

面向韧性的城市基础设施系统级联失效研究综述与展望*

Cascading Failures in Urban Infrastructure Systems Towards Resilience: A Review and Prospects

张长椿 赫磊 范亭君

ZHANG Changchun, HE Lei, FAN Tingjun

关键词 城市基础设施；级联失效；防灾韧性规划；人工智能技术；研究综述

Keywords: urban infrastructure; cascading failures; disaster-resilient planning; artificial intelligence; literature review

摘要 全球气候变化引起极端灾害频发，城市基础设施系统间的复杂依赖导致的级联失效风险，已成为防灾韧性规划面临的核心挑战。围绕基础设施系统级联失效现有防灾韧性规划相关研究存在三方面局限：基础设施系统依赖关系受限于数据和方法，识别类型单一；关键设施精细化识别忽视社会系统与居民行为，模拟体系不全；韧性提升策略关注单系统响应和应急对策，多系统协同规划缺乏。在当前人工智能技术广泛应用的背景下，结合前沿技术提出解决以上三个问题的可能研究方向和技术路径：利用多源数据与大语言模型提升基础设施依赖关系识别精度；构建“设施—社会—人口”耦合的数物融合仿真模型增强城市空间脆弱性刻画的准确性；发展多系统协同的智能恢复策略，支撑城市服务能力快速恢复。将为防灾韧性规划关键问题的进一步研究指明方向并提供可行的技术路径。

Abstract: The increasing frequency of extreme disasters driven by global climate change has underscored the risks of cascading failures stemming from complex interdependencies among urban infrastructure systems, making this a pivotal challenge for disaster-resilient urban planning. Current research in this field, however, remains constrained by three critical bottlenecks: First, the identification of infrastructure system dependencies is limited by data availability and methodological constraints, resulting in a narrow range of identifiable categories. Second, the refined identification of critical facilities overlooks social systems and residents' behavior, leading to an incomplete simulation framework. Third, strategies for resilience improvement focus on single-system responses and emergency countermeasures, with collaborative multi-system planning remaining underdeveloped. Against the backdrop of advancing Artificial Intelligence technologies, this study proposes transformative research directions and technical pathways to address these gaps: leveraging multi-source heterogeneous data and Large Language Models to enhance the granularity and precision of interdependency identification; developing "facility—society—population" coupled cyber-physical simulation models to refine the characterization of urban spatial vulnerability; and formulating intelligent, multi-system collaborative recovery strategies to facilitate the rapid restoration of urban service capacities. This study aims to offer both theoretical guidance and feasible technical approaches for advancing research on key issues in disaster-resilient planning.

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202601014
文章编号 1000-3363(2026)01-0102-08

作者简介

张长椿，同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生，zhangcc319@qq.com

赫磊，同济大学建筑与城市规划学院科管部主任、长聘副教授，上海同济城市规划设计研究院城市评估与开发研究中心主任、特聘研究员，通信作者，leih@tongji.edu.cn

范亭君，同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生

* 教育部基础学科和交叉学科突破计划（项目编号：JYB2025XDXM116）；上海市优秀技术带头人项目“城市空间的复合健康干预机理与规划调控技术”（项目编号：23XD1433900）

全球气候变化加剧了极端气象灾害的频率与强度，使我国高密度建设的大城市频遭严重内涝侵袭。近年来，郑州、北京、深圳等特大暴雨事件均造成巨大损失与社会影响，突显城市系统的脆弱性。以郑州“7·20”特大暴雨灾害为例，因单个基础设施失效引发的级联失效，城市陷入大面积功能瘫痪，公共服务恢复显著滞后^[1]。

为应对此挑战，我国政府高度重视防灾韧性提升与基础设施更新，近五年国家陆续出台了数十项政策文件，包括《中共中央办公厅 国务院办公厅关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见》（2024年12月）等，明确要求各地政府加强应对极端灾害的韧性能力建设，全面提升城市综合防灾水平。实践层面，《北京市韧性城市空间专项规划（2022—2035年）》《上海市综合防灾减灾规划（2022—2035年）》《国土空间综合防灾规划编制规程》（TD/T 1086—2023）等均明确了防灾韧性城市建设的框架、程序与核心内容。虽然这些文件、规划及规程认识到了城市多系统相互作用的重要性，但是对于多系统作用规律的科学认知及精准调控技术仍存在显著不足。

究其根源，城市建成环境中各要素之间存在复杂的相互耦合关系，形成了

失效传播的条件与路径，导致灾害引发的次生灾害在建成环境中持续传播与扩散^[2-3]。城乡规划作为统筹建成环境多系统空间布局与建设时序的核心手段，由于多灾种、多系统交互的系统性研究和精准调控手段缺乏，防灾规划效果有限^[4-8]。因此，针对城市防灾减灾的实际需求与当前实践水平，迫切需要开展建成环境多系统级联失效机理的基础理论研究，并探索规划调控技术的应用方法，以提升防灾韧性城市规划编制的科学性和可操作性。本文首先分析当前防灾规划体系在应对复杂系统风险时的局限性；其次，从依赖性识别、失效模型仿真及韧性恢复策略三个维度，对城市关联基础设施级联失效研究展开跨学科的系统梳理，并深入剖析现有级联失效研究在提升城市韧性过程中面临的难点与问题；最后，结合新技术方法，为当前防灾韧性规划构建发展愿景和创新路径。

1 城市基础设施系统的耦合风险

城市是一个动态系统，在运转过程中高度依赖各类基础设施系统的功能支撑。这些系统看似独立，实则通过复杂的联系构成一个相互依赖的功能传导网络，共同支撑居民的日常生活与城市功能^[9]。如图1所示，电力、通信、交通、

