中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 3 期: 290 ~ 304
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

城市公共安全应急响应动态地理模拟研究

李强[①], 顾朝林[②*]

① 中国人民解放军 95806 部队, 北京 100076;
② 清华大学建筑学院, 北京 100084
* 联系人, E-mail: gucl@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2014-03-28; 接受日期: 2015-01-06; 网络版发表日期: 2015-02-11
国家高技术研究发展计划项目(编号: 2013AA122302)资助

摘要 在复杂性科学研究的启示下, 将用于复杂地理空间系统建模与仿真的地理模拟系统(GSS)理论引入城市公共安全应急领域, 研究了大范围城市公共安全应急响应模拟的技术方法, 提出了基于第二代地理模拟系统——多智能体系统(MAS)和地理信息系统(GIS)的城市公共安全应急响应模型框架, 完成应急响应多智能模型体系架构、应急智能体个体结构、应急环境描述方法、多智能体模拟环境工作原理和多智能体模型在计算机上实现的关键技术研究, 构建了模拟系统平台原型. 采集北京市原城八区基础地理数据为实验数据, 以假想的突发事件为背景进行了城市公共安全应急响应的复杂过程模拟实验, 验证了运用地理模拟系统的空间动态建模方法构建城市公共安全应急响应系统的可操作性和技术体系的可行性. 文章认为: 复杂系统理论和复杂适应性系统理论可以为城市公共安全应急响应的复杂动态过程研究提供理论框架, 复杂系统动态仿真方法和现代空间信息技术可以成为城市公共安全应急响应系统构建的方法论和技术支持, 基于多智能体和 GIS 的应急响应模型是城市公共安全应急响应研究的关键技术, 在实际的城市公共安全应急响应模拟时, 基于 Repast 和 Geotools 实现多智能体系统与 GIS 系统的紧密集成, 基于 JTS 实现空间数据分析, 以及基于 Terracotta 集群技术解决大运算量数据处理至关重要.

关键词
城市公共安全应急响应系统
地理模拟系统(GSS)
多智能体系统(MAS)
应急指挥决策
城市安全规划

我国正处在快速城镇化进程时期, 这既增强了城市防灾、抗灾和救灾的能力, 也增加了城市自然和社会公共安全事件发生的频率, 同时随着我国在世界上影响力的增加, 我国城市公共安全面临日趋复杂和严峻的局面, 传统的应急处置城市公共安全事件方法已不能适应客观需求. 本文根据我国城市公共安全应急的特点和当前国际上模拟仿真科学的最新发展, 将用于复杂地理空间系统建模的地理模拟系统(Geographical Simulation Systems, GSS)理论应用于城市应急模拟, 研究大范围城市公共安全应急响应动态模拟的技术方法, 构建基于动态地理模拟技术的城市公共安全应急响应模拟系统, 为建立新

中文引用格式: 李强, 顾朝林. 2015. 城市公共安全应急响应动态地理模拟研究. 中国科学: 地球科学, 45: 290–304
英文引用格式: Li Q, Gu C L. 2015. Dynamic geographical simulation for urban public Safety emergency response (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 45: 290–304

的城市应急指挥决策机制和城市安全规划模式进行基础研究.

1 现状与进展

1.1 城市公共安全应急系统发展状况

在西方发达国家或地区, 近年来大都建立了多种抗御自然和人为灾害的应急响应系统(表1), 这些系统通过有效地识别和管理各种突发事件的风险, 提供了快速的应急决策支持. 我国于2005年开始重视城市公共安全应急工作, 国务院召开了"全国应急管理工作会议"并提出"重视运用科技应对突发公共事件的能力"[1]. 2006年国务院颁布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》, 把公共安全作为独立领域进行战略研究并制定规划纲要, 同时颁布《国家突发公共事件总体应急预案》, 逐步建成国家防汛抗旱指挥系统、国家安全生产信息系统、疾病和突发公共卫生事件网络直报系统等, 也有20多个城市着手建立城市应急系统. 然而, 这些城市应急系统只是实现了系统的互联互通、灾情上报、数据交换与共享等, 系统和应急信息资源尚未有效整合, 系统的核心功能——应急决策支持还没有实现, 因此迫切需要引入新的技术辅助实现城市公共安全应急响应处置. 2014年国家科技部又颁布"十三五"科技支撑研究项目"城镇重大灾害和事故应急处置关键技术研发及示范"进行重点研究.

1.2 城市公共安全应急系统技术发展

(ⅰ) 城市空间属性的静态格网模拟研究. 地理学家和地理信息科学家采取分类、区划、插值和图谱等方法, 建立了描述城市空间的各种地理特征变量的静态格网模型, 为动态城市模拟提供了数据基础. 其中, 一类研究采用统计分析、地理叠置分析和比较分析等方法, 如宗跃光等(2002)采取两个时段的TM影像对北京城市扩展空间模式的研究; 另一类则是采用遥感、地理信息系统技术, 采集人口、土地利用、陆地生态系统等自然和经济要素, 建立全国尺度1 km×1 km格网数据图(刘纪远, 2003; 田永中等, 2004; 廖顺宝和李泽辉, 2003).

(ⅱ) CGE与GIS集成的城市模拟模型研究. 20世纪60年代阿隆索(Alonso, 1964)和罗利(Lowry和Ira, 1964)分别提出区位竞租模型和城市土地利用与交通集成模型. 进入20世纪70年代, 随着数量经济学的发展, 与新古典经济学一般均衡分析对应的可计算一般均衡模型(CGE, Computable General Equilibrium)日渐成熟, 为了模拟城市与区域经济的发展, 区域和多区域甚至空间化的CGE模型被逐步开发出来(Iwan等, 1998; Kilkenny, 1999). 20世纪80年代, 国外学者开始运用自组织和协同理论开展城市的人口分布、产业演化、设施分布、空间模式和交通行为等研究(Zeleny, 1980; Batten, 1982; Allen等, 1984; Pumain等, 1986). 20世纪90年代以来, 随着计算机技术和海量数据可得, 集成CGE和局部均衡模型的空间网络式的CGE模型被成功开发(Löfgren和Robinson, 1999), 世界银行也主

表 1 主要西方发达国家或地区应急响应系统一览表 [a)]

应急系统名称	主持方	作用
全球应急联动系统	美国联邦应急联动署	同国际系统连接, 进行灾害管理, 减灾、风险管理、灾害科研等
NIMS系统	美国	通过法制化的手段, 将完备的危机应对计划、高效的核心协调机构、全面的危机应对网络和成熟的社会应对能力包容在体系中
全球危机和应急网络	加拿大应急联运署	建立全球应急准备、响应系统, 提供减灾和恢复方面的信息
ERISK系统	欧盟	基于卫星通信的网络基础构架, 为其成员国实现跨国、跨专业、跨警种, 高效及时地处理突发公共事件和自然灾害提供支持服务
deNIS系统	德国	评估灾难的现状情势和面临的问题, 分析应该采取什么样的方法来保护公众的人生安全
模块化紧急管理系统	挪威、法国、芬兰、丹麦四国	一个包括环境信息、公众保护、在线培训和遇灾反应的集成平台
日本灾害响应系统(DRS)	日本	灾情预警与应急指挥系统的灾害视听系统和应急对策显示系统

a) 资料来源: 赛迪顾问, 2008-01

1) 中国政府网. 温家宝总理在全国应急管理工作会议上的讲话. 2005-07-23. http://www.gov.cn

持开发了大区域宏观经济CGE模型, 如土耳其CGE模型、韩国CGE模型和喀麦隆CGE模型, 城市研究者也试图将城市与区域经济学模型与空间分析技术结合起来建立一套可运行的城市模拟模型(Klosterman, 1994; Hubacek和Sun, 2001). 尽管上述研究在多区域CGE模型(MRCGE)或空间CGE模型(SCGE)的建立和应用上做了有益的工作, 但是, 这些模型的基本空间单元仍然是某种类型的"区域", 还不是真正意义上的城市空间模拟模型. 我国学者也将CGE模型应用于宏观经济预测以及金融、财政、产业和环境等方面的政策分析(王劲峰等, 2000; 张伟和顾朝林, 2000; 李雪松, 2000; 周焯华等, 2002; 蒋金荷和姚愉芳, 2002; 黄季焜和李宁辉, 2003; 周建军和王韬, 2002; 李洪心和付伯颖, 2004), 其中黄季焜等开发了基于CGE的"中国农业及非农业可持续发展决策支持系统", 并把CAPSiM和CGE及GTAP三大模型联结起来, 成功将农业CGE模型与计算机模拟结合, 无疑为试图将CGE与城市模拟结合的研究框架提供可行性经验示范.

