

# 灾害治理与城市治理领域仿真技术的研究综述

瞿妙希, 袁景怡

北京建筑大学城市经济与管理学院, 北京

收稿日期: 2026年5月8日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年6月5日

## 摘要

在全球气候变化与城镇化背景下, 灾害治理对仿真技术提出了更高要求。为系统把握仿真技术的应用脉络, 本文梳理了系统动力学、元胞自动机、社会力模型、多主体建模、数字孪生及大语言模型驱动仿真的研究进展。研究表明, 仿真技术正从传统模型向虚实融合、认知驱动演进, 为提升应急管理效能提供支撑。

## 关键词

仿真技术, 灾害, 仿真模型, 城市治理

# Research Review of Simulation Technology in the Fields of Disaster Governance and Urban Governance

Miaoxi Qu, Jingyi Yuan

School of Urban Economics and Management, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

Received: May 8, 2026; accepted: June 1, 2026; published: June 5, 2026

## Abstract

Against the backdrop of global climate change and urbanization, disaster governance has put forward higher requirements for simulation technology. To systematically grasp the application context of simulation technology, this paper reviews the research progress of system dynamics, cellular automata, social force models, multi-agent modeling, digital twins, and large language model-driven simulation. The research shows that simulation technology is evolving from traditional models to virtual-reality integration and cognitive-driven approaches, providing support for improving the effectiveness of emergency management.

## Keywords

Simulation Technology, Disaster, Simulation Model, Urban Governance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

全球气候变化与快速城镇化加剧了灾害与城市安全风险的复杂性和不确定性,对灾害与城市治理的科学化、智能化提出更高要求。仿真技术作为复杂系统推演与决策优化的核心手段,对提升治理效能与城市韧性具有重要价值。本文围绕仿真技术在灾害治理与城市治理中的应用展开系统综述,梳理其发展脉络与研究现状。

本文所指仿真技术是采用数学模型与计算机技术模拟真实系统动态行为,用于预测、验证及优化系统性能的工程方法[1]。综述聚焦灾害治理与城市治理,以2020~2026年国内外核心研究为主,兼顾经典与前沿成果,保证时效性与系统性。本文中,灾害治理是指广义灾害场景下的全链条应急治理,具有短期、突发、强不确定性的特点;城市治理特指城市常态运行阶段的常规治理活动,具有长期、连续、规则稳定的特点。前者为非常态应急治理场景,后者为常态运行治理场景。常态城市治理为灾害治理筑牢空间与机制基础,灾害治理则检验并强化城市系统韧性,二者共同构成城市安全治理体系的平急一体化框架。

灾害与城市治理领域的仿真技术发展大致经历以下阶段:系统动力学可从宏观刻画灾害与疏散的整体反馈,但难以描述微观个体差异与空间特征。元胞自动机以离散化、可扩展建模实现微观行为模拟,但在连续运动与复杂交互上存在不足。社会力模型突破离散模型局限,提供更真实的物理运动支撑,但过度依赖力学假设,缺乏主体自主决策。2000年后,多主体建模(ABM)继承元胞自动机自下而上思路[2],实现异质主体行为与宏观涌现模拟,但难以与物理场景实时同步。数字孪生以数据驱动的虚实同构解决反馈缺失问题,2014年后广泛应用于洪涝治理与智慧城市,但智能交互与决策能力有限。大语言模型(LLM)进一步赋予仿真认知推理、自然交互与智能决策能力,推动疏散仿真从行为模拟走向认知决策,成为当前前沿方向。

本文系统梳理了仿真技术在两大领域的应用脉络,厘清了不同仿真技术的应用场景、侧重点与瓶颈,对比了各类技术的核心异同,明确了其在常态治理与应急治理场景中的适配差异、互通价值与融合路径,为构建平急一体化的仿真技术体系提供参考。

## 2. 系统动力学的应用

### 2.1. 系统动力学概述

系统动力学是始于1956年的一种研究复杂系统结构、功能与动态反馈行为机制的系统科学方法,主要用于研究复杂系统的结构、功能与动态行为之间的关系[3]。

### 2.2. 系统动力学在洪涝灾害中的应用

近年来,系统动力学模型在洪涝灾害治理中得到广泛应用。在城市洪涝治理场景中,李灿构建了暴雨洪涝下社区韧性系统动力学模型,基于仿真结果,针对性地提出社区韧性水平提升策略[4];雷婷等人则构建县域适灾韧性三角形模型,设计反映县域适灾韧性演化过程的系统动力学模型,指出县域适

灾韧性的演化趋势, 并从灾害前中后三个方面给出了建议[5]; 徐宗学等人则构建城市内涝灾害应急管理系统动力学(SD)模型, 刻画全过程动态演化, 识别影响内涝应急的关键因素与敏感变量, 提出可提升应急处置效果的针对性对策, 为防洪减灾提供支撑[6]; 此外, 陈杉等人构建了矿山水害灾害链动态分级预警决策系统, 揭示了极端降水驱动矿山水害灾害链的非线性演化机制, 为矿山水害精准预警与灾害防治提供了理论依据与技术支撑[7]; 卢毅等人从决策者视角出发, 采用系统动力学方法构建了决策者风险感知对洪涝灾害应急物资调配影响的仿真模型, 揭示了救灾中心与灾点决策者的风险感知水平对灾点物资满足率及供需不平衡程度的影响规律, 阐明了决策者风险感知对洪涝灾害应急物资调配的影响机制[8]。

