

Fallos en cascada en sistemas de infraestructura urbana hacia la resiliencia: una revisión y perspectivas

ZHANG Changchun, HE Lei, FAN Tingjun

Resumen: La frecuencia cada vez mayor de los desastres extremos provocados por el cambio climático mundial ha puesto de relieve los riesgos de caducidad causados por las complejas interdependencias entre los sistemas de infraestructura urbana, lo que los convierte en un reto fundamental para la planificación urbana resistente a los desastres. Los estudios existentes siguen estando limitados por tres limitaciones. La identificación de las interdependencias de infraestructura está limitada por la disponibilidad de datos y los instrumentos metodológicos, lo que produce un conjunto estrecho de categorías reconocidas. La identificación refinada de las instalaciones críticas suele pasar por alto los sistemas sociales y el comportamiento de los residentes, dando lugar a marcos de simulación incompletos. Las estrategias de mejora de la resiliencia siguen centrándose principalmente en las respuestas de un sistema único y las contramedidas de emergencia, mientras que la planificación de múltiples sistemas de colaboración sigue subdesarrollada. Ante el rápido progreso de la inteligencia artificial, este artículo propone direcciones de investigación y vías técnicas: utilizando datos heterogéneos de múltiples fuentes y modelos de lenguaje grandes para mejorar la granularidad y precisión de la identificación de la interdependencia; desarrollando modelos de simulación ciberfísica acoplados de la sociedad-población para caracterizar la vulnerabilidad espacial urbana; y formulando estrategias inteligentes de recuperación de múltiples sistemas para acelerar la restauración de la capacidad de servicio urbano. El estudio proporciona orientación teórica y enfoques técnicos viables para cuestiones clave en la planificación resistente a los desastres.

Palabras clave: infraestructura urbana; fallas en cascada; planificación resistente a los desastres; inteligencia artificial; revisión de la literatura

El cambio climático mundial ha incrementado la frecuencia y la intensidad de los desastres meteorológicos extremos, exponiendo megaciudades chinas altamente edificadas a graves riegos e inundaciones. Las recientes tormentas de lluvia pesada en Zhengzhou, Beijing y Shenzhen causaron grandes pérdidas y impactos sociales y revelaron la vulnerabilidad de los sistemas urbanos. La tormenta de lluvia extraordinaria Zhengzhou 20 de julio es un caso típico: fallas en cascada provocadas por el fracaso de una sola instalación de infraestructura provocaron una parálisis funcional a gran escala, y la recuperación de los servicios públicos se redujo notablemente [1].

En respuesta, China ha asignado cada vez más importancia a la resiliencia ante los desastres y a la renovación de la infraestructura. En los últimos cinco años se han publicado una serie de documentos normativos nacionales, entre ellos las opiniones sobre la promoción de nuevas infraestructuras urbanas de construcción y construcción de ciudades resilientes emitidas en diciembre de 2024. Estos documentos requieren que los gobiernos locales aumenten la resiliencia ante desastres extremos y mejoren la capacidad integral de prevención de desastres urbanos. En la práctica, la planificación espacial resiliente de Beijing, la planificación integral de la prevención y reducción de desastres y los procedimientos técnicos nacionales para la planificación territorial amplia de la prevención de desastres espaciales tienen todos los marcos, procesos y contenidos básicos definidos. Sin embargo, la comprensión científica de las interacciones multisistema y las técnicas reglamentarias precisas sigue siendo insuficiente.

En su raíz, el entorno construido contiene complejas relaciones de acoplamiento entre múltiples elementos. Estas relaciones crean las condiciones y las vías para la propagación del fracaso, permitiendo que los desastres secundarios provocados por los peligros primarios se difundan y se expandan dentro del entorno construido [2-

3]. La planificación urbana y rural es un medio básico de coordinar las distribuciones espaciales multisistemas y las secuencias de construcción en el entorno construido, pero la falta de investigación sistemática y regulación precisa para las interacciones multihazard y multisistema limita el efecto de la planificación de la prevención de desastres [4-8]. Por lo tanto, en este documento se examinan las limitaciones actuales de la planificación de la prevención de desastres, se resumen los estudios de la infraestructura interconectada de la identificación de la interdependencia, la simulación de fallos y la estrategia de recuperación de la resiliencia y se proponen perspectivas y vías de innovación basadas en las nuevas tecnologías.

1 Coupling risks in urban infrastructure systems

La ciudad es un sistema dinámico que depende en gran medida de las funciones de infraestructura durante el funcionamiento. Los sistemas aparentemente independientes forman una red de transmisión funcional interdependiente que apoya la vida cotidiana y las funciones urbanas [9]. Como se muestra en la Fig. 1, energía, comunicaciones, transporte, suministro de agua y otros sistemas de línea de vida tienen estrechas relaciones internas de apoyo al suministro. También ofrecen garantías esenciales para los servicios públicos como hospitales y reservas materiales. Estas instalaciones, a través de redes de infraestructura y sistemas de transporte por carretera, satisfacen las necesidades diarias de los residentes y estabilizan el funcionamiento urbano.

