

面向突发事件的微观地理过程集成模拟^①

宋宜全^{②*} 崔铁军^{*} 李 毅^{**} 王若柔^{**} 刘江涛^{***}

(^{*}天津师范大学城市与环境科学学院 天津 300074)

(^{**}中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

(^{***}济南市勘察测绘研究院 济南 250013)

摘 要 从地理系统研究的角度探讨了自然地理过程与人文地理过程集成模拟的重要性和必要性,并面向突发事件,提出了在微观环境中以个体为建模单元集成模拟上述两个过程的框架。以网格为基本单元,对集成模拟的媒介——地理要素对象进行了建模,进而结合高斯数理模型、元胞自动机和多智能体系统,分别对病原体扩散的自然地理过程和人群活动的人文地理过程建模。并以北京展览馆为研究区,对模拟试验进行了描述,分析了突发事件的演变过程与人群活动特征。该研究可为微观环境中人地关系集成分析提供支持,为突发事件的定性定量分析提供方法参考。

关键词 地理过程, 模拟, 微观环境, 突发事件, 地理模型

0 引 言

地理过程是地理要素随时空变化的历程,它从广延性和连续性的角度对地理规律进行了统一的描述^[1]。按要素构成,地理过程可划分为自然过程和人文过程两类。地理过程模拟可重构地理事件,设计虚拟地理实验,预测地理变化,提供地理决策,因而一直是地理学研究的热点。但自然与人文的区分,模糊了地理学的真正本质^[2],使人地间关系的研究常被割裂。且由于传统地理学对人地关系中“人”的忽视^[3,4],使“人”的异质性常被忽略,影响了地理过程表达与分析的准确性和有效性。将地理学中的自然过程与人文过程进行综合,定性、定量地研究地理系统内部各要素的作用机制与演化趋势,才能为可持续发展的实现提供可靠的理论与方法^[5]。地理过程研究的重点与核心应转向自然与人文结合、微观与宏观集成的地理现象表达与建模之中^[6]。

突发事件是指突然发生的危及大众利益、影响社会秩序的需尽快制止的事情^[7]。从内容上划分,突发事件将引发自然过程(火灾、污染物扩散等)与

人文过程(人群时空活动)的演变。但当前地理学特别是地理信息系统(geographic information system, GIS)多侧重于自然过程建模,“人”的研究尺度多限定为宏观的、无差异性的整体——人类。空间环境中的人群活动与个体行为密切相关,个体行为常会影响其它个体的决策,进而可能引发人群活动的变异。单一宏观尺度的地理学突发事件建模消除了个体差异,缺乏对不同个体微观行为的表达,有时需借助“自下而上”的建模方式,从多个尺度分析人地关系,则更有助于对地理现象的把握,提高地理决策水平。因此,本文将侧重于以个体为主要建模单元的微观环境中的地理过程模拟,以突发事件为例,研究集成模拟涉及的框架、方法及试验,以此提高地理学特别是 GIS 对突发事件分析与处理的能力。

1 集成多智能体与元胞自动机的地理过程模拟框架

基于元胞自动机(cellular automata, CA)和多智能体系统(multi-agent system, MAS)的非线性建模是当前地理过程模拟的常用方法。在离散时空中,CA可基于简单转换规则来模拟复杂地理现象。元胞、

① 国家自然科学基金(41201375, 41101363), 863 计划(2012AA12A204)和天津师范大学博士基金(52XB1109)资助项目。

② 男, 1980 年生, 博士, 讲师; 研究方向: 地理过程模拟与分析, 虚拟地理环境研究; 联系人, E-mail: syiq@hotmail.com
(收稿日期: 2012-05-14)

状态、邻域和转换规则是 CA 的 4 个基本组成元素。由于空间建模的简单有效,CA 已广泛应用于地理过程建模中^[8-10]。且在 CA 模型基础上,演化出多种新的模型^[11,12]。智能体(Agent)是具备环境感知与自主决策的实体。MAS 则是由多个可相互协作的 Agent 组成的应用系统。在行为多样性表达方面,MAS 较 CA 更有优势,无需预先设定参数便可进行行为迭代,可为地理对象提供更为智能的交互。MAS 的这种优势,使其广泛应用于面向个体活动的人文地理过程建模中^[9,13,14]。但与 CA 相比,MAS 缺乏空间的概念^[9]。地理过程集成模拟时,可将 MAS 与 CA 结合,使其既易于对个体所在空间环境的自然地理现象进行表达,又可为地理环境中个体复杂时空行为提供建模支持。

