DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.07.023

我国城市安全韧性发展现状与技术发展方向展望

刘奕，张辉*，王晶鑫，刘洋，郝彧露，范维澄

（清华大学安全科学学院，北京 100084）

摘要：当前，全球气候变化加剧，极端自然灾害频发，相应影响呈现跨领域、跨区域的系统性风险特征，对城市安全治理提出了新的重大挑战，因而评估我国城市系统性风险防控与安全韧性建设的现实基础及发展走向、构建面向未来的技术发展战略框架成为亟需。本文从管理决策层、基层执行层、社会协同层、关键区域4个维度出发，深入分析了我国韧性城市治理的短板；系统梳理了城市安全韧性理论研究进展、我国城市安全韧性技术应用现状，进而明确了我国城市安全韧性技术攻关要点；提出了应急管理－业务连续性管理融合决策模型，支持构建“感知－认知－决策”三维韧性技术路径。研究认为，人工智能与无人装备应用、数字孪生技术驱动、可持续发展推动、技术与管理一体化、跨学科协同创新是推进我国城市韧性建设的主导方向，可为提升城市灾害防控能力、强化系统韧性、保障安全运行提供理论依据与技术指引。

关键词：城市安全韧性；系统性风险防控；防灾减灾；数字孪生；智能决策

中图分类号：TU984.2　　**文献标识码：**A

Development Status and Technological Prospects of Urban Safety Resilience in China

Liu Yi, Zhang Hui*, Wang Jingxin, Liu Yang, Hao Yulu, Fan Weicheng

(School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Currently, global climate change is intensifying, extreme natural disasters occur frequently, and the corresponding impacts exhibit characteristics of cross-domain and cross-regional systemic risks, posing new and significant challenges to urban safety governance. Therefore, it is urgently needed to assess the current status and development trends of systemic risk prevention and control and safety resilience construction in cities of China, and to construct a future-oriented technological development framework. The study analyzes major challenges regarding resilient urban governance in China from four dimensions: management decision-making, grassroots implementation, social collaboration, and critical regions. Moreover, it reviews the current theoretical research on urban safety resilience and the progress of technology application in China, and then clarifies the key areas for technological breakthroughs. A decision-making model that integrates emergency management and business continuity management is also proposed, supporting the construction of a resilient technology path that involves three dimensions: perception, cognition, and decision-making. Furthermore, the study proposes the leading directions for promoting the construction of resilient cities in China: application of artificial intelligence and unmanned equipment, development driven by digital twin, sustainable development promotion, integration of technology and management, and cross-disciplinary collaborative innovation. These directions are expected to provide a theoretical basis and technical guidance for enhancing disaster prevention and control capabilities, strengthening system

收稿日期：2025-07-06；**修回日期：**2025-08-06

通讯作者：*张辉，清华大学安全科学学院教授，研究方向为公共安全；E-mail: zhhui@tsinghua.edu.cn

资助项目：国家重点研发计划项目(2024YFC3017000)；中国工程院咨询项目“极端灾害下城市与社会系统安全韧性技术发展战略研究”(2024-XBZD-21)；国家自然科学基金项目(72334003)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

resilience, and ensuring safe operation of cities.
Keywords: urban safety resilience; systemic risk prevention and control; disaster prevention and mitigation; digital twin; intelligent decision-making

一、前言

当前，全球气候变化持续加剧，平均气温比前工业化时期高出1.45 ℃，2023年成为有气象记录以来最热的一年；全球多地频繁发生极端高温、强降雨、干旱、暴洪、野火、沙尘暴等灾害事件，呈现出多灾并发、季节交错的新特征[1]。例如，2024年6月18日湖南省岳阳市平江县遭遇自有气象记录以来持续时间最长、强度最大、雨量最多的严峻汛情[2]。世界经济论坛也将不断增加的极端天气事件列为未来十年的首要全球风险之一[3]，认为当前极端灾害的发生频率、强度以及衍生的复杂链条影响持续上升[4]。自然灾害与人为事故的耦合效应、交叉叠加凸显，灾害造成的影响呈现多元并存、链式联动的系统性风险特征，对城市安全治理构成前所未有的挑战。

在此背景下，韧性城市理念得到更多关注，强调在城市“规划–建设–运行–管理”全过程中融入风险预判、应急响应、系统恢复机制，保障城市高效、安全、可持续运行。“十四五”规划纲要提出构建更高水平的城市安全韧性，标志着我国城市韧性建设进入新阶段[5]。《城市安全风险综合监测预警平台建设指南（2023版）》进一步提出，推动和完善城市安全风险综合监测预警平台建设，深入开展国家安全发展示范城市创建工作[6]。以北京、上海为代表的多个城市，已将韧性城市建设作为城市发展的目标导向并探索实施了相关政策。与国家政策逐步深化同步，科技进步正在加速重塑城市应急管理模式。人工智能（AI）、第五代移动通信（5G）、低轨卫星星座、边缘计算、城市信息模型（CIM）、数字孪生等新兴技术，在城市灾害监测预警、应急响应、辅助决策等关键环节中加快落地应用，为构建高效、协同、智能的城市安全韧性技术体系提供了有力支撑。科技创新成为推动城市韧性发展的核心动力，应急管理装备的智能化、数字化发展被视为应急管理体系现代化的重要标志[7]，系统部署的智慧韧性城市与应急管理体系建设工作为相关技术研发及应用明确了发展方向[8,9]。相关政策和科技进步涵盖了早期的安全治理经验积累、中后期的顶层设计落地、技术与制度“双轨驱动”下的系统部署，为我国韧性城市建设及技术发展、多部门协同治理提供了良好的基础条件。

整体来看，城市正在从以物理基础设施为主导的传统系统，向“物理–信息–社会”三元融合的复杂巨系统演进。在城市化高密度演进、经济活动集聚与环境不确定性叠加的背景下，城市风险表现出耦合性强、传导路径多元、反馈机制复杂等特点，驱动城市治理向系统性、韧性化转型。为此，构建兼顾安全保障与科技创新的城市治理模式，提升城市韧性与抗风险能力，成为推进国家治理体系和治理能力现代化的重要内容[10,11]；亟需系统评估城市系统性风险防控和安全韧性体系的现实基础与未来走向，明确相应的战略发展路径。

构建城市安全韧性技术体系将是应对未来城市系统性风险的核心支点，也是未来韧性城市治理体系构建的关键路径。相关技术体系融合物理、信息、社会3个系统，运用大数据智能、多灾种耦合建模、仿真推演、信息物理系统（CPS）、AI、大模型、数字孪生、韧性评估等具体技术，显著增强城市对灾害的抵抗力、吸收力、恢复力、适应力，提升城市应对复杂性与不确定性风险的治理能力；涵盖风险感知、预警预测、协同应急、快速恢复与持续演化等过程，具有集成化、智能化、适应性强的特征，在面对各类突发事件、系统性风险、长期不确定性挑战下能够保障城市关键基础设施、社会功能、经济秩序、居民生命财产安全。

本文把握我国韧性城市建设现状与问题，梳理城市安全韧性技术发展趋势并阐明技术攻关要点，提出应急管理–业务连续性管理（EM–BCM）融合决策模型；进而展望城市安全韧性技术的发展路径，为提升城市灾害防控能力和系统韧性提供理论支持与应用依据。

二、我国城市安全韧性发展面临的主要挑战

（一）管理决策层：全域风险感知与智能决策能力不足

1. 风险底数动态更新机制不健全

“十四五”规划纲要强调了构建“空天地海一体化”全域风险监测网络，但多数城市缺乏统一的数据底座和动态更新机制。风险信息分散在自然资源、住建、气象、水利等部门，数据标准不一致、数据结构多样、数据交换接口兼容性差，难以支撑城市级乃至国家级的全周期风险评估和灾害链推演。特别是在跨省份地震带、跨流域洪水灾害等跨区域风险方面，缺乏统一的分级更新机制和事件级响应逻辑。

2. 智能辅助决策体系建设滞后

现有的城市应急响应体系主要依赖人工经验和预设预案，而大数据、AI模型、数字孪生的系统集成缺失。面向台风叠加内涝、热浪诱发火灾等复杂灾害场景，开展风险演化路径建模依赖多源数据融合和机器学习算法；而相关技术在管理决策层的应用处于试验探索阶段，标准化平台与操作规范缺乏，导致AI辅助推演结果缺乏透明度，难以纳入高层级决策程序。