(iii) 地理模拟系统研究. 黎夏等(2007)最早提出地理模拟系统的概念, 其核心是建立地理模型, 通过模拟实验的手段来对复杂地理现象进行模拟和预测. 将GSS写成:

$$GSS_{t+1}\sim\{MSE_t, SI_t, N_t\}, \quad (1)$$

式中, MSE_t代表t时刻GSS里面的微观空间实体; SI_t代表t时刻微观空间实体之间的交互作用; N_t代表t时刻微观空间实体的邻域. 微观空间实体(Micro-Spatial-Entities, MSE)、空间关系和时间是GSS的核心要素. 微观空间实体对应于现实世界的空间个体或地理对象, 又分为活动的空间实体(Activated-Spatial-Entities, ASE)如人、车辆等和固定空间实体(Fixed-Spatial-Entities, FSE)如建筑、道路等; 空间关系主要是指微观实体的交互作用; GSS采用离散的方式处理时间, 有利于用计算机来构建模型. 在众多复杂系统建模sss与仿真方法中, 元胞自动机(Cellular Automaton, CA)和多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)由于其独特的建模思路, 以及与地理模拟相契合特点, 使其成为GSS建模的主要方法, CA和MAS也被分别称为第一代和第二代地理模拟系统.

(iv) CA及基于CA的城市空间动态分析模型研究. CA是一种具有自组织行为的时空离散、状态离散的并行数学模型, 经常被用于复杂系统研究. 1979年Tobler首次正式将CA用来模拟当时美国五大湖区底特律城市的发展(Tobler, 1979), 深入地揭示了城市空间动力学机制和复杂性, 剖析城市内部横向地理空间单元之间的相互作用机制. 到20世纪90年代, 怀特(White和Engelen, 1993)和巴蒂(Batty和Longley, 1994a; Batty和Xie, 1994b)利用CA的方法发展了基于空间参考的城市动态分析和可视化工具, 并将CA模型较好地与基于栅格的地理信息处理技术和编程技术结合起来构建城市空间增长模拟模型. 巴蒂结合GIS的建模方法, 主张运用分形城市、元胞自动机和代理人等科学范式, 理解混沌边缘等城市现象的动态性、渐进性与复杂性, 采用自下而上可视化的多情景分析模拟城市空间增殖的模式和状态, 提出了诸如耗散结构城市、协同城市、分形城市和网络城市等原型城市模型. 在国内, 周成虎等(1999)利用CA研究了城市的空间发展演化, 构建了GeoCA-Urban模型, 并提出了地理元胞自动机(GeoCA)的概念; 黎夏等(1999)研究了全局的、区域的、局部的约束条件对CA模拟过程的影响, 利用约束性CA对可持续城市发展形态进行模拟, 何春阳等(2005)利用CA对城市土地利用演化进行研究. 然而, 由于CA模型对各种自然和社会经济因素之间反馈关系相对忽视, 基于CA的城市动态建模在很大程度上被简化成了某种格网空间上各种"空间转换规则"的设计(薛领等, 2004).

(v) 基于智能体的城市空间模拟模型研究. 20世纪70年代初, 谢林(Schelling, 1971)设计了隔离模型(Segregation model)被认为是空间智能体的雏形, 这一由棋盘所模拟的"城市"经历了一个微观互动的自组织过程, 充分体现了"从不稳定产生秩序"的原理(薛领等, 2004). 由于智能体之间能够采取通讯、学习和交互等方式适应环境的动态变化, 并与环境共同演进, 传统人工智能研究突破了单纯注重个体智能而忽视集体智能的局限性, 智能体理论成为复杂系统研究的新手段(项后军和周昌乐, 2001; Wooldridge和Jennings, 1995). 人工智能科学(AI)推动了复杂系统理论应用于城乡地理空间的研究, 但直到20世纪90年代以后基于多智能体的建模研究才逐渐增多, 如班奈森(Benenson, 1998; Benenson等, 2002)采用多智能体模型模拟了城市空间演化的自组织现象和城镇居民的种族隔离和居住分异现象. Portugali (2000)运用自组织和协同原理, 系统阐述了自组织城

市的概念, 提出基于元胞空间智能体框架的FACS模型. Ligtenberg等(2001)提出了一种基于元胞自动机和多智能体相结合的土地利用规划模型. 布朗等(Brown, 2003)利用多智能体模型模拟了城郊边缘地区的居住区开发. 在国内, 薛领等(2003)在Swarm环境下采用多智能体建模方法设计了一个城市演化模型; 张凡等(2005)利用多智能体模型对城市等级体系和城市职能分工的形成进行研究; 杨青生等(2005)利用多智能体模型和CA进行了城市土地变化研究. 但上述这些模型大多数还只是概念模型, 能够应用于真实世界模拟的模型非常有限. 从技术角度看, 直到最近, 大多数的空间多智能体研究仍然是采用类似于CA的规则网格, 智能体在这些网格间移动, 它们的运行环境不是基于真实世界的地理空间环境(Batty, 2013; Szell, 2014). MAS与GIS的紧密耦合或集成仍然是目前地理模拟系统研究需要解决的重要问题.

1.3 城市公共安全应急响应模拟技术及其不足

目前国际上在城市应急指挥系统建设以及城市安全规划方面, 主要采用动态、定量分析方法与计算机模拟仿真技术相结合, 建立科学高效的应急指挥决策系统. 进行城市公共安全和突发事件的数字仿真, 可以帮助人们掌握事件的动态演变规律和原因, 分析事件对人员、建筑物、经济和环境的影响, 为减灾防灾措施的制定及城市安全规划提供参考; 而对事件发生后的应急响应过程进行模拟, 则可以帮助人们理解应急响应复杂的动态过程, 分析应急响应过程中人类的复杂行为特征以及各种应急措施的有效性和可行性, 提高应急决策水平和应急响应能力. “9·11”事件以后, 美国大力加强了应急技术研发和集成应用, 在灾害数字仿真方面开发了多种模型用于灾害分析及模拟, 如用于飓风造成的海浪计算的SLOSH (Sea, Lake, Overland.Surge from Hurricanes)模型、用于危险化学品泄漏模拟的ALOHA模型、用于多灾种祸合模拟的HAZUS模型等. 在应急响应模拟方面比较著名的是由美国纽约大学灾难准备与响应中心(CCPR)大范围应急准备项目组(The Large Scale Emergency Readiness Project, LaSER)开发的PLAN C(Planning with Large Agent-Networks against Catastrophes)模型[2)], PLAN C是一个进行城市灾害模拟和应急计划的软件平台, 各种基于现实的智能体可以在真实的城市地图上进行交互, 从而模拟不同的重大灾害事件应急响应复杂的动态过程. 从国内的研究看, 目前在灾害数字仿真模拟方面的研究相当零散, 不成体系. 涉及城市公共安全应急响应的计算机模拟仿真也刚刚开始, 如杨立中等(2002)研究了火灾场景下基于元胞自动机的人员逃生模型, 一些研究单位, 如东北大学(张培红等, 2001)、北京师范大学(陈晋等, 2000)、中国科技大学火灾科学国家重点实验室(杨立中等, 2004)等也研究建立了一些人员紧急疏散模型. 但受各种条件的影响, 我国在公共安全应急模拟方面的研究还远远落后于发达国家, 目前还未能建立完善的模型和生产出具有应用价值的软件.

2 方法

2.1 多智能体系统和模型构建

为了给应急决策者和应急管理者深入理解应急响应复杂动态过程、掌握应急响应的动态规律, 城市公共安全应急响应系统构建采用多智能体系统和模型.

(ⅰ) 多智能体系统. 多智能体系统, 简单地说, 就是由多个可以相互交互的智能体所组成的系统. 多智能体系统中的智能体一般都有一个或多个特征值, 智能体之间能够进行交互作用, 使得系统整体具有进化、演化和涌现规律. 通常在一个多智能体系统中, 既有能够代表现实行为主体的活动智能体, 也有代表环境或资源不能活动的智能体.

(ⅱ) 多智能体模型. 构建一个多智能体系统, 需要对实际系统进行复杂性分析和以仿真为目标的需求分析, 将各类微观个体抽象为相应的智能体(Agent)类, 建立智能体模型. 应用多智能体系统, 对生物、生态和社会、经济等复杂系统建立动态模型的研究方法, 被称为基于多智能体的建模方法(Agent-Based Modeliong, ABM或Multi-agent Based Modeling, MABM), 所建立的系统模型即为多智能体模型.

(iii) 多智能体建模. 多智能体建模采取由底向

2) NYU-CCPR. Planning with Large Agent-NetworksAgainst Catastrophes (Plan-C). 2008-02-02. http://www.bioinformatics.nyu.edu/Projects/planc

上的建模方法. 首先, 在对目标系统复杂特征和仿真需求分析的基础上, 抽象出组成系统的静态和动态微观个体, 采用相关的智能体构造技术建立每个个体的智能体模型. 其次, 采用合适的多智能体系统体系架构来组装这些个体智能体, 建立起整个系统仿真模型. 在多智能体系统中, 通过各智能体间的通讯、合作、冲突、协调、调度、管理和控制, 表达实际目标系统的结构、功能和行为特征.

