

# 复杂系统理论在社会治理中的应用综述



田逢时<sup>1,2</sup>, 疏学明<sup>2</sup>, 汪秉宏<sup>3\*</sup>

(1. 中国人民警察大学 智慧警务学院, 廊坊 065000; 2. 清华大学 安全科学学院, 北京 100084; 3. 中国科学技术大学 近代物理系, 合肥 230026)

**摘要** 经济持续发展和社会不断进步对社会治理现代化提出了新的要求。社会是一个典型的复杂系统, 社会治理研究迫切需要从复杂系统的角度, 依靠多学科的交叉融合, 从整体上加以解决。该文选取复杂系统相关研究方法, 对社会治理中疫情防控、谣言管控、智慧交通和智慧消防 4 个典型场景进行了重点分析, 总结了复杂系统理论在社会治理领域应用中存在的问题, 对下一步主要发展的方向进行了展望。

**关键词** 复杂系统; 社会治理; 谣言管控; 智慧交通; 智慧消防

中图分类号 O59; TP301.5 文献标志码 A DOI 10.12178/1001-0548.2022309

## The Application of Complex Systems in Social Governance

TIAN Fengshi<sup>1,2</sup>, SHU Xueming<sup>2</sup>, and WANG Binghong<sup>3\*</sup>

(1. School of Intelligent Police, China People's Police University, Langfang 065000, China;

2. School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** The modernization of social governance needs to manage social issues in a complex system way. This article makes a brief introduction to the fundamentals of complex systems at the beginning, and then focuses on their applications in typical scenarios of social governance including epidemic prevention and control, rumor control, intelligent transportation, and smart fire safety. Finally the current challenges as well as the future perspectives on the emerging governance techniques are summarized.

**Key words** complex system; social governance; rumor control; intelligent transportation; smart fire safety

社会是一个典型的复杂系统<sup>[1]</sup>, 复杂性是它的核心特征<sup>[2-3]</sup>。近年来, 现代信息技术为治理的基础性研究提供了十分有利的技术条件<sup>[4-5]</sup>, 相关学者运用复杂系统理论, 从不同角度对社会治理问题进行了研究。

在统计物理学的视角下, 文献 [6-7] 提出, 复杂系统理论的研究不仅关心网络自身的拓扑结构, 而且关注网络上进行的各种物理过程和动力学行为。展望了复杂系统研究的几个重要方向: 新一代信息网络的结构和动力学、演化合作博弈、人类动力学和信息物理学。

在社会物理学视角下, 文献 [8] 进行了大量探索性研究, 形成了相对完整的理论体系, 提出基于社会燃烧理论的网络舆论传播“集中度”, 基于社会行为熵理论的网络舆论传播“组织度”, 基于社

会激波理论的网络舆论传播“临界度”, 将网络舆论传播从定性研究转为定量应用。

在系统内相互作用的视角下, 文献 [9] 指出复杂系统的适应性可以很好地运用到社会治理之中。文献 [10] 指出社会是一个复杂的自适应系统, 社会子系统间存在着明显的关联性。文献 [11] 采用系统动力学方法, 解释了中国城市系统中的社会、组织和环境因素的相互作用关系。文献 [12] 提出使用复杂网络理论刻画社会复杂系统之间的相互作用关系。

在大数据时代下, 推动复杂系统研究与社会治理相结合, 已经成为现阶段社会治理研究的重要内容<sup>[13]</sup>。基于海量数据和复杂系统理论进行量化分析<sup>[14-18]</sup>, 为社会治理赋能, 推动经验治理向数据治理转变, 被动响应型治理向主动预见性治理转变,

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-06-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC0833400); 警察大学科研重点专项 (ZDZX202005)

作者简介: 田逢时, 博士, 主要从事复杂系统理论等方面的研究。

\*通信作者 E-mail: bhwang@ustc.edu.cn

有效促进治理决策科学化, 治理方式精细化, 从而提升社会治理水平。

本文对使用复杂系统方法解决社会治理领域相关的问题进行了综述。通过引入复杂网络和复杂适应系统两种研究方法, 分析复杂系统理论在社会治理典型场景的应用, 对未来主要发展的方向进行展望。

## 1 复杂系统理论

复杂系统理论主要包括复杂网络和复杂适应系统两个方面。复杂网络突出强调系统所具有的网络结构, 是研究复杂系统的一种角度和方法, 也是认识社会复杂系统性质和功能的基础<sup>[19]</sup>。复杂适应系统突出强调仿真系统的价值, 包括动力学行为的研究, 是社会治理问题研究的重要方法论<sup>[20-21]</sup>。

复杂系统理论能够揭示产生社会治理复杂性的内在机理, 有助于发现社会治理复杂性生成的内在原因, 提供了社会治理研究的新范式<sup>[22]</sup>。相关研究包括物理学、生物学等自然科学学科和经济学、社会学等社会科学<sup>[23-24]</sup>, 呈现出明显的交叉学科特性<sup>[25]</sup>。

### 1.1 复杂网络

复杂网络将系统内部的各个元素作为节点, 元素间的关系视为连接<sup>[26-28]</sup>, 系统中因子间相互关联构成网络拓扑结构。社会系统也可以通过不同网络进行描述<sup>[7]</sup>, 系统内各主体之间互相连接, 形成复杂的网络化结构<sup>[29-30]</sup>。

近年来, 利用复杂网络进行社会治理领域的研究已经成为研究热点。相关研究发现, 交通路网优化、谣言传播、传染病传播等网络存在显著的复杂网络的特征<sup>[27, 31]</sup>, 主要分为两个方面: 1) 网络统计特性的实证研究, 通过计算机采集相关数据, 可以对实际网络的拓扑结构进行分析。如交通网、电力网等。2) 将网络结构与网络上的动力学过程相结合, 分析结构特性及其演化规律。如谣言、灾害、传染病传播等<sup>[32]</sup>。

### 1.2 复杂适应系统

复杂适应系统理论 (Complex Adaptive System, CAS), 是目前系统科学代表理论之一。建模与仿真方法已经被证明是复杂适应系统理论研究社会治理问题的可行方法。多主体建模可以通过多智能体的联合或聚集动态模拟复杂系统的实际场景<sup>[33]</sup>。很多社会系统都包含着大量相互作用的主体 (Agent), 该方法能够有效解决复杂适应系统中的社会治理的一些经典问题<sup>[34]</sup>。使用系统动力学 (System

Dynamics, SD) 可以进行动态仿真实验, 使决策者在不同情境下尝试采取有差异的措施, 并对措施执行后的效果进行观测和仿真, 从而改变了过去社会科学实验需要花费高昂费用的局限性<sup>[31]</sup>。

复杂网络的动力学行为在社会治理领域成为近年来关注的热点之一。网络演化模型、网络上的传播等部分都在讨论演化行为及其机制, 而网络传播动力学机制的研究主要集中在病毒传播和信息传播两个方面<sup>[35]</sup>。

