DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.03.027

超大城市地下空间系统智慧韧性发展策略研究

韩凯航[1,2]，黎俊轩[1,2]，陈湘生[1,2*]，金银富[1,2]，林星涛[1,2]，张楠[1,2]，陈曦[1,2]，苏栋[1,2]，包小华[1,2]，崔宏志[1,2]

（1. 深圳大学未来地下城市研究院，广东深圳 518060；2. 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室，广东深圳 518060）

摘要：超大城市地下空间开发利用是缓解城市土地压力、优化交通和提升韧性的关键。然而，传统的“工程韧性”理念在全球气候变化和城市化加速背景下，难以应对地下空间系统复杂性、多灾害耦合及数据智能处理等挑战。因此，向人工智能赋能的“智慧韧性”理念转变，聚焦韧性防灾减灾，成为未来发展亟需。本文首先梳理了超大城市地下空间系统面临的灾害类型，阐述了超大城市地下空间系统智慧韧性的内涵，进而指出了智慧韧性发展涉及的关键科学和技术问题，并从灾害类型与强度的时空分布、灾变分析与韧性评估理论、材料–结构协同体系、全域感知技术与高保真数据库、基于人工智能技术的自主决策与智能进化等方面剖析了超大城市地下空间系统智慧韧性发展现状及存在的问题。进一步构建了“物理–信息–仿真”三域融合与实时数据交互的多维度协同管控（PISMC）框架，明晰了超大城市地下空间系统智慧韧性体系的实施路径。研究建议，从物理、信息、仿真三域多维度强化保障措施，构建综合保障体系，推动超大城市地下空间系统智慧韧性发展的有序性与高效性。

关键词：超大城市地下空间系统；智慧韧性；“物理–信息–仿真”三域；PISMC 框架

中图分类号：TU28　**文献标识码：**A

Development Strategy for Intelligent Resilience of Underground Space System in Megacities

Han Kaihang[1,2], Li Junxuan[1,2], Chen Xiangsheng[1,2*], Jin Yinfu[1,2], Lin Xingtao[1,2], Zhang Nan[1,2], Chen Xi[1,2], Su Dong[1,2], Bao Xiaohua[1,2], Cui Hongzhi[1,2]

(1. Underground Polis Academy of Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: The development of underground spaces in megacities is crucial for alleviating urban land pressure, optimizing transportation, and enhancing resilience. However, under the dual pressures of global climate change and rapid urbanization, the traditional concept of engineering resilience struggles to address challenges such as the complexity of underground space systems, multi-hazard coupling, and intelligent data processing. Consequently, a shift toward an AI-enabled intelligent resilience concept, focusing on resilient prevention and mitigation of disasters, has become an imperative direction for future development. This study first categorizes the types of disasters

收稿日期：2025-03-28；**修回日期：**2025-06-26

通讯作者：*陈湘生，深圳大学未来地下城市研究院教授，中国工程院院士，研究方向为超大城市深层地下空间韧性基础理论研究；E-mail: xschen@szu.edu.cn

资助项目：国家自然科学基金(52090084)；中国工程院咨询项目“城市安全面临的挑战及对策”(2022-JB-02)，“极端情况下超大城市立体空间安全韧性战略研究”(2023-HZ-03)；国家重点研发计划项目(2022YFC3800905, 2024YFF0507902)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

faced by underground space systems in megacities and elaborates on the concept of intelligent resilience for such systems. It then identifies key scientific and technological issues involved in developing intelligent resilience. Subsequently, the study analyzes the current state and existing problems in intelligent resilience development across several dimensions: spatiotemporal distribution of disaster types and intensities; theories for failure mechanism analysis and resilience assessment; synergistic material-structural systems; comprehensive sensing technologies and high-fidelity databases; and AI-driven autonomous decision-making and intelligent evolution. Furthermore, a multi-dimensional collaborative management and control framework based on the integration of physical, information, and simulation domains with dynamic real-time data interaction is constructed, which clarifies the implementation pathways for the intelligent resilience systems of underground space in megacities. Finally, the study recommends strengthening comprehensive safeguards across physical, information, and simulation domains to construct an integrated support system, thereby promoting the orderly and efficient advancement of intelligent resilience in megacity underground space systems.

Keywords: underground space system in megacities; intelligent resilience; physical, information, and simulation domains; PISMC framework

一、前言

20世纪以来，全球城市化进程迅速推进，2023年，世界上人口超过1000万的超大城市已有26个。超大城市不仅在经济上影响深远，其社会影响也不可忽视。城市扩张导致环境污染、交通拥堵等“城市病”，使城市安全和可持续发展面临巨大挑战。1991年，联合国人居署发布《东京宣言》，指出21世纪是地下空间的世纪[1]。2019年，全球地下空间开发利用《上海宣言》形成了开发利用地下空间、提高城市韧性和生态安全的国际共识[2]。根据《上海市城市总体规划（2017—2035年）》，到2035年上海主城区与新城新建轨道交通、市政设施（含变电站、排水泵站、垃圾中转站等）地下化比例达到100%[3]。在国际方面，美国、英国以及联合国、国际性组织也相继开展了关于韧性城市建设的倡导活动并发布宣言性指导文件，以促进世界上超大韧性城市建设。韧性城市建设的一个大背景是超大城市发展方式的转变，以往的城市发展大多采取“摊大饼”的方式发展，带来了诸多城市问题，如交通拥堵、土地资源紧张、城市内涝和环境污染等问题。解决超大城市的“城市病”，向地下空间发展是有效途径之一。一方面可以增加超大城市的立体空间承载力，另一方面也可以增加地表蓝绿空间，在提升城市韧性安全水平的同时也提高了城市居民的生活质量[4,5]。

