

8-7-2020

Discussion of Integrating Biological-Chemical Hazard Simulation and Artificial Society Computational Experimental Platform

Sihang Qiu

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Xiaogang Qiu

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Bin Chen

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Discussion of Integrating Biological-Chemical Hazard Simulation and Artificial Society Computational Experimental Platform

Abstract

Abstract: Biological-chemical hazard once brought great loss to human beings, which encouraged people to develop a number of biological-chemical simulation models and corresponding simulation tools. However, influences of hazards to society were rarely considered in the past. *By integrating biological-chemical simulation and artificial society computational experimental platform, it was feasible to assess hazard and analyze its social effects meanwhile, which efficiently assisted manager to estimate hazard risk and make decisions.* Two methodologies of integration and a corresponding example were given.

Keywords

biological and chemical simulation, artificial society, computational experiment, pedestrian evacuation

Recommended Citation

Qiu Sihang, Qiu Xiaogang, Chen Bin. Discussion of Integrating Biological-Chemical Hazard Simulation and Artificial Society Computational Experimental Platform[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2194-2202.

生化仿真与人工社会计算实验集成的途径探讨

邱思航, 邱晓刚, 陈彬

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 生化灾害曾经给人们造成过非常大的损失, 为此人们研究出了众多生化仿真模型和相应的仿真工具。但是以往的生化仿真工具很少考虑对社会人群的影响。通过将生化仿真与人工社会计算实验集成, 既能从不同的层面对生化灾害仿真进行评估, 也能分析其对社会人群的影响, 从而更好地辅助管理者进行灾害评估和应急管理决策。在此基础上, 提出了从两个方面将生化仿真与人工社会计算实验集成的途径, 并给出了一个案例, 为未来研究生化灾害提供了一种可行的方法。

关键词: 生化仿真; 人工社会; 计算实验; 人群疏散

中图分类号: X45

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 09-2194-09

Discussion of Integrating Biological-Chemical Hazard Simulation and Artificial Society Computational Experimental Platform

Qiu Sihang, Qiu Xiaogang, Chen Bin

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Biological-chemical hazard once brought great loss to human beings, which encouraged people to develop a number of biological-chemical simulation models and corresponding simulation tools. However, influences of hazards to society were rarely considered in the past. *By integrating biological-chemical simulation and artificial society computational experimental platform, it was feasible to assess hazard and analyze its social effects meanwhile, which efficiently assisted manager to estimate hazard risk and make decisions.* Two methodologies of integration and a corresponding example were given.

Keywords: biological and chemical simulation; artificial society; computational experiment; pedestrian evacuation

引言

随着科技的发展, 生化灾害对人们的威胁也日益显著, 它的危害性极大, 致死率极高。灾害物质的种类繁多, 难以检验预防, 容易对生物个体或自然环境留下永久性伤害, 并且部分灾害物质传播迅速, 能造成大面积伤亡。因此近年来, 很多国家投

入了巨大的财力物力用于研究生物化学灾害的防治。其中主要的防治措施有:

(1) 根据以往经验总结的防治方法。这是过去比较常见的做法, 即根据以往生化灾害的具体情况, 分析灾害发生的原因和规律, 由此总结出新的生化灾害发生时该采取的应对方案。

(2) 采用计算机仿真的手段。从灾害的源头开始分析, 对灾害扩散过程建模并仿真, 由计算机计算出最终的结果, 并加以分析。从而得出应对灾害应采取的措施。

常见的经验总结法依赖于以往案例, 且往往带



收稿日期: 2015-06-29 修回日期: 2015-07-31;
基金项目: 国家自然科学基金(91024030);
作者简介: 邱思航(1993-), 男, 浙江衢州人, 研究方向为系统仿真; 邱晓刚(1963-), 男, 江西宁都人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为系统仿真、平行应急管理。

<http://www.china-simulation.com>

• 2194 •

有主观性, 不同的决策者可能做出截然不同的判断。而计算机仿真具备了经验总结方法所不具有的优点, 如巨大的计算量、丰富的数据以及易于更新等。此后, 人们研究出了不同的数学模型和仿真方法用于模拟生化灾害事件, 同时也开发出了一些生化仿真工具, 它们已经能很好地对危害物质的扩散及其结果进行预测和评估。

对社会的仿真是近年来的热点话题, 它涉及了社会学、经济学、认知科学等多种学科^[1]。所以, 在生化灾害仿真中可以考虑的一个重要因素就是人与社会对灾害的反应。在此, 我们提出生化灾害仿真与人工社会计算实验平台集成的仿真系统, 使系统既具备生化灾害仿真工具的功能, 同时拥有人工社会的支撑, 并能通过多 Agent 的研究方法对灾后社会进行应急管理研究。

