

引用格式：陈湘生, 苏栋, 吴泽洲, 等. 我国超大城市地下空间韧性发展路径及战略. 中国科学院院刊, 2026, 41(2): 244-259, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251214002.

Chen X S, Su D, Wu Z Z, et al. Development pathways and strategies for enhancing resilience of underground space in China's megacities. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(2): 244-259, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251214002. (in Chinese)

我国超大城市地下空间 韧性发展路径及战略

陈湘生 苏栋 吴泽洲 韩凯航* 林星涛 曹香鹏 陈伟斌

1 深圳大学未来地下城市研究院 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 深圳 518060

摘要 随着我国城镇化进入“存量提质增效”阶段，超大城市面临资源约束与安全风险的双重压力，地下空间作为城市韧性关键载体，其高质量发展具有紧迫的战略意义。文章系统剖析我国超大城市地下空间发展现状、面临挑战与未来趋势，聚焦“既有空间韧性提升”与“深层空间韧性开发”两大核心议题，提出覆盖“数字底座—智能平台—关键技术—协同治理”的体系化发展路径。文章研究指出，应通过构建三维数字孪生底座、智能监测管控平台、材料—装备—平台协同的韧性提升技术体系，以及跨部门协同治理机制，全面提升地下空间在灾害预防、应急响应与快速恢复方面的能力。针对深层开发，文章提出“规划—设计—施工—运维”全链条科学路径与“规划—运维—政策”协同的韧性治理框架，以期为我国超大城市地下空间韧性发展提供系统性战略参考。

关键词 超大城市，地下空间，韧性，数字孪生，深层开发，治理体系

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20251214002

CSTR 32128.14.CASbulletin.20251214002

随着我国城镇化进入“存量提质增效”新阶段，超大城市面临的资源约束、安全风险与“城市病”问题交织叠加。在《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》（以下简称“十五五”

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金重大项目（52090084），中国工程院行业院重点咨询项目（2025-HZ-08），中国工程院紧急重点咨询项目（2024-JZ-06）

修改稿收到日期：2026年2月3日

规划建议)强调“提高防灾减灾救灾和重大突发公共事件处置保障能力”的背景下,向地下要空间、要资源、要安全,已成为实现可持续发展的必然战略选择。我国城市地下空间开发规模已稳居世界前列,以北京、上海、深圳等为代表的超大城市,已构建起包含交通、商业、市政管廊等功能的庞大地下体系,成为支撑城市运行的重要基石。

然而,规模扩张并未自动转化为高质量与高安全。中央提出建设“韧性城市”的战略目标,强调城市在冲击下维持功能与快速恢复的能力。地下空间作为城市的“里子”,其自身韧性直接关乎全域安全。当前,地下空间正暴露出冗余性不足、稳健性欠缺等短板,凸显出一个核心矛盾:地下空间既是提升城市防灾能力的关键支撑,又可能因环境复杂、治理滞后而成为脆弱性源头。为此,本文系统审视我国超大城市地下空间发展现状,剖析其面临的多维挑战与未来趋势,并聚焦“既有空间韧性提升”与“深层空间韧性开发”两大核心议题,构建覆盖“数字底座—智能平台—关键技术—协同治理”的体系化发展路径与战略框架,以期为推动地下空间从“规模扩张”转向“韧性发展”,建设安全、高效、绿色、智慧的地下系统提供理论支撑与实践指引。

1 超大城市地下空间韧性发展现状、挑战与趋势

“十五五”规划建议指出,“坚持城市内涵式发展,大力实施城市更新,建设创新、宜居、美丽、韧性、文明、智慧的现代化人民城市”。为深入贯彻落实相关精神,深刻把握新形势下中国城市发展规律,

以城市高质量发展为主题,以城市内涵式发展为主线,以城市更新为重要抓手,以地下空间开发利用为重要突破口,应大力推动城市空间结构优化、动能转换、品质提升、绿色转型,加快构建地上地下一体化立体空间治理体系。中国城市地下空间发展以存量空间提质增效为重要方向,通过地下空间治理现代化、风险防控精细化、民生服务人本化、技术装备自主化,为新时代城市高质量发展构筑基石。

随着我国城镇化进入以存量提质增效为主的新阶段,城市发展方式面临深刻转型。地下空间作为宝贵的战略性空间资源,其科学开发利用对于推动城市高质量发展,打造宜居、韧性、智慧城市具有关键意义。2025年7月中央城市工作会议^①和8月《中共中央国务院关于推动城市高质量发展的意见》,均强调了高效利用城市地下空间,优化城市空间结构的重要性。住房和城乡建设部等9部门联合发布相关行动方案^②(以下简称“行动方案”),为地下空间的未来发展指明了方向。

1.1 “世界前列”的规模积累:我国超大城市地下空间开发现状与特征

地下空间韧性并非独立概念,它与城市韧性在核心内涵上深度同构。一个真正具备韧性的城市,必然要求其地下空间系统内嵌并服务于城市的总体抗灾、恢复与适应目标,两者是目标一致、不可分割的有机整体。地下空间是城市韧性的关键物理载体和功能动脉。通过建设综合管廊增强城市生命线的鲁棒性与冗余性,利用智慧平台提升灾后恢复效率与资源调配能力,并规划“平急两用”空间以增强城市适应性,地下空间直接而系统地赋能了城市韧性的各个维度。总

① 中央城市工作会议在京举行习近平发表重要讲话.(2025-07-15)[2026-02-03]. <https://www.news.cn/politics/leaders/20250715/628141404d134324af199c1235d29800/c.html>; 习近平:在中央城市工作会议上的讲话.(2025-07-14)[2026-02-03]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202601/content_7054826.htm.

② 住房和城乡建设部等9部门贯彻落实《关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见》行动方案(2025—2027年).(2025-10-17)[2026-02-03]. https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2025/art_ed034fbfc38f41dca0d3ea39533d9bd3.html.

而言之，地下空间韧性是城市韧性不可或缺的物理基础、功能载体和战略纵深。一个真正“抗得住、扛得过、恢复快”的韧性城市，必然拥有一个安全、可靠、智能、富有韧性的“隐形之城”。未来，随着“行动方案”的深入推进，地下空间的韧性建设将成为深化城市安全韧性提升行动、打造现代化人民城市的关键战场^[1]。

我国超大城市地下空间的开发，在经历以轨道交通和房地产驱动的高速规模扩张后，已积累了巨大存量。截至2024年底，中国城市地下空间累计建筑面积35.21亿平方米，开发利用总量位居世界前列。当前，其发展正与国家的宏观战略同频共振，呈现出新的特征^[2]。

(1) 开发的根本目标与城市发展范式转变深度绑定。中央城市工作会议指出，“认真践行人民城市理念，坚持稳中求进工作总基调”“以推动城市高质量发展为主题，以坚持城市内涵式发展为主线”。在此背景下，地下空间开发已超越单纯“向下要空间”的工程思维，成为“优化城市空间结构”、践行“集约高效”发展方式的核心手段。例如，通过建设地下交通系统和停车设施，能有效疏解地面交通压力；通过将商业、市政等功能转入地下，能为城市置换出更多的地面公共绿地和开放空间。这标志着地下空间的角色，正在从被动承载转向主动优化城市功能与形态^[3-6]。