供水等生命线系统内部具有紧密的供应支撑关系，同时也作为基础功能为医疗、物资储备等公共服务设施提供必要保障。各类型服务设施的功能又通过基础设施网络和道路交通系统的连接，用以满足居民日常生活需求。这种高效的功能依赖关系，实现了城市的稳定运行。

然而，这种关联并非自然形成，而是人为规划与设计的结果。建成环境的形态及其组织方式，本质上是通过一系列规划决策塑造的。基础设施间的耦合关系、空间布局结构，以及功能之间的联结方式，也同样是在城市规划、工程设计与系统整合过程中为提升整体运行效率而采取的有意识的设计手段。随着技术发展，基础设施间的连接类型与联结密度不断增加，在提升整体服务效率的同时，也显著增加了系统的脆弱性^[10-11]。如图2所示，一旦某个关键节点或子系统受到干扰，其影响会通过依赖链迅速扩散，导致多系统连锁瘫痪。例如：2003年美加大停电，电力系统故障引发供水、交通、通信等一系列系统失效；2021年郑州“7·20”特大暴雨灾害中，电力设施受损进而导致供水、通信等生命线系统陷入困境^[1]。

由此可见，城市基础设施系统间相互关联导致某单一设施因灾害受损触发级联失效，引发城市服务能力骤减，使

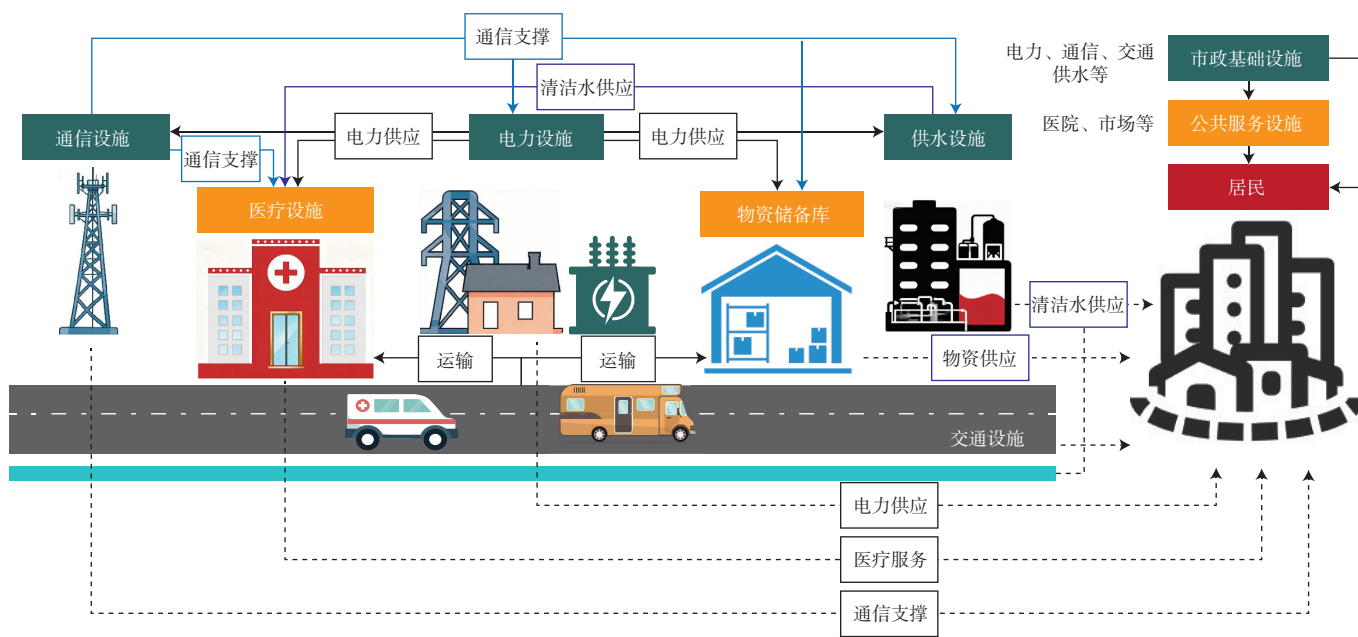


图1 城市基础设施系统间的依赖关系
Fig.1 Interdependencies among urban infrastructure sub-systems

地区居民日常生活和城市经济遭遇连锁型破坏。因而，面对当前我国如火如荼开展的防灾韧性城市规划，如何降低关联基础设施系统级联失效所带来的连锁影响，高效和精准地干预有限设施、地块和系统，提升城市系统的整体服务能力是韧性城市建设的关键。

2 城市基础设施防灾规划研究进展

围绕城市基础设施的防灾问题，传统的防灾规划主要开展了以下两方面的研究：①单系统设施优化。此类研究多聚焦于单一基础设施的优化设计，如城市道路^[12]、雨水调蓄池^[13]、绿色基础设施^[14]以及排涝泵站^[15]等。相关优化策略多基于物理模型模拟，以灾害后果最小化为目标，提出兼顾成本与效益的设施优化方案。然而，此类研究存在明显局限性：一方面，优化策略局限于单个设施，未充分考虑多系统设施之间的级联互馈关系；另一方面，忽视了非工程设施在灾害风险防控中的作用。②系统性保护与规划。从系统视角提出基础设施韧性提升的综合措施，措施包含空间、工程以及管理等维度^[16-17]，但多聚焦设施直接受损情况，对关联机制引发的间接失效研究不足，规划对策精准度有限^[18]。

近年来，随着对城市韧性问题的关注，学者们逐渐认识到，基础设施间的关联性是决定城市脆弱性与灾后恢复速

度的核心因素，单一系统的防灾规划难以应对极端灾害的连锁破坏效应^[19]。据此，学者们从关联机制出发，提出更具针对性的规划指引。颜文涛等^[6]强调需结合人群分布优化各级设施的选址与规模，降低灾后级联失效风险。陈智乾^[20]提出需根据设施在防灾体系中的功能定位调整布局结构，强化市政基础设施防灾能力评价与应急保障能力。韩煜等^[21]提出将风险暴露、脆弱性评估与危害性分析纳入防灾规划评估体系，为防灾目标制定提供科学依据。

