资源并同时给予用户最大的活动空间,如何针对不同的应用目标,高效地开发出既合乎需要又具有方便美观丰富的界面形式的地理信息系统,是 GIS 开发者非常关心的问题, GIS 的开发模式有以下三种类型

5.1.1.1 独立开发

独立开发指不依赖于任何 GIS 工具软件,从空间数据的采集、编辑到数据的处理分析及结果输出,所有的算法都由开发者独立设计,选用某种程序设计语言在一定的操作系统平台上编程实现。这种方式的好处在于无须依赖任何商业 GIS 工具软件,减少了开发成本,但一方面对于大多数开发者来说,能力、时间、财力方面的限制使其开发出来的产品很难在功能上与商业化 GIS 工具软件相比。

5.1.1.2 宿主型二次开发

指基于 GIS 平台软件上进行应用系统开发。大多数 GIS 平台软件都提供了可供用户进行二次开发的脚本语言,如 ESRI 的 ArcView 提供了 Avenue 语言,MapInfo 公司的 MapInfo Professional 提供了 MapBasic 语言等等。用户可以利用这些脚本语言,以原 GIS 软件为开发平台,开发出自己的针对不同应用对象的应用程序。这种方式省时省心,但进行二次开发的脚本语言,作为编程语言,功能极弱,用它们来开发应用程序仍然不尽如人意,并且所开发的系统不能脱离 GIS 平台软件,是解释执行的,效率不高。

5.1.1.3 基于 GIS 组件的二次开发

随着软件理论和技术的发展,同时由于各种计算机软件规模的迅速膨胀以及人力资源的相对有限导致了可重用的开发思想和面向对象的软件开发模式的出现,同时由于组件接口技术的出现使得 GIS 底层处理过程的封装成了可能,即用户并不需要确切的懂得对地理空间数据以及关系的详细处理算法,便可很轻松的通过软件提供商提供的控件或自动化服务器来进行二次开发从而定制自己所需的各种软件界面或完成自己所需要的任何功能。这就是所谓的组件式 GIS(Components GIS, ComGIS)。大多数 GIS 软件产商都提供商业化的 GIS 组件,如 ESRI 公司的 MapObjects、MapInfo 公司的 MapX 等,这些组件都具备 GIS 的基本功能,开发人员可以基于通用软件开发工具,尤其是可视化开发工具,如 Delphi、VisualC++、Visual Basic、Power Builder 等为开发平台,进行二次开发。

组件式 GIS 的基本思想是把 GIS 的各大功能模块划分为几个控件,每个控件完成不同的功能。各个 GIS 控件之间,以及 GIS 控件与其它非 GIS 控件之间,可以方便地通过可视化软件开发工具集成起来,形成最终的 GIS 应用。控件如同一堆各式各样的积木,它们分别实现不同的功能(包括 GIS 和非 GIS 功能)入根据需要把实现各种功能的“积木”搭建起来,构成应用系统(陆汝砖等, 2000)。

组件 GIS 为新一代 GIS 应用提供了全新的开发方式。与传统的 GIS 相比,这一技术具有多方面的特点(黄建业和王卫安, 2001; 刘丹等, 2002): (1) 实现系统无缝集成: GIS 组件实现 GIS 的功能,其它功能由其它的功能组件或应用模块去做, GIS 组件与其它组件和应用之间的联系由可视化的通用开发语言来建立,这些开发语言建立了应用系统的框架。GIS 组件和其它组件提供了功能的实现具体,在框架的组织下构成运行的应用系统,因此,使用组件 GIS 可以实现高效、无缝的系统集成。(2) 便于开发: 组件 GIS 不需要专门的 GIS 二次开发语言,只需实现 GIS 基本功能函数,按照 ActiveX 控件标准开发接口,增强了 GIS 软件的可扩展性。只需熟悉基于 Windows 平台的通用集成开发环境,以及 ComGIS 各个控件的属性、方法和事件,就可以完成应用系统的开发和集成,ComGIS 可以跨语言使用。(3) 可扩展性强: 在组件式软件技术背后,有一个十分庞大的组件资源库,用户可以从不计其数的组件中挑选需要的组件和组件式 GIS 一起集成应用系统,极大地扩展了 GIS 的功能,全球范围内有许多软件公司在编写各种各样的控件,这些第三方

控件基本上可以解决任何通用软件编程所遇到的问题。(4) 易于推广：今 GIS 发展有两个重要的趋势：GIS 的应用正在从数据库建立转向数据使用；同时，GIS 正在从难于使用的系统向易于使用的系统转变(John C. Trinder, 1998)。组件式 GIS 正是导致这些转变的重要推动力，组件式技术已经成为业界标准，用户可以象使用其他 ActiveX 控件一样使用组件式 GIS 控件，使非专业的普通用户也能够开发和集成 GIS 应用系统，推动了 GIS 大众化进程。组件式 GIS 的出现使 GIS 不仅是专家们的专业分析工具，同时也成为普通用户对地理相关数据进行管理的可视化工具。(5) 成本低：组件式 GIS 提供空间数据的采集、存储、管理、分析和模拟等功能，至于其他非 GIS 功能(如关系数据库管理、统计图表制作等)则可以使用专业厂商提供的专门组件，有利于降低 GIS 软件开发成本。另一方面，组件式 GIS 本身又可以划分为多个控件，分别完成不同功能，用户可以根据实际需要选择所需控件，降低了用户的经济负担。

5.1.2 组件式 GIS 二次开发工具——Mapobjects 组件

组件式地理信息系统 (Components GIS, ComGIS)，就是面向对象技术和组件式软件技术在 GIS 软件开发中的应用，是指基于组件对象平台，以一组具有某种标准通信接口的、允许跨语言应用的组件提供的 GIS，这种组件称为 GIS 组件。GIS 组件之间以及 GIS 组件与其他组件之间可以通过标准的通信接口实现交互 (杨家武, 2006)。ComGIS 不依赖于某一种开发语言，而是嵌入通用的开发环境。

5.1.2.1 Mapobjects 组件概述

Mapobjects 是全球最大的 GIS 厂商 ERSI 公司的 GIS 系列产品中的重要组成部分，其结构合理、简洁、易于扩充，是目前较为流行的 GIS 组件。它是一组提供应用开发人员使用得制图与 GIS 功能的控件，它由一个叫 Map 控件的 ActiveX 控件和一系列可编程 ActiveX 对象组成。在标准的 windows 编程环境下，能够与其他图形、多媒体、数据库的开发技术无缝地组成完全独立的应用系统，用户可以使用 VB、VC、Delphi 等平台进行二次开发 (陈杰, 2006)。

利用 MapObjects 组件可以方便地在应用程序中添加地图绘制、显示、以及对空间数据管理与分析等地理信息系统的基本功能(齐红, 2005)。MapObjects 的使用和开发过程与其他的 ActiveX 控件一样，在 VB 的编程环境下，只要把 MapObjects 的 ActiveX 控件添加到应用程序当中，就可以通过接口对其提供的各种功能进行调用。他不是为最终用户而是专门为开发人员提供的。开发人员可在熟悉和喜欢的开发环境中利用 MapObjects 开发出 GIS 应用系统。使用 MapObjects 开发地理信息系统具有灵活、快捷、高效、方便等诸多优点，大大减少了开发时间和开发难度。它同样可以利用其他强大的应用程序创建非常符合特定需要的应用，这一特点正是目前大多数地理信息系统开发工具所欠缺的，它的应用成熟也必将推动地理信息系统应用更加迅速的普及 (陈禹, 2001)。但 MO 不能执行某些高级功能，如高质量地图输出、表面模型或网络分析等高级空间分析、拓扑编辑，应用者可利用 ESRI 的其他产品如 Arc/Info、ArcView 来实现 (王育红等, 2002)

5.1.2.2 Mapobjects 组件相关技术

ActiveX 是一套基于组件式对象模型 (COM) 的可以使软件组件在网络环境中进行互操作而不管该组件是使用何种语言创建的技术, 实际上是 OLE (object linking & embedding, 对象链接与嵌入技术) 的新版本。它使 OLE 接口加强了对数据和特性的管理, 效率更高, 被广泛应用于 Web 服务器以及客户端的各个方面, 同时, 它也被用于创建普通的桌面应用程序。作为 ActiveX 的重要内容, ActiveX 控件是一种可编程、可重用的基于 COM 的对象和 OLE 与 ActiveX 技术的自定义控件。它是基于与应用程序无关的思想设计的, 其目标是提供一种面向对象、与操作系统无关、与机器平台无关、可以在应用程序之间互相访问对象的机制。ActiveX 控件提供给用户应用接口, 发送相应的事件, 开发者可以截取这些事件, 执行相应的功能。ActiveX 控件的开发端和使用端是完全独立的, 可用于不同语言、不同开发平台、不同的系统环境中, ActiveX 与 Activex 控件通过属性、事件、方法等接口与用户应用程序进行交互 (张轶辉, 2005)。

属性 (Propertie) 是指描述控间或对象性质 (attributes) 的数据, 如 BackColor (地图背景颜色) GPSIcon (用于 GPS 动态目标跟踪显示的图标) 等。可以通过重新指定这些属性的值来改变控件和对象性质。在控件内部, 属性通常对应于变量 (Variables)。

方法 (Methods) 是指对象的动作 (Actions), 如: Show (显示)、AddLayer (增加图层)、open (打开)、Close (关闭) 等。通过调用这些方法可以让控件执行诸如打开地图文件、显示地图之类的动作。在控件内部, 方法通常对应于函数 (Functions)。

事件 (Events) 是指对象的响应 (Responses)。当对象进行某些动作时 (可以是执行动作之前、动作进行过程中或者是动作完成后), 可能会激发一个事件, 以便客户程序介入并响应这个事件。比如用鼠标在地图窗口内单击 (Mouse Down) 并选择了一个地图要素, 控件产生选中事件 (如 Item Picked) 通知客户程序有地图要素被选中, 并传回描述选中对象的个数、所需图层等信息的参数。

5.2 材料与方法

根据 5.1 节的概述与分析, 本系统的开发采用了 ESRI 的 MapObjects 组件, 通过 Visual Basic 可视化开发语言, 在 Windows XP 平台下实现外来生物风险评估的功能。该系统采用此种方法可以避开某些应用的具体编程, 直接调用控件, 实现具体应用, 从而缩短程序开发周期, 使编程过程更简洁, 用户界面更友好, 程序更加灵活、简便。系统可脱离 GIS 平台独立运行, 具有成本低、易于维护、通用性好等优点。

5.2.1 系统需求分析

外来生物风险评估是与实际工作紧密相连的一项研究, 在相关政府决策和检疫部门都起着重要的作用。风险评估可以说是大量数据的收集和加工处理的过程, 数据的存储和分析离不开计算

机技术的辅助，尤其是数据库技术和 GIS 技术。物种的适生区预测和入侵概率预测需要根据特定模型分析大量的数据（诸如气象数据），然后得到预测结果，如果能利用数据库技术编制程序将大大提高分析计算效率。计算结果的输出形式也在很大程度上影响着分析判断，以图表的形式增加数据的可读性，挖掘数据的真实含义是很有必要的，GIS 技术可以达到这样的目的，但如果能在一个系统中同时拥有模型运算和 GIS 功能，评估者就不需要花很多精力去学习各种软件，便可以高效快速地进行风险评估工作，应用 GIS 的二次开发技术开的应用型地理信息系统可以很好地完成此类任务。因此，开发外来生物风险评估系统对于风险分析和风险管理都有着重要的现实意义。