(2) 地下空间已成为增强城市安全韧性的关键支撑。2025年7月，中央城市工作会议指出，“以建设创新、宜居、美丽、韧性、文明、智慧的现代化人民城市为目标”，将“韧性”列为现代化人民城市建设目标之一，并专门要求“统筹利用地上地下空间，加强‘平急两用’公共基础设施建设”。地下空间因其固有的恒温、恒湿、稳定和抗震等物理特性，被公认为是构建城市防灾减灾体系的天然载体。其韧性价值主要体现在两方面：①作为“平急两用”的应急空

间，可提供避难场所、物资储备库和应急指挥中心；②作为城市生命线的“主动脉”，通过容纳综合管廊、地下变电站、深层排水调蓄隧道等核心基础设施，能显著减少风险暴露，保障城市在极端情况下的基础运行能力。“行动方案”中部署的“城市生命线安全工程”，正是通过物联网感知设备对地下管线、隧道等进行实时监测，以科技手段强化这一韧性基座^[7-11]。

(3) 智慧化正成为提升地下空间治理效能的新引擎。中央城市工作会议倡导“着力建设便捷高效的智慧城市”，“行动方案”则全面部署了以数字化、网络化、智能化赋能新型城市基础设施建设的任务。这为我国地下空间的精细化管理提供了路径。“行动方案”提出的推动地下管网“一张图”建设、深化建筑信息模型（BIM）技术应用，以及完善城市信息模型（CIM）平台等举措，旨在破解地下空间“看不见、摸不清”的痛点。通过构建全域感知、三维可视的数字孪生体，实现从规划、建设到运维的全生命周期智慧管理，是当前地下空间领域技术升级的鲜明趋势^[1,12-15]。

1.2 “多重挑战”交织的现实困境：地下空间韧性发展面临的问题剖析

我国超大城市地下空间韧性发展面临多维度、系统性的挑战，这些挑战既源于地下空间自身环境的复杂性与隐蔽性，也与快速城市化进程中规划、建设、管理等多环节的不协调密切相关，具体可凝练为以下4个方面。

(1) 浅中层存量空间改造困难重重。城市更新背景下，大量既有浅中层地下结构存在韧性缺陷，但改造提升面临现实瓶颈。产权关系复杂导致责任主体与利益分配难以协调，改造工程自身技术风险高且对城市运行干扰大。更关键的是，当前缺乏针对老旧地下结构韧性评估与提升的专用标准、技术体系和成本效益模型，使得大量存量空间成为韧性网络的薄弱环节。

(2) 深层开发面临基础理论“真空”。向深层（50米以深）进军是趋势，但极端地质环境对全生命周期韧性构成根本性科学挑战。适用于深层岩土体的力学与工程响应理论严重滞后，对强震、岩爆等灾害机理认知不足，深层火灾、应急救援等研究几近空白。全生命周期运维与健康保障同样缺乏理论指导和数据支撑，导致深层开发本质安全缺乏科学基石。

(3) 气候变化引发新型复合灾害链。全球变暖背景下，“地下水缓慢抬升”与“极端降雨瞬时内涝”的耦合效应构成新型“灰犀牛”风险。地下水位上升持续侵蚀结构安全储备，特大暴雨则可能引发脉冲式上托力与洪水倒灌“内外夹击”，这种“缓变—突变”耦合灾害超出了传统“以排为主”的防灾设计思路，暴露出现有地下空间应对复杂水文序列的系统脆弱性。

(4) 体制机制与管理存在系统性制约。韧性提升的根本障碍在于治理体系。国家层面统领性法律缺失导致关键问题无“法”可依，规划协同与传导机制不畅。“多头管理、条块分割”的治理结构难以应对跨系统复合灾害，信息壁垒阻碍统筹联动。全生命周期安全监管存在“重建设、轻运维”漏洞；同时，市场化机制不健全与社会参与不足，制约了共治基础的形成。

有鉴于此，我国超大城市地下空间韧性发展正处在关键节点，挑战横跨技术攻坚、理论突破、灾害应对和治理变革多个层面，亟需系统性解决方案为构建安全可持续的“地下生命线”扫清障碍。

1.3 “数智韧性绿色”融合的未来图景：地下空间高质量发展趋势展望

我国超大城市地下空间的未来发展，正从规模扩张，转向以“数智化、韧性、绿色、低碳”为核心的高质量发展。这不仅是行业的内在需求，更是响应“十五五”期间筑牢防灾减灾智慧防线、构建现代化城市安全体系的必然要求。在此导向下，构建安全、

高效、可持续的地下空间高质量发展新范式意义重大。

(1) 数智化与智能建造驱动的全生命周期精准管控。大数据、人工智能与数字孪生技术正破解地下空间“不可见”难题。通过构建高精度三维地质与工程模型，实现规划设计的可视化模拟与风险前置规避。智能建造（如人工智能风险预测、智能盾构）提升施工安全效率，而基于物联网的智慧运维系统则能实时感知结构健康，变“被动抢险”为“主动防控”，实现从规划、建造到运维的全流程数字化精准管控。

(2) 构建平急结合的城市韧性地下生命线。未来韧性内涵超越结构坚固，更强调系统的可恢复性与自适应能力。在工程层面，发展基于性能的设计与可修复的预制装配式结构，结合智能监测构建损伤感知与评估体系。在系统层面，通过前瞻性规划，将地下空间深度融入城市防灾体系，建设具备“平急两用”功能的调蓄设施、应急物资库与疏散通道，强化其作为保障城市核心功能运行的韧性基座作用。

(3) 贯彻以人为本的绿色生态开发理念。发展导向正从单一功能承载转向环境品质与人文关怀。通过应用光导照明、垂直绿化与高效环控技术，显著改善地下空间的自然感与舒适度。同时，积极开发地下智慧停车、公共文化与体育设施等新场景，直接解决民生痛点，将更多地面空间释放给市民与绿化，提升城市整体宜居性。

(4) 全链条服务城市“双碳”战略。低碳实践贯穿全生命周期，在减排层面，推广绿色建材与装配式工艺以降低建造能耗，利用地下恒温特性实现运行节能。在系统贡献层面，探索将地下空间作为城市能源转型节点，用于大规模地热开发、压缩空气储能等，以支撑可再生能源稳定利用，为城市碳中和作出净贡献。