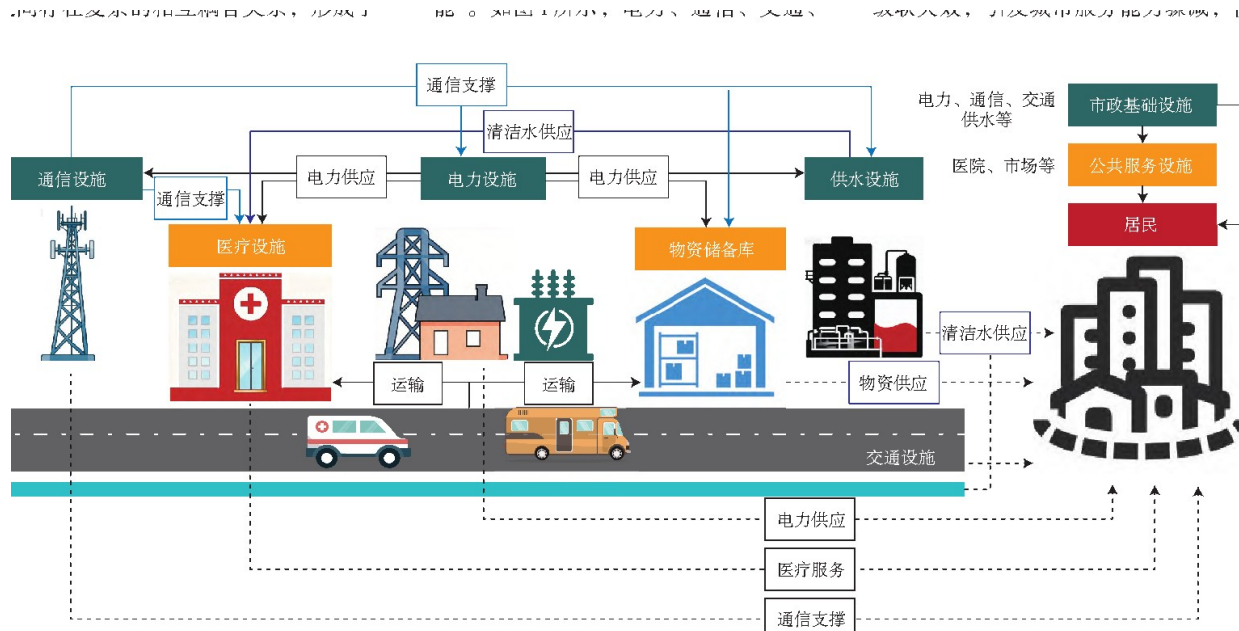


Fig. 1 Interdependencies among urban infrastructure subsystems.

Esta asociación es el resultado de la planificación y el diseño. La forma y organización del entorno construido están conformadas por decisiones de planificación, y las relaciones entre la interdependencia, los diseños espaciales y los vínculos funcionales entre los sistemas de infraestructura están diseñados para mejorar la eficiencia operacional general. A medida que aumentan las conexiones y la densidad de acoplamiento, la eficiencia del servicio mejora pero la vulnerabilidad sistémica también crece [10-11]. Cuando un nodo o subsistema crítico es perturbado, el efecto puede extenderse rápidamente a través de cadenas de dependencia y causar parálisis multisistema. El apagón norteamericano de 2003 provocó fallos en el suministro de agua, el transporte y las comunicaciones; en el 2021 Zhengzhou 20 de julio la tormenta de lluvia, el daño a las instalaciones eléctricas causó dificultades en el suministro de agua y las comunicaciones [1].

Las interconexiones entre los sistemas de infraestructura significan que el daño a una sola instalación puede provocar fallos en cascada, debilitar la capacidad de servicio urbano y causar daños en cadena a la vida cotidiana de los residentes y a la economía urbana. Bajo el intenso esfuerzo de China por construir ciudades resistentes a los desastres, reducir los impactos de cascada, intervenir eficientemente en instalaciones limitadas, paquetes y sistemas, y mejorar la capacidad de servicio urbano son tareas clave para la construcción de ciudades resistentes.

2 Progresos en la planificación de la prevención de desastres en la infraestructura urbana

La planificación tradicional de la prevención de desastres en torno a la infraestructura urbana se ha desarrollado principalmente en dos direcciones. La primera es la optimización de instalaciones de un solo sistema. Los estudios existentes se centran en el diseño optimizado de instalaciones individuales como infraestructura vial, tanques de detención de agua de lluvia, tuberías de agua, infraestructura verde y estaciones de bombeo, a menudo utilizando modelos físicos o numéricos para minimizar las pérdidas posteriores a desastres y mejorar la eficacia de los planes de emergencia [12-15]. Esta línea de trabajo es útil para la optimización de ingeniería local, pero generalmente se limita a una sola instalación y no considera plenamente la retroalimentación entre múltiples sistemas o acoplamiento espacial.