1 生化仿真工具及模型

现有的生化灾害仿真工具有 HPAC、BioWar 等^[2-3]。Defense Threat Reduction Agency (DTRA) 组织开发的仿真软件 HPAC (Hazard Prediction Analysis Capability) 能在世界范围内进行核生化灾害的建模与仿真。HPAC 包含了全球范围的 3D 地理信息、精度达到 1000 m 范围的人口信息以及丰富的灾害物质信息, 还具有获取实时天气的功能, 并能运用高斯模型计算危害物质的扩散情况。HPAC 的核心模型库中有生化武器攻击模型、生化设施泄漏模型、核武器攻击模型等超过十个危害模型, 还具备自定义危害物质和扩散参数的功能^[4]。Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) 支持的项目 BioWar 是一个基于多 Agent 系统的用于分析传染病或生物武器攻击对城市影响的仿真模型。BioWar 不仅具有多种疾病的模型, 还能通过相关的算法, 模拟每个 Agent 在他所在的城市遭受到生物攻击之后的行为。当前的生化灾害仿真工具主要从生化灾害的生成、生化灾害物质的扩散和生化灾害的评估三个方面进行计算模拟。生化灾害的生成与扩散已经具有了完备的理论方法,

而生化灾害的评估一直以毒理学为基础, 着重分析生化灾害对个人的影响。生化灾害仿真工具应具有三个主要功能。

1.1 生化灾害生成

生化灾害生成的目的是预先设定生化灾害仿真所需的参数及仿真环境, 主要包括: 危害物质的性质、危害物质的释放和扩散参数以及发生危害时的环境因素这 3 个方面。

1.1.1 危害物质的性质

危害物质的性质包含物质的物理、化学及毒理学性质。物理和化学性质决定了危害物质的扩散过程和结果, 毒理学性质决定了危害物质对个人的影响, 即一个人在吸入了多少危害物质后会失能或死亡。

1.1.2 危害物质的释放和扩散参数

危害物质的释放和扩散参数主要有危害物质释放的速率、危害物质释放的时间和生化扩散方程的扩散参数。危害物质的释放速率、持续时间和扩散方程参数都直接决定了物质扩散的物理过程和最终结果, 是扩散仿真必不可少的参数。

1.1.3 环境因素

环境因素指发生危害时的天气因素和危害发生地的地形地貌等。天气因素包括了发生灾害时的风速、风向和雨雪状况, 附近的地形地貌也对危害物质的扩散起到一定的影响作用^[5-6]。

1.2 生化物质扩散

生化灾害物理模型主要分为两类, 一类是根据统计规律计算出气体的浓度分布, 另一类是根据流体力学方程, 通过数值计算的方法对气体扩散进行模拟^[7]。其中高斯扩散模型基于物质扩散的统计规律得到, 人们发现自由气体扩散在空间中的浓度分布符合高斯分布(正态分布), 高斯扩散模型由此得名。数值方法计算复杂, 但具有更高的精度。因为

高斯模型能在保证一定精度的同时计算更为简单、高效、不易出错, 所以我们在系统中使用高斯模型对生化物质扩散进行仿真分析。高斯扩散模型针对不同的适用情景分为两类: 高斯烟羽模型和高斯烟团模型。

1.2.1 高斯烟羽模型

高斯烟羽模型的表达式见公式(1)。

$$C(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{\sigma_y^2}} \left(e^{-\frac{(z-H_r)^2}{\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H_r)^2}{\sigma_z^2}} \right) \quad (1)$$

其中: σ_y 和 σ_z 分别表示 y 方向与 z 方向的高斯扩散参数; H_r 表示释放源高度; 公式假设风沿 x 正方向移动, x , y , z 分别表示空间中的坐标, 该坐标点的有害物质浓度为 $C(x, y, z)$ 。高斯烟羽模型用于扩散源连续释放的情境, 如烟囱或其他持续不断释放的危害源。

1.2.2 高斯烟团模型

高斯烟团模型的表达式如公式(2)。

$$C(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{\sigma_y^2}} \left(e^{-\frac{(z-H_r)^2}{\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H_r)^2}{\sigma_z^2}} \right) \quad (2)$$

其中: σ_x , σ_y 和 σ_z 分别表示 x 方向、 y 方向与 z 方向的高斯扩散参数; H_r 表示释放源高度; 公式假设风沿 x 正方向以风速 u 移动, x , y , z 分别表示空间中的坐标, 该坐标点在释放开始后 t 时刻的有害物质浓度为 $C(x, y, z, t)$ 。高斯烟团模型用于扩散源瞬时释放的情境(释放时间远小于扩散时间也可近似为瞬时释放), 如爆炸或其他短时间释放危害物质的释放源。