综上所述，数智化是实现精细化管控的使能技术，韧性是应对不确定性的根本保障，绿色与低碳是

可持续发展的内在要求。这四大趋势相互关联、协同作用，共同引领我国超大城市地下空间迈向更安全、高效、宜居与可持续的未来。

2 超大城市既有地下空间韧性提升路径

超大城市既有地下空间规模巨大，但普遍存在韧性短板，其提升是城市安全更新的迫切需求。本部分以“感知—评估—提升—协同”为主线，提出覆盖“数字底座—智能平台—关键技术—管理协同”的韧性提升体系。首先，通过构建三维数字底座与数字孪生模型，破解地下空间“底数不清”的治理瓶颈；进而，构建“物理—信息—仿真”三域融合的智能监测管控平台，实现从全息感知到智能决策的闭环；在此基础上，系统阐述材料增韧、装备修复与平台评估等关键技术，形成“材料—装备—平台”三位一体的韧性提升方案；最后，提出以跨部门协同为核心的治理机制，通过场景化阈值驱动响应与资源一体化调度，实现从技术韧性到管理韧性的系统跃升。

2.1 “底数不清”到“一图统管”：构建地下空间三维数字底座与数字孪生模型

针对地下空间在规划、建设和管理等方面存在的问题，《城市地下空间开发利用管理规定（2011年修订版）》强调将地下空间纳入城市总体规划、专项规划并实行统一管理，《自然资源部关于探索推进城市地下空间开发利用的指导意见》进一步要求开展地下空间资源调查、完善权属表达、构建监测监管体系，《“十四五”国家信息化规划》提出要完善城市信息模型平台和运行管理服务平台，探索建设数字孪生城市，实现包含地下空间的城市“一张图”数字化管理，以及“一图统管”模式。

针对超大城市地下空间目前仍存在底数不清、信息不全、“信息孤岛”等问题^[16]，建议在前述政策框架下，建立跨部门数据汇聚机制，系统梳理并整合各类工程的地质资料，以及地下建（构）筑物、管线等

资料。对于地质资料缺失或现状不明的区域，采用勘探、物探进行补充探测与实地排查，全面掌握地下岩土层分布、水文地质条件等信息，精准查明岩溶、空洞、活动断裂等不良地质作用的范围与风险。通过既有地下空间的系统性的资料整合、校核和排查，确认既有地下建筑、交通设施、综合管廊、管线等的精确空间位置和服役状态。在底数调查过程中，可同步推进权属厘清、用途登记、空间分类与边界划定等工作。

建议由城市核心职能部门牵头，联合地下空间各权属单位，基于统一的空间基准与数据标准，共同建立城市地下空间三维统一数字底座^[17]。为实现数据的动态更新与管理，必须建立明确的权责清单、数据汇交和共享机制。规定各部门在新建、改建工程竣工后，须及时更新并提交经审核后的数据信息至数据底座，确保底数清晰、更新及时、来源可溯，从而形成共建、共治、共享的地下空间数据治理新格局。

应加快构建城市级别的地下空间数字孪生模型，以物理实体信息为基础，通过对地下建筑、管线设施、地质条件、人员活动和机械设备等要素的系统化采集，实现地下空间核心数据的持续汇聚和特征抽取^[18]。构建由几何模型、物理模型、行为模型和规则模型组成的虚拟表达体系，使地下空间结构形态、运行特征和管理需求能够在数字环境中准确呈现^[19]（图1）。进一步通过统一标准体系和跨部门数据共享，形成可验证、可追溯、可持续演化的数字孪生模型^[20]，为提升城市资源配置能力、治理效能和安全韧性奠定坚实基础。

2.2 “物理—信息—仿真”三域融合：打造智能监测与管控平台

以“感知—决策—进化”机制为目标，构建并优化基于“物理—信息—仿真”三域融合的监测及智能管控平台。需夯实理论与框架基础，明确韧性提升的核心逻辑。建议将地下空间韧性界定为多特征综合

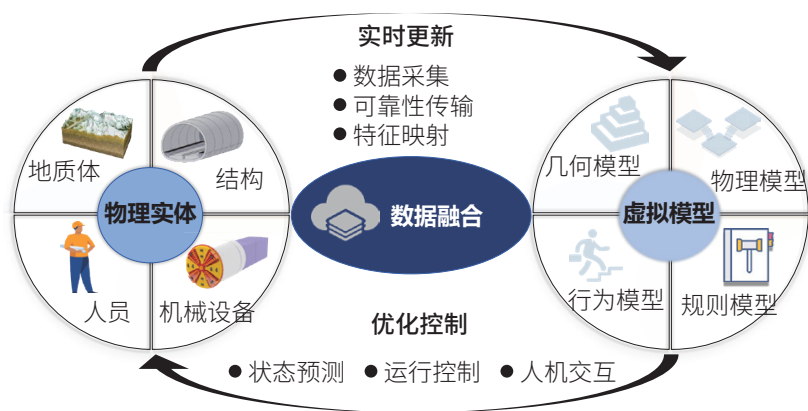


图1 地下空间数字孪生模型架构

Figure 1 Digital twin model architecture for underground space

体，强化“物理—信息—仿真”三域协同理念^[1]，推动物理域的全域感知、信息域的数据整合与仿真域的情景推演深度联动，破解传统平台感知与决策、仿真与实际脱节的问题，为后续技术落地与功能构建提供系统性理论支撑。

在技术体系搭建上，建议采用“六层递进式”架构，以全息感知为核心导向，实现全链条技术赋能，构建覆盖“感知—传输—存储—分析—决策—指挥”的闭环管控体系（图2）。**感知层**需全面部署分布式光纤传感（DFOS）、微机电系统（MEMS）多参数传感器，搭配无人机自组网（UAV-Mesh）技术，精准捕获位移、应变等多场耦合参数，同时通过无人机巡检填补地下盲区监测空白^[21,22]；在此基础上，集中攻关全息全域感知技术，针对地下空间信号遮挡、环境干扰导致的数据偏差问题，通过优化传感设备布局、提升信号抗干扰算法等方式，实现隐蔽区域、结构薄弱部位的毫米级高精度监测，保障感知数据的全面性、一致性与可靠性，为“感知—决策”环节筑牢数据根基，构建无死角、高精度的感知网络。**传输层**优先采用远距离广域网（LoRa-WAN）与第5代移动通信技术/窄带物联网（5G/NB-IoT）边缘网关组合方案，保障海量数据低时延回传，依托边缘节点完成本地数据预处理与异常阈值过滤，降低云端算力负荷^[23]。**存储**

—计算层需构建“城市信息模型+建筑信息模型+地理信息系统”（CIM+BIM+GIS）融合数据库，将宏观的城市地理环境、中观的地下空间结构与微观的构件设备信息在统一的空间坐标系下进行关联，打破“信息孤岛”。在此基础上，依托数据湖（Data Lake）存储海量多源原始数据，结合Iceberg开放表格式提供的类数仓能力，兼顾灵活性与高性能查询；通过Kafka分布式流处理平台接入实时数据流，利用流批一体分布式计算引擎实现实时“抽取+转换+加载”、关联分析与复杂事件处理，构建端到端的高性能实时数据湖架构^[24]。**分析层**应引入LSTM-GAN、GNN等先进算法，重点突破异常检测、结构健康评估等功能^[25]；同时，深入研究多灾害链式耦合模型，形成针对性关键节点阻断策略与灾害蔓延控制方案，让仿真域的情景推演更贴合实际，提升平台对复合灾害的预判与防控能力。**决策层**需搭建数字孪生平台，融合知识图谱与红蓝对抗演练机制，实现灾害情景模拟、分级预警指令自动生成与应急资源智能调度；同步构建智慧韧性动态评估体系，融合数据—知识混合驱动模式，打破传统事后评估的局限，推动韧性评估从事后总结向事前预防转变，为决策层提供动态、精准的韧性优化依据。**可视化指挥层**应配置三维地理信息系统（3DGIS）/数字孪生大屏与统一调度中心，达成全域

