



人工免疫算法改进 及其应用

● ● ● Improved Artificial Immune Algorithms
and Their Applications

● 韩旭明 王丽敏 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

.. 013048465

TP18
244

人工免疫算法改进及其应用

Improved Artificial Immune Algorithms
and Their Applications

韩旭明 王丽敏 著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING



北航

C1656578

TP18

244

内 容 简 介

人工免疫系统是模仿自然免疫系统功能的一种智能方法,是继人工神经网络、进化计算之后新的智能计算研究方向,是生命科学和计算机科学相交叉而形成的交叉学科研究热点。本书是作者几年来科研成果的总结。全书共分9章,主要内容是在计算智能的基础上,针对人工神经网络、进化计算和人工免疫系统进行了理论研究和应用研究,重点研究人工免疫系统的免疫克隆选择算法及其理论改进和应用研究,并将提出和改进的算法应用到大气环境质量评价和大气环境质量预测两个领域,取得了令人满意的结果。

本书内容充实,结构清晰,实例丰富,适合从事计算机及其相关学科的师生,以及相关科研院所的科研人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

人工免疫算法改进及其应用 / 韩旭明, 王丽敏著. — 北京: 电子工业出版社, 2013.6

ISBN 978-7-121-20660-3

I. ①人… II. ①韩… ②王… III. ①免疫学—应用—人工智能 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 125444 号

责任编辑: 竺南直

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 8.75 字数: 224 千字

印 次: 2013 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

由生物引发的信息处理系统可以分为：人工神经网络，进化计算和人工免疫系统。其中，人工神经网络和进化计算已经被广泛地应用于各个领域，并产生了巨大的经济效益和社会效益。近年来，随着人们对免疫系统机理的进一步揭示，关于人工免疫系统的理论研究和应用研究倍受关注，一些研究成果已经被广泛用于机器学习、故障诊断、机器人行为仿真和控制、网络入侵检测和函数优化等众多领域，表现出卓越的性能和效率。

本书是作者几年来科研成果的总结。全书共分8章，主要内容是在智能计算的基础上，针对人工神经网络、进化计算和人工免疫系统进行了理论研究和应用研究，重点研究人工免疫系统的免疫克隆选择算法及其理论改进和应用研究，并将提出和改进的算法应用到大气质量评价和大气质量预测两个领域，取得了令人满意的结果，具体研究内容如下：

(1) 主要介绍了人工神经网络的拓扑结构、分类、工作方式和学习方法，以及免疫系统的生物学机理、人工免疫系统与人工免疫算法等。另外，还介绍了进化计算的生物学基础、进化计算的主要特征等相关知识。智能计算中的人工神经网络、进化计算、人工免疫系统等相关理论知识是本书主要研究工作的基础。

(2) 在人工免疫系统的基础上，提出引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法，即 ICESA-VS (Immune Clonal Selection Algorithm Introduced into Vaccination Strategy) 算法。在疫苗提取，疫苗选取，疫苗接种过程中引入轮盘赌选择算法，并构造了二进制位基因位选取和接种策略等方法。算法采用实数制编码；根据解决问题的复杂程度和实际需要确定抗体的克隆规模；疫苗提取是将优良抗体集合中的全部抗体作为候选疫苗种群；根据候选疫苗个体亲和度占候选疫苗种群所有个体亲和度之和的比率，计算候选疫苗个体被选取的概率，通过轮盘赌方法在候选疫苗种群中选取候选接种疫苗；将候选接种疫苗与克隆后的抗体按照二进制位基因位选取得到的基因位进行疫苗接种，形成新抗体。本书提出的引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法在疫苗接种过程中具有随机性、自适应性和多样性等特点，提高了优良抗体和疫苗的接种概率，确保优良抗体和基因能够在子代抗体中得以继承和延续，实现了免疫的自我调节功能。

(3) 提出引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法，即 ICESA-LGMO (Immune Clonal Selection Algorithm Introduced into Local Gaussian Mutation Operator) 算法。高斯变异继承了高斯分布具有的集中性、对称性和均匀变动性等优良特征，具有较好的局部搜索能力。主要改进方法是通过构造并引入局部高斯变异算子指导抗体基因变异，利用局部高斯变异的小步长不断地自适应调整与变换，实现抗体基因在局部区域上的扰动，搜索原抗体附近比原抗体更好满足问题的新抗体和基因，从而形成新的抗体。本书提出的引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法有效地提高了局部求解的精度，克服了传统免疫克隆选择算法局部搜索能力不佳的问题。