5.2.2 系统结构设计

系统结构决定系统相应功能，系统由底层数据库、功能模块、用户图形界面三部分组成。底层数据库主要包括空间数据和属性数据等，通过 ADO（ActiveX Data Objects，ADO 是一个用于存取数据源的 COM 组件，它提供了编程语言和统一数据访问方式的一个中间层。允许开发人员编写访问数据的代码而不用关心数据库是如何实现的，而只用关心到数据库的连接。）与底层数据库进行接口；各功能模块采用 Visual Basic+MapObjects 控件编程实现；用户界面利用 Visual Basic 设计（图 5-1）。

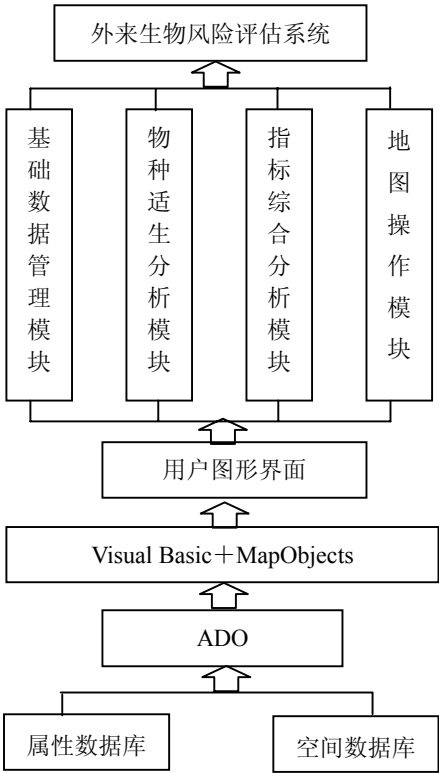


图 5-1 开发外来生物风险评估系统的结构图

Fig. 5-1 The development framework of alien species risk assessment system

系统功能模块主要包括四个部分（图 5-2）：基础数据管理模块、物种适生分析模块、指标综合分析模块和地图操作模块。基础数据管理模块主要是对全球气候数据和物种生物学数据进行

更新等管理，为其他的分析工作做基础数据准备；物种适生分析模块主要又分为两个子模块：气候相似距离法和生物气候相似法，即应用两种不同的原理对物种的适生性范围进行预测（第二章和第三章详述）；指标综合分析模块定量评估了不同因素对外来生物入侵的影响（第四章详述）；地图操作模块的主要功能是将其他模块分析的数字数据图像化，以最佳的图形显示方式给出分析结果。

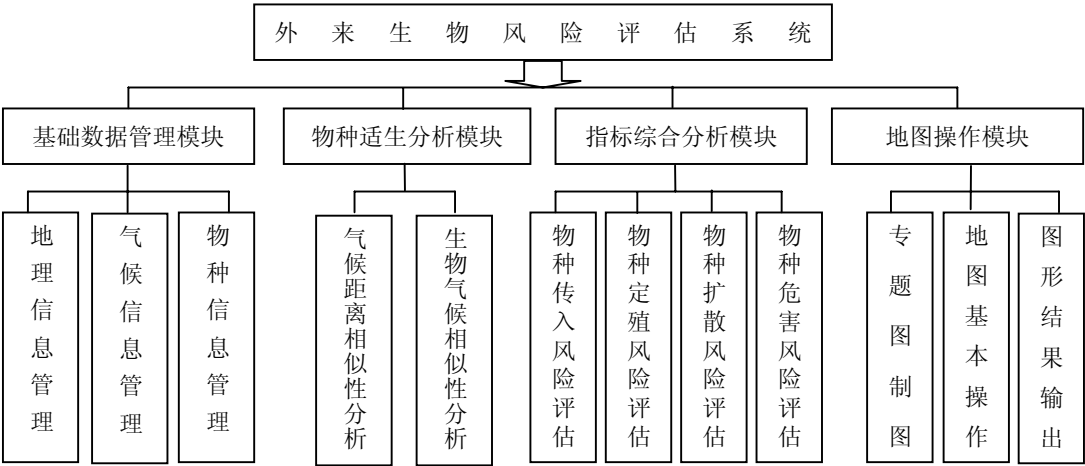


图 5-2 外来生物风险评估系统的功能框架

Fig. 5-2 The functional framework of alien species risk assessment system

5.2.3 系统数据库建立

数据库是建立系统的既基础，数据库设计在 GIS 软件设计中占有重要的位置。本系统采用空间数据和属性数据分开管理的办法，空间数据采用文件方式存储，属性数据采用数据表方式存储。因此，本系统的数据库设计包括空间数据库组织和属性数据库设计。

空间数据库组织主要有点、线、面三类数据，都以美国 ESRI 公司的地图数据文件（SHP 文件）为标准，其 SHAPE 文件可以由 ArcGIS、ArcView 等软件数字矢量化生成。主要的空间点数据为中国站点分布、中国地市级站点分布、全球站点分布，主要的空间线数据为公路、河流、省界、县界；主要空间面数据为土地利用、土壤分布、植被分布。

本文采用微软的 ACCESS 关系数据库实现属性数据的存储，属性数据库主要存储一些与空间位置无关的数据，即通常所说的非几何属性或简称属性，是与地理实体相联系的地理变量或地理意义，包括定性和定量两类型数据。前者如我国指标项目等；后者如气候数据、物种生物学数据等。所有属性数据库表见表 5-1 所示。

表 5-1 外来生物风险评估系统的属性数据表

Table 5-1 The attribute datasheet of alien species risk assessment system

数据表名称	数据表内容	数据表使用目的
Continents	大洲信息	用于数据管理
Countries	国家信息	用于数据管理

States	州/省信息	用于数据管理
Locations	位点地理信息	原数据，主要用于模型运算
Monthly	位点气候信息	原数据，主要用于模型运算
Species	物种生物学信息	原数据，主要用于模型运算
Result_clim	气候相似性法结果	结果数据存储
Result_distr	生物相似性法结果	结果数据存储
Areas	评估地区信息	用于数据管理
ThirdIndex	三级指标项目信息	相关文字信息管理
SecondIndex	二级指标信息	相关文字信息管理
FristIndex	一级指标信息	相关文字信息管理
Indass	三级指标项目定量数据	原数据，主要用于模型运算
Indass_nd	二级指标风险值结果	结果数据存储
Indass_st	一级指标风险值结果	结果数据存储
Indass_all	物种入侵风险值结果	结果数据存储

其中比较重要的原数据表有全世界位点地理信息表（Locations）、全世界位点气候信息表（Monthly）、物种生物学信息表（Species），它们的具体结构见下表。

表 5-2 全世界位点地理信息表结构

Table 5-2 The datasheet structure of global geographical information

字段名称	字段类型	字段长度	索引	字段说明
ContinentID	数字	长整型	是	大洲编号
CountryID	数字	长整型	是	国家编号
StatesID	数字	长整型	是	州/省编号
LocationID	自动编号	长整型	是	站点编号
LocationName	文本	50		站点名称
Latitude	数字	双精度型		经度
Longitude	数字	双精度型		纬度
Elevation	数字	双精度型		海拔

表 5-3 全世界位点气候信息表结构

Table 5-3 The datasheet structure of climate information in the world

字段名称	字段类型	字段长度	索引	字段说明
ContinentID	数字	长整型	是	大洲编号
CountryID	数字	长整型	是	国家编号
StatesID	数字	长整型	是	州/省编号
LocationID	数字	长整型	是	站点编号
Month	数字	长整型		月份编号
MinTemp	数字	双精度型		月平均最低温度
MaxTemp	数字	双精度型		月平均最高温度
Rainfall	数字	双精度型		月平均降水量
RHam	数字	双精度型		月平均相对湿度
Daylength	数字	双精度型		月平均日照时数
Soiltemp	数字	双精度型		月平均 0cm 土壤温度

表 5-4 物种生物学信息表结构

Table 5-4 Datasheet structure of species biological information

字段名称	字段类型	字段长度	索引	字段说明
SpeciesID	自动编号	长整型	是	大洲编号
Species_Name_En	文本	150		国家编号
Species_Name_Cn	文本	150		州/省编号
Species_Name_Ln	文本	150		站点编号
Species_Doc	备注	150		月份编号
DV0	数字	双精度型		发育起点温度
DV1	数字	双精度型		适宜温度上限
DV2	数字	双精度型		适宜温度下限
DV3	数字	双精度型		限制性高温
PDD	数字	双精度型		有效积温
SM0	数字	双精度型		限制性最低土湿
SM1	数字	双精度型		适宜土湿上限
SM2	数字	双精度型		适宜土湿下限
SM3	数字	双精度型		限制性最低土温
RH0	数字	双精度型		限制性最低湿度
RH1	数字	双精度型		适宜湿度上限
RH2	数字	双精度型		适宜湿度下限
RH3	数字	双精度型		限制性最低湿度
DL0	数字	双精度型		发育起点光照
DL1	数字	双精度型		限制性光照
EV0	数字	双精度型		限制性最低海拔
EV1	数字	双精度型		适宜海拔上限
EV2	数字	双精度型		适宜海拔下限
EV3	数字	双精度型		限制性最低海拔

5.2.4 系统数据流程

本节主要介绍了地理数据、气候数据、物种数据和指标分析数据在系统中的流程（图 5-3）。数据通过用户界面（表单）载入模型并运算，输出结果到数据表。系统所有用户界面（即表单）见表 5-5。

表 5-5 外来生物风险评估系统表单

Table 5-5 Forms of alien species risk assessment system

表单名称	表单说明	表单名称	表单说明
MDIForm1	主菜单	Climatch	气候相似性方法
Continents	大洲信息管理	Distribution	生物气候相似性
Countries	国家信息管理	Addareas	评估地点信息管理
States	州/省信息管理	AddthirdIn	三级指标项目信息管理
Locations	位点地理信息管理	Risksum	选择评估项目并计算权重值

dilixinxi	地理信息数据管理	Risk_jisuan	评估各级指标风险值
Wuhouxinxi	站点气候信息管理	W_nd	设置二级指标权重值
SpeciesMgm	物种生物学信息管理	W_st	设置一级指标权重值