## 2 典型应用场景

近年来, 国内外学者主要使用复杂网络、系统动力学、多主体 (Multi-Agent) 仿真以及多种方法融合解决社会治理典型场景中的实际问题。主要体现在: 使用复杂网络和系统动力学方法探索传染病传播机制并提出合理化建议; 使用传染病传播模型和复杂适应系统理论结合研究谣言的动态传播过程, 提出相应的管控措施; 使用复杂网络和多主体仿真方法进行城市路网特征分析和优化, 解决道路拥堵问题; 使用系统动力学研究消防安全管理问题, 进行动态安全风险评估; 使用多主体仿真研究应急状态下的疏散问题, 提高疏散人员的认知能力和救援队伍的决策能力。

### 2.1 复杂系统理论在疫情防控中的应用

疾病的传播机制是网络传播行为研究的重要内容<sup>[36]</sup>, 复杂网络模型能很好地解释复杂系统在形成和演化过程中的组织规律<sup>[37]</sup>。在文献 [38] 中, 疾病传染或被感染的个体通常使用网络中的节点表示, 如果两个个体间能够以某种方式直接发生关联, 则通过网络中的边连接形成网络的拓扑结构, 构建相关模型对此类传播行为进行研究。经典的疾病传播模型为 SIS 模型和 SIR 模型<sup>[39]</sup>: S (Susceptible, 易感状态)、I (Infected, 感染状态)、R (Removed, 被移除状态)。这两种模型区别是设置了不同的传播规则。在 SIS 模型中, 每个节点存在易感者和具有传染性的已感染者两种状态; 而在 SIR 模型中, 节点既不会被感染也不会感染其他节点, 这就等于将其排除到传播网络之外<sup>[40]</sup>。

经典模型已经无法适应当今社会的复杂场景研究。近年来, 研究人员不断对经典动力学模型进行改进, 根据不同场景, 引入对应变量, 使其更加适应疫情复杂的变化趋势, 提高预测精度, 揭示传染病传播机理, 定量评估传染病扩散风险, 为政府制定有效的防控措施提供技术支撑。文献 [41] 引入

易感再生数、当日感染率和潜伏感染率求解演化动力学方程,利用时变参数对疫情发展进行了预测,评估政府防控措施的效果。文献[42]针对新型冠状病毒流行的特征及相关的防控措施,提出了一种仓室传播动力学模型,包含“易感、未隔离潜伏期、已隔离潜伏期、确诊感染、无症状感染、确诊后治愈、无症状感染后治愈和因病死亡”8个变量。建议优先追踪感染者,提高潜伏期患者的隔离率。文献[43]建立了寨卡病毒传播的复杂网络模型,该模型考虑了传播过程中感染媒介的传播,发现蚊虫对于寨卡病毒的传播影响更大,在一些重点城市需要对环境消杀,进行重点防范。文献[44]构建了一个随机SEIR (Susceptible-Exposed-Infected-Removed) 流行病动态模型,在该模型中引入人类意识的指数函数,建议易感人群应该有意识地减少与确诊或疑似病例患者的接触,并判断病毒的规模会随着人类意识的提高而逐渐减少。文献[45]将隐性传播者引入传统SEIR模型,提出可以采用分段拟合等措施改进模型,发现隐形传播者的传染性显著大于普通潜伏者。文献[46]使用SEIR模型,考虑了不同的防控措施,提出当校园中发现病例时,实施封闭患者班级和年级的精准防控策略,就可控制住疫情的发展,取得与封闭学校近似,甚至更好的效果。

学者们通过寻找疫情传播的阈值,从而对疫情防控提供决策支撑。文献[47]通过SIS (Susceptible-Infected-Susceptible) 模型,引入独立传播人员变量,发现该类型人群在感染复杂网络边缘结构中发挥了重要作用,给出了病毒防控中需要关注的流行传播阈值。文献[48]建立了一个基于小世界网络上的SIQR (Susceptible-Infectious-Quarantine-Recovery) 流行病模型,发现了病毒区域性稳定传播和最终消亡的阈值。文献[49]使用SIRS (Susceptible-Infected-Recovered-Susceptible) 模型,发现了流行病爆发的周期性阈值,解决了网络拓扑结构与复杂发病机制的耦合问题。文献[50]提出了一种复杂网络上的非线性SIQS (Susceptible-Infected-Quarantined-Susceptible) 传染病模型,他们均发现存在一个传染病传播的阈值,该阈值可以将系统分为无病均衡和区域性流行均衡两个状态。

基于复杂网络的社会网络建模可以更好地描述个体之间的相互影响<sup>[51]</sup>,网络传播模型研究的关键是制定传播规则和选择网络拓扑结构。相关学者将传染病传播模型与复杂适应系统相结合,研究个体

演化规律和防控策略。文献[52]讨论了系统科学中复杂网络、多主体在传染病传播中的应用,提出了相应的数学模型。文献[53]提出了基于异质主体的疾病传播建模方法,该方法主要关注疾病病程发展、传染力演化、个体接触等微观过程的异质性和随机性描述。研究发现,输入病例的及时确诊和隔离是大规模传染病传播防控的关键。文献[54]发现,在流行病期间,主体的适应性行为可能导致复杂的动力学疾病传播。文献[55-56]使用多主体仿真模拟流行病传播过程,研究发现居家隔离等措施在本质上是切断社会接触网络的连边,可以有效抑制病毒的传染。

综上,相关研究以复杂网络和动力学模型为基础,考虑了不同的变量,但针对防控措施对疫情防控的动态影响作用方面的研究较少。在大数据与人工智能兴起的背景下,利用兴趣点数据(Point of Interest, POI)和基于位置服务数据(Location Based Services, LBS),充分考虑空间关系与人口属性等因素,可为精细化建模奠定技术基础,将会使疫情防控的研究更加深入。

## 2.2 复杂系统理论在谣言管控中的应用

突发事件谣言的传播一般都会经历一个形成、发展、高涨、波动和消散的渐进性演变过程<sup>[57]</sup>,谣言传播的生命周期也相应被分为潜伏期、爆发期、蔓延期和恢复期<sup>[58]</sup>。突发事件和突发事件谣言的耦合过程,伴随着突发事件的发展演化,网络谣言随之动态变化,网络谣言在突发事件的不同阶段也发挥着不同的作用。

在早期的研究中,学者们主要为描述谣言传播的行为建立复杂网络模型,分析谣言传播机制,抑制谣言传播。文献[59]提出的D-K模型是描述谣言传播行为的经典数学模型。该模型在一定的近似条件下较为合理,能够描述谣言的传播行为<sup>[60]</sup>。文献[61]对D-K模型进行了改进,引入传播者与人群中其他人进行双向接触传播的变量。文献[62]分析了随机无标度网络的传播过程,提出了无标度网络谣言传播模型。文献[63]认为,人类行为中的幂律特性能够抑制谣言传播行为。相关研究主要适用于小规模社交网络。而在现代大型社交网络中,往往需要充分考虑结构更加复杂的网络和动力学传播过程。将复杂网络结构研究与系统动力学的研究相结合,是目前研究的主要方向之一。