由此可见，韧性导向的城市防灾规划，必须统筹兼顾“单系统鲁棒性”与“多系统级联失效防控”双重需求。这要求规划决策者突破传统单一系统优化的思维定式，转向跨系统协同与整体韧性构建，将“级联防控”提升为规划编制的核心内容。但现有规划指引多基于经验总结与历史案例归纳，缺乏对级联失效机理及其放大效应的深入解析，也欠缺策略可行性与有效性的系统验证，导致实践操作性不强。因此，深化基础设施级联失效机制研究，识别城市复杂网络中的关键脆弱环节，已成为韧性防灾规划编制的迫切需求。

3 城市关联基础设施级联失效关键技术研究进展

城市关联基础设施各子系统通过物质、能量与信息交互形成有机整体，极

端扰动下的局部失效易通过依赖链条扩散引发级联失效，对城市运转和居民安全构成严重威胁。因此，如何识别其失效机制与空间效应对提升城市韧性至关重要。

解析基础设施级联失效问题，应遵循“机制解析—风险推演—主动干预”的系统化研究逻辑。即：首先揭示失效传播的内在依赖关系与关键路径，进而量化模拟动态过程并评估综合风险，最终形成面向韧性提升的解决对策。基于此框架，本文围绕依赖性识别、模型仿真、恢复策略等三个核心环节展开综述，系统梳理相关研究的现状、成果与挑战，为其融入防灾韧性城市规划提供参考，具体流程如图3所示。

3.1 关联基础设施之间的依赖关系识别

Rinalidi等^[9]最早系统阐述了基础设施间的相互依赖关系，归纳了电力、供水、通信、能源与交通等基础设施之间的依赖类型，包括物理依赖、网络依赖、地理依赖和逻辑依赖等四类。此后，学者们从不同视角拓展了依赖关系的分类，陆续补充了政策性依赖、社会性依赖^[22]、经济性依赖以及市场性依赖^[23]等内容。然而，早期研究多依赖专家经验判断依赖类型，且研究对象多集中于电力、供水等少数部门，缺乏实际数据的实证支持。