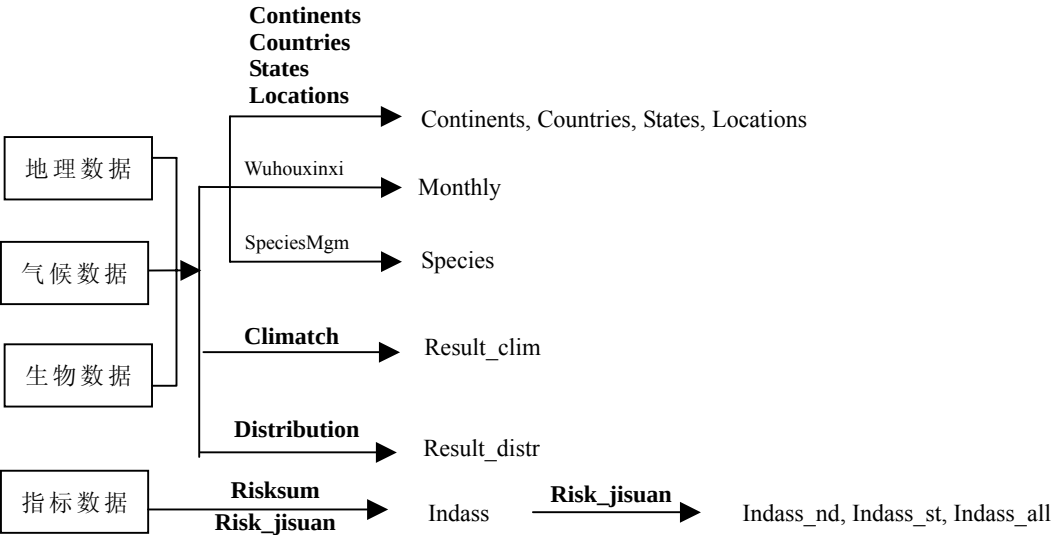


图 5-3 外来生物风险评估系统数据流程（黑体表示表单，白体表示数据表）

Fig. 5-3 Date flow chart of risk assessment system of alien species (bold indicates form, light indicates datatable)

5.3 结果与分析

5.3.1 基础数据管理模块

本模块的主要功能是对地理数据、气候数据和物种生物学数据进行管理，实现添加、删除、修改、查询等基本功能，为其他模块功能的实现提供数据基础。用户可以通过此模块的界面浏览所有的相关数据，并进行常规操作。

5.3.2 物种适生分析模块

本模块分别应用了第二章和第三章的原理，实现气候相似性分析和生物气候相似性分析。

在“气候相似性”用户界面中（图 5-4），首先在“比较点”中选择一个站点，然后选择某个国家或省/州，用其所有站点与比较点进行比较，得到点与点之间的气候相似值。在气候相似性比较时可以考虑以下几个因素：最低温、最高温、降水、相对湿度、土壤温度和光照，本系统可以分别考虑各单因素，也可以综合考虑所有因素，结果将自动保存在数据表中，等待“地图操作模块”调用。需要说明的是，由于本研究没有获得国外的土壤温度和光照数据，所在如果气候相似性比较涉及到国外站点，将只能考虑前四个因子。



图 5-4 气候相似性分析法的用户界面

Fig. 5-4 User interface of climate analogy analysis



图 5-5 生物气候相似分析法的用户界面

Fig. 5-5 User interface of Bio-climate analogy analysis

在“生物气候相似性”用户界面中，选择一个物种和一个国家或一个省/州，这个物种的生物学数据分别和这个地区所有站点一一比较，最终得到每个站点对于该物种的气候适宜性指标。根据用户需要，考虑的因素可以有不同的组合（图 5-5）。结果将自动保存在数据表中，等待“地图操作模块”调用。

5.3.3 指标综合分析模块

本模块应用了第四章的原理，实现物种入侵某地的综合指标分析。首先要对三级指标项目、评估地区和物种信息进行设立，物种信息管理在“基础信息管理模块”已经完成，在此需要完成评估地区和评估项目的添加、删除、修改等管理。系统设置的三级指标项目可能不是用户所需要了，用户可通过图 5-6 界面轻松加入自己希望评估的项目，通过图 5-7 管理评估地区信息。



图 5-6 三级指标项目管理的用户界面

Fig. 5-6 User interface of the 3-level index item management



图 5-7 评估地区信息管理的用户界面

Fig. 5-7 User interface of assessment areas information management



图 5-8 选择评估项目的用户界面

Fig. 5-8 User interface of assessment items choices

在“选择评估项目”用户界面中（图 5-8），首先选择需要评估的物种和地区，选择一级指标和二级指标后，所有三级指标项目会自动出现在相应位置，用户根据需求选择项目（系统规定在

10 条以内), 然后在“三级指标数目”中勾选项目个数, 在“三级指标权重对比表”的相应位置填入重要性分数值, 点击“保存三级指标项目和权重”后, 选定的项目和权重值会自动保存在数据表中, 等待 Risk_jisuan 表调用实现风险值评估功能。

指标风险评估-评估各级风险值

参与评估的三级指标				
	c2	weight	type	value rd thirdindex_name
	0	.333	0	.8 外来物种在源地的分布范
	0	.097	0	.6 在源地采用的该物种管理
	0	.569	0	.5 外来物种在源地的危害程
▶	0	.15	2	.013 人为传入-美国进口
	0	.101	0	.4 外来生物在运输、存储环
	0	.08	2	0 人为传入-贱金属制品
	0	.13	2	.001 人为传入-进口纸木制品

人为传入-美国进口

三级指标评估数据

最大值(Max) 1395200 权重值(W) 指标类型(T)

最小值(Min) 0 .15 2

最适上限(C1) 0 地区值(X) 成本型指标-代码1 效益型指标-代码2 区间型指标-代码3

最适下限(C2) 0 18184

三级指标计算

.013

修改

删除

二级指标评估

二级指标 传入途径(2)

的风险值是: .051

修改权重

计算

一级指标评估

一级指标 传入风险(1)

的风险值是: .169

修改权重

计算

总风险

☐ 传入风险

☐ 定殖风险

☐ 扩散风险

☐ 危害风险

权重 .25

权重 .25

权重 .25

权重 .25

计算

评估结果

入侵 的概率是

确定三级指标项目和权重

退出

图 5-9 风险值评估的用户界面

Fig. 5-9 User interface of risk value calculation

在“风险值评估”用户界面中(图 5-9)的“三级指标评估数据”填入最大值(Max)、最小值(Min)、最适上限(C₁)、最适下限(C₂)、地区值(X)和指标类型(T), 点击“三级指标计算”, 便得到三级指标风险值。在表格中选择含有二级指标或一级指标编号的任意一项, 点击相应“计算”, 得到二级指标风险值、一级指标风险值和入侵风险值。

5.3.4 地图操作模块

地图操作模块(图 5-10)的主要功能是实现 GIS 对图形操作的基本功能; 对上述模块运算出的数值进行图形分析, 形成专题图(专题图是指具有某种相同属性的地理现象的图形集合); 对从外部导入的 Shape 图层文件进行符号化, 挖掘深度信息。

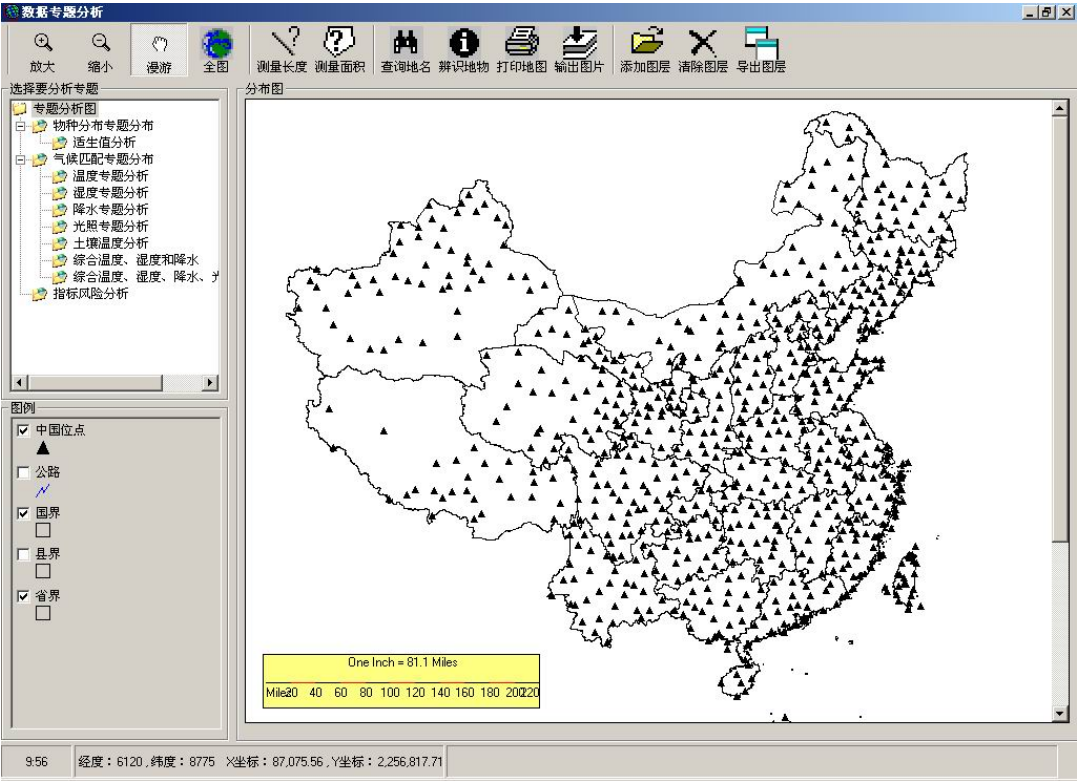


图 5-10 地图操作模块的用户界面

Fig. 5-10 User interface of map operation module

5.3.4.1 基本功能

地图放大：用于放大地图，选中此工具后，按住鼠标左键拉出一个矩形框，即可获得放大后的地图。

地图缩小：用于缩小地图，选中此工具后，按住鼠标左键拉出一个矩形框，即可获得缩小后的地图。

全图显示：在地图页面上进行过多步操作后，通过此功能查看该图的全貌。

地图漫游：如果要查看本地图的其他部分内容，可使用漫游功能，在地图上按住鼠标左键并移动，便可在地图上漫游。

测量长度：用鼠标左键单击地图确定开始点，按住并移动鼠标，移至结束点，放开鼠标，便可显示测量到的距离。

测量面积：用鼠标左键单击地图确定开始点，按住并移动鼠标到第二个点，再移动鼠标后便成为一个一边固定，另两边移动的三角形，当第三个点确定时，再移动鼠标后便成为一个两个边固定，另两边移动的四边形，依次类推，理论上可形成一个有无数边的多边形。放开鼠标，便可显示测量到的面积。

查询地名：输入查询字符串后选择查询图层，在查询结果列表中选择要显示的内容，可以高

亮、居中、缩放至结果范围三种方式显示。

辨识地图：启动该功能后，用鼠标点击一个面、线或者点，该地物高亮显示后，便弹出具体地物信息，包括特征值、属性值、图层名称和图层类型。

打印地图：打印当前地图。

输出图片：把当前显示的地图保存成 jpg 或 BMP 格式的图片，便于编辑。

添加图层：从外部导入 Shape 文件

清除图层：删除一个 Shape 文件形式的图层

导出图层：保存一个 Shape 文件形式的图层

5.3.4.2 专题图

专题图主要应用了 MapObjects 的图表渲染 (ChartRenderer) 功能。对生物气候相似性方法和气候相似性方法的结果分别用柱状图和饼状图两种不同的形式显示。选择“显示专题图方式”后进行关联条件设置，通过下拉框选择正确的地图图层、图层字段、计算数据表、关联字段名称和需要显示的结果字段，点击“下一步”，当对话框显示“建立数据关系成功”时点击“确定”，进入专题图设置。在饼状图中，可以设置饼型的最大值和最小值，系统根据各自站点的数据数值来显示不同的大小的饼型，可以对显示颜色和标注颜色进行调换，同时提供两种标注的方式，一是显示结果数值二是显示位点名称。点击“开始显示”，主窗口的地图会有所变化。在柱状图中，可以对柱子的高度、宽度、显示颜色、标注颜色进行设置，同时也提供是否显示结果数值和位点名称这两种显示标注的方式。图 5-11 和图 5-12 分别显示了系统中专题图的两种显示方式。