### 2.3. 代表性研究评述

上述研究运用系统动力学方法, 通过构建社区韧性、县域适灾性、应急物资调配等多场景反馈模型, 将洪涝灾害治理中的多要素交互关系转化为可量化的存量与流量回路, 实现了对灾害演化全过程的动态追踪, 为识别关键驱动因素、制定干预策略提供了可验证的量化依据。同时, 研究场景从城市社区、县域治理延伸至矿山等特殊灾害场景, 并纳入决策者风险感知等行为变量, 突破了传统模型仅关注物理过程的局限, 有效提升了模型对真实灾害治理中物理社会耦合系统的解释力, 为理解灾害治理中的人为因素提供了新的分析视角。

但系统动力学的宏观建模特性, 决定了其以系统整体行为为核心分析单元, 难以刻画洪涝灾害中不同区域的空间异质性差异, 也无法捕捉个体与群体的疏散行为差异, 模型输出更偏向宏观趋势判断, 难以支撑精细化的应急决策; 同时, 当前研究多采用单一系统动力学模型, 与 GIS、多主体建模、数字孪生等技术的耦合仍处于起步阶段, 难以实现宏观系统趋势与微观个体行为、物理空间动态的同步推演, 无法满足平急一体化治理对常态风险研判与应急动态响应的双重需求。

## 3. 元胞自动机的应用

### 3.1. 元胞自动机概述

元胞自动机为离散、分布式、空间可扩展的动力学系统, 无需复杂微分方程即可模拟复杂演化。其应用已从自然科学拓展至工程与社会领域, 随后该方法延伸至行人流仿真, 形成交通流模型改进与二维行人模型直接构建两大路径, 推动行人动力学发展, 成为复杂系统时空演化研究的核心工具[9]。

### 3.2. 元胞自动机在灾害事故场景中人群紧急疏散的应用

元胞自动机是人群紧急疏散常用仿真模型, 适用于多类灾害与事故场景。杜鹏飞等模拟极端降雨洪水侵入下地铁隧道疏散, 引入行为决策机制[10]; 孙华锴等构建视障与正常行人混合疏散模型, 刻画视障者疏散特征[11]; 曹淑超等建立恐怖袭击下应急疏散模型, 弥补袭击行为缺失问题并给出优化建议[12]; 张海鹏等提出 CAVT 模型, 量化船舶超大空间火灾环境影响[13]; 白鹏等综合人群行为与人员特征, 实现复杂楼宇疏散仿真[14]; 宋英华等构建融合折返行为的场域模型, 揭示逆流对冲拥堵机理并提出减阻方案[15]。

元胞自动机在人群疏散研究中常与心理行为因素耦合建模。刘以雪等构建融合从众行为与个体差异的模型, 分析人群规模、出口间距对从众阈值的影响[16]; 凤四海等引入恐慌传染机制, 量化恐慌值并融入决策, 模拟不同危险扩散与密度下的疏散规律[17]; 王莉等结合 CA、A\*路径规划与 SIS 情绪传染, 探究恐慌对封闭空间疏散效率的影响[18]; 王益等集成恐慌传播与救援分区引导, 揭示耦合作用机制并提出救援分配策略[19]; 宋英华等融合恐慌感染与信息引导, 揭示情绪与信息共同作用下的疏散规律[20]。

### 3.3. 代表性研究评述

上述研究运用元胞自动机模型, 覆盖地铁隧道洪水、船舶火灾、恐怖袭击等多类灾害事故场景, 从基础路径模拟拓展至从众行为、恐慌传染、折返决策等复杂心理因素的耦合刻画, 为揭示疏散拥堵机理、优化减阻方案提供了量化支撑; 部分研究还与路径规划、情绪传染模型结合, 进一步提升了对真实场景的还原能力。但元胞自动机以预设局部规则驱动离散格点演化的核心逻辑, 使其在面对真实灾害的复杂性时仍存在明显局限。一方面, 规则化格点空间难以适配船舶超大空间、隧道等复杂几何结构, 模型对场景细节的刻画能力有限; 另一方面, 静态的预设规则无法完全复现个体决策的随机性, 也难以耦合火灾蔓延、积水上涨等动态灾害过程, 多数研究仍停留在静态场景的疏散推演, 对疏散个体与救援人员、管理人员之间的多主体协同交互刻画不足, 难以支撑复杂场景下的一体化应急决策需求。

## 4. 社会力模型的应用

### 4.1. 社会力模型概述

社会力模型也是一种人员疏散模型的微观的建模方法, 它把行人视为相互作用的粒子, 考虑了恐慌系数对人员疏散的影响[21]。对比元胞自动机模型离散化空间、规则化演化、仅能实现简单局部交互的特征, 社会力模型则更侧重于连续运动过程、力学机理抽象、可刻画复杂人群交互行为。