谣言的传播与传染病的传播存在极大的相似性<sup>[64]</sup>。相关学者使用复杂网络和系统动力学方

法, 从传播现象入手进行分析并建立模型, 对谣言的动态传播过程进行研究。文献 [65] 提出了一种网络谣言传播的替代模型, 该模型是著名的传染病易感模型的推广, 研究发现网络节点数会影响谣言的传播。文献 [66] 重点研究了具有不同随机结构的 SIR 模型, 考虑到在度-度函数上的底层网络的结构, 提高了对网络拓扑在随机传播动力学过程汇总的阈值行为。文献 [67] 在 SI 模型基础上, 研究了谣言传播和人群扩散对复杂网络结构的影响, 有助于更好地探索网络环境中不同人群的空间分布, 为网络信息环境的管理提供帮助。文献 [68] 提出了 SHPRS (Susceptible Hesitating Propagating Resisted Susceptible) 的无标度网络谣言传播模型, 详细分析了谣言的传播动力学。文献 [69] 针对点对点传播和群体传播, 改进了 SIR 模型。他们都提出了谣言持续传播和最终消散之间的临界阈值, 有助于更好地理解谣言传播的行为, 制定谣言管控措施。

国内外学者针对移动社交网络谣言传播, 考虑了不同因素对模型进行改进。文献 [70] 提出 SEIRD (Susceptible Exposed Infected Recovered Defended) 模型, 发现用户意识在信息传播中起着重要的作用。通过提高用户意识、抑制成本、权威用户传播正面信息等方式能够有效抑制谣言传播。文献 [71] 考虑了遗忘因素, 加入真实信息的传播者变量  $T$ , 建立了 SITR (Susceptible Infective True Removed) 模型, 得到谣言传播的阈值, 给出了谣言和信息传播者间的边界平衡点, 为有效降低谣言负面效应提供了理论依据。文献 [72] 考虑了个人抵抗、个人偏好、从众性、谣言强度、政府谣言驳斥等影响因素, 提出 8-state ICSAR (Ignorant, Information Carrier, Information Spreader, Advocate, Removal) 模型, 对比了不同的谣言传播途径, 发现个体对谣言的抵抗存在地域差异, 博客和新闻门户网站的辟谣措施可以有效降低谣言传播的阈值。

综上, 相关研究主要通过参考传染病传播基本模型, 并在其基础上考虑不同因素加以改进。但是, 不同事件造成的谣言 (如自然灾害谣言, 传染病谣言, 食品安全谣言, 社会事件谣言等), 以及不同阶段 (形成、发展、高涨、波动和消散) 的谣言传播机制存在差异, 需要根据不同场景, 寻找针对性的管控谣言传播的方法。

### 2.3 复杂系统理论在智慧交通中的应用

复杂系统理论为智慧交通建设提供了新的分析

视角。但是, 早期研究主要集中在对不同交通方式的网络结构进行研究<sup>[73-75]</sup>, 这些研究很难用于解决现代社会的交通难题。

目前交通拥堵已经成为困扰城市发展的严重问题, 缓解拥堵具有显著的经济、环境和社会效益<sup>[76]</sup>。近年来, 国内外学者从城市道路网络优化和交通信号灯智能控制等角度进行研究。

在城市道路网络优化问题中, 文献 [77] 深入分析了城市的主要方面, 包括流动模式、多式联运的影响、不同交通方式之间的耦合、基础设施网络的演化, 以及空间、社会组织以及城市之间的相互作用。文献 [78] 提出复杂网络理论在城市交通规划问题研究中具有诸多优势, 网络中重要节点的识别对交通网络规划、网络鲁棒性的保护具有重要作用。文献 [79] 针对城市道路上存在严重道路拥堵现象, 通过对交通流这种复杂系统的动态演化特性的研究, 提出了一种精准预测的方法。文献 [80] 使用复杂网络节点度方差评价城市道路网络的脆弱性, 发现城市道路网络末端接入小区后, 能够有效提高道路网络的鲁棒性。文献 [81] 发现中国大型城市的道路网络的度分布具有无标度特性, 提出了城市道路复杂网络模型。该模型对城市道路网络进行了优化, 使得城市道路网络包含小区路网, 适用于封闭小区开放问题。文献 [82] 分别建立行人优先和车辆优先的城市街道交通系统动力学仿真模型, 模拟机动车和行人在交通上的矛盾。研究发现行人优先模式造成交通效率急剧下降, 机动车优先模式可以明显改善交通拥堵程度, 减少尾气排放。文献 [83] 使用城市机动车出行量数据, 引入物流量、人口发展模式、城市经济特征和环境等变量, 建立了城市交通拥堵控制的系统动力学仿真模型, 分析了影响城市交通拥堵的变量之间的因果关系。

城市道路的交叉路口的信号灯控制也是智慧交通中的重要组成部分。目前, 有信号灯控制的交叉路口是城市环境中最普遍的瓶颈类型之一, 因此交通信号控制在城市交通管理中发挥关键作用<sup>[76]</sup>。道路网络是一个有向图, 其节点和边分别代表交叉路口和道路。现实世界的道路网络在道路属性、交叉路口结构和信号相位设置方面比合成网络更复杂<sup>[84]</sup>。相关研究使用复杂适应系统理论探索解决交通拥堵问题。文献 [85] 提出了一种用于大规模城市交通场景的高效、多智能体强化学习环境。研究人员可以将其用作交通信号控制问题的试验台模拟各种场景: 从合成网格场景到现实世界, 从拥有数十辆汽

车的小型道路网络到拥有数万辆汽车的大型网络。文献 [86] 对大规模交通网络中多交叉口的信号控制问题进行了研究。通过为所有交叉口分配共享主体, 使该模型在大规模路网中实现了较好的控制效果。文献 [84] 将多主体仿真与机器学习技术相结合, 设计多智能体强化学习 (Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL) 的合作策略, 并将联合行动学习者和独立学习者这种分类扩展到交通信号控制问题。

传统交通模拟器一般采用跟驰模型对现实交通环境下车辆行为进行仿真。然而, 这些简化的物理模型通常无法准确预测车辆在复杂的现实交通环境下的运动方式。强化学习方法可以直接从观察到的数据中学习, 而不会做出不切实际的假设。文献 [87] 将每个驾驶员建模为一个智能体, 模拟真实世界中每个驾驶员根据自己观察独立做出决策的情况。在模型中, 每个智能体能够接收来自环境的观察并按照策略顺序采取行动。该研究将交通模拟转化为一个机器学习问题, 并直接从现实世界的演示中学习单个车辆的行为模式。这种方法有助于还原真实世界中的车辆轨迹。