3. 跨区域协同与联动机制缺失

强化跨部门、跨区域的信息共享与协同调度能力虽然成为政策导向，但部门壁垒、“信息孤岛”现象依然存在，不同部门在数据标准、处理方式上未能充分协调，出现了重建设、轻应用的情况。一些地方虽然启动“城市安全风险一张图”项目，但部署级别、更新深度参差不齐。此外，数据壁垒既源于行政分割，也根植于制度安排不清、资源分配不均。不同部门在信息采集权属、财政投入归属、数据处置权限方面缺乏明确约定，导致功能相似的信息平台难以开展协同应用。例如，跨流域灾害数据因管理主体分属多个省份、多类部门，导致共享机制缺位、风险传导预警延误。

4. 技术标准碎片化阻碍数据融合与平台互联

各个城市在建设城市安全风险感知平台时采用的数字孪生、物联网（IoT）架构标准存在较大的差异性。不少城市开展了“城市运行一张图”建设试点，但底层接口协议、元数据结构、建模语言存在差异，难以开展模型复用与跨城联动。以深圳智慧应急平台、上海城市运行管理中心为例，两者在数据格式、图层定义、事件响应机制方面均不兼容，目前无法支撑长江三角洲地区、粤港澳大湾区范围内的一体化灾害推演与资源统筹。

（二）基层执行层：队伍力量薄弱且持续作战能力不足

1. 基层应急队伍规模与任务需求明显失衡

多数城市的基层应急人员与常住人口比例不足1∶10 000，远低于国际主流水平（1∶5000），多数社区和乡镇仅配置了兼职人员或者依赖志愿者网络。一线救援力量以志愿者和兼职人员为主，专业消防、医疗、技术支援力量难以全面覆盖城市各区域和各类灾情；特别是在夜间或节假日，一旦发生重大灾害，基层应急队伍难以迅速开展高风险区域的搜救、灭火、生命探测等任务。“人少、面广”“赶不及、撑不住”的基层应急工作形势，不利于把握救援时机，也显著降低整体效能。

2. 基层执行人员专业能力薄弱

许多基层应急执行人员在风险识别、现场评估、救援方案制定等关键环节上较多依赖个人经验与传统方法，而对现代应急技术、现代化装备操作的掌握较为粗浅。面对危化品泄漏、建筑坍塌、高层火灾等复杂灾情时，多数人员不会操作便携式生命探测器、无人机侦察系统、热成像仪等现代化装备，也无法基于平台数据进行多目标场景判断，导致救援常处于“试错”“缓慢响应”状态。

3. 基层培训与演练机制不够完善

地方管理部门定期组织的应急演练，较多停留在“桌面演习”“例行流程”，集中在基础流程和单一技能训练，尚未形成跨部门、跨专业、跨层级、跨场景的综合联动演练体系。缺少针对高温、浓烟、塌方等极端环境下装备适应性、网络通信干扰等场景的专门演练，使基层执行人员在真实灾害应急过程中难以熟练运用新技术、多源信息融合手段。“通信中断+高温+人员拥堵”等极端复合情境少有模拟，移动通信车、无人侦察、应急电源协同调度的演练几乎缺席，导致相关技术装备建而不用。

4. 基层人员轮换与保障机制缺乏

灾害现场的高强度作业通常持续多日，基层应急队伍因编制有限而无法实施高效轮换与增援，致使作战疲劳频发。现场后备力量调配和健康监测机

制等不够成熟，易造成基层人员体能和心理的透支，不利于发挥连续救援的效能，也增加救援失误和二次伤害的风险。

（三）社会协同层：志愿者动员组织能力与专业水平欠缺

1. 志愿者资源整合与专业化不足

社会应急力量建设体系尚不完善，公众对突发事件的防范知识了解严重不足，救灾文化和避险常识尚未深入人心。虽然政策文件强调将志愿服务纳入突发事件应急体系、制定应急志愿服务预案，但许多城市的志愿者组织缺乏与应急指挥系统对接的标准化数据接口及任务分派机制，灾时人力资源调配依赖社交媒体群组、电话通知等非结构化的通信方式，导致志愿者分布与灾区需求热点的动态匹配效率低下。此外，常态化培训和专业化演练不足，志愿者技能水平参差不齐，参与救援的效率和配合度不佳。

2. 志愿者安全保障条件不齐备

防毒面具、定位手环、应急通信设备等志愿者个体安全防护装备，普及率和性能指标均有不足，导致志愿者难以就近获取关键物资。志愿者保险的覆盖范围有限，相应的人身安全与装备损失缺乏制度性保障。专业化的应急技能培训体系未能覆盖全场景需求，难以合理控制高危环境下的作业安全风险。

3. 公众行为指导机制不健全

公众行为引导技术的研发工作滞后于数字化社会的发展需求，在灾害预警发布和现场指令方面缺少覆盖全社会的多渠道宣传体系。错误信息和谣言易在社交网络中传播，引发恐慌且不利于正确避险。推动社会力量参与社区风险排查、应急宣传已是基本要求，但不少城市缺乏有效的公众教育体系，灾害科普手段单一。社会公众在遇险时缺少科学的逃生自救习惯，多在被动等待救援。针对灾时人群聚集、物资抢购等行为的实时预警与疏导策略不够健全，尚未形成数据驱动的动态调控能力，容易加剧次生社会风险。

（四）关键区域：极端环境适应性技术支撑体系薄弱

1. 应急通信与物资投送能力滞后

在极端环境下，城市基础设施易发生断路、断网、断电（“三断”）情况，而现有的应急技术支撑体系尚不健全。针对“三断”区域发展应急供电和通信设备、提升生命探测 / 综合救援 / 电力保障能力已是明确要求，但当前的技术部署能力仍存在较大差距。部分地区缺乏快速构建临时通信网络的技术手段，尽管无人机空中基站等技术已开展探索应用，但系统集成度不高、抗干扰能力不足，难以稳定支持关键区域的大范围通信需求。多数应急指挥中心依赖柴油发电机、便携式卫星电话，存在油料运输困难、部署响应滞后、电源持久性不佳等问题，难以支撑长时间、多点位的同步救援。

在救援物资方面，道路中断导致传统运输方式受阻，而常规救援队伍缺乏两栖车辆、空中投送装备。模块化全地形水陆两栖抢险装备等仍处于试点应用阶段，未能实现批量部署与实战适配。山地和高原地区物资运输严重依赖人力搬运，而重型无人机等远程智能投送装备发展滞后，在高海拔、低温、强风等环境中的飞行性能、投送精度等存在不足。此外，失水状态下的供水保障应急能力薄弱，多依赖瓶装水转运、临时抽水泵等低效手段，而就地净水装备、应急管网快速恢复方案等有待开发。个人防护、生命探测装备在面对火灾、高寒、缺氧等极端环境时的可靠性有待提升，部分装备因环境适配性差而难以形成第一响应能力。

2. 智能化、无人化救援装备适配性不足

当前，智能化、无人化救援装备在关键区域的适配性明显不足。无人机、救援机器人等装备，在山地、塌方、泥石流等复杂地形应用时普遍表现为任务算法鲁棒性低、环境识别能力不足。大多数地面机器人在面对非结构化地形时，路径规划与障碍规避需要高质量遥感、多模态数据的支持，否则容易出现导航漂移、姿态误判等情况；配置的传感器在强干扰环境中性能下降，影响幸存者生命特征的识别精度。

智能化、无人化救援装备普遍存在续航时间短、载荷能力有限等硬件层面的性能瓶颈，难以满足偏远地区长时间、大范围作业的实际需求。分布式能源与补给系统缺失，导致关键的监测设备易因电量耗尽而失联，指挥平台瘫痪、救援中断等问题频发，显著影响救援连续性和信息透明度。全地形车等大型装备也受制于通行能力、燃料消耗、转运灵活性等，在道路受损、桥梁垮塌等场景中表现不佳，未

能成为有效突破“最后一千米”的关键支撑。

三、城市安全韧性理论研究进展与我国技术应用现状

（一）城市安全韧性理论研究进展

当前，城市化进程加速推进，城市系统日益复杂化，极端灾害新特征显现，灾害链条的复杂性显著增加（见图1）[12~14]。城市面临的安全风险问题不断加剧，获得各方面的高度关注。从城市安全到城市系统性风险，再到城市应急响应、城市安全治理，相关概念不断演化，逐步形成涵盖城市规划、灾害管理、公共政策、复杂系统科学、信息技术等的多交叉融合研究领域。自然灾害、重大技术故障、公共卫生事件等城市突发事件频发，凸显出数据驱动、具有良好适应性的城市安全治理与决策机