(1) 微观智能体的构建. 微观智能体的构建涉及两方面的问题, 一是系统中微观个体的识别, 即将系统中的什么映射为智能体. 二是智能体的内部模型的构造, 即智能体的内部结构组成. 从计算角度看智能体是一个计算实体, 具有属于自身的资源, 能够感知环境信息, 根据内部的行为控制机制确定应采取的行动, 智能体的行动实施后, 将对自身状态和环境状态产生影响. 要实现这样的智能体, 可以采用不同的结构. 所谓结构就是定义智能体的基本成分以及各成分之间的关系和交互机制, 主要有三种基本形式, 认知型(Cognitive)或慎思型(Deliberative)体系结构、反应式(Reactive)体系结构和复合型(Hybrid)体系结构(史忠植, 2002).

(2) 多智能体系统构建. 在构建所有的微观智能体对象之后, 多智能体建模的下一步工作就是要从宏观层面来考虑如何建立多智能体的体系结构, 即将这些微观智能体分布到模拟仿真环境中, 使它们可以在组织和协调规则下运行(表2).

2.2 应急响应多智能体建模

由于基于多智能体的建模与仿真方法能够从微观个体的相互作用产生宏观全局的格局, 从而可以更好地理解城市现象, 发现现象背后的形成机制, 因此在城市空间演化、人口迁移、交通控制、突发公共事件应急、环境资源管理、公共设施选址及可持续发展等问题研究方面都可以发挥独特作用. 尤其就城市公共安全应急响应系统而言, 可以通过定义如人、医院、消防车、救护车和现场处置点等微观智能体及其行为规则, 结合GIS和多智能体系统的仿真模型, 使其在GIS提供的真实地理空间环境中相互作用, 从而模拟事件发生时城市居民和救援资源之间的相互作用关系, 捕捉其内在的复杂性, 使公共健康、医疗和应急管理的专家以及城市规划师可以模拟、分析和理解公共安全事件发生的过程, 从而提高城市应对突发事件的能力.

(ⅰ) 基于多智能体的城市公共安全应急响应模型框架. 应急响应是城市公共安全应急管理的一个阶段, 是灾难事件后的处置与救援. 因此从管理学的角度看, 可以把应急响应看作是城市居民及救援力量在一定的时间、空间和社会背景下进行的一种有组织的活动. 受到灾难影响的城市居民和实施救援的救援力量是这一活动的基本主体, 将其称之为“应急单元”. 灾难波及的区域范围, 是“应急单元”作用的空间和社会背景, 统称为“应急环境”. 由于灾难事件的破坏性、不可重复性, 应急响应实战演习组织的困难性和花费巨大, 以及一次实验不足以反应统计规律等不利因素, 将应急响应过程抽象为应急响应模型, 通过模型模拟对应急响应过程进行分析, 可以为应急决策和指挥提供科学依据. 应急响应模拟, 是在一定空间范围和条件下, 对已经发生或可能发生的紧急事件的应急响应过程的再现或预测, 是对城市居民和救援力量在应急响应过程中的行为仿真.

根据上述分析, 基于多智能体的应急响应模型可以用一个四元组来定义:

<ER, EREM, ERA, ERMP> (2)

式中, ER为突发公共事件模型, EREM为应急环境模型, ERA为应急智能体, EMP为应急响应模型参数. 它们共同形成基于多智能体的城市应急响应模型理论框架(图1).

(1) 应急智能体. 城市居民及救援力量是应急

表 2 多智能体系统构建

组成	功能	描述
1. 环境	智能体的运作与生存的基础	多智能体模型的重要组成部分, 是真实空间在模型空间上的虚拟映射, 可以采用的数据结构包括抽象的网格空间、连续空间以及基于GIS的真实地理空间等
2. 结构	将个体间关系转化成多智能体系统模型表达	现实中的个体存在着各种各样的关系, 如交通系统中的节点间的连接关系、作战系统中的指挥关系, 组织团体中的上下级关系等, 结构实现这些关系在计算机中的表达, 组成与实际系统相符合的人工社会
3. 通信	智能体间的交互手段	定义智能体间消息发送与接收机制、消息的内容格式等
4. 协调	实现智能体间的协作或消除冲突	智能体在运行的过程中存在许多正面和负面交互关系, 协调机制实现了智能体间的协作或消除冲突

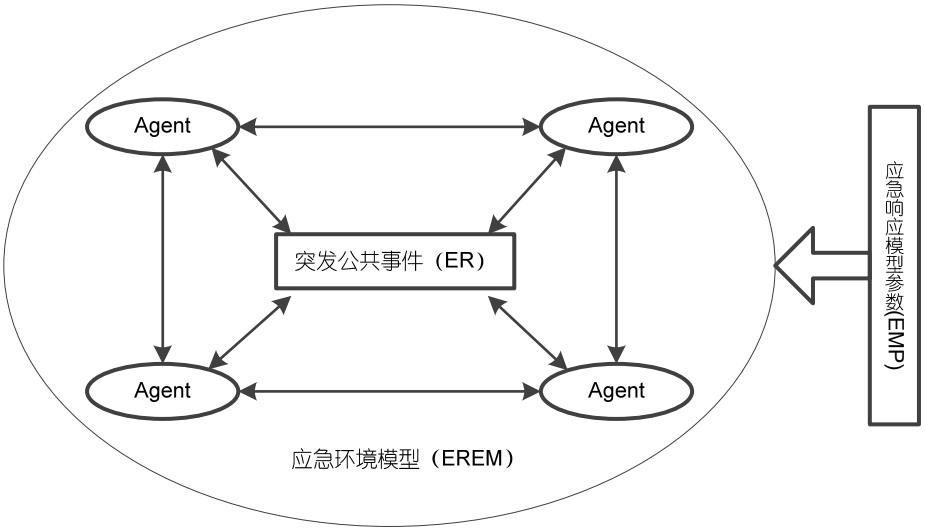


图 1　基于多智能体的应急响应模型基本结构

响应中的基本单元. 显然, 人具有自主行为能力, 可以根据自身的状况及所处的环境做出不同的行为选择. 而救援力量, 不管是救援车辆, 还是医院, 现场处置小组也都是由一定的团体或个人控制的具有一定行为能力的主体, 因此把应急响应过程中的受到事件影响的城市居民以及救援力量抽象为一类智能体, 称为应急智能体. 应急智能体是应急响应模型中的行为主体, 是模型最基本的、核心元素.

(2) 应急环境模型.　应急环境是应急单元生存和运行的空间和社会背景. 应急环境模型, 就是对组成应急背景的自然环境和社会环境的描述. 应急智能体的行为可以改变环境状态, 而应急环境状态的改变反过来又作用于应急智能体.

(3) 突发公共事件模型.　突发公共事件模型, 就是实际发生或假设发生的灾害或灾难的数字仿真模型.

(4) 应急响应模型参数.　为了控制模型的运行, 以及对模拟结果的分析, 需要设置相应的模型参数. 应急响应模型参数, 就是对应急响应模拟的初始条件、中间控制和仿真结果的描述, 分为控制参数和观测参数两类. 控制参数主要由一组用于设置仿真运行初始条件的环境变量构成. 如突发公共事件的地点、各种应急智能体的初始数量、仿真开始与结束的时间条件、仿真时钟的推进步长等. 观测参数主要由一组反映应急智能体、应急环境的状态转移过程的统计分析变量构成. 如受影响居民的健康状态变化, 医院的资源状态变化, 救援车辆的行程等, 以及根据仿真的目的而定义的其他变量.

(ⅱ) 应急智能体模型. 应急智能体是应急响应模型的核心组成元素, 是应急响应过程的行为主体, 在模型运行状态下, 它能根据自身状态和环境参数做出响应, 从事各种活动, 进行状态转换, 从而在宏观上体现出应急响应复杂动态过程. 本文设计的城市公共安全应急响应系统的应急智能体模型结构如图2, 由标识、状态、知识、通信、个性和行为6部分组成(表3), 其工作原理如图3.

2.3　多智能体建模仿真平台的构建

多智能体建模仿真平台是开展多智能体模拟的基础. 除了通用编程语言外, 还包括多智能体开发工具、复杂系统仿真框架、复杂系统仿真平台以及专用仿真工具.