高斯烟羽模型和高斯烟团模型可以满足绝大多数生化物质扩散的仿真, 并且已经应用在众多生化物质扩散仿真系统中。

1.3 生化灾害评估

现有的生化灾害评估方法较为简单, 一类是通过毒理学的毒性指标和一个地区的人口分布计算

出大概的伤亡人数, 另一类是根据生化物质的扩散情况和已有经验给出定性的评估结果。现有评估方法存在一定缺陷, 它基于统计数据, 忽略了生化灾害中动态事件的影响, 针对小范围公共场所(如化工厂、广场等)无法进行仿真评估。

2 人工社会计算实验工具及模型

人们很早就开始尝试通过计算机仿真的方法研究社会问题。随着计算机运算能力的增强, 人们发现原有的社会模型在某种程度上已经不能满足建立一个复杂社会系统的需要, 同时伴随着复杂网络理论的诞生, 基于复杂系统和多 Agent 建模的社会问题研究方法逐渐走向主流。它不仅能够对宏观社会现象进行分析, 同样它也具备分析个体行为模式的能力。通过人工社会计算实验, 人们对社会的认识将会达到一个新的高度。2004 年, 由王飞跃提出的人工社会-计算实验-平行执行(ACP)理论使人工社会方法取得了新的进展, 通过计算实验来解决过程更为复杂、结果更难以预测的社会问题^[8-9]。现在已有一定数量的人工社会计算实验软件或语言, 比较著名的有 Swarm^[10], Netlogo^[11], Repast^[12-13] 等。这些开发语言或软件平台均基于多 Agent 理论实现, 通常包含人口模型、环境模型, 但是它们都缺乏相应的领域模型, 所以无法实现生化危害的仿真。

2.1 人口模型

人口模型由多 Agent 系统和个体的行为模型组成。在系统中首先需要确定人口的数量、性别和年龄分布、工作和家庭信息等基本数据, 然后根据复杂网络理论生成人口网络。除了基于网络结构的 Agent 系统, 我们还需要建立个体的行为模型, 即确定个体的活动规则。人口是生化灾害仿真的主体, 人口模型也是仿真系统的基础部分。

当生化灾害发生后, 所有人员都会进入紧急状态, 经过一定的响应时间后开始执行相应的行为, 如疏散人员开始疏散、营救人员启动营救行动等。

2.2 环境模型

环境模型包括了地形地貌、建筑物和交通系统等。人工社会系统中的 Agent 均在环境模型设定的仿真环境中活动, 同时系统中丰富的地形地貌数据也为生物物质扩散仿真提供了有力的数据支持。建筑物和交通系统是人群日常行为和紧急情况下疏散模型的重要组成部分。

2.3 领域模型

领域模型使人工社会系统具备了与领域仿真结合的功能, 如人工社会中的疾病传播模型、舆论传播模型等。一个通用的人工社会计算实验平台一般不具有领域模型, 当开发者在实验平台上进行某一专门领域的实验时, 需要在平台基础上开发领域模型用于领域仿真。在本系统中, 人工社会计算实验平台为生化仿真提供了支撑, 生物物质的危害模型和生化灾害下人员疏散模型作为领域模型加入到人工社会计算实验平台中。

3 生化仿真与人工社会计算实验集成的途径

现有生化仿真工具的局限性在于缺乏完善的人口和环境模型与数据, 并且危害评估的方法也仅限于人群危害的统计分析。而人工社会计算实验平台作为一个社会仿真系统, 具有详细的人口和环境模型与数据, 能对生化仿真工具提供良好的支撑。与此同时, 生化灾害还可通过生化仿真工具与人工社会计算实验平台的接口, 使用建模的方法对危害物质的扩散以及对个体的危害进行定量化描述, 管理者可在人工社会平台评估生化灾害对社会的影响, 并测试应急响应预案, 进行应急管理研究。

生化仿真工具和人工社会计算实验平台的集成目的在于提升定量分析生化灾害对社会的影响、研究生化灾害下人群的行为特征(疏散)以及研究生化灾害应急管理的能力。两者可通过以下两个方面模型的改进进行集成。

3.1 生物物质危害模型

生物物质危害模型是生化仿真工具与人工社会的主要结合方面, 它用于模拟和计算不同生物物质在不同情境下对个体身体状况造成的影响, 如死亡、失去行动能力等。通过对生物物质危害性的建模, 使人工社会计算实验平台具备了与生化灾害仿真集成的能力。