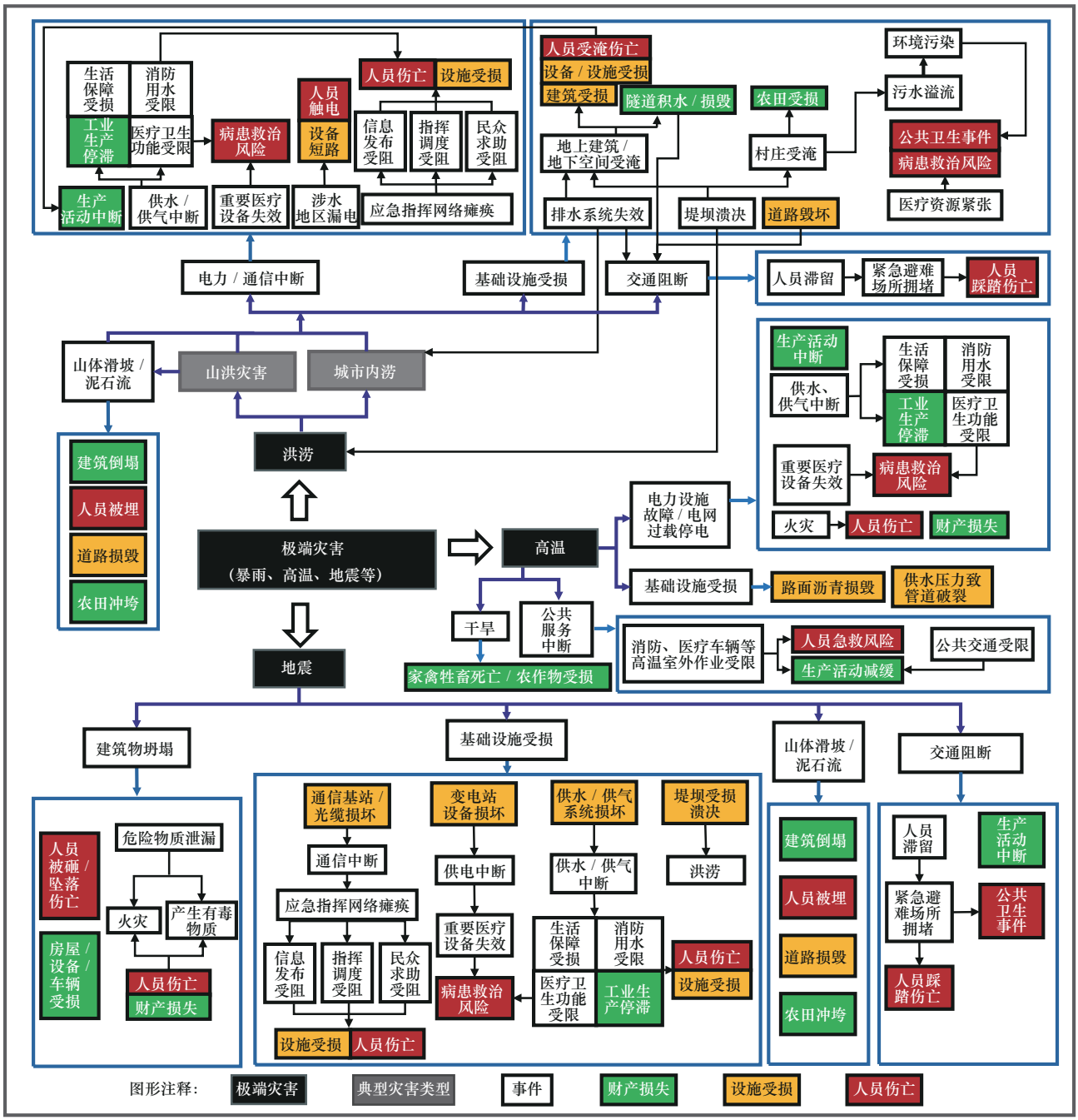


图1　极端灾害的灾害链示意图

制的迫切性。

多年来，城市安全韧性领域研究经历了从单一学科向多学科交叉融合的转变。起初，学术研究重在应急响应和灾害管理，关注突发事件及时反应、应急资源合理调配；随着城市化进程加速、城市面临风险复杂化，学术研究视野逐步扩展，涉及城市韧性建设、可持续发展、AI应用等议题，相关前沿探索标志着城市安全研究从传统应急管理转向关注动态、预防性、科技驱动等要素。早期研究集中在基于数据和模型的风险评估与决策支持系统[15~23]，为城市多重风险应对提供了理论依据。随着研究的深入，城市作为脆弱的风险承受体更应具备一定的韧性以有效应对灾难并维持系统的长期适应能力，成为普遍观点。城市韧性、可持续性逐渐成为城市安全研究的重要议题，提升城市在面对灾难和环境变化时的自我恢复能力逐步成为研究重心[24~28]。这一过程中，气候变化的影响更为突出，成为城市安全研究的核心议题之一。极端天气事件频发、环境风险加剧，推动采用绿色基础设施[29~32]、低碳城市设计[33~36]等手段来积极应对气候变化，提升城市的适应性和韧性。机器学习、强化学习、贝叶斯网络等数据分析技术[37~39]获得广泛应用，支持基于大规模数据进行风险预测和决策优化，为灾难预警和应急响应提供高效的技术手段，推动城市安全管理朝着智能化方向转型。

在更多引入智能技术后，学术界对城市安全管理的关注逐渐转向数据驱动的决策支持系统[40~47]，据此提升城市应对多重风险的能力。健康、社会行为等因素对城市安全的影响也因全球公共卫生事件频发而受到更多重视。公共卫生事件成为城市安全研究的重要议题，城市居民的健康风险、社会行为及其与环境、基础设施等因素的交织影响等[48~51]丰富了城市安全研究内涵。此外，城市系统脆弱环节识别与影响评估[52~56]获得较多关注，能够精确预测风险的传播路径和潜在影响，为应急响应、资源调配提供了理论支持，推动城市安全管理从被动反应转向主动预防。基于更为精确的城市安全模型模拟不同灾害情境下的城市反应[57~60]成为趋势，在增进理解城市系统运行机制的同时，为政策制定提供科学依据，更好应对复杂的城市风险和灾害管理问题，也体现出科学研究从定性到定量、从模糊到精准的发展过程。

值得指出的是，城市安全韧性研究进一步与城市规划、公共安全管理、气候科学等领域交叉融合，以系统性思维认识并应对复杂灾害风险，促使研究范式从单一维度的韧性提升转向“社会 – 技术 – 生态”综合的韧性构建，发展更加完备的韧性评估指标体系和决策支持工具。相关演变过程也反映了学术界对城市风险复杂性的认识深化。未来研究将深度融合新兴技术和创新理念，朝着智慧应急和数字化转型的方向演进。基于大数据的分析方法、智能决策支持、跨领域综合研究有望成为主流趋势。随着城市安全管理复杂性的不断增加，未来研究也面临挑战：融合多个学科研究成果，构建具有高度适应性和韧性的城市安全管理框架；应对大数据处理、算法偏差等方面的挑战，提升城市安全系统的全球适应性。

（二）我国城市安全韧性技术应用现状

1. 跨空间协同：构建城市风险治理的全维联动格局

城市的物理系统、信息系统、社会系统共同构成高度耦合的复杂巨系统，3类系统的融合程度直接决定了城市的整体风险承载能力和恢复弹性。城市运行过程中发生的灾害事件涉及多个维度，予以治理和响应需突破传统的“条块分割”“系统孤岛”管理模式。诸多前沿技术的发展为上述跨空间协同提供坚实支撑，相关技术融合可促成“人 – 机 – 物”高度协同的城市治理新格局。随着跨空间协同机制的不断完善，未来城市将逐步实现从“功能孤岛”向“系统互联”跃迁，形成“物 – 信 – 社”三元融合、实时互通、联动响应的风险治理网络。

在物理空间方面，以感知设备为核心的泛在传感网络提供了城市底层数据获取通道。各种传感器、设备、网络技术的应用，支持物理世界中建筑、车辆、道路、设备等物体与信息系统之间的实时数据交换与互动，包括结构应力监测、桥梁振动监测、地下管网泄漏检测在内的监测设备实现自动化和常态化感知，为及时预警提供数据支持。在信息空间方面，大数据平台、AI算法、知识图谱等逐步成熟，AI与大数据成功赋能信息系统，具备了城市的跨域数据集成与智能分析能力；提升城市的感知、预测与决策能力，增强多源异构数据的融合处理与风险动态识别能力，为复杂系统性风险的识