### 4.2. 社会力模型在灾害事故场景中人群紧急疏散的应用

现有研究围绕多场景应急疏散, 基于基础社会力模型开展了大量优化与应用工作。杨子贤等构建社会力模型, 还原疏散动力学特征, 优化铁路客运站设备布局, 提升疏散效率[22]; 于润泽等探究折返行为与响应时间对大型邮轮疏散的影响, 为方案优化提供依据[23]; 程尧等基于社会力模型模拟文物景区疏散, 发现场景布局等 4 类因素均显著影响疏散效果, 并提出优化对策[24]。

为适配复杂灾害场景, 学者从多视角扩展改进社会力模型。刘珊引入从众心理与热辐射, 改进铁路客运站火灾疏散模型[25]; 魏诗雨等加入惶恐系数与同伴关系, 构建飞机火灾一体化疏散模型[26]; 张艺萌等结合 BIM 与 Multi-agent 优化海洋平台疏散模型[27]; 谢启苗引入群组与时间修正, 揭示客船疏散规律[28]; 李聪等耦合 FDS 与 AnyLogic, 揭示高海拔隧道火灾疏散规律[29]; 郭海湘等加入紧张因子与体力系数, 优化煤矿井下分区疏散[30]; 张平引入引导作用力, 构建静态引导疏散模型[31]; 邓杜军等耦合恐慌与速度, 改进恐慌疏散模型[32]; 刘维嵩融合引导与避障, 适配地铁站台疏散[33]; 晏晗琪改进道路与转弯场景, 识别老旧小区疏散瓶颈[34]; 朱琛宸融入情绪传染与团体行为, 优化医院分级疏散[35]。

### 4.3. 代表性研究评述

上述研究依托社会力模型及多学科耦合方法, 针对铁路客运站、邮轮、隧道、老旧小区等多类场景开展应急疏散仿真。社会力模型以“驱动力排斥力吸引力”为核心, 将个体运动转化为可量化的力学方程, 这一特性使其突破了传统离散模型的局限, 能够更真实地还原人群连续运动轨迹, 为揭示拥堵形成机理、优化通道与出口布局提供了可靠的量化依据。在此基础上, 学者们通过引入恐慌系数、同伴关系、引导作用力等变量, 将心理因素与力学模型耦合, 进一步拓展了模型对真实疏散场景的解释力, 为多场景疏散方案优化提供了决策支撑。

但社会力模型以连续力学驱动个体运动的底层逻辑, 也带来了难以突破的局限。模型的核心假设是“个体行为完全由力学平衡决定”, 这一理想化前提使其难以刻画真实灾害中个体的非理性决策、从众心理突变与动态环境干扰的耦合效应; 同时, 现有改进多集中于特定场景的局部参数修正, 未能从根本上拆解从个体行为、群体互动到环境约束的多尺度耦合演化机理, 对老旧小区、高海拔隧道等复杂受限

空间中, 设施老化、地形干扰与情绪传染等多源因素的动态交互刻画不足, 导致模型普适性与可迁移性有限。此外, 不同改进模型的边界条件、适用场景及误差来源缺乏横向对比与批判性评估, 尚未形成具有共识性的理论框架与改进范式。

## 5. 多主体建模的研究

### 5.1. 多主体建模概述

多主体建模是面向复杂系统研究的离散建模方法, 采用从微观个体到宏观整体的自下而上建模思路, 能够有效模拟城市系统中个体行为与决策过程, 在刻画人、时空耦合的复杂行为特征上具备显著优势[36]。

### 5.2. 多主体建模在应急行为中的研究

多主体建模作为模拟复杂系统运作手段之一, 其在城市灾害疏散领域的应用, 已完成从规则驱动模型, 到主体属性异质性刻画的模拟的研究范式转变。Oğuz Emir 等研究表明, ABM 可有效解析自然灾害对人口与基础设施的复合冲击, 尤其在应急物流中能够实现分布式动态决策, 优化救援协同与路径效率[37]; Jia Xu 融合复杂网络与 ABM, 量化基础设施失效衰减过程, 揭示风险级联扩散规律, 为风险阻断提供支撑[38], 证实 ABM 在应急协同与韧性评估中的优势。

在主体异质性刻画上, 相关研究突破均质假设。Maciej Pawlik 将儿童异质性引入模型, 揭示其洪涝疏散中空间感知与从众行为特征[39]; Mariana Vilaça 耦合 LCA 与 ABM, 复现主体偏好动态演化机制[40]。

随着多系统交互研究深入, ABM 在社会异质性解析中持续拓展。Jiawei Xue 构建社会-物理网络耦合模型, 揭示社区恢复中的群体分化规律[41]; Obeng A. Addai 基于 Flood-ABM 证实社会不平等加剧灾害脆弱性空间分异[42]; Xinyi Shu 提出多尺度物理驱动 ABM, 阐明下垫面与人口集聚对城市内涝风险的放大机制[43]。

### 5.3. 代表性研究评述

综上, 现有城市洪涝灾害居民应急行为研究, 依托多主体建模自下而上的离散仿真范式, 已形成从物理致灾环境到心理认知因素的完整研究脉络。物理层面, 多主体建模突破了传统宏观模型的局限, 可通过对个体位置、速度、行为规则的离散化定义, 实现积水流速、设施失效等动态致灾因子对疏散行为影响的量化追踪, 为构建多场景耦合模型提供了灵活的建模框架; 心理层面, 该方法可通过为不同主体赋予差异化的风险感知、人格特质与行为偏好, 突破均质假设, 厘清了个体异质性对决策行为的作用路径, 为洪涝应急管理提供了方法支撑。