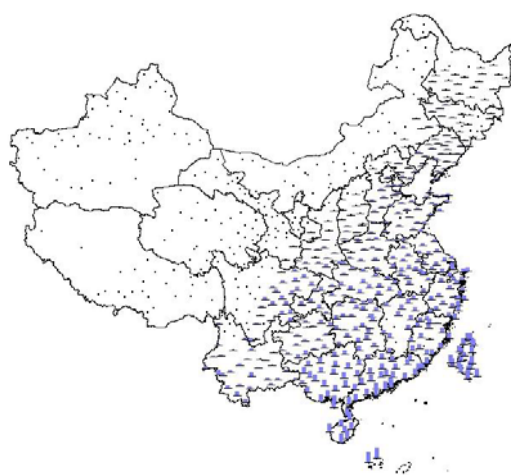


图 5-11 柱状图显示方式

Fig. 5-11 Histogram



图 5-12 饼状图显示方式

Fig. 5-12 Pie chart

5.3.4.3 图层符号化

对从外部导入或系统自带的 Shape 图层进行符号化显示，可以按照类别和特定需求以不同形

式显示。系统内部的图层多是基础图层，例如省界、县界，外部导入图层则可以更有针对性，例如，通过 ArcGIS 将气候相似性数值矢量化生成的 SHAPE 文件，进行地图符号属性操作，直观地表现数据的深层含义。在此，主要应用的 MapObjects 的标注渲染（LabelRenderer）、按值渲染（ValueRenderer）功能。

单一符号化：对于点数据来说，每个点形状大小颜色完全一样，本系统提供圆点、方形、十字、三角等几种形状。对于面数据来说，每个面的填充色完全一样，本系统提供实填充、水平填充、对角线填充、灰度填充、垂直填充等几种填充方式。

唯一符号化：点、线、面按图层的某个字段所有不同取值设置不同符号，每种取值的填充色完全一样。例如每个气候带的站点填充色是一致的，把这些点放在省界的地图上，就可以看出每个省的气候带类型（图 5-13）

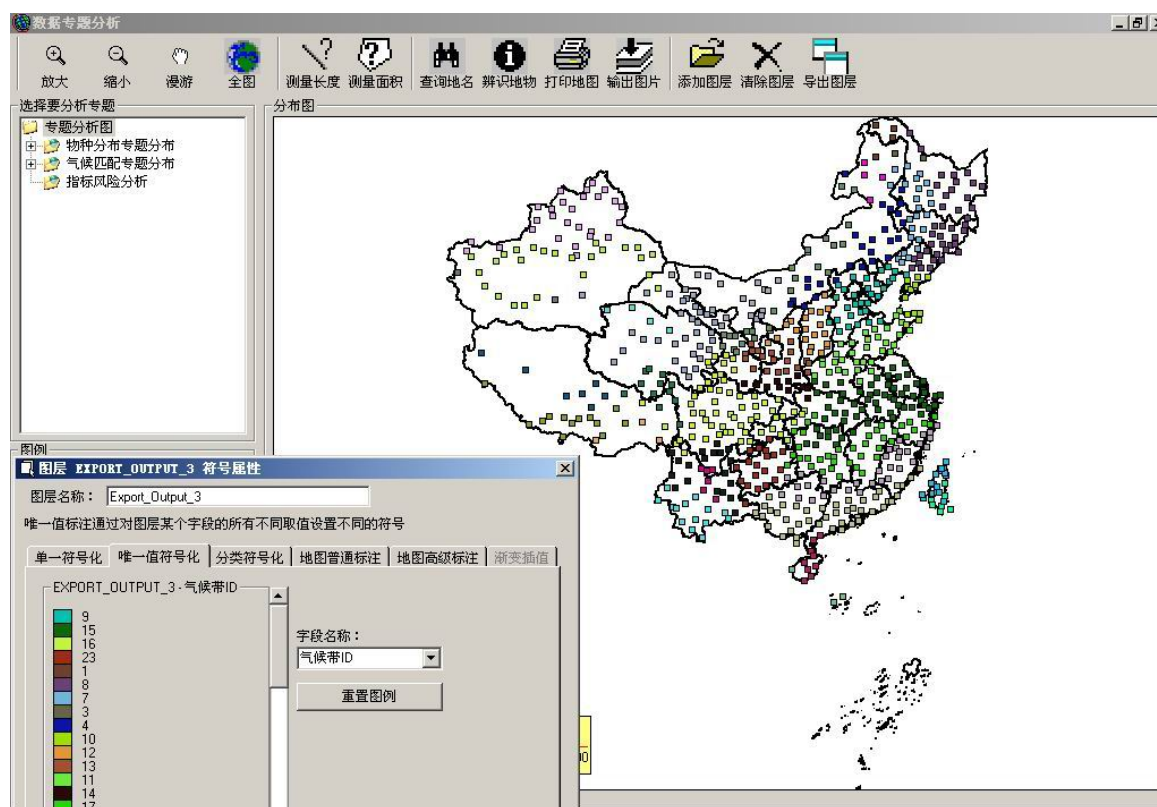


图 5-13 唯一符号化操作界面和显示结果

Fig. 5-13 User interface of exclusive symbol operation and its diaplay result

分类符号化：点、面按数据表的某个字段值平均分成几段，分段数据可由用户设定，选择起始颜色和终止颜色建立颜色值域，点击“重置图例”，得到一组渐变色图例，点击“应用”，主界面地图方可显示。例如图 5-14 生物气候相似性分析中的 EI_A 值。

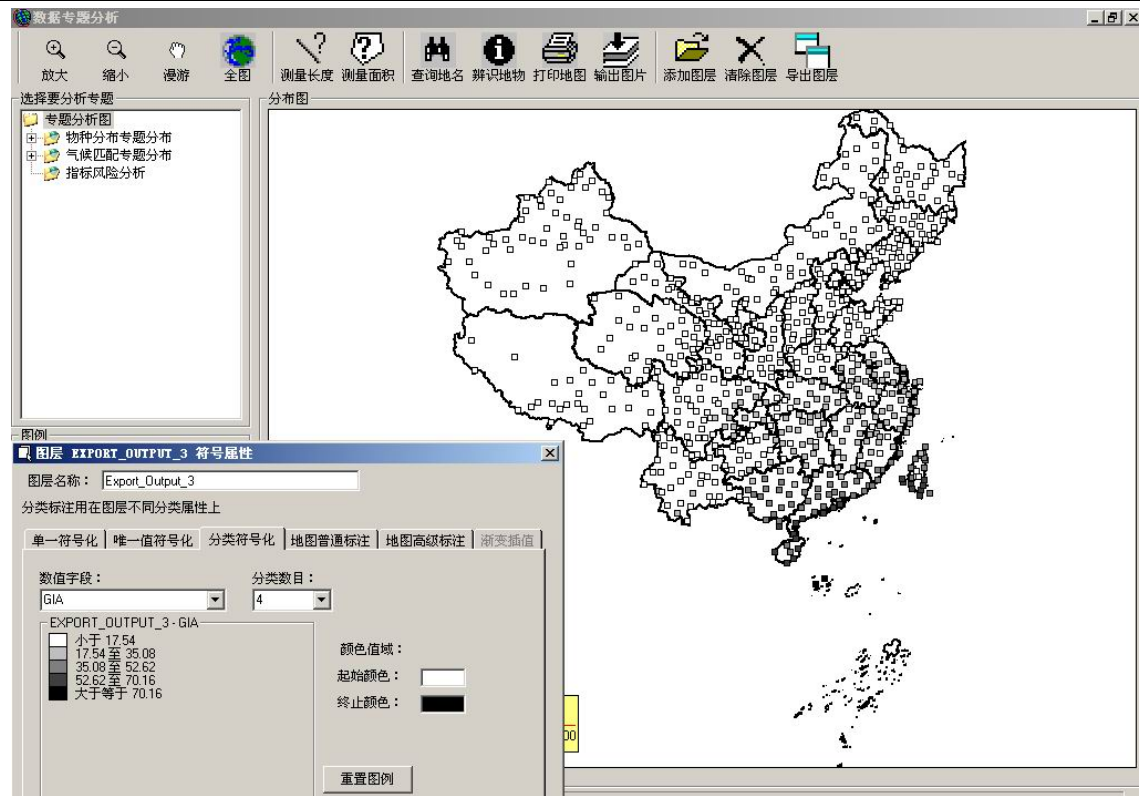


图 5-14 分类符号化操作界面和显示结果

Fig. 5-14 User interface of classified symbol operation and its diaplay result

地图标注：可按不同字段的值对点、线、面数据进行文字标注。可以调节文字大小、摆放位置、颜色等属性，高级标注方法绘制图层时，可以避免标注文字压盖或重复。

5.4 结论与讨论

本章建立外来生物风险评估系统，把上文中的第二章至第四章的原理机器化，避免评估者理解复杂的预测原理和进行大量的数学计算。依据组件式 GIS 原理，应用 MapObjects 组件开发了地图操作模块并加载在系统中，能在得到预测数字结果之后轻松地实现数字图形化，避免评估者再次学习复杂的 GIS 软件。针对外来生物风险评估的应用型地理信息系统在实际工作中将发挥重要的作用。

因为 MapObjects 的局限性，所以系统在实现 GIS 功能上也存在一定局限性。MapObjects 不具备由数字转化成 Shape 文件的功能，当从外部导入数字数据时，不能直接导入数据表，需要通过 ArcGIS 软件先转化成 Shape 文件再导入系统，这就增加了评估者的使用系统时的障碍。此外，通过比较可明显看出，MapObjects 组件开发的空間分析和制图功能效果弱于 ArcGIS，这也正是该组件的一个重要的缺点。MapObjects 组件不支持点值转化成面值的插值功能，在进一步分析物种适生分布时暴露出一定的缺陷，如果站点较少的话，就无法推断无站点地区的适生程度。因此，尽管该系统可以对数值进行图形化，但考虑到为了明确地显示物种的分布区，本文的主要结果需要使用 ArcGIS 软件补充作图。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本研究建立了外来生物风险评估系统，用红火蚁做分析案例，验证了系统的可应用性，预测得到了红火蚁入侵中国的适生情况。

