

梁勤欧 著

人工免疫系统与 GIS空间分析应用

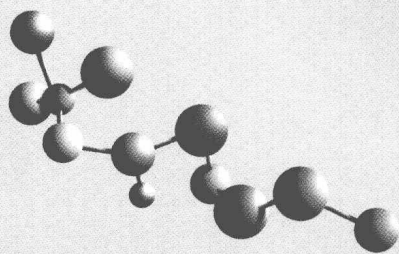
Artificial Immune Systems and
Their Applications in GIS Spatial Analysis



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

梁勤欧 著



人工免疫系统与 GIS空间分析应用

Artificial Immune Systems and
Their Applications in GIS Spatial Analysis



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

人工免疫系统与 GIS 空间分析应用/梁勤欧著. —武汉: 武汉大学出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-307-08383-7

I. 人… II. 梁… III. ①免疫学—应用—人工智能 ②地理信息系统—研究 IV. ①TP18 ②P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 250089 号

责任编辑: 胡 艳 责任校对: 刘 欣 版式设计: 王 晨

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北恒泰印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 18.75 字数: 265 千字 插页: 2

版次: 2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-08383-7/TP · 383 定价: 39.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

梁勤欧，出生于1968年12月，男，内蒙古呼和浩特人，工学博士，浙江师范大学地理与环境科学学院教授。

2003年6月于武汉大学地图制图学与地理信息工程专业博士研究生毕业，获得工学博士学位。

1996年7月硕士研究生毕业后，分配到武汉大学资源与环境科学学院工作。先后任助教、讲师，2004年11月受聘为武汉大学资源与环境科学学院副教授。2007年7月调到浙江师范大学地理与环境科学学院工作。2009年12月受聘为浙江师范大学地理与环境科学学院教授。

主要研究方向为：空间信息系统模型算法设计与应用，人工免疫系统及其在空间信息系统、遥感、城市规划与管理中的应用。已发表多篇有关人工免疫系统在GIS空间分析等领域的应用研究论文。主持了国家自然科学基金项目1项；主持完成了武汉大学地理信息系统教育部重点实验室开放基金项目1项；主持完成了武汉市城市规划设计研究院项目1项。此外，还参与完成了多项国家级和省部级科研项目的工作。

前 言

免疫系统是继神经系统之后所发现的又一复杂的生物系统。免疫系统的许多机制给工程技术人员、计算机工程师等带来解决问题的灵感启示,他们基于免疫系统的机制来构造解决各种实际问题的算法,这些算法一般被称做人工免疫系统 (Artificial Immune System, AIS)。人工免疫系统是一种新兴的计算智能 (Computational Intelligence, CI) 模型,发展历史迄今不过二十几年。

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 的核心功能是空间分析。GIS 空间分析只有吸收计算机科学等领域的最新理论成果,进行各种模型的算法改造与应用等研究,才能保持 GIS 的创新性和生机活力。

人工免疫系统的研究正逐渐成为工程技术和计算智能领域的研究热点。人工免疫系统为 GIS 空间分析的研究与开发提供了新的理论和技术支持。目前,国内外有关人工免疫系统在 GIS 空间分析中的应用研究很少。针对这种现状,本书选择“人工免疫系统与 GIS 空间分析应用”为题,以 GIS 空间分析中的部分空间网络分析和空间统计分析问题为实验对象,应用人工免疫系统模型进行初步的应用实验研究。本书主要以克隆选择算法 (CLONALG) 及其扩展模型遗传克隆选择算法 (CLOGA)、人工免疫网络模型 (aiNet)、改进克隆选择算法、局部变换克隆选择算法等为主要研究方法,以 GIS 空间分析中的定位-分配问题 (Location-Allocation)、地理信息预测问题、聚类分析问题、旅行商问题 (TSP)、车辆路径问题 (VRP) 等为主要应用和实验目标,概略研究了人工免疫系统在 GIS 空间分析中应用的理论与方法。