别、评估和干预提供关键支撑。在社会空间方面，公众参与机制逐步完善，将人类社会行为纳入治理网络而形成“人人皆是感知终端、人人皆是治理参与者”的新格局。城市治理系统通过社交媒体、传感器、其他数字平台，可实时收集来自市民和社会组织的数据，掌握公众的需求和反馈以及应急响应的效果。管理部门通过小程序、微信城市服务端、应急响应应用程序等形式，广泛采集民意数据，用于优化政策制定过程和突发事件响应。

在政策引导与试点项目推动下，全国多地启动了城市韧性建设工程，应用IoT、通信网络、AI等技术，加快建设城市级“数字底座”，包括统一城市数据平台、信息资源目录体系、跨部门数据接口标准，以从底层打通各类数据的流通壁垒。以杭州市的“城市大脑”、广州市的“穗智管”等为典型，实现多个系统数据的统一汇聚、分析、再利用，支撑了城市运行风险的综合感知与联动治理。

2.“5G+边缘计算”：建立实时智能的城市“神经网络”

5G与边缘计算深度融合，正在重塑城市的感知与响应体系。通过5G网络连接海量终端设备（如传感器、摄像头、无人机），构建高带宽、低时延的实时感知网络，显著提升城市对风险事件的快速响应能力，为城市构建“实时联接一切”的通信能力。边缘计算依托本地化处理能力、分布式架构与容灾特性[61]，为城市提供接近终端的智能处理节点，形成“感知 – 分析 – 响应”闭环链路。此外，“5G+边缘计算”增强关键时刻的通信与计算韧性，即使中心系统暂时失联，边缘节点也能独立承担基础监测与预警功能。

在应急响应方面，“5G+边缘计算”已部署到智能消防、智慧交通、危险品监管、城管执法等场景。例如，在大型民航机场，边缘计算节点可处理数百路高清视频流，及时识别可疑行为并启动联动机制，显著提高响应速度。在公共安全管理中，边缘计算单元布设在重要交通枢纽、人口密集区域，与5G结合，实现海量视频数据的分布式处理，可识别涉险行为、非法集聚、交通拥堵等异常状态并及时上报城市管理中心。“5G+边缘计算”在防灾减灾领域也展现了良好潜力：与地震预警系统集成，实现震感信息的超低延迟发布；针对暴雨、台风等极端天气，即时处理积水点的水位变化，提供主动触发型排水调度能力。

以深圳、上海为代表的一些超大城市，广泛部署了“5G+边缘计算”基础设施，应用至公安、消防、城市运行管理等场景，支持构建快速感知、智能调度的“城市神经网络”。未来，5G与边缘计算的协同将向“端 – 边 – 云 – 智”融合架构演进，与AI推理芯片、联邦学习技术、云原生平台等深度结合，进一步提升城市的数字韧性。

3. 无人装备：构建“人机协同”的城市风险作战力量

无人机、地面机器人、水下 / 地下特种装备等智能无人装备作为“城市感知触角”“任务执行末梢”，支持构建“空 – 地 – 水”多维协同的作业体系，成为数字空间与物理空间连接的关键媒介，在城市安全与韧性治理中发挥着日益突出的作用。在城市灾害管理中，无人装备具有传统人力难以比拟的优势：对于灾害救援、日常巡检等场景，机器人可替代人类进入有毒气体、火场、结构坍塌等高危环境，执行搜救、测温、侦测等作业任务，提升作业效率与人员安全，能够实时回传图像支撑精准决策；具备夜间、雨天、长时作业能力，可不间断提供数据支撑与处置能力。例如，深圳市的全域城市安全感知网络部署了消防灭火、排爆、水上救援等功能的智能机器人，经由5G与应急平台联动，可实时感知城市运行风险并形成城市风险“一张图”。

我国加快推进智能装备研发与应用布局，针对城市火灾、高层建筑火灾、地下有限空间事故、地下水域等复杂危险场景，开发了灭火、搜索、救援、排烟等方面的专业机器人装备[62]。尤其是在城市消防领域，使用了地面消防机器人、高层灭火侦察机器人、水下搜救机器人等智能装备，增强了火灾扑救、救援搜寻等能力。北京、武汉、重庆等城市建立了应急机器人试验验证平台，支持复杂环境适应性测试。应急管理部门制定了应急机器人装备技术标准，完善相关装备的采购机制与配套政策。更为重要的是，相关装备逐步从“单点作业”向“系统联动”转变，可接入城市大脑、边缘节点、CIM平台，与应急平台、视频系统、地理信息系统（GIS）保持联动，建立智能导航、路径规划、队列作战、协同调度等能力，形成“人机 – 网端 – 指挥中心”三位一体的响应格局，提升复杂场景下应急救援的效率和安全性。

4. CIM 与数字孪生：形成城市的“智慧映射镜像”

CIM 与数字孪生技术不仅提供了城市运行状态的“全息视图”，而且逐步成为支持城市安全韧性治理决策的关键依托[63,64]。CIM 是融合 GIS、建筑信息模型（BIM）、IoT 的城市级三维模型平台，针对城市地形地貌、建筑设施、地下管线、交通网络等进行空间建模，形成“实景级”的城市数据底图，据此叠加实时感知数据、风险地图、历史案例，实现城市运行状态的可视、可知、可管。例如，在建筑群韧性评估方面，广泛应用 CIM、BIM 融合的三维仿真平台，结合场景感知数据和结构参数，实现建筑群在地震、火灾、强风等灾害过程中的结构响应评估、损伤模拟、疏散效率仿真；在基础设施抗灾韧性评估方面，多个城市积极推动关键生命线系统（如供水、电力、燃气、通信、交通）的多灾种耦合建模，构建基于 GIS 的“空间 – 功能 – 时间”三维一体的韧性评估模型。此外，数字孪生技术叠加仿真建模、AI 分析能力，可实现城市运行态势的实时映射、灾害场景的虚实联动推演、应急响应的智能调度，形成可预测、可交互、可验证的城市数字镜像。例如，上海市基于城市数字孪生平台构建了城市防汛防台智能指挥系统，实现雨量监测、积水监控、应急响应的一体化管理；北京市海淀区建设的“气象大脑”平台，整合了 CIM、智慧气象、多部门数据，构建了精细化气象风险地图，在特大暴雨中实现“预测 – 响应 – 处置”全过程联动。广州、成都、宁波等城市启动了基于“CIM+孪生平台”的城市安全模块建设，对水务、电力、交通、燃气、地下空间等系统进行集成管控。实践表明，CIM 与数字孪生融合了物理感知、信息分析、社会治理机制，成为城市系统性风险评估、预警发布、应急处置的重要技术支撑。在数字中国、城市治理现代化等战略的推动下，未来 CIM 与数字孪生将成为智慧城市的核心底座技术之一，促进城市韧性水平进一步提升。

四、我国城市安全韧性技术攻关要点

（一）面向城市安全的智能化情景推演与系统化综合风险评估方法

城市是多个系统深度耦合的复杂巨系统，各类基础设施相互依存；一旦某个系统失效，通常引发级联效应，构成系统性风险。现有的“风险 – 韧性”耦合框架能够评估多灾种场景下的城市基础设施抗灾能力，但多将城市视为静态结构，无法有效描述跨层级、跨部门的耦合关系，也难以进行实时更新以应对复杂变化的城市系统状态，存在结构化不充分、动态性不足、定量性有限等问题。为此，围绕城市安全相关的系统性综合风险评估，亟待构建以智能情景推演为核心的新型评估方法体系，构建贯通“预警 – 响应 – 恢复”全过程的风险评估系统，在城市数字孪生平台上运行状态感知、风险预测、应急策略检验、事后复盘等功能，推动从模型构建到现实应用的连续支撑。

城市安全韧性技术正在朝着智能化情境推演方向探索。利用 AI 与机器学习技术，构建更加逼真的灾害场景模拟系统。通过深度学习模型建模历史灾害数据，生成多时空尺度的灾害演化路径。应用图神经网络，刻画城市多个系统之间的联动响应，开展多灾种情境的联动演化。采用贝叶斯网络、因果推理图等工具，识别潜在的触发路径与风险链条，增强对复杂非线性耦合关系的理解与解释能力。