6.1.1 外来生物风险评估系统的建立

应用 Visual Basic 计算机语言和 MapObjects 地理信息系统二次开发组件开发了外来生物风险评估系统，该系统的主要功能是对外来生物进行适生性分析和入侵概率预测。本系统提供三种预测方法：第一，气候相似性分析法：遵循气候相似原理，应用相似离度法预测外来生物在入侵区的适生范围和入侵各地区的概率，找到与物种目前发生地气候最相似的地方；第二，生物气候相似法：用外来物种的生物学参数与待预测区域的相应气候数据相比较，得到反映物种生存适应性的生态气候指数，找到物种最适合生存的地方；第三，多指标综合分析法：建立了外来生物风险评估指标体系，主要对传入风险、定殖风险、扩散风险和危害风险进行量化评估，最终得到物种入侵某地区的风险值，即入侵概率值。三种方法的预测结果不仅以数值的方式表示，为了增加数据可读性，涉及到地理分布的结果都用不同符号显示在地图上。

6.1.2 外来生物风险评估指标体系的建立

外来生物风险评估指标体系共设为三个级别，一级指标分别是传入风险、定殖风险、扩散风险和危害风险，每个一级指标下设立三个二级指标，传入风险考虑源地、途径和目标地因素，定殖风险和扩散风险考虑环境、物种自身和人为因素，危害风险需要考虑行业影响、生态和社会影响。每个二级指标又设立数个三级指标，每个三级指标下可根据不同物种不同地区由评估者制定相关的项目和定量方法。为了保证评估的客观性，系统规定了 34 个必要的三级指标。通过该体系对外来生物的各种风险一一进行评估。

6.1.3 红火蚁在中国的适生范围

物种的适生范围分为四个不同的级别，分别用不同的色系表示，从高风险到低风险的级别是红色警报区、橙色警报区、黄色警戒区和绿色小风险区。通过气候相似性分析法和生物气候相似分析法预测红火蚁在中国的适生范围地图可以看出，广东、广西的大部分地区和福建南部处于红色警报区，根据调查数据显示，这些地区已经有红火蚁发生并危害；广大的华中华中地区，包括湖南、湖北、安徽、福建、浙江、江苏、台湾均处于橙色警报区，当地政府需提高警惕，做好预防工作。在我国的西南地区，红火蚁的适生程度高与低的界限比较明显，川渝地区西部、贵州西部和云南南部明显比其他西南地区更适合红火蚁适生。我国的东北、华北和西北地区多处处于黄色警戒区或绿色小风险区。从气候带分布来说，闽南-珠江区、葡江-闽江-南岭区、雷琼区、台北区、

台南区、江南区、江北区、四川区均处在红色或橙色警报区。这些高风险的地区需要当地政府给予重视，制定相应的防控措施。

6.1.4 红火蚁在中国的入侵概率分析

物种入侵概率分析可以给决策者以数值的概念，对最终决策十分有帮助。同时用三种方法预测红火蚁入侵中国政区、气候区的概率，结果一致表明红火蚁在我国华东和华南政区和气候区的入侵概率较高，事实上，红火蚁目前也已经在我国华南地区的广东、广西、福建局部地区严重发生，一定程度上验证了结果的准确性。通过对三种方法的结果比较表明，在气候较适合红火蚁适生的中国南方地区，考虑更多的非气候因素时，如人为干扰等，会降低红火蚁的入侵概率，对于气候较不适合红火蚁适生的中国北方地区来说，情况则相反，说明非气候因子对物种成功入侵的概率具有一定的影响，在外来生物风险评估时要尽量多考虑气候以外的其他因素。

6.2 本研究的创新之处

本研究围绕外来生物风险评估内容，应用数据库技术和组件式地理信息系统二次开发技术思想开发了具有通用性的“外来生物风险评估系统”，尽管应用型 GIS 系统案例并不罕见，但在外来入侵生物研究领域却为数不多。在系统中，应用相似离度法和改造后的 CLIMEX 模型预测物种的适生区和入侵概率，针对所有外来生物制定了风险评估指标框架，并把评估过程机器化，增加指标评估应用的灵活性的简便性，提高评估者工作效率。目前在红火蚁风险评估研究中，大多以适生范围为主要研究内容，本研究也从这个角度预测了中国政区和气候区的红火蚁适生地，更重要的是预测了划分后地区的入侵概率，给决策者以图形和数值两方面的判断依据。

6.3 展望

在研究过程中发现风险评估指标的定量化方法仍旧需要进一步研究，理想的量化方法需要指标的特定模型和相对充足的数据资料来支持，根据指标不同，模型建立的难易程度也不同，如社会、行业影响因子的模型较气候模型来说就比较难建立，也不容易得到有效的数据。在开发系统方面，尽管 MapObjects 组件已经突显了很多优势，但其缺乏空间分析功能是阻碍其提高应用性的一个障碍，今后的发展方向可以尝试应用更先进的 ArcGIS Engine 做为开发工具，实现更多的 GIS 空间分析和显示功能，并和 WebGIS 结合实现网络化的外来生物风险评估平台的建立，为全球信息共享提供条件。

参考文献

1. Adams C.T., Agriculture and medical impact of the imported fire ant. In: Lofgren C.S. & vander Meer R.K. eds. Fire Ants and Leaf-cutting Ants. Biology and Management. Vestview Press, 1986.
2. Allen C.R., Demaris S., Lutz R.S., Red imported fire ant impact on wildlife: an overview. Texas Journal of Science 1994, 46 : 51 - 59.
3. Allen C.R., Lutz R.S., Demarais S., Red imported fire ant impacts on northern bobwhite populations. Ecological Applications 1995, 5 (3) : 632 - 638.
4. Andersen M.C., Adams H., Hope B., Powell M., Risk assessment for invasive species. Risk Analysis 2004, 24(4) : 787-793.
5. Andersen M.C., Adams H., Hope B., Powell M., Risk assessment for invasive species. Risk Analysis 2004, 24(4) : 787-793.
6. Anderson R.P., Peterson A.T., Marcela G.L., Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. Oikos 2002, 98 : 3-16.
7. Andow D.A., Kareiva P.M., Levin S.A., Spread of invading organisms. Landscape Ecology 1990, 4 : 177-188.
8. Arie K., Parrott L., Examining the colonization process of exotic species varying in competitive abilities using a cellular automaton model. Ecological Modelling 2006, 199(3) : 219-228.
9. Background document for the threat abatement plan. Australian government-Department of the Environment and Heritage (DEH), 2006, 49.
10. Buren W.F., Artificial faunal replacement for imported fire ant control. Florida Entomologist 1983, 66 : 93-100.
11. Canter L.W., Cooperative imported fire ant programs - final programmatic impact statement. USDA APHIS-ADMF, 1981 : 240.
12. Canter L.W., Cooperative imported fire ant programs2final programmatic impact statement. USDA2APHIS2ADMF, 1981, 240.
13. Copp G.H., Garthwaite R., Gozlan R.E., Risk identification and assessment of non-native freshwater fishes: a summary of concepts and perspectives on protocols for the UK. Journal of Applied Ichthyology 2005, 21 : 371-373.
14. Cuddington K., Hastings A., Invasive engineers. Ecological Modelling 2004, 178 : 335-347.
15. Daehler C.C., Denslow J.S., Ansari S., Kuo H-C., A risk-assessment system for screening out invasive pest plants from Hawaii and other Pacific Islands. Conservation Biology 2004, 18(2) : 360-368.
16. Dowell R.V., Gilbert A., Sorensen J., Red imported fire ant found in California. California Plant Pest and Disease Report, 1997, 6(3-4) : 50-55.
17. Drees B.M., Berger L.A., Cavazos R., Factors affecting sorghum and corn seed predation by foraging red imported fire ants (Hymenoptera :Formicidae) .Journal of Economic Entomology 1991, 84 : 285-289.

18. Drees B.M., Red imported fire ant predation on nestlings of colonial waterbirds. *Southwestern Entomologist* 1994, 19 : 355-359.
19. Drees B.M., Williams D.F., Considerations for planning, implementing and evaluating a spot-eradication program for imported fire ants. *Fire Ant Plan Fact Sheet* June, 2002.
20. Elton C.S., *The Ecology of Invasion by Animals and Plants*. Methuen, 1958, 181.
21. Enserink M., Predicting invasions: biological invaders sweep in. *Science* 1999, 285 :1834-1836.
22. EPPO, Guidelines in pest risk analysis-pest risk assessment scheme. *EPPO Bulletin* 1997, 27 : 281-305.
23. EPPO, Guidelines on pest risk analysis. *EPPO Bulletin*, 1997.
24. FAO, International standards for phytosanitary measures: pest risk analysis for quarantine pests including analysis of environmental risks. 2003, 7.
25. FAO/IPPC, Guidelines for pest risk analysis. 1995, ISPM 2.
26. FAO/IPPC, Pest risk analysis for quarantine pests. 2004, ISPM 11.
27. Farber O., Kadmon R., Assessment of alternative approaches for bioclimatic modeling with special emphasis on the Mahalanobis distance. *Ecological Modelling* 2003, 160 : 115-130.
28. Gevrey M., Wornera S., Kasabov N., Pitt J., Giraudel J.L., Estimating risk of events using SOM models: A case study on invasive species establishment. *Ecological Modelling* 2006, 197 : 361-372.
29. Hölldobler B., Wilson E.O., *The Ants*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1990, 732 pp.
30. Hastings A., Cuddington K., Davies K.F., Dugaw C.J., Elmendorf S., Freestone A., Harrison S., Holland M., Lambrinos J., Malvadkar U., Melbourne B.A., Moore K., Taylor C, Thomson D., The spatial spread of invasions: new developments in theory and evidence. *Ecology Letters* 2005, 8 : 91-101.
31. Heuvelink G.B., Burrough P.A., Error propagation in cartographic modelling using Boolean logic and continuous classification. *International Journal of Geographical Information Systems* 1993, 7 : 231-246.
32. Holland J.H., *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, University of Michigan Press. 1975.
33. <http://www.issg.org/database/welcome/>. The Global Invasive Species Database (GISP). 2006.
34. Imported fire ant quarantine. United States Department of Agriculture (USDA)-Animal and Plant Health Inspection Service Plant Protection and Quarantine-Invasive Species and Pest Management. 2006. 2.
35. International Standards for Phytosanitary Measures (ISPM No.11). Pest risk analysis for quarantine pests including analysis of environmental risks and living modified organisms. 2004
36. James S.S., Pereira R.M., Vail K.M., Survival of imported fire ant (Hymenoptera : Formicidae) species subjected to freezing and near-freezing temperatures. *Environmental Entomology* 2002, 31 : 127-133.
37. Jetter K., Hamilton J., Klotz J., The potential economic effects of red imported fire ants in California. post-doctoral fellow at the University of California, Agricultural Issues Center (AIC), University of California. 2002.
38. Jetter K.M., Hamilton J., Klotz J.H., Red imported fire ants threaten agriculture, wildlife and