但多主体建模模型的模拟效果高度依赖预设的行为规则与参数设定, 而现有研究多采用静态的人格特质参数, 缺乏对多特质交互及其与动态物理环境的时序耦合刻画, 难以真实复现灾害中居民从理性决策到非理性行为的动态演化过程; 同时, 主体行为规则的设定多基于经验假设, 缺乏真实灾害行为数据的校准与验证, 导致模型对真实疏散行为的拟合度与预测效度仍有待提升, 难以支撑高可信度的应急决策推演。

## 6. 数字孪生技术的应用

### 6.1. 数字孪生概述

随着城市治理与灾害应对复杂度的提升, 现实灾害场景往往呈现出突发性强、演化快、数据密集的特征, 对模型的实时性、真实性提出了更高要求。传统基于虚拟推演的仿真模型, 多依赖离线规则驱动, 难以在虚实之间建立高保真的实时映射与闭环反馈。数字孪生技术的诞生, 为解决这一困境提供了思路。它通过构建高保真物理底座, 实现了虚实同构, 使得仿真模型能够更紧密地贴合真实世界的动态演化。

从建模仿真的角度, 可以将其看作一个仿真模型[44]。

## 6.2. 数字孪生技术的应用

面对灾害场景复杂化趋势, 仿真技术亟需向虚实融合的实时化演进。数字孪生依托高保真物理底座构建虚实同构, 使模型能实时响应真实世界演化, 成为提升灾害治理效能的关键路径。张炜等搭建数字孪生泵站平台, 实现智能管控与优化调度[45]; 李新宇构建大型调水工程数字孪生体系, 提升工程智能运行与安全保障水平[46]; 朱晓光等基于开放数据协同构建洪涝应急系统, 提升需求分析与决策效率[47]; 张群等融合多源数据与 LSTM-GAN 模型, 建成数字孪生城市防洪“四预”决策系统[48]; 刘明等构建数字孪生水网平台, 实现中小流域防洪“四预”智能化[49]。

数字孪生正加速与物联网、水文模型、大数据、AI 深度融合。慎东方等总结大坝监测技术短板, 指明智慧水利发展方向[50]; 蔡帅等构建数字孪生预警系统, 实现感潮河网精准洪涝预警[51]; 张坤等构建高原山区高精度地理数据底板, 提升流域洪水预报与决策支撑能力[52]。

数字孪生在防汛抗旱中具备的高保真仿真与闭环决策能力, 可为城市治理数字化转型提供支撑。林雨铭等构建了融合复杂系统理论、数字孪生技术与强化学习算法的城市生命体研究框架, 实现跨系统耦合与全周期韧性治理[53]。

随着研究深化, 学界认识到模型与交互机制比单纯数据更关键。田颖等基于复杂系统与 CIM, 结合大模型构建孪生演进机制, 形成以场景迭代驱动的全要素数字孪生城市[54]; 李玉梅等解析元宇宙赋能智慧城市的逻辑与路径, 推动智慧城市向虚实融合、多元共治升级[55]。

数字孪生在火灾、地震、地质灾害防控中同样具有重要作用。吴建国等构建了融合物联网、人工智能与数字孪生技术的应急联动机制, 提升船舶火灾防控能力[56]; 徐翱等基于 BIM、GIS 与数字孪生研发高层建筑消防平台, 实现主动预警与高效救援[57]; Xie 等提出 ADLSTM-Fire 模型, 可超前 60 秒实时预测建筑火灾趋势[58]; Zhang 等将 Transformer 与数字孪生融合, 实现隧道火灾实时预测与三维可视化[59]。地震与地质灾害领域, 李芳构建多源传感、数字孪生与深度学习相结合的系统, 实现建筑抗震性能动态评估与预警[60]; 葛臣依托数字孪生实现矿山地质灾害全周期监测与修复评估[61]; 李焯芬等建立空天地监测与数字孪生决策体系, 提升三峡库区地质灾害防控水平[62]。

## 6.3. 代表性研究评述

学者们依托数字孪生虚实映射、实时交互与闭环优化的核心特性, 将其与物联网实时感知、水文动力模拟、大数据分析、人工智能推演等技术深度耦合, 构建起覆盖灾害孕育、演化、响应与恢复全周期的技术支撑体系。数字孪生通过物理实体与虚拟模型的双向映射, 在洪涝动态淹没范围推演、船舶火灾蔓延路径预测、建筑结构抗震性能评估等场景中, 实现了风险精准识别、灾害提前预警与防控方案动态优化, 为多灾种防控的决策效率与管控效能提升提供了全新技术路径。

但多数数字孪生工具聚焦单一灾害场景的功能性实现, 跨领域、跨部门的多源异构数据融合与共享仍存在显著壁垒, 难以形成支撑城市级安全治理的系统性数据底座; 同时, 现有模型多侧重灾害物理过程的还原, 对社会行为、应急决策等复杂因素的动态耦合刻画不足, 面向整体性、系统性的数字孪生城市构建仍存在较大挑战, 尚未形成覆盖全要素、全周期、全场景的闭环治理范式。