La segunda dirección es la protección y planificación del sistema. Desde el punto de vista del sistema, los estudios identifican la resiliencia de la infraestructura y proponen estrategias en esferas como la gestión integrada, el control de procesos completos refinados y el mantenimiento regular [16-17]. La labor reciente sobre la resiliencia urbana ha reconocido cada vez más que las interdependencias entre las infraestructuras determinan la vulnerabilidad urbana y la velocidad de recuperación posterior al desastre. Los becarios han propuesto orientación de planificación desde el acoplamiento de infraestructuras municipales y sistemas de prevención de desastres [18], pidieron que se incorporara la exposición, la vulnerabilidad y el análisis de riesgos en el sistema de evaluación de la prevención de desastres [20], y argumentaron que la planificación resiliente debe coordinar la robustez de un sistema único con la prevención de la falta de cobertura multisistema [19-21]. En general, la planificación orientada a la prevención de desastres debe pasar de la experiencia de ingeniería a nivel de las instalaciones a la coordinación entre los sistemas. Su tarea es identificar los vínculos vulnerables en redes complejas, comprender los mecanismos de falsificación de cascada y efectos de amplificación, y traducirlos en controles de planificación operables. El proceso se puede organizar alrededor de tres enlaces principales: identificación de interdependencia, simulación de fallos y estrategia de recuperación (Fig. 3).

3 Avances de investigación sobre tecnologías clave para los fallos en cascada en la infraestructura urbana interconectada

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

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

支持。

为此，后续研究转向基于数据的依赖性关系识别。目前依赖性识别方法主要

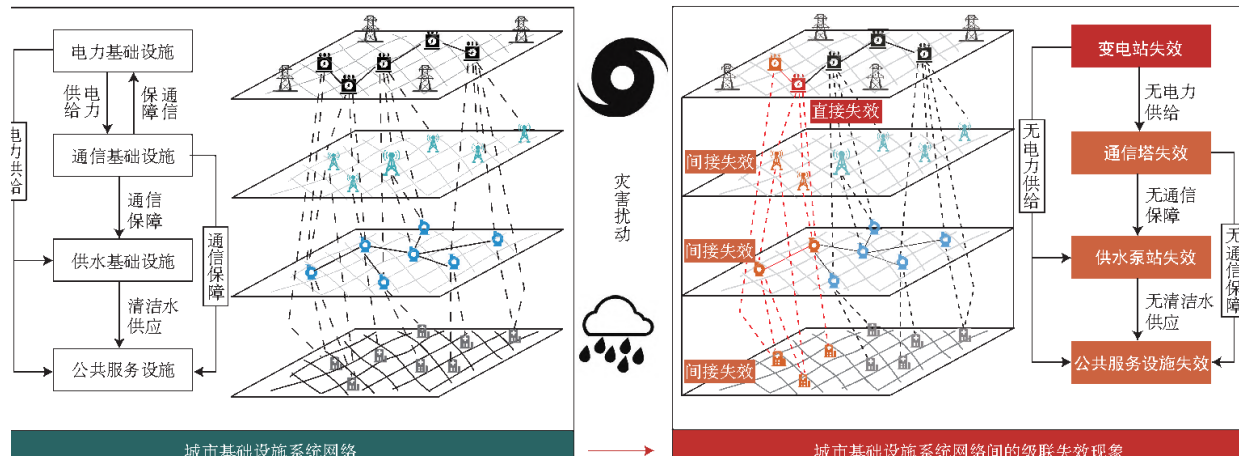


Fig. 2 Fallos de los sistemas de infraestructura urbana.