传统信号无法感知实时交通模式并对其做出反应, 工程师需要手动更改交通区域信号控制中的交通信号计时。优化交叉口压力的方法可以在某些条件下使系统吞吐量最大化<sup>[88]</sup>。网络中交通信号的数量很大程度上影响了实验结果, 因为主体所采取的探索规模随着路网规模的增加而增加<sup>[84]</sup>。提高多智能体的交通仿真模型在不同交通环境下的泛化能力, 可以帮助探索新型高效的交通解决方案。同时, 探索更加复杂情境下 (如突发事件造成大量车辆短时涌入造成系统局部瘫痪并形成连锁反应) 的交通拥堵治理也是值得深入研究的一个课题。

## 2.4 复杂系统理论在智慧消防中的应用

智慧消防情景下运用复杂系统理论的研究主要体现在两个方面: 使用复杂适应系统理论进行消防安全管理和应急条件下的疏散。

在消防安全管理领域的研究中, 确定影响因素, 建立指标体系, 进行消防安全风险评估是学界的通行做法<sup>[89]</sup>。指标的评价通常采用主观 (如专家打分法、层次分析法) 和客观评价方法 (如熵权法、贝叶斯法)。主观评价方法人为因素较大; 客观评价法完全从数据出发, 得出结果较为客观, 但往往对数据的依赖度较大。然而, 影响建筑物、工矿、地下空间等场所的消防安全的因素较多, 这些因素对消防安全管理的影响并不一致。此外, 消防

安全水平和这些影响因素在时间上是动态的和非线性的。传统风险评估方法主要基于影响因子的静态评价, 没有考虑动力学的演化过程, 难以反映动态和非线性特征<sup>[90]</sup>。使用复杂系统理论, 将系统动力学应用在消防风险评估领域, 可以有效弥补传统风险评估的不足。

在地铁火灾事故的研究中, 文献 [91] 运用系统动力学理论, 构建了地铁电气火灾影响因子仿真模型并进行动态预测。对比不同投入策略获得最优投入方案, 为地铁运营方进行安全管理提供科学的决策支持。文献 [92] 结合系统动力学原理, 考虑人员、设备、环境和管理 4 个因素对地铁火灾发生、蔓延和控制的影响, 构建了地铁火灾事故仿真模型, 得到的数据和结论可以为地铁火灾的预防和应对措施提供指导。文献 [93] 确定了火灾场景下城市轨道交通调度安全的影响因子, 结合系统动力学构建了仿真模型进行动态预测, 综合考虑安全投入和人员调度配置比例, 提出最优的火灾调度安全控制方案。

在危险化学品火灾事故的研究中, 文献 [94] 基于系统动力学理论, 建立了多因素耦合下的危险化学品储运火灾爆炸事故动力学模型。该模型能够直观描述各变量耦合作用下的累积过程, 为危化品火灾爆炸事故原因的研究提供了借鉴。文献 [95] 考虑了井喷火灾事故的发生概率、事故损失以及投资、培训、管理等变量, 基于系统动力学, 给出了动态概率预测模型, 该模型能较好地估算动态事故损失与安全效益之间的关系, 为管理者优化安全投资配置提供了科学的指导。文献 [96] 从人员、设施、管理、技术等方面分析了影响储油罐区消防安全的因素, 确定了流态模型和变量, 构建了储油罐区消防安全系统仿真模型。该模型可对某一时期系统安全等级变化趋势进行动态预测, 为强化油罐区消防安全管理的体系提供了理论依据。

在消防队伍自身建设中, 文献 [97] 构建了消防安全监管能力建设指标体系。依据系统动力学模型, 绘制了消防安全监管能力因果关系图与存量流量图。建议在法规制定、宣传教育、信息化建设等方面均衡投入, 实现消防安全监管能力的全面提升。文献 [98] 从不同消防监督检查投入比例对消防监督检查稳定性影响的角度, 运用系统动力学理论, 建立了评价消防监督检查稳定性的系统动力学模型。研究发现在保持均衡投入的基础上, 对监督机制的完善上有所侧重的投入策略是较好的选择。

文献 [99] 采用系统动力学的方法,从人员素质、消防装备、基础设施以及人与装备结合 4 个方面对影响灭火救援作战能力的关键因素进行了定量分析,建立了相应的战斗力模型并进行了仿真分析。研究发现,增加救援装备投入以及人员与设备相结合,可以有效地推动灭火救援工作。

相关研究从管理学的角度,将系统动力学应用于不同事故场景和消防队伍建设上,体现了研究对象的动态演化过程。未来的研究中,构建随机过程模型,评价动态火灾风险,建立能够体现火灾随时间传播过程的风险评估理论,也是值得深入研究的课题。

除了使用复杂适应系统理论解决消防安全管理问题以外,使用该理论求解疏散问题也是目前研究比较深入的方向。元胞自动机是研究最多、应用最为广泛的网络动力模型<sup>[100]</sup>。早期研究一般使用元胞代替疏散个体,考虑疏散过程中影响人员的各方面因素,构建疏散逃生模型<sup>[101]</sup>。但是,元胞自动机模型基本上都是对主体的运动建立规则,忽视了主体的差异性,其固定的作用规则限制了模型的进一步应用。所以,现阶段国内外学者以多主体建模为基础,考虑不同个体间属性的差异,对模型进行细化<sup>[102-103]</sup>,相关研究主要从疏散人群和疏散场所两个角度展开分析。

对疏散人群的研究中,文献 [104] 研究了新型冠状病毒疫情期间医院特殊行动需求人员在火灾情况下的疏散问题。考虑了患者和医护人员,构建多主体仿真模型进行仿真研究,结果表明:针对行动不方便的患者设置特殊的疏散通道以及发挥医护人员对患者疏散作用非常重要。文献 [105] 为疏散主体设定了一系列特征,使主体在速度、年龄、对环境的熟悉程度、接班撤离、选择疏散路线等方面具有异质性,便于在模型中将智能体引导至最近的出口。文献 [106] 基于多主体建模,模拟不同类型的动态紧急信息提示对疏散全过程中疏散人员行为的影响。研究结果表明,动态紧急提示能够有效提高疏散效率。文献 [107] 将人群分为 3 种主体: Lead Agent、Ordinary Agent 和 Panic Agent。分析了人群互动的机制,开发了基于智能体和元胞自动机的人群交互模型。结果表明,人群互动尤其是 Lead Agent 的引导和协调有助于提高疏散效率,缩短疏散时间。