(4) 鉴于引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法和引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法具有的优点, 将两种算法相结合, 提出了引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法, 即 ICSA-VSLGMO (Immune Clonal Selection Algorithm Introduced into Vaccination Strategy and Local Gaussian Mutation Operator) 算法。另外, 对两种算法相结合, 互相促进, 相互提高的过程进行分析。本书提出的引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法和引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法局部搜索更为细腻, 求解的精度也明显提高。这种求解精度的提高不是上述两种算法通过增加运行时间, 提高迭代次数所能达到的, 是两种算法优势上的相互补充, 互相促进与提高。此外, 在几种改进的免疫克隆选择算法中, 本书还采用了扩大搜索空间策略, 确保在全局范围内搜索到较好的新抗体和基因, 避免陷入局部峰值。同时, 还采用禁忌算法和插入排序等方法提高算法效率。

(5) 在引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法和引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法的基础上, 根据评价大气质量的目标函数, 采用引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法对大气污染损害率公式进行参数优化, 进而提出一种基于免疫克隆选择算法的大气质量评价模型和评价方法。通过模拟实验结果的比较和分析得出: 与传统免疫克隆选择算法相比, 本书提出的引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法, 引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法, 引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法的全局和局部搜索能力明显提高, 提高了求解精度。引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法能够在保持种群多样性的同时提高算法收敛速度; 本书提出的大气质量评价方法具有原理直观, 物理意义明确, 评价结果准确等优点。它是人工免疫理论和技术应用于大气环境领域的一种全新的有效方法, 具有较好的实用性和应用前景。

(6) 提出一种适合于优化多参问题的动态阈值方法。该方法结合抗体间的相似度确定初始阈值, 通过构造阈值递减函数约束动态阈值的衰减幅度, 避免产生相似的抗体, 有效克服免疫克隆选择算法优化多参问题时产生的近亲繁殖和早熟收敛问题。

(7) 在 Elman 人工神经网络基础上, 鉴于引入动态阈值策略的引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法在多参优化方面具有较好的优势, 提出了一种基于改进免疫克隆选择算法 (引入动态阈值策略的 ICSA-VSLGMO 算法) 优化动态递归神经网络的新方法。对递归神经网络的具体结构, 连接权值, 联系单元的初始值等实现自动进化训练学习, 实现了动态递归神经网络的自动构造与设计, 并以动态递归 Elman 神经网络为例进行分析。该方法为免疫克隆选择算法优化动态递归神经网络提供一种新的有效解决方案。

(8) 将本书提出的改进的免疫克隆选择算法优化 Elman 神经网络, 引入趋势信息双反馈 Elman 神经网络和基本 Elman 神经网络三种网络应用于大气质量预测领域。通过对三种主要污染物 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 拟合和预测的实验结果进行比较和对比分析, 验证了本书提出的改进的免疫克隆选择算法 (引入动态阈值策略的 ICSA-VSLGMO 算法) 优化 Elman 神经网络具有较好的拟合与预测能力, 利用该方法对吉林省某城市的大气质量进行预测, 得到了令人满意的结果, 具有较好的实用价值和应用前景。

(9) 在进化计算基础上, 采用一种基于群体的随机全局优化工具即粒子群优化算法, 算法对计算大气污染损害率的普适公式中的参数进行优化, 得到了对于多种污染物均适用的具有普适性大气质量综合污染指数评价模型和评价方法, 该模型具有公式形式简单, 计算简便等优点。此评价方法是将大气环境质量的好坏与其所受的损害程度直接相联系, 使基于粒子群优化算法的大气质量综合评价法具有更明确的物理意义, 原理更加直观, 而且该评价法不受污染物种类及数目的限制, 使其具有很强的通用性和可比性。

本书是在国家自然科学基金项目(项目编号: 61202306)、吉林省科技厅基础项目(项目编号: 201215119, 20100507)、吉林省教育厅十二五重点规划项目(项目编号: 2012185)、吉林省教育厅新世纪人才计划专项、吉林财经大学青年学俊等项目的资助和支持下完成的。值此专著完成之际, 诚挚地感谢吉林大学计算机科学与技术学院左万利教授, 智能工程实验室的梁艳春教授、时小虎副教授、孙延凤副教授的热情帮助和指点。