进一步，结合数字孪生技术复现高保真、沉浸式、可交互的灾害场景。构建虚拟城市模型，实时接入多源传感器数据，动态调整模拟参数，增强情景推演的实时性和可信度。结合虚拟现实交互、人群行为建模，模拟居民的疏散行为，测试应急响应预案的操作可行性与社会接受度。以发生事件为基准，回放事件演化过程，比对模型模拟输出与真实事件进展的一致性。针对灾害传播路径或系统失效节点，引入随机扰动模拟，评估不同初始条件下模型的稳定性和鲁棒性。借助遥感影像、交通监控、应急日志等数据，验证推演结果中关键节点、时间序列、真实感知数据之间的对应关系。建立包含传播路径偏差、响应时间差、资源调度误差等定量指标的评估框架，考核不同算法模型的模拟精度。组织领域专家对模拟结果进行结构审查与情境演练反馈，提升模型情境设定、行为规则的现实合理性。

（二）“数据智能–应急管理–城市治理”体系化适配协作的应急响应机制

城市应急管理体系在顶层设计与基层实施之间

长期存在结构错位的问题[65,66]，城市应急管理的结构化治理、多样化基层之间的张力凸显。纵向协调不足是当前应急响应体系中的首要问题，横向协同障碍同样不利于多部门联合响应的高效实施，资源能力差异则加剧响应不均的问题。例如，数量众多的基层单元在应急能力、人口结构、经济条件、公共服务水平等方面存在显著差异，与区域发展不均衡叠加，导致统一的政策和预案在基层执行时往往不够协调，较多出现响应脱节、资源错配的情况。为此，着眼顶层统一化、部门通用化、行业专业化、基层多样化的时代需求，构建“顶层结构化 – 基层多样化”“左右连通 – 上下贯通”“数据智能 – 应急管理 – 城市治理”体系化适配协作的应急响应机制成为亟需。

应急响应适配机制的核心是“数据智能 – 治理体系 – 技术系统”有效协同。通过标准化接口与中台机制，实现以下三方面互联互通，构建敏捷、高效、闭环的应急响应生态：多源数据涵盖气象、水文、地理、IoT、社交媒体等，经统一平台进行融合分析，为态势感知、风险研判、响应调度提供基础支撑；治理体系涉及管理部门、专业机构、社区组织、志愿者等多元主体，需要横向信息共享机制和任务协作流程；技术系统包括应急调度平台、GIS 可视化、无人机巡查、通信网络等，是落实应急决策、推动快速执行的关键载体。此外，技术能力的提升又将改变社会系统对风险的认知、预测、应对等能力，从而形成正向循环。

整合多项关键技术并建立联动机制，在应急指挥中心通过信息化平台进行紧密协同，据此构建自适应的应急协同体系。预警阶段可实现异常信号的快速识别与评估，响应阶段确保多部门协同决策、资源部署、现场救援的无缝衔接，恢复阶段开展总结评估并持续优化预案与流程，最终形成“预警 – 响应 – 恢复”闭环式应急协作机制，增强城市应对突发事件时的综合处置能力。① 实时监测与数据融合。应用 IoT、5G 技术，布设各种环境与生命体征监测传感器，采集城市各类关键设施和公共空间的实时数据。基于大数据平台对多源数据进行融合分析，提供多维度灾害情报和空间分布信息。② 智能分析与辅助决策。采用 AI 算法和知识图谱，对复杂事件进行风险评估和方案优化。使用深度学习模型预测灾害发展趋势，根据规则引擎和图推理定位关键影响因素，生成科学的决策建议。③ 协同指挥与通信平台。建立跨部门应急指挥中枢，整合 GIS 地图、IoT 终端、通信工具，构建指挥调度、信息共享、多方通信一体化的能力。在灾害发生后，在平台上可视化呈现各方数据，通过移动终端发送行动指令、接收现场反馈。④ 动态资源调度机制。建立涵盖救援物资、车辆、人员等信息的应急资源动态管理库，应用优化算法形成救援力量和物资的实时调度策略，保障关键资源及时到达重点区域；预测不同调度方案的实施效果，持续优化调度策略。⑤ 跨域多级联动机制。制定通用标准和流程，实现市区两级及不同部门之间的联动预案。建立事件分类分级响应机制，将灾害信息自动流转到相应层级并触发响应，如一级灾害信息同时推送给市区两级指挥中心，相关部门按分工同时启动应急预案。定期开展跨部门联演，测试并优化联动机制。

（三）数据智能赋能 EM–BCM 融合的决策支持方法

应急管理、业务连续性管理是城市风险管理领域的两个核心理念：前者关注在突发事件中进行紧急响应、救援调度和危机处置，后者强调关键服务和业务流程不中断的能力[67]。为适应复杂多变的城市风险环境，EM – BCM 融合的管理模式成为新的关注点，即决策支持不仅关注短期应对，而且兼顾长期恢复与运营稳定，有助于应急响应、业务连续性保障的统一。相较日本多层级防灾体系下的政府高度主导模式、美国联邦紧急事务管理署框架下以标准化应急流程为核心的机制体系，这一模型更贴合我国城市高密度人口、多主体治理、资源配置不均衡等实际，通过融合模型实现应急系统、常态运行系统的耦合，展现出良好的适配性与场景落地能力。

基于数据智能的新一代决策支持系统将形成智能化架构并支持 EM – BCM 融合。① 数据与知识层。整合城市运行和应急事件的多源数据，包括 IoT 传感器数据、历史灾害记录、基础设施拓扑、各部门业务流程及应急预案文档。建立知识图谱或语义模型，关联事件、资源、角色、策略等要素，确保跨部门数据的语义互通。② AI 分析层。基于大规模机器学习模型和优化算法，对复杂任务网络进行推理。利用图神经网络模拟城市基础设施之间的依赖关系，经由大语言模型辅助整理多部门沟通

文档，基于机器学习算法分析各类应急策略的历史效果。③ 仿真与数字孪生层。借助城市数字孪生或仿真平台，对拟定的应急决策进行虚拟验证。在仿真环境中复现多种场景，评估不同应对策略的效果及风险，为科学决策提供数据支撑。④ 决策执行层。依托可视化指挥界面、智能提醒机制，将分析结果转化为易操作的决策建议，直接与资源调度和应急预案的执行流程进行对接。支持模拟演练和即时演示，利于交互式比较方案、直观展示多维影响，进而反馈至方案优化。

在具体的城市应用场景中，构建多任务网络与协同模型，描述不同危机条件下的工作流程，相应决策支持方法将促成四方面关键能力。① 跨部门模型整合。构建统一数据标准和共享平台，实现卫生、交通、电力等领域模型的语义对接与数据互操作。将各部门的需求模型和约束条件纳入同一知识图谱，在综合评估时快速调用不同领域模型。② 智能任务调度。应用动态规划、整数规划、强化学习等算法，结合任务优先级、资源可用性、时效性要求，自动生成优化的多任务调度方案。支持实时更新调度决策，高效应对事件信息或资源的变化。③ 智能方案推荐。结合仿真结果和机器学习预测，生成多种应对策略并进行性能排序。利用生成式模型和启发式算法，提出不同的疏散路线或物资分配方案，标注相应的预期效果和潜在风险，辅助决策选择。④ 决策策略评估与反馈。对比多轮模拟和真实执行结果，评估既定策略的效果与不足，以闭环学习的方式持续优化。根据事后分析结果，调整知识图谱中的参数和规则，对模型进行再训练，更好适应城市的特殊情况和突发模式。

五、我国城市安全韧性技术发展方向

（一）人工智能和无人装备推动灾害治理从“响应驱动”向“预测调控”演进

得益于AI赋能，城市应急响应逐步从被动响应转向主动干预。基于AI的预测和分析方法，将进一步增强城市应急响应体系的效能，推动城市安全管理向“智慧治理”阶段迈进，逐步实现灾害响应的自动化、精准化、高效化。基于深度学习的预训练大模型在灾害预测、应急决策支持、资源调度方面展现出良好潜力，能够分析和处理海量的历史灾害数据、气象数据、地理信息数据，进而识别潜在的风险并形成高度拟真的风险预测路径。与传统的静态模拟不同，AI模型支持开展风险动态演进预测和连续策略调整，AI增强型调度系统可依据资源可用性、灾害强度、社会脆弱性等来动态优化任务路径与响应时机，支持“以人为中心”的智能韧性调控，实现“预测 – 响应 – 决策”闭环，显著提高灾害响应的效率和精准性。针对基层执行能力薄弱的问题，构建“AI+人”协同机制：开发轻量化AI工具包，适配基层场景；运用“技术支持 – 人力补位”机制，建立“智能调度+志愿者响应”的协同平台；建立面向基层救援人员的标准化AI协同训练体系。