3.1.1 生物物质毒性指标

常见的衡量生物物质毒性的指标有 LD_{50} (Lethal Dose 50%)和 LC_{50} (Lethal Concentration 50%)等, 它们分别表示 50%致死剂量和 50%致死浓度。另外, 人员受有毒物质影响不仅与浓度有关, 与暴露在该浓度环境中的时长也有关系, 著名化学家 Fritz Haber 于 20 世纪初提出 Ct 的概念: 个体受有毒物质影响的程度可用浓度 C 与暴露时间 t 的乘积衡量(Haber's Law)^[14], 例如一个人在有毒物质浓度为 10 mg/L 的环境下暴露 1 min 与浓度为 1 mg/L 的环境下暴露 10 min 的影响是近似相等的。所以人们往往使用 LCt_{50} (半致死浓度与暴露时间的乘积)描述一种化学物质的毒性。我们使用的扩散模型能方便的计算出一个点在某一时刻的浓度, 相反地, 直接估算一个人吸入危害物质的剂量则非常困难, 因此在生物物质危害模型中, 我们使用 Ct 来评估生物物质对个体 Agent 的影响, 具体使用的指标可以包括 ICt_{50} , ICt_{90} , LCt_{01} , LCt_{50} , LCt_{90} , LCt_{100} (分别表示半失能, 90%失能, 最小致死, 半致死, 90%致死, 绝对致死)等。

因人工社会计算实验平台中每个 Agent 具有比较完整的属性, 在实验数据充足的情况下还可考虑性别和年龄的影响。对每一种危害物质, 都可列出如表 1 的毒性指标表。

若没有足够的数据用于考虑不同性别年龄的人群中毒性指标的分布, 则对所有 Agent 使用通用的毒性指标。

表 1 不同年龄性别的毒性指标表例(单位:kg/m³·s)

	最小致死 (LCt ₀₁)	50%致死 (LCt ₅₀)	90%致死 (LCt ₉₀)	绝对致死 (LCt ₁₀₀)
0-10 岁男			
0-10 岁女			
20-30 岁男			
20-30 岁女			
.....				

3.1.2 毒性指标的分布

下面以致死毒性指标为例,计算毒性指标的分布。假定 Agent 的致死毒性指标 LCt 符合对数正态分布,当 $x > 0$ 时,对数正态分布表达式如(3)所示。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\ln(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

当 $\mu = 0, \sigma = 1$ 时,对数正态分布概率密度函数曲线如图 1 所示。

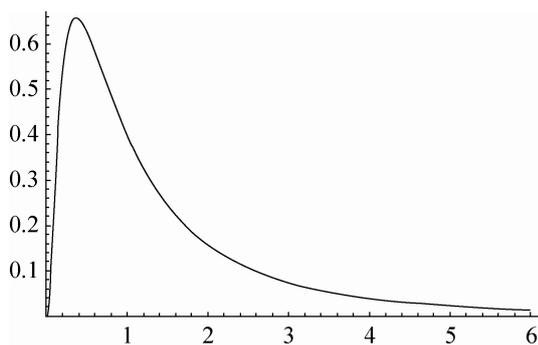


图 1 对数正态分布概率密度函数

其累计分布表达式如式(4)所示。

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{Erf} \left[\frac{\ln x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right] \quad (4)$$

其中 $\operatorname{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 。所以可得式(5)。

$$\begin{cases} F(\text{LCt}_{50}) = 0.5, \\ F(\text{LCt}_{90}) = 0.9 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \operatorname{Erf} \left[\frac{\ln(\text{LCt}_{50} - \mu)}{\sigma\sqrt{2}} \right] = 0, \\ \operatorname{Erf} \left[\frac{\ln(\text{LCt}_{90} - \mu)}{\sigma\sqrt{2}} \right] = 0.8 \end{cases} \quad (5)$$

通过数值求解得到 $\operatorname{Erf}(0) = 0, \operatorname{Erf}(0.9062) = 0.8$, 那么可以通过式(6)求解出 μ 与 σ 。

$$\begin{cases} \frac{\ln(\text{LCt}_{50} - \mu)}{\sigma\sqrt{2}} = 0, \\ \frac{\ln(\text{LCt}_{90} - \mu)}{\sigma\sqrt{2}} = 0.9062 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu = \ln(\text{LCt}_{50}), \\ \sigma = \frac{\ln(\text{LCt}_{90}) - \ln(\text{LCt}_{50})}{0.9062\sqrt{2}} \end{cases} \quad (6)$$

