

元胞自动机及其在传染病防控领域中的应用

毕雪¹, 苏弘博², 郭佳慧³, 黄德生⁴, 关鹏¹

1 中国医科大学公共卫生学院流行病学教研室(沈阳, 110001); 2 中国医科大学 97 期七年制临床医学(沈阳, 110001);
3 中国医科大学 98 期七年制临床医学(沈阳, 110001); 4 中国医科大学基础医学院数学教研室(沈阳, 110001)

摘要:元胞自动机是一种时间、空间和状态都离散的动力系统, 可以对事件的发展趋势进行模拟。本文就元胞自动机的历史、现况和前景以及元胞自动机在各个领域, 特别是在传染病领域的应用展开了全面的阐述, 为该领域的科研人员提供参考。

关键词:传染病; 元胞自动机; 应用

Cellular Automata and its application in the field of infectious disease control

BI Xue, SU Hong-bo, GUO Jia-hui

Department of Epidemiology, School of Public Health, China Medical University, Shenyang
110001, Liaoning

Abstract:Cellular Automata is a dynamical system with discrete time, space and states, which has been applied to simulate the development trend of events. This article described the history of cellular automata, current status and prospects as well as its application in various fields, especially in the field of infectious disease control, with the aim to provide reference for disease control professionals.

Key words: infectious diseases; Cellular Automata; application

基金:国家自然科学基金项目(71073175)

作者简介:毕雪(1988-), 女, 汉族, 辽宁丹东人, 硕士研究生; 研究方向: 传染病流行病学

通讯作者:关鹏, 教授。E-mail: pguan@mail.cmu.edu.cn

随着科学技术的进步和社会的发展，在大多数国家和地区传染性疾病已不再是引起死亡的首要病因，但仍然面临着老传染病持续存在、曾一度被控制的传染病又死灰复燃、新传染病不断涌现、病原体的耐药性急剧增加等威胁和挑战。了解传染性疾病的相关分布规律并进行适当的时空演化过程仿真有助于探索疾病可能的危险因素和有效的防控措施，模拟传染性疾病传播特征的数学模型由此应运而生^[1,2]。以微分方程为主的两种决定性数学模型在许多传染性疾病的防控中得到了应用，其两种基本模式为考虑免疫的 SIR 模型(Susceptible Infected Removed, SIR)和不考虑免疫的 SIS 模型(Susceptible Infected Susceptible, SIS)。由于现实世界中与传染病相关的各类数据之间具有复杂的关系，交织成网络并呈现出复杂的动力特性，网络动力学模型的应用范围日益扩大。其中，一种空间、时间、状态完全离散的非线性动力系统模型—元胞自动机(Cellular Automata，简称 CA)成为复杂系统和网络研究的有力工具。元胞自动机也称细胞自动机、点格自动机、分子自动机或单元自动机，它是在 20 世纪 40 年代末期，Von Neumann 从逻辑数学的角度出发模拟生物体自我繁殖系统时，将递归和自动机概念有机结合的产物，最早模型为具有 29 个状态，以 5 个元胞为邻居的可自我复制的离散动力学系统。在此基础之上，剑桥大学的 Conway^[3]于 1968 年开始用不同的二维元胞自动机规则做实验，并于 1970 年归纳出被称为“生命游戏”的多种简单规则来展示元胞自动机的多种复杂行为，开启了元胞自动机应用于实践的新篇章。受制于当时计算机能力的限制，20 世纪 80 年代才由 Wolfmanm 进行系统研究后将其动力学行为划分为平稳型、周期型、混沌型和复杂型四大类，由此引发元胞自动机在复杂系统建模与模拟中的广泛应用^[4]，见图 1。



图 1 元胞自动机分型及在各领域中的应用

1 元胞自动机基本概述

元胞自动机是一种时间、空间和状态均离散的动力系统，其最基本的组成部分包括元胞（Cell）、元胞空间（Lattice）、邻居（Neighbour）、规则（Rule）和时间（Time）^[5]。一个元胞自动机由元胞、元胞空间、邻居及局部演化规则四部分组成，可用如下四元组表示^[6]：

$$C=(Ld, S, N, F)$$

C 为一个元胞自动机；

L 代表元胞空间，元胞空间是由分布在其中的空间格点所组成的集合，元胞空间的集合划分用 Ld 表示，它代表一个规则划分的 d 维网格空间，每个网格单元即是一个元胞；元胞自动机的几何划分可以是任意维数的欧几里德空间。目前常用的元胞自动机一般为一维和二维。一维元胞空间划分只有一种形式，二维元胞空间划分为三角形、正方形和六边形三种。二维元胞自动机模型最常见的邻居定义是 Moore 型邻居和 Von Neumann 型邻居。元胞空间在理论上应该是无限的，但实际应用中无法满足这一理想条件，常用的四种边界条件是：周期型，定值型、绝热型和反射型^[7]，二维元胞自动机模型示意图见图 2。