- homes. California Agriculture 2002, 56(1) : 26-34.
39. Kohonen T., Self Organizing Maps. Berlin: Springer. 1995.
40. Korzukhin M.D., Porter S.D., Thompson L.C., Wiley S., Modeling temperature Dependent range limits for the fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera : Formicidae) in the United States. Environmental Entomology 2001, 30 : 645-655.
41. Korzukhin M.D., Porter S.D., Thompson L.C., Wiley S., Modeling Temperature-Dependent Range Limits for the Fire Ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in the United States. Environmental Entomology 2001, 30(4) : 645-655.
42. Korzukhin M.D., Porter S.D., Thompson L.C., Wiley S., Modeling Temperature-Dependent Range Limits for the Fire Ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in the United States. Environmental Entomology 2001, 30(4) : 645-655.
43. Kot M., Lewis M.A., van den Driessche P., Dispersal data and the spread of invading organisms. Ecology 1996, 77 : 2027-2042.
44. Kot M., Medlock J., Reluga T., Walton D.B., Stochasticity, invasions, and branching random walks. Theoretical population biology 2004, 66 : 175-184.
45. Kot M., Medlock J., Reluga T., Walton D.B., Stochasticity, invasions, and branching random walks. Theoretical Population Biology 2004, 66 :175-184.
46. Krusińska E., A valuation of state of object based on weighted Mahalanobis distance. Pattern Recognition 1987, 20 : 413-418.
47. Li H., Medina F., Vinson S.B., Coates C.J., Isolation, characterization, and molecular identification of bacteria from the red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) midgut. Journal of Invertebrate Pathology 2005, 89 : 203-209.
48. Lofgren C.S., Banks W.A., Glancey B.M., Biology and control of imported fire ants. Annual Review of Entomology 1975, 20 : 12-30.
49. Mack R.N., Predicting the identity and fate of plant invaders: emergent and emerging approaches. Biological Conservation 1996, 78 : 107-121.
50. MacLeod A., Evans H.F., Baker R.H.A., An analysis of pest risk from an Asian longhorn beetle (*Anoplophora glabripennis*) to hardwood trees in the European community. Crop Protection 2002, 21 : 635-645.
51. Markin G.P., O'Neal J., Dillier J.H., Collins H.L., Regional variation in the seasonal activity of the imported fire ant, *Solenopsis saevissima* richteri. Environmental Entomology 1974, 3 : 446-452.
52. McCubbin K.I., Weiner J.M., Fire ants in Australia: a new medical and ecological hazard. Medical Journal of Australia 2002, 176 : 518 -519.
53. Mistroa D.C., Rodriguesa L.A.D., Schmid A.B., A mathematical model for dispersal of an annual plant population with a seed bank. Ecological Modelling 2005, 188 : 52-61.
54. Moloney S., Vanderwoude C., Red imported fire ants: an ecological threat to eastern Australia's threatened wildlife? Ecological Management and Restoration 2002, 3 : 167-175.
55. Moloney S., Vanderwoude C., Red imported fire ants: a threat to eastern Australia's wildlife? Ecological Management and Restoration 2002, 3(3) : 167-175.
56. Morrison L.W., Long term impacts of an arthropod community invasion by the imported fire ant, *Solenopsis invicta*. Ecology 2002, 83 : 2337-2345.
57. Nattrass R., Vanderwoude C., A preliminary investigation of the ecological effects of red

- imported fire ants (*Solenopsis invicta*) in Brisbane. *Ecological Management and Restoration* 2001, 2 : 220-223.
58. Neubert M.G., Parker I.M., Projecting Rates of Spread for Invasive Species. *Risk Analysis* 2004, 24(4) : 817-831.
59. Papes M., Peterson A.T., Predicting the Potential Invasive Distribution for *Eupatorium adenophorum* Spreng. in China. *Journal of Wuhan Botanical Research* 2003, 21(2) : 137-142.
60. Peterson A.T., Ball L.G., Cohoon K.P., Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modelling methods. *Ibis* 2002, 144 : E27 - E32.
61. Peterson A.T., Vieglais D.A., Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem. *Bioscience* 2001, 51(5): 363-371.
62. Pheloung P.C., Williams P.A., Halloy S.R., A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions. *Journal Environmental Management* 1999, 57 : 239-251.
63. Pimentel D., Zuniga R., Morrison D., Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics* 2005, 52 : 273-288.
64. Porter S.D., Eimeren B.V., Gillert L.E., Invasion of red imported fire ants : microgeography of competitive replacement. *Entomological Society of America* 1988, 81 : 913-918.
65. Porter S.D., Savignano D.A., Invasion of polygyne fire ants decimates native ants and disrupts arthropod community. *Ecology* 1990, 71 : 2095-2106.
66. Porter S.D., Tschinkel W.R., Foraging in *Solenopsis invicta* : effects of weather and season. *Environmental Entomology* 1987, 16 : 802-808.
67. Porter S.D., Van Eimeren B., Gillbert L.E., Invasion of red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). *Australian Journal of Zoology* 1996, 14 : 73-17.
68. Porter S.D., Williams D.F., Patterson R.S., Intercontinental differences in the abundance of *Solenopsis* fire ants (Hymenoptera: Formicidae) : an escape from natural enemies. *Environmental Entomology* 1997, 26 : 373-384.
69. Power J.M., D'Eon S.P., Quantifying pest-caused forest depletion using geographic information systems and database technologies. Information Report Petawawa National Forestry Institute, Forestry Canada, 1991, (PI-X-105) : iv + 17.
70. Pranschke A.M., Hooper-Bùi L.M., Influence of abiotic factors on red imported fire ant (Hymenoptera : Formicidae) mound population ratings in Louisiana. *Environmental Entomology* 2003, 32 (1) : 204-207.
71. Pysek P., Hulme P.E., Spatio-temporal dynamics of plant invasions: Linking pattern to process. *Ecoscience* 2005, 12(3) : 302-315.
72. Robertson M.P., Villet M.H., Palmer A.R., A fuzzy classification technique for predicting species' distributions: applications using invasive alien plants and indigenous insects. *Diversity Distribution* 2004, 10 : 461-474.
73. Ross K.G., Vargo E.L., Keller L., Social evolution in a new environment : the case of introduced fire ants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1996, 93 : 3021-3025.
74. Rouget M., Richardson D.M., Nel J.L., Maitre D.C.L., Egoh B., Mgidi T., Mapping the potential ranges of major plant invaders in South Africa, Lesotho and Swaziland using climatic suitability.

- Diversity Distribution 2004, 10 : 475-484.
75. Salisbury J.G., Nicholls T.J., Lammerding A.M., Turnidge J., Nunn M.J., A risk analysis framework for the long-term management of antibiotic resistance in food-producing animals. International Journal of Antimicrobial Agents 2002, 20 : 153-164.
 76. Scott J.K., Panetta F.D., Predicting the Australian weed status of southern African plants. Journal of Biogeography 1993, 20 : 87-93.
 77. Scott J.K., Yeoh P.B., Bionomics and the predicted distribution of the aphid *Brach caudus rumexicolens* (Hemiptera: Aphididae). Bulletin of Entomological Research 1999, 89 : 97-106.
 78. Sindel B.M., Michael P.W., Spread and potential distribution of *Senecio madagascariensis* Poir. (fireweed) in Australia. Australian Journal of Ecology 1992, 17 : 21-26.
 79. Smallwood K.S., A rating system for potential exotic bird and mammal pests. Biological Conservation 1992, 62: 149-159.
 80. Stohlgren T.J., Schnase J.L., Risk analysis for biological hazards: what we need to know about invasive species. Risk Analysis 2006, 26(1): 1-11.
 81. Sutherst R.W., Maywald G., A climate model of the red imported fire ant , *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): implications for invasion of new regions, particularly Oceania. Environmental Entomology 2005, 34(2): 317-335.
 82. Sutherst R.W., Maywald G.F., A computerized system for matching climates in ecology. Agriculture Ecosystems and Environment 1985, 13: 281-289.
 83. Sutherst R.W., Maywald G.F., Kriticos D., CLIMEX version 3 user's guide. CSIRO, 2007.
 84. Sutherst RW, 2003. Prediction of species geographical ranges. Journal of Biogeography 30 : 805-816.
 85. Taber S.W., Fire ants. College Station: Texas A & M University , 2000.
 86. Thomas C.S., Gubler W.D., A privatized crop warning system in the USA. Bulletin OEPP, 2000, 30(1) : 45-48.
 87. Thompson L.C., Jones D.B., Semevski F.N., Semenov S.M., Fire ant economic impact: extending Arkansas survey results over the South In S. B. Vinson and B. M. Dress (comp). Proceedings, 5th International Pest Ant Symposia and the 1995 Annual Imported Fire Ant Conference, 2-4 May, San Antonio, TX. 1995, 155-156.
 88. Tschinkel W.R., Fire ant queen longevity and age: estimation by sperm depletion. Annals of the Entomological Society of America 1987, 8: 263-266.
 89. Tsutsui N.D., Suarez A.V., The colony structure and population biology of invasive ants. Conservation Biology 2003, 17 (1) : 48-58.
 90. Underwood E.C., Klinger R., Moore P.E., Predicting patterns of non-native plant invasions in Yosemite National Park, California, USA. Diversity Distribution 2004, 10: 447-459.
 91. Vinson S.B., Effect of the imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) on a mall plant decomposing arthropod community . Environmental Entomology 1991, 20: 8-10.
 92. Vision S.B., Invasion of the red imported fire ant: spread, biology, and impact. American Entomologist 1997, 43 (1): 23-39.
 93. Waage J. K., A global strategy to defeat invasion species. Science 2001, 292 : 5521.
 94. Walker C., Parnell T., HABITAT: a procedure for modelling a disjoint environmental envelope for a plant or animal species. Global Ecology and Biogeography Letters 1991, 1: 108-118.

95. Wang J., Kropff M.J, Lammert B., Christensen S., Hansen P.K., Using CA model to obtain insight into mechanism of plant population spread in a controllable system: annual weeds as an example. *Ecological Modelling* 2003, 166: 277-286.
96. Wang R., Wang Y.Z., Invasion dynamics and potential spread of the invasive alien plant species *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in China. *Diversity Distribution* 2006, 12: 397-408.
97. Weber E., Gut D., Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe. *Journal for Nature Conservation* 2004, 12: 171-179.
98. Wei S.Q., Liu G.L., An approach to research methods in bioclimatic analogy. *Journal of Agricultural Meteorology* 1993, 48(5): 241-255.
99. Wiens J.A., Schooley R.L., Weeks R.D., Patchy landscape and animal movements: do beetles percolate? . *Oikos* 1997, 78: 257-264.
100. Wiley E.O., McNyset K.M., Peterson A.T., Robins C.R., Stewart A.M., Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine learning algorithm. *Oceanography* 2003, 16: 120-127.
101. Williamson M., Fitter A., The varying success of invaders. *Ecology* 1996. 77: 1661-1665.
102. Willis K.J., Whittaker R.J., Species diversity-scale matters. *Science* 2002, 295: 1245-1248.
103. With K.A., Assessing the Risk of Invasive Spread in Fragmented Landscapes. *Risk Analysis* 2004, 24(4): 803-815.
104. Wojcik D.P., Allen C.R., Brenner R.J., Forsy E.A., Jouvenaz D.P., Lutz R.S., Red imported fire ant: impact on biodiversity. *American Entomologist* 2001, 47(1): 16-23.
105. Wojcik D.P., Porter S.D., Comprehensive literature database for the imported fire ants, *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. . In W. P. Wojcik and S. D. Porter [eds.], FORMIS: a master bibliography of ant literature. USDA-ARS, CMAVE, Gainesville, FL (<http://cmave.usda.usg.edu/formis/>). 2000.
106. Wolfram S., Cellular automata as models of complexity. *Nature* 1984, 311(4) : 419.
107. Worner S.P., Ecoclimatic assessment of potential establishment of exotic pests. *Journal of Economic Entomology* 1988, 81(4): 973-983.
108. Worner S.P., Gevrey M., Modelling global insect pest species assemblages to determine risk of invasion. *Journal of Applied Ecology* 2006, 43: 858-867.
109. ESRI 中国（北京）有限公司, ESRI 公司 ArcGIS 系列产品介绍. 2005.
110. Jorgensen S E, 陆健健, 周玉丽（译）, 张利权（校）, 生态模型法原理. 上海: 上海翻译出版公司. 1988, 394.
111. 艾丽容, 遗传算法综述. *计算机应用研究* 1997, 4: 3-6.
112. 安徽省统计局, 安徽统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
113. 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队, 北京统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
114. 陈晨, 龚伟荣, 胡白石, 周国梁, 包云轩, 刘凤权, 基于地理信息系统的红火蚁在中国适生区的预测. *应用生态学报* 2006, 17(11): 2093-2097.
115. 陈洪俊, 三叶斑潜蝇和西花蓟马在中国的风险评估及管理对策研究. [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2005.
116. 陈杰, 基于 Mapobjects 的禽流感检测信息系统的设计与开发. *福建林业科技* 2006, 33(3): 107-111, 197.