状态全息呈现、实时图谱化展示与跨部门联动指挥，提升管控效率。此外，为实现“决策—进化”的长效反馈，需探索自适应材料—结构协同技术，研发自感知、自修复高韧性材料，实现地下空间结构的智能进化，持续夯实三域融合平台的韧性基础。

2.3 “材料—装备—平台”三位一体：突破既有地下空间结构韧性提升关键技术

面向超大城市既有地下空间的韧性提升，核心在于以体系化思路构建韧性设计、材料增韧、装备高效修复与平台智能决策的深度协同格局，实现“事前预测—事中调控—事后快速恢复”全流程闭环，全面支撑城市生命线工程的安全与可持续运行。韧性提升体系强调“材料—装备—平台”三位一体的耦合作用，通过量化韧性目标，将材料性能提升、结构节点优化、智能化运维与实时数据反馈纳入统一设计框架，协同提升结构鲁棒性、界面可恢复性及全生命周期的运行韧性，为复杂灾害情景下实现地下空间的可计算、可校核、可比选和可持续韧性设计奠定基础。

韧性提升材料层面不再追求单一力学指标的极值，而是在复杂荷载与环境作用下形成高强高韧的复合体系。通过网格增强与多尺度纤维协同，让材料在静—动荷载、冲击扰动与微裂纹扩展中实现能量耗散与裂缝控制^[26]；通过揭示界面微观损伤—宏观性能关

联机制，构建贴近真实服役状态的耐久性评价框架；还可通过创新骨料机械锚固主导的界面形貌量化方法，使修复层成为结构功能的延伸；结合完善防水材料的复合构造与工艺创新，使地下空间韧性提升提供材料保障。

增韧装备侧聚焦在地下受限空间、复杂构造与安全约束下实现“快修—强修”。通过高压水射流破拆技术，在保护钢筋与完好基体的前提下定域破除劣化混凝土^[27]，降低次生损伤；构建低回弹的高韧性喷射修复工艺，实现“修复即强化”；利用三维感知、臂架运动学建模与挠度补偿，打造具备数字孪生能力的末端定位系统；采用模块化集成，使破拆修复系统快速切换并在受限环境下高效部署，形成以感知支撑控制、以集成提升效率的稳定体系。

韧性评估平台层面以监测数据驱动韧性评价，构建从节点到网络的时变分析框架，在功能、时间、成本三维空间中推演灾变场景下的演化路径；依托知识图谱与推理^[28]，将地下空间本体知识结构化，支撑方案检索与方案生成；通过数据库、模型库、知识库与交互系统组成的平台架构，把监测、评估、方案、执行与反馈贯通，成为韧性提升的“操作系统”^[29]；强调方案可复制、机制可移植，让决策过程“说得清、算得明、做得到、看得见”。



图2 监测及智能管控平台架构

Figure 2 Monitoring and intelligent control platform architecture

面向超大城市，韧性提升技术体系的价值在于构建地下空间的“快恢复、智适应”能力：材料提供冗余与界面协同，装备保障现场快速、质量稳定，平台将复杂性收敛为可执行方案。未来将进一步强化多尺度、多学科耦合，材料侧走向智能化与功能化，装备侧提升在线感知与自治控制，平台侧融入跨部门的管理韧性，最终形成“材料—装备—平台—管理”协同标准与流程，让韧性提升从项目能力上升为城市能力，在灾链扰动中实现功能保持与快速恢复。

2.4 “信息孤岛”到“协同作战”：强化跨部门协同提升管理韧性

超大城市既有地下空间系统性强、连通度高，当发生暴雨内涝、结构损伤等风险时，易引发跨区域、跨系统连锁反应。当前，管理碎片化导致的“信息孤岛”、权责壁垒，以及协同不足是导致应急响应滞后的主要制度瓶颈。提升地下空间韧性，须将跨部门协同作为关键治理任务，并与空间数字化、监测智能化同步推进^[30]。

针对当前地下空间应急管理中存在的被动响应、信息分散与协同效率低下等问题，应构建场景化阈值驱动的主动防控与联动机制^[1]。该机制以城市地下空间三维数字底座与数字孪生平台为支撑，融合气象、地质、设施实时运行等多源数据，设定科学分级预警阈值，实现“感知—识别—触发—处置”的全链条响

应模式^[20]（图3）。一旦阈值触发，系统能够自动生成跨部门协同处置工单并推送至统一指挥调度平台，召集相关部门开展联合会商，并将研判结论直接转化为封控、疏散或抢修等执行指令。该机制的有效运转，依赖于跨部门数据汇交制度的完善与数据语义的标准化统一。

建议由市级应急管理部门牵头，系统整合当前分散于各部门的泵站、应急电源、专业队伍及装备等关键资源，构建全市统一管理、动态更新的“应急资源池”与电子调度地图^[31]。在此基础上，制定分区域、分灾种的资源预置与调度预案，提高资源投送的精准性与即时性。应定期开展多部门联合实战演练与数字孪生平台桌面推演，将演练制度化、常态化，明确年度综合演练要求，重点磨合指挥流程、检验资源调度效率、规范现场协同接口，并通过制定标准化的责任移交文书等配套文件，确保应急响应全程可追溯、可操作。

应将协同效能纳入考核评价体系，以形成长效治理机制。建议将数据共享质量、联合响应时效、关键功能恢复时长等指标纳入城市地下空间韧性评估体系，并与部门管理绩效挂钩^[32]。依托数字孪生平台定期开展能力评估，形成“评估—整改—复核”的治理闭环。通过地方细则进一步明确协同工单、数据接口