3.1.3 人员伤亡的判定

对每个 Agent, 当前的毒性指标 Ct (浓度·时间, kg/m³·s) 计算方法如下: 设仿真步长为 Δt , 则在某一时段 $(t, t + \Delta t)$, 位于 (x, y, z) 的个体对应的 Ct 为 $\Delta t \cdot C(x, y, z, t)$, 那么一个人到 $t = n \cdot \Delta t$ 时刻的 Ct 总量计算公式如式(7)。

$$\text{Ct} = \sum_i^n C(x_i, y_i, z_i, i\Delta t) \Delta t \quad (7)$$

计算得到 Agent 的毒性指标 Ct 后,判断 Agent 所处的状态,若毒性指标 Ct 超出该 Agent 所能承受的致死毒性指标 LCt, 则该 Agent 的状态改变为死亡,对 Agent 丧失行动能力的处理也是类似的。一旦 Agent 状态改变,系统可以精确获得下列类似信息:在 t_1 时刻个体 a 在 (x_1, y_1, z_1) 死亡或在 t_2 时刻个体 b 在 (x_2, y_2, z_2) 丧失行动能力。

除了死亡和失能外,如果有丰富的毒理学数据,还可以对 Agent 建立更为细致的危害模型,有害物质对 Agent 的影响方式见表 2。

影响方式	相关毒性指标
Agent 死亡	LCt, LC, LD, MLD, MNLD, TEEL-3 等
Agent 昏迷或失能, 速度为 0	ICt, IDLH, AEGL-3, ERPG-3 等
Agent 出现严重中毒现象, 速度减慢	AEGL-2, ERPG-2, TEEL-2 等
Agent 出现中毒现象, 不影响行动	ECt, EC, ED, AEGL-1, ERPG-1, TEEL-1 等
Agent 能感觉到毒气, 无症状	LSDA, TEEL-0 等

3.2 人群疏散模型

人群疏散模型是生化仿真工具与人工社会计算实验平台的第二个结合方面,它用于描述人群受到生化灾害的影响后作出的应急反应,疏散模型能体现出人群在生化灾害威胁下的行为特点和运动规律,是生化灾害对社会产生的直接影响。常见的疏散模型有元胞自动机模型和社会力模型等,其中元胞自动机模型将整个疏散环境划分为网格(元胞),每次个体移动只能向与该个体所在网格相邻的八个网格移动,这种方法计算速度快,实现非常简单。因此,在对大规模疏散进行仿真时,可采用元胞自动机模型。而社会力模型将环境中所有实体均视为单个粒子或粒子团,将人与人、人与环境之间的心理作用抽象为一种力^[15]。力作用于粒子使粒子产生相应的运动,所以,社会力模型的计算更加复杂,也更适用于小场景。

社会力模型由 Helbing 提出,他最初提出社会力模型的应用背景就是在恐惧情况下的人员疏散情景,因此社会力模型不仅对普通行人能有效地仿真,它同样能很好地模拟紧急情况下的疏散过程。社会力模型中,粒子的运动方程描述见公式(8)。

$$m_a \frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = m_a \frac{\mathbf{v}^0 \mathbf{e}(t) - \mathbf{v}_a(t)}{\tau_a} + \sum_{b(\neq a)} \mathbf{f}_{ab} + \sum_W \mathbf{f}_{aW} \quad (8)$$

其中: a 表示个体对应的粒子标号; m_a 表示粒子 a 的质量; $\mathbf{v}_a(t)$ 表示粒子 a 在 t 时刻的速度。表达式右边第一项表示粒子 a 的自驱动力,右边第二项表示粒子 a 与其他单个粒子产生的作用力合力,其中包括排斥力、吸引力、摩擦力等,右边第三项表示该粒子 a 与其他环境实体产生的力的合力,包括排斥力、吸引力、摩擦力、恐惧产生的推力等等。所以,我们可在式(8)中添加项实现人群对有害物质的恐惧和排斥作用,当有害物质浓度增高时,人群会更焦躁,期望速度会更高,相较无有害物质的疏散存在明显的差异,如图2。

在时刻 t 计算出粒子的加速度 $d\mathbf{v}_a/dt$,并通过数值积分的方法即可计算出行人的速度和位置,模拟出人群的疏散行为。在每个仿真步长,社会力模

型的时间复杂度为 $O(n^2)$,对于较大范围的情况,尤其是行人数目明显增多后,社会力模型计算效率低下,无法完成预期的仿真功能。因此在大范围情景中可以使用如下方法将元胞自动机的网格划分思想与社会力模型相结合。

