

“十二五”国家重点图书出版规划项目

公共安全应急管理丛书

面向公共卫生管理的 传染病传播建模与仿真研究

梅 珊 王文广 朱一凡 何 华 赵翌瑾◎著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



公共安全应急管理丛书

面向公共卫生管理的 传染病传播建模与仿真研究

梅 珊 王文广 朱一凡 何 华 赵翌瑾◎著

国家自然科学基金面上项目（71373282）资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

为进一步构建和完善我国突发公共卫生事件应急管理体系,提高各级防控机构对突发公共卫生事件的处置能力和水平,本书围绕我国公共卫生长期需求,针对突发公共卫生事件的疾病传播过程建模和仿真、应急方案有效性评估、疫情监测时空统计分析展开研究,探索适应我国国情的突发公共卫生事件应急处置的理论和技術支撑。

本书内容翔实、图文并茂,许多问题的阐述结合实例,不仅可以为建模与仿真领域科技人员和高等院校建模与仿真专业或相近专业的研究生和高年级本科生的学习提供参考,也可以作为公共卫生和传染病防控管理实践的有益借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

面向公共卫生管理的传染病传播建模与仿真研究/梅珊等著. —北京:科学出版社, 2018.4

(公共安全应急管理丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-057076-5

I. ①面… II. ①梅… III. ①传染病-突发事件-危机管理-研究-中国 IV. ①R183

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第064444号

责任编辑:王丹妮/责任校对:严娜

责任印制:霍兵/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年4月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年4月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:204 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书编委会

主 编

范维澄 教 授 清华大学

郭重庆 教 授 同济大学

副主编

吴启迪 教 授 国家自然科学基金委员会管理科学部

闪淳昌 教授级高工 国家安全生产监督管理局

编 委 (按姓氏拼音排序)

曹河圻 研究员 国家自然科学基金委员会医学科学部

邓云峰 研究员 国家行政学院

杜兰萍 副局长 公安部消防局

高自友 教 授 国家自然科学基金委员会管理科学部

李湖生 研究员 中国安全生产科学研究院

李仰哲 局 长 国家发展和改革委员会经济运行调节局

李一军 教 授 国家自然科学基金委员会管理科学部

刘 克 研究员 国家自然科学基金委员会信息科学部

刘 奕 副教授 清华大学

刘铁民 研究员 中国安全生产科学研究院

陆俊华 副省长 海南省人民政府

孟小峰 教 授 中国人民大学

邱晓刚 教 授 国防科技大学

汪寿阳 研究员 中国科学院数学与系统科学研究院

王 垒 教 授 北京大学

王 宇 研究员 中国疾病预防控制中心

王飞跃 研究员 中国科学院自动化研究所

王岐东 研究员 国家自然科学基金委员会计划局

翁文国	教 授	清华大学
吴 刚	研究员	国家自然科学基金委员会管理科学部
杨列勋	研究员	国家自然科学基金委员会管理科学部
于景元	研究员	中国航天科技集团 710 所
张 辉	教 授	清华大学
张 维	教 授	天津大学
周晓林	教 授	北京大学
邹 铭	副部长	民政部

总 序

自美国“9·11”事件以来,国际社会对公共安全与应急管理的重视度迅速提升,各国政府、公众和专家学者都在重新思考如何应对突发事件的问题。当今世界,各种各样的突发事件越来越呈现出频繁发生、程度加剧、复杂复合等特点,给人类的安全和社会的稳定带来更大挑战。美国政府已将单纯的反恐战略提升到针对更广泛的突发事件应急管理的公共安全战略层面,美国国土安全部2002年发布的《国土安全国家战略》中将突发事件应对作为六个关键任务之一。欧盟委员会2006年通过了主题为“更好的世界,安全的欧洲”的欧盟安全战略并制订和实施了“欧洲安全研究计划”。我国的公共安全与应急管理自2003年抗击非典后受到从未有过的关注和重视。2006年和2007年,我国相继颁布实施了《国家突发公共事件总体应急预案》和《中华人民共和国突发事件应对法》,并在各个领域颁布了一系列有关公共安全与应急管理的政策性文件。2014年,我国正式成立“中央国家安全委员会”,习近平总书记担任委员会主席。2015年5月29日中共中央政治局就健全公共安全体系进行第二十三次集体学习。中共中央总书记习近平在主持学习时强调,公共安全连着千家万户,确保公共安全事关人民群众生命财产安全,事关改革发展稳定大局。这一系列举措,标志着我国对安全问题的重视程度提升到一个新的战略高度。