本书的研究内容是在作者博士论文和武汉大学地理信息系统教

育部重点实验室开放研究基金项目 (wd200608) 基础上, 在国家自然科学基金项目 (70773089) 资助下完成的后续的研究和创新性工作。其中, 第 7 章“人工免疫系统模型与旅行商问题”和第 8 章“人工免疫系统模型与车辆路径问题”的全部内容 (包括实验测试、改进模型等)、油田最小费用的布局-分配问题实验、基于克隆选择算法和自组织特征映射网络 (SOFM) 的浙江省市县现代化水平空间差异、2003 年以来人工免疫系统国内外研究进展概况等工作, 都是在国家自然科学基金项目 (70773089) 资助下完成的一些创新性成果, 并且都是首次公开发表。本书的出版也得到国家自然科学基金项目 (70773089) 的资助。

本书想尽量回答以下问题: 为什么在 GIS 空间分析中要应用人工免疫系统模型? 如何在 GIS 空间分析中应用人工免疫系统模型? 在 GIS 空间分析中应用人工免疫系统模型需要注意哪些问题? 等等。全书的内容大致如下:

第 1 章, 研究了 GIS 空间分析的含义, 提出在当今计算机和 GIS 理论和技术条件下新的 GIS 空间分析功能, 提出了人工免疫系统应用于 GIS 空间分析的必要性和可能性。概述了医学免疫学的研究进展。分析了人工免疫系统的国内外研究进展。在此基础上, 提出了人工免疫系统在空间信息系统中的主要应用研究方向。

第 2 章, 分析研究了生物免疫系统的一些主要的概念和名词术语的含义, 并对人工免疫系统中涉及较多的克隆选择理论和独特型免疫网络理论进行了基本原理的介绍。

第 3 章, 研究了主要的人工免疫网络模型、免疫遗传算法和克隆选择算法等模型的基本原理、算法流程及其主要特点。同时, 对克隆选择算法进行了扩展与改进, 扩展和改进后的模型称为遗传克隆选择算法, 通过实验验证了其良好的性能。

第 4 章, 以 GIS 空间分析中网络分析中的布局-分配问题为应用对象, 进行了遗传克隆选择算法解决一般布局-分配问题的应用效果实验。提出了一种基于克隆选择算法结合其他方法, 解决障碍布局-分配问题的简化流程。通过一个简单实验证明了所提方法是可行的。

第5章,提出遗传克隆选择算法优化BP神经网络学习算法基本流程,通过XOR问题和湖北省人口预测的实验,对比了遗传克隆选择算法优化BP神经网络进行预测研究的应用效果。

第6章,把aiNet模型应用到空间信息聚类研究中,通过一个简单实例和多指标的城市综合实力聚类的实验来表明其可行性。通过浙江省市县现代化水平空间差异聚类分析实验,比较了克隆选择算法和自组织特征映射神经网络在聚类分析研究中的差异。

第7章,选择旅行商问题(TSP)作为实验研究对象,应用人工免疫系统的主要模型进行了算法模型的应用实验。重点讨论各种人工免疫系统模型的优缺点及其需要改进的地方,并提出改进的克隆选择算法和局部变换克隆选择算法,通过TSP实验验证了这些新算法相对更好的应用性能。

第8章,选择车辆路径问题(VRP)作为实验研究对象,应用人工免疫系统的主要模型进行了算法模型的应用实验。实验结果进一步表明局部变换克隆选择算法的应用实验效果是最好的。

第9章,归纳总结了人工免疫系统(AIS)在理论和技术领域有待进一步研究和解决的问题。提出了人工免疫系统(AIS)理论模型方面以及人工免疫系统在空间信息系统应用方面未来的研究方向。