5G、低轨卫星通信技术发展迅速，促进极端气候事件和灾害场景下通信能力质的飞跃。依托低延迟、高带宽的5G，广域覆盖的低轨卫星互联网，可在地面通信设施受损的情况下承担灾害数据的实时传输任务，确保指挥决策畅通，为灾害应急响应、灾后恢复提供可靠的信息支持。地面机器人、无人机群等智能装备正在重构传统的“人+物”响应逻辑，可在复杂灾害场景下执行监测、搜救、物资投送等任务，在恶劣环境下提供无接触作业能力，减少对现场人员的依赖，大幅降低救援人员面临的风险，显著提升救援效率，成为基层人力资源不足条件下开展救灾的核心支撑力量。

（二）数字孪生技术驱动城市安全治理从“静态建模”向“动态调控”转型

数字孪生技术可在虚拟空间中真实再现城市及其关键基础设施的运行状态，提供应对灾害情景、进行影响评估、制定干预措施的新型手段。模拟地震、洪水等灾害事件对城市管网、交通系统和其他基础设施的冲击，在灾前提前识别脆弱环节、设计应急预案，应用预警机制有效降低灾害的潜在风险；在灾中实现实时状态监测、动态策略生成、应急资源调度，支撑秒级响应和连续调整；在灾后评估影响并优化恢复方案，将经验数据反馈到模型迭代过程以形成闭环改进。

数字孪生系统不同于CIM等传统的城市建模系统，强调“实时状态感知 – 情景推演仿真 – 响应策略演化”闭环能力：与IoT、BIM、知识图谱深度

集成，具备从物理状态、结构关联到治理规则的多层语义联通能力；显著提高实时性，可在秒级时间尺度上反映供水、电力、交通等城市关键系统的运行变化，与响应策略生成保持联动；支持地震、暴雨、污染等多种灾害类型的快速切换与响应方案推荐。

未来将依托“数字孪生+区块链”融合平台，构建城市级数据可信协同系统，有效打破数据壁垒，保障多部门协作的一致性、时效性和安全性。结合智能调度系统、无人装备、AI 决策支持，数字孪生将形成“虚拟 – 现实 – 行动”闭环，促成城市灾害应急响应的自动化、精准化和高效化。通过多源数据融合和模拟优化，数字孪生可支持城市长期韧性规划、风险评估、应急演练，增强城市系统对未来不确定性事件的适应能力。数字孪生将成为推动城市韧性建设的核心技术之一、构建智慧城市的重要组成部分，促进灾害应急管理体系的现代化和智能化。

（三）全球风险背景下可持续发展推动构建城市“韧性–可持续性–转型治理”协同路径

全球气候变暖、极端气候事件频发，对城市的生态、经济、社会系统带来了显著压力。强降雨、干旱、洪水等灾害在不同地区交替出现，对城市的灾害预测、预警、应急处置能力提出了新需求。全球合作的复杂性增加，造成全球资源分配的进一步失衡。积极应对气候变化引发的自然灾害、生态系统退化、经济社会动荡，成为城市韧性建设的关键议题。

以“硬件安全”为核心的城市防灾传统理念，不再适应新时期城市可持续发展的需求。现代城市韧性不仅关注遭受突发灾害后的短期恢复能力，更强调面对长期和系统性风险时的适应性与转型能力。可持续发展在这一过程中发挥了关键作用，不仅指示城市基础设施韧性、能源效率、生态承载力的主导方向，而且强调社会治理、公共服务、社区参与的长期优化，使城市在应对全球性不确定性时具备持续自适应能力。因此，韧性与可持续性逐渐成为城市发展的战略目标，将驱动城市安全研究摆脱“救急式”思维模式，转向“韧性 – 可持续发展 – 转型治理”协同演进的综合范式。

在实践中，城市可通过整合风险识别及预警、应急响应、基础设施韧性提升、能源与生态系统优化、社会治理强化等手段，推动韧性与可持续发展的协同。在提升关键系统的适应能力和资源利用效率后，城市既能在当前危机中快速恢复，也可增强面对未来全球性挑战的长期持续适应能力。在全球风险背景下，以可持续发展为导向的韧性建设为城市安全治理提供了理论指引和实践路径，推动城市从单一防护模式转向系统性、综合性、长期可持续的韧性治理模式。

（四）安全韧性技术与管理融合为提升城市安全治理能力提供新增支持

面向复杂的风险环境，安全韧性技术与管理融合成为优化城市韧性建设的重要方向。技术创新可为管理提供有力支持，显著增强城市防灾能力；技术应用也不能孤立存在，效能发挥依赖兼有灵活性和适应性的管理机制。为此，积极有效的城市安全治理需要在技术与管理层面实现协同。在基础设施抗灾能力提升、城市网络恢复力建模、突发事件响应优化方面，技术提供能力边界，管理确保策略调整、资源协调、跨部门联动的高效执行，由此形成技术赋能、管理决策协同的闭环体系。在应急管理实践中，技术支持系统为管理决策提供快速精准的信息保障，管理则根据实时信息调整策略、统筹各方力量与资源配置，确保应急响应的高效性和精准性。这种深度融合有利于提升城市在灾害冲击下的即时反应能力，推动治理模式朝着智能化、系统化、前瞻性方向发展，促成城市韧性建设的长期战略引领力。

技术治理也需嵌入制度适配与伦理约束。为应对当前“数据孤岛”、隐私风险、公众接受度不足等问题，可从制度层面、能力建设、伦理治理三方面出发，构建“技术 – 制度”协同体系。建设国家级灾害信息共享与互联平台，推动形成“标准化接口+分级授权”机制。建立公众风险教育体系和志愿者应急培训平台，提升基层响应力。制定 AI 辅助决策的解释性标准、数据安全监管规范，明确责任边界，保障技术应用合法可控。整体上，城市安全韧性技术与管理的深度融合将促成更高水平的安全治理体系（兼有硬性技术支撑和柔性管理能力），体现为技术引领、管理驱动、战略发展相协调的城市安全韧性建设新范式。

（五）跨学科协同成为应对城市多维风险挑战的关键路径

现代城市是“物理 – 信息 – 社会”融合系统，随着风险类型的多样化、传播机制的复杂化，相应安全概念早已突破单一学科范畴。单一学科的技术能力、方法体系、认知边界已经难以应对城市面临的耦合风险，如“自然 – 社会 – 工程”复合灾害、“突发 – 渐进”联动风险、“局部 – 全局”共振效应等。城市安全研究已在多个层面呈现出跨学科融合的趋势，突出表现在自然科学与社会科学的融合、工程科学与管理科学的融合、技术科学与政策研究的融合。为此，跨学科研究成为城市安全韧性技术发展的必然要求和创新动力。构建多学科集成的韧性评估体系，准确识别系统薄弱环节、脆弱人群、潜在失稳链条。融合认知科学与AI，提升“人机协同”对应急决策的支持能力。整合社会网络分析、空间地理模型，识别信息传播与资源配置方面的结构性瓶颈。未来的城市安全研究将突出“协同创新”“集成赋能”的科研组织模式，推动学科之间的深度耦合，形成具有系统集成能力的智慧城市风险治理框架。

城市安全韧性是贯穿“感知 – 认知 – 治理”全过程的系统性工程。打破传统的学科、制度、技术界限，融合AI、数字孪生、制度创新、公众协作，支持构建面向全球风险挑战、具有自主适应与持续演化能力的智慧城市治理体系。在短期（1~3年），以智能感知与应急响应能力为突破口，构建城市级“快速识别 – 精准处置”韧性响应链。在中期（3~5年），聚焦数字孪生与系统建模，推动城市治理从“静态建模”转向“动态决策”“场景调控”。在长期（5年以上），构建“韧性 – 可持续 – 治理转型”复合演化路径，推动城市安全从单维技术防护向多系统协同治理演进。

六、结语

本文围绕极端灾害驱动下的城市系统性风险防控与安全韧性技术发展，立足我国复杂城市体系特征与治理需求，识别了当前我国韧性城市治理短板，凝练出三大关键技术攻关要点，提出了城市安全韧性技术发展方向。构建的EM – BCM融合决策模型，打破了传统应急管理与业务连续性管理的分离格局，形成了“感知 – 认知 – 决策”三维韧性技术路径，提升了城市在系统性风险情境下的联动响应、智能调度、连续运营能力，与我国高密度、多主体、多层级的城市治理工作需求适配且有良好的可操作性。

展望未来，城市韧性技术的研究和应用仍面临更高的复杂性与不确定性挑战。可深入探索跨系统、跨部门的数据融合机制，深化AI与数字孪生在动态灾害模拟、连续决策优化、智能调度中的应用。也可关注技术治理与伦理、制度协调的集成路径，以增强城市安全韧性对突发和长期风险的综合适应能力。在实践层面，可推进多场景、多级别的应急演练与模型验证，探索技术赋能条件下的城市韧性评估标准和政策导向，为城市面对极端灾害和系统性风险时提供可持续的战略支撑与行动指南。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 6, 2025; **Revised date:** August 6, 2025

Corresponding author: Zhang Hui is a professor from the School of Safety Science, Tsinghua University. His major research filed is public safety. E-mail: zhhui@tsinghua.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2024YFC3017000); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Safety and Resilience Technologies for Urban and Social Systems under Extreme Disasters” (2024-XBZD-21); National Natural Science Fund of Project (72334003)

参考文献

[1] Zhang W X, Clark R, Zhou T J, et al. Weather and climate extremes hitting the globe with emerging features [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2024, 41(6): 1001–1016.