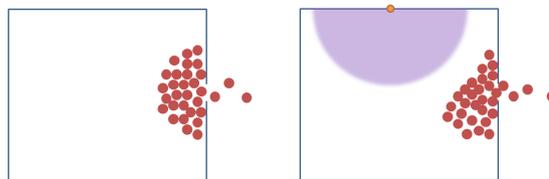


图2 无有害物质与有害物质的疏散情况示意图

首先将全部仿真区域划分为等大小的方形网格,且每个网格与当前处在该网格的 Agent 和环境实体有连接关系,如图3所示。然后设定一个参数 R ,当两个 Agent 的距离大于 R 时可认为他们之间不再存在相互关系,这时计算每个 Agent 的加速度时只需考虑在距离 R 以内的网格上的 Agent 和环境实体。另外,网格的划分也能对 Agent 的路径规划起到加速作用,在远离目标点的位置,同一网格内 Agent 可以对其规划相同或相似的路径,一定程度上解决了对所有个体逐一规划路径而导致效率低下的问题。

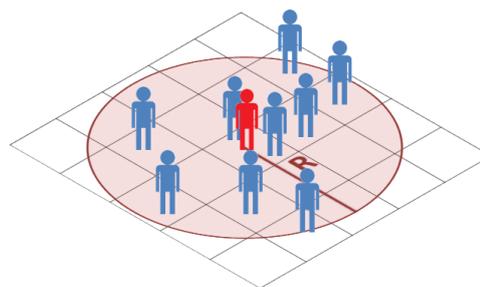


图3 仿真区域划分示意图

4 集成框架

为了更好地将生化仿真工具与人工社会计算实验平台集成,本节提出集成系统的基本框架。框架可分为四个部分,分别为人工社会建模、生化灾害建模、仿真实验和仿真运行环境。系统框架图如图4所示。

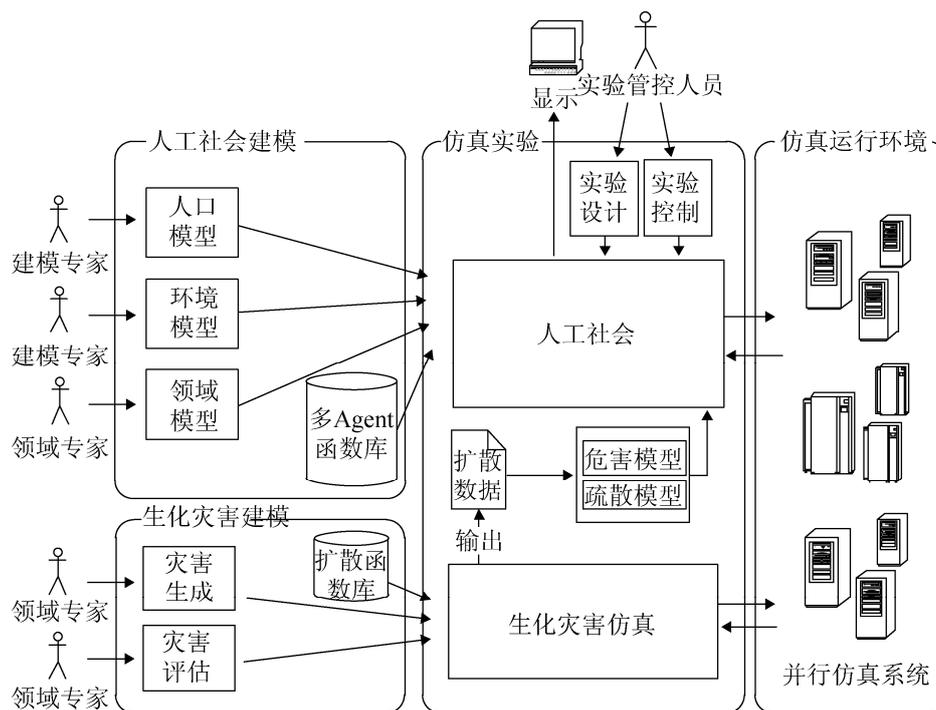


图 4 系统集成框架

系统集成框架中的 4 个部分分别实现了不同的功能。其中人工社会建模由建模专家或领域专家建立相应的仿真模型(包括人口模型、环境模型和领域模型), 并设定生化灾害生成和评估的相关参数, 这部分还包含相应的函数库, 用于支持多 Agent 系统仿真的运行; 生化灾害建模部分主要由扩散领域专家确定扩散参数, 由毒理学和应急管理专家确定生化灾害的评估方案, 这部分模型可以通过扩散函数库调用, 并且能以动态链接库的形式与仿真实验集成; 仿真实验部分主要用于进行实验设计和仿真控制, 生化灾害仿真与人工社会的集成也在这一部分体现, 生化灾害仿真输出仿真数据并导入危害模型和疏散模型, 这两个模型接收到数据后作出响应从而改变人工社会的状态; 仿真运行环境负责运算, 它可支持模型调度、并发事件处理、分布式计算、CPU/GPU 加速等功能, 并可确保生化灾害仿真与人工社会仿真的时钟同步。