由于作者水平有限, 加之智能研究领域纵深宽广, 书中难免有种种考虑不周之处, 诚请广大读者批评指正。

韩旭明 王丽敏
2013 年 5 月于长春

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 大气质量评价与预测	2
1.2.1 大气与大气污染	2
1.2.2 大气污染及危害	3
1.2.3 国内外大气质量研究现状	4
1.3 本书主要研究内容	6
1.4 本书结构安排	7
参考文献	8
第 2 章 计算智能概述	11
2.1 人工神经网络简介	12
2.1.1 神经网络的发展	13
2.1.2 神经元及变换函数	15
2.1.3 神经网络拓扑结构	16
2.1.4 神经网络分类	17
2.1.5 神经网络工作方式	18
2.1.6 神经网络学习方法	18
2.2 进化计算	20
2.2.1 进化计算生物学基础	20
2.2.2 进化计算发展	21
2.2.3 进化计算主要分支	23
2.2.4 进化计算的主要特征	25
2.3 人工免疫系统	26
2.3.1 人工免疫系统的发展	27
2.3.2 免疫系统的生物学机理	29
2.3.3 人工免疫系统模型	33
2.3.4 人工免疫系统应用	33
2.3.5 免疫系统特性	37
2.3.6 人工免疫算法	38
2.4 本章小结	43
参考文献	43

第 3 章	人工免疫克隆选择算法	48
3.1	免疫克隆选择算法研究现状	50
3.2	传统免疫克隆选择算法	52
3.2.1	传统免疫克隆选择算法	52
3.2.2	传统免疫克隆选择算法的不足	53
3.3	引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法	54
3.3.1	抗体克隆的规模和疫苗的提取	54
3.3.2	疫苗的选择	55
3.3.3	疫苗的接种	56
3.3.4	算法描述	57
3.4	引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法	59
3.4.1	局部高斯变异算子的构造	59
3.4.2	算法描述	60
3.5	引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法	60
3.5.1	问题的提出	60
3.5.2	算法描述	62
3.6	本章小结	63
	参考文献	64
第 4 章	基于改进免疫克隆选择算法优化的大气质量评价模型及其应用	66
4.1	大气污染损害率普适公式	66
4.2	改进免疫克隆选择算法优化参数	67
4.2.1	构造目标函数	67
4.2.2	传统免疫克隆选择算法优化参数	68
4.2.3	引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法优化参数	70
4.2.4	引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法优化参数	71
4.2.5	引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法优化参数	74
4.3	四种算法的比较与性能分析	75
4.3.1	算法比较的约束条件	75
4.3.2	四种算法比较与性能分析	75
4.4	基于改进免疫克隆选择算法的大气质量综合污染评价模型	79
4.5	五个级别大气污染损害率取值范围的确定	80
4.6	某城市大气质量评价结果及分析	80
4.7	十个监测点大气质量评价结果及与其他评价方法的比较和分析	84
4.8	本章小结	86
	参考文献	86
第 5 章	基于免疫克隆选择算法优化的动态递归神经网络	89
5.1	Elman 神经网络	89