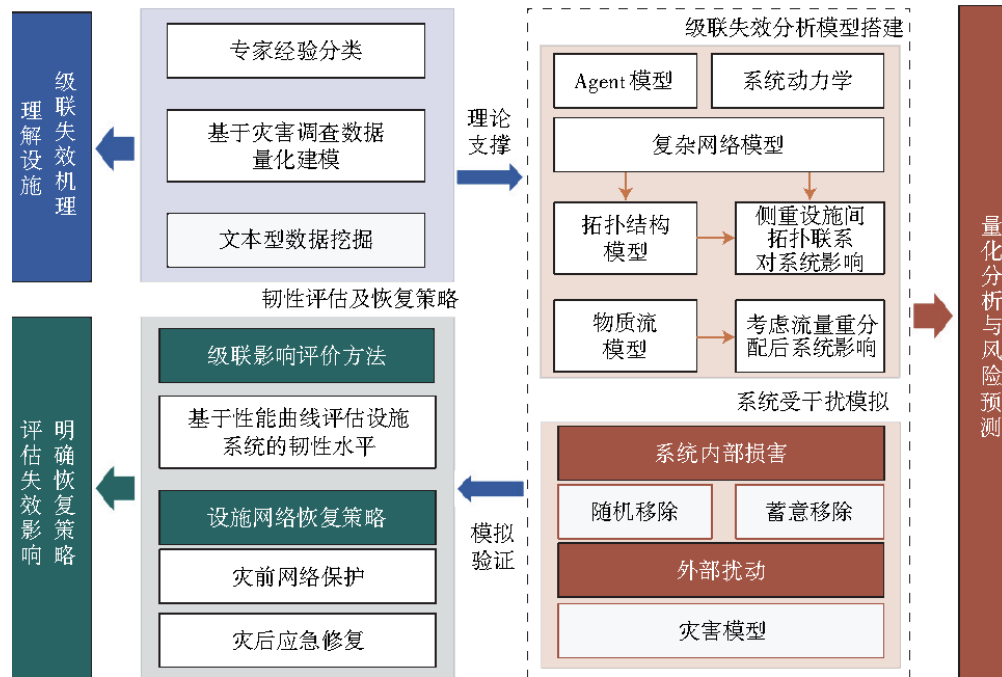


图3 城市基础设施级联失效关键技术研究概况

Fig. 3 Examen de la literatura sobre tecnologías clave para mitigar los fallos de cascada en la infraestructura urbana.

Los subsistemas de infraestructura urbana forman entidades orgánicas mediante el intercambio de materia, energía e información. Bajo disturbios extremos, las fallas locales pueden extenderse a lo largo de las cadenas de dependencia y escalar en fallas de cascada, amenazando el funcionamiento urbano y la seguridad residente. El análisis de este problema debe seguir una lógica de flujo de sistema de análisis de mecanismos, deducción de riesgos, intervención activa y evaluación de la resiliencia. El examen siguiente se centra en la identificación de la interdependencia, la simulación de fallos y las contramedidas de resiliencia.

3.1 Determinación de las interdependencias entre la infraestructura interconectada

Rinaldi et al. classified interdependencies among infrastructure into physical, cyber, geographical, and logical categories, focusing on power, water supply, communications, energy, and transport systems [9]. Estudios posteriores ampliaron esta clasificación desde diferentes perspectivas añadiendo dependencia política, dependencia social y dependencia económica [22]. El trabajo temprano se basó a menudo en el juicio de expertos y se concentró en algunos sectores como el suministro de energía y agua, con un apoyo limitado de datos empíricos.

Los estudios posteriores se desplazaron hacia la identificación de dependencia basada en datos. Los métodos basados en los registros de investigación de desastres cuantifican las interdependencias de los datos de los posteriores. Mendonca y Wallace identificaron correlaciones en la restauración de infraestructuras después del ataque del World Trade Center [24] 2001. Monsalve y de la Llera estimaron coeficientes y fortalezas de la interdependencia de la restauración [25]. Zorn y Shamseldin derivaron dirección e intensidad de dependencia utilizando relaciones de recuperación de asistencia [26]. La minería de informes y noticias también se ha utilizado para extraer hechos de dependencia de los registros públicos y los medios de comunicación, con lo que se construyen pruebas textuales más diversas para el reconocimiento de la interdependencia [27-29].

La investigación basada en datos sigue siendo exploratoria. Muchos estudios se basan en la extracción de texto monomodal, la falta de validación cruzada de datos multifunción y suelen identificar tipos de interdependencia como la adyacencia geográfica o el apoyo administrativo a la decisión. Siguen siendo insuficientes para revelar mecanismos complejos de dependencia entre las infraestructuras asociadas.

3.2 Simulación de fallas en cascada en infraestructura interconectada

Las deficiencias en la infraestructura se producen a través de la interdependencia compleja y la dependencia funcional. Por lo tanto, la simulación realista es esencial para comprender los mecanismos de falla e identificar instalaciones clave. Existing research mainly addresses modeling methods, disturbance forms, and dynamic deduction under faults.

3.2.1 Modelo de métodos para redes de infraestructura interconectadas

Debido a las diferencias en la perspectiva de la investigación y la disponibilidad de datos, se utilizan ampliamente tres tipos de métodos de modelado. El modelado basado en agentes trata componentes de infraestructura como entidades con atributos de decisión y comportamiento y simula interacciones entre sistemas [31-32]. Los métodos de dinamismo del sistema examinan la retroalimentación entre perturbación y respuesta de la red, analizando los efectos a largo plazo de los fallos [33-34]. Métodos de análisis de redes de componentes abstractos como nodos, conexiones físicas o de dependencia como bordes y relaciones direccionales como pesos, identificando así la fiabilidad y transmisión de flujo de servicio a través de sistemas [35-36].