对疏散场所的研究中,文献 [108] 提出了一种基于智能体的模型来模拟人们从起火的公共建筑中疏散。模拟结果表明,疏散人员的数量、火灾传播

速度对模型的影响很大。文献 [109] 提出了一种基于 Agent 的建筑物疏散模型,发现建筑物内部结构对疏散的影响较大,在疏散过程中使用不同的消防安全设施对疏散效率存在一定的潜在影响。研究为设计建筑结构和安装消防安全设施提供有益的建议。文献 [110] 基于多主体仿真模型,对地铁站台、站厅和楼梯 3 种空间,以及消防员走步梯逆行、人群密度分布不同的情况进行了疏散模拟。模拟试验结果为地铁空间设计和消防方案制定提供了参考依据。文献 [111] 利用系统动力学理论,构建了城市地下综合体大规模集体疏散的简化模型,该模型结合了连续模型和离散模型的优点,可用于大规模人群的疏散行为。研究发现疏散引导和平时疏散演练可以有效提高疏散效率。文献 [112] 运用系统动力学的原理分析地下商场在火灾中的人员疏散特征。该研究将应急疏散划分为动员、引导、行动和救护 4 个子系统,构建了各子系统与整体疏散系统的因果关系图和系统动力学模型。针对不同的动员效果、引导者数量、救护小组数量进行仿真实验,并提出相应的应急疏散策略。实验结果表明:应急疏散动员和疏散过程中的指挥引导在前期的疏散中效果明显。

为反映真实火灾场景下的人员疏散行为,研究者们尝试将疏散模型与真实人员疏散实验或演习相结合,提高了疏散人员和救援队伍的认知水平和决策能力,为不同类型场所的疏散提供理论依据。但是,被试者在这些实验或演习中的行为不一定反映真实火场中的疏散过程。使用真实火灾现场人员疏散视频,将复杂系统环境中个体微行为与整体环境属性相结合,将卷积神经网络等机器学习方法与多主体仿真建模相结合,可以为解决现有研究中存在的瓶颈问题提供新的思路。

### 3 结束语

虽然复杂系统相关理论在社会治理领域被广泛应用,但仍存在着一些不足,进一步推进复杂系统相关理论的深入研究,同时拓展相关研究领域,主要有以下 4 个方面。

1) 数据基座方面。目前各类复杂系统在数据获取方面存在一定难度,数据基座的拓展问题亟待解决。主要表现在各业务职能部门数据壁垒仍然相对严重,各单位数据标准和规范不统一,无法通过有效的方法获得较为准确全面的系统结构数据,不能构建出完整的复杂系统结构体系。多源异构的社

会动态数据具有多层复杂、动态随机特性,整合海量数据并建立可共享利用的数据仓库亟待解决。随着数据规模和种类的不断增长,所建立的数据库可选数据范围呈数量级式增长,使数据的获取、分析、运用以及构建合适的复杂系统都带来了极大挑战。

2) 基础模型方面。复杂系统在社会治理的基础模型研究仍存在不足。目前,相关研究主要集中在社会学、管理学、法学等人文社科领域,定性研究相对较多,定量研究不足。定性研究可以从理论思辨的宏观层面揭示某些社会治理相关的特定要素,但不利于从微观层面进行细致深入的分析。当前,面向社会治理复杂系统的多元共治问题研究逐渐兴起,表征和发掘多元共治主体之间的关系存在难题。因此,有必要整合相关数据资源,针对研究对象和应用场景,实现协同关系模型数字化、协同过程和协同质量量化描述,为提升社会治理效能提供理论指导。

3) 仿真系统方面。使用复杂系统理论开展风险态势感知的仿真系统研究有待加强。复杂系统理论与传统网络舆情检测方法相比,具有非侵入、低成本、实时高效等特点。基于跨媒体、跨平台的社交网络数据进行自动、实时和有效的群体极端社会行为预测,是移动互联网时代开展社会风险智能感知预警的创新。研究建立包括物理环境、心理因素、处置措施等多个方面的复杂系统体系,基于事件推动的社会演化趋势模糊推理仿真与演化模型,构建多智能体模型,实现对重点人、重点社群、重点社会热点事件的动态发现和预测,实现对社会治理态势的分析、预测、评估和优化。

4) 应用场景方面。运用复杂系统理论解决社会治理特定场景下的应用问题仍有较大研究空间。针对群体性事件如何从和平演变为暴力事件,刑事案件重点及高发区域、特大城市及超大型社区的管理等复杂场景进行高危风险预测。目前对于这些情境要素的研究不够系统全面,多要素耦合作用对人的行为影响研究相对匮乏。因此,需要梳理相关情境要素的关联性,揭示其表现形式、诱发因素、演变特征,提出更加灵活、高效的社会治理体系的自适应工作模式及策略。

综上所述,将复杂系统理论应用于社会治理领域仍然有较大的改进空间。在下一步的研究中,应加强对社会治理复杂性特征和形成机制的认识,构建社会风险监测、评估和预警模型,完善社会治理

智能决策支持体系。

未来应将复杂系统理论运用在更多的社会治理场景中,构建智慧社会理论体系,研究共性关键技术,使复杂系统理论成为社会治理的科学方法论;为推进社会治理体系和治理能力现代化、建设智慧社会提供科技支撑,不断增强社会治理的精准性和有效性。

## 参考文献

- [1] GARGIULO C, PAPA R. Chaos and chaos: The city as a complex phenomenon[J]. *Tema-Journal of Land Use Mobility and Environment*, 2021, 14(2): 261-270.
- [2] ALLEN P M. Cities and regions as self-organizing systems[M]. [S.l.]: Routledge, 2012.
- [3] MUKHERJEE S, CHAUDHURY S. Exploring bio-inspired self-organization for developing emergent intelligence in urban super organism[C]//Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies. New York: IEEE, 2014: 1-8.
- [4] MARX V. The big challenges of big data[J]. *Nature*, 2013, 498: 255-260.
- [5] 周涛. 大数据商业革命和科学革命[J]. *视听界(广播电视技术)*, 2013(3): 5-11.
- [6] ZHOU T. Big data business revolution and scientific revolution[J]. *Radio & TV Broadcast Engineering*, 2013(3): 5-11.
- [6] 汪秉宏, 周涛, 何大初. 统计物理与复杂系统研究最近发展趋势分析[J]. *中国基础科学*, 2005, 7(3): 37-43.
- [7] WANG B H, ZHOU T, HE D R. The trend of recent research on statistical physics and complex systems[J]. *China Basic Science*, 2005, 7(3): 37-43.
- [7] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏, 等. 复杂网络研究概述[J]. *物理*, 2005, 34(1): 31-36.
- [8] ZHOU T, BAI W J, WANG B H, et al. A brief review of complex networks[J]. *Physics*, 2005, 34(1): 31-36.
- [8] 刘怡君, 牛文元. 基于社会物理学的舆论形成和演化研究[J]. *中国应急管理*, 2008(3): 28-32.
- [9] LIU Y J, NIU W Y. Research on the formation and evolution of public opinion based on social physics[J]. *China Emergency Management*, 2008(3): 28-32.
- [9] FOSTER C J, PLANT K L, STANTON N A. Adaptation as a source of safety in complex socio-technical systems: A literature review and model development[J]. *Safety Science*, 2019, 118: 617-631.
- [10] 刘春成, 侯汉坡. 城市的崛起: 城市系统学与中国城市化[M]. 北京: 中央文献出版社, 2012.
- [11] LIU C C, HOU H P. The rise of cities: Urban systematics and urbanization in China[M]. Beijing: Central Party Literature Press, 2012.
- [11] LI Y, BEETON R J S, SIGLER T, et al. Enhancing the adaptive capacity for urban sustainability: A bottom-up approach to understanding the urban social system in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235: 51-61.
- [12] BOCCALETTI S, BIANCONI G, CRIADO R, et al. The