为此，后续研究转向基于数据的依赖关系识别。目前依赖性识别方法主要

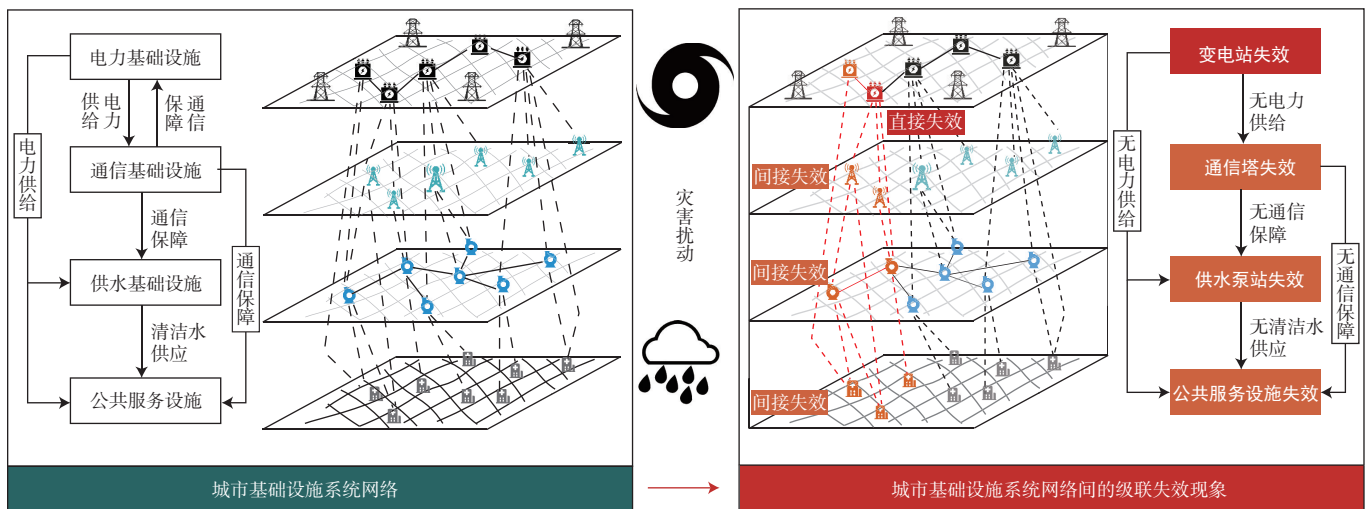


图2 城市基础设施级联失效现象
Fig.2 Cascading failures of urban infrastructure systems

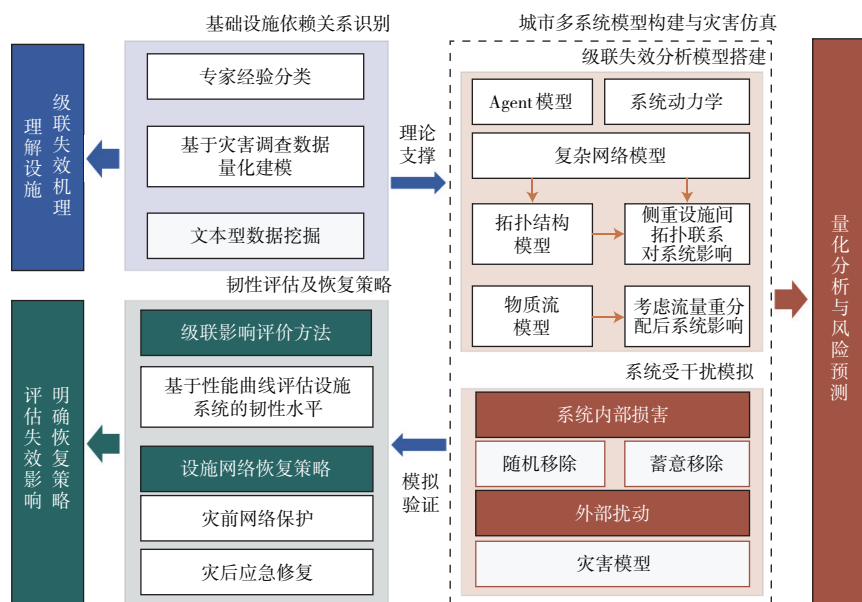


图3 城市基础设施级联失效关键技术研究概况

Fig.3 Literature review on key technologies for mitigating cascading failures in urban infrastructure

有以下两类。

(1) 基于灾害调查数据的数学建模

不同于依赖类型的识别，研究人员利用灾害调查数据对基础设施间的依赖程度进行量化分析。如：Mendonça 等^[24]基于皮尔逊相关系数分析，发现 50% 的关键基础设施系统之间存在显著相关性；Monsalve 等^[25]通过拟合灾后基础设施恢复速率，识别依赖关系及其强度；Zorn 等^[26]则借助恢复曲线数据计算相关性，进而判定依赖的方向与强度。然而，此类方法高度依赖精细化的灾后数据，由于灾害调查数据的可获得性，实际应用存在较大局限。

(2) 基于历史事故报告的数据挖掘

相互依赖事件记录主要来自报纸、媒体报道、网络新闻、官方事后评估以及基础设施管理部门。早期研究人员^[27-28]主要从媒体报道以及官方评估报告中直接提取基础设施相互依赖事件信息。近年来，随着大数据技术发展，学者们^[29-30]开始通过领域语料库构建、多模式关系框架等方法从更加多样的文本中精细化识别依赖关系。

尽管如此，现有数据驱动的研究仍处于初步探索阶段，多数研究仅采用单一模态文本数据挖掘，缺乏多源数据交叉验证，识别的依赖类型也以物理连接为主，对地理邻近、管理决策等复杂依

赖机制的探索不足，未来需进一步拓展识别方法与内容，推动形成系统化、规范化的研究范式。

3.2 关联基础设施级联失效模拟仿真

关联基础设施间存在复杂的地理依赖和功能依赖关系，其连锁失效难以通过传统经验直观预测，因而进行关联基础设施级联失效的仿真模拟尤为重要。现有研究主要从基础设施网络的建模以及故障扰动下的动态推演两方面展开。

3.2.1 关联基础设施网络的建模方法

基于研究视角与数据可获得性差异，现有主流建模方法分为三类：①基于 Agent 的建模方法。为分析系统间的相互影响，研究^[31-32]将基础设施组件视为具有自主决策能力的智能体，通过局部交互刻画系统间依赖关系，评估单一设施失效对整体网络的连锁影响。②系统动力学方法。研究^[33-34]聚焦扰动下网络的动态演化过程，分析政策、技术等宏观因素对基础设施系统的长期影响。③基于网络的分析方法。研究将设施组件抽象为节点，物理连接与依赖关系抽象为边，通过图结构刻画系统拓扑与服务流动模式。该方法可进一步分为拓扑结构模型与物质流模型：前者聚焦网络结构特征，通过失效传递分析系统鲁棒性与脆弱性^[35-36]；后者在拓扑基础上纳入服

务流传递特性，模拟节点失效后的流量重分配过程，故障还原度更高但建模复杂度也相应提升^[37-38]。基于网络的建模方法可兼顾节点异质性、网络拓扑等复杂特征，因而被广泛应用于电力—供水、电力—通信等关联基础设施系统研究^[39-43]中。

然而，基于网络的精细化建模高度依赖设施空间位置、服务能力、灾害响应等敏感数据，获取难度较大^[44]，建模常需依赖假设补足，而过多假设会影响结果可信度与决策有效性。因此，如何在数据稀缺场景下保障模型精度是当前建模的核心挑战。

3.2.2 仿真模型中的故障扰动形式

基础设施网络在运行过程中常面临各类扰动事件的冲击，导致其服务功能中断。这些扰动既源于系统内部风险，如设备老化、随机故障等，又包括外部灾害事件，例如自然灾害、事故灾难与恶意攻击。为深入理解不同扰动在系统间的传播机制，学者们开发了不同网络攻击方式进行模拟。

针对系统内部扰动，研究^[45-47]多采用随机移除或蓄意攻击的节点移除策略，模拟扰动下的级联故障行为。针对外部灾害扰动，考虑到灾害具备明显的时空异质性与地理关联特征，研究^[48-50]通常结合灾害机理模型与基础设施易损性曲线，模拟灾害作用下的组件失效过程。

然而，现有灾害扰动模型对灾害时空动态特征的刻画精度不足，且缺乏对多灾害耦合或连续扰动情境下系统响应的有效模拟，仍有待进一步研究。

3.3 级联失效影响下基础设施韧性对策

在关联基础设施失效作用机制研究基础上，为有效保障极端天气下关联基础设施系统的稳定性，学者们围绕韧性评估以及恢复策略展开研究。韧性评估目前主要采用基于性能曲线的量化方法^[51]。该方法通过比较级联失效前后系统性能随时间的变化情况来表征系统韧性，其基本形式可表述为：

$$R = \frac{\int_0^T P_A(t) dt}{\int_0^T P_B(t) dt}$$

其中， R 为韧性指标， $P_A(t)$ 表示级联失效后系统性能， $P_B(t)$ 表示级联失效前系统性能。系统性能通常从网络连通

性以及功能损失度两个维度进行衡量。网络连通性主要衡量扰动前后网络结构的变化,一般由平均连通度、最大连通子图、最短平均距离等指标反映。功能损失度则通过失效后服务维持能力进行刻画。恢复策略相关研究重点关注灾前基础设施网络的保护和灾后基础设施的恢复两大环节。灾前设施网络保护,重点在于识别关键组件与网络的最佳运行方式,并通过优化资源配置和保护措施,降低灾害事件对基础设施网络的影响程度或脆弱性,从而提升其抗灾能力。现有研究多基于鲁棒优化、随机规划、多目标博弈等模型,构建网络最优保护策略集,实现网络结构与保护措施协同优化^[52-54]。