自然与人文地理过程建模都需以具有空间位置信息的地理要素为基础,其建模都离不开地理要素的选取、处理与分析。因此,可对参与地理过程的地理要素及属性进行分析,抽取共同的地理属性,封装不同对象间交互的接口,构建具有媒介作用的地理要素对象,来实现面向具体地理应用的自然地理过程与人文地理过程的集成(图 1)。

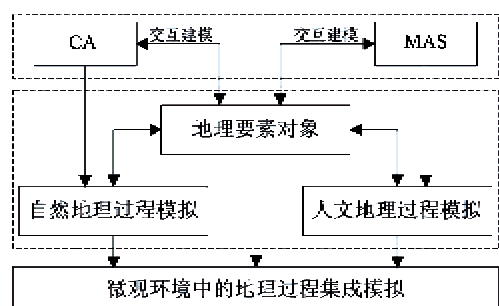


图1 集成多智能体与元胞自动机的地理过程模拟框架

2 面向突发事件的微观地理过程集成模拟方法

2.1 地理要素对象建模

基于精细元胞的空间划分,是 CA 中常见的元胞空间表达方式,也是目前社会学领域人群模拟空间建模的主要方法。CA 元胞与 GIS 栅格单元有相似之处,二维正方形都是其常用的空间单元。但与栅格单元属性具有唯一性不同,CA 元胞可存储多种状态,且存在领域与转换规则的设置。虽然 CA 已成为地理系统研究的重要工具,但 CA 在地理过程建模时仍存在空间表达较为简单、无法对更高空间层次的地理单元位置与属性意义进行描述、难以真实反映地理要素间的空间作用及空间关系、难以准

确定义地理过程的复杂演化规则等不足^[15,16]。此外,CA 还存在元胞空间多为二维表达,难以模拟三维微观地理过程的缺陷。

本文涉及的地理要素对象是在 CA 元胞和 GIS 栅格单元基础上扩展而构建的,其基本单元是网格。网格是指与空间位置对应的,可表达唯一语义,具有固定规则大小的 2.5D 栅格单元。网格由几何描述和语义属性构成。几何描述包含网格编码及网格剖分参数(长度、宽度和高度)。网格编码是在投影转换和空间剖分基础上进行的,是网格行号、列号及高程的组合。为保证唯一性和一致性,本文采用了全球编码,即空间剖分后的网格编码值,是从空间投影原点开始计算的。语义是网格环境语义信息的组合,它既可包含地物属性,也可表达是否被某个体所占据的状态。

通过面向对象的网格组织,本文对地理要素进行了封装。对象可定义为对一组信息及其操作的描述。面向对象的网格可认为是具有相同语义,空间相邻的网格的组合。通过面向对象组织,部分网格语义属性的存储单元可从单个网格变换为一组网格,空间表达单元也转变为具有具体语义的空间目标,可减少网格语义属性的存储空间,易于实现地理实体的表达、存储、空间关系的计算与分析。相应地,本文地理要素表达将包含网格和网格对象两个层次,在两个层次上设定地理过程演化规则,进行空间计算与分析,对复杂地理环境及其地理演变过程进行描述(图 2)。

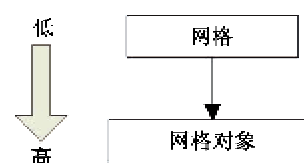


图2 基于网格的多层次地理空间表达

2.2 面向病原体扩散的自然过程建模

病原体扩散是当前城市公共安全管理关注的热点。日本东京地铁沙林事件及美国“炭疽邮件”事件,标志着病原体扩散已成为现实的威胁。病原体扩散手段包含邮寄、人工投放、气溶胶散布和自杀性传染^[17]。气溶胶散布具有影响范围大、传播速度快、造成心理恐慌严重等特点,成为最可能病原体扩散方式。本文以气溶胶携带的病原体扩散作为自然过程案例,对突发事件建模。病原体扩散过程中,个体感染的主要途径是吸入大气中的病原体。因此,