3.2.2 Formas de perturbación del fracaso en las redes de infraestructura

Las redes de infraestructura están expuestas a perturbaciones internas y externas. Las perturbaciones internas incluyen la eliminación aleatoria y ataques maliciosos contra nodos o componentes, que se utilizan para simular interrupciones causadas por equipos de envejecimiento, falla operacional o daños específicos [45-47]. Las perturbaciones externas incluyen peligros naturales, accidentes y ataques maliciosos. Tienen una heterogeneidad espaciotemporal y correlaciones geográficas significativas, y los estudios a menudo combinan modelos de proceso de peligro con modelos de redes de infraestructura para simular fallos de componentes bajo acción de desastre [48-51]. Sin embargo, los modelos de perturbación existentes todavía tienen una

capacidad limitada para captar la evolución espacial dinámica y los procesos de respuesta entre los sistemas en situaciones de desastre complejo.

3.3 Estrategias de resistencia a la infraestructura en relación con los efectos de la falacia de cascada

Sobre la base de mecanismos de ocultación, los estudios han evaluado las estrategias de recuperación y restauración de la infraestructura para garantizar la estabilidad de los servicios durante el clima extremo. La evaluación de la resiliencia utiliza comúnmente curvas de rendimiento para cuantificar la condición del sistema antes, durante y después del fallo [51]. Los estudios de restauración se centran en la protección de la red antes de la asignación de recursos y desastres después de desastres, incluida la identificación de componentes clave, la optimización de los modos de funcionamiento de la red, la asignación de recursos y las medidas de protección [52-54]. Estudios de recuperación de emergencia examinan la secuenciación de tareas y la asignación de recursos bajo recursos limitados de reparación y limitaciones de comportamiento [55-56].

La investigación de la estrategia existente ha avanzado en la identificación de componentes clave, la mejora de la protección de la red y la optimización de la asignación de recursos de reparación, pero todavía se centra principalmente en las propias redes de infraestructura. A menudo no se tienen plenamente en cuenta los efectos de la accesibilidad al servicio residente, el comportamiento de las operaciones sociales y la coordinación espacial en la resiliencia.

3.4 Examen de los progresos realizados en la investigación

3.4.1 Objetos de investigación: insuficiente integración multisistema

Los estudios actuales se concentran principalmente en sistemas de infraestructura únicos o fallas internas de cascada entre un pequeño número de sistemas. Aún no han formado un marco que comienza desde la ciudad general, integra múltiples tipos de infraestructura y evalúa sus efectos sobre la capacidad de servicio residente. El contenido de las investigaciones sigue dominado por las instalaciones de transporte y drenaje, mientras que los efectos funcionales de la infraestructura social, como los hospitales, las reservas materiales y los servicios de emergencia reciben una atención insuficiente. Dado que el fracaso de estas instalaciones puede afectar directa e indirectamente la recuperación posterior al desastre, es necesario ampliar el sistema de objetos de investigación.

3.4.2 Exploración del mecanismo: la precisión de identificación sigue siendo limitada

Los estudios de los mecanismos de falla se basan a menudo en el juicio cualitativo o en el análisis de datos estructurados. La identificación de la dependencia basada en datos y el descubrimiento de la ley de transmisión siguen siendo débiles. Muchos estudios se basan en documentos autorizados o extracción de información única, falta de validación cruzada y análisis integrado de datos heterogéneos de múltiples fuentes, y proporcionan una caracterización insuficiente de dependencias complejas entre infraestructuras interrelacionadas.

3.4.3 simulación modelo: representación insuficiente de los mecanismos físicos y los efectos sociales

Los modelos de simulación existentes pueden describir en cierta medida los procesos de falla física de las instalaciones, pero tienden a centrarse en los daños a nivel de las instalaciones. A menudo carecen de un análisis completo de la accesibilidad de los servicios de los residentes y los efectos de la cooperación social. Dado que el objetivo fundamental de la resiliencia urbana es salvaguardar las necesidades cotidianas de los residentes y la continuidad de los servicios, los modelos deben introducir dimensiones como la accesibilidad residente y el suministro de servicios para realizar una transformación de la interrupción funcional a la evaluación de los efectos sociales.

3.4.4 Nivel de estrategia: la regulación sigue concentrada en la reparación de ingeniería

Las estrategias actuales de recuperación se concentran en la reparación de ingeniería y el refuerzo protector y aún no han formado un marco de recuperación sistemático que integra la coordinación espacial y temporal. Las medidas de ingeniería pueden mitigar el fracaso de la infraestructura local, pero no son suficientes para hacer frente a los efectos de la cascada en múltiples sistemas. La planificación futura debe crear mecanismos integrados para la optimización del diseño espacial, la redundancia de las instalaciones y la coordinación de la gobernanza, que apoyen la recuperación coordinada y el rápido restablecimiento de la capacidad de los servicios residentes.