灾后应急恢复,研究重点在于解决修复资源有限性和修复行为逻辑约束下的优化问题,尤其是修复任务的选择与排序。现有研究^[55-56]围绕修复优先级、任务调度、资源优化配置等核心问题,构建了多类决策优化模型,证实基于级联失效规律制定的恢复策略,可显著降低网络失效后的整体风险。

3.4 研究进展评述

尽管国内外关于城市基础设施级联失效机理与仿真研究已取得一定成果,但在应对极端灾害情景与复杂城市系统耦合方面仍存在诸多不足与挑战。

3.4.1 研究对象层面:缺乏多系统综合视角

现有研究多聚焦单一或少数基础设施系统内部的级联失效现象,尚未形成从城市整体视角出发、整合多类型基础设施及其对居民服务能力影响的研究框

架。研究内容仍以交通、排水等市政设施为主,对社会性基础设施(如医院、物资储备库、应急服务设施等)的功能连锁失效关注不足,而这些设施的失效往往对居民日常生活与灾后恢复产生更为直接和深远的影响。

3.4.2 机理挖掘层面:识别精度有待提升

现有关于失效机理的研究多以定性推断或结构化数据分析为主,数据驱动的依赖性识别与传播规律挖掘仍显薄弱。多数研究仅依赖单一模态文本进行信息提取,缺乏多源数据的交叉验证与综合分析,对关联基础设施的复杂依赖机制刻画不足。

3.4.3 模型仿真层面:缺乏物理机理刻画与社会影响推演能力

现有仿真模型对设施物理失效过程的刻画多基于假设和经验,还原度不足;同时,研究普遍聚焦于设施层面的受灾分析,缺乏对居民服务获取能力与社会运行影响的综合研判。城市韧性的核心目标是保障灾害情景下居民基本服务的连续性,因此亟须在模型中引入居民可达性与服务供给维度,实现从“系统功能韧性”向“社会功能韧性”的转变。

3.4.4 策略层面:调控手段局限于工程维度

当前恢复策略多集中于工程修复和防护加固,缺乏从规划、空间与治理层面统筹的系统性恢复框架。工程措施虽能缓解局部设施失效,但难以应对多系统间的级联失效影响。未来应构建融合空间布局优化、设施冗余配置与治理协同机制的综合防灾调控体系,实现多系统协同恢复与居民服务能力的快速重建。

4 新技术下基础设施级联失效研究展望

围绕上文提出的当前研究中存在的基础设施系统依赖识别类型单一、关键设施精细化模拟体系不全、韧性提升策略多系统协同规划缺乏等三个方面的问题,在人工智能新技术广泛应用的背景下,我们对未来研究提出如下三个方面的展望。

4.1 利用大语言模型提升基础设施依赖关系识别精度

目前,基础设施间的相互依存性分析多聚焦物理连接层面,对通信设施间的虚拟依赖、社会基础设施的地理邻近依赖等复杂机制缺乏深入探索。以内涝灾害为例,可构建基于内涝灾情多模态数据链的分析框架,借助多模态大数据识别潜在的、难以直观捕捉的设施间依赖关系,具体流程如图4所示。首先,构建融合多源数据的集成数据库,涵盖历史灾情报告、新闻报道、专家知识、遥感影像与传感器监测信息。其中,文本类数据可提取基础设施在正常运行状态下难以察觉的依赖关系,并评估系统失效对居民生活的实际影响程度。传感器数据可用于捕捉交通出行、设施运行状态与土地利用等动态信息,从而实现灾前至灾后设施运行状态的精细识别。遥感影像用于解析基础设施的空间分布特征与实体连接关系。

在此基础上,利用大语言模型对多源数据进行清洗、融合与知识抽取,构建基础设施依赖效应知识图谱,实现依赖关系的结构化存储与可视化呈现。通

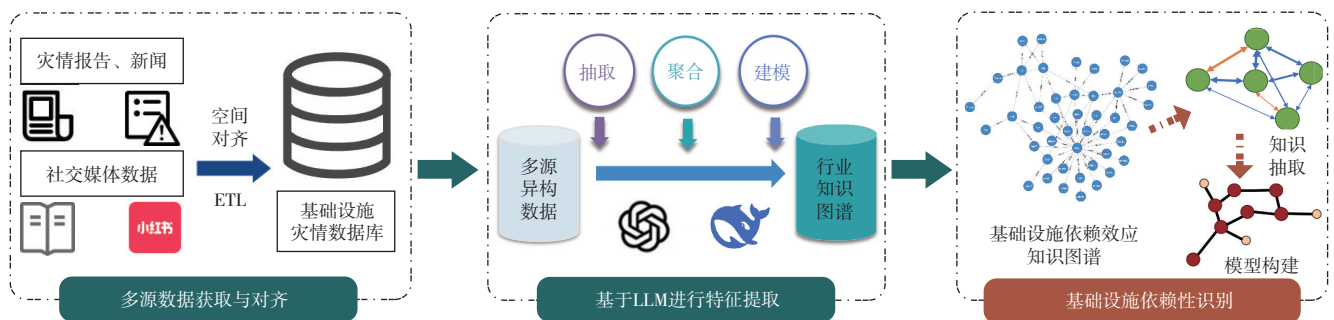


图4 利用多源数据与大语言模型提升基础设施依赖关系识别
Fig.4 Enhancement of infrastructure interdependency identification through multi-source data and Large Language Models