系统集成框架的不同部分之间的接口主要依靠函数库和数据文件或数据流实现。人工社会建模环境完成各子模型的建模后, 协同多 Agent 系统仿

真函数库, 通过函数调用的方式与人工社会实验环境实现对接, 用于接口实现的函数包括初始化函数、仿真控制函数等。生化灾害建模环境与人工社会建模环境类似, 依赖于扩散函数库, 并通过动态链接库调用的方式与人工社会实验环境对接, 动态链接库中包含了生化事件生成、扩散仿真、危害评估和生成效果图等多种类型的函数。而人工社会运行环境是为基于多 Agent 理论的人工社会系统而设计的高性能运算平台, 它与实验环境通过相关的运算函数和数据接口进行集成, 它们之间不仅涉及到函数的调用还涉及到大容量数据的传送。因此, 必须处理好系统间各个部分的通信机制, 保证系统的并发处理能力和模型调度能力。

5 结合案例

假定在某化工厂一厂房内发生有毒气体氯气(Cl_2)泄露事件。厂区平面图如图 5 所示, 泄露点位置在图中标出。图中正右侧为厂房的逃生门, 绿点为氯气泄漏点, 厂房的长宽各 20 m, 逃生门宽 1m, 假设 200 名工人随机分布在厂房内。

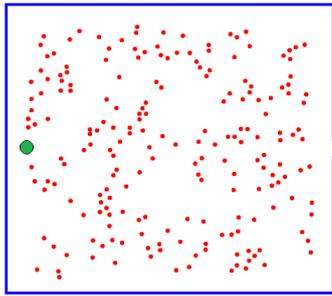


图 5 厂房平面示意图

查阅相关文献, 氯气的 LCt_{50} 为 $1.14\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{s}$, LCt_{90} 为 $4.98\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{s}$ 。由式(6)可得 μ 和 σ 的表达式(9)。

$$\begin{cases} \mu = \ln(LCt_{50}) \approx 0.131, \\ \sigma = \frac{\ln(LCt_{90}) - \ln(LCt_{50})}{0.9062\sqrt{2}} \approx 1.15 \end{cases} \quad (9)$$

根据给定的 LCt 分布表达式, 给人工社会计算实验平台中每个 Agent 随机设定一个致死毒性指标 LCt 。假定事发时厂房内工人均在工作状态, 氯气泄露的速率为 $1\text{kg}/\text{s}$ 。完成参数的设定后即可开始仿真。通过共 5 次仿真实验, 可以得出厂区死亡密度分布、死亡数随时间的变化趋势, 见图 6~7。

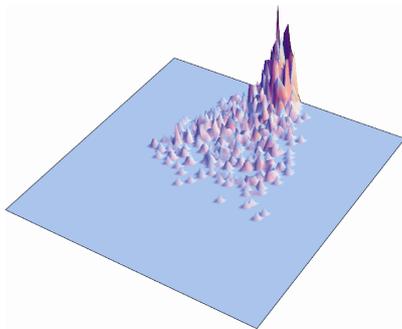


图 6 死亡密度分布图

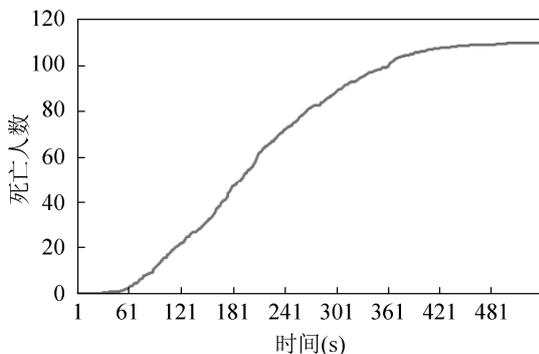


图 7 死亡人数趋势图

观察仿真结果, 我们发现, 在厂房逃生门附近死亡人数明显较多, 且死亡速率随时间呈先增后减趋势, 在前 1 min 内死亡人数很少, 为黄金逃生时间。因此管理者可根据仿真结果, 制定相应的应急管理预案, 确保人员能在规定时间内迅速疏散或在厂区内增添相应的紧急救护设施, 使工人能在最快速得到保护, 避免惨剧的发生。

6 结论

由于生化灾害具有极大危害性, 所以对生化灾害难以进行真实实验, 仿真就成为了研究此类问题的最佳选择。本文介绍了生化仿真与人工社会计算实验平台的集成系统, 为未来研究生化灾害提供了一种可行的方法, 但生化灾害仿真在未来的发展仍有很多挑战和发展空间。