## 7. 大语言模型的研究

### 7.1. 大语言模型概述

数字孪生在场景构建方面已展现出成熟的应用价值, 而 LLM 可通过生成式认知交互, 为数字孪生主

体赋予超越预设规则的自主决策能力, 使其从固定脚本驱动的重复性行为模拟, 升级为基于环境感知与逻辑推理的真实人类行为决策。

## 7.2. 基于大语言模型的主体仿真与决策研究

LLM 驱动的主体仿真是应急管理领域, 特别是作为在疏散决策、危机沟通和灾害响应协调等复杂社会技术系统建模方面的重要手段之一[63]。

在疏散仿真领域, LLM 智能体可高保真模拟真实人群行为。Li 等基于 GPT-4o 构建万级智能体疏散系统, 融入移动、决策、交互模块, 为疏散预案提供实操建议[64]; Chen 等(2025)提出 FLARE 框架, 将 PMT 与前景理论融入 LLM, 显著提升野火疏散决策预测精度, 解决小样本过拟合问题[65]。

在物理环境与认知决策的耦合架构方面, Dang 等(2025)构建 LLM 与 CA 融合的火灾疏散模型, 相较传统 ABM, 疏散时间缩短 23%, 路径与协调性显著提升, 为复杂空间仿真提供新范式[66]。

在灾害信息处理领域, Mou 等综述了 LLM 驱动的社会仿真[67]; Zheng 等提出 E-KELL 框架, 用知识图谱增强灾害决策可靠性[68]; Yin 等(2025)开发 CrisisSense-LLM, 实现灾害信息高效自动分类[69]。

## 7.3. 代表性研究评述

LLM 驱动的多智能体模型有效解决传统 ABM 预设规则的局限性, 通过融合语义推理生成性行为与行为理论, 实现了对居民疏散行为灾害信息处理应急响应协调等场景的高保真仿真, 显著提升了仿真模型的适应性与决策指导价值, 同时拓展了其在应急物流信息监测资源调度等领域的应用边界。尽管 LLM 为灾害行为仿真与决策领域提供了新的路径, 但当前研究仍处于初级阶段, 目前 LLM 驱动的多智能体仿真存在可解释性差泛化能力不足的问题, 现有模型多依赖黑箱式推理, 难以明确智能体决策的内在逻辑与关键影响因子, 且模型在小规模场景下的仿真效果较好, 但在大规模多灾种叠加的复杂灾害场景下, 易出现人格一致性下降仿真效率降低等问题, 泛化能力有待提升。再者, 现有研究虽实现了 LLM 与 CA 水动力模型等物理环境模型的耦合, 但二者的耦合多停留在表层, 未能实现物理环境参数如积水深度流速与智能体认知状态如风险感知恐慌的实时动态交互, 导致仿真结果与真实灾害场景下的居民行为产生偏差, 亟需进一步优化模型架构深化领域适配强化多系统耦合, 推动人工智能技术与灾害应急管理的深度融合, 提升应急决策的科学性与准确性。

## 8. 各个仿真技术在灾害治理与城市治理中的评述

仿真技术对比表见表 1。

**Table 1.** Comparison of simulation technologies  
**表 1.** 仿真技术对比表

技术	模型原理	时空尺度	主体行为	数据需求	计算成本	主要优势	局限	应用场景	主要应用场景
系统动力学	反馈控制	连续	整体规则驱动, 不区分个体行为	系统存量数据、历史统计数据、灾害链演化参数	低	趋势清晰、整体演化	无微观、无空间	灾前风险评估、中长期韧性规划	灾害治理
元胞自动机	离散格点	离散	规则驱动, 个体行为由预设局部规则决定	初始状态数据、邻接规则参数、空间拓扑数据	中	轻量、易扩展	规则固化	灾前模拟、灾中应急推演	灾害治理

续表

社会力模型	连续力学	连续	规则驱动, 行为由力学约束主导	个体运动参数、空间拓扑数据、人群密度分布数据	中高	运动真实	力学假设强	灾中应急疏散	灾害治理
多主体建模	异质交互	连续、离散	自主决策, 支持异质主体的规则	主体属性数据、交互规则参数、环境动态数据、行为心理学数据	高	行为复杂	标定难	灾前预案推演、灾中应急响应、灾后恢复评估	灾害治理
数字孪生	虚实同构	连续	规则与数据双驱动, 物理实体与虚拟模型的同步交互	实时感知数据、三维空间模型、动态运行数据、历史运维数据	极高	实时同步	数据依赖高	全生命周期	城市治理
LLM驱动	认知推理	连续、离散	认知驱动, 支持自然语言交互、复杂决策与多主体对话	文本语料数据、对话交互数据、场景描述数据、行为知识库	极高	智能交互	幻觉、不稳定	全生命周期	灾害治理

## 9. 研究结论

本文基于灾害治理与城市治理视角, 系统梳理系统动力学、元胞自动机、社会力模型、多主体建模、数字孪生、大语言模型六类仿真技术, 得出以下结论:

(1) 从技术应用角度来看, 系统动力学侧重刻画灾害宏观系统演化, 多用于洪涝等综合治理, 但受限于其建模逻辑, 难以反映不同区域的空间异质性, 也无法捕捉个体疏散行为差异; 元胞自动机与社会力模型适配微观人群疏散场景, 能还原基础行为机理, 但分别存在规则固化、力学假设理想化的固有局限; 多主体建模可有效刻画异质主体交互, 实现微观行为到群体涌现的模拟, 但行为规则预设性强, 难以复现居民非理性动态决策; 数字孪生以虚实融合支撑全周期闭环管控, 但跨部门多源异构数据融合壁垒突出; 大语言模型凭借认知推理与自然交互能力成为前沿方向, 但在仿真幻觉控制、大规模复杂场景泛化上仍存在短板。

(2) 从范式演进角度来看, 仿真范式由单阶段向灾害全周期一体化演进, 从分散规划、响应、恢复转向全链条动态模拟。

(3) 从研究理念角度来看, 灾害治理的关注点已从单一的物理防控, 逐步转向物理、社会与心理因素的耦合分析。心理认知与行为规律成为关键, 未来需强化多维度耦合建模以提升应急决策科学性。

## 10. 研究建议

(1) 构建大语言模型与传统行为仿真模型的适配性耦合框架。针对现有仿真技术在物理过程与心理行为耦合上的短板, 突破单一模型局限, 推动系统动力学、社会力模型、多主体建模与大语言模型的交叉融合, 重点解决自然语言交互与离散行为规则的兼容问题, 实现物理环境、个体心理与群体行为的多尺度协同模拟, 为应急决策提供兼具动态性与保真性的仿真支撑。

(2) 搭建面向城市洪涝韧性治理的数字孪生闭环支撑平台。整合数字孪生的虚实映射能力、多智能体仿真的群体行为刻画能力与大语言模型的认知交互能力, 构建覆盖灾害孕育、演化、响应与恢复全周期的技术平台, 实现风险推演、行为仿真、方案优化与效果反馈的一体化运行, 破解跨部门数据壁垒, 为系统性应急决策提供统一底座。

开展非理想化场景下异质性主体非理性应急决策的生成机理研究。突破现有多主体建模中静态人格

特质与均质化主体假设, 引入人格特质交互、时序演化与灾害场景动态耦合机制, 刻画积水动态变化、信息偏差等不确定变量对居民决策的影响, 构建非理想化场景下居民非理性动态决策的生成机理模型, 替代固定规则驱动的仿真范式, 提升模型的现实适配性。

构建面向复杂受限空间的应急疏散仿真场景参数化适配方法与可迁移模型。提炼不同灾害场景的共性几何特征、环境约束与人群行为规律, 构建标准化的场景描述参数集; 同时开发基于元胞自动机与社会力模型的场景自适应建模接口, 实现不同空间结构、灾害类型下的快速模型生成与规则适配, 降低定制化建模成本, 提升仿真模型在多场景应急决策中的泛化能力与工程应用价值。

## 基金项目

北京市社会科学基金项目基金年度规划项目青年项目。

项目等级: 北京市社会科学基金青年项目(属于省部级社科基金)。

项目名称: 罕遇灾害下基于“资源-效能”匹配的首都韧性城市建设实施路径研究。

项目编号: 23GLC046。

## 参考文献

- [1] 范文慧, 蒋沅. 人工智能时代的仿真科学与工程思考[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(7): 1607-1623.
- [2] 翁春露. 智能体仿真模拟(ABM)的异化风险与融合治理——基于《科技伦理审查办法(试行)》的适用展开[J]. 中国科技论坛, 2026(1): 11-19.
- [3] 张波, 虞朝晖, 孙强, 等. 系统动力学简介及其相关软件综述[J]. 环境与可持续发展, 2010, 35(2): 1-4.
- [4] 李灿. 暴雨洪涝下社区韧性影响因素及提升策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2025.
- [5] 雷婷, 回晓靖, 刘杰. 面向暴雨灾害的县域适灾韧性演化模型构建及特征分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 164-171.
- [6] 徐宗学, 卢兴超. 城市暴雨洪涝灾害动力学机制及其防控关键技术[J/OL]. 水利学报, 1-16. <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.20250622>, 2026-05-01.
- [7] 陈杉, 黄莹, 赵云胜. 极端降水诱发矿山水害灾害链演化与预警[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(6): 28-39+58.
- [8] 卢毅, 尚远望, 王宇航, 等. 决策者风险感知对洪涝灾害应急物资调配的影响[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 182-190.
- [9] 杨立中, 方伟峰, 黄锐, 等. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型[J]. 科学通报, 2002(12): 896-901.
- [10] 杜鹏飞, 刘晓斐, 刘贞堂, 等. 基于元胞自动机的极端降雨下地铁疏散模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(12): 5-11.
- [11] 孙华锴, 陈长坤, 翁佳俊, 等. 考虑视觉障碍行人的疏散模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 183-191.
- [12] 曹淑超, 钱嘉龙. 考虑恐怖袭击模式的行人应急疏散模拟[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(7): 1539-1548.
- [13] 张海鹏, 李语松, 陈淼, 等. 船舶超大空间火灾环境下人员疏散模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(1): 53-61.
- [14] 白鹏, 刘楠, 董卓龙, 等. 基于遗传算法的元胞自动机复杂楼宇人员疏散模型[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(8): 236-243.
- [15] 宋英华, 许如霞, 郭晨. 考虑折返行为的元胞自动机人员疏散模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(9): 39-45.
- [16] 刘以雪, 毛占利, 廖明煜. 考虑从众阈值和主体特征的人群疏散元胞自动机模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(12): 156-161.
- [17] 风四海, 王志杰, 邓捷, 等. 引入恐慌因素的元胞自动机应急疏散模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 148-154.
- [18] 王莉, 刘致君. 考虑恐慌情绪感染的 CA 疏散模型算法研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 1225-1230.
- [19] 王益, 朱佳波, 胡义. 考虑恐慌行人和多救援人员分区引导的疏散研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 1955-1964.