过该框架，能够系统识别市政、交通与社会三类基础设施系统之间的依赖效应与失效阈值，进而揭示从设施受损到居民服务中断的全链条灾害影响机理。

4.2 构建数物融合的城市多系统依赖模型进行情景模拟与风险评估

对于防灾韧性城市规划编制而言，构建可精准模拟多系统级联失效过程的模型是核心挑战。数字模型虽能高效推演系统宏观响应，却难以复现极端灾害下设施失效的微观机理与复杂物理过程，易因简化假设而造成失效阈值与传递路径的判断偏差；而物理模型虽能还原真实细节，却难以覆盖大范围复杂场景。因此，构建“数物融合”的城市多系统依赖模型是突破现有技术局限的核心路径。

数物融合模型由多系统依赖仿真模型与物理实验模型两大核心模块构成。多系统依赖模型以单层基础设施网络为基础，依托依赖规则集完成耦合构建：首先基于领域专业知识，完成电力、供水、交通等核心单层网络的拓扑简化与建模；其次依托知识图谱挖掘的依赖关系，结合模糊理论构建失效函数，定义涵盖连接方式、依赖类型、关键阈值等核心参数的规则集；最后通过依赖规则实现多系统网络动态集成，形成完整的

城市基础设施耦合系统模型。以洪涝灾害为例，该模型可耦合水动力模拟识别内涝水文特征，通过灾害情景叠加与级联失效计算，量化设施失效的社会冲击，精准定位系统脆弱环节。物理实验模型通过可控环境下的失效场景复现，为数字模型提供参数校准与结果验证。通过缩尺模型模拟特定水压与土壤条件下的供水管网爆管过程，获取管道材料在极端荷载下的力学参数；通过风洞、水槽等物理实验，获取供通信基站抗风荷载系数以及城市积水演进水文特征等核心数据，校准数字模型关键参数。物理实验的实测数据可反哺数字模型，提升微观失效机理刻画精度；数字模型的宏观模拟结果可指导物理实验参数设计，二者形成双向互补的验证体系，为复杂系统行为研判提供坚实可迭代的数据支撑。

未来，数物融合模型可进一步发展为城市复杂系统推演基座，为防灾专业大模型提供高质量训练语料与逻辑约束，解决通用大模型专业场景的“物理幻觉”与“泛化脆弱”问题，为城市防灾智能决策体系构建奠定关键基础。

4.3 实现多目标下的智能防灾韧性规划

当前，智能技术正推动规划编制从经验驱动向数据与模型驱动转型。应对极端灾害下城市多系统级联失效的复杂

挑战，亟须建立融合智能算法与多目标决策的规划调控框架，实现从被动响应到主动防控的转变。如图5所示，该框架的核心在于构建“机理挖掘—仿真模拟—决策优化”的闭环调控机制。首先，在机理挖掘阶段，重点开展基础设施依赖关系识别，梳理核心系统的功能关联与耦合路径，明确关键节点与传导链路，为建模与仿真提供理论与数据支撑。其次，在仿真模拟阶段，基于已构建的城市多系统依赖模型，完成理论建模、实证验证、情景模拟与风险评估全流程分析，通过多梯度极端灾害情景设定，量化模拟系统性能衰减、服务中断与连锁影响效应，为决策优化提供精准量化依据。最后，在决策优化阶段，以仿真模型为支撑，通过多目标智能优化技术生成最优干预策略，核心包含四大环节：①构建涵盖工程、空间、管理多维度的防灾策略库；②设定“防灾效能最大化、经济成本最小化、社会影响最低化”的多目标优化函数；③基于耦合级联失效多层复合网络模型，完成多策略的仿真验证与效果评估；④通过迭代优化生成稳定高效的最优干预动作序列。通过上述调控技术，可有效解决当前防灾规划多系统协同不足、干预措施针对性弱的核心问题，为城市灾害防控提供系统精准的决策支撑，推动防灾韧性规划向智

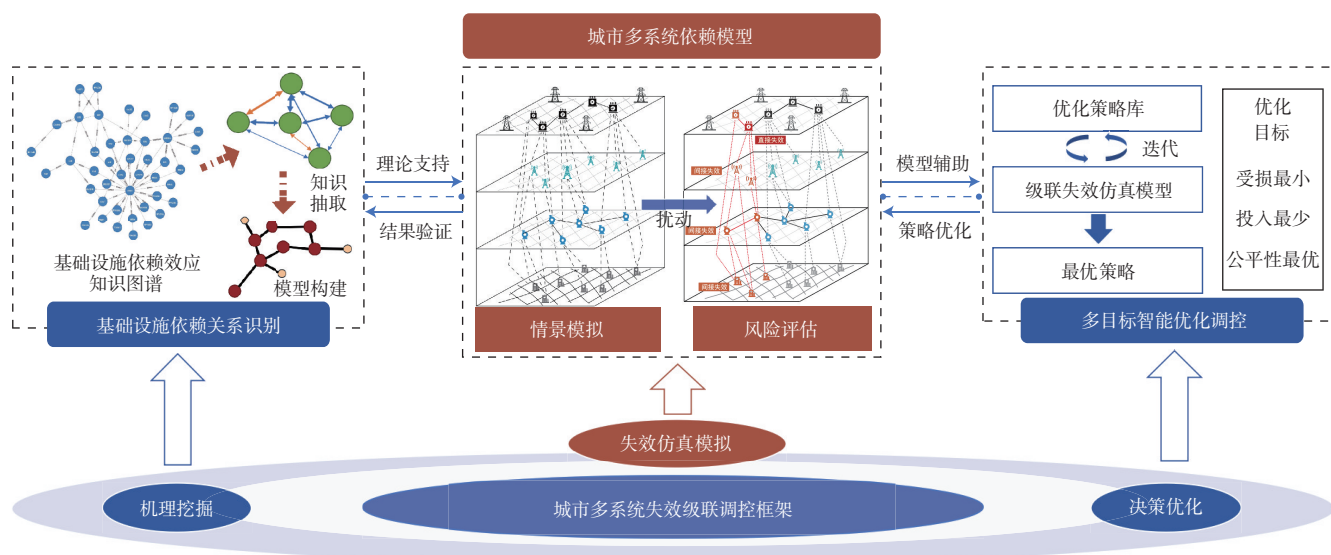


图5 城市多系统级联失效规划调控方式

Fig.5 Planning and regulatory approaches for urban multi-system cascading failures