- structure and dynamics of multilayer networks[J]. *Physics Reports*, 2014, 544(1): 1-122.
- [13] 范如国. “全球风险社会”治理: 复杂性范式与中国参与[J]. *中国社会科学*, 2017(2): 65-83.  
FAN R G. Governance of “global risk society”: The paradigm of complexity and Chinese participation[J]. *Social Sciences in China*, 2017(2): 65-83.
- [14] LAZER D, PENTLAND A, ADAMIC L, et al. Computational social science[J]. *Science*, 2009, 323(5915): 721-723.
- [15] GAO J, ZHANG Y C, ZHOU T. Computational socioeconomics[J]. *Physics Reports*, 2019, 817: 1-104.
- [16] ZHOU T. Representative methods of computational socioeconomics[J]. *Journal of Physics: Complexity*, 2021, 2(3): 031002.
- [17] HOFMAN J M, WATTS D J, ATHEY S, et al. Integrating explanation and prediction in computational social science[J]. *Nature*, 2021, 595(7866): 181-188.
- [18] 周涛, 高馨, 罗家德. 社会计算驱动的社会科学研究方法[J]. *社会学研究*, 2022(5): 130-155.  
ZHOU T, GAO X, LUO J D. Social science research methods driven by social computing[J]. *Sociological Studies*, 2022(5): 130-155.
- [19] 刘晋霞. 复杂网络社团结构的探测及其在资金融通网络中的应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.  
LIU J X. The research on detecting community structure of complex networks and its application in financial networks[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [20] JOHANSEN C, HORNEY J, TIEN I. Metrics for evaluating and improving community resilience[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, 23(2): 04016032.
- [21] 刘佳燕, 沈毓颖. 面向风险治理的社区韧性研究[J]. *城市发展研究*, 2017, 24(12): 83-91.  
LIU J Y, SHEN Y Y. Research on community resilience oriented to risk governance[J]. *Urban Development Studies*, 2017, 24(12): 83-91.
- [22] 范如国. 复杂网络结构范型下的社会治理协同创新[J]. *中国社会科学*, 2014(4): 98-120.  
FAN R G. Collaborative innovation in social governance in a complex network structural paradigm[J]. *Social Sciences in China*, 2014(4): 98-120.
- [23] BARABÁSI A L. *Network science*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [24] 汪小帆. 网络科学发展研究[C]//2012—2013 控制科学与工程专业发展报告. 北京: 中国自动化学会, 2014: 111-119.  
WANG X F. Highlights in network science research [C]//2012-2013 Development Report on Control Science and Engineering Discipline. Beijing: Chinese Institute of Automation, 2014: 111-119.
- [25] 汪秉宏. 人类选择行为动力学研究及对于公共安全应急管理复杂系统的应用[C]//中国交叉科学学会第16届学术年会. 丹东: 中国交叉科学学会, 2016: 9.  
WANG B H. Human choice behavior dynamics research and the application in the complex system for public safety emergency management[C]//The 16th Annual Conference of the Chinese Institute of Cross-Science. Dandong: Chinese Institute of Cross-Science, 2016: 9.
- [26] ALBERT R, BARABÁSI A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1): 47-97.
- [27] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks[J]. *SIAM Review*, 2003, 45(2): 167-256.
- [28] 桑曼乘, 覃成林. 国外区域经济研究的一个新趋势: 区域经济网络研究[J]. *人文地理*, 2014, 29(3): 28-34.  
SANG M C, QIN C L. A new trend in regional economics: Research on regional economic networks[J]. *Human Geography*, 2014, 29(3): 28-34.
- [29] 范维澄, 闪淳昌, 等. 公共安全与应急管理[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
FAN W C, SHAN C C, et al. *Public safety and emergency management*[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [30] 范如国. 复杂性治理: 工程学范型与多元化实现机制[J]. *中国社会科学*, 2015(10): 69-91.  
FAN R G. Management of complexity: Engineering paradigms and diversified implementation mechanisms[J]. *Social Sciences in China*, 2015(10): 69-91.
- [31] 周涛, 张子柯, 陈关荣, 等. 复杂网络研究的机遇与挑战[J]. *电子科技大学学报*, 2014, 43(1): 1-5.  
ZHOU T, ZHANG Z K, CHEN G R, et al. The opportunities and challenges of complex networks research[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 43(1): 1-5.
- [32] 倪顺江. 基于复杂网络理论的传染病动力学建模与研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.  
NI S J. Research on modeling of infectious disease spreading based on complex network theory[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [33] PLIKYNAS D, RAUDYS A, RAUDYS S. Agent-based modelling of excitation propagation in social media groups[J]. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 2015, 27(4): 373-388.
- [34] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J]. *城市发展研究*, 2018, 25(10): 1-3.  
QIU B X. Methods and principles of designing resilient city based on complex adaptive system theory[J]. *Urban Development Studies*, 2018, 25(10): 1-3.
- [35] 何大初, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
HE D R, LIU Z H, WANG B H. *Complex systems and complex networks*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [36] DOROGOVTSSEV S N, MENDES J F F. *Evolution of networks: From biological nets to the Internet and WWW*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [37] STROGATZ S H. Exploring complex networks[J]. *Nature*, 2001, 410: 268-276.
- [38] 陈昊. 复杂网络模型研究与应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.  
CHEN H. Research and Application of Complex Network Model[D]. Xi'an: Xidian University, 2006.
- [39] HETHCOTE H W. The mathematics of infectious diseases[J]. *SIAM Review*, 2000, 42(4): 599-653.
- [40] 蔡超然. 复杂网络上传染病传播动力学及接种动力学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.  
CAI C R. Epidemic spreading dynamics and vaccination dynamics on networks[D]. Lanzhou: Lanzhou University,