在科学研究领域,公共安全与应急管理研究的广度和深度迅速拓展,并在世界范围内得到高度重视。美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)资助的跨学科计划中,有五个与公共安全和应急管理有关,包括:①社会行为动力学;②人与自然耦合系统动力学;③爆炸探测预测前沿方法;④核探测技术;⑤支持国家安全的信息技术。欧盟框架计划第5~7期中均设有公共安全与应急管理的项目研究计划,如第5期(FP5)——人为与自然灾害的安全与应急管理,第6期(FP6)——开放型应急管理系统、面向风险管理的开放型空间数据系统、欧洲应急管理信息体系,第7期(FP7)——把安全作为一个独立领域。我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中首次把公共安全列为科技发展的11个重点领域之一;《国家自然科学基金“十一五”发展规划》把“社会系统与重大工程系统的危机/灾害控制”纳入优先发展领域;

国务院办公厅先后出台了《“十一五”期间国家突发公共事件应急体系建设规划》、《国家突发事件应急体系建设“十二五”规划》、《国家综合防灾减灾规划（2011—2015年）》和《关于加快应急产业发展的意见》等。在863、973等相关科技计划中也设立了一批公共安全领域的重大项目和优先资助方向。

针对国家公共安全与应急管理的重大需求和前沿基础科学研究的需求，国家自然科学基金委员会于2009年启动了“非常规突发事件应急管理研究”重大研究计划，遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路，围绕应急管理中的重大战略领域和方向开展创新性研究，通过顶层设计，着力凝练科学目标，积极促进学科交叉，培养创新人才。针对应急管理科学问题的多学科交叉特点，如应急决策研究中的信息融合、传播、分析处理等，以及应急决策和执行中的知识发现、非理性问题、行为偏差等涉及管理科学、信息科学、心理科学等多个学科的研究领域，重大研究计划在项目组织上加强若干关键问题的深入研究和集成，致力于实现应急管理若干重点领域和重要方向的跨域发展，提升我国应急管理基础研究原始创新能力，为我国应急管理实践提供科学支撑。重大研究计划自启动以来，已立项支持各类项目八十余项，稳定支持了一批来自不同学科、具有创新意识、思维活跃并立足于我国公共安全与应急管理领域的优秀科研队伍。百余所高校和科研院所参与了项目研究，培养了一批高水平研究力量，十余位科研人员获得国家自然科学基金“国家杰出青年科学基金”的资助及教育部“长江学者”特聘教授称号。在重大研究计划支持下，百余篇优秀学术论文发表在SCI/SSCI收录的管理、信息、心理领域的顶尖期刊上，在国内外知名出版社出版学术专著数十部，申请专利、登记软件著作权、制定标准规范等共计几十项。研究成果获得多项国家级和省部级科技奖。依托项目研究成果提出的十余项政策建议得到包括国务院总理等国家领导人的批示和多个政府部门的重视。研究成果直接应用于国家、部门、省市近十个“十二五”应急体系规划的制定。公共安全与应急管理基础研究的成果也直接推动了相关技术的研发，科技部在“十三五”重点专项中设立了公共安全方向，基础研究的相关成果为其提供了坚实的基础。

重大研究计划的启动和持续资助推动了我国公共安全与应急管理的学科建设，推动了“安全科学与工程”一级学科的设立，该一级学科下设有“安全与应急管理”二级学科。2012年公共安全领域的一级学会“公共安全科学技术学会”正式成立，为公共安全领域的科研和教育提供了更广阔的平台。在重大研究计划执行期间，还组织了多次大型国际学术会议，积极参与国际交流合作。在世界卫生组织的应急系统规划设计的招标中，我国学者组成的团队在与英、美等国家的技术团队的竞争中胜出，与世界卫生组织在应急系统的标准、设计等方面开展了密切合作。我国学者在应急平台方面的研究成果还应用于多个国家，取得了良好