人工免疫系统在GIS空间分析中有着非常广阔的应用前景。本书的目的是为尽快引进与发展人工免疫系统在GIS空间分析中的理论与应用研究做一基础性工作,并借此抛砖引玉。

作者学识浅,经验不足,在各种模型的改进等方面肯定有许多不完善的地方,作者只是想通过本书提供一些思路、一些想法。书中错漏之处在所难免,一切责任均由作者本人自负。

谨以此书呈现给地理信息科学领域的各位专家学者和同仁,你们的批评与指正是作者所期盼的。

梁勤欧

2010年11月

致 谢

我从 20 世纪 90 年代末开始,以地理学本科、人文地理学硕士的专业背景,带着对新兴的地理信息系统专业的热爱与兴趣,走进了我国 GIS 研究水平非常高的武汉大学,师从国内著名地理信息学专家祝国瑞教授和李霖教授,开始攻读地图制图学与地理信息工程专业的博士研究生。2000 年的一天,笔者查阅计算机专业文献,发现了人工免疫系统这个新兴的计算智能模型,于是把人工免疫系统模型在 GIS 空间分析等领域的应用选为自己博士论文的研究内容和方向。经过几年不懈的努力,终于在 2003 年 5 月通过博士学位论文答辩,获得武汉大学地图制图学与地理信息工程专业工学博士学位。

博士毕业后,我继续就人工免疫系统在 GIS 空间分析中的应用进行了探索,并获得国家自然科学基金等的资助,取得了阶段性成果。

在本书即将出版之际,我十分感谢自己的博士生导师祝国瑞教授对我的悉心指导。祝老师虽然已经离开我们近 5 年了,但作为他的学生,我时刻铭记着先生的教诲。

我十分感谢自己的另一位博士生导师李霖教授对我学业的指导与帮助。在我读博期间,李老师正好在日本做客座研究,但李老师仍然对我的论文进行了细致的修改与指导。同时,我也十分感谢自己的硕士生导师西北师范大学詹启仁教授。詹老师引领我进行“国土资源调查与制图”方向的探索,奠定了我进行 GIS 应用研究的基础。

武汉大学宁津生院士、毋河海教授、何宗宜教授、刘耀林教授、张良培教授、郭庆胜教授、林爱文教授等;中国科学院地理科

学与资源研究所廖克研究员；河南财经政法大学李小建教授；南京师范大学倪绍祥教授等地理科学、测绘科学领域的前辈和知名专家学者，在我博士论文的完成、评阅和答辩中提出诸多宝贵意见，我在此深表谢忱。

感谢巴西 Campinas 州立大学的 De Castro L. N.，在我研究过程中遇到难解的学术问题时，他都给予了及时、耐心的帮助，并就有关问题与我进行了详细的探讨。

同时，我还要感谢的有国家自然科学基金项目（70773089）课题组成员的合作；我在武汉大学工作期间资源与环境科学学院的各位同事；我现在工作的浙江师范大学地理与环境科学学院的各位同事。

我的研究生徐静、潘玉侠在人工免疫系统国内外研究进展方面进行了部分资料的收集整理工作。感谢她们的劳动与付出。

国家自然科学基金委员会管理科学部的各位老师为我的研究工作得以顺利开展，提供了及时的帮助。武汉大学出版社的相关编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，使得本书的文字、排版等错误降到最小。作者在此一并感谢。

感谢我的妻子、女儿和亲戚，他们多年来的默默奉献和支持，才使我能集中精力完成学习和研究工作。

梁勤欧

2010 年 11 月

目 录

引 言	1
第 1 章 概述	5
1.1 GIS 空间分析概述	5
1.1.1 地理信息系统与空间信息系统	5
1.1.2 GIS 空间分析	5
1.1.3 人工免疫系统应用于 GIS 空间分析的必要性和可能性	10
1.2 医学免疫学研究进展	12
1.2.1 免疫学的起源	12
1.2.2 免疫学的创立	13
1.2.3 实验免疫学的发展	13
1.2.4 免疫学的近代发展	14
1.3 国外人工免疫系统理论与应用研究进展	17
1.3.1 2003 年以前国外人工免疫系统研究进展	17
1.3.2 2003 年以来国外人工免疫系统研究进展	24
1.4 国内人工免疫系统理论与应用研究进展	27
1.4.1 2003 年以前国内人工免疫系统研究进展	28
1.4.2 2003 年以来国内人工免疫系统研究与地理信息应用进展	35
1.5 人工免疫系统在空间信息系统中的应用前景	39
1.5.1 空间数据获取	39
1.5.2 空间数据挖掘	40
1.5.3 GIS 空间分析	41