病原体扩散区域、个体吸入病原体数量的计算是实现自然与人文过程集成的重点。

高斯模型具有物理概念清晰、实验基础坚实、数学计算简单等优点,且建模的准确性较高,是目前应用最广的气溶胶扩散模型之一。高斯模型包括烟羽模型和烟团模型两种。烟羽模型适用于连续点源的扩散,而烟团模型适用于瞬间泄漏(即突发性瞬时泄漏或泄漏时间小于扩散时间)的扩散。病原体扩散常为突发性瞬时释放,且释放时间常小于扩散时间。因此,本文选取高斯烟团模型

$$\rho(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left\{-\left[\frac{(x - \bar{u}t)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (1)$$

对病原体扩散进行建模。它表达了初始剂量为 Q , 在 x 轴、 y 轴及 z 轴的扩散系数为 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 的病原体气溶胶,在风速为 $\bar{u}$ 的环境中,经时间 t 后,其 (x, y, z) 位置处浓度 $\rho(x, y, z)$ 的计算方法。

在微观环境,特别在室内,由于墙壁、地面等的阻挡,病原体难以跨越障碍物而到达另一个开放空间。因此本文将地物属性添加至地理要素对象中,以此作为对象封装与分类的依据,并将其引入到突发事件建模中。与气溶胶接触时,由于个体身高等的差异,同一位置或时刻不同个体吸入病原体的数量可能不同。个体吸入病原体数量的精确求解需对三维空间内的气溶胶浓度进行连续计算。浓度值的连续性需求加大了地理过程模拟的计算量,且由于微观地理环境的复杂性及个体差异,个体可吸入病原体的数量常带有较大的不确定性,常难以进行精确定量计算。为简化计算,本文将地理过程模拟时的时空维进行了离散化处理。空间维离散化是指采用网格和网格对象对空间环境数据进行表达,时间维离散化是指将地理过程模拟分割成等间隔的帧。同时本文假定同一时空属性下个体吸入病原体的数量相同,其值等同于某一固定高度(1.65m)与网格尺寸的乘积。病原体扩散区域的求解可等同于 z 值固定(公式(1))的病原体浓度求解。对某帧每个网格的病原体数量求解后,其值存放于地理要素对象中。对病原体数量值大于零的网格进行统计,就可获取病原体的扩散区域。对个体运动经过网格的病原体数量值求和,就可求解出个体吸入病原体的总数量。

2.3 面向人群活动的人文过程建模

本文基于 MAS 对人群活动进行建模,每个

Agent 都代表一个个体。每个 Agent 都包含年龄、体重、运动速度等物理属性、行为规则及环境感知参数的设定。人群活动建模的关键是对个体运动行为的建模。本文个体运动行为模型是在社会力模型基础上扩展的。社会力模型主方程为^[18]

$$f_i(t) = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij}(t) + \sum_w f_{iw}(t) \quad (2)$$

它表达了质量为 m_i 的个体 i , 期望以理想最大速度 v_i^0 向目标方向 e_i^0 运动,而由于必要的躲避或者减速导致当前速度 v_i 与理想速度有所偏差。受目标驱动力的影响,个体会在弛豫时间 τ_i 内达到此理想速度。运动过程中,个体间及个体与墙壁间有保留一定间隔的趋势,这种作用通过排斥力和摩擦力来表达。个体间、个体与墙壁间的作用力通过 f_{ij} 和 f_{iw} 来表示。

本文对社会力模型进行了时空离散化处理。空间离散化指空间计算基于网格或网格对象,时间离散化指相邻时间段内个体只能移动数个网格。本文将个体下一帧运动方向定义为其周围八网格之一(图3),即基于 $f_i(t)$ 值的分解,不同方向的运动概率可以实时计算,个体最终将选择最大的概率方向运动。

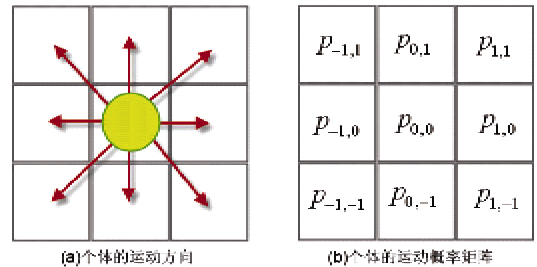


图3 个体可能的运动方向及其概率矩阵

3 微观地理过程集成模拟试验

本文研究区为北京展览馆。它位于北京西直门商业区,地理位置优越,也是城市公共安全重点防护区域。

3.1 场景建模与模拟设置

研究区场景包含三部分:空间环境、人群和病原体扩散事件。空间环境包含室内和室外两部分。室内空间包含展厅、走廊、楼梯、柱子等。室外空间包含展览馆相邻的广场。空间环境坐标系为 WGS84,投影为墨卡托投影,坐标单位为 m。基于网格参数