未来，超大城市的地下空间将发展为集地下交通、市政、防灾、公共活动、能源、物流及战略设施等多功能于一体的综合性立体支撑系统。同时，超大城市的立体空间整合了地下空间、地上空间、多层地表与立体街道结构，其核心在于高人口密度紧凑型城市环境中垂直维度的开发、耦合与利用。保障此类城市安全运行的基础在于综合防灾减灾能力。然而，当前立体空间发展面临深度层次差异显著、系统协同不足及整体韧性薄弱等关键挑战，尤其在极端情景下，综合防灾减灾能力尤显不足。目前，城市韧性地下空间的研究多聚焦于“工程韧性”的理念，强调鲁棒性、冗余性和恢复性等核心要素。根据灾害类型的差异韧性研究各有侧重，针对地震、爆炸等（时域作用短、不可预测）冲击类侧重于灾害发生后带来的后果（修复时间、修复费用、人员伤亡等）进行韧性评估，进而根据全域损伤失效特征进行结构体系的优化与韧性提升；针对施工扰动工程灾害、缓变地质灾害等（时域作用长、可预测）压力类则侧重于灾害发生过程中地下结构体系复合功能、性能的演化规律，且多从抗力韧性、恢复韧性与适应韧性的角度进行韧性评估，进而根据这些指标同时考虑经济条件的约束进行韧性提升措施的最优策略制定[6~10]。

传统“工程韧性”理念在应对未来城市环境日益复杂的挑战时，局限性日益凸显。核心问题在于，现有方法难以有效刻画韧性提升决策所蕴含的自进化智慧特征——即系统在动态环境中通过学习与适应机制实现韧性持续增强的内在能力。与此同时，技术的快速发展为韧性研究带来了新的契机。人工智能的深度赋能、多学科交叉融合与协同创新，以及大数据在存储、处理、挖掘与管理方面的突破，已成为当前研究的焦点。这些进展为构建更智能化、更具适应性的韧性评估框架提供了重要支撑。然而，尽管技术手段不断革新，针对“智适应韧性”（强调系统在复杂不确定环境下的智能适应能力）的系统性研究仍相对匮乏。当前学术界与实践领域对“智适应韧性”的探索尚处于初步阶段，亟待深入拓展。综上所述，传统韧性评估方法的局

限主要源于其静态分析视角与技术手段的不足；而新兴技术虽为“智慧韧性”研究开辟了新路径，但相关领域的深入探索与理论构建仍需加强，以有效应对未来城市发展的复杂韧性需求。

本文系统梳理了超大城市地下空间系统面临的灾害类型，深入阐释了其智慧韧性的核心内涵；全面剖析了当前该系统智慧韧性发展的现状与关键瓶颈；创新性提出了基于“物理–信息–仿真”三域融合与实时数据交互的多维度协同管控框架（PISMC），明晰了超大城市地下空间系统智慧韧性体系的实施路径，旨在为相关研究与建设提供理论参考和实践指导。

二、超大城市地下空间系统智慧韧性的内涵

（一）概念定义与核心特征阐述

本研究聚焦人口超过1000万、地下空间功能高度复合的超大城市（如北京、上海、深圳）。超大城市地下空间系统智慧韧性的核心内涵是指依托人工智能、物联网、数字孪生、大语言模型等技术，实现地下空间系统自主感知灾变、智能决策调控、动态适应进化的综合抗灾能力。针对不同类型灾害的时域特征和可预测性特征（见表1），智慧韧性通过将智能技术与韧性理念相结合，目标是构建“强鲁棒、富冗余、快恢复、智适应”（其中智适应强调感知、决策、进化特性）的城市地下空间系统，实现更高效的管理和决策，确保城市地下空间在面临复杂挑战时依然具备适应能力和持续性发展（见图1）。将智慧与韧性相结合，不仅提升了系统对灾害的响应能力，还为未来城市环境的管理和决策提供了新的视角与解决方案[11~13]。

超大城市地下空间系统智慧韧性具体表现为：第一，鲁棒性突出，系统能够有效抵御灾害扰动，维持核心功能与结构稳定性；第二，冗余性显著，系统可通过多重备份机制阻断灾链传导，确保关键

表1　超大城市地下空间系统面临的主要灾害类型及分类

类型	持续时间	分类	内容
冲击类	短	突发事件	战争、爆炸、火灾、碰撞
	短	突发性地质灾害	地震、崩塌、滑坡、泥石流等
	较短	区域极端气象	暴雨、洪涝、台风
	较短	人类生产活动	施工降水、施工扰动、工程事故
压力类	长	渐变性地质灾害	地面沉降、水土流失、土地沙漠化、淤积等
	长	全球气候变化	海水侵蚀、土地盐渍化、海岸侵蚀等