的国际声誉。各类国际学术活动的开展,极大地提高了我国公共安全与应急管理在国际学术界的声望。

为了更广泛地和广大科研人员、应急管理工作以及关心、关注公共安全与应急管理问题的公众分享重大研究计划的研究成果,在国家自然科学基金委员会管理科学部的支持下,由科学出版社将优秀研究成果以丛书的方式汇集出版,希望能为公共安全与应急管理领域的研究和探索提供更有力的支持,并能广泛应用到实际工作中。

为了更好地汇集公共安全与应急管理的最新研究成果,本套丛书将以滚动的方式出版,紧跟研究前沿,力争把不同学科领域的学者在公共安全与应急管理研究上的集体智慧以最高效的方式呈现给读者。

重大研究计划指导专家组

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	公共卫生应急管理	1
1.2	传染病传播问题	2
1.3	传染病传播建模与仿真的常用方法	5
第 2 章	支持传染病传播建模和仿真的复杂 agent 网络方法	22
2.1	传染病传播建模分析	22
2.2	复杂 agent 网络方法	30
2.3	基于复杂 agent 网络的传染病传播过程建模	36
第 3 章	空气传播传染病城市扩散建模	54
3.1	空气传播传染病城市扩散建模问题分析	54
3.2	城市建模	56
3.3	虚拟人口建模	61
3.4	系统实现和实验	64
第 4 章	传染病传播仿真应用研究	67
4.1	传染病传播仿真系统	67
4.2	荷兰阿姆斯特丹男同性恋 HIV 流行病仿真应用	76
4.3	封闭高校内甲型 H1N1 流感传播仿真应用	89
第 5 章	基于时间影响网络的突发公共卫生事件应急方案有效性评估方法	96
5.1	时间影响网络理论基础	96
5.2	传染病防控的时间影响网络模型	103
5.3	传染病防控应急行动规则与应急效果评价	110
5.4	行动方案概率变化的传染病防控信息融合	117
第 6 章	基于时间影响网络的传染病防控应用案例研究	122
6.1	问题背景分析	122
6.2	初始方案	123
6.3	符合规则的方案	127

6.4 融合实时信息的方案.....	129
第 7 章 支持传染病疫情监测的时空统计分析模型.....	134
7.1 时间分析模型.....	134
7.2 空间分析模型.....	138
7.3 时空分析模型.....	145
7.4 时空分析模型案例研究.....	147
参考文献.....	150

第 1 章

绪 论

1.1 公共卫生应急管理

突发公共卫生事件 (public health accident, PHA) 是指可能发生或者已经发生的, 对社会大众的健康造成或者可能造成重大损失的传染病疫情以及不明原因的群体性疾病等。

突发公共卫生事件具有一定的共性, 主要包括突发性、意外性、群体性、严重危害性等。突发公共卫生事件一旦发生, 不仅威胁人类的生命安全, 损害人的身心健康, 还会造成严重的社会经济损失, 甚至导致国家或地区的形象受损, 影响社会稳定。因此, 构建与完善保障有力的突发公共卫生事件应急体系, 实现对突发公共卫生事件及时、有效的监测预警、应急处置、应急保障, 对提高卫生应急综合管理水平、最大限度地减少突发公共卫生事件对公众健康造成的危害、保障公众身心健康与生命财产安全、维护经济社会稳定等具有极其重要的意义。

当前我国正处于社会经济发展转型的关键时期, 其间出现的突发公共卫生事件, 如 SARS (severe acute respiratory syndrome, 传染性非典型肺炎)、禽流感、甲型 H1N1 流感等, 严重危害社会经济发展和人民身心健康。另外, 我国突发公共卫生事件的暴发频率和危害性呈逐年升高的趋势, 而公共危机管理应急体系仍显薄弱。自 2003 年我国出现 SARS 以后, 各级政府就开始重视对突发公共卫生事件应急管理的研究, 并且进行了相关应急措施、管理方法和制度等方面的建设, 通过了《突发公共卫生事件应急条例》等相关的规范性文件, 同时在加强相关应急机构的建设、监测预警和应急预案体系的建设和、应急专业队伍的建设、应