117. 陈克, 范晓虹, 李尉民, 有害生物的定性与定量风险分析. 植物检疫 2002, 16(5): 257-261.
118. 陈克, 姚文国, 章正, 肖悦岩, 严进, 徐岩, 白章红, 陈小帆, 包黎明, 小麦矮腥黑穗病在中国定殖风险分析及区划研究. 植物病理学报 2002, 32(4): 312-318.
119. 陈雷, 把多辉, 薛生梁, 韩永翔, 作物生态气候滑移相似离度分析及其应用. 干旱地区农业研究 2005, 23(3): 118-121, 140.
120. 陈岩, 陈乃中, 朱水芳, 陈洪俊, 红火蚁实时荧光分子检测方法. 植物检疫 2005, 19(4): 204-206.
121. 陈永宁, 赵和苍, 曹恒, 层次分析法在农业可持续发展生态环境安全评价中的应用. 安徽地质 2004, 14(1): 47-51.
122. 陈禹, 基于 MapObjects 控件的地理信息系统设计与开发. 计算机工程 2001, 27(4): 41-43, 150-152.
123. 程俊峰, 万方浩, 郭建英, 西花蓟马在中国适生区的基于 CLIMEX 的 GIS 预测. 中国农业科学 2006, 39(3): 525-529.
124. 程勋, 杨毅恒, 陈薇伶, 自组织特征映射网络的分析与应用. 长春师范学院学报(自然科学版) 2005, 24(4): 55-59.
125. 重庆市统计局, 重庆统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
126. 董慧, 杨定, 红火蚁入侵的种群生物学与行为遗传学. 植物保护 2005, 31(4): 18-23.
127. 董旭, 魏振军, 一种加权欧氏距离聚类方法. 信息工程大学学报 2005, 6(1): 23-25.
128. 福建省统计局, 国家统计局福建调查总队, 福建统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
129. 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰磷, 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社. 2001, 228-229.
130. 高亮之, 金之庆, 黄耀, 水稻栽培计算机模拟优化决策系统. 北京: 中国农业科技出版社. 1992: 30-32.
131. 高亮之, 农业模型学基础. 香港: 天马图书有限公司, 2004.
132. 甘肃年鉴编委会, 甘肃年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
133. 广东省统计局, 广东统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
134. 广西壮族自治区统计局, 广西统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
135. 贵州省统计局, 国家统计局贵州调查总队, 贵州统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
136. 国家统计局国民经济综合统计司, 中国区域经济统计年鉴—2005. 北京: 中国统计出版社. 2006
137. 海南省统计局, 海南统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
138. 河北省人民政府办公厅, 河北省统计局, 河北省社会科学院, 河北经济年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
139. 河南省统计局, 河南统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
140. 何小娟, 相似离度在钦州市月降水量预报中的应用. 广西气象 2002, 23(2): 16-18.
141. 黑龙江省统计局, 黑龙江调查总队, 黑龙江统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
142. 湖北省统计局, 国家统计局湖北调查总队, 湖北统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
143. 湖南省统计局, 湖南统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
144. 黄建业, 王卫安, 软件组件技术及其在 GIS 中的应用. 地矿测绘 2001, 17(3): 39-42.

145. 黄杏元, 马劲松, 汤勤, 地理信息系统概论. 北京: 高等教育出版社. 2001.
146. 吉林省统计局, 吉林统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
147. 贾文明, 周益林, 丁胜利, 段霞瑜, 外来有害生物风险分析的方法和技术. 西北农林科技大学学报(自然科学版) 2005, 33(增): 195-200.
148. 江苏省统计局, 江苏统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
149. 江西省统计局, 国家统计局江西调查总队, 江西统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
150. 江世宏, 刘栋, 李广京, 入侵红火蚁 (*Solenopsis invicta* Buren) 的发生、危害与防范. 深圳职业技术学院学报 2005, 2: 33-36.
151. 金舒, 基于遗传算法的应用开发. 自动化技术与应用 2002, 2: 37-39.
152. 晋琳琳, 侯光明, 李鸿雁, 自组织特征映射网在人力资源开发中的应用. 科学学研究 2005, 23(增): 230-235.
153. 康绍军, 余卫东, 基于相似离度的相似预报系统. 河南气象 2002, 3: 23-24.
154. 李德山, 李建光, 红火蚁生物学特性及其防治. 植物检疫 2005, 19(2): 93-95.
155. 李红梅, 韩红香, 薛大勇, 利用 GARP 生态位模型预测日本松干蚧在中国的地理分布. 昆虫学报, 2005b, 48(1): 95-100.
156. 李红梅, 李静, 薛大勇, 外来物种适生区的研究方法. 见: 李典谟, 武春生, 伍一军, 孟晓星编著, 全国生物多样性保护与外来物种入侵学术研讨会论文集. 2006, 97-102.
157. 李红梅, 孙江华, 韩红香, 肖晖, 薛大勇, 椰心叶甲在我国潜在分布区的预测分析. 中国森林病虫 2005a, 24(6): 5-8.
158. 李开乐, 相似离度及其使用技术. 气象学报 1986, 44(2): 174-183.
159. 李尉民, 有害生物风险分析. 北京: 中国农业出版社, 2003.
160. 李一平, 康玲, 宋丽英, 相似离度方法在沙尘暴预报中的应用. 内蒙古气象 2004, 25-8.
161. 李一平, 康玲, 相似离度的沙尘暴预报业务系统. 干旱区资源与环境 2004, 18(1): 93-96.
162. 李振宇, 解焱, 中国外来入侵种. 北京: 中国林业出版社, 2002.
163. 李志红, 杨汉春, 沈佐锐, 动植物检疫概论. 北京: 中国农业大学出版社. 2004, 94, 97.
164. 廖木星, 高玉德, 宋国盛, 秦臻, 赵怀森, 相似离度在船用防避台风决策系统中的应用. 大连海事大学学报 1999, 25(2): 11-16.
165. 辽宁省统计局, 辽宁统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
166. 林立丰, 段金花, 卢文成, 易建荣, 张贤昌, 蔡松武, 广东省吴川红火蚁的形态特征及其鉴别. 中国媒介生物学及控制杂志 2005, 16(3): 174-177.
167. 林伟, 苹果蠹蛾在中国危险性评估的初步研究. [博士学位论文]. 北京: 北京农业大学. 1994, 78-79.
168. 刘丹, 郑坤, 彭黎辉, 组件技术在 GIS 系统中的应用与研究. 地球科学-中国地质大学学报 2002, 3(27): 263-266.
169. 刘光媛, 聂庆华, 赵明, 基于 ArcIMS 开发 WebGIS 的农业环境信息系统研究. 地理空间信息 2007, 5(1): 40-43.
170. 刘桂莲, 农业气候相似距的可靠性和可行性研究. 见: 魏淑秋, 刘桂莲编著. 中国与世界生物气候相似研究. 北京: 海洋出版社, 1994, 19-31.
171. 刘茂松, 张明娟, 景观生态学——原理与方法. 北京: 化学工业出版社. 2004, 186.
172. 刘南, 刘仁义, 地理信息系统. 北京: 高等教育出版社. 2002.
173. 刘南威, 自然地理学. 北京: 科学出版社, 2005: 215, 217.

174. 刘晓燕, 吕利华, 冯夏, 陈焕瑜, 周小毛, 张德雍, 黄华, 何余容, 红火蚁生物防治研究进展. 广东农业科学, 2005, 5: 18-23.
175. 刘迎湖, 谢利, 骆世明, 陈实, 曾任森, 入侵杂草化感作用的细胞自动机模拟研究. 应用生态学报 2006, 17(2): 229-232.
176. 陆汝砖, 金芝, 陈刚, 面向本体的需求分析. 软件学报 2000, 11(8): 1009-1017.
177. 吕晓阳, 孔令江, 刘幕仁, 细胞自动机的演化与计算理论. 华南师范大学学报(自然科学版) 1996, 2: 43-49.
178. 马骏, 万方浩, 郭建英, 游兰韶, 豚草卷蛾在我国的生物气候相似性分析. 中国农业科学 2003, 36(10): 1156-1162.
179. 内蒙古自治区统计局, 陕西统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
180. 宁夏回族自治区统计局, 宁夏统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
181. 青海省统计局, 青海统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
182. 齐红, 基于 VC 和 MapObjects 的森林资源管理系统的开发应用研究.[硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
183. 容剑东, 吴川市红火蚁伤人事件流行病学调查分析. 医学动物防制 2005, 21(4): 265-266.
184. 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队, 山东统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
185. 山西省统计局, 山西统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
186. 陕西省统计局, 陕西统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
187. 上海市统计局, 上海统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
188. 沈文君, 分布式外来有害生物风险分析 WebGIS 研制. [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学. 2004.
189. 沈佐锐, 温室生态系统健康研究进展. 中国生态学会通讯 2000, (特刊): 39-41.
190. 四川省统计局, 四川调查总队, 四川统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
191. 司马云瑞, 梁意文, 帅晶晶, 蔡萍, 基于马氏距离的方体模型及其在病毒预警中的应用. 计算机应用研究 2005, 8: 198-200.
192. 宋关福, 钟耳顺, 组件式地理信息系统研究与开发. 中国图像图形学报 1998, 3(4): 313-317.
193. 孙安健, 世界气候. 北京: 气象出版社, 1986: 8.
194. 天津市统计局, 天津统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
195. 涂晓芝, 颜学峰, 钱锋, 自组织映射网络及其在化工领域中的应用. 计算机应用化学 2005, 22(9): 737-744.
196. 田家怡, 山东外来入侵有害生物与综合防治技术. 北京: 科学出版社. 2004, 50-52.
197. 万方浩, 物种引进——生态学理论对生物防治实践的启示. 见:《青年生态学者论从(一)》. 北京: 中国科学技术出版社, 1991, 278-283.
198. 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
199. 万方浩, 叶正楚, Harris P., 生物防治作用物风险评价的方法. 中国生物防治 1997, 13(1): 37-41.
200. 万方浩, 郑小波, 郭建英, 重大农林外来入侵物种的生物学与控制. 北京: 科学出版社. 2005, 44.