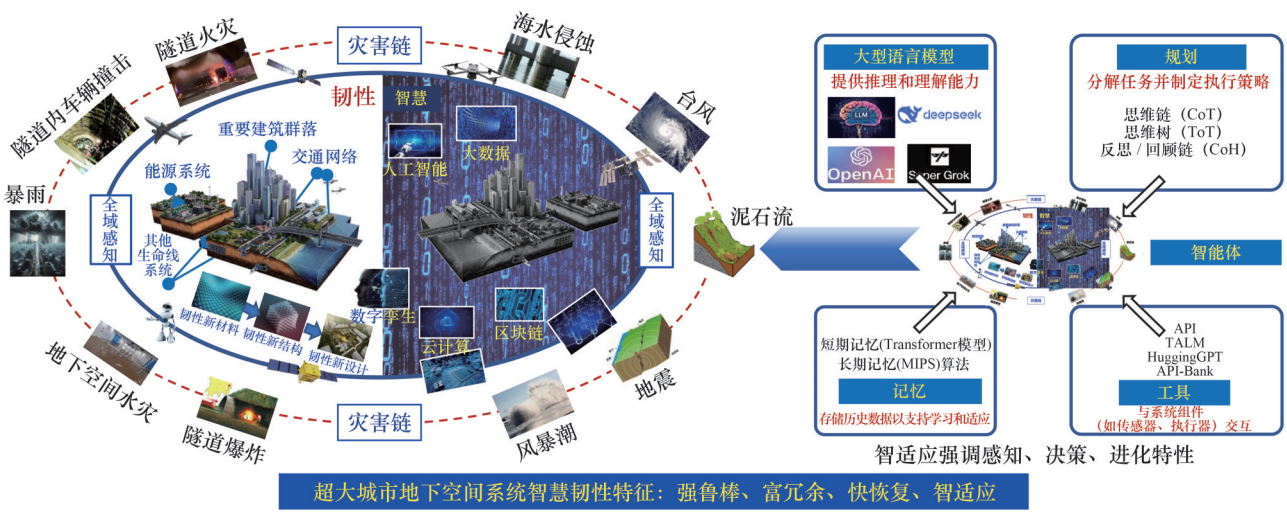

图1　超大城市地下空间系统智慧韧性的内涵

注：API为应用程序编程接口；TALM为工具增强语言模型。

功能在局部失效时不发生级联崩溃；第三，快速恢复性高效，灾后能够加速功能与结构性能修复 / 提升，实现系统运行状态的快速复常；第四，智能反演能力先进，基于实时感知数据对系统结构体系缺陷及地质隐患进行智能诊断与可视化表征。该能力通过提升灾害防控精准度与系统管控效能，支撑灾时响应措施的敏捷化与精准化决策。上述多维能力的协同作用，使超大城市地下空间系统在复杂灾害情境中保持动态适应能力，进而为系统可持续发展提供核心保障[14,15]。

（二）超大城市地下空间系统智慧韧性多维度量体系

在维度方面[16~18]，超大城市地下空间系统韧性可以归纳为6个维度，分别是组织、经济、社会、环境、基础设施、群体功能。其中，基础设施维度对超大城市韧性是非常重要的支撑，且由于地下基础设施赋存于地层岩土介质的特点，增加了研究的复杂性和提升韧性的难度。在尺度方面，超大城市地下空间系统可划分为5个尺度：第一个尺度是材料尺度[19~21]；第二个尺度是单体结构特征截面尺度[22~25]；第三个尺度是单体结构尺度[8,26~28]；第四个尺度是区域地下工程群尺度[29]；第五个尺度是城市地下工程群网络尺度[30~37]。前四个尺度主要强调结构本体的韧性，不管是材料、构件还是结构体系，强调的是结构本体的韧性，第五个尺度更多是强调城市级的功能性防灾韧性。进行尺度划分后，便于研究小尺度的灾变如何发展 / 耦联至大尺度，同时便于我们针对各个尺度制定韧性目标和提升策略。在评估方法方面[38,39]，其研究演进脉络可概括为3个阶段：第一阶段（工程韧性）聚焦地震、爆炸等时域短、不可预见型灾害的灾后影响评估（如修复时长、经济损失、人员伤亡等），基于全域损伤失效模式分析开展结构体系优化与韧性提升；第二阶段（演进韧性）转向施工扰动灾害、缓变地质灾害等时域长及可预测型的灾害，关注地下结构多功能耦合性能的动态演化规律，主要从抗力韧性、恢复韧性与适应韧性三个维度构建评估体系，并结合经济约束条件制定韧性提升最优策略；第三阶段（智慧韧性）则延伸出“感知–决策–进化”协同效能评估范式，具体涵盖多尺度感知精度、决策响应时滞、系统进化效率等核心指标。

（三）关键科学问题和技术问题

超大城市地下空间系统面临多灾种耦合作用的复杂挑战，具体表现为：多源致灾因子经长期时变效应诱发多维病害体系，通过灾变链式传导威胁结构安全；病害性态的高维特征难以统一表征，其与结构性能的映射关系不明确；结构病害频发导致事故率与损失持续攀升，现行风险指标体系存在维度缺失且缺乏动态表征能力，评估方法拘泥于事后损失统计，难以支撑韧性导向的主动管控需求；多病害耦合作用下结构空间覆盖特征的演化规律尚未厘清，导致技术措施协同不足、策略与工程需求脱节。本文基于上述挑战，凝练了覆盖“本征行为–灾变演化–韧性调控”全链条的关键科学问题与技术瓶颈。

1. 地下空间多尺度结构本征演化与临界失效机制

针对超大城市地下结构体系隐蔽性强、损伤累积不可逆的特征，当前技术瓶颈在于从微观材料劣化到宏观系统失稳的跨尺度演化规律认知瓶颈。通过融合多源传感数据与物理驱动模型，构建“材料–构件–系统”三级退化映射关系，揭示长期服役（时变损伤）与突发灾害（动态冲击）耦合作用下的非线性演变路径。关键创新方向可建立考虑能量累积与耗散平衡的临界失效判据，解决传统安全系数法的静态评估局限，为地下结构全生命周期健康监测提供理论依据。

2. 多物理场耦合灾变传递与链式效应机理

面向地下空间“灾害–结构–环境”多系统交互作用引发的级联失效难题，当前技术瓶颈在于水–热–力–化多场耦合的灾变传播动力学模型。通过数字孪生平台还原灾害触发、扩散、耦合的三阶段演进过程，定量解析单灾种能量释放与多灾种协同放大的传递路径差异。进而提出基于复杂网络理论的链式效应阻断机制，建立关键节点脆弱性识别与能量耗散调控方法，为地下空间灾害防控从被动截断向主动疏导转变提供新范式。

3. 智慧韧性动态评估与自适应调控理论

针对现有韧性评估模型滞后性显著、调控策略缺乏预见性的痛点，创建数据–知识混合驱动的实

时韧性诊断体系。研究方向可通过深度强化学习算法构建“监测预警–损伤评估–策略生成–效果验证”闭环优化框架，研发具有自进化能力的智能调控算法。实现数字孪生模型与实体系统的双向交互优化，攻克传统方法中物理空间与信息空间割裂的技术壁垒，推动地下空间韧性管理从经验决策向智能涌现决策跨越。