(ⅰ) 多智能体开发工具.　多智能体开发工具主要针对网络环境, 主要目的是实现异构分布式计算. 目前包括智能体语言、可重用包/类库、开发工具和开发平台等, 其中开发平台提供了比较完整的功能, 如图形化建模、编程环境和调试工具等, 使用比较方便. 比较著名的多智能体开发平台包括ADK, Agent-Builder, AgentFactory, JADE, JACK和Zeus等. 多智能体开发工具为智能体的建模、设计、实现、运行和监视等提供了很好的支持. 利用这些功能能够大大减少实现多智能体仿真计算平台的工作量、降低

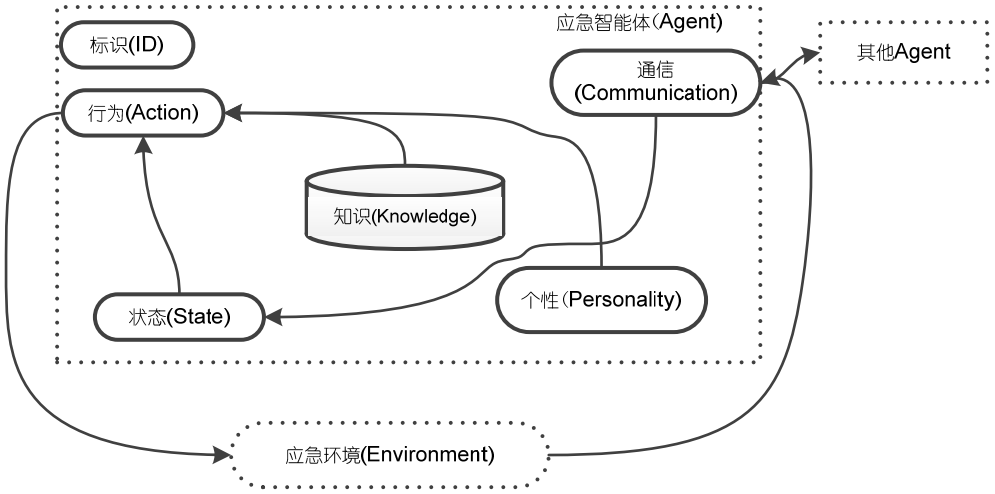


图 2　应急智能体模型结构

表 3　应急智能体模型构成

要素	功能
1. 标识(ID)	用于区别不同的应急智能体, 每个应急智能体都有一个唯一的标识
2. 状态(State)	应急智能体的属性集合, 包括智能体当前的自身状态信息, 如当前的位置, 人的健康程度, 救援力量的资源状况等, 还包括智能体已经采取的决定和计划等, 如居民是在去往医院还是在去往最初的目标等
3. 知识(Knowledge)	存储在智能体中的一些规则和智能算法, 用于智能体做出决策, 如医院的救治策略, 居民的路线选择算法等; 另外, 本文中对于智能体所获得的环境信息也作为其所具有的知识存储, 用于对环境作出判断, 依据环境状态而采取不同的行动
4. 通信(Communication)	应急智能体从环境中获取信息以及与其他智能体进行信息交换的接口. 应急智能体可以通过持有通信工具, 获取环境中广播的信息, 如交通状况, 医院状态等, 也可以通过与其他智能体交谈更新自己的状态信息
5. 个性(Personality)	不同种类的应急智能体所特有的个性参数, 如人的担忧度、顺从度等, 反应人在紧急情况下的心理; 如医院设定的紧急、严重、康复等的阀值, 以区分不同病人健康程度
6. 行为(Action)	应急智能体依据其所扮演的角色, 可以采取的行动. 如居民根据选定的路线前往目的地, 医院根据救治策略对病人进行施救等. 这些行为将在模拟过程的每一个周期中依据触发条件决定是否被执行

技术难度.

(ⅱ) 复杂系统仿真框架. 以Swarm为代表, 它们不针对特定领域, 而是提供一组设计和描述多智能体建模仿真的概念, 同时提供支持实现该框架的软件包. 研究人员采用这些概念设计仿真模型、编写程序, 程序中通过调用仿真框架提供的类库和工具实现仿真计算平台.

(iii) 复杂系统仿真平台. 以NetLogo为代表, 主要目的是克服仿真框架的易用性差的问题, 将实验管理工具、运行控制工具和仿真动态显示工具与开发环境集成在一起, 为复杂系统研究者提供一个概念简单、建模灵活和使用方便的仿真工具. 目前比较优秀的仿真平台除了NetLogo还有AgentSheets, Cormas和SeSAm等.

(iv) 专用仿真工具. 专门针对特定类型的复杂系统的研究而开发的仿真工具, 这些工具针对这些复杂系统, 通过输入参数、自定义规则等驱动程序运行, 为研究这些特定系统提供了方便. 如用于交通分析的TRANSSIMS、用于经济系统仿真的Aspen、用于政治交互和论争的PS-I等.

(ⅴ) 城市公共安全应急响应模拟平台框架. 城市公共安全应急响应模拟系统的开发, 由于地理空间概念的加入, 以及模拟的空间尺度, 参与个体数量等, 使通用仿真平台和专用仿真工具都不能满足研究的需要. 同时考虑到系统未来的应用, 还要兼顾其未来与城市应急指挥平台以及决策支持等系统的集成, 需要对系统具有完全的控制能力, 因此也不允许采用通用仿真平台来实现. 根据这些特点, 构建既要满足多智能体建模与仿真的可靠性、可信性, 同时又要兼顾系统的扩展性的模拟系统, 仿真框架无疑是

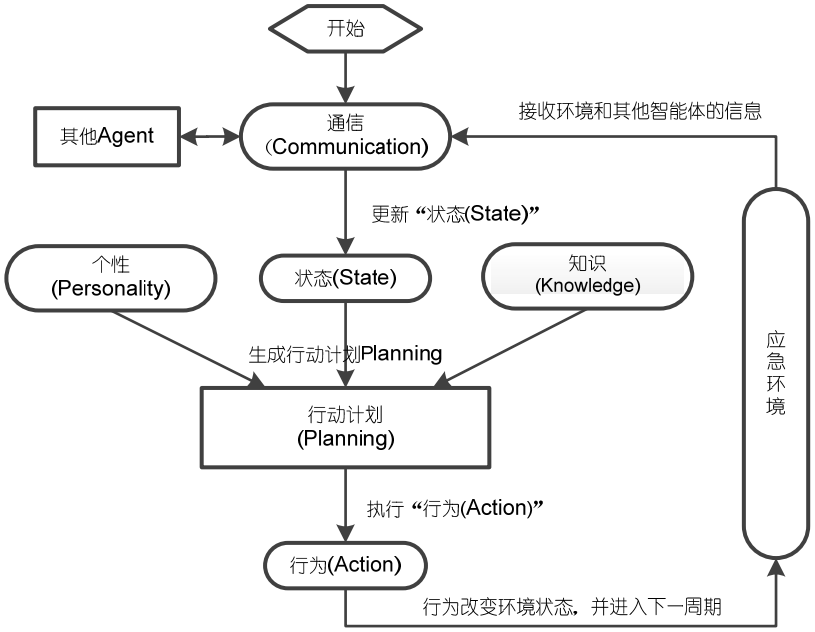


图 3　应急智能体模型工作原理

最佳的选择. 对于多智能体仿真平台构建, 以通用性好、扩展能力强的仿真框架为核心, 采用通用集成开发环境, 充分利用第三方类库, 特别是开源软件, 集成多种方法实现面向城市公共安全应急响应的计算机仿真实验平台. 本文选择Repast S做为多智能体计算机仿真平台开发的核心框架, 并集成Geotools和Terracotta等成熟的Java第三方插件和类库, 开发设计城市公共安全应急响应模拟平台(图4).

2.4　空间多智能体的实现

(ⅰ) GIS与MAS的集成方法. 当多智能体模拟需要在地理空间中进行时, GIS系统与多智能体建模与仿真系统的集成便成为核心问题. 但如何实现两者的集成, 却是一个相当困难的问题, 主要原因是GIS不是一个理想的动态建模平台. 许多学者对二者的集成进行了研究(Goodchild, 2005; Maguire, 2005; Bernard和Krüger, 2000; Westervelt, 2002), 主要的方法可以分为两类, 一种称为耦合(Coupling), 另外一种称为嵌入(Embeding)或集成(Intergration). 本文以建模软件为中心, 采用GIS软件类库实现系统GIS功能的Modelling-centric方法来实现模拟平台中GIS与MAS的集成, 即以Repast S仿真框架为核心, 集成Geotools和JTS, 实现基于真实地理空间数据的应急响应模型(Repast S中GIS的表达方法及智能体沿GIS路线行进的算法见附录1和2, http:earth.scichina.com).

(ⅱ) GIS与MAS集群运算的实现. 由于模拟是以城市为背景的, 在模拟的过程中, 涉及的微观个体(Agent)种类繁杂、数量巨大, 其活动空间广阔, 同时各智能体的行为又为并发执行, 因此造成运算量大, 运行速度缓慢, 甚至无法运行. 解决大运算量, 提高计算机应用系统的运行速度, 本次将一组独立的计算机配置成一个集群系统, 构建海量数据处理与运算功能块, 采用由美国Terracotta公司开发的开源Java集群平台(图5).

Repast S本质上是一个单机的仿真框架, Terracotta集群技术为提高多智能体仿真平台的计算能力和实现大规模模拟提供了解决方案. 通过Repast S与Terracotta集成, 可以将大量的并发执行的智能体分布到网络环境中闲散的PC机上, 使单机无法解决的大运算量计算问题通过计算机集群而得以解决.