4 Prospects for cascading-failure studies under new technologies

Habida cuenta de los problemas de la identificación incompleta de la interdependencia, la simulación refinada insuficiente de las instalaciones críticas y las estrategias débiles de planificación colaborativa multisistema, la inteligencia artificial ofrece nuevas vías de investigación. Este documento propone tres direcciones: mejorar la precisión de la identificación de dependencia de infraestructura con modelos de idiomas grandes, construir modelos de dependencia multisistemas cibernéticos para simulación de escenarios y evaluación de riesgos, y realizar una planificación inteligente resistente a los desastres con múltiples objetivos.

4.1 Utilizar modelos de idiomas grandes para mejorar la identificación de la infraestructura

El análisis actual de la interdependencia se centra principalmente en las conexiones físicas, y la exploración de dependencias ocultas entre sistemas como las comunicaciones, el transporte y la infraestructura social sigue siendo insuficiente. Los modelos de lenguaje pueden utilizarse para extraer datos de múltiples fuentes, incluidos informes históricos sobre desastres, noticias, conocimientos especializados, imágenes de teleobservación, monitoreo de sensores e información de redes sociales. Los datos de texto ayudan a revelar dependencias de infraestructura bajo operación normal y condiciones inusuales de desastre, capturar datos de sensores y estados operativos de instalaciones, y teleobservación interpreta la distribución espacial y las conexiones físicas. Sobre esta base, los modelos de idiomas grandes pueden realizar análisis semánticos, extracción de conocimientos y construcción de gráficos de conocimiento, creando un mapa de conocimiento de la interdependencia y haciendo que las estructuras de dependencia sean almacenables y visualizables. Mediante el almacenamiento estructurado y la representación visual, el modelo puede apoyar la identificación de dependencias latentes y no intuitivas y proporcionar una base de pruebas más sólida para las decisiones de planificación (Fig. 4).

从内部的级联失效现象，从本形成
市整体视角出发、整合多类型基础
设施对居民服务能力影响的研究框

宝内中用优化、以施几承能且与信理阶
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。

源数据进行清洗、融合与知识抽取，并
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。

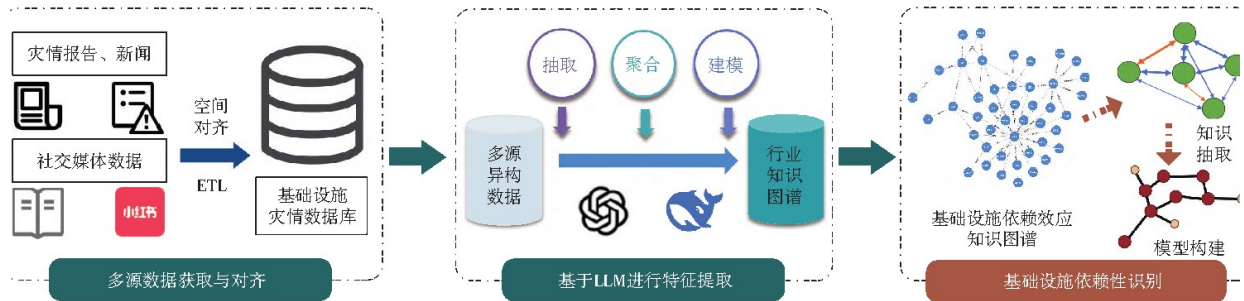


Fig. 4 Mejora de la identificación de la interdependencia de la infraestructura mediante datos multifunción y modelos de idiomas grandes.

4.2 Creación de modelos de dependencia multisistemas urbanos ciberfísicos para simulación de escenarios y evaluación de riesgos

Para la planificación resistente a los desastres, modelar fallas en cascada en múltiples sistemas es un reto central. Los modelos puramente digitales pueden deducir eficientemente las respuestas del sistema macroscópico, pero tienen dificultad para reproducir mecanismos finos y simplificar las hipótesis modelo puede sesgar los umbrales de falla y las vías de transmisión. Los modelos físicos pueden restaurar procesos reales, pero su cobertura de escenarios complejos a gran escala es limitada. Un modelo de dependencia ciberfísica puede combinar las ventajas de ambos.

El modelo consiste en simulación de dependencia multisistema y módulos de experiencia física. El módulo de simulación toma las redes de infraestructura de una sola capa como base y completa la construcción de acoplamientos de acuerdo con las reglas de dependencia, incluyendo topología simplificada y modelado de redes centrales tales como energía, suministro de agua y transporte, y la definición de leyes de flujo, tipos de dependencia, atributos clave, y parámetros básicos. El módulo de experiencia física verifica los resultados de la simulación digital bajo entornos controlados. Las mediciones de túneles de viento, tanques y otros experimentos pueden corregir las relaciones de oferta y demanda, los parámetros mecánicos y los parámetros de vulnerabilidad bajo cargas extremas, mejorando la precisión de los mecanismos de falla microscópica y proporcionando evidencia para la calibración de modelos multiescala.