- [20] 宋英华, 李俊逸, 郭晨. 考虑恐慌情绪和信息传递的行人疏散模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(5): 155-161.
- [21] 宋卫国, 于彦飞, 陈涛. 出口条件对人员疏散的影响及其分析[J]. 火灾科学, 2003(2): 100-104+121.
- [22] 杨子贤, 陈军华. 复杂客流条件下铁路客运站应急疏散仿真研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(11): 66-71.
- [23] 于润泽, 任鸿翔, 孔凡涛, 等. 考虑折返行为和响应时间的大型邮轮人员疏散仿真[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(4): 55-64.
- [24] 程尧, 刘晓栋. 基于社会力模型的文物景区人员应急疏散仿真研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(4): 100-109.
- [25] 刘珊. 铁路客运站火灾疏散仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2019.
- [26] 魏诗雨, 刘勇. 改进社会力模型的飞机火灾一体化疏散仿真优化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13942-13948.
- [27] 张艺萌, 孙海, 董胜. 基于 BIM 和 Multi-agent 联合优化的海洋平台应急疏散仿真研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(S1): 167-173.
- [28] 谢启苗, 郭帅帅. 基于社会力模型的客船人员疏散仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(8): 1710-1724.
- [29] 李聪, 孙会君, 薄颖, 等. 高海拔复杂艰险山区铁路隧道在火灾场景下的行人疏散仿真[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(2): 108-115.
- [30] 郭海湘, 卢仪帆, 李旭泽, 等. 基于社会力模型的煤矿井下分区区域应急疏散优化研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(5): 121-132+165.
- [31] 张平. 引导行为影响下的行人运动规律及其应急疏散研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [32] 邓社军, 虞宇浩, 张俊林, 等. 基于行人恐慌情绪解析的改进社会力模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 45-52.
- [33] 刘维嵩. 考虑避让行为的人群疏散引导模型及引导策略研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.
- [34] 晏晗琪. 老旧小区道路行人疏散仿真及瓶颈优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2025.
- [35] 朱琛宸. 医院应急疏散中恐慌情绪与小团体行为的耦合机制及仿真研究[J]. 交通科技与管理, 2026, 7(1): 47-50.
- [36] 田达睿. 复杂性科学在城镇空间研究中的应用综述与展望[J]. 城市发展研究, 2019, 26(4): 25-30.
- [37] Emir, O., Işık, O. and Ermiş, M. (2025) Use of Agent-Based Simulation Models: A Review for First Responder Capabilities in Disaster Response. *Procedia Computer Science*, **274**, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.12.013>
- [38] Xu, J., Ding, C., Guo, X., Ren, J., Liu, X. and Hou, C. (2025) Urban Waterlogging Disaster Risk Evaluation Framework Based on Complex Network and Agent-Based Model: A Case Study of Zhengzhou, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **131**, Article 105885. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105885>
- [39] Pawlik, M., Takabatake, T., Shiroshita, H., Jayaratne, R., Haddad, H., Kitagawa, K., et al. (2025) Agent-Based Modelling for Flood Evacuation as Inclusive Disaster Risk Reduction: Pilot Participatory Action Research with 11- and 12-Year-Old Children from a Japanese School. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **117**, Article 105180. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105180>
- [40] Vilaça, M., Correia, G.H.D.A. and Coelho, M.C. (2025) Applying an ABM-LCA Framework for Analysing the Impacts of Shared Automated Electric Vehicles across Large-Scale Scenarios. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, **33**, Article 101623. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101623>
- [41] Xue, J., Park, S., Mondal, W.U., Reia, S.M., Yao, T. and Ukkusuri, S.V. (2024) An Agent-Based Model of Post-Disaster Recovery in Multilayer Socio-Physical Networks. *Sustainable Cities and Society*, **115**, Article 105863. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105863>
- [42] Addai, O.A., Soares, C.P., Dhawale, R.S., Schuster-Wallace, C.J. and Spiteri, R.J. (2025) Flood-ABM: An Agent-Based Model of Differential Flood Effects on Population Groups and Their Decision-Making Processes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **128**, Article 105698. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105698>
- [43] Shu, X., Ye, C., Xu, Z., Liao, R. and Zhang, S. (2025) A Multiscale Physically-Based Approach to Urban Flood Risk Assessment Using ABM and Multi-Source Remote Sensing Data. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **119**, Article 105332. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105332>
- [44] 陈超, 聂文雪, 李旭, 等. 数字孪生中的建模与仿真研究应用现状[J]. 计算机与数字工程, 2025, 53(11): 3270-3275.
- [45] 张炜, 曹玉佩, 陈济世. 安徽省防汛抗旱移动排灌泵站信息化平台建设实践[J]. 中国防汛抗旱, 2026, 36(4): 81-85.