在城市公共安全应急响应模型中, 造成运行速度缓慢的主要原因是模型中智能体数量众多, 而这些智能体的行为又是在时间上离散的并发行为, 在一个模拟时间片中所有的智能体行为都要触发一次, 也即在一个模拟周期中要求所有的智能体必须完成它的规定动作后, 模拟才能进入下一个周期. 这样随

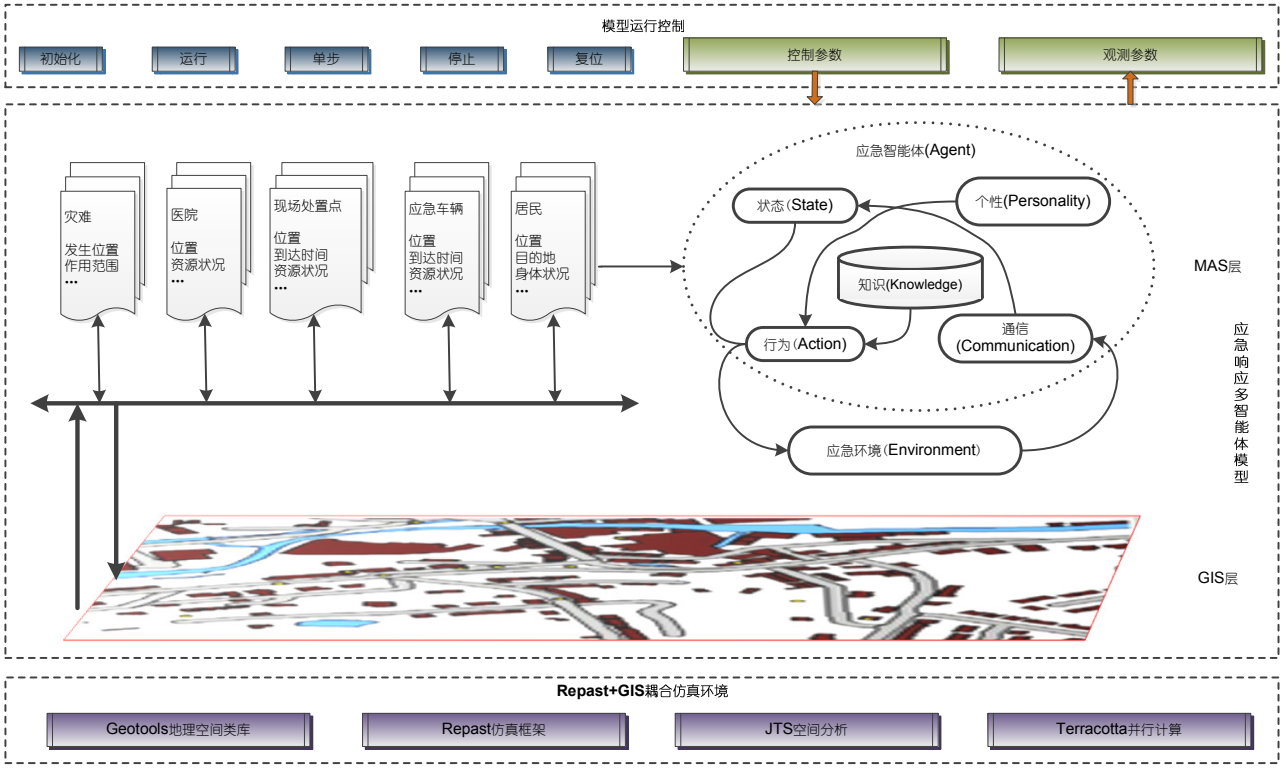


图 4　城市公共安应急响应模拟系统构成图

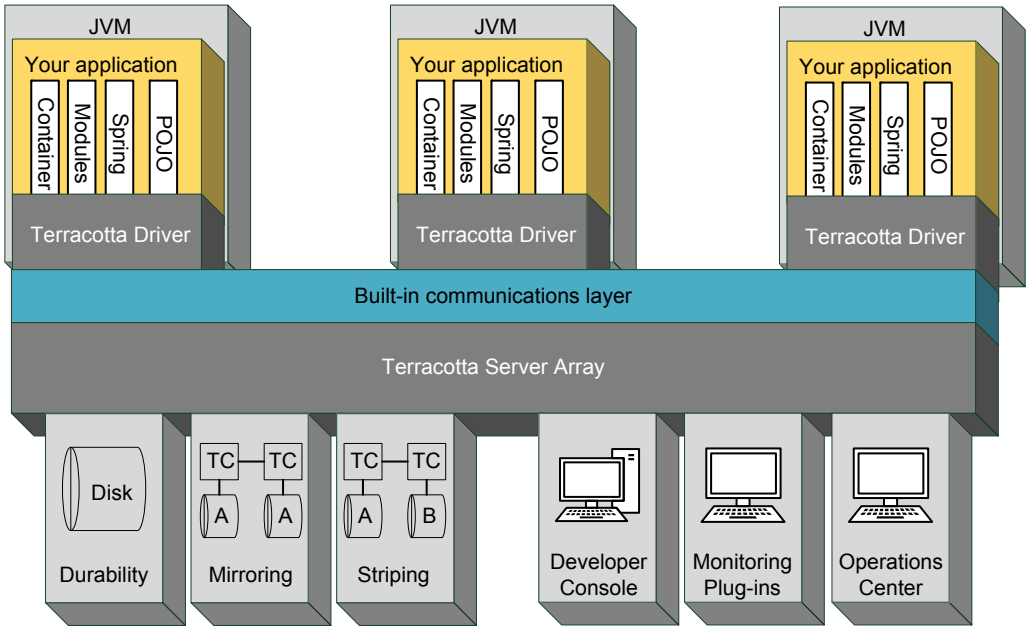


图 5　Terracotta 的原理示意图

着智能体数量的增多，这种计算任务会显著地增加，而单个处理器运算能力是有限的，在不增加处理器的情况下，模拟速度自然会降下来. 如果将智能体分布到多个计算机上，让他们在不同的计算机上执行

各自的运算, 而在总体上, 让它们在一个集中的环境中显示出它们行为的变化, 这样便可以提高模拟的速度, 这也符合多智能体模拟的自治性、涌现性的特征. Terracotta集群技术可以满足这种技术需求. 因此, 在应急响应模拟平台中, 将Repast S与Terracotta集成, 编写设计可以工作在网络集群环境下的模拟程序, 并将其分布到闲散的PC机上, 从而可以提高平台处理能力. 而这种集群方式简便易行, 可以应用于多种目的, 既可以在实验室中将几台计算机连接起来, 开展模拟实验, 也可以在实际应用中, 将城市应急指挥中心的电脑组成集群网络, 来加快模拟的速度.

3　结果

本文以北京为例, 进行了城市公共安全应急响应系统的动态地理模拟.

3.1　应急环境模型设计

以缩编处理的北京市1∶1万基础地理数据作为应急智能体活动的地理空间环境. 在图层处理时, 将各级道路融合为一个图层, 作为应急智能体活动的限制图层; 抽取居民地图层中医院、消防队、各级公安部门和应急避难场所等与应急相关的地物为一个图层, 作为可以参与应急过程的环境智能体; 其他图层则作为背景显示(图6). 为了生成智能体活动的路线网络, 对GIS数据中的道路图层进行了合并处理, 各级道路层合并为一个图层, 对合并的图层进行拓扑检查, 保证各道路的联通性. 此外, 假设行人步行的最大速度初始化为从5~7的随机数(即行人的行进速度为每小时5~7 km), 与行人的平均行进速度一致.