(长宽高分别为 0.5m,0.5m,0.2m),及三维模型的顶点及三角形数据,获取三维模型表面网格几何数据。并通过不同语义组合,形成面向对象的网格,完成地理要素对象的数据获取与处理。

病原体扩散采用粒子系统进行可视化建模。基于可视化需求来初始化粒子的位置、外观、运动、生存周期等属性,并根据病原体浓度值指定初始颜色和透明度,确定粒子可视化模型,借助粒子系统进行病原体的自动扩散,并用后续病原体浓度值来重新约束粒子的可视化^[19]。

由于时间、展览内容的差异,突发事件的位置、时间及环境参数及展览馆人群参数都会存在较大差异。本文采用人工设置方法对病原体扩散及人群参数进行了设定(见表 1 和表 2)。

表 1 模拟情景参数设置

参数	人群数	模拟时间 (s)	突发事件爆发 的空间位置	突发事件爆发 时间(s)
值	300	3400	经度:116°20'18.69" 纬度:39°56'20.39" 高程值:57.5m	1200

表 2 病原体扩散参数设置

参数	病原体名称	病原体剂量 (百万生物单位/克)	温度 (摄氏度)	风速 (m/s)
值	霍乱弧菌	200	20	(1,1,1)

人群参数主要包含人群数量、年龄分布以及不同个体的运动速度、行程等。根据观察,个体在常态环境下的运动速度约为 0.85 ~ 1.30m/s^[20]。基于正态分布函数,本文将个体初始速度设置为 1 ~ 3 个网格。参观展览时,多数个体的活动范围将涵盖大部分展厅。本文将个体参观展厅数随机设置为全部展厅与概率区间(0.8 ~ 1.0)的乘积。个体初始行程设定为从某随机入口进入展览馆,参观完部分展厅后,从某随机出口离开。主出口与主入口的概率在设置时将大于其它出口或入口。模拟时,个体行程还将包含随机停留。个体行程的初始时间(即出现于场景的时间)将基于模拟时间的区间,依据正态函数进行设置。本文假设人群对病原体释放未感知,即在病原体释放前后,个体的行为将未发生变化。

3.2 模拟结果与分析

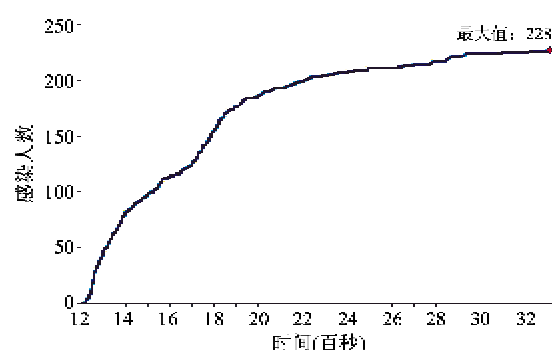
基于集成模拟方法及模拟试验的场景建模及设置,病原体扩散时空区域可实时获取(图 4),每个个

体动态时空位置与感染状态可实时计算(图 5),借助于可视化技术可实现对面向病原体扩散地理过程集成模拟。



注: 图中圆和正方形分别表示个体已感染或未感染状态

图 4 面向病原体扩散地理过程集成模拟试验



横轴和纵轴分别表示时间(百秒)和感染人数

图 5 集成模拟中感染人数的动态统计

从图 5 可看到,在病原体扩散初始,感染人数会快速增加。但随障碍物的阻挡,参数的增量会出现波动,但整体仍呈现增大趋势,直至到达最大值。在集成模拟完成后,可基于病原体种类、潜伏期、感染天数、潜伏期内每天发病率、干预措施及其实施时间和干预效果等,来对病原体扩散进行整体评估,为后续的防治指挥和医疗资源调配提供决策支持。

4 结论

随着地理系统研究的进展,自然过程与人文过程逐渐相互渗透融合,界限不再简单分明^[21]。在微观层次下,以统一的数据、模型与表达环境对地理过程集成模拟与分析,可弥补当前地理建模侧重宏观模拟、缺乏个体尺度研究的缺陷,更加有效地获取地理规律,提高地理决策水平。通过对地理要素对象、面向病原体扩散的自然过程和面向人群活动的人文过程的描述,本文对面向突发事件的地理过程进行了建模,并以北京展览馆为研究区,进行了模拟试验。结果表明,本文方法可服务于地理过程集成模