1.5.4 地理系统模拟模型	41
1.6 本书的研究目标和内容	42
第2章 生物免疫系统组成结构及主要理论	45
2.1 免疫系统解剖学特点	45
2.1.1 淋巴组织器官	46
2.1.2 免疫细胞	48
2.2 免疫系统的一些基本概念	52
2.3 生物免疫系统主要理论	54
2.3.1 克隆选择学说	54
2.3.2 免疫网络理论	55
2.4 本章小结	57
第3章 人工免疫系统主要理论模型及克隆选择算法的 扩展	58
3.1 人工免疫网络模型	59
3.1.1 字条空间模型	59
3.1.2 免疫系统对象模型	61
3.1.3 资源受限人工免疫网络	63
3.1.4 形态空间人工免疫调节网络 (SAIRN)	67
3.1.5 动态离散决策机制模型	68
3.1.6 人工免疫网络模型	69
3.1.7 结论	72
3.2 免疫遗传算法与克隆选择算法	73
3.2.1 免疫系统的遗传算法建模方法和 FPP 模型	74
3.2.2 免疫遗传算法	74
3.2.3 免疫遗传算法	75
3.2.4 免疫算法	77
3.2.5 克隆选择算法	78
3.2.6 免疫优势克隆算法	80
3.2.7 量子克隆进化策略算法	80

3.2.8 结论	82
3.3 克隆选择算法的扩展——遗传克隆选择算法	82
3.3.1 克隆选择算法的扩展、改进——遗传克隆选择 算法	82
3.3.2 遗传克隆选择算法和克隆选择算法、遗传算法的 比较	86
3.4 基于遗传克隆选择算法的点状地图符号识别	91
3.4.1 概述	91
3.4.2 基于遗传克隆选择算法的点状地图符号识别	92
3.4.3 结论	95
3.5 本章小结	96
第4章 克隆选择算法在布局-分配问题中的应用	97
4.1 基于遗传克隆选择算法的布局-分配问题研究	97
4.1.1 概述	97
4.1.2 布局-分配问题的模型描述与主要算法	98
4.1.3 布局-分配问题的遗传克隆选择算法求解	101
4.1.4 实验研究1: Cooper 和 Rosing 测试数据实验	104
4.1.5 实验研究2: 油田最小费用的布局-分配问题	110
4.2 基于克隆选择算法的障碍布局-分配问题研究	119
4.2.1 障碍布局-分配问题模型描述	119
4.2.2 一种基于克隆选择算法解决障碍布局-分配问题的 简化流程	122
4.2.3 实验研究	126
4.3 本章小结	131
第5章 克隆选择算法优化 BP 神经网络的地理信息预测	133
5.1 BP 神经网络概述	133
5.1.1 BP 神经网络结构	135
5.1.2 BP 神经网络常用传递函数	135
5.1.3 BP 神经网络学习算法	138

5.1.4	BP 神经网络的限制与不足	139
5.2	基于遗传克隆选择算法优化 BP 神经网络学习算法	140
5.3	实例研究	142
5.3.1	基于遗传克隆选择算法改进的 BP 网络用于 XOR 问题的研究	142
5.3.2	基于遗传克隆选择算法改进的 BP 网络进行 湖北省人口预测	146
5.4	本章小结	151
第 6 章	人工免疫系统模型在空间信息聚类中的应用	152
6.1	对人工免疫网络模型进行空间数据聚类基本过程分析	152
6.1.1	主要聚类方法简介	152
6.1.2	人工免疫网络模型的特点及改进建议	155
6.1.3	人工免疫网络模型进行空间数据聚类基本过程 分析	157
6.2	基于人工免疫网络模型的城市综合实力聚类	166
6.2.1	指标体系建立	167
6.2.2	人工免疫网络模型的设计与计算	176
6.2.3	城市综合实力聚类结果分析	177
6.2.4	结论	177
6.3	基于克隆选择算法和自组织特征映射网络的浙江省市县 现代化水平空间差异	178
6.3.1	自组织特征映射网络概述	179
6.3.2	研究数据尺度与计算智能模型选择	183
6.3.3	应用克隆选择算法分析浙江省城市化与非农化 空间差异	184
6.3.4	应用克隆选择算法和自组织特征映射网络分析 浙江省市县现代化综合水平空间差异	191
6.3.5	结果与讨论	197
6.4	本章小结	197