- 2017.
- [41] 喻孜, 张贵清, 刘庆珍, 等. 基于时变参数-SIR 模型的 COVID-19 疫情评估和预测[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 357-361.  
YU Z, ZHANG G Q, LIU Q Z, et al. The outbreak assessment and prediction of COVID-19 based on time-varying SIR model[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(3): 357-361.
- [42] 桑茂盛, 丁一, 包铭磊, 等. 基于新冠病毒特征及防控措施的传播动力学模型[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(1): 124-133.  
SANG M S, DING Y, BAO M L, et al. Propagation dynamics model considering the characteristics of 2019-nCoV and prevention-control measurements[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(1): 124-133.
- [43] LI L, ZHANG J, LIU C, et al. Analysis of transmission dynamics for Zika virus on networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 347: 566-577.
- [44] ZHANG Y, LI Y X. Evolutionary dynamics of stochastic SEIR models with migration and human awareness in complex networks[J]. *Complexity*, 2020, 2020: 3768083.
- [45] 林俊锋. 基于引入隐形传播者的 SEIR 模型的 COVID-19 疫情分析和预测[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 375-382.  
LIN J F. Assessment and prediction of COVID-19 based on SEIR model with undiscovered people[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(3): 375-382.
- [46] 孙皓宸, 徐铭达, 许小可. 基于真实人际接触数据的新冠肺炎校园传播与防控[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3): 399-407.  
SUN H C, XU M D, XU X K. Infection and prevention of COVID-19 in schools based on real-life interpersonal contact data[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(3): 399-407.
- [47] DING Q, LI W H, HU X M, et al. The SIS diffusion process in complex networks with independent spreaders[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 546: 122921.
- [48] LIU Y, ZHAO Y Y. The spread behavior analysis of a SIQR epidemic model under the small world network environment[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1267(1): 012042.
- [49] WANG D, ZHAO Y, LUO J F, et al. Simplicial SIRS epidemic models with nonlinear incidence rates[J]. *Chaos*, 2021, 31(5): 053112.
- [50] LI K Z, ZHU G H, MA Z J, et al. Dynamic stability of an SIQS epidemic network and its optimal control[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2019, 66: 84-95.
- [51] ZHENG X L, ZHONG Y G, ZENG D, et al. Social influence and spread dynamics in social networks[J]. *Frontiers of Computer Science*, 2012, 6(5): 611-620.
- [52] LANZAS C, CHEN S. Complex system modelling for veterinary epidemiology[J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 2015, 118(2/3): 207-214.
- [53] 段伟. 基于异质 agent 的疾病传播建模与计算实验[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.  
DUAN W. Heterogeneous agent-based modeling and computational experiments of infectious disease transmission[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [54] ZHANG X G, SHAN C H, JIN Z, et al. Complex dynamics of epidemic models on adaptive networks[J]. *Journal of Differential Equations*, 2019, 266(1): 803-832.
- [55] 靳祯, 罗晓峰. 复杂网络传播动力学研究进展[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 426-441.  
JIN Z, LUO X F. Advances in spreading dynamics research on complex networks[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 426-441.
- [56] LUO X F, ZHANG X G, SUN G Q, et al. Epidemical dynamics of SIS pair approximation models on regular and random networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 410: 144-153.
- [57] 刘通. 基于大数据的政府网络舆情应对策略[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.  
LIU T. Government internet public opinion strategy based on big data[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2018.
- [58] 罗晨阳. 突发公共事件的网络舆情政府引导研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
LUO C Y. Research on public opinion and governmental guidance of public opinion on emergent public incidents [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [59] DALEY D J, KENDALL D G. Epidemics and rumours[J]. *Nature*, 1964, 204: 1118.
- [60] 余雅红. 复杂网络系统动力学行为分析及控制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
YU Y H. Research on key techniques of radio resource allocation in relay-enhanced cellular networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [61] MAKI D P, THOMPSON M. Mathematical models and applications: With emphasis on the social, life, and management sciences[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1973.
- [62] MORENO Y, NEKOVEE M, PACHECO A F. Dynamics of rumor spreading in complex networks[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2004, 69(6): 066130.
- [63] GRABOWSKI A, KRUSZEWSKA N, KOSIŃSKI R A. Dynamic phenomena and human activity in an artificial society[J]. *Physical Review E*, 2008, 78(6): 066110.
- [64] 樊冬梅. 基于流行性和相似性的网络传播动力学研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.  
FAN D M. Spreading dynamics on the popularity-and-similarity based networks [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [65] TRPEVSKI D, TANG W K S, KOCAREV L. Model for rumor spreading over networks[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2010, 81(5): 056102.
- [66] ISHAM V, HARDEN S, NEKOVEE M. Stochastic epidemics and rumours on finite random networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2010, 389(3): 561-576.
- [67] HE L, ZHU L H, ZHANG Z D. Turing instability induced