4. 全息感知与多模融合建模技术

面向地下空间多尺度动态特征的精准捕捉需求，当前技术瓶颈在于三维激光扫描、分布式光纤传感与非接触式监测技术的异构数据融合瓶颈，构建兼具毫米级形变监测与多系统耦合解析能力的“神经感知网络”。通过开发建筑信息模型–地理信息模型–城市信息模型（BIM-GIS-CIM）多模融合的孪生建模引擎，实现从微观材料劣化到宏观城市级灾害链的跨尺度动态映射，为灾害推演提供高精度数字底座，推动地下空间从“黑箱系统”向“透明化实体”的认知跃迁。

5. 灾害链智能推演与实时预警技术

针对多物理场耦合灾害的复杂传播特性，构建物理机理与实时数据双驱动的混合智能模型，集成迁移学习框架与LSTM-GAN预测算法，破解多系统灾害链的时空演化规律。依托边缘计算赋能的秒级响应决策树，实现从监测数据采集、灾变路径推演到分级预警发布的分钟级闭环，将传统灾后被动处置转变为事前主动防控，显著提升城市应急响应的时空压缩能力。

6. 韧性动态评估与演化预测技术

基于时空大数据与图神经网络，建立融合结构稳定性、功能冗余度、恢复敏捷度的多维度韧性“数字体征”体系。通过构建“灾害冲击–经济损失–社会影响”的跨域传导模型，量化分析韧性衰减轨迹与灾后恢复瓶颈，解决传统工程韧性评估中“重单体、轻系统”的局限，实现从静态安全评价到动态韧性预测的范式升级，为地下空间全生命周期优化提供量化决策依据。

7. 智能调控与自适应修复技术

聚焦地下空间韧性主动提升需求，研发Transformer驱动的生成式拓扑优化算法与数字孪生协同决策平台，实现多目标约束下的自进化设计方案实时生成。结合微纳米传感–形状记忆材料–修复机器人构成的“感知–诊断–干预”闭环，形成预测性维护、损伤自修复与功能自适应增强的三位一体调控体系，推动地下基础设施从“被动防御”向“自主进化”的韧性范式转型。

三、超大城市地下空间系统智慧韧性发展现状及存在的问题

（一）灾害类型和强度时空分布方面——复杂多变与数据不足

当前，超大城市地下空间的灾害类型复杂多样，包括地质、水灾、火灾和人为事故等，且灾害往往以链式形式相互作用，但相关耦合效应和传播机制的研究不足，导致风险评估和管理的系统性不足。同时，灾害强度的空间分布数据不完整、不确定，且因地质条件复杂，缺乏精准的动态模型以反映灾害随季节、天气等因素的时空变化。此外，监测数据分散、覆盖度不足，难以有效整合实现跨灾种和区域的预警与响应。链式灾害反应的识别和预测难度大，当前多为单一灾害评估，缺乏对灾害链的触发条件和传播路径的深入理解，限制了系统性防控措施的实施。数据的实时性欠缺进一步影响了灾害应急响应的时效性，同时现有风险评估和分级体系未能充分适应不同地下空间的特性，缺乏差异化的风险管理。为实现智慧韧性的发展目标，未来应加强缓变气象环境（海平面上升与城市化）、极端气象环境（暴雨洪涝、风暴潮与城市化）、多重灾害链式方面的研究[40~43]。

（二）灾变分析方法与韧性评估理论方面——模型单一与理论体系欠缺

在灾变分析方法与韧性评估理论方面取得了进展，但仍存在多灾害耦合不足、动态更新与实时性缺乏、韧性评估标准不系统、区域适应性不足以及灾变分析与韧性评估协同不足等问题。现有灾变分析方法多聚焦于单一灾害类型，未能有效反映多灾害联动的复杂链式灾害效应，而灾变模拟多依赖静态数据，难以实时联动监测数据进行动态更新，降低了决策支持的科学性。同时，韧性评估模型较为粗略，缺乏多层次的标准体系和区域适应性，未能反映不同地下空间的结构和功能差异，导致评估结果适用性受限。此外，灾变分析与韧性评估之间缺

乏联动，削弱了韧性管理的动态适应性。为此，未来亟需更多关注以下几点内容：多尺度、多场景、全要素、多时域的灾变分析方法与韧性评估理论，经济水平约束下融合过程韧性与状态韧性的双测度综合方法（多维度指标方面），加强评估与预测中的不确定性研究[25,37,44]。

（三）创新的材料－结构协同体系方面——协同效应不足与适应性挑战

在超大城市地下空间的智慧韧性发展中，材料–结构协同体系取得了初步成效，但仍面临一些局限：现有材料在韧性、智能化方面的性能不足，难以在极端灾害条件下提供充分的自适应性与快速修复能力；材料与结构一体化设计的系统性不强，未能有效发挥材料特性；智能化感知材料应用受限，成本高、耐久性不足，长期稳定性和响应精度在复杂环境中难以保障；自修复材料的耐久性和经济性有待提升，多次损伤情况下修复能力下降；绿色低碳材料的韧性与耐久性仍不及传统材料，且绿色低碳性能与韧性设计未能形成有效结合，影响其适用性。未来亟需发展兼具韧性、智能化和绿色低碳性能的新型材料，优化材料与结构的一体化协同设计，并提升智能感知材料的经济性和耐久性，以全面支持地下空间智慧韧性体系的建设。未来创新的地下空间材料–结构协同体系的发展将涵盖三个层面的内容：首先，针对新材料的研发，期望其具备高韧性、自感知和自修复功能；其次，针对新构件的设计，期望其具有优异的功能性、能量耗散能力及阻隔灾害链的效果；最后，针对新型结构体系的构建，期望采用多级熔断机制，以实现抗灾变韧性结构的创新。