5.1.1	Elman 神经网络数学模型	89
5.1.2	Elman 神经网络学习算法	90
5.1.3	Elman 神经网络学习算法的缺陷	91
5.2	基于改进免疫克隆选择算法优化的动态递归神经网络	92
5.2.1	多参分析	92
5.2.2	动态阈值	93
5.2.3	算法描述	94
5.3	本章小结	95
	参考文献	95
第 6 章	引入趋势信息的双反馈 Elman 神经网络	96
6.1	趋势信息	96
6.2	双反馈 Elman 神经网络	96
6.3	引入趋势信息的双反馈 Elman 神经网络	98
6.4	本章小结	100
	参考文献	100
第 7 章	若干算法在大气质量预测中的应用	101
7.1	性能评价指标	101
7.2	基本 Elman 神经网络在大气质量拟合中的应用	101
7.2.1	基本 Elman 神经网络拟合实验	102
7.2.2	仿真实验	102
7.3	引入趋势信息 Elman 神经网络在大气质量拟合中的应用	102
7.3.1	引入趋势信息 Elman 神经网络拟合实验	103
7.3.2	仿真实验	103
7.4	基于免疫克隆选择算法优化的 Elman 神经网络在大气质量拟合中的应用	104
7.4.1	基于免疫克隆选择算法优化的 Elman 神经网络拟合实验	104
7.4.2	仿真实验	105
7.5	几种算法在大气质量拟合应用中的比较	106
7.6	几种算法在大气质量预测中的应用	108
7.6.1	基本 Elman 神经网络预测大气质量	109
7.6.2	引入趋势信息的双反馈 Elman 神经网络预测大气质量	109
7.6.3	基于免疫克隆选择算法优化 Elman 神经网络预测大气质量	109
7.6.4	仿真实验与结果分析	110
7.7	本章小结	112
	参考文献	112
第 8 章	基于粒子群算法优化的大气质量评价模型及其应用	114
8.1	我国最常使用的 API 大气质量评价法	115
8.2	粒子群优化算法概述	116

8.2.1	粒子群优化算法原理	117
8.2.2	粒子群优化算法流程	117
8.3	基于粒子群优化算法大气质量指数评价模型	117
8.3.1	大气质量综合污染损害指数评价模型	118
8.4	仿真模拟与分析	119
8.5	本章小结	121
	参考文献	122
第 9 章	结论与展望	124
9.1	结论	124
9.2	展望	125

第 1 章 绪 论

1.1 背景与意义

大气环境质量与人们的健康及生活息息相关。随着市场经济和工业化进程的加快,使大气质量严重恶化,使污染的空气成为威胁所有生灵的凶险杀手,使人类的生存条件和生态系统受到严重影响。自 1932 年以来,全球曾发生了多次震惊世界的大气污染事件。例如 1932 年 12 月的马斯河谷烟雾事件,由于 SO_2 转化为 SO_3 进入人的肺部,导致数千人发病,60 人死亡;1943 年 5 月到 10 月美国洛杉矶的光化学烟雾事件,由于石油工业和汽车废气在紫外线辐射作用下产生的光化学烟雾,致使大多数居民患病,65 岁以上老人死亡共计 400 人;1948 年 10 月美国多诺拉烟雾事件,由于 SO_2 同烟尘作用生成了硫酸盐,吸入人的肺部,四天内约 6000 人患病,17 人死亡;1952 年 12 月英国伦敦烟雾事件,粉尘中 Fe_2O_3 使 SO_2 转变成硫酸,附着在烟尘上,吸入人的肺部,在 5 天内 4000 人死亡,历年共发生 12 起,死亡近万人。大气污染还可抑制植物生理机制,使其生长不良,抗病抗虫能力减弱,甚至死亡;大气污染还能对气候产生不良影响,如降低能见度,减少太阳的辐射,导致城市佝偻发病率的增加;大气污染物能腐蚀物品,影响产品质量。数十年来,不少国家发生酸雨现象,雨雪中酸度增高,使河湖、土壤酸化、鱼类减少甚至灭绝,森林发育也受到严重影响等。以上事实表明:控制大气污染,预防污染事件的发生,开展大气污染评价及污染预测工作已迫在眉睫。

早在 18 世纪,世界上就出现了局部地区的大气污染现象。第二次世界大战以后,大气污染问题日益严重。近年来,随着经济的快速发展,以及工业化、信息化进程的加快,大气污染已呈现出严重化、多元化发展趋势,污染后的空气正威胁着所有生物。在一次次大气污染造成的灾害面前,人类逐渐意识到保护大气环境的重要性,环境保护意识也明显增强,对大气的环境质量也日益关注。20 世纪 60 年代,国外开始大规模开展大气污染监测工作。我国从 70 年代中期开始按环境保护要求在一些城市进行大气污染监测工作,而开展大气质量评价和大气质量预测工作则相对滞后^[1]。大气质量评价是根据人们对大气质量的具体要求,按照一定的评价标准和评价方法,对大气质量进行定性或定量的评定,它是确定大气污染程度的一种方法和手段,故又称为大气污染评价。开展大气质量评价和大气质量预测工作,及时、准确、全面地了解未来大气环境质量的变化,从而采取必要的控制和防范措施,对改善人类生存环境,提高人们生活质量具有十分重要的意义。20 世纪 90 年代,国家环境监测总站分批组织 46 个重点城市陆续开展了空气质量周报,又分别于 2000 年,2001 年组织 42 个重点城市开展了空气质量日报和