能化、精细化升级。

5 结语

本文系统梳理了面向防灾韧性城市规划的基础设施系统级联失效研究进展,围绕依赖关系识别、失效模型仿真与恢复策略制定等三个核心环节,深入解析了基础设施系统在极端灾害下的级联失效机理与防控路径。研究发现,准确识别基础设施间的多维依赖关系是理解级联传播逻辑的基础,通过建模仿真可量化评估系统在扰动下的动态响应行为,为制定针对性恢复策略、提升系统整体韧性提供科学依据。

然而,既有研究在应对高复杂度城市系统时仍存在明显局限,包括对多系统协同失效机制认知不足、对社会功能影响考量欠缺,以及调控手段偏重工程维度而忽视空间协同作用等问题。为突破上述瓶颈,本文结合人工智能新技术提出未来研究方向:一方面,应依托多源数据融合与大语言模型技术,构建基础设施依赖知识图谱,深化对隐性、动态依赖关系的识别能力;另一方面,需构建“基础设施—社会系统—人口”联动的数物融合仿真平台,通过数字模拟与物理实验的互补验证,提升对级联传播路径的预测精度。在此基础上,进一步建立融合空间布局优化与工程防护措施的多目标决策模型,借助智能算法生成系统最优干预序列,从而形成从风险识别到策略实施的完整技术闭环。

未来随着数据环境的不断完善与智能方法的持续融入,基础设施韧性研究将在城市安全治理与可持续发展中发挥愈加核心的引领作用。

参考文献

[1] 国务院灾害调查组.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R].北京:中华人民共和国应急管理部,2022.

[2] 赫磊,解子昂,李捷.防灾韧性城市:本质内涵、分形结构与特征向量[J].城市规划,2024,48(7):28-35.

[3] 彭翀,左沛文,李月雯,等.城市空间多风险耦合及规划的韧性应对[J].城市规划学刊,2024(5):88-97.

[4] 翟国方.气候变化背景下规划视角的城市

雨洪灾害韧性应对:关键概念、基本思路和通用框架[J].城市规划学刊,2024(1):29-37.

[5] 戴慎志,刘婷婷,高晓昱,等.国土空间防灾减灾规划编制体系与实施机制[J].城市规划学刊,2023(1):48-53.

[6] 颜文涛,任婕,张尚武,等.上海韧性城市规划:关键议题、总体框架和规划策略[J].城市规划学刊,2022(3):19-28.

[7] 颜文涛,李子豪.风险扰动视角下城市空间结构的韧性机理研究:理论框架与实证方法[J].国际城市规划,2023,38(4):1-10.

[8] 赫磊,解子昂.走向韧性:城市综合防灾规划研究综述与展望[J].城乡规划,2021(3):43-54.

[9] RINALIDI S M, PEERENBOOM J P, KELLY T. Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(6): 11-25.

[10] 谢磊,周鹏飞,杨鸿艺,等.气候变化冲击下沿海地区生命线工程韧性范式探索以宁波市为例[J].城市规划学刊,2022(8):81-88.

[11] SUN H J, ZHAO H, WU J J. A robust matching model of capacity to defense cascading failure on complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(25): 6431-6435.

[12] 杨泉.基于减少内涝的城市道路设计优化方案[J].科学技术创新,2025(5):150-153.

[13] 李文钰,侯精明,李轩,等.基于雨洪数值模型的城市雨水调蓄池优化运行方案研究[J].水资源与水工程学报,2024,35(5):82-89.

[14] 郭彪,虎嘉宁,顾清华,等.绿色基础设施应对城市内涝的优化布设研究[J].城市与减灾,2024(6):27-32.

[15] 李恺琳.旧城区排涝泵站设计要点及整流措施优化[J].福建建设科技,2024(6):140-142,154.

[16] 孔赞,崔丽敏,李伟,等.公共安全视角下市政基础设施规划的要点研究[C]//中国城市规划学会.人民城市,规划赋能:2023中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划).2023:18.

[17] 龚奇龙,王小斌,尹毫企,等.国土空间规划视角下的韧性市政基础设施研究[C]//中国城市规划学会.人民城市,规划赋能:2022中国城市规划年会论文集(03城市工程规划).2023:10.

[18] 郭东军,吴艳华,赵洪旭,等.关键基础设施防护规划的国际经验与启示[J].城市规

划学刊,2025(1):111-119.

[19] 戴慎志,冯浩,赫磊,等.我国大城市总体规划修编中防灾规划编制模式探讨:以武汉市为例[J].城市规划学刊,2019(1):91-98.

[20] 陈智乾.韧性城市理念下的市政基础设施规划策略初探[J].城市与减灾,2021(6):36-42.

[21] 韩煜,黄啸,叶信岳,等.通过关联基础设施系统的适应性防灾减灾规划提升气候变化背景下的城市韧性[J].景观设计学(中英文),2021,9(6):78-87.