（四）全息全域感知技术与高保真数据库构建方面、数字孪生技术的应用方面——“数据孤岛”与实时性不足

在超大城市地下空间智慧韧性发展中，全息全域感知技术、高保真数据库和数字孪生技术取得了一定进展，但仍存在覆盖不足、数据维护难度大和动态模拟精度有限等问题。全域感知技术在地下空间的高精度覆盖和实时数据采集能力有待提升，许多隐蔽区域和复杂地质条件下的感知效果不佳；高保真数据库的数据来源异构且实时更新成本较高，难以确保数据的完整性和时效性，影响灾害链分析的精准性；数字孪生技术因实时性和精细化不足，尚不能动态反映复杂环境下的灾害演化细节。同时，不同技术间的标准化体系缺乏，限制了数据共享和系统协同，导致灾害信息管理效率低。未来，亟需加强以下技术的发展和高效融合：基于数字化传感、微机电系统、高精度陀螺仪、无人机、光纤传感等感知技术的地下工程监测应用；基于BIM技术、GIS技术、视频融合技术建立地质信息与地下工程的三维可视化；基于物联网、第五代移动通信、大数据与神经网络、人工智能等技术的地下空间开发信息数据的传输与分析。核心目标是通过无线泛在感知和大面积自感应材料形成实时全域感知系统并与外部环境协同感知[45]。

（五）基于人工智能技术的自主决策与智能进化方面——智能化水平有限与决策机制不完善

基于人工智能的自主决策和智能进化技术正逐渐应用于灾害预警、应急响应和结构健康管理，但面临多重挑战。目前，自主决策系统的精确度和泛化能力不足，难以在新型灾害情景中做出有效动态调整；智能进化系统缺乏对多灾害链的适应性学习能力，无法全面捕捉复杂灾害的相互作用，影响应急能力和预测精度；数据实时性和模型更新机制的不足，使得人工智能系统难以适应动态环境，降低了决策支持效果。此外，人工智能决策的透明性和安全性欠缺，导致系统的可解释性不足，降低了人类的信任度。未来亟需提升人工智能系统的泛化能力，基于“类人建筑”理念，推动“类人脑”模式的实现，其中包括判断、决策、执行及不断进化（类比于神经系统）。具体而言，首先通过数字化构建知识图谱，进而对实时数据进行分析、诊断与判别；利用大数据和云计算技术对数据进行全息诠释与优化；实现物理空间与数字空间的实时互动，确保高效无缝的实施过程；通过机器学习不断训练并创造新知识，从而推动应用场景的创新，完成“类人脑”进化。最终，结合感知与神经系统，系统将具备对洪水、气体泄漏、火灾、爆炸等灾害和事故的自我防卫与抵抗能力，实现快速报警、响应与灾害防御（类比于免疫系统）[46]。

四、超大城市地下空间系统智慧韧性发展策略

（一）实践路径

本文提出了一个“物理–信息–仿真”三域融合与实时数据交互的PISMC框架，明晰了超大城市地下空间系统智慧韧性体系的实施路径，如图2所示。该框架将整合物理域、信息域和仿真域的协同作用，通过融合物联网、数字孪生、人工智能等技术，构建“感知–分析–决策–进化”闭环体系，为超大城市地下空间可持续发展提供理论支撑与实践路径。

1. 物理域：全域实时感知与应急修复

物理域主要包括基于分布式光纤的全域感知技术、受损结构的快速修复技术与装备、多级熔断机制的新型抗灾变韧性结构体系。物理域作为系统的基础层，依托分布式光纤全域感知技术实现对地下空间系统结构状态的实时监测。现场实测或模型试验通过高精度感知设备采集结构动态数据，同时配合受损结构的快速修复技术与装备，采用多级熔断机制的新型抗灾变韧性结构体系，确保在灾害发生时能够及时获取真实现场状态，并快速采取应急修复和增韧措施。

2. 信息域：大数据融合与智能反演

信息域主要包括海量孪生体实体数据和动态智能感知数据的高效融合技术、大数据驱动下的神经网络深度学习、基于施工实时数据的地质参数反演（透明城市地下空间）、基于类脑模型与长期感知数据的韧性评估方法。信息域负责将来自物理域的海量孪生体实体数据与动态智能感知数据高效融合，通过大数据驱动下的神经网络深度学习，实现施工实时数据的地质参数反演，构建透明城市地下空间的实时地质状态图谱。同时，借助类脑模型和长期感知数据，开展韧性评估方法研究，形成高保真数据库，为后续仿真提供准确、实时的参数更新支持。

3. 仿真域：实时迭代的链式灾变模拟

仿真域主要包括基于双层双相物质点法的链式灾变模拟技术、参数的实时更新与迭代技术。在仿真域中，基于信息域传入的实时数据，采用双层双相物质点法构建链式灾变模拟模型。通过参数实时更新与迭代技术，仿真平台能够对地下空间系统在多灾种作用下的变形、损伤扩展以及灾害链式反应过程进行精确模拟，预测结构演变趋势，并将仿真结果迅速反馈给物理域，为现场应急修复和韧性提升提供决策依据。

（二）数据交互与协同

“韧性–智慧”PISMC框架强调3个域数据流的实时高效交互。从物理域出发，无论是现场实测抑或模型试验，通过全域感知技术获取超大城市地下空间系统结构体系的实时状态数据，采集后输入信息域；在信息域里，基于既往案例构建的高保真数据库和本工程采集的实时数据，采用人工智能 / 神