预报并通过媒体（电视、报纸、电台、声讯台）向公众发布，由此，标志着我国大气环境质量评价和大气质量预测工作发展到了一个新的阶段^[2]。

1.2 大气质量评价与预测

1.2.1 大气与大气污染

按照国际标准化组织（ISO）对大气和空气的定义：“大气（Atmosphere）：是指环绕地球的全部空气的总和。”科学研究中，以大区域或全球性的气流为研究对象，常用大气一词。环境空气（Ambient air）：是指人类、植物、动物和建筑物暴露于其中的室外空气，环境空气所指的范围相对小一些。

大气是包围在地球周围的一层气体，大气也称为大气圈或大气层，它维护着人类及生物的生存，也是人类的保护伞。在地球表面之上 80 千米的垂直空间基本为均匀混合的空气层，称为大气层。对人类及生物生存起重要作用的是距地球表面 12 千米以内的空气层，也就是对流层。对流层中的干燥清洁空气由氮（78.08%）、氧（20.95%）、氩气（0.93%）等气体组成，这三种气体约占空气总量的 99.94%，其他气体总和不到千分之一。

按照国际标准化组织（ISO）的定义：大气污染通常是指由于人类活动和自然过程引起某种物质进入大气中，呈现出足够的浓度，达到了足够的时间，并因此而危害了人体的舒适、健康和福利或危害了环境的现象。

按照大气污染来源可分为自然过程排放污染物和人类活动排放污染物两类。自然过程排放污染物是指自然界自行向大气排放污染物的污染源；人类活动排放污染物是指人类的生产活动和生活活动所形成的污染源。其中，引起公害的往往是人类活动排放污染物。随着工业及交通运输业的不断发展，大量的有害物质被排放到空气中，改变了空气的正常组成，使原有的清洁空气受到了污染。当我们生活在受到污染的空气中，健康就会受到影响。

为了改善环境空气质量，防止生态破坏，创造清洁适宜的环境，保护人体健康，根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》制定了《环境空气质量标准》（GB3095—1996）。这个标准规定了环境空气质量功能区划分、标准分级、主要污染物项目和这些污染物在各个级别下的浓度限值等，是评价空气质量好坏的科学依据。它将有关地区按功能划分为三种类型的区域：一类区为自然保护区、林区、风景名胜区和需要特殊保护的地区；二类区为城镇规划中确定的居住区、商业交通居民混合区、文化区、一般工业区和农村地区；三类区为特定工业区。环境空气质量标准也分为三级，一类区执行一级标准，二类区执行二级标准，三类区执行三级标准。衡量某个区域的空气质量达到几级标准主要是根据此区域空气中各种污染物如总悬浮颗粒物、二氧化硫、氮氧化物的浓度达到几级标准。

根据国务院环境保护委员会第三届第十次会议的决定，从 1997 年 6 月开始，中国 47 个重点城市将陆续分批开展空气质量周报工作。环境监测部门根据环境保护法规的要求，对国家空气质量标准中规定的几种主要污染物已经开展了长期的例行监测，以掌握和评价城市空气质量状况和污染变化趋势。开展空气质量周报是对一周的空气质量进行

回顾性的评价,并以空气污染指数的表征形式定期向社会发布,为公众提供及时、准确的环境信息。随着环境监测工作的发展,通过建设现代化的城市空气质量自动监测系统,空气质量周报逐渐发展为空气质量日报,并进而实现空气污染预报,使得有关部门和广大公众对城市的空气质量情况做到与天气预报一样事先“早知道”,从而对可能出现的空气污染采取及时、有效的防范措施^[3]。

1.2.2 大气污染及危害

自然界清新、洁净的空气,使人心旷神怡、精神振奋。但随着工业的迅速发展和人口急剧增长,大量燃烧煤炭、石油所产生的化学物质以废气和烟尘等形式排放到大气中,超过了大气环境的容许量,给人类的生活、生产和身体健康带来有害影响。据统计,全世界每年排入大气的污染物约有6亿多吨。