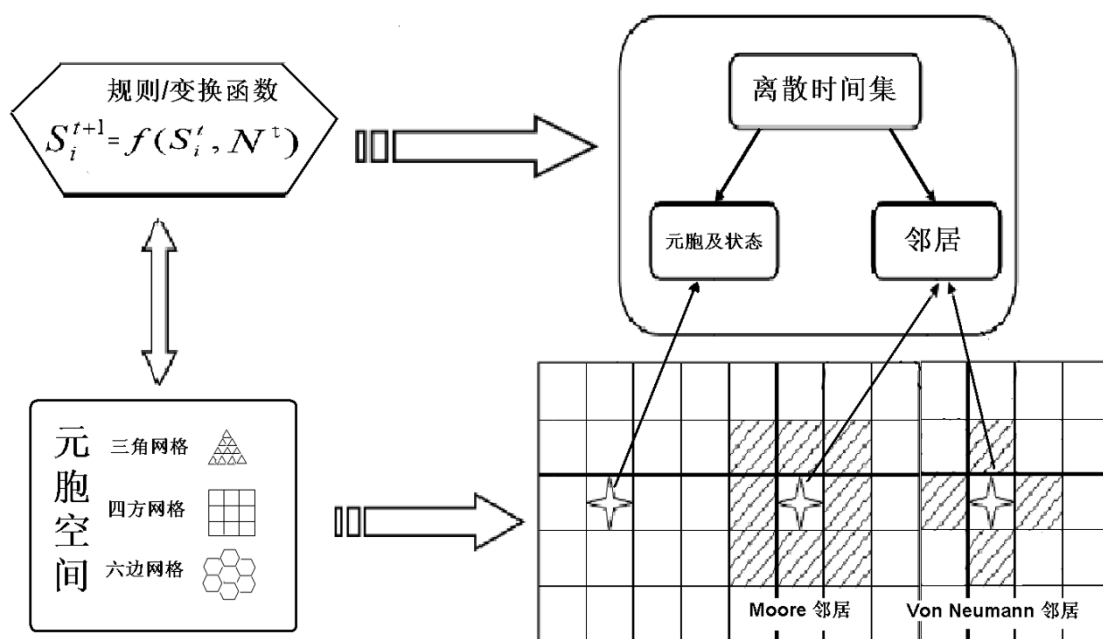


图 2 元胞自动机结构示意图

2 元胞自动机在传染病领域中的应用进展

传统微分方程对初始条件较为敏感，其主要共同点是假定背景人群均匀分布，且个体之间的交互概率相等，而现实生活中很难满足这一理想条件。同时微分方程是对传染病在时间上的传播特征进行建模，忽略了个体本身的差异及其所处的空间环境的差异，难以考虑传染病空间流行过程中的局部特征和空间上的变化特征，也不能处理复杂的边界条件和初始化条件^[8,9]。和微分方程相比，元胞自动机只需确定相对简单的局部演化规则，多步迭代和并行演化后即可获得模拟结果，同时可对复杂的时空演化过程进行演示。上述简单、方便的特性使其在传染病领域中得到有效的应用，显示出其良好的应用前景。近十年来元胞自动机在中国大陆地区传染性疾病预防领域的主要应用见表 1，主要集中在传染性疾病中的甲型流行性感冒，传染性非典型肺炎（SARS）、水痘、肺结核和艾滋病（AIDS）等五种疾病防控中的应用。元胞自动机也有其局限性，它在模拟社会网络在传染性疾病的流行过程中的作用时仍显薄弱，因为它要求每个状态的变化必须是邻近的，并不允许非邻近的行为^[10]。同时由于疾病传播的实际背景空间通常是形状和大小都不规则的空间实体，采用规则格网来模拟本质上不规则的背景空间也不合适^[11]。相关领域的