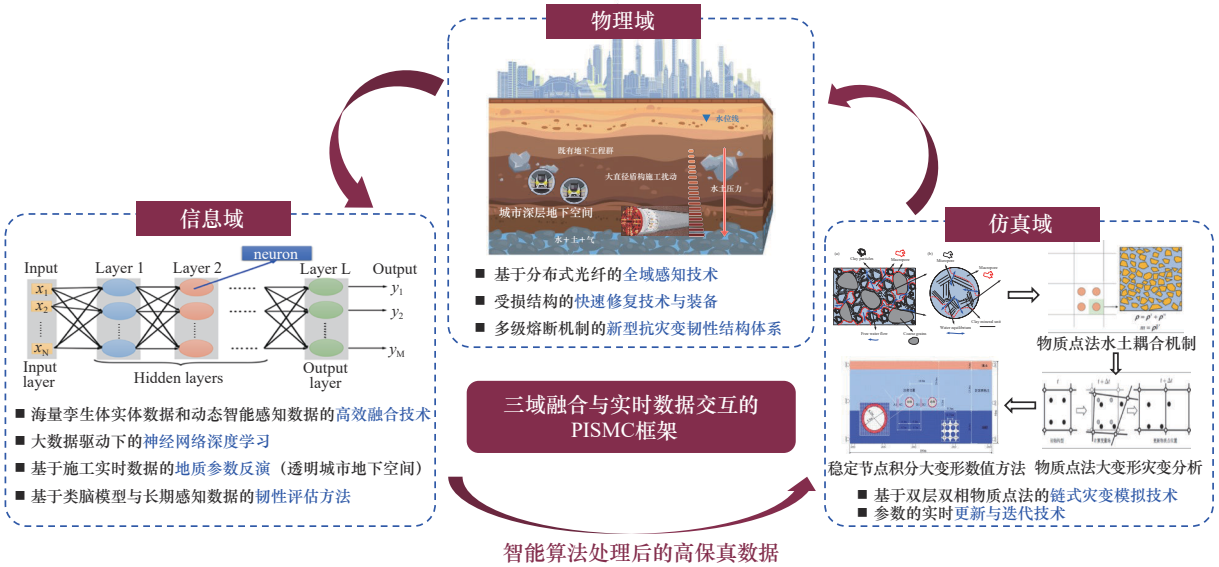

图2　三域融合与实时数据交互的PISMC框架

注：Input为输入；Layer为层次；Output为输出；Hidden Layers为隐藏层；neuron为神经元。

经网络深度学习算法进行处理、反演，更新地质参数，更新地下结构缺陷 / 接触不良信息，数据流入仿真域；在仿真域里，基于信息域流入的数据，采用基于双层双相物质点法的链式灾变模拟技术和参数的实时更新与迭代技术数据，建立实时高效的数值仿真模型进行链式灾变模拟，预测超大城市地下空间系统结构体系的变形发展趋势，流入物理域；在物理域，基于仿真域流入的预测数据，及时采取技术措施，对受损结构进行快速修复和韧性提升，下一阶段重复这个数据流，实现数据的实时交互。

PISMC 框架通过物理域的实时监控、信息域的深度数据融合与智能反演以及仿真域的动态链式灾变模拟，构成一个数据实时交互、反馈闭环的综合管控系统。该框架能够在灾害发生前后实现从状态监测、风险评估、灾变预测到应急修复、结构增韧的全周期动态管控，既满足了超大城市地下空间系统对高韧性和智能化管理的需求，也为智慧城市建设提供了全新的技术路径和管理模式。

五、超大城市地下空间系统智慧韧性保障体系构建

（一）物理域的保障措施

部署分布式光纤传感网络及多参数高精度传感器阵列，结合基于物联网的装备协同网络，实现对环境变量（如温度、湿度、应力、变形）的全域实时精准监测，奠定可靠的数据基础。着力发展快速响应与损伤修复能力，通过研发应用自动化快速修复技术（如原位三维打印、智能注浆）及特种修复装备（如管片修复机器人），并配套建设包含自愈合智能混凝土、高耐腐蚀合金等先进材料的智能材料库及其性能动态数据库，确保损伤发生时能迅速精准启动修复，有效抑制损害蔓延。实施灾变防御与韧性增强机制，核心在于采用多级熔断防护策略（依托结构冗余设计与分级响应系统）以逐级吸收分散冲击能量，同时深度融合 BIM 与 GIS 技术，构建覆盖全生命周期的结构健康档案与数字孪生平台（例如在关键节点预埋形状记忆合金传感器实现形变阈值自动响应），实时映射物理状态。通过高精度感知、快速修复与灾变防御措施协同联动，最终形成“感知–诊断–预警–修复”的闭环响应链，显著增强物理域应对扰动与灾害的整体韧性。

（二）信息域的保障措施

为确保数据全生命周期的安全性与完整性，需实施端到端加密传输机制，并融合区块链技术构建分布式存储网络，实现数据的不可篡改性验证与跨域冗余备份，即使遭遇局部节点损毁仍可保障数据的完整性与服务的连续性，形成抗毁通信拓扑；在智能决策层，支持各区域子系统在严格保护数据隐私的前提下进行分布式模型协同训练，并运用迁移学习技术实现跨场景知识迁移（如将沿海城市洪涝预测模型适配于内陆地质灾害预警），同时结合边缘计算优化实时数据处理效率以降低系统延迟；为强化数据治理与决策可靠性，需建立可信数据链，引入数字指纹技术对传感器数据进行来源认证与完整性校验，并实施严格的数据清洗流程以过滤异常值。上述措施协同作用，构建了从数据安全传输、隐私保护计算到跨域智能决策的全栈保障链条，显著提升信息域在复杂扰动下的抗毁性、决策精准性与系统韧性。

（三）仿真域的保障措施

建立基于异构并行计算（CPU/GPU）与量子辅助加速的混合计算平台，支撑多尺度灾变推演沙盒系统实现纳秒级材料失效模拟至小时级城市灾害扩散的全尺度覆盖；开发物理信息神经网络替代传统有限元模型，将计算效率提升两个数量级，同时通过动态更新算法实时融合感知数据驱动模型迭代，确保仿真状态与实际物理域同步演进；构建对抗式验证体系，引入生成对抗网络合成极端灾害场景（如地震–暴雨–电力中断复合事件），实施数万次压力测试以暴露系统级联失效路径（如地下枢纽疏散方案优化），并基于实际事件反馈持续校准模型参数。通过计算加速、物理机理嵌入与极端场景淬炼的深度协同，显著提升灾变预测的时效性、准确性与决策支撑可靠性。