3.2　应急智能体模型设计

应急智能体包括7类, 居民(person agent)、医院

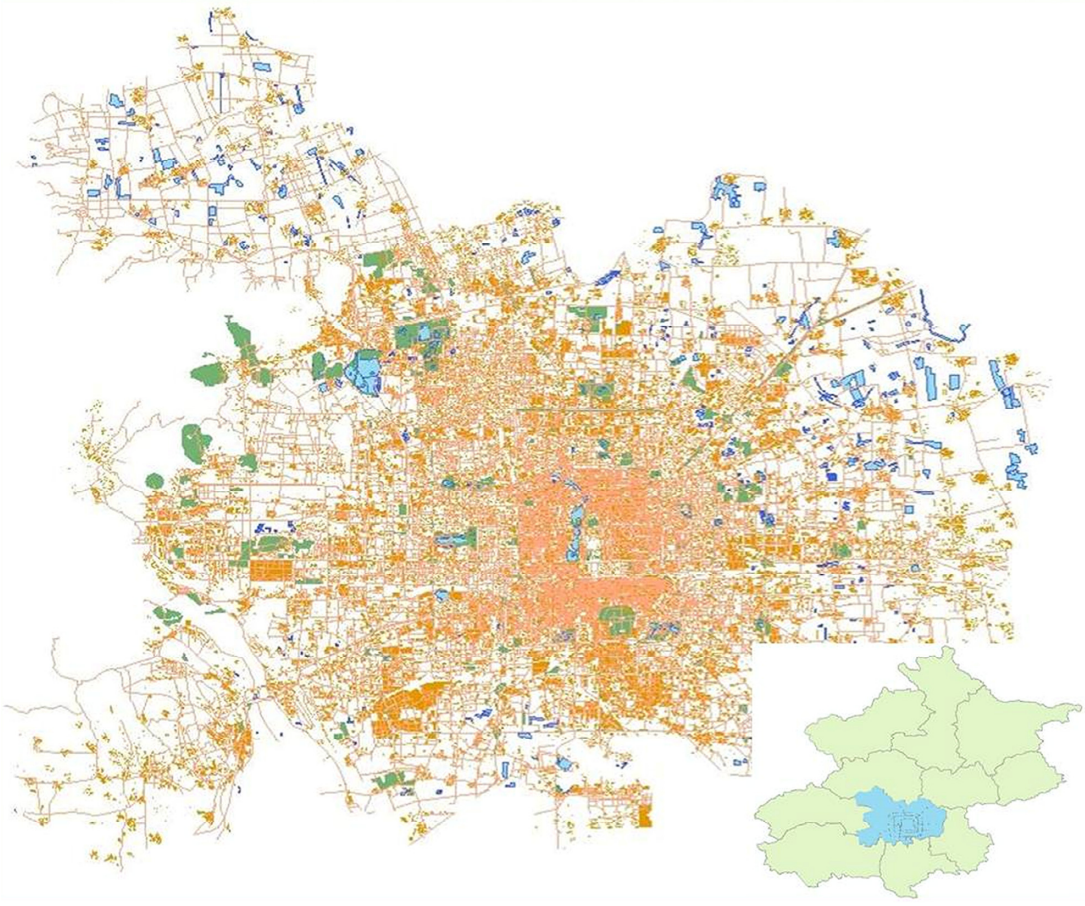


图 6　北京应急响应动态地理模拟实验数据及其范围

(hospital agent)、现场临时救治点(on-site responder)、消防车(fire engine)、警车(police)、救护车(ambulance)和现场危机处理小组(emergency manage team). 为了简化实验, 前3类智能体分别从状态、知识、个性、通信和行为5个方面设计各自的参数和行为规则, 如居民智能体(表4), 后4类智能体在实验中我们只模拟其在接到事件指示后, 到达事件地点的过程, 而对于其在现场的行为则不进行模拟.

3.3 模拟环境变量

模拟环境变量包括事件发生位置、各种应急智能体的初始数量、仿真运行周期、事件发生模式以及用于模拟控制的全局变量等(表5).

3.4 其他模拟条件假设

其他的假设还包括: (1) 模拟只进行3000个周期, 一个周期代表实际时间1 min, 即3000 min(2天零2小

表 4 居民智能体的主要参数及行为规则

Agent	参数			行为规则
		名称	取值	
Person		标识(ID)	(0, PersonNum)	Person根据健康度决定继续原目标、去医院还是原地等待救援. w_l, o_l和d为Person Agent所具有个性参数, 用来表现人的心理行为: 如果h_l <Very bad health level则在原地等待救援; 如果h_l <Unsafe health level则去医院, 否则如果其担忧度或痛苦度较高他也会选择去医院. Very bad health level及Unsafe health level均为系统设定的一个环境变量, 作为控制参数来控制模拟的运行.
	状态 (State)	健康度(health-level)	$h_l \in (0, 1)$	
		目的地(destination)	家、单位或医院	
		是否在医院接受处置(treated)	yes or no	
		所在医院标识(betohospital)	(0, hospital agent number)	
	知识 (Knowledge)	医院的位置和当前的状态(hospital_list)	医院列表	
		现场救助点的位置和当前状态 (onsite_responder_list)	现场救助点列表	
		当前目的地的最短路径(route)	GIS空间坐标列表	
	个性 (Personality)	担忧度(degree of worry)	$w_l \in (0, 1)$	
		顺从度(level of obedience)	$o_l \in (0, 1)$	
		痛苦度(level of distresss)	$d = w_l * (1 - h_l)$	
	通信 (Communication)	是否持有通讯工具(probability of communication device)	yes or no	
		通讯工具工作的可能性(Phone update probability)	$i_l \in (0, 1)$	
	行为 (Action)	保持原目的地	Go old destination	
		去往医院	Go hospital	
		原地等待救援	Wait	

表 5 北京应急响应模拟模型环境变量预设

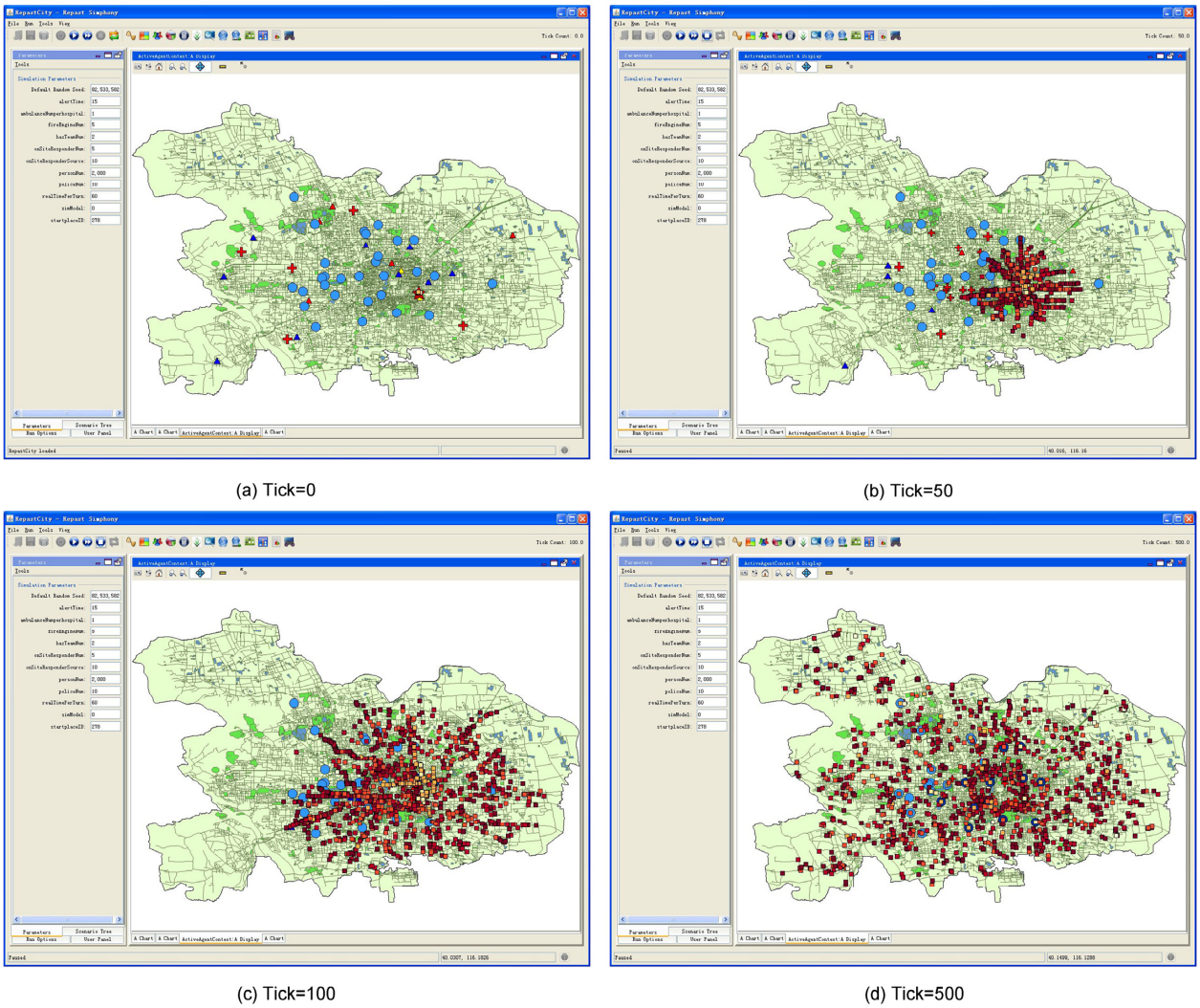
序号	名称	表示符号	范围	值	备注
1	事件发生模式	Sim Model	(0, 1)	0	0: 点源式 1: 分布式
2	点源式事件地点	ER Location	(0, Max Resident Num)	可变	Max Resident Num为GIS中地物的最大标识号
3	居民智能体的数量	Person Num	(0, ∞)	可变	
4	医院智能体的数量	Hospital Num	(0, 31)	可变	
5	现场临时救治点智能体的数量	On-site responder Num	(0, ∞)	可变	
6	每个医院出动救护车的数量	Ambulance Num	(0, ∞)	可变	
7	警车的数量	Police Num	(0, ∞)	可变	
8	消防车的数量	Fireengine Num	(0, ∞)	可变	
9	紧急响应小组的数量	HazTeam Num	(0, ∞)	可变	
10	居民不安全的健康度	Unsafe health level	(0, 1)	0.4	
11	居民的最大自身恢复力	Maxium untreated recovery	(0, 1)	4.96×10^{-5}	
12	居民严重的健康度恶化率	Maximum critical woseing	(0, 1)	6.67×10^{-4}	
13	居民危险的健康度恶化率	Maximum dangerous woseing	(0, 1)	2.63×10^{-4}	
14	居民乘车的概率	Take car	(0, 1)	0.05	
15	医疗提供的恢复力	treatment	(0, 1)	2.98×10^{-4}	