专业人员已尝试根据研究目的和所收集数据的分布特征，将元胞自动机和传统的 SIR 模型或地理信息系统联合应用以提高模拟仿真的精度和降低预测风险^[15-18]。例如当两元胞并非邻近的元胞且考虑存在传播通道时，可扩展距离定义并计算空间相关性的权重^[11]，或者采用扩大半径的方式使两者距离在研究半径内，距离的定义或半径的确定均根据目标疾病的实际传播特点而定。

表 1. 元胞自动机在传染病领域中的应用进展

序号	第一作者，发表年份	传染性疾病类型	主要研究内容	作者提及的可能局限性或建模要求
1	王仲君，2014 ^[12]	HIV 感染	从年龄结构和传染能力等方面入手，考虑元胞间是否有致病性接触行为及致病性接触行为的次数对 HIV 在普通人群和高危人群中的传播行为	未考虑个体出生与死亡，迁入及迁出等因素
2	王锰，2014 ^[13]	杭州下沙大学城大学生水痘传播模拟	探讨不同水痘感染概率、不同初始感染人数、不同时间隔离对水痘传播的影响	水痘传播模型需多次演化并结合临床实际情况方可相对精确获得相关参数值
3	张飞，2013 ^[14]	2005-2006 年成都市结核病疫情	元胞自动机与 GIS 结合，寻找发病热点区域、空间分布模式，模拟结核病传染的时空演进	需要基于结核病的发病特点和层次分析法归纳主要影响要素并确定各地区要素的分级
4	李光亮，2013 ^[15]	某大学校园 25 个班级，某传染病流行情况模拟	隔离措施对传染病疫情发展的仿真模拟（与 SIR 模型结合）	未考虑潜伏期患者是否具有传染性
5	谭欣欣，2013 ^[19]	中国 2009 年甲型 H1N1 暴发事件	建立同时具有异质性和移动性的 SEIR 传染病传播模型，考察种群移动比例和种群移动最大距离对传染病传播的影响（与 SEIR 模型结合，SEIR: Susceptible Exposed Infective Recovered）	对于初始状态的设置，局部演化规则的设置、邻居模式的选择还可以进一步探讨
6	陕振沛，2013 ^[20]	广东甲型 H1N1 事件	甲型 H1N1 的流行过程模拟	系统空间采用虚拟的分布均匀的正方形网格，与实际地理空间有差距，且现实社会中人口分布并非均匀
7	杨青，2012 ^[12]	广东甲型 H1N1 事件	改变传递效率、潜伏期长度、元胞基因长度以及防御措施的力度对疫情流行情况的影响	模型中系统空间为虚拟的分布均匀的正方形网格，与实际地理空间有

				差距，且现实社会中人口分布并非均匀
8	潘志方，2011 ^[21]	AIDS	AIDS 传播情况的仿真模拟	需为每个元胞的不同状态空间赋值、设置基本传染数和有效病例、隔离强度和随机不确定因子
9	游爱丽，2010 ^[16]	某地区甲型 H1N1 流行情况	基于 SIR 元胞自动机模型对甲型 H1N1 流感传播过程进行模拟（与 SIR 模型相结合）	模型需完善以扩展到一般的传染病传播过程模拟
10	贺明峰，2008 ^[22]	SARS	探讨抵抗能力、传染能力、人群的大小等对传染规模和传染时间的影响	可进一步探讨如隔离，重点传染源的影响等问题
11	李璐，2008 ^[23]	HIV/AIDS	模拟人群数量和个体移动性变化时为疾病传播过程的影响（扩展了邻域的概念）	外推时应考虑其他传染病的传播特点
12	郑鑫，2007 ^[17]	2003 年北京 SARS	基于 GIS 的元胞自动机模型模拟 SARS 的传播	实际应用中需在简单性和真实性之间寻找平衡点
13	余雷，2007 ^[24]	2003 年北京 SARS	流行过程模拟，探讨人员移动比例和就医时间等对影响因素对疾病传播的影响	模型需要完善以扩展到更为一般的传染病传播过程模拟
14	刘建清，2006 ^[18]	北京公布的某年 4 月 20-29 日 SARS 疫情数据	SARS 传播过程的仿真模拟（与 SIR 模型结合）	仅从宏观上反映 SARS 的传播规律，缺少对疾病微观上特别是疑似病例的发展变化的研究