（四）综合保障措施

为实现物理域、信息域与仿真域的三维协同赋能，需构建全域联动、动态演进、认知驱动的综合保障体系。首先，建立基于统一语义模型的跨域数据共享平台，通过数字线程技术实现多源异构数据

的实时流通与状态同步，支撑全域资源的高效调度；其次，开发韧性成熟度动态评估模型，依托数字孪生平台融合卷积神经网络视频分析、结构传感数据等多模态信息，生成空间化韧性指数热力图（如基础设施风险预警图），并创新性实施“红蓝军对抗”演练机制——红方通过数字孪生体发起复合灾变虚拟攻击（如地震–火灾–通信中断），蓝方借助物理–信息–仿真管理中枢（如PISMC）平台动态调度三域防御资源，持续优化应急响应策略；最后，构建地下空间韧性知识图谱，结构化整合历史灾变案例、处置方案与专家经验规则，形成具备自主进化能力的认知基础设施。通过数据融通、动态评估、对抗淬炼与知识沉淀的四维联动，最终实现复杂灾害场景下系统韧性的闭环优化与涌现式提升。

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: March 28, 2025; **Revised date:** June 26, 2025

Corresponding author: Chen Xiangsheng is a professor from Underground Polis Academy of Shenzhen University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include the resilience evaluation and improvement strategies of underground space in megacities. E-mail: xschen@szu.edu.cn

Funding project: National Natural Science Fund Project (52090084); Chinese Academy of Engineering project “Urban Security Challenges and Countermeasures” (2022-JB-02), “Study on Security Resilience Strategy of Megacities under Extreme Conditions” (2023-HZ-03); National Key R&D Program of China (2022YFC3800905, 2024YFF0507902)

参考文献

[1] Tokyo declaration on urban underground utilization [R]. Tokyo: Proceedings of the 4th International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Buildings, 1991.

[2] Shanghai declaration on urban underground space development and utilization [R]. Shanghai: Global Urban Underground Space Development and Utilization Summit Shanghai (FUUS), 2019.

[3] 上海市人民政府. 上海市城市总体规划(2017—2035年) [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2018.
Shanghai Municipal People’s Government. Shanghai master plan (2017—2035) [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2018.

[4] 中国工程院战略咨询中心, 中国岩石力学与工程学会地下空间分会, 中国城市规划学会. 2023中国城市地下空间发展蓝皮书 [M]. 北京: 科学出版社, 2025.
Chinese Academy of Engineering Center for Strategic Studies, Underground Space Branch of Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, & Urban Planning Society of China. 2023 China urban underground space development blue book [M]. Beijing: Science Press, 2025.

[5] 杨华勇, 江媛, 李喆, 等. 地下空间开发综合治理发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 126–136.
Yang H Y, Jiang Y, Li Z, et al. Comprehensive management strategy of underground space development in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 126–136.

[6] 雷升祥, 赵伟, 雷宇明. 城市地下空间工程韧性提升研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(10): 1627–1636.
Lei S X, Zhao W, Lei Y M. Enhancing engineering resilience in urban underground space [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(10): 1627–1636.

[7] 肖明清, 封坤. 盾构隧道结构韧性设计方法研究 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(8): 204–213.
Xiao M Q, Feng K. Study on the resilient structure design of shield tunnels [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(8): 204–213.

[8] 卢浩, 陈丹鹤, 邓树新, 等. 重大工程设施抗爆韧性设计的思考 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 864–873.
Lu H, Chen D H, Deng S X, et al. Reflection on anti-explosion toughness design in major engineering facilities [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(6): 864–873.

[9] 顾祥林, 余倩倩, 姜超, 等. 城市土木工程基础设施韧性提升理论与方法 [J]. 工程力学, 2023, 40(3): 1–13.
Gu X L, Yu Q Q, Jiang C, et al. Theory and method of resilience enhancement of urban civil engineering infrastructures [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(3): 1–13.

[10] 郑刚, 程雪松, 周海祚, 等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(7): 1–38.
Zheng G, Cheng X S, Zhou H Z, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 1–38.

[11] Admiraal H, Cornaro A. Future cities, resilient cities – The role of underground space in achieving urban resilience [J]. Underground Space, 2020, 5(3): 223–228.

[12] Liu S C, Peng F L, Qiao Y K, et al. Evaluating disaster prevention benefits of underground space from the perspective of urban resilience [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 58: 102206.

[13] Liu S C, Peng F L, Qiao Y K, et al. Quantitative evaluation of the contribution of underground space to urban resilience: A case study in China [J]. Underground Space, 2024, 17: 1–24.

[14] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. 2003, 19(4): 733–752.

[15] Bruneau M. Enhancing the resilience of communities against extreme events from an earthquake engineering perspective [J]. Journal of Security Education, 2006, 1(4): 159–167.

[16] 罗冰洁, 彭芳乐, 刘思聪, 等. 城市地下空间韧性评价指标及模型探讨研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3570–3578.
Luo B J, Peng F L, Liu S C, et al. Evaluation indicators and models of urban underground space resilience [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3570–3578.

[17] 李德智, 吴洁, 崔鹏. 城市社区复合生态系统适灾弹性的评价指

标体系研究 [J]. 建筑经济, 2018, 39(5): 92–96.
Li D Z, Wu J, Cui P. Research on the disaster resilience evaluation index system of urban community complex ecosystem [J]. Construction Economy, 2018, 39(5): 92–96.

[18] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters [J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 598–606.