时), 这基于以下的假设: 如果一个人活过了前两天, 那么他也就不会再死去, 之后的死亡率不会出现大的变化. (2) 救护车在模型中同其他应急车辆一样, 只模拟其到达与展开. 也即救护车并不起救治的作用. 这样如果一个人不去就医, 即使其受到的伤害很严重, 救护车并不会运送他, 那么无论是医院还是现场临时救治点都不能帮到他. (3) 交通模型只考虑车辆和行人行进速度的变化, 而不考虑道路的封锁、拥堵等特殊情况, 在模型中也不考虑地铁行进速度的特殊因素.

3.5　应急响应模拟结果

本次应急响应模拟所使用的假设均来自于北京实际或相关的文献提供的参数等, 模拟过程不仅强调依靠现实情况和历史数据、应急的指挥者在现实情况下集成专家的意见, 而且结合不同时段的模拟结果为下时段模拟提供决策条件和模拟环境. 模拟系统的运行界面如图7和8所示.

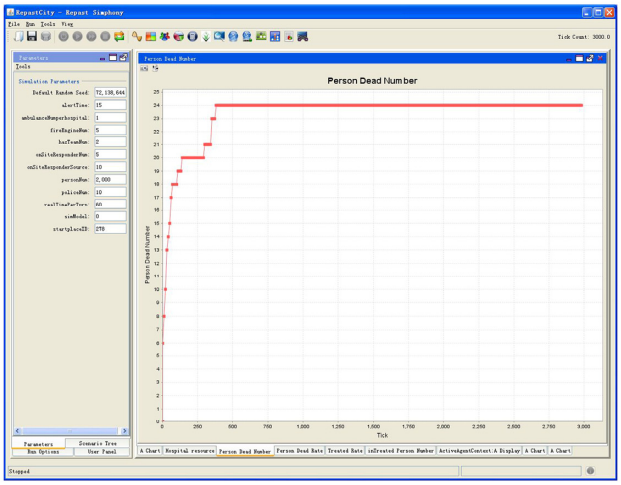
本次模拟通过分别设置0, 1, 5, 10, 15和20个现场临时救治点, 来考察不同现场临时救治点数量对死亡率的影响. 通过改变警报时间, 即现场临时救治点开始行动的时间, 考察其到达的时间对死亡率的影响. 实验模拟(人群数量为2000)结果如图9所示. 医院资源的多少, 对于抢救伤员的性命具有至关重要的作用. 本次模拟还分别设置医院的资源(床位)数为



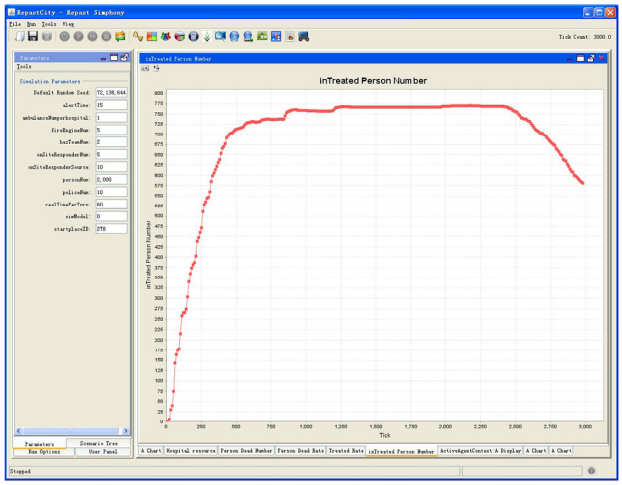
(a) Tick=0　(b) Tick=50

(c) Tick=100　(d) Tick=500

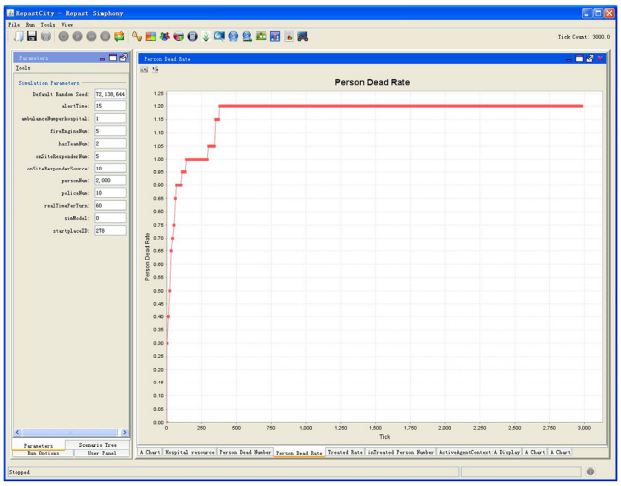
图 7　北京公共安全事件应急响应动态模拟过程



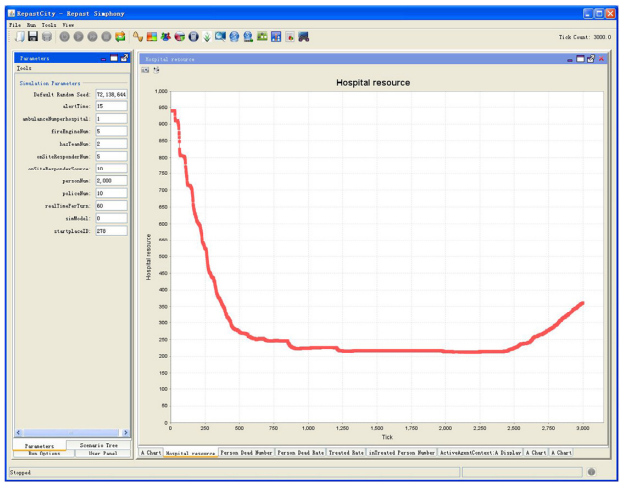
(a) 死亡人数变化曲线



(b) 在医院接受救治人数变化曲线



(c) 死亡率变化曲线



(d) 医院资源数变化曲线

图 8　模拟过程观测参数变化监测

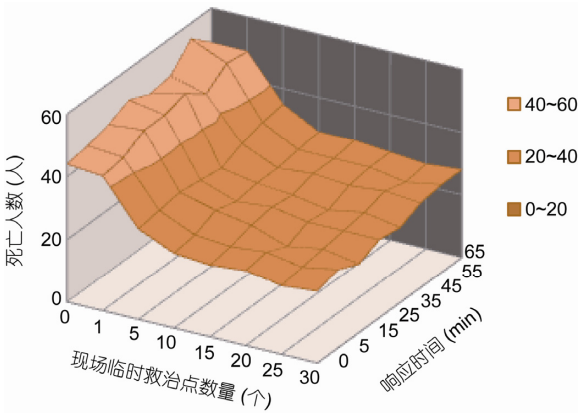


图 9　现场临时救治点数量与响应时间对人员死亡率的影响

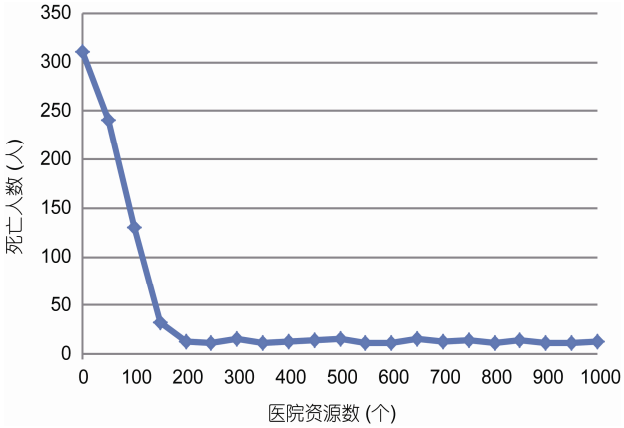


图 10　模拟事件中医院资源数对死亡人数的影响

0, 50, 100, 150直至1000, 每个设置模拟运行10次, 取其平均值, 结果如图10所示. 从图9可以看出, 如果医院的资源数>150, 那么有不超过50人会死亡; 如果医院的资源数>200, 那么可以使这个数字降到10~20.