- by complex networks in a reaction–diffusion information propagation model[J]. *Information Sciences*, 2021, 578: 762-794.
- [68] XU H, LI T, LIU X D, et al. Spreading dynamics of an online social rumor model with psychological factors on scale-free networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 525: 234-246.
- [69] JIA P Q, WANG C, ZHANG G Y, et al. A rumor spreading model based on two propagation channels in social networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 524: 342-353.
- [70] SANG C, LIAO S. Modeling and simulation of information dissemination model considering user's awareness behavior in mobile social networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 537: 122639.
- [71] 张菊平, 郭昊明, 荆文君, 等. 基于真实信息传播者的谣言传播模型的动力学分析[J]. *物理学报*, 2019, 68(15): 193-204.
- ZHANG J P, GUO H M, JING W J, et al. Dynamic analysis of rumor propagation model based on true information spreader[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(15): 193-204.
- [72] ZHANG N, HUANG H, DUARTE M, et al. Risk analysis for rumor propagation in metropolises based on improved 8-state ICSAR model and dynamic personal activity trajectories[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 451: 403-419.
- [73] SIENKIEWICZ J, HOLYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(4): 046127.
- [74] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston subway a small-world network?[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2002, 314(1/2/3/4): 109-113.
- [75] AMARAL L A, SCALA A, BARTHELEMY M, et al. Classes of small-world networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97(21): 11149-11152.
- [76] WEI H, ZHENG G J, GAYAH V, et al. A survey on traffic signal control methods[EB/OL]. [2023-03-27]. <http://arxiv.org/abs/1904.08117>.
- [77] BARTHELEMY M. *The structure and dynamics of cities*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016.
- [78] DING R. The complex network theory-based urban land-use and transport interaction studies[J]. *Complexity*, 2019, 2019: 4180890.
- [79] ADEWUMI A, KAGAMBA J, ALOCHUKWU A. Application of chaos theory in the prediction of motorised traffic flows on urban networks[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 22: 5656734.
- [80] 詹斌, 蔡瑞东, 胡远程, 等. 基于城市道路网络脆弱性的小区开放策略研究[J]. *物流技术*, 2016, 35(7): 98-101.
- ZHAN B, CAI R D, HU Y C, et al. Residential community open-up strategy based on fragility of urban road network[J]. *Logistics Technology*, 2016, 35(7): 98-101.
- [81] 陈伟哲, 李乡儒. 基于复杂网络的封闭小区交通开放策略探究[J]. *自动化学报*, 2018, 44(11): 2068-2082.
- CHEN W Z, LI X R. Research on traffic opening strategy of closed communities by complex network[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 2068-2082.
- [82] 徐冬平, 薛小杰. 城市交通中“路权”的系统动力学仿真研究[J]. *生产力研究*, 2016(3): 104-107.
- XU D P, XUE X J. Research on system dynamics simulation of 'right of way' in urban traffic[J]. *Productivity Research*, 2016(3): 104-107.
- [83] HE K K, CHEN Y. Urban traffic congestion based on system dynamics: Taking Wuhan city as an example[C]//International Conference on Internet and Distributed Computing Systems. Cham: Springer, 2016: 372-380.
- [84] WEI H, ZHENG G J, GAYAH V, et al. Recent advances in reinforcement learning for traffic signal control[J]. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 2021, 22(2): 12-18.
- [85] ZHANG H C, FENG S Y, LIU C, et al. CityFlow: A multi-agent reinforcement learning environment for large scale city traffic scenario[C]//Proceedings of the World Wide Web Conference. New York: ACM, 2019: 3620-3624.
- [86] CHEN C C, WEI H, XU N, et al. Toward a thousand lights: Decentralized deep reinforcement learning for large-scale traffic signal control[J]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2020, 34(4): 3414-3421.
- [87] ZHENG G J, LIU H Y, XU K, et al. Learning to simulate vehicle trajectories from demonstrations[C]//Proceedings of the IEEE 36th International Conference on Data Engineering. New York: IEEE, 2020: 1822-1825.
- [88] KOUVELAS A, LIORIS J, FAYAZI S A, et al. Maximum pressure controller for stabilizing queues in signalized arterial networks[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014, 2421(1): 133-141.
- [89] FERREIRA T M, VICENTE R, SILVA JARM, et al. Urban fire risk: Evaluation and emergency planning[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, 20: 739-745.
- [90] 刘爱华. 城市灾害链动力学演变模型与灾害链风险评估方法的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LIU A H. Research on the dynamics evolution model of urban disaster chain and the risk assessment method of disaster chain[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [91] 肖楚阳, 宋守信. 地铁电气火灾中机械方面影响因子系统动力学仿真分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(8): 81-86.
- XIAO C Y, SONG S X. System dynamics simulation analysis on mechanical influence factors for electric fire in metro[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(8): 81-86.
- [92] YAN W Y, WANG J H, JIANG J C. Subway fire cause analysis model based on system dynamics: A preliminary model framework[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 135: 431-438.
- [93] 贺德强, 胡颖, 路向阳. 基于系统动力学的地铁火灾调度安全模型研究[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(1): 35-43.
- HE D Q, HU Y, LU X Y. Dispatcher safety model for the vehicle fire scene of FAO based on the system

- dynamics[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(1): 35-43.
- [94] 陈伟珂, 张欣. 危化品储运火灾爆炸事故多因素耦合动力学关系[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(6): 49-54.  
CHEN W K, ZHANG X. Dynamic relationship between multi coupling risk factors of hazardous chemical storage and transportation fire and explosion accidents[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(6): 49-54.
- [95] WANG Y, LI B, QIN T, et al. Probability prediction and cost benefit analysis based on system dynamics[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 114: 271-278.
- [96] ZHANG Y, ZHANG M G, QIAN C J. System dynamics analysis for petrochemical enterprise fire safety system[J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 1034-1042.
- [97] 刘纪达, 董昌其, 冯雨, 等. 基于系统动力学的消防安全监管能力建设研究[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(11): 1682-1686.  
LIU J D, DONG C Q, FENG Y, et al. Study on fire safety supervision capability construction based on system dynamics[J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(11): 1682-1686.
- [98] 徐珊. 消防监督检查稳定性的系统动力学仿真分析[J]. *中国人民警察大学学报*, 2022, 38(8): 28-32.  
XU S. Simulated analysis of fire supervision and inspection stability based on system dynamics[J]. *Journal of China People's Police University*, 2022, 38(8): 28-32.
- [99] 殷飞, 张鹏, 商靠定, 等. 消防部队战斗力的系统动力学仿真[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(8): 1126-1129.  
YIN F, ZHANG P, SHANG K D, et al. System dynamics simulation on the battle effectiveness of fire units[J]. *Fire Science and Technology*, 2018, 37(8): 1126-1129.
- [100] LI Y, CHEN M Y, DOU Z, et al. A review of cellular automata models for crowd evacuation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 526: 120752.
- [101] 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, 47(12): 896-901.  
YANG L Z, FANG W F, HUANG R, et al. A model of People's escape in fire based on cellular automata[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(12): 896-901.
- [102] 王付宇, 王骏. 突发事件情景下地铁站人员应急疏散问题综述[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(10): 2888-2893.  
WANG F Y, WANG J. Summary of emergency evacuation of subway station personnel in emergency situations[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(10): 2888-2893.
- [103] VERMUYTEN H, BELIËN J, DE BOECK L, et al. A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems[J]. *Safety Science*, 2016, 87: 167-178.
- [104] HAGHPANAH F, GHOBADI K, SCHAFFER B W. Multi-hazard hospital evacuation planning during disease outbreaks using agent-based modeling[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction: IJDRR*, 2021, 66: 102632.
- [105] COTFAS L A, DELCEA C, IANCU L D, et al. Large event halls evacuation using an agent-based modeling approach[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 49359-49384.
- [106] CHOI M, LEE S, PARK M, et al. Effect of dynamic emergency cues on fire evacuation performance in public buildings[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2018, 24(4): 04018029.
- [107] CHEN Y X. Agent-based research on crowd interaction in emergency evacuation[J]. *Cluster Computing*, 2020, 23(1): 189-202.
- [108] KASEREKA S, KASORO N, KYAMAKYA K, et al. Agent-based modelling and simulation for evacuation of people from a building in case of fire[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 130: 10-17.
- [109] TAN L, HU M Y, LIN H. Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency[J]. *Information Sciences*, 2015, 295: 53-66.
- [110] WANG F. Multi-scenario simulation of subway emergency evacuation based on multi-agent[J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2021, 20(2): 387-397.
- [111] LI X J, CHEN W B, WANG C, et al. Study on evacuation behavior of urban underground complex in fire emergency based on system dynamics[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1343.
- [112] 陆秋琴, 赵毛亚, 黄光球. 地下商场火灾应急疏散策略仿真模型[J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(12): 1684-1689.  
LU Q Q, ZHAO M Y, HUANG G Q. Simulation model of emergency evacuation strategy during underground shopping mall fires[J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(12): 1684-1689.

编辑 张莉