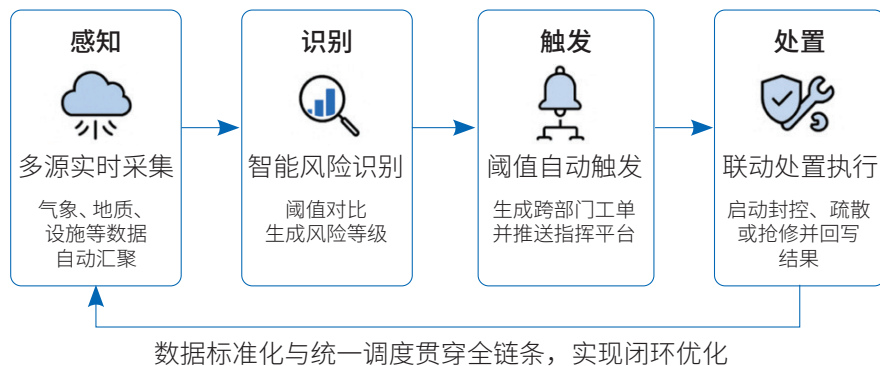


图3 阈值驱动的全链条响应模式

Figure 3 Threshold-triggered full-chain response model

与指挥职责，推动跨部门协同从临时协作固化为常态化制度韧性，为地下空间运维更新与绿色低碳改造奠定坚实管理基础^[33]。

3 超大城市深层地下空间韧性发展战略

向深层（50米以深）进军是拓展城市空间资源的战略方向，也是韧性建设的前沿领域。未来，深层地下空间将超越单一的交通、仓储功能，向多功能、网络化、立体复合形态发展。其核心功能可大致分为以下3类：①城市极端灾害下的“终极安全避难所”与战略物资储备空间；②深层能源（如地热、压缩空气储能）开发利用与输配的关键节点；③城市智慧物流、数据中枢等新型基础设施的载体，与地面功能互补的“逆向城市”形态。这种功能与形态的转型，是深层空间韧性价值实现的基础。然而，深层开发面临地质环境复杂、灾变机理不明、技术标准缺失等科学挑战。本部分以“规划—设计—施工—运维”全链条为主线，提出深层地下空间韧性发展的科学路径与技术体系。首先，从区域地质环境响应机制出发，建立多场耦合模型与可开发性评价理论；进而，聚焦深层土—结构—环境耦合效应，发展全寿命韧性设计方

法；针对施工扰动灾变，构建智能预警与变形控制技术体系；最后，提出“规划—运维—政策”协同的韧性治理框架，推动深层地下空间从单一工程安全向系统韧性、从技术突破向制度保障的战略转型。

3.1 “规划—设计—施工—运维”全链条贯通：深层地下空间韧性开发科学路径

以超大城市深层地下空间韧性开发为总目标，以韧性地下结构体系为落脚点，以岩土体—深层地下结构相互作用为主线，构建贯穿“规划—设计—施工—运维”的整体科学路径（图4）。

（1）提出涵盖地质环境效应评估的深层地下空间韧性规划方法。从区域尺度出发，以深层地下空间地质环境效应响应机制为核心，系统识别深部地层原生应力场、渗流场与温度场的演化特征，建立适用于超大城市的多场耦合数学物理模型；定量分析地下空间集中开发、分期开发及超深开挖等扰动情景下，对地应力重分布、渗流通道重构及热环境演变的影响规律。进一步，结合不良地质体、结构面及构造带等因素，揭示深层地下空间与区域地质环境的长期“协调—失衡—再协调”过程，提出基于地质环境韧性的可开发性评价理论与适宜性分区方法，形成服务于超大

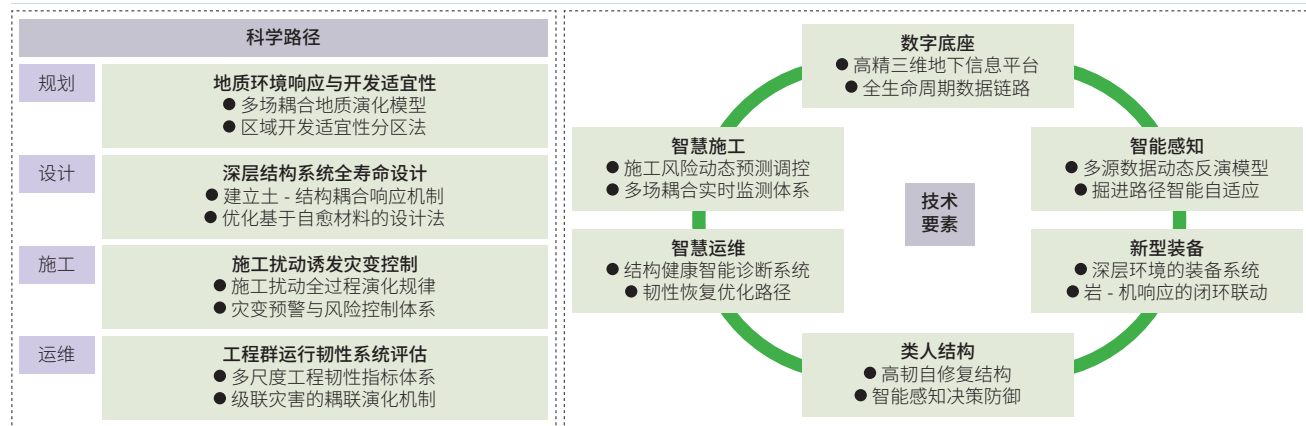


图4 超大城市深层地下空间韧性发展战略

Figure 4 Resilience development strategy for deep underground space in megacities

城市深层地下空间总体布局、功能分区和开发顺序优化的决策支撑体系。

(2) **建立面向全寿命周期的深层地下结构韧性设计理论。**面向深层地下结构全寿命韧性设计,聚焦“深层土—结构—环境”三者耦合效应,系统研究土体与结构刚度差异及深层土本构特性对结构受力与变形模式的影响,构建考虑高地应力、高渗透压及环境侵蚀的深层土—结构分析模型。通过动三轴试验、离心模型试验等手段,获得高地应力—高渗透压条件下深层土动力变形与强度参数,建立适用的动力弹塑性本构模型;结合高轴压比地下结构构件拟静力试验与抗震离心模型试验,识别深层地下结构在强震与持续侵蚀作用下的损伤演化路径与破坏模式,构建时变地震易损性模型。在此基础上,发展基于耗能元件的可恢复地下结构体系及基于自愈合超高性能混凝土的性能提升设计方法,形成面向全寿命周期的深层地下结构韧性优化设计框架。

(3) **构建针对深层施工扰动与灾变的安全韧性保障体系。**针对深层地下空间施工阶段易诱发的扰动-灾变问题,以超深基坑和深层隧道为代表工程类型,系统分析开挖卸荷应力路径作用下深层土体的力学响应与扰动—灾变时空演化规律,构建涵盖启动、扩展与失稳全过程的灾变机理模型。充分考虑深层土体水力耦合特性,建立水—土—结构耦合条件下施工扰动的概化模型与全过程数值分析方法,揭示高水压渗透破坏、集中卸荷塌落以及邻近结构协同变形等控制机理。结合实际工程,开展多工况数值模拟与数据反演,提炼邻近结构变形主控因素与典型响应模式,引入机器学习与快速识别技术,形成施工扰动智能预警、变形控制与灾变预防技术体系,支撑深层地下空间施工阶段的韧性保障。