主要污染源有以下几种:

- 生活污染源:如家庭、商业服务部门等燃煤排放的烟尘和废气;
- 交通污染源:如汽车、火车、飞机、船舶等排放的废气;
- 工业污染源:如发电厂、钢铁厂、水泥厂、氮肥厂、烧碱厂及其他各类化工厂排放的废气和粉尘。

主要大气污染物有两大类:

- 气态污染物(如二氧化硫、硫化氢、一氧化碳、二氧化碳、二氧化氮、氨、氯气等);
- 颗粒态污染物(如烟、雾、粉尘)。

大气污染会对人类和其他生物造成危害。20世纪以来,不断发生的公害,使人们认识到保护大气、预防污染的重要性。如1952年12月5日至8日英国伦敦大雾,因烧煤所产生的烟尘和烟雾无法散发,造成千万人呼吸道感染,4天中死亡达4000多人;1991年日本四日市石油冶炼和工业燃油所排放的工业废气,使大气中的二氧化硫的浓度超过标准5~6倍,致使全市哮喘病发作。

我国普遍使用的空气污染指数(Air Pollution Index, API)评价法是将常规监测的几种空气污染物浓度简化成为单一的概念性指数值形式,并分级表征空气污染程度和空气质量状况,适合于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势。空气污染的污染物有:烟尘、总悬浮颗粒物、可吸入悬浮颗粒物(浮尘)、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳、臭氧、挥发性有机化合物等。

空气污染指数是根据空气环境质量和各项污染物的生态环境效应及其对人体健康的影响来确定污染指数的分级数值及相应的污染物浓度限值。空气质量周报所用的空气污染指数的分级标准为:

- ① 空气污染指数 API 50 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值一级标准;
- ② API 100 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值二级标准;
- ③ API 200 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值三级标准;
- ④ API 更高值段的分级对应于各种污染物对人体健康产生不同影响时的浓度限值。

根据我国空气污染特点和污染防治重点,目前计入空气污染指数的项目暂定为:二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物或总悬浮颗粒物。随着环境保护工作的深入和监测技

术水平的提高,将调整增加其他污染项目,以便更为客观地反映污染状况。中国采用的空气污染指数(API)监测的可吸入颗粒物是PM₁₀。一般而言,粒径2.5微米至10微米的粗颗粒物主要来自道路扬尘等;2.5微米以下的细颗粒物(PM_{2.5})则主要来自化石燃料的燃烧(如机动车尾气、燃煤)、挥发性有机物等。事实上在中国大部分地区,特别是工业集中的华北地区,PM_{2.5}占到了整个空气悬浮颗粒物重量的大半。2012年2月28日发布新修订的《环境空气质量标准》(简称新标准),在新标准中增加了细颗粒物(PM_{2.5})和臭氧(O₃)8小时浓度限值监测指标。这是中国首次将PM_{2.5}纳入空气质量标准,也是首次由国务院通过的环境空气质量标准。

新标准分期实施的时间要求如下:

2012年,京津冀、长三角、珠三角等重点区域以及直辖市和省会城市;

2013年,113个环境保护重点城市和国家环保模范城市;

2015年,所有地级以上城市;

2016年1月1日,全国实施新标准。

世界卫生组织2005年最新出版的《空气质量准则》尤其对大气中可吸入颗粒物的浓度限值制定了严格的标准。WHO规定PM_{2.5}年平均浓度为10微克/立方米($\mu\text{g}/\text{m}^3$),24小时平均浓度为 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。美国作为世界碳排放第二大国,2006年主动将PM_{2.5}的24小时标准由 $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ 改为 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$;PM_{2.5}的年标准仍为原来的 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在美国已经建立了关于细颗粒物的日常监测和公众通报制度。

我国政府十分重视环境保护工作,制定了防治大气污染的法规。例如“大气污染防治法”,“大气环境质量标准”等。人类只有一个地球,全世界人民应该珍惜它。在不断发展生产的同时学会保护大气不受污染,保护地球环境,使我们生活的大气永远洁净,天空永远蔚蓝。