4.3 Realización de una planificación inteligente resistente a los desastres bajo múltiples objetivos

La planificación existente depende en gran medida de la deducción basada en la experiencia y del análisis basado en modelos. Bajo desastres extremos, las fallas de cascada multisistema urbano requieren un marco de planificación que integra algoritmos inteligentes y toma de decisiones multiobjetivas, pasando de la respuesta pasiva a la prevención activa. Como se muestra en la Fig. 5, el núcleo es construir un bucle integrado de minería de mecanismos, simulación y optimización de decisiones. En la minería de los mecanismos se identifican dependencias de infraestructura, asociaciones funcionales y vías de acoplamiento. En simulación, se utilizan modelos multisistema para la construcción teórica, validación empírica, simulación de escenarios y evaluación de riesgos. En la optimización de decisiones, los algoritmos multiobjetivos generan secuencias de intervención óptimas bajo objetivos como la perturbación mínima, la inversión más baja y la equidad óptima.

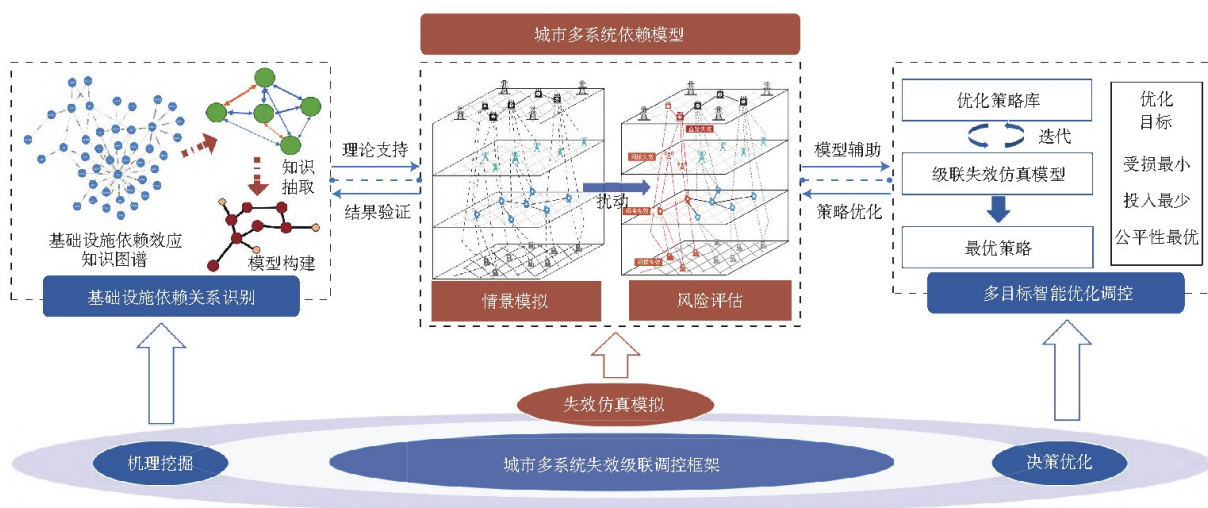


Fig. 5 Criterios de planificación y regulación para fallas de cascada multisistema urbano.

Este marco ayuda a abordar dos problemas fundamentales en la planificación actual de la prevención de desastres: la falta de mecanismos de interacción multisistemas suficientes y la falta de controles cuantitativos, precisos y flexibles. Puede apoyar la identificación de riesgos, la recuperación funcional y la intervención espacial y promover la planificación resistente a los desastres hacia la inteligencia y la mejora refinada.

5 Conclusión

En este documento se examinan los progresos realizados en la investigación de fallos de cascada en los sistemas de infraestructura para la planificación urbana resistente a los desastres. En él se resumen sistemáticamente tres enlaces básicos, a saber, la identificación de la interdependencia, la simulación de fallos y la formulación de estrategias de recuperación, y se analizan los mecanismos de encubrimiento y las vías de prevención de la infraestructura con perturbaciones por desastres. La determinación precisa de las dependencias multidimensionales es la base para comprender los mecanismos de ocultación; los sistemas de simulación y evaluación de escenarios son la base científica para formular estrategias de recuperación específicas y mejorar la resiliencia general del sistema.