第7章 人工免疫系统模型与旅行商问题	199
7.1 旅行商问题概述	199
7.1.1 旅行商问题	199
7.1.2 旅行商问题数学描述	201
7.2 克隆选择算法求解旅行商问题流程	201
7.3 人工免疫系统模型求解旅行商问题实验	203
7.3.1 20城市以下 TSP 实验	204
7.3.2 20~30城市 TSP 实验	207
7.3.3 50~96城市 TSP 实验	217
7.4 本章小结	231
第8章 人工免疫系统模型与车辆路径问题	233
8.1 车辆路径问题概述	233
8.1.1 车辆路径问题	233
8.1.2 有能力约束车辆路径问题数学描述	235
8.2 人工免疫系统模型求解有能力约束车辆路径问题的 基本方法	236
8.2.1 编码方式	236
8.2.2 车辆能力约束	238
8.2.3 免疫算法操作	239
8.3 人工免疫系统模型求解有能力约束车辆路径问题实验	239
8.3.1 10客户有能力约束车辆路径问题实验	240
8.3.2 31客户有能力约束车辆路径问题实验	245
8.3.3 44客户有能力约束车辆路径问题实验	251
8.4 本章小结	254
第9章 总结与展望	256
9.1 总结	256
9.2 展望	259
参考文献	262

引 言

世界上第一个地理信息系统是加拿大地理信息系统 (Canada Geographic Information System, CGIS), 出现于 20 世纪 60 年代。加拿大地理信息系统是一个辅助土地利用管理与资源监测的地理信息数据库系统, 可以实现空间数据的存储、查询、检索以及简单的建模与分析。随着计算机软、硬件技术的快速发展, 地理信息系统技术得到迅速的普及与推广。特别是面向对象的 Windows 操作系统成为主流后, 地理信息系统技术成为方便相关科学工作者应用的一个普及的科研辅助工具, 也成为涉及空间数据管理的许多部门管理人员常用的一个系统。

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 是在计算机软硬件技术的支持下, 运用系统工程和信息科学的理论和方法, 综合地、动态地获取、存储、传输、管理、分析和利用地理信息的技术系统。

地理信息系统最大的特点是管理的数据具有空间特性。但具有空间特性的数据给计算机管理带来很大的不便。早期的 GIS 软件只能采用对空间数据与属性数据分别存储管理的方法, 如 Arc/Info, MapInfo 等, 从软件名称就可以看出这类软件中的 Arc 或 Map 用来管理地理空间数据, Info 管理地理空间属性数据, 通过 ID 标识码把两个数据库联结起来。这样管理空间数据的缺点是进行空间分析操作等非常不便。随着面向对象数据库技术的进一步应用, 当今大部分国内外的 GIS 软件已经克服了这个问题。

地理信息系统的最终目的是通过空间分析技术来实现地理空间建模、地理空间评价与地理空间决策支持。所以, GIS 空间分析是地理系统的核心功能, 是地理信息系统区别于一般信息系统的

主要功能特征,也成为评价一个地理信息系统功能强弱的主要指标之一。

目前, GIS 技术已经进入用户时代。主要体现在用户的普及性和用户的认同性两个方面。同时 GIS 的基本功能也远远不能满足用户的需求。其原因是多方面的,一是地理数据的海量性、复杂性和不确定性,使得 GIS 难以进行科学计算;二是计算机理论与技术的局限性,造成目前 GIS 的智能化水平还很低。所以,随着计算机理论与技术的进一步发展,空间分析的理论与应用研究进一步深入,解决这一问题才能成为可能。从专业角度讲,只有在空间分析强大理论基石上,才能建立起灵活多样的应用模型,从而满足不同用户方方面面的需求。