4 讨论和结论

本文将地球信息科学中最新发展的用于复杂地理空间系统建模与仿真的地理模拟系统理论(GSS)应用于城市公共安全应急响应的动态模拟, 建立了基于多智能体(MAS)和地理信息系统(GIS)的城市公共安全应急响应模拟模型框架, 解决了模型实现的关键技术问题, 提出了模型实现的技术体系, 构建了模拟系统平台原型. 论文最后以北京市原城八区基础地理数据为实验数据进行了大范围城市公共安全应急响应模拟实验, 验证了模型框架的可操作性和技术体系的可行性.

复杂系统理论和复杂适应性系统理论是开展城市公共安全应急响应复杂动态过程研究的理论基础, 复杂性科学强调的整体性、动态性的研究方法为城市公共安全应急响应过程和规律研究提供了方法论, 基于空间信息技术的地理模拟系统(GSS), 能够模拟复杂的时空动态现象, 是进行城市公共应急响应模拟的有效平台, 在实际的城市公共安全应急响应模拟时, 设计构建基于多智能体和GIS的应急响应模型是开展模拟的关键, 基于Repast和Geotools实现多智能体系统与GIS系统的紧密集成、基于JTS实现空间数据分析、基于Terracotta集群技术解决大运算量数据处理是当前进行城市尺度空间多智能体模拟的有效技术途径.

目前复杂系统的动态仿真方法在城市系统的研究中尚处于初始阶段, 这类从微观出发通过离散化的微观个体模型来研究宏观现象的方法代表了当前城市系统研究的最新发展方向, 方法的应用应该还处在探索阶段, 有关实际场景模拟更是简化了很多必要的条件和环境状态, 因此, 可以说, 本研究只是一种尝试和探索, 实际可操作应用的城市公共安全应急系统应该更加复杂.

参考文献

陈晋, 李强, 辜智慧, 等. 2000. 灾害避难行为的模拟模型研究(Ⅰ)——基本模型的建立与计算机实现. 自然灾害学报, 9: 65–70

何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 2005. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 464–473

黄季焜, 李宁辉. 2003. 中国农业政策分析和预测模型——CAPSiM. 南京农业大学学报(社会科学版), 13: 31–41

蒋金荷, 姚愉芳. 2002. 气候变化政策研究中经济——能源系统模型的构建. 数量经济技术经济研究, 2002: 41–45

黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 等. 2007. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社. 250–258

黎夏, 叶嘉安. 1999. 约束性单元自动演化CA模型及可持续城市发展形态模拟. 地理学报, 54: 289–298

李洪心, 付伯颖. 2004. 对环境税的一般均衡分析与应用模式探讨. 中国人口、资源与环境, 14: 19–22

李雪松. 2000. 加入WTO对中国经济影响的CGE模型比较分析. 数量经济技术经济研究, 10: 21–24

廖顺宝, 李泽辉. 2003. 基于人口分布与土地利用关系的人口数据空间化研究——以西藏自治区为例. 自然资源学报, 18: 559–665

刘纪远. 2003. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. 地理研究, 22: 1–9

史忠植. 2002. 高级人工智能. 北京: 电子工业出版社. 512–543

田永中, 陈述彭, 岳天, 等. 2004. 基于土地利用的中国人口密度模拟. 地理学报, 59: 283–292

王劲峰, 陈红焱, 王智勇, 等. 2000. 区域发展和水资源利用透明交互决策系统. 地理科学进展, 19: 9–16

项后军, 周昌乐. 2001. 人工智能的前沿——智能体(Agent)理论及其哲理. 自然辩证法研究, 17: 29–33

薛领, 杨开忠, 沈体雁. 2004. 基于Agent的建模——地理计算的新发展. 地球科学进展, 19: 305–311

薛领, 杨开忠. 2003. 城市演化的多主体(multi-agent)模型研究. 系统工程理论与实践, 12: 1–9

杨立中, 方伟峰, 黄锐, 等. 2002. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型. 科学通报, 47: 896–901

杨立中, 李健, 赵道亮, 等. 2004. 基于个体行为的人员疏散微观离散模型. 中国科学E辑: 技术科学, 34: 1264–1270

杨青生, 黎夏, 刘小平. 2005. 基于Agent和CA的城市土地利用变化研究. 地球信息科学, 7: 78–81

张凡, 吴晓军, 薛惠峰. 2005. CAS理论在中心地理论研究中的应用. 微计算机应用, 26: 133–138

张培红, 岳丽红, 陈宝智. 2001. 最优应急疏散路线动态模拟的研究. 人类工效学, 7: 10–13

张伟, 顾朝林. 2000. 城市与区域规划模型系统. 南京: 东南大学出版社. 1–174

周焯华, 杨俊, 张林华. 2002. CGE模型的求解方法、原理和存在问题. 重庆大学学报(自然科学版), 25: 142–145
周成虎, 孙战利, 谢一春. 1999. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社. 1–163
周建军, 王韬. 2002. CGE模型的方程类型选择及其构建. 决策借鉴, 15: 70–74
宗跃光, 周尚意, 张振世, 等. 2002. 北京城郊化空间特征与发展对策. 地理学报, 57: 135–39
Allen P M, Boon F, Engelen G, et al. 1984. Modeling evolving spatial choice patterns. Appl Math Comput, 14: 97–129
Alonso W. 1964. Location and Land Use. Cambridge: Harvard University Press. 1–204
Batten D. 1982. On the dynamics of industrial evolution. Region Sci Urban Econ, 12: 449–462
Batty M. 2013. The New Science of Cities. Boston: MIT Press. 1–540
Batty M, Longley P. 1994. Fractal Cities: A Geometry of Form and Function. London: Academic Press. 27–35
Batty M, Xie Y. 1994. From cells to cities. Environ Plan B, 21: 31–48
Benenson I, Omer I, Hatna E. 2002. Entity-based modeling of urban residential dynamics: The case of Yaffo, Tel Aviv. Environ Plan B, 29: 491–512
Benenson I. 1998. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. Comput Environ Urban Syst, 22: 25–42
Bernard L, Krüger T. 2000. Integration of GIS and spatio-temporal simulation models: Interoperable components for different simulation strategies. T GIS, 4: 197–215
Brown D G, Page S E, Riolo R, et al. 2003. Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectivess of greenbelts. Environ Model Softw, 19: 1097–1109
Goodchild M F. 2005. GIS, spatial analysis, and modelling overview. In: Maguire D J, Batty M, Goodchild M F, eds. GIS, Spatial Analysis and Modelling. Redlands: ESRI Press, 1–18
Hubacek K, Sun L X. 2001. A scenario analysis of China's land use and land cover change: Incorporating biophysical information into input-output modeling. Struct Cha Econ Dynam, 12: 367–397
Iwan J A, Matthew P D, Ronald E M, et al. 1998. Methods of Interregional and Regional Analysis. UK: Ashgate
Kilkenny M. 1999. Explicitly spatial rural-urban computable general equilibrium. Am J Agr Econ, 81: 647–652
Klosterman R E. 1994. Large-scale urban models retrospect and prospect. J Am Plan Assoc, 60: 3–6
Ligtenberg A, Bregt A K, Lammeren R V. 2001. Multi-actor-based land use modeling: Spatial planning using agents. Landscape Urban Plan, 56: 21–33
Löfgren H, Robinson S. 1999. Nonseparable farm household decisions in a computable general equilibrium model. Am J Agr Econ, 81: 663–670
Lowry, Ira S. 1964. A Model of metropolis. Report RM 4125-RC. Santa Monica. CA: Rand Corporation
Maguire D J. 2005. Towards a gis platform for spatial analysis and modeling. In: Maguire D J, Batty M, Goodchild M F, eds. GIS, Spatial Analysis and Modelling. Redlands: ESRI Press. 19–39
Portugali J. 2000. Self-Organization and the City. Berlin: Springer-Verlag. 1–352
Pumain D, Saint-Julien T, Sanders L. 1986. Urban dynamics of some French cities. Eur J Oper Res, 25: 3–10
Schelling T C. 1971. Dynamic models of segregation. J Math Sociol, 1: 143–186
Szell M. 2014. Connecting paradigms. Science, 343: 970–971
Tobler W R. 1979. Cellular geography. In: Gale S, Olsson G, eds. Philosophy in Geography. Dordrecht: Reidel Publishing Company. 279–386
Westervelt J D. 2002. Geographic information systems and agent-based modelling. In: Gimblett H R, ed. Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes. Oxford: Oxford University Press. 83–104
White R, Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns. Environ Plan A, 25: 1175–1199
Wooldridge M, Jennings N. 1995. Intelligent agent: Theory and practice. Knowl Eng Rev, 10: 115–152
Zeleny M. 1980. Autopoiesis, Dissipative Structures, and Spontaneous Social Orders. Boulder: Westview Press. 45–79