(4) **建立适用于深层地下空间工程群的韧性评估与提升理论。**立足超大城市深层地下空间工程群运行阶段,以“结构—地层—功能系统”一体化安全为目

标,综合运用模型试验、数值仿真和现场监测等手段,系统研究施工扰动、地震荷载、环境侵蚀及结构劣化耦合作用下岩土体—工程系统的灾变动力过程,揭示多致灾因子驱动下地下工程群的级联失效与耦联灾变机制。基于复杂网络理论,对深层地下空间工程群进行网络拓扑建模,引入层次分析方法构建多尺度韧性指标体系,从单体结构、地层介质到工程群系统3个层级表征其易损性、鲁棒性、冗余性与可恢复性,建立面向超大城市的深层地下空间工程群耦联韧性评估模型。进一步,从系统布局优化、关键节点韧性加强与功能恢复路径设计等方面提出深层地下空间韧性提升策略,形成支撑超大城市深层地下空间韧性发展战略实施的成体系科学技术路线。

综上,为实现深层地下空间对城市及自身韧性的双重提升,需构建“理论—方法—技术”3层级指引体系:在理论层面,发展基于多场耦合与复杂系统科学的深地工程韧性理论,阐明其与城市大系统互馈机理;在方法层面,完善涵盖“风险智能感知—性能动态评估—恢复路径优化”的全生命周期韧性管理方法学;在技术层面,则依托前述数字孪生、智能装备与类人结构等技术集群,形成可感知、可计算、可调控的韧性赋能工具体系。通过3层级协同,方能将深层地下空间从“静态工程”转化为城市动态韧性系统的核心组成部分。

3.2 “数字孪生+智能装备”双轮驱动:深层地下空间韧性开发关键技术体系

以超大城市深层地下空间韧性发展战略为牵引,实现从单工程安全向地下空间系统韧性的整体跃迁,总体路径应立足保障深层地下空间全寿命周期韧性这一关键目标。围绕深层地下空间这一“第四空间资源”,构建“物理—信息—仿真”三域耦合的数字基础设施,叠加智能感知、智能决策与自适应结构体系,为城市在极端工况和多灾耦合作用下提供可感知、可预测、可恢复的地下安全屏障^[34]。

(1) **构建面向深层地下空间的高精度三维数字底座。**依托多源异构数据（钻探、物探、BIM/GIS等），建立深层地下空间“一张三维底图”和高保真数字孪生体，实现地层结构、地下工程及市政管线的统一表达与动态更新；引入“物理—信息—仿真”协同框架，打通规划—设计—施工—运维的全生命周期数据链，为灾变情景推演、韧性评估与优化决策提供统一计算平台^[35,36]。

(2) **发展深层数字勘探与智能地质感知装备体系。**面向百米级深层环境，集成超前地质预报、地震与电磁成像、孔内监测等手段，与机器学习反演算法耦合，形成可实时更新的不确定地质模型；在机械化隧道掘进施工与深竖井施工中，引入“岩—机数字孪生”，通过刀盘载荷、震动与姿态等多源传感数据在线反演围岩类别与结构面分布，实现“边掘进、边勘探、边校正”的智能地质感知与路径自适应优化^[37]。

(3) **打造面向深层复杂工况的新型智能施工装备与工法。**构建具备自适应转矩与推力控制的高压智能机械化隧道掘进施工，联接数字孪生平台，实现掘进参数与围岩响应的闭环调整；发展适配高地应力、高水压环境的可换刀、可模块重构刀盘与高效排渣系统，并与机器人辅助检修装备耦合，降低深层作业风险。同时，在深层地下公共空间与枢纽节点中，探索“类人地下建筑结构”。通过模块化“器官单元”与“中枢神经”式智能管控中枢，将环境感知、流线调控、应急疏散与结构健康监测纳入同一决策体系，使地下建筑群具备类似生命体的自感知、自调节与局部自愈能力^[38]。

(4) **构建深层地下空间智慧施工与运维一体化平台。**施工阶段，依托数字孪生与物联网传感网络，对开挖面、支护结构、围岩及邻近既有结构实现多物理场实时监测，结合智能风险识别与主动控制算法，形成对突水突泥、拱顶失稳与大变形的动态预警和施工参数联动调整；运维阶段，面向隧道、综合管廊及类

人地下建筑群，构建集结构健康诊断、环境与能耗管理、人流行为感知于一体的智慧运维系统，实现病害早期识别、功能退化趋势评估与韧性恢复路径自动生成，为灾前减灾、灾中应急与灾后快速恢复提供技术支持^[39,40]。

总体而言，通过以数字孪生和智能感知为核心的基础平台、以新一代智能装备和工法为抓手，并嵌入具有人本响应与自适应特征的类人地下建筑结构，可形成支撑超大城市深层地下空间韧性发展战略的成套技术要素体系，为未来极端情景下城市安全运行和功能快速恢复提供坚实的“深层韧性底盘”^[41]。

3.3 “规划—运维—政策”协同发力：构建深层地下空间韧性治理体系

深层地下空间的韧性建设不仅依赖技术突破，也需在规划、运维和政策等方面形成系统化的管理框架，使其融入超大城市整体治理。由于深层地下空间范围广、耦合度高、责任主体多元，其管理体系应围绕“空间规划—运维治理—政策保障”3个层面构建协同机制，推动从工程技术到城市韧性能力的有效转化^[4]。

(1) **规划层面。**应将深层地下空间纳入国土空间总体规划和相关专项规划，形成与地上及浅层空间协调的多层级布局^[42]。关键区域应预留冗余空间，并开展地质安全、水文影响及邻近结构交互评估，避免后期冲突。重大基础设施应进行一体化设计，并在关键节点预留通风、设备更新及节能改造接口，在不影响主体功能的前提下增强系统适应性与可持续性。

(2) **运维层面。**应建立“监测—感知—分析—处置”的闭环运行机制，构建覆盖结构安全、环境参数与设备状态的多源监测体系。依托城市级智能管控平台，整合数据、工单与应急流程，实现可视化监控与闭环管理^[43]。明确运维责任边界，推行基于性能的维护模式，并将设施可用率、响应时效与能效指标纳入考核体系。对高耗能系统优先采用高效设备与智能调

控, 兼顾运行经济性与应急可靠性。

(3) **政策保障层面**。需通过法规、资金与协同机制实现制度支撑, 完善深层地下空间在规划审批、权属界定、安全责任等方面的法律法规, 增强管理可执行性^[1]。设立长效投入与改造基金, 支持设施安全加固、数字化升级与监测体系建设。建立跨部门信息共享与会商机制, 推动自然资源、住建、应急、交通等部门在规划、建设与运营阶段协同联动。对具备显著节能与安全效益的改造项目, 可予以财税激励, 促进绿色低碳与韧性提升的协同实现^[12]。

4 结语

我国超大城市地下空间正从“规模扩张”转向“韧性发展”的新阶段。面对气候变化、灾害链耦合与城市运行风险交织的复杂挑战, 地下空间韧性已成为城市安全可持续发展的生命线。本文系统提出“既有空间韧性提升”与“深层空间韧性开发”双轮驱动的发展框架, 强调以数字化、智能化技术为引擎, 以“材料—装备—平台”协同为支撑, 以跨部门治理为保障, 构建“可感知、可预测、可恢复”的地下韧性体系。

展望未来, 地下空间韧性建设需进一步融入城市整体安全战略与“双碳”目标, 推动“地上下、浅深层、规建管”全系统协同。通过加强基础理论研究、突破智能装备与数字孪生关键技术、完善法律法规与标准体系, 为超大城市应对不确定风险、实现高质量发展提供坚实的地下支撑。在全球城市普遍面临高密度运行与复合风险挑战的背景下, 我国超大城市地下空间韧性发展路径的系统探索, 有望为国际城市地下空间治理提供可借鉴的中国方案。

参考文献

- 1 韩凯航, 黎俊轩, 陈湘生, 等. 超大城市地下空间系统智慧韧性发展策略研究. 中国工程科学, 2025, 27(4): 95-105.