3 讨论

现实世界中传染病防控模拟面临着诸多挑战,譬如如何在社会网络中联系程度和行为方式等因素的动态变化中综合、全面分析传染病的流行过程和趋势。传染病防控相关的数据包括传染源的健康相关行为和活动范围、干预措施、易感人群特征,病原体的传染力、致病力、毒力等数据,各数据之间的复杂关系的探寻依赖于完善的传染性疾病预防数据和相应研究方法的改进与发展。本研究通过介绍元胞自动机在传染性疾病预防中的应用,了解了该方法在该领域中的适用范围和潜在的局限性,为传染病相关防控体系中的理论工具的完善提供了参考和借鉴。设计思想源自于生物学自繁殖现象的元胞自动机已经成为复杂性研究中网络动力学的经典代表,预计今后将在传染性疾病的防控领域有更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 张靳冬, 张建陶, 钱建东, 等. 常州市细菌性痢疾发病趋势灰色模型 GM(1,1)预测[J]. 实用预防医学, 2013, 20(3):310-311.
- [2] 代翔宇, 高立冬, 于凤江, 等. 遥感技术结合宿主动物监测的肾综合征出血热多元时间序列模型研究[J]. 实用预防医学, 2013, 20(6):665-669.
- [3] Conway JH. On Numbers and Games[M]. London: A K Peters, 1976.
- [4] Wolfmanm S. Theory and application of Cellular Automata[M]. Singapore: The World Scientific Publishing Co, Ltd, 1986.
- [5] 赵伟, 王宏志, 李峰. 基于传染疾病防控的 GIS 构架实现[J]. 价值工程, 2012, (30):177-178.
- [6] 薛惠锋, 吴晓军, 解丹蕊, 等. 复杂性人工生命研究方法导论[M]. 国防工业出版社, 第一版, 2007.
- [7] 孙德山. 元胞自动机研究进展[J]. 五邑大学学报(自然科学版). 2011, 25(4):22-28.
- [8] Sirakoulis GC, Karafyllidis I, Thanailakis A. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation[J]. Ecological Modelling,

2000, 133:209-223.

- [9] 杨青,杨帆. 基于元胞自动机的突发传染病事件演化模型[J]. 系统工程学报, 2012, 27(6):727-738.
- [10] Bandini S, Worsch, T. Theory and Practical Issues on Cellular Automata: Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Karlsruhe, 4-6 October 2000 Paperback[M]. 1st Edition. Springer, 2000:108-116.
- [11] 钟少波, 张毛磊, 郑金勇, 等. 基于空间实体的传染病蔓延模拟研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(18):190-193.
- [12] 王仲君,张莉丽. 具有年龄结构的异质元胞自动机 HIV 传播模型[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2014, 36(2):145-149.
- [13] 王锰,曹毅,余土根,等. 基于元胞自动机的水痘传播演化模拟[J]. 中华医院感染学杂志, 2014, 24(10):2512-2514.
- [14] 张飞,褚永彬. 基于 GIS 地理空间认知的结核病预防分析与推理研究[J]. 科技经济市场, 2013, (4):79-81.
- [15] 李光亮, 温利华, 闫俊霞, 等.基于元胞自动机的传染病传播模拟研究[J]. 长江大学学报, 2013, 10(25):85-87.
- [16] 游爱丽, 闫萍. 基于元胞自动机的甲型 H1N1 流感病毒的模型[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2010, 27(1):56-59.
- [17] 郑鑫. GIS 与元胞自动机模型应用探讨[J]. 南阳师范学院学报, 2007, 6(3):55-58.
- [18] 刘建清, 王江荣, 王庆龄, 等. 以 SARS 为例的传染病传播模型[J]. 兰州石化职业技术学院学报, 2006, 6(4):27-29.
- [19] 谭欣欣, 戴钦武, 史鹏燕, 等. 基于元胞自动机的个体移动异质性传染病传播模型[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(6):908-914.
- [20] 陕振沛, 宁宝权, 郭亚丹. 采用元胞自动机的甲型 H1N1 流感传播模型研究[J]. 2013, 25(2):73-76.

- [21] 潘志方, 杨峰, 沈琴晓. 基于元胞自动机的艾滋病传播模型研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2011, 28(3):479-483.
- [22] 贺明峰, 邓成瑞. 基于元胞自动机的 SARS 传播模型[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(3):41-46.
- [23] 李璐, 宣慧玉, 高宝俊. 基于元胞自动机的异质个体 HIV/AIDS 传播模型[J]. 系统管理学报, 2008, 17(6):704-710.
- [24] 余雷, 薛惠锋, 高晓燕,等. 基于元胞自动机的传染病传播模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(2):196-198.