- [46] 李新宇. 南水北调中线干线工程数字孪生体系建设研究[J]. 科技创新与应用, 2026, 16(11): 97-100+104.
- [47] 朱晓光, 陈丰照, 佟保根, 等. 数据协同视角下洪涝灾害应急系统开发模式研究[J]. 水利信息化, 2026(1): 16-19.
- [48] 张群, 郭园, 杨文栋, 等. 数字孪生赋能城市防洪排涝“四预”决策体系构建分析[J]. 陕西水利, 2026(4): 68-70.
- [49] 刘明, 王琛珏, 王国苗. 数字孪生滦河水网防洪协同管理平台构建与应用[J]. 水利信息化, 2026(1): 8-15.
- [50] 慎东方, 周琴慧, 张继铭. 水库大坝安全监测技术的现状与发展趋势[J]. 水上安全, 2026(5): 134-136.
- [51] 蔡帅, 于永强, 王豪杰. 基于数字孪生的感潮河网城市洪涝预警系统构建与应用[J]. 工程技术研究, 2026, 11(4): 205-207.
- [52] 张坤, 蔡文静, 张志科, 等. 考虑洪水风险的高原山区流域地理空间数据构建及应用[J/OL]. 水利水电快报, 1-11. <https://link-cnki-net-s.door.bucea.edu.cn/urlid/42.1142.TV.20260321.1710.004>, 2026-05-01.
- [53] 林雨铭, 周之伦, 郑瑜, 等. 从隐喻到模型: 城市生命体的复杂系统建构[J/OL]. 地球信息科学学报, 1-17. <https://link-cnki-net-s.door.bucea.edu.cn/urlid/11.5809.p.20260421.1542.002>, 2026-05-01.
- [54] 田颖, 杨滔, 等. 基于场景迭代的数字孪生城市构建逻辑[J]. 上海城市规划, 2023(5): 24-30.
- [55] 李玉梅, 王嫣, 许晗, 等. 元宇宙赋能智慧城市建设: 理论机制、问题检视与治理举措[J]. 电子政务, 2024(8): 97-108.
- [56] 吴建国, 吴佳琪, 余友安, 等. 船舶火灾安全防控中的智能应急联动机制研究[J]. 船舶物资与市场, 2026, 34(3): 115-117.
- [57] 徐翱, 姜剑斌. 高层建筑火灾智能防控与救援平台构建及效能实证研究——基于海宁市“高层建筑精准火灾防控及救援软件 V1.0”的案例分析[J]. 中国人民警察大学学报, 2026, 42(2): 81-85.
- [58] Xie, W., Zeng, Y., Zhang, X., Wong, H.Y., Zhang, T., Wang, Z., et al. (2025) Aiot-Powered Building Digital Twin for Smart Firefighting and Super Real-Time Fire Forecast. *Advanced Engineering Informatics*, **65**, Article 103117. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103117>
- [59] Zhang, X., Jiang, Y., Wu, X., Nan, Z., Jiang, Y., Shi, J., et al. (2024) Aiot-Enabled Digital Twin System for Smart Tunnel Fire Safety Management. *Developments in the Built Environment*, **18**, Article 100381. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100381>
- [60] 李芳. 建筑结构抗震性能智能监测与分析技术研究[J]. 智能物联技术, 2026, 58(3): 149-152.
- [61] 葛臣. 矿山地质灾害治理与生态修复协同测绘技术研究[J]. 山西建筑, 2026, 52(9): 159-162+182.
- [62] 李焯芬, 程雷, 朱作祥, 等. 三峡库区地质灾害防治进展与展望[J]. 武汉大学学报(理学版), 2026, 72(2): 175-187.
- [63] 王亚男. 基于主体建模: “生成解释”的计算性重构及其解释力[J]. 科学技术哲学研究, 2026, 43(1): 36-43.
- [64] Li, Y., Das, S. and Shirado, H. (2025) What Makes LLM Agent Simulations Useful for Policy? Insights from an Iterative Design Engagement in Emergency Preparedness.
- [65] Chen, R., Wang, C., Sun, Y., Zhao, X. and Xu, S. (2025) From Perceptions to Decisions: Wildfire Evacuation Decision Prediction with Behavioral Theory-Informed LLMs. *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)*, Vienna, July 2025, 29754-29778. <https://doi.org/10.18653/v1/2025.acl-long.1438>
- [66] Dang, P., Zhu, J., Li, W., Xie, Y. and Zhang, H. (2025) Large-Language-Model-Driven Agents for Fire Evacuation Simulation in a Cellular Automata Environment. *Safety Science*, **191**, Article 106935. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106935>
- [67] Mou, X., Ding, X. and He, Q. (202) From Individual to Society: A Survey on Social Simulation Driven by Large Language Model-Based Agents.
- [68] Zheng, Z.M., Zhang, H.H., Zhang, J., Liu, P. and Pan, Y. (2024) A Research on Gas Safety Knowledge Graph and Retrieval-Augmented Generation Mechanism Based on Large Language Model. *2024 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, 13-16 December 2024, 311-315. <https://doi.org/10.1109/iccc62609.2024.10942024>
- [69] Yin, K., Li, B. and Liu, C. (2024) Crisissense-LLM: Instruction Fine-Tuned Large Language Model for Multi-Label Social Media Text Classification in Disaster Informatics.