急知识的宣传等方面取得了很大的进展,从而使我国的突发公共卫生事件的应急能力得到很大的提升,并且使我国应急管理工作取得了很大的进展。

虽然我国突发公共卫生事件的应急管理水平不断增强,但在现实中还存在着许多问题,对公共卫生事件应急处置提出了新的挑战。应急处置难点主要表现在以下几个方面:一是突发公共卫生事件的防范难度越来越大;二是目前传染性的突发疾病越来越多,如空气污染等导致新的突发性疾病的产生;三是公共卫生的监测预警和信息网络还不完善,在现实中存在着各个部门协调不畅通、缺乏有效的沟通协调机制等问题;四是对应急专业人才队伍的建设还不够,培训质量还太差,模拟演练在培训中所占的比重太少,缺乏理论与实践的结合。

因此,为进一步构建和完善我国突发公共卫生事件应急管理体系,提高各级防控机构防控突发公共卫生事件的能力和水平,本书围绕我国公共卫生长期需求,针对突发公共卫生事件的疾病传播过程建模和仿真、应急方案有效性评估、疫情监测时空统计分析开展研究,探索适应我国国情的突发公共卫生事件应急处置的理论和技術支撑。

■ 1.2 传染病传播问题

1.2.1 传染病问题的特点分析

公共卫生事件通常引起突发性疾病及传染病扩散。传染病传播是由致病源在人与人或者人与动物之间传播引起的,这些致病源包括病毒(virus)、细菌、支原体等各种微生物。以病毒为例进行说明。病毒是一类非细胞形态的介于生命与非生命形式之间的物质,具有以下主要特征:①个体微小,大多数必须用电子显微镜才能看见;②只含有一种类型的核酸,DNA或RNA;③不能独立生活,必须靠寄生在其他生物的活细胞内才能生长繁殖;④具有受体连结蛋白(receptor binding protein),与敏感细胞表面的病毒受体连结,进而感染细胞。病毒感染人体后至人体发病前都有一段潜伏期,短者只有1~3天,如流感病毒;长者可达数月甚至数年,如狂犬病病毒和HIV(human immunodeficiency virus,人类免疫缺陷病毒)。病毒在自然界中分布很广,人、动物、植物、真菌和细菌等都可被病毒寄生而引起感染。病毒是引起人类传染病的重要病原体之一,由病毒引起的传染病数量远比细菌和其他微生物多,约占总数的3/4,如流行性感冒、肝炎、水痘、带状疱疹及艾滋病(acquired immunodeficiency syndrome, AIDS)等,这些致病病毒传染性强,可能引起大规模流行病。

病毒种类不同,传播途径也不同。以天花病毒和 HIV 为例进行说明。天花病毒主要通过空气传播,如 2 米范围内较长时间的面对面接触^①,或者床上用品和衣物的直接接触就可能导致传染;而 HIV 的传播途径主要包括性接触、静脉毒品注射、母婴传播和使用被污染的血产品。

病毒种类不同也决定了个体感染后的病程发展不同。例如,感染天花病毒的病人的病情发展可大致分为四个阶段^[1]:①无症状、无传染性且对疫苗敏感的第一阶段,持续 4 天左右;②无症状、无传染性且对疫苗不敏感的第二阶段,持续 8 天左右;③有(发烧等)前驱症状、有(低)传染性且对疫苗不敏感的第三阶段,持续 2~4 天;④有(皮疹)症状的第四阶段,1 天左右皮疹将会发至全身,之后这个阶段持续 3 个星期左右。

传染病主要由病毒传播引起,病毒本身的传播特点以及人与人之间的交互方式决定了所引发的传染病或流行病的扩散动态性。对于自然发生的传染病而言,如流感、SARS 和 HIV/AIDS 等,人们与此类致病病毒(或变体)的抗争由来已久,积累了一定的经验和统计数据。以 HIV/AIDS 为例,它已成为当今世界最受关注的传染病之一,在全世界范围内广泛流行,人类对这种大规模流行病积累了大量的研究和统计数据,联合国艾滋病规划署(The United Nations Joint Programme on HIV/AIDS, UNAIDS)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)每年联合发布各国发病情况统计报告。而对于生物恐怖袭击导致的传染病而言,由于医学人员对恐怖分子可能采用的烈性病毒,如天花病毒^①和炭疽热病毒^②等缺乏传染病学数据,并且生物恐怖袭击鲜有发生且很少发展为大规模传染病,因此如何对这类传染病扩散展开研究并防范生物恐怖袭击,具有较大难度。