近年来,以人工神经网络、进化计算、人工免疫系统、DNA 计算、元胞自动机、L-系统等为主要代表的新兴的计算智能(Computational Intelligence, CI),为 GIS 空间分析提供了新的机遇和发展的契机。

人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)的研究起步相对较晚,近年来国内外的相关理论研究和应用研究发展迅速,但迄今为止正式的一般理论框架还未提出。1997 年和 1998 年的 IEEE Systems, Man and Cybernetics 国际会议组织专题讨论了 AIS。2002 年 9 月 9 日至 11 日,在英国的 Kent 大学召开了第一届人工免疫系统国际大会(ICARIS 2002),会议的目的是通过研究不同的免疫学机制及其在信息处理和工程设计中的关系,来加强 AIS 的研究。2003 年 9 月 1 日至 3 日,在英国的 Edinburgh 召开了第二届人工免疫系统国际大会(ICARIS 2003),会议涉及的领域包括自己/非己模型、免疫网络模型(如 B 细胞)、克隆选择和变异、AIS 理论以及 AIS 应用等一些重点问题。此后,人工免疫系统国际大会每年召开一届,截至 2010 年 10 月,共召开了九届,这对人工免疫系统最新的理论与应用研究进行了很好的梳理与总结,并及时提出了许多新的需要进一步研究的课题。

免疫系统的基本生物学原理是构造人工免疫系统的—个基本依据。免疫系统的研究分为两派:—派主要包括医学、生物学家、物

理学家和数学家等,他们研究的主要目的是给出免疫系统的医学和生物学理论,或给出生物免疫系统的精细模型和描述,主要包括各种免疫系统的生物学机理理论、免疫的非线性动力学模型等;另一派主要包括计算机科学家、工程技术人员、应用数学家、哲学家以及其他许多领域的学者专家,他们关心的是如何将免疫系统的免疫机制获得强大的灵感,来构造解决实际问题的算法,使得这些算法具有有趣和有效的计算能力,这些统称为免疫系统的工程应用研究,有的学者称其为免疫工程学(Immune Engineering),但一般都称为人工免疫系统。

免疫系统是一个由各种细胞、分子、组织和器官组成的复杂系统。这些细胞、分子、组织和器官被研究证实在生物体中完成着各种各样的任务,包括模式识别(Pattern Recognition)、学习(Learning)、记忆获取(Memory Acquisition)、遗传多样性(Generation of Diversity)、噪声忍受(Noise Tolerance)、综合(Generalization)、分布式侦察(Distributed Detection)以及最优化(Optimization)等(De Castro L. N. 和 Von Zuben F. J., 1999a)。

基于免疫系统的这些特性启发,国内外学者设计了许多种理论模型,并应用于不同的领域,如机器学习、控制、计算机病毒预防等。综合国外有关 AIS 的研究,理论模型集中在免疫学习算法、免疫网络模型、克隆选择模型、免疫记忆、自己/非己识别、反面选择模型等领域。应用领域涉及模式识别、控制、优化、机器人、故障诊断、计算机病毒预防、多智能体、机器学习、数据挖掘等。国内涉及人工免疫系统稍晚,但近年来发展非常迅速。在早期,国内研究 AIS 的理论方面主要是综述性的较多,也有一些算法模型的设计与改造研究,但可操作性强的模型较少;近几年来,国内出现了大量新的人工免疫系统模型和算法。应用方面涉足非常广泛,包括机器人行为控制、模式识别、组合优化、计算机病毒预防、故障诊断、免疫规划、函数寻优等许多方面。

在早期(2003 年以前),AIS 由于其复杂性而没有引起计算领域的重视,和人工神经网络、进化计算等相比,人们对其的重视程度远远不够,国内外的研究成果很少。在 GIS 空间分析领域的应用