[19] Wan Z, Chang Z, Xu Y D, et al. Optimization of vascular structure of self-healing concrete using deep neural network (DNN) [J]. Construction and Building Materials, 2023, 364: 129955.

[20] Wan Z, Xu Y D, Zhang Y, et al. Mechanical properties and healing efficiency of 3D-printed ABS vascular based self-healing cementitious composite: Experiments and modelling [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 267: 108471.

[21] Hong C Y, Wang X T, Han K H, et al. Performance investigation of 3D printed clay soil using fiber Bragg grating technology [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(2): 453–462.

[22] 路德春, 廖英泽, 曾娇, 等. 城市地下空间恢复韧性发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 38–44.
Lu D C, Liao Y Z, Zeng J, et al. Development strategy for recovery resilience of urban underground space [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 38–44.

[23] 朱合华, 禹海涛, 韩富强, 等. 穿越活动断层隧道抗震韧性设计理念与关键问题 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 193–204.
Zhu H H, Yu H T, Han F Q, et al. Seismic resilience design principles and key issues for tunnels crossing active faults [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 193–204.

[24] Chen X S, Shen J, Bao X H, et al. A review of seismic resilience of shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 136: 105075.

[25] Han K H, Zhang D M, Chen X S, et al. A resilience assessment framework for existing underground structures under adjacent construction disturbance [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 141: 105339.

[26] Zheng G, Cui T, Cheng X S, et al. Study of the collapse mechanism of shield tunnels due to the failure of segments in sandy ground [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 464–490.

[27] 柳献, 孙齐昊. 盾构隧道连续性倒塌特征分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 913–922.
Liu X, Sun Q H. Characteristics analysis on progressive collapse of shield tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 913–922.

[28] 李鹏飞, 李泽, 葛辰贺, 等. 砂性地层盖挖逆作地铁车站深基坑开挖变形特性及冗余度分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S1): 98–108.
Li P F, Li Z, Ge C H, et al. Deformation characteristics and redundancy analysis of deep foundation pit excavation in metro station using covering top-down method in sandy stratum [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 98–108.

[29] Zhang J H, Wang A X, Zhang L M, et al. Coupling failure mechanism of underground structures induced by construction disturbances [J]. Mathematics, 2023, 11(3): 615.

[30] Zhang D M, Du F, Huang H W, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example [J]. Safety Science, 2018, 106: 230–243.

[31] Wang X R, Koç Y, Derrible S, et al. Multi-criteria robustness analysis of metro networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 474: 19–31.

[32] Zhang J H, Min Q J, Zhou Y, et al. Vulnerability assessments of urban rail transit networks based on extended coupled map lattices with evacuation capability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 243: 109826.

[33] Sun D, Guan S T. Measuring vulnerability of urban metro network from line operation perspective [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 94: 348–359.

[34] Jiang R Y, Lu Q C, Peng Z R. A station-based rail transit network vulnerability measure considering land use dependency [J]. Journal of Transport Geography, 2018, 66: 10–18.

[35] Lu Q C, Zhang L, Xu P C, et al. Modeling network vulnerability of urban rail transit under cascading failures: A Coupled Map Lattices approach [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108320.

[36] D'Lima M, Medda F. A new measure of resilience: An application to the London underground [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 81: 35–46.

[37] 鲁佳慧, 刘家宏, 刘创, 等. 城市排水系统韧性评估研究进展 [J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 1–10.
Lu J H, Liu J H, Liu C, et al. Research progress on urban drainage system resilience evaluation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 1–10.

[38] 段怡嫣, 翟国方, 李文静. 城市韧性测度的国际研究进展 [J]. 国际城市规划, 2021, 36(6): 79–85.
Duan Y Y, Zhai G F, Li W J. International research progress on measuring urban resilience [J]. Urban Planning International, 2021, 36(6): 79–85.

[39] 李亚, 翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究 [J]. 规划师, 2017, 33(8): 5–11.
Li Y, Zhai G F. China's urban disaster resilience evaluation and promotion [J]. Planners, 2017, 33(8): 5–11.

[40] 王海申. 山东省城市韧性时空格局演变特征与提升路径研究 [D]. 曲阜: 曲阜师范大学(硕士学位论文), 2023.
Wang H S. Study on the spatiotemporal evolution characteristics and enhancement pathways of urban resilience in Shandong province [D]. Qufu: Qufu Normal University (Master's thesis), 2023.

[41] 冯仕远. 城市增长背景下济南市城区洪涝模拟研究 [D]. 济南: 济南大学(硕士学位论文), 2019.
Feng S Y. Flood simulation and impact assessment under future urban sprawl in Jinan city [D]. Jinan: University of Jinan (Master's thesis), 2019.

[42] 梁晨. 气候变化背景下的城市旱涝风险应对策略——以河北省与广东省为例 [D]. 石家庄: 河北科技大学(硕士学位论文), 2018.
Liang C. Coping strategies of urban drought and flood risk in the context of climate change—A case study of Hebei and Guangdong provinces [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology (Master's thesis), 2018.

[43] 石勇. 灾害情景下城市脆弱性评估研究——以上海市为例 [D]. 上海: 华东师范大学(博士学位论文), 2010.
Shi Y. Research on vulnerability assessment of cities on the disas-

ter scenario-a case study of Shanghai city [D]. Shanghai: East China Normal University (Doctoral dissertation), 2010.

[44] 杨静, 李大鹏, 翟长海, 等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题 [J]. 中国科学基金, 2019, 33(5): 525–532.
Yang J, Li D P, Zhai C H, et al. Key scientific issues in the urban earthquake resilience [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(5): 525–532.

[45] Napolitano R, Reinhart W, Gevaudan J P. Smart cities built with smart materials [J]. Science, 2021, 371(6535): 1200–1201.

[46] Chen X S, Xia C Q, Cui H Z, et al. Developing humanoid architectural structures for a resilient city [J]. Bridge, 2023, 53(1): 38–43.