- Han K H, Li J X, Chen X S, et al. Development strategy for intelligent resilience of underground space system in megacities. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 95-105. (in Chinese)
- 2 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, 中国城市规划学会地下空间规划分会. 2025 中国城市地下空间发展蓝皮书. 北京: 科学出版社, 2025. Strategic Consulting Center of Chinese Academy of Engineering, Underground Space Branch of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, Underground Space Planning Branch of Urban Planning Society of China. 2025 Blue Book on Urban Underground Space Development in China. Beijing: Science Press, 2025. (in Chinese)
- 3 杨华勇, 江媛, 李喆, 等. 地下空间开发综合治理发展战略研究. 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. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 126-136. (in Chinese)
- 4 雷升祥, 赵伟, 雷宇明. 城市地下空间工程韧性提升研究. 隧道建设, 2023, 43(10): 1627-1636. Lei S X, Zhao W, Lei Y M. Enhancing engineering resilience in urban underground space. Tunnel Construction, 2023, 43(10): 1627-1636. (in Chinese)
- 5 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. 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. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(5): 525-532. (in Chinese)
- 6 上海市人民政府. 上海市城市总体规划(2017—2035 年). 上海: 上海科学技术出版社, 2018. Shanghai Municipal People's Government. Shanghai master plan (2017-2035). Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2018. (in Chinese)
- 7 龙浩瑜, 陈焰明, 郭瑞. 城市地下空间开发利用初步研究与应用浅析. 新型城镇化, 2025, (7): 52-55. Long H Y, Chen Y M, Guo R. Preliminary research and application analysis on the development and utilization of urban underground space. New Urbanization, 2025, (7): 52-55. (in Chinese)

- 8 郝杨光, 沈中伟, 史平阳, 等. 城市更新背景下地下空间开发研究现状与展望. 城市环境设计, 2025, (6): 80-86.
Hao Y G, Shen Z W, Shi P Y, et al. Current status and prospects of research on urban underground space development from the perspective of urban renewal. Urban Environment Design, 2025, (6): 80-86. (in Chinese)
- 9 黄永. 韧性视域下城市地下空间安全风险能力构架研究. 北京: 中共中央党校(国家行政学院), 2025.
Huang Y. Research on the Capability Framework of Urban Underground Space Safety Risk Management from the Perspective of Resilience. Beijing: Party School of the Central Committee of C. P. C (National Academy of Governance), 2025. (in Chinese)
- 10 王萍. 探究智慧城市视角下的城市地下空间管理. 智能建筑与智慧城市, 2025, (5): 15-17.
Wang P. Exploration of the urban underground space management from the perspective of smart city. Intelligent Building & Smart City, 2025, (5): 15-17. (in Chinese)
- 11 蓝婧. 多源地理信息融合的城市地下空间测绘与可视化表达技术// 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 丽水: 丽水恒远工程技术服务有限公司, 2025: 333-336.
Lan J. Urban underground space surveying and mapping and visual expression technology based on multi-source geographic information fusion// Proceedings of the Academic Symposium on Artificial Intelligence and Economic Engineering Development. Lishui: Lishui Hengyuan Engineering Technology Service Co., Ltd., 2025: 333-336. (in Chinese)
- 12 刘利. 中国城市地下空间产权管理与政策建议. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S2): 521-527.
Liu L. Ownership management and policy recommendations for urban underground space in China. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(S2): 521-527. (in Chinese)
- 13 范益群. 我国城市地下空间建设现状与未来. 施工企业管理, 2024, (11): 51-54.
Fan Y Q. Current situation and future of urban underground space construction in China. Construction Enterprise Management, 2024, (11): 51-54. (in Chinese)
- 14 秦博宇, 龚丹丹, 陈志龙. 中国城市地下空间开发利用助力低碳发展现状、策略与构想. 隧道建设, 2024, 44(7): 1337-1355.
Qin B Y, Gong D D, Chen Z L. Current situation, strategy, and conception for exploiting and using urban underground spaces for low-carbon development in China. Tunnel Construction, 2024, 44(7): 1337-1355. (in Chinese)
- 15 彭芳乐, 乔永康, 董蕴豪, 等. 新发展阶段城市地下空间开发利用发展战略研究. 中国工程科学, 2024, 26(3): 176-185.
Peng F L, Qiao Y K, Dong Y H, et al. Development strategy for urban underground space in the new development stage. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 176-185. (in Chinese)
- 16 Gong H, Su D, Zeng S, et al. Advancements in digital twin modeling for underground spaces and lightweight geometric modeling technologies. Automation in Construction, 2024, 165: 105578.
- 17 Zeng S, Chen X, Su D, et al. Multi-source data-driven intelligent analysis and decision optimization for high-density pedestrian flows in urban public spaces. Automation in Construction, 2025, 177: 106367.
- 18 Yu G, Lin D, Wang Y, et al. Digital Twin-enabled and Knowledge-driven decision support for tunnel electromechanical equipment maintenance. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105318.
- 19 Gong H, Su D, Zeng S, et al. Parallel Simulation and Prediction Techniques for Digital Twins in Urban Underground Spaces. Automation in Construction, 2025, 175: 106212.
- 20 苏栋, 陈湘生. 地下空间数字孪生技术与工程实践. 北京: 清华大学出版社, 2025.
Su D, Chen X S. Digital twin technology and engineering practice for underground space. Beijing: Tsinghua University Press, 2025. (in Chinese)
- 21 Morgenthaler S, Braun T, Zhao Z, et al. UAVNet: A mobile wireless mesh network using unmanned aerial vehicles. Proceedings of the IEEE Globecom Workshops, 2012, (6): 1603-1608.
- 22 陈湘生, 洪成雨, 苏栋. 智能岩土工程初探. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2151-2159.
Chen X S, Hong C Y, Su D. Preliminary exploration on