201. 王炳庭, 世界区域气候. 北京: 中国农业出版社, 1992, 5.
202. 王福祥, 林芙蓉, 朱景全, 红火蚁的检疫与控制. 植物检疫 2005, 19(3): 150-153.
203. 王卷乐, 陈沈斌, 廖顺宝, 基于组件 GIS 的精准水稻种植信息系统的开发. 地球信息科学 2004, 6(2): 27-30.
204. 王瑞, 我国严重威胁性外来入侵植物入侵与扩散历史过程重建及其潜在分布区的预测. [博士学位论文]. 北京: 中国科学院植物研究所. 2006, 21, 45-84.
205. 王守聪, 吴晓玲, 林芙蓉, 张润志, 曾玲, 陈忠南, 刘年喜, 澳大利亚和新西兰红火蚁防控的主要做法和经验. 世界农业 2006, 2: 46-48.
206. 王献溥, 生物入侵的生态威胁及其防除措施. 植物杂志 1999, 4: 4-5.
207. 王育红, 张健雄, 陶盅刚, 基于 MapObjects 的 GIS 应用系统开发. 焦作工学院学报(自然科学版) 2002, 21(3): 194-198.
208. 魏淑秋, 关于“气候、农业气候及生物气候相似”的作用与效益研究. 见: 魏淑秋, 刘桂莲编著. 中国与世界生物气候相似研究. 北京: 海洋出版社, 1994, 7-12.
209. 魏淑秋, 刘桂莲, 中国与世界生物气候相似研究. 北京: 海洋出版社. 1994, 17.
210. 魏淑秋, 气候相似论的发展. 见: 魏淑秋, 刘桂莲编著. 中国与世界生物气候相似研究. 北京: 海洋出版社, 1994, 1-5.
211. 魏淑秋, 生物气候相似研究方法. 见: 魏淑秋, 刘桂莲编著. 中国与世界生物气候相似研究. 北京: 海洋出版社, 1994: 13-18.
212. 魏淑秋, 章正, 郑耀水, 应用物气候相似距对小麦矮化腥黑穗病在我国定殖可能性的研究. 北京农业大学学报, 1995, 21(2): 127-131.
213. 邬建国, 景观生态学——概念与理论. 生态学杂志 2000, 19(1): 42-52.
214. 邱群勇, 王钦敏, 肖桂荣, 基于组件技术的地理信息系统应用研究. 计算机应用 2001, 21(7): 71-72.
215. 吴建生, 自组织特征映射神经网络及其应用. 柳州师专学报 2005, 20(3): 105-108.
216. 西藏自治区统计局, 西藏统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
217. 新疆维吾尔自治区统计局, 新疆统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
218. 向言词, 彭少麟, 任海, 周厚诚, 植物外来种的生态风险评估和管理. 生态学杂志 2002, 21(5): 40-48
219. 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 常禹, 李团胜, 景观生态学. 北京: 科学出版社. 2003, 98.
220. 徐海根, 王健民, 强胜, 王长永, 外来物种入侵·生物安全·遗传资源. 北京: 科学出版社, 2004.
221. 徐健华, 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社. 2004, 305.
222. 徐汝梅, 成新跃, 昆虫种群生态学——基础与前沿. 北京: 科学出版社. 2005, 140.
223. 徐汝梅, 生物入侵——数据集成、数量分析与预警. 北京: 科学出版社. 2003, 129-144.
224. 许益鹄, 陆永跃, 曾玲, 席银宝, 黄俊, 红火蚁局域扩散规律研究. 华南农业大学学报 2006, 27(1): 34-36.
225. 薛大勇, 李红梅, 韩红香, 张润志, 红火蚁在中国的分布区预测. 昆虫知识 2005, 42(1): 57-60
226. 严武军, 遗传算法应用现况概述. 太原师范专科学校学报, 2002, 1: 4, 16.
227. 杨国祥, 史学正, 于东升, 王洪杰, 孙维侠, 赵永存, 金洋, 基于 WebGIS 的中国土壤参比查询系统研究. 土壤学报 2007, 44(1): 1-6.
228. 杨家武, 仝志辉, 董现华, 利用 MapObjects 开发 GIS 的主要技术浅析. 现代电子技术 2007,

- 245: 47-49.
229. 杨涛, 骆嘉伟, 王艳, 吴君浩, 基于马氏距离的缺失值填充算法. 计算机应用 2005, 25(12): 2868-2871.
230. 杨旭, 黄家柱, 许建军, 闫国年, 基于组件式 GIS 的地下水动态管理系统设计与开发. 地理与地理信息科学 2004, 20(1): 47-50.
231. 云南省统计局, 云南统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
232. 曾玲, 陆永跃, 陈忠南, 红火蚁监测与防治. 广东: 广东科技出版社. 2005.
233. 曾玲, 陆永跃, 何晓芳, 张维球, 梁广文, 入侵中国大陆的红火蚁的鉴定及发生为害调查. 昆虫知识 2005, 42(2): 144-148.
234. 张传武, 细胞自动机及其理论研究进展. 贵州大学学报 (自然科学版) 2004, 21(3): 289-292, 306.
235. 张丰启, 崔晶, 王仁胜, 相似离度在入型判别和定时、定点、定量预报中的应用. 气象 2002, 28(9): 44-48.
236. 张宏群, 史悦, 安裕伦, ComGIS 技术的资源环境信息系统研究与开发. 贵州师范大学学报 (自然科学版) 2004, 22(1): 72-84.
237. 张金亭, 詹长根, 刘陶琨, 基于组件技术的地籍信息系统开发研究. 华中农业大学学报 (社会科学版) 2001, 39(1): 67-71.
238. 张润志, 任立, 刘宁, 严防危险性害虫红火蚁入侵. 昆虫知识 2005, 42(1): 6-10.
239. 张润志, 张大勇, 叶万辉, 桑卫国, 薛大勇, 李尉民, 农业外来生物入侵种研究现状与发展趋势. 植物保护 2004, 30(3): 5-9.
240. 张轶辉, 基于 MapObjects 下的 GIS 二次开发. [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2005.
241. 赵敏, 中国生态水工思想考察——以都江堰为例. 长沙铁道学院学报 (社会科学版) . 2005, 1: 6-10.
242. 赵强, 赵建涛, 基于 ArcIMS 的配电网 WebGIS 技术概述. 华北电力大学学报 2006, 33(2): 94-96.
243. 赵友福, 林伟, 应用地理信息系统对梨火疫病可能分布区的初步研究. 植物检疫 1995, 9(6): 321-326.
244. 浙江省统计局, 浙江统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
245. 甄文祥, 王文田, 遗传算法及其应用. 计算机应用研究 1994, 9: 9-10.
246. 郑剑宁, 范东晖, 施惠祥, 卢岳云, 裘炯良, 红火蚁的研究与控制. 中华卫生杀虫药械 2005, 11(3): 186-189.
247. 中华人民共和国农业部公告. 第 453 号. 2005-01-17.
248. 中华人民共和国国家统计局, 中国统计年鉴—2006. 北京: 中国统计出版社. 2006
249. 周祥, 陈泽坦, 红火蚁及其入侵海南的风险与防控对策. 热带农业科学 2005, 25(4): 44-47.

致 谢

2004年我有幸成为了一名中国农业科学院植物保护研究所硕士研究生,在万方浩研究员领导的生物入侵研究室及农业部外来入侵生物预防与控制研究中心(CMIAS)开始了为期三年的研究生生活。回首在研究生院和实验室学习和研究的日日夜夜,点滴在心,在论文顺利付梓之际,我谨以此文对关心过我、帮助过我的人表达我至深的谢意。

首先向我的导师万方浩研究员表以最诚挚的敬意,感谢万老师给了我在CMIAS学习的机会,让我深刻体会到CMIAS这个大家庭的和谐气氛和团结互助的传统作风,能在这样优秀的集体中成长是我人生中挥之不去的重要经历。在课题研究过程中,从论文的选题、课题设计、数据分析直到论文的撰写完成无不倾注了万老师的智慧和心血,正是在他的辛劳之下,才有了本文的产生。万老师广博深厚的学术造诣、孜孜不倦的敬业精神、为人师表的高尚风范、宽广坦荡的胸怀、谦逊真诚的处事方式,让我受益匪浅,我学到的不仅仅是知识,更是做人做事的道理,这将鞭策我在今后的科研工作与生活中不断进步。同时也特别感谢师母杨晓玲老师在生活中给予了慈母般的关怀,在日后的工作和学习中必将加倍努力,以不负导师和师母的教导和期望。

衷心感谢沈文君助理研究员在论文的研究思路和写作方面给予的指教以及生活上给予的帮助。同时要感谢本研究室谢明副研究员、刘万学副研究员、郭建英副研究员、张桂芬副研究员、王瑞助理研究员和邱卫亮老师三年来在生活 and 论文试验等方面的帮助,致以深厚的谢意。感谢为本研究提供地理信息系统软件和CLIMEX软件的中国农业科学院蔬菜所的谢丙炎研究员,感谢中国农业大学李志红教授对外来生物风险分析及检疫方面知识的传授和指导。感谢为本文提出宝贵意见的中国农业大学沈佐锐教授和中国科学院动物所戈峰研究员。

感谢湖南农业大学王运生博士生和中国农业科学院陈林博士生在风险评估理论方法方面提供的思路,感谢同研究室的学兄桂富荣、杨国庆、黄文坤、蒋智林和学姐张炬红、崔旭红、吕志创、扈新萍三年来给予我在多方面的关心和照顾。此外本研究室的众多同学:牛红榜、应飞、宫伟娜、顾渝娟、李丽、李新、兰亚红、郭义、许三军、李东超、钟良平、严盈、严琦、张毅波、周志湘;本科实习生:金亚南、张晓燕、高白鹿、王芹,在和他们的日常交流和讨论中让我受益很多,在此对他们的帮助表示感谢。要感谢的人还有很多,老师、同学和朋友,谢谢你们的鼓励,不能一一提及还望见谅。

最后,特别感谢我的祖父祖母和父母,感谢他们在漫长的求学过程中对我无微不至的关心和无怨无悔的支持,在我成长的每个一个足迹中,都印刻着他们的汗水和希望。

王雅男 于北京

2007年6月

作者简介

王雅男，女，中共党员，1982年7月6日生，籍贯北京。

教育背景：

1994.9-2000.7 北京市海淀区八一中学；

2000.9-2004.7 沈阳农业大学植物保护学院，获农学学士学位；

导师：王小奇教授。

2004.9-2007.7 中国农业科学院植物保护研究所，生物安全专业，攻读硕士学位，

导师：万方浩研究员。

发表文章：

王雅男，万方浩，沈文君，外来入侵生物定量风险评估模型. 昆虫学报. 2007, 50(5): 512-520.

王雅男，万方浩，沈文君，应用相似离度法预测红火蚁在中国适生区域及其入侵概率. 中国农业科学. 2007. （已接受）