无论针对自然发生的传染病还是生物恐怖袭击导致的传染病,研究疾病传播引起的传染病扩散问题的目的都可归结为以下几点。

(1) 研究在潜在疾病扩散范围(疫区)内,传染病在人群中的传播动态性,并试图分析影响传染病扩散的不同因子的重要性。

(2) 传染病通过人群交互进行传播具有不同的途径和特点,研究其如何影响传染病的扩散范围和速度。

(3) 制定和实施公共卫生控制措施,以降低和遏制传染病扩散的影响。疾病类型不同,对制定政策的要求会有所不同。例如,天花病毒等的传播是在较短时间内(数天)迅速扩散,造成危害和恐慌,因此需要从速掌握其扩散规律并制定相关策略;而 HIV 则有所不同,首先它的传播不是那么迅速,其次它不会造成

① Smallpox. <http://en.wikipedia.org/wiki/Smallpox>, 2009.

② Anthrax. <http://en.wikipedia.org/wiki/Anthrax>, 2009.

大范围的恐慌,因此需要从长远的角度来考虑对它的控制。

然而,研究疾病传播引起的传染病扩散问题存在诸多困难。传染病的人类临床实验是不可能进行的,且历史上在人类中的传染病传播实验都是不人道的;通过动物实验可以获得一些数据,但这与传染病在人类中的传播存在差别;传染病扩散的特点在很大程度上取决于病原体的特征,由于无法对传染病感染人体的过程进行实验,因此只能利用有限且不完全的历史统计数据。

计算机建模与仿真能够模拟个体内部的运行机理,探索个体之间、个体与环境之间的交互关系对系统的影响,可以预演或再现系统的运行规律,并对系统进行评价和优化设计。此外,对无法直接进行实验的系统进行计算机建模与仿真,能够节省大量的人力物力资源和费用。因此,利用计算机建模和仿真对不可在真实世界进行实验的传染病扩散进行模拟和预测,是研究传染病传播动态性并在此基础上支持公共卫生控制措施制定的一种有效途径。

1.2.2 构成复杂系统的传染病传播危险人群

自然界中广泛存在由无数个体组合而成的具有无限多样性和复杂性的事物,被统称为复杂系统。它们区别于一般中、小系统和简单系统,具有高阶次(或高维数)、多回路、非线性、多时空、层次性、开放性和不确定性等特点^[2]。

复杂系统的诸多特点从本质上聚合体现为涌现性^[2]。涌现性是指复杂系统的组分之间存在着相互作用而形成复杂结构,在表现组分特性的同时,还传递着作为整体而新产生的特性。也就是说,诸多部分一旦按照某种方式形成系统,就会产生出系统整体具有而部分或部分总和不具有的属性、特征、行为及功能等,而一旦把整体还原为不相干的各部分,则这些属性、特征、行为及功能等便不复存在。这些高层次具有而还原到低层次就不复存在的特点被称为复杂系统的涌现性。

复杂性科学的发展进一步揭示了涌现性与系统层次之间复杂的因果关系,多层次是复杂系统必须具有的一种组织方式,层次结构是系统复杂性的基本来源之一^[3]。高层次具有低层次没有的特性;低层次隶属和支撑高层次,高层次包含或支配低层次。高层次具有低层次没有的涌现性,一旦还原为低层次,这种涌现性就不复存在。

传染病传播危险人群构成一个复杂系统,可将其划分为个体层和群体层两个层次来探讨系统的涌现性。传染病传播危险人群包含的个体数量众多,个体之间的非线性相互作用聚合成群体层可观测到的涌现性。这些涌现性在传染病传播研究中体现为流行病学意义上的对传染病流行程度的度量。在个体(微观)层次,可简化地描述个体的状态及行为规则,以及个体在行为过程中发生交互需要满足的条件。在群体(宏观)层次,可观察到个体之间的交互复杂多变,并可在群体