[22] DUDENHOEFFER D D, PERMANN M R, MANIC M. CIMS: a framework for infrastructure interdependency modeling and analysis[C]// Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey: IEEE, 2006: 478-485.

[23] FRIESZ T L, MOOKHERJEE R, PEE-TA S. Modeling large scale and complex infrastructure systems as computable games [M]// FRIESZ T L. Network science, nonlinear science and infrastructure systems. New York: Springer, 2007: 53-75.

[24] MENDONÇA D, WALLACE W A. Impacts of the 2001 World Trade Center attack on New York city critical infrastructures[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2006, 12(4): 260-270.

[25] MONSALVE M, de la LLERA J C. Data-driven estimation of interdependencies and restoration of infrastructure systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 181: 167-180.

[26] ZORN C R, SHAMSELDIN A Y. Quantifying directional dependencies from infrastructure restoration data[J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(3): 1363-1381.

[27] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 174-180.

[28] MCDANIELS T, CHANG S, PETERSON K, et al. Empirical framework for characterizing infrastructure failure interdependencies[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2007, 13(3): 175-184.

[29] ZHOU S, NG S T, YANG Y, et al. Delimiting infrastructure failure interdependencies and associated stakeholders through news mining: the case of Hong Kong's water pipe bursts[J]. Journal of Management in Engineering, 2020, 36(5): 04020060.

- [30] GÜRSAN C, DE GOOYERT V, DE BRUIJNE M, et al. Socio-technical infrastructure interdependencies and their implications for urban sustainability: recent insights from the Netherlands[J]. *Cities*, 2023, 140: 104397.
- [31] BASU N, PRYOR R, QUINT T. ASPEN: a micro-simulation model of the economy[J]. *Computational Economics*, 1998, 12: 223-241.
- [32] DUDENHOEFFER D D, PERMANN M R, MANIC M. Interdependency modeling and emergency response[C]// *Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference*. San Diego: Society for Modeling and Simulation International, 2007: 1230-1237.
- [33] BUSH B B, DAUELSBERG L R, LECLAIRE R J, et al. Critical infrastructure protection decision support system (CIP/DSS) project overview[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2005.
- [34] CONRAD S H, LECLAIRE R J, O'REILLY G P, et al. Critical national infrastructure reliability modeling and analysis [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2006, 11 (3): 57-71.
- [35] POLJANŠEK K, BONO F, GUTTIÉRREZ E. Seismic risk assessment of interdependent critical infrastructure systems: the case of European gas and electricity networks[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(1): 61-79.
- [36] DUEÑAS-OSORIO L, CRAIG J I, GOODNO B J, et al. Interdependent response of networked systems[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2007, 13(3): 185-194.
- [37] OUYANG M. Critical location identification and vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under spatially localized attacks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 154: 106-116.
- [38] MÜHLHOFER E, KOKS E E, KROPF C M, et al. A generalized natural hazard risk modelling framework for infrastructure failure cascades[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 234: 109194.
- [39] ATAT R, ISMAIL M, SERPEDIN E. Joint cascade vulnerability assessment of interdependent power-water infrastructures [J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(4): 5156-5167.
- [40] RUEDA D F, OLIVARES D E, OLIVEIRA L F M. Using interdependency matrices to mitigate targeted attacks on interdependent networks: a case study involving a power grid and backbone telecommunications networks[J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, 16: 3-12.
- [41] OUYANG M, WANG Z. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: with a focus on joint restoration modeling and analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 141: 74-82.
- [42] WANG S, HONG L, OUYANG M, et al. Vulnerability analysis of interdependent spatially embedded infrastructure networks under localized attack[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2017, 28(8): 1750089.
- [43] WANG N, WU M, YUEN K F. A novel method to assess urban multimodal transportation system resilience considering passenger demand and infrastructure supply [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 239: 109478.
- [44] UNDRR. Addressing the infrastructure failure data gap: a governance challenge [R]. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021.
- [45] OUYANG M, HONG L, MAO Z J, et al. A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 17(5): 817-828.
- [46] BEYZA J, RUIZ-PAREDES H F, GARCIA-PARICIO E, et al. Assessing the criticality of interdependent power and gas systems using complex networks and load flow techniques[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 540: 123169.
- [47] WANG N, WU M, YUEN K F. A novel method to assess urban multimodal transportation system resilience considering passenger demand and infrastructure supply [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 238: 109478.
- [48] LOGGINS R A, WALLACE W A. Rapid assessment of hurricane damage and disruption to interdependent civil infrastructure systems[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2015, 21(4): 04015005.
- [49] LEE S, CHOI M, LEE H S, et al. Bayesian network-based seismic damage estimation for power and potable water supply systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 197: 106796.
- [50] KAYS H M I, SADRI A M, MURALEETHARAN K K M, et al. Modeling flood propagation and cascading failures in interdependent transportation and storm-water networks[J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2025, 48: 100741.
- [51] ZHANG W, HAN Q, SHANG W L, et al. Seismic resilience assessment of interdependent urban transportation-electric power system under uncertainty[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 183: 104078.
- [52] FANG Y P, ZIO E. An adaptive robust framework for the optimization of the resilience of interdependent infrastructures under natural hazards[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(3): 1119-1136.
- [53] WANG K, XU Z, LIU Y, et al. Resilience enhancement for multistate interdependent infrastructure networks: from a preparedness perspective[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2023, 72(1): 190-203.
- [54] LI Y, LIN J, ZHANG C, et al. Joint optimization of structure and protection of interdependent infrastructure networks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 218: 108163.
- [55] ZHANG C, LIU X, JIANG Y P, et al. A two-stage resource allocation model for lifeline systems quick response with vulnerability analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(3): 855-864.
- [56] ZHANG C, KONG J, SIMONOVIC S P. Restoration resource allocation model for enhancing resilience of interdependent infrastructure systems[J]. *Safety Science*, 2018, 102: 169-177.