[2] 王飞跃, 王籽幻, 杨倩, 等. 新安全观“共同”视角下城市洪涝灾害应急资源配置四方博弈研究 [J]. 灾害学, 2025, 40(3): 26–32, 53.
Wang F Y, Wang Z H, Yang Q, et al. Research on the four-party game of emergency resource allocation in urban flood disasters under the common perspective of a new vision of security [J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40(3): 26–32, 53.

[3] 祖嘉纬, 刘泽照. 极端天气灾害的应急响应分析——中德两地特大洪灾比较 [J]. 城市与减灾, 2022 (2): 58–62.
Zu J W, Liu Z Z. Analysis on emergency response for extreme weather events based on comparison between big floods in Germany and China [J]. City and Disaster Reduction, 2022 (2): 58–62.

[4] 余瀚, 王静爱, 柴玫, 等. 灾害链灾情累积放大研究方法进展 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1498–1511.
Yu H, Wang J A, Chai M, et al. Review on research methods of disaster loss accumulation and amplification of disaster chains [J].

Progress in Geography, 2014, 33(11): 1498–1511.

[5] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. (2021-03-13)[2025-07-21]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
Outline of the 14th Five-Year Plan for national economic and social development and long-range objectives through the year 2035 [EB/OL]. (2021-03-13)[2025-07-21]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

[6] 城市安全风险综合监测预警平台建设指南 (2023 版) [EB/OL]. (2023-11-19)[2025-07-21]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916861.htm.
Guidelines for the construction of comprehensive monitoring and early warning platform for urban safety risks (2023 edition) [EB/OL]. (2023-11-19)[2025-07-21]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6916861.htm.

[7] 张伟东, 高智杰, 王超贤. 应急管理体系数字化转型的技术框架和政策路径 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 107–116.
Zhang W D, Gao Z J, Wang C X. Digital transformation of emergency management system: Technical framework and policy path [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 107–116.

[8] 关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见 [EB/OL]. (2024-12-05)[2025-07-21]. https://www.gov.cn/zhengce/202412/content_6991171.htm.
Opinions on promoting the construction of new urban infrastructure and building resilient cities [EB/OL]. (2024-12-05)[2025-07-21]. https://www.gov.cn/zhengce/202412/content_6991171.htm.

[9] 国务院关于印发“十四五”国家应急体系规划的通知 [EB/OL]. (2021-12-30)[2025-07-21]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2022-02/14/content_5673424.htm.
Notice of the State Council on printing and distributing the “14th Five-Year Plan” for national emergency management system [EB/OL]. (2021-12-30)[2025-07-21]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-02/14/content_5673424.htm.

[10] 范维澄. 健全公共安全体系 构建安全保障型社会 [N]. 人民日报, 2016-04-18 (09).
Fan W C. Improving the public safety system and building a security-assurance society [N]. People’s Daily, 2016-04-18 (09).

[11] 范维澄, 黄弘. 韧性城市建设的意义、进展与展望 [N]. 人民日报, 2024-06-14 (09).
Fan W C, Huang H. The significance, progress, and outlook of resilient city construction [N]. People’s Daily, 2024-06-14 (09).

[12] 居丽丽, 穆海振. 上海台风、大雾和高温灾害链的建立和分析 [R]. 石家庄: 第十四届中国科协年会, 2012.
Ju L L, Mu H Z. Establishment and analysis of the typhoon, fog, and high-temperature disaster chain in Shanghai [R]. Shijiazhuang: The 14th Annual Conference of the China Association for Science and Technology, 2012.

[13] 靳文波, 杨继星, 刘韶菲, 等. 特大城市暴雨灾害断链推演与应对方法研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 20–29.
Jin W B, Yang J X, Liu S F, et al. Chain breaking simulation and countermeasures of rainstorm disasters in megacities [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 20–29.

[14] Lu Z, Yan D Y, Jiang H J. Earthquake disaster chain model based on complex networks for urban engineering systems [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2024, 40(3): 230–237.

[15] Krupka J, Kasparova M, Jirava P. Case-based reasoning model in process of emergency management [R]. Berlin: Man-Machine Interactions, 2009.

[16] Liu W M, Hu G Y, Li J F. Emergency resources demand prediction using case-based reasoning [J]. Safety Science, 2012, 50(3): 530–534.

[17] Wey W. Smart growth principles combined with fuzzy AHP and DEA approach to the transit-oriented development (TOD) planning in urban transportation systems [J]. International Journal of Energy Technology and Policy, 2013, 3: 251–258.

[18] Vallejo E, Criado C, Arrizabalaga E, et al. Sustainable strategic urban planning: Methodology for urban renovation at district level [R]. Abu Dhabi: ISES Solar World Conference 2017, 2017.

[19] Li X N, Yan D H, Wang K, et al. Flood risk assessment of global watersheds based on multiple machine learning models [J]. Water, 2019, 11(8): 1654.

[20] Walker J J, Petrakis R E, Soulard C E. Implementation of a surface water extent model using cloud-based remote sensing—Code and maps [EB/OL]. (2020-02-10)[2025-07-21]. https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5e28b8d8e4b0d3f93b05fe4a.

[21] Lin C J, Zhang M, Zhou Z Q, et al. A new quantitative method for risk assessment of water inrush in karst tunnels based on variable weight function and improved cloud model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103136.

[22] Pham B T, Luu C, Phong T V, et al. Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125815.

[23] Kechidi S, Castro JM, Monteiro R, et al. Development of exposure datasets for earthquake damage and risk modelling: The case study of Northern Algeria [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021;19(12):5253–5283.

[24] 樊博, 冯冰娜. 灾害协同治理的准备度研究 [J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2015, 23(6): 31–39.
Fan B, Feng B N. Readiness for collaborative emergency governance [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Philosophy and Social Sciences), 2015, 23(6): 31–39.

[25] 赵秋红, 郁蒙浩. 非常规突发事件应急管理体系的组织设计理论、方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Zhao Q H, Xi M H. Organizational design of emergency management system for unconventional emergencies: Theory, methods, and applications [M]. Beijing: Science Press, 2017.

[26] 赵金龙, 黄弘, 朱红青, 等. 我国城市群突发事件应急协同机制研究 [J]. 灾害学, 2019, 34(2): 178–181.
Zhao J L, Huang H, Zhu H Q, et al. Study on the emergency collaboration for urban agglomerations in China [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 178–181.

[27] Xu Y. Study on improving the linkage mechanism of urban public emergency response [R]. Sanya: 2019 4th International Conference on Financial Innovation and Economic Development (ICFIED 2019), 2019.

[28] 吕孝礼, 付帅泽, 朱宪, 等. 突发事件协同研判行为研究: 研究进展与关键科学问题 [J]. 中国科学基金, 2020, 34(6): 693–702.

Lyu X L, Fu S Z, Zhu X, et al. Joint crisis sensemaking: A review and research agenda [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(6): 693–702.

[29] Shirgir E, Kheyroddin R, Behzadfar N. Analyzing existing urban green infrastructure to face climate change effects in neighbourhoods: Case study—Yousef Abad Quarter of Tehran [J]. Journal of Climate Change, 2020, 6(1):47–58.

[30] Reynolds H L, Mincey S K, Montoya R D, et al. Green infrastructure for urban resilience: A trait-based framework [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2022, 20(4): 231–239.

[31] Rodriguez B M. The Influence of green infrastructure on the resilience of urban drainage systems [D]. Brisbane: University of Queensland (Doctoral dissertation), 2022.

[32] Sharma S, Kumar S, Singh A. Assessment of green infrastructure for sustainable urban water management [J]. Environment, Development and Sustainability, 2023: s10668-023-03411-w.