范围计算人群中传染病的流行程度。根据个体的行为和规律,不可推导和预测系统的整体行为,同时宏观层次的系统现象也是不能够完全用个体的行为和规律解释的。

复杂系统的涌现性具有以下特征^[4]。

(1) 复杂系统涌现性表现为一种整体模式(global pattern)的出现。涌现性的一个最基本的特征就是系统具有了其组成部分所不具有的一种整体性质。整体模式的形成是复杂系统涌现性的一个基本特征。

(2) 复杂系统的涌现性表现为“从简单中生成复杂”的新特性,霍兰以“简单中孕育着复杂”作为涌现的基本特征。

(3) 复杂系统涌现性具有一种非迭代模拟的不可推导性和不可预测性。复杂系统的涌现性具有不可预测性是指研究者不能从低层次的组成个体及其行为规则演绎地推出高层次系统的性质或行为。并且复杂性科学揭示:涌现性的这种不可推导性或不可预测性主要源于系统本身所具有的复杂性,是微观层次的大量非线性相互作用和作用环境相关(context-dependent)的结果。

(4) 复杂系统涌现性表现为高层次具有下向因果作用和不可还原性。“所谓下向因果关系(downward causation)原理就是处于层级的低层次的所有过程受到高层次规律的约束,并遵照这些规律行事。”也就是说,在进化突现的过程中,整体模式的形成,会对低层次的个体产生一种下向因果作用。另外,即使在原则上从系统的组成部分及其结合方式也无法推出系统S具有性质P,用低层次组分及其规律不能完全解释和替代宏观层次规律。

因此,传染病传播危险人群作为一个复杂系统,具有系统层次的整体模式,如传染病能否在疫区范围内流行及其流程度,这些整体模式是否出现并不能由个体如何被感染的局部规则完全决定。系统行为具有不可推导性和不可预测性,不能从个体如何被感染的局部行为推断出传染病是否流行的系统行为。此外,系统行为的变化也会对个体行为产生影响。例如,当个体知晓传染病正大肆流行时,会改变自身行为以降低被其他个体感染的概率。

■ 1.3 传染病传播建模与仿真的常用方法

1.3.1 系统动力学建模方法

基于微分方程组的系统动力学建模方法是用来模拟传染病发展的传统实验方法之一,主要包括 SIR(susceptible-infective-recovered/removed)模型、SIS

(susceptible-infective-susceptible) 模型、SIRP (susceptible-infected-recovered-partially immune) 模型和 SEIR (susceptible-exposed-infectious-removed) 模型等。

1) SIR 模型

最简单的流行病传播系统动力学模型是 Lowell Reed 和 Wade Hampton Frost 在 20 世纪 20 年代提出的 SIR 模型, 该模型将作为研究对象的群体分为以下三类^[5,6]。

(1) 易感染的 (susceptible), 即他们目前没有感染疾病, 但是如果跟有病的人接触, 他们可能也感染。

(2) 有传染性的 (infective), 即他们已经感染此疾病, 并能传染给他人。

(3) 已痊愈的 (recovered), 即他们已痊愈并具备永久免疫性, 因此他们不会再得此病和传染他人; 或者移除的 (removed), 即病人有可能死于此疾病, 并从有传染性的群体中移出。

在传统的基于数学的流行病学研究中, 假设任何易感染的个体, 在每单位时间内被任何有传染性的个体感染疾病的均匀概率为 β ; 有传染性的个体, 以某一固定的常数速率 γ 痊愈并获得免疫能力, 或者说以这个常数速率死亡。那么, 群体中处于易感染 S、有传染性 I 和已痊愈 (或移除的) R 状态的个体比例为 s 、 i 和 r , 最简单的形式可以用常微分方程组表示, 如式 (1.1) 所示。

$$\frac{ds}{dt} = -\beta is, \quad \frac{di}{dt} = \beta is - \gamma i, \quad \frac{dr}{dt} = \gamma i \quad (1.1)$$