(1) 生化仿真与人工社会计算实验多方面集成

生化仿真工具与人工社会计算实验平台除了从文中提到的两个方面集成外, 还可以在很多方面进行集成, 如人员伤亡的信息如何从受灾区传播到外界、营救人员如何营救受困人员、危害带来的舆论影响以及危害对经济的影响等。人员伤亡信息的传播可以选取合适的消息扩散模型进行仿真; 受困人员营救模型可以看作是疏散模型的逆过程, 疏散模型是疏散人员从事发点规划路径前往安全地点, 而营救模型是营救人员规划路径前往事发地点并将伤者送往安全地点, 此外营救模型还应考虑营救人员防护设备的防护性、使用时间和营救策略规划等问题, 因此营救模型是一个复杂但极具应用前景的集成方向。危害对社会带来的舆论及经济影响涉及到更多的领域知识, 相关的研究更具有挑战性。

(2) 动态数据驱动应用系统。为了提升系统的实时性和预测性, 仿真数据可以从真实世界中直接获取。NSF 于 2000 年提出的动态数据驱动应用系统(DDDAS)的概念^[16]。DDDAS 仿真将仿真系统与外界环境结合, 通过传感器或其他设备实时采集现实世界的的数据, 作为仿真系统的输入量进行仿真,

或作为其参考数据用以修正仿真模型。

(3) 生化灾害反算与溯源。在实际生产中,有时我们能通过监测站监测到有害物质的严重超标,却并不能知道有害源的释放速率和位置,因此,生化灾害的溯源和反算在未来工作中将占有举足轻重的地位。灾害反算可应用于工业园区,根据园区内监测站监测的数据分析出超标污染物的排放源强和位置,也可在战场上用于迅速确定生化武器的当量和攻击点。现有的生化灾害反算算法大多只能用于恒定释放速率且位置已知的有害物质泄露事故,对于源强可变和位置未知的有害事故反算与溯源还有很大的研究空间。

参考文献:

- [1] David Lazer, A Pentland, L Adamic, *et al.* Computational Social Science [J]. Science (S0036-8075), 2009, 323(5915): 721-723.
- [2] Matt Brennan. HPAC (Hazard Prediction and Assessment Capability) \diamond jSWAT (Joint Seminar Wargaming Adjudication Tool) Integration; A Technical Solution [R]// Victoria, Australia: Human Protection and Performance Division DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2006: 1-25.
- [3] Westinghouse Savannah River Company. Use of the Hazard Prediction and Assessment Capability (HPAC) at the Savannah River Site (U) [R]// United States: Westinghouse Savannah River Company, 2004: 1-23.
- [4] Kathleen M Carley. BioWar: Scalable Agent-Based Model of Bioattacks [C]// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans. USA: IEEE, 2006, 36(2): 252-265.
- [5] John Sontowski. Multiscale Environmental Dispersion Over Complex Terrain—The MEDOC Models [R]// United States: Defense Nuclear Agency, 1996: 1-86.
- [6] Bojan Gasic. Assessing the Impact of Weather Events at Mid-Latitudes on the Atmospheric Transport of Chemical Pollutants Using a 2-Dimensional Multimedia Meteorological Model [J]. Atmospheric Environment (S1352-2310), 2010, 44(35): 4489-4496.
- [7] Ralf Metzler. The Random Walk's Guide to Anomalous Diffusion: A Fractional Dynamics Approach [J]. Physics Reports (S0370-1573), 2000: 339(1): 1-77.
- [8] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究讨论 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
- [9] 邱晓刚, 张鹏, 陈彬, 等. 面向非常规突发事件应急管理的人工社会计算实验平台研究 [J]. 中国应急管理, 2014, 1(2): 7-14.
- [10] Minar N. The Swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations [R]. Santa Fe, NM: Santa Fe Institute. 1996: 1-11.
- [11] Tisue S. NetLogo: A Simple Environment for Modeling Complexity [C]// Boston, USA: International Conference of Complex System, 2004: 16-21.
- [12] Collier N. Repast: An Extensible Framework for Agent Simulation [R]// United States: Natural Resources & Environmental Issues, 2001: 1-18.
- [13] Steven F. Railsback. Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations [J]. Simulation (S0037-5497), 2006, 82(9): 609.
- [14] Bliss C I. The Relationship between Exposure, Time, Concentration and Toxicity in Experiments on Insecticides [J]. Annals of the Entomological Society of America (S0013-8746), 1940, 33(4): 721-766.
- [15] Dirk Helbing. Simulating Dynamical Features of Escape Panic [J]. Nature (S0028-0836), 2000, 407(6803): 487-490.
- [16] DDDAS Workshop. DDDAS Workshop Report, NSF Workshop Report, January 2006. [R/OL]. (2010-08-30) [2015-06-29]. www.dddas.org.