[33] Ryan C. Eco-acupuncture: Designing and facilitating pathways for urban transformation, for a resilient low-carbon future [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 50: 189–199.

[34] Charoenkit S, Kumar S. Building low-carbon and disaster-resilient communities: Integrating climate mitigation and adaptation into the assessment of self-help housing design [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2017, 22(5): 695–728.

[35] Mohamed S A, Hamid N H A, Othmani N I, et al. Sustainable urbanism: Pathway to resilient strategies in adapting early Malay Town towards low carbon city [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1102(1): 012071.

[36] Bao Y X, Leung M K, Poon D, et al. Integrating vertical farm into low-carbon high-rise building in high-density context: A design case study in Hong Kong [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 96: 110472.

[37] Allam Z, Dhunny Z A. On big data, artificial intelligence and smart cities [J]. Cities, 2019, 89: 80–91.

[38] Tian W C, Zhang Z Y, Xin K L, et al. Enhancing the resilience of urban drainage system using deep reinforcement learning [J]. Water Research, 2025, 281: 123681.

[39] Peng M, Zhang L M. Analysis of human risks due to dam-break floods: Part 1: A new model based on Bayesian networks [J]. Natural Hazards, 2012, 64(1): 903–933.

[40] Ahad M A, Paiva S, Tripathi G, et al. Enabling technologies and sustainable smart cities [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102301.

[41] 王慧敏, 黄晶, 刘高峰, 等. 大数据驱动的城市洪涝灾害风险感知与预警决策研究范式 [J]. 工程管理科技前沿, 2022, 41(1): 35–41.

Wang H M, Huang J, Liu G F, et al. Research paradigm of big data driven urban flood disaster risk perception, early warning and decision [J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management, 2022, 41(1): 35–41.

[42] 王志杨, 张靖, 何宇, 等. 数据与模型混合驱动的区域综合能源系统双层优化调度决策方法 [J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3797–3813.

Wang Z Y, Zhang J, He Y, et al. Hybrid data-driven and model-driven bi-level optimal scheduling decision for regional integrated energy systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3797–3813.

[43] Schintler L A, McNeely C L. Artificial intelligence, institutions, and resilience: Prospects and provocations for cities [J]. Journal of Urban Management, 2022, 11(2): 256–268.

[44] Rao A, Kim J, Kamineni M, et al. Evaluating ChatGPT as an adjunct for radiologic decision-making [EB/OL]. (2023-02-07)[2025-07-21]. https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2023.02.02.23285399v1.

[45] Jiang C T, Guan X, Zhu J F, et al. Resilience of healthy cities in the post-pandemic era: Findings based on Internet of things data and artificial intelligence algorithms [J]. Internet of Things, 2023, 23: 100810.

[46] Chen E D, Zhang H X. Research on the impact of artificial intelligence technology on urban public health resilience [J]. Frontiers in Public Health, 2024, 12: 1506930.

[47] Pour M A, Ghiasi M B, Karkehabadi A. Applying machine learning tools for urban resilience against floods [EB/OL]. (2024-12-09)[2025-07-21]. https://arxiv.org/abs/2412.06205.

[48] Ba R, Wang C Y, Kou L Y, et al. Social resilience assessment for urban system: A case study of COVID-19 epidemic [R]. Singapore: Big Data and Social Computing, 2022.

[49] Zhang J M, Wang T. Urban resilience under the COVID-19 pandemic: A quantitative assessment framework based on system dynamics [J]. Cities, 2023, 136: 104265.

[50] Liu R, Li X, Zhang Z Z. Urban resilience of large public health events based on NPP-VIIRS nighttime light images: A case study of 35 large cities in China [J]. Sustainability, 2024, 16(17): 7483.

[51] Huang X Y, Wu Q, Dai Y, et al. Resilience building in public health rapid response teams in urban multi-hazard scenarios: Pathways and strategies from Shanghai, China [J]. Global Health & Medicine, 2025, 7(2): 106–111.

[52] Song J, Chang Z, Li W F, et al. Resilience-vulnerability balance to urban flooding: A case study in a densely populated coastal city in China [J]. Cities, 2019, 95: 102381.

[53] Diaz-Sarachaga J M, Jato-Espino D. Analysis of vulnerability assessment frameworks and methodologies in urban areas [J]. Natural Hazards, 2020, 100(1): 437–457.

[54] Zhang M, Liu Y F, Xiao Y X, et al. Vulnerability and resilience of urban traffic to precipitation in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23): 12342.

[55] Hung C H, Hung H C, Hsu M C. Linking the interplay of resilience, vulnerability, and adaptation to long-term changes in metropolitan spaces for climate-related disaster risk management [J]. Climate Risk Management, 2024, 44: 100618.

[56] Wang W J, Xu C, He J C, et al. Resilience-vulnerability balance and obstacle factor analysis in urban flooding: A case study in the Qinghai – Tibetan Plateau [J]. Buildings, 2024, 14(5): 1274.

[57] 李瑞奇, 黄弘, 周睿. 基于韧性曲线的城市安全韧性建模 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(1): 1–8.

Li R Q, Huang H, Zhou R. Resilience curve modelling of urban safety resilience [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(1): 1–8.

[58] 郭羽羽, 罗福周, 钟兴润. 基于熵权 – 正态云模型的城市安全韧性评估研究 [J]. 灾害学, 2021, 36(4): 168–174.

Guo Y Y, Luo F Z, Zhong X R. Study on urban safety resilience assessment based on entropy weight-normal cloud model [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 168–174.

[59] Jiao L D, Wang L W, Lu H, et al. An assessment model for urban resilience based on the pressure-state-response framework and BP-GA neural network [J]. Urban Climate, 2023, 49: 101543.

[60] 吴倩倩, 苏旋, 冯彦成, 等. 基于“三角理论模型” 的城市社区公共安全韧性评价研究 [J]. 中国应急管理科学, 2025 (2): 26–40.
Wu Q Q, Su X, Feng Y C, et al. Research on the evaluation of public safety resilience of urban communities based on the “triangular theory modeling” [J]. Journal of China Emergency Management Science, 2025 (2): 26–40.

[61] 黄婕. 面向多边缘节点的资源分配方法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学(博士学位论文), 2024.
Huang J. Research on resource allocation methods for multi-edge nodes [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications (Doctoral dissertation), 2024.

[62] 应急管理部 工业和信息化部关于加快应急机器人发展的指导意见 [EB/OL]. (2023-12-29)[2025-07-21]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924441.htm.
Ministry of Emergency Management, Ministry of Industry and Information Technology publish a guidance on accelerating the development of emergency robots [EB/OL]. (2023-12-29)[2025-07-21]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924441.htm.

[63] 城市信息模型(CIM)基础平台技术导则 [EB/OL]. (2020-09-15)[2025-07-21]. http://big5.www.gov.cn/gate/big5/www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/25/5546996/files/8b001bb0d928490d9bbc36b13329ab29.pdf.
Technical guidelines for the urban information model (CIM) basic platform [EB/OL]. (2020-09-15)[2025-07-21]. http://big5.www.gov.cn/gate/big5/www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/25/5546996/files/8b001bb0d928490d9bbc36b13329ab29.pdf.

[64] 张国政. 数字孪生技术提升城市韧性路径研究——基于风险治理视角 [D]. 北京: 中共中央党校(国家行政学院) (博士学位论文), 2024.
Zhang G Z. Research on the path to enhance urban resilience using digital twin technology—Based on the risk governance perspective [D]. Beijing: Party School of the Central Committee of the Communist Party of China (National Academy of Governance) (Doctoral dissertation), 2024.

[65] 何钰, 杨愉. 城市消防韧性体系构建的多维协同路径研究 [R]. 上海: 长三角区域韧性安全城市建设论文集, 2025.
He Y, Yang Y. Multi-dimensional collaborative path for constructing the urban firefighting resilience system [R]. Shanghai: Proceedings of the Yangtze River Delta Regional Resilient and Safe City Construction, 2025.

[66] 徐雪松, 闫月, 陈晓红, 等. 智慧韧性城市建设框架体系及路径研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 10–19.
Xu X S, Yan Y, Chen X H, et al. Framework system and path of smart resilient city construction [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 10–19.

[67] 姜琪, 李亚龙, 张洁, 等. 基于业务连续性管理的应急管理体系建设研究 [J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(23): 42–45.
Jiang Q, Li Y L, Zhang J, et al. Research on the construction of emergency management system based on business continuity management [J]. Computer Knowledge and Technology, 2019, 15(23): 42–45.