定义一个有效传播强度 $\lambda = \beta/\gamma$ 。传统的疾病传播理论发现存在一个大于零的传播强度阈值 λ_c , 当传播强度 $\lambda \geq \lambda_c$ 时疾病将传播开来并持久存在; 当传播强度 $\lambda < \lambda_c$ 时疾病以指数的速度很快消亡。同时, 科学家们通过理论分析和大量的实验发现 λ_c 是一个不算小的值, 这对于控制疾病的传播来说是一个好消息, 表明可以通过降低疾病的传播强度至 λ_c 以下的方法来有效抑制疾病的传播扩散。

2) SIS 模型

不是所有疾病都能使痊愈者获得免疫能力, 如研究比较多的肺结核和淋病。在这种情况下, 痊愈的病人从有传染性的群体移到易感染的群体中, 而不是移到已痊愈的或移除的群体中, 具有这种动态性的模型被称为 SIS 模型。最简单的形式可以用式 (1.2) 的常微分方程组表示:

$$\frac{ds}{dt} = -\beta is + \gamma i, \quad \frac{di}{dt} = \beta is - \gamma i \quad (1.2)$$

其中, β 和 γ 的意义与 SIR 模型中的一致, 分别代表感染率和痊愈率。

3) 其他模型

其他同类模型还包括 SIRP^[7,8] 模型、SEIR^[9,10] 模型和 SI (susceptible-infected) 模型等, 这里不再一一讨论。

很多研究采用系统动力学建立传染病传播模型。2003 年 SARS 大规模暴发以

后,人们对其传播和发展趋势进行了大量的研究。方兆本等对 SARS 流行规律进行建模和预报^[11]; Zhou 等建立了描述我国 SARS 传播与控制的数学模型^[12];时培建等围绕 SARS 传播问题,建立并分析了传统的传染病模型,得出 SARS 传播的规律^[13];刘建清等根据北京疫情的有关数据进行研究,给出 SARS 病毒传播的 SIR 模型^[14]等;王拉娣深入研究了传染病动力学模型以及控制传染病的策略两类问题^[15];白颖建立了以 SARS 为代表的传染病流行过程系统动力学模型以及广州市定点医院治疗 SARS 病人的过程模型,并考虑防控措施因素的影响^[16]。

1.3.2 基于多 agent 系统的方法

1. 多 agent 系统

基于 agent 的建模 (agent-based modeling), 又称基于个体的建模 (individual-based modeling), 用于自底向上、从个别到整体、从微观到宏观来研究复杂系统的复杂性。期望通过低层次具有简单行为的个体 (如生物领域的人体、器官、细胞、分子, 军事领域的无人驾驶飞行器等) 模型, 表现系统级复杂的、无法预测的并且合乎实际的涌现行为。

基于 agent 的建模和仿真 (agent-based modeling and simulation, ABMS) 是一种实验技巧和框架^[17], 可以对研究的系统进行假设限定, 建立满足特定精度、分辨率和逼真度要求的模型以表示个体的行为及交互, 然后在计算机上进行仿真实验, 支持对复杂系统的研究。基于 ABMS 方法所建立的仿真系统称为多 agent 系统。

多 agent 系统属于分布人工智能和分布计算的交叉研究领域, 是一种普遍公认的研究和解决复杂系统问题的有效途径, 也是当前建模和仿真领域的研究热点之一。多 agent 系统是一个由多个互相交互的 agent 构成的系统, 即使每个 agent 的单独策略非常简单, 也可以体现系统的非线性的自组织和复杂行为。Heylighen 将自组织定义为“最初互不依赖的个体之间的局部交互, 引起的自然产生的全局一致性涌现行为”^[18]。在传染病建模领域, 可以将传染病通过个体之间的物理接触传播, 能否导致传染病流行以及流行程度强弱, 理解为对这个群体进行建模而得到的多 agent 系统的一种自组织和涌现行为。

多 agent 系统具有以下几个突出特点^[19]。

(1) 组成系统的个体数量众多, 个体之间以及个体与环境之间的交互非常复杂, 各个体遵循符合自身利益和目标的决策规则, 执行相应的动作。

(2) 个体行为向上聚合成系统行为, 但二者不具备线性关系, 因而采用分析 (将系统分解为其组成部分) 方法难以达到预期研究目标^[20]。

(3) 自适应意味着系统中的个体可以感知环境, 根据预定义的目标和当前状