- intelligent geotechnical engineering. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(12): 2151-2159. (in Chinese)
- 23 Wang Y P, Lin X Q, Adhikary A, et al. A primer on 3GPP narrowband internet of things (NB-IoT). *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3): 117-123.
- 24 Sundararamaiah M, Nagarajan S K S, Remala R, et al. Crafting a high-performance real-time data lake with flink and iceberg. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 2024, 12(10): 1-7.
- 25 Ruff L, Kauffmann J R, Vandermeulen R A, et al. A Unifying review of deep and shallow anomaly detection. *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109(5): 756-795.
- 26 Pan J, Ping P, Ding B, et al. Impact behaviour of 3D printed fiber reinforced cementitious composite beams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 182: 108175.
- 27 Ye B B, Wang H S, Chen X, et al. Full-scale test of damaged reinforced concrete (RC) columns retrofitted with high-strength engineered cementitious composites (HSECC). *Journal of Building Engineering*, 2025, 112: 113525.
- 28 Gan B L, Zhang D M, Huang Z K, et al. Ontology-driven knowledge graph for decision-making in Resilience enhancement of underground structures: Framework and application. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 163: 106739.
- 29 Gan B L, Zhang D M, Chen Z G, et al. Resilience evaluation of existing metro stations considering adjacent construction disturbance intensity: Methodology and application. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*, 2025, 11(4): 04025072.
- 30 易荣. 科学开发地下空间资源, 激活城市经济高质量发展. *中国科学院院刊*, 2025, 40(4): 725-729.
- Yi R. Scientific development and utilization of underground space resources to stimulate high-quality urban economic development. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2025, 40(4): 725-729. (in Chinese)
- 31 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. *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. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(4): 107-116. (in Chinese)
- 32 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. *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. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(9): 3570-3578. (in Chinese)
- 33 吴泽洲, 黄浩全, 陈湘生, 等. “双碳”目标下建筑业低碳转型对策研究. *中国工程科学*, 2023, 25(5): 202-209.
- Wu Z Z, Huang H Q, Chen X S, et al. Countermeasures for low-carbon transformation of construction industry in China toward the carbon peaking and carbon neutrality goals. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 202-209. (in Chinese)
- 34 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- Yang L Y, Chen S Y, Wang X. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 2001-2031. (in Chinese)
- 35 罗丹, 黄晓琴, 冷费贤, 等. 数字孪生在交通基础设施智能建造中的应用与挑战. *交通运输工程学报*, 2025, 25(3): 33-64.
- Luo D, Huang X Q, Leng F X, et al. Applications and challenges of digital twin in intelligent construction of transportation infrastructure. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(3): 33-64. (in Chinese)
- 36 苏栋, 黄茂隆, 韩文龙, 等. 城市深层地下空间地质环境韧性评估模型与应用. *中国地质*, 2024, 51(1): 157-169.
- Su D, Huang M L, Han W L, et al. Evaluation model of geological environment resilience in the urban deep underground space and its application. *Geology in China*, 2024, 51(1): 157-169. (in Chinese)
- 37 Xu Z H, Yu T F, Li S C, et al. Intelligent identification of lithology and adverse geology: A state-of-the-art review. *Smart Underground Engineering*, 2025, 1: 3-25.
- 38 Zhao G F, Li Z, Chen Y F, et al. A digital twin-based multiscale framework for predicting full-scale TBM rock cutting performance from miniature point load tests. *Smart*

- Underground Engineering, 2025, 1: 51-63.
- 39 杨党锋, 刘晓东, 苏锋, 等. 城市地下综合管廊智慧运维管理研究与应用. 土木建筑工程信息技术, 2017, 9(6): 28-33.
Yang D F, Liu X D, Su F, et al. Research and application of intelligent operation management of urban utility tunnel. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2017, 9(6): 28-33. (in Chinese)
- 40 周锴, 冷嘉伟. 建筑学视角下城市地下空间研究进展与思考. 中国工程科学, 2025, 27(5): 106-117.
Zhou K, Leng J W. Urban underground space: research progress and future outlook from an architectural perspective. Strategic Study of CAE, 2025, 27(5): 106-117. (in Chinese)
- 41 林星涛, 陈湘生, 苏栋, 等. 考虑多次扰动影响的盾构隧道结构韧性评估方法及其应用. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 591-601.
Lin X T, Chen X S, Su D, et al. Evaluation method for resilience of shield tunnel linings considering multiple disturbances and its application. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 591-601. (in Chinese)
- 42 刘超, 赵竹君, 李海梅. 国土空间规划体系下城市地下空间规划的再认识. 城市发展研究, 2022, 29(1): 48-53.
Liu C, Zhao Z J, Li H M. Re-understanding urban underground spaces planning in the spatial system. Urban Development Studies, 2022, 29(1): 48-53. (in Chinese)
- 43 He Q F, Wu Z Z, Chen X S. An integrated framework for automatic green building evaluation: A case study of china. Frontiers of Engineering Management, 2024, 11: 269-287.

Development pathways and strategies for enhancing resilience of underground space in China's megacities

CHEN Xiangsheng SU Dong WU Zezhou HAN Kaihang* LIN Xingtao
CAO Xiangpeng CHEN Weibin

(1 Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2 State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen 518060, China)

Abstract As China's urbanization enters the phase of enhancing quality and efficiency of existing assets, megacities are facing dual pressures of resource constraints and safety risks. Underground space, as a key carrier for urban resilience, holds urgent strategic significance for high-quality development. This study systematically analyzes the current status, challenges, and future trends of underground space development in China's megacities, focusing on two core issues: "resilience enhancement of existing underground space" and "resilience-oriented development of deep underground space". It proposes a systematic development path covering "digital base-intelligent platform-key technologies-collaborative governance". The study emphasizes the need to comprehensively enhance the disaster prevention, emergency response, and rapid recovery capabilities of underground space through the construction of a 3D digital twin base, an intelligent monitoring and control platform, a resilience enhancement technology system integrating materials, equipment, and platforms, and a cross-departmental collaborative governance mechanism. For deep development, the study proposes a

*Corresponding author

full-chain scientific path covering “planning–design–construction–operation” and a resilience governance framework coordinating “planning–operation–policy”, aiming to provide systematic strategic references for the resilient development of underground space in China’s megacities.

Keywords megacities, underground space, resilience, digital twin, deep development, governance system

陈湘生 中国工程院院士。深圳大学未来地下城市研究院院长、教授。主要研究领域:地下设施建造与运维的韧性基础理论和安全控制智能技术等。E-mail: xschen@szu.edu.cn

CHEN Xiangsheng Academician of the Chinese Academy of Engineering. Director and professor of the Underground Polis Academy, Shenzhen University. His research focuses on the fundamental theories of resilience and intelligent technologies for safety control in the construction and operation of underground facilities. E-mail: xschen@szu.edu.cn

韩凯航 深圳大学未来地下城市研究院特聘研究员。主要研究领域:超大城市地下空间智慧韧性、韧性提升关键技术、城市基础设施系统优化等。E-mail: hankaihang@szu.edu.cn

HAN Kaihang Adjunct research fellow of the Underground Polis Academy, Shenzhen University. His research focuses on intelligent resilience of underground space, key technologies for enhancing urban resilience, and optimization of urban infrastructure systems. E-mail: hankaihang@szu.edu.cn

■ 责任编辑: 文彦杰