拟,可实现微观环境中的人地关系集成分析。在应用层次上,也可为突发事件的定性定量分析及快速处置提供决策参考。

地理过程类型、尺度、区域的差异,难以对其精确模拟,而自然与人文的集成模拟需求更增加了建模的难度。地理过程模拟的相关理论与方法还需进一步研究和深化。本研究面向病原体扩散事件进行了地理过程模拟试验,其模型设计将带有一定的针对性,因此在面向其它应用时需进一步扩展与完善。此外,如何将本文试验与应急决策实际结合,也需进一步研究。

参考文献

- [1] 牛文元. 理论地理学. 商务印书馆, 1992
- [2] 汪爱华, 张树清. RS 和 GIS 支持下的三江平原沼泽湿地动态变化研究. 地理科学, 2002, 22(5): 636-640
- [3] 谢觉民. 人文地理学笔谈: 自然·文化·人地关系. 北京: 科学出版社, 1999. 32-46
- [4] 陈国阶. 论地理学面临的挑战与发展. 地理科学, 2003, 23(2): 129-135
- [5] Tu X, Terzopoulos D. Artificial fishes: physics, locomotion, perception, behavior. Proceedings of the Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1994: 43-50
- [6] 冷疏影, 宋长青. 陆地表层系统地理过程研究回顾与展望. 地球科学进展, 2005, 20(6): 600-606
- [7] 张沛, 潘锋. 现代城市公共安全应急管理概论. 北京: 清华大学出版社, 2007
- [8] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999
- [9] 黎夏. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社, 2007
- [10] Benenson I, TORRENS PM G. Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena. Wiley Online Library, 2004
- [11] Song W, Xu X, Wang B H, et al. Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 363(2): 492-500
- [12] Dirk H, Motonari I, Takashi N, et al. Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics. College Park, MD, ETATS-UNIS: American Physical Society, 2003
- [13] Ali W, Moulin B. 2D-3D multiagent geosimulation with knowledge-based agents of customers' shopping behavior in a shopping mall. *Spatial Information Theory*, 2005, 445-458
- [14] Thalmann D, Musse S. Crowd Simulation. Springer, 2007
- [15] 孙燕楠. 扎龙湿地时空格局演变的细胞自动机模型研究: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007
- [16] 于欢, 何政伟, 张树清等. 基于元胞自动机的三江平原湿地景观时空演化模拟研究. 地理与地理信息科学, 2010, 26(4): 90-94
- [17] 杜新安, 曹务春. 生物恐怖的应对与处置. 北京: 人民军医出版社, 2005
- [18] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490
- [19] Lin H, Zhu J, Xu B, et al. A Virtual Geographic Environment for a Simulation of Air Pollution Dispersion in the Pearl River Delta (PRD) Region // Lee J, Zlatanova S. 3D Geo-Information Sciences. Springer Berlin Heidelberg. 2009: 3-13
- [20] Victor J. Blue, Jeffrey L. Adler. Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows. Washington, DC, ETATS-UNIS: Transportation Research Board, 1999
- [21] 唐志鹏, 张进, 刘卫东. 自然过程与人文过程模拟之差异比较分析. 地理学报, 2010, 65(12): 1581-1590

Geographical process simulation in micro-spatial environments for emergencies response

Song Yiquan*, Cui Tiejun*, Li Yi**, Wang Ruorou**, Liu Jiangtao***

(* College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387)

(** State Key Lab of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(*** Jinan Geotechnical Investigation and Surveying Institute, Jinan 250013)

Abstract

From the view of geographic system, the importance and necessity of integrating simulation of the physical geographical process and the human geographical process was discussed. Then the framework for integrating simulation of the above two processes in the micro-spatial environment was given. Grid and spatial object, the two basic units of spatial data modeling in geographical process simulation, was advanced and the spatial object was modeled based on grid. After that, combined with the Gaussian mathematical model, cellular automata and multi-agent systems, the physical geographical process of pathogens diffusion and the human geographical process of crowd activities were both modeled. Take Beijing Exhibition Center as a typical study area, the detailed description of the geographic simulation was given, and the characteristics of crowd activity in emergencies were analysed. This study can provide support for the integrating analysis of the people-land relationship in the micro-spatial environment and qualitative and quantitative analysis of emergencies.

Key words: geographic process, simulation, micro-spatial environment, emergencies, geographic model