La revisión también encuentra claras limitaciones en los estudios actuales. No entienden suficientemente los mecanismos de fracaso colaborativo multisistema, no representan las funciones sociales y los efectos de los servicios, y prestan una atención limitada a la coordinación espacial en la reparación de ingeniería. Para superar estos problemas, la investigación futura debe utilizar datos heterogéneos de múltiples fuentes y modelos de lenguajes grandes para construir gráficos de conocimiento de dependencia de infraestructura; construir plataformas de simulación ciberfísica que integren simulación digital y experimentos físicos; y desarrollar modelos de decisión multiobjetivos para la asignación de recursos y la intervención resiliente. A medida que los entornos de datos mejoren y los métodos inteligentes se integren más profundamente, la investigación sobre la resistencia a la infraestructura desempeñará un papel cada vez más importante en la gobernanza de la seguridad urbana y el desarrollo sostenible.

Referencias

- [1] State Council Disaster Investigation Team. Investigation report on the Henan Zhengzhou July 20 extraordinary rainstorm disaster [R]. Beijing: Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, 2022.
- [2] He Lei, Xie Ziang, Li Jie. Disaster-resilient cities: essential connotation, fractal structure and characteristic vectors [J]. City Planning Review, 2024, 48(7): 28-35.
- [3] Peng Chong, Zuo Peiwen, Li Yuewen, et al. Multi-risk coupling in urban space and resilient planning response [J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 88-97.
- [4] Zhai Guofang. Resilient responses to urban rainstorm-flood disasters from a planning perspective under climate change: key concepts, basic ideas and a general framework [J]. Urban Planning Forum, 2024(1): 29-37.
- [5] Dai Shenzhi, Liu Tingting, Gao Xiaoyu, et al. Compilation system and implementation mechanism of territorial spatial disaster prevention and reduction planning [J]. Urban Planning Forum, 2023(1): 48-53.
- [6] Yan Wentao, Ren Jie, Zhang Shangwu, et al. Shanghai resilient city planning: key issues, overall framework and planning strategies [J]. Urban Planning Forum, 2022(3): 19-28.
- [7] Yan Wentao, Li Zihao. Resilience mechanism of urban spatial structure from the perspective of risk disturbance: theoretical framework and empirical methods [J]. Urban Planning International, 2023, 38(4): 1-10.
- [8] He Lei, Xie Ziang. Towards resilience: review and prospect of urban comprehensive disaster-prevention planning [J]. Urban and Rural Planning, 2021(3): 43-54.
- [9] Rinaldi 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] Xie Lei, Zhou Pengfei, Yang Hongyi, et al. Exploring a resilience paradigm for lifeline engineering in coastal areas under climate-change impacts: the case of Ningbo [J]. *Urban Planning Forum*, 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] Yang Xiao. Optimization scheme for urban road design based on reducing waterlogging [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2025(5): 150-153.
- [13] Li Wenyu, Hou Jingming, Li Xuan, et al. Optimal operation of urban rainwater detention tanks based on a stormwater numerical model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024, 35(5): 82-89.
- [14] Guo Li, Hu Jianing, Gu Qinghua, et al. Optimized deployment of green infrastructure for urban waterlogging response [J]. *City and Disaster Reduction*, 2024(6): 27-32.
- [15] Li Kailin. Design essentials and rectification-measure optimization for drainage pumping stations in old urban districts [J]. *Fujian Construction Science and Technology*, 2024(6): 140-142, 154.
- [16] Kong Yun, Cui Limin, Li Wei, et al. Key issues in municipal infrastructure planning from the perspective of public safety [C]//Urban Planning Society of China. *People's City, Planning Empowerment: Proceedings of the 2023 Annual National Planning Conference*, 2023: 18.
- [17] Gong Qilong, Wang Xiaobin, Yin Haoqi, et al. Research on resilient municipal infrastructure from the perspective of territorial spatial planning [C]//Urban Planning Society of China. *People's City, Planning Empowerment: Proceedings of the 2022 Annual National Planning Conference*, 2023: 10.
- [18] Guo Dongjun, Wu Yanhua, Zhao Hongxu, et al. International experience and implications for critical infrastructure protection planning [J]. *Urban Planning Forum*, 2025(1): 111-119.
- [19] Dai Shenzhi, Feng Hao, He Lei, et al. Compilation mode of disaster-prevention planning in master-plan revisions of large Chinese cities: the case of Wuhan [J]. *Urban Planning Forum*, 2019(1): 91-98.
- [20] Chen Zhiqian. Preliminary exploration of municipal infrastructure planning strategies under the resilient-city concept [J]. *City and Disaster Reduction*, 2021(6): 36-42.
- [21] Han Yu, Huang Xiao, Ye Xinyue, et al. Enhancing urban resilience under climate change through adaptive disaster-prevention and mitigation planning for interconnected infrastructure systems [J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2021, 9(6): 78-87.
- [22] Dudenhoefter 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, Peeta 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] Mendonca 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. Delineating 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] Gursan 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] Dudenhoefter 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] Poljansek K, Bono F, Gutierrez 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] Duenas-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] Muhlhofer 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 stormwater 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.

Traducción asistida por IA