1.2.3 国内外大气质量研究现状

为了加强空气污染防治,减少空气污染对人类健康及环境造成的危害,人们开展了对大气环境质量和对人类健康适宜程度进行评定的研究。目前,关于大气质量的评价方法,国内外专家和学者已经提出了多种方法,如模糊数学法,物元分析法,灰色聚类法,集对分析法,主成分分析法和空气污染指数(Air Pollution Index, API)法等,其中以API法应用较为普遍^[4-10]。空气污染指数法(API)是美国国家环境保护署在20世纪70年代制定的一种反映空气质量的方法,我国目前仍然采用此种方法。空气污染指数(API)法的主要思想是将空气中的污染物浓度简化为指数形式,用具体指数表示空气的污染程度及空气的质量,将监测点每天的各种污染物的浓度与其限值进行比较,确定对应于该浓度值时API所在的指数区间,最后根据插值法确定该污染物浓度的API值。在我国通常以大气中的三种主要污染物监测数据作为大气环境质量评价的依据,它们分别是:SO₂, NO_x和TSP(总悬浮颗粒物)^[11-12]。但上述方法都存在着一个明显的不足:即评价和评价结果缺乏明确的物理意义,难以直接为环境整治规划提供科学依据。而本书提出的基于免疫克隆选择算法(Particle Swarm Optimization)大气质量综合污染评价法能

有效地克服这一缺陷,它采用一种更有效的评价理论,将大气质量的好坏与大气污染物对环境质量的损害程度相联系,使评价结果具有明确的物理意义。

除此之外,许多环境专家和学者还提出了一些其他的评价方法,如肖井坤在2000年提出的灰色系统分析法^[13],朱宏兰在1997年提出的距离判别法^[14],邓新民在1997年提出的投影寻踪分析法^[15],刘随军在2006年提出的星座图法^[16],郭奇在2004年提出的属性识别法^[17]。鉴于智能算法具有的“拟物”与“仿生”特性,近年来越来越多的大气环境专家与学者将智能的理论和用于大气质量评价领域,还提出了基于智能方法的大气质量评价法,例如李希灿在2003年提出的模糊集理论分析评价法^[18],李祚泳在2000年提出的遗传优化法^[19],王丽敏在2004年提出的基于粒子群算法的大气质量评价法^[20],左俊在2007年提出的基于遗传神经网络评价法^[21],蒋华英在2006年提出的沌理论评价法^[22]等。上述方法中有的已经在大气环境质量评价工作中得到应用,有些方法还在探索阶段。免疫克隆选择算法作为一种仿生智能算法,它具有深刻的生物背景和广泛的应用前景。该算法的灵感来自生物获得性免疫的克隆选择原理,是一种借鉴生物免疫系统独有的辨识与计算机制。它提供了一种求解复杂系统问题的方法,该方法不依赖于问题的具体种类和领域,具有很强的鲁棒性。本书在免疫克隆选择算法的基础上,对传统免疫克隆选择算法进行了改进研究,提出了若干改进的免疫克隆选择算法,并将其应用于大气质量评价领域,得到了令人满意的结果。

大气质量预测是近几年环境科学中发展最快的研究领域之一。目前,在国内外通常采用的三种主要大气质量预测模型:潜势预测,统计预测和数值预测^[23]。其中统计预测和数值预测在实际应用中较为常用。虽然上述三种预测方法在现实应用中具有可行性等优点,然而也存在着一些不足,例如潜势预测、统计预测的数学模型较为复杂,预测结果欠佳等。数值预测方法具有投资成本高,技术难度大,见效慢和周期长的特点^[24]。

统计预测是在数理统计的基础上,以大气中的各种污染物浓度数据和资料,结合同期的气象数据为依据建立的预测模式。统计预测包括:利用过去的大气污染物数据进行分析预测,挖掘其内在规律的多元回归法;剖析以往的大气污染物浓度与气象形势之间的内在联系,挖掘出各种天气类型的大气污染物浓度在时间、空间上的分布规律的分类法;根据污染物变化的特点,通过对历史数据的变化趋势和规律进行分析,对其内在变化规律特征进行挖掘,实现对未来大气污染物的变化进行推断的趋势外延法。

此外,针对大气污染物数据具有空间范围大,时间跨度长,原始数据较为离散等诸多特点,是一个多因素多层次的复杂系统。国内外学者还采用其他预测方法,如灰色预测法。灰色预测法是运用灰色系统理论建模方法,把大气环境看作一个灰色系统,以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”的不确定性系统做为研究对象。将所有的随机变量看作在一定范围内的时间和空间上变化的灰色量,将整个随机过程看成是在一定范围内变化的与时间有关的灰色过程。在通过对已知信息的加工和处理,提取和抽取其中有价值的信息,实现对大气污染物的变化和演化过程的正确认识和有效控制^[25]。

目前,越来越多的大气环境专家与学者将智能的理论用于大气环境质量预测领域^[26-30]。在国外,1993年Boznar和Lesjak提出了利用人工神经网络的方法预测污染物 SO_2 ^[31];

在 1996 年, Yi 和 Prybutok 提出了利用神经网络的方法预测污染区臭氧的浓度^[32]等。在国内, 近年来也提出了多种基于智能方法的大气质量预测方法, 例如王俭和胡筱敏在 2006 年提出的基于 BP 模型的大气污染预报法^[33], 蒋华英在 2006 年提出的基于混沌理论的大气质量预测法^[22]等。本书在免疫克隆选择算法的基础上, 将提出的改进的免疫克隆选择算法用于大气质量预测领域, 获得了较好的结果。

1.3 本书主要研究内容

本书在智能计算的基础上, 针对人工神经网络、进化计算和人工免疫系统进行了研究, 重点是在人工免疫系统的基础上, 对免疫克隆选择算法及其基于此算法优化的神经网络等进行了理论研究和应用研究, 并将提出和改进后的算法应用到大气质量评价和大气质量预测领域, 其主要研究内容如下:

(1) 提出了引入疫苗接种策略的免疫克隆选择算法, 即 ICSA-VS 算法 (Immune Clonal Selection Algorithm Introduced into Vaccination Strategy)。在疫苗提取, 疫苗选取, 疫苗接种过程中引入了轮盘赌选择算法, 并构造了二进制位基因位选取和接种策略等方法。该方法既可保证抗体及基因在变异、交叉和接种过程中的随机性, 同时又提高了优良抗体和疫苗的接种概率, 使优良基因能够在子代抗体中得以继承和延续。本书提出的 ICSA-VS 算法具有随机性、自适应性、多样性等优点, 实现了免疫的自我调节功能。

(2) 提出了引入局部高斯变异算子的免疫克隆选择算法, 即 ICSA-LGMO 算法 (Immune Clonal Selection Algorithm Introduced into Local Gaussian Mutation Operator)。通过构造并引入局部高斯变异算子指导抗体基因变异。利用高斯变异的小步长不断地自适应调整与变换, 实现抗体基因在局部区间上的扰动, 搜索原抗体附近比原抗体更好满足问题的新抗体和基因。本书提出的 ICSA-LGMO 算法提高了问题求解的精度, 克服了传统免疫克隆选择算法局部搜索能力不佳的缺陷。

(3) 提出了引入疫苗接种策略和高斯变异算子的免疫克隆选择算法, 即 ICSA-VSLGMO 算法 (Immune Clonal Selection Algorithm Introduced into Vaccination Strategy and Local Gaussian Mutation Operator)。ICSA-VSLGMO 算法在充分发挥 ICSA-VS 算法和 ICSA-LGMO 算法各自优点的同时, 互相补充, 相互促进与提高, 局部搜索能力更为细腻, 求解的精度显著提高。

(4) 将 ICSA-VSLGMO 算法应用于大气质量评价领域。根据满足问题的目标函数对 S 型生长曲线指数 (大气污染损害率) 公式中的参数进行优化, 提出了一种基于免疫克隆选择算法的大气质量评价模型和对于多种大气污染物均适用的具有普适性的大气质量评价方法, 并应用提出的模型和评价方法对吉林省某城市的大气质量进行评价, 并进行了比较研究。结合国家《环境空气质量标准 (GB3095—1996)》确定五个级别相对应的大气污染损害率的目标值, 实验结果验证了本书提出的大气质量评价模型和评价方法用于大气质量评价领域是科学、可行的, 所得评价结果与 RPL 法、倍斜率聚类 (TSC) 法、模糊综合 (F) 法基本吻合, 与目前正在使用的 API 法得到的评价结果基本一致, 具有较好的实用性和应用前景。