余思汗,陈文凯,林旭川,等.基于震害模拟及现场调查的银川4.8级、4.6级地震震害分析[J].地震工程学报,2027,49(1):185-192.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250414001

Yu Sihan, Chen Wenkai, Lin Xuchuan, et al. Seismic damage analysis of the Yinchuan *M*4.8 and *M*4.6 earthquakes through simulation and field investigation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49 (1): 185-192. DOI: 10.20000/j. 1000 - 0844.20250414001

基于震害模拟及现场调查的银川4.8级、4.6级地震震害分析

余思汗[1], 陈文凯[2], 林旭川[3], 陈夏楠[3], 袁小祥[4],
刘 刚[5], 雷启云[1], 金 涛[1]

(1. 宁夏回族自治区地震局,宁夏 银川 750001;
2. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000;
3. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;
4. 中国地震局地震预测研究所,北京 100036;
5. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学),四川 成都 610059)

摘要: 2025年1月2日,宁夏银川断陷盆地中部的永宁县和金凤区先后发生4.8级和4.6级地震,造成显著的社会经济影响。为快速评估震害程度并支撑后续区域抗震设防工作,基于精细化地震动模型、地质模型及建筑物三维模型构建,采用非线性弹塑性时程分析方法,对重点区域建筑群开展震害模拟分析。研究结果表明,震中5 km范围内建筑物损伤呈现集中分布特征,主要表现为老旧建筑及自建房因抗震能力不足而产生的轻微破坏现象。该区域震中最大烈度为Ⅵ度,且未出现中度及以上破坏等级。进一步分析揭示,盆地沉积层对地震动具有显著放大效应,并对居民心理状态产生一定影响。研究结果可为老旧建筑存量丰富的城市提供重要参考,助力提升其抗震韧性及灾害应对能力,同时为城市直下型地震的应急处置与风险防控策略优化提供科学依据。

关键词: 银川4.8级和4.6级地震;震害模拟;地震应急处置;快速评估;建筑物震害

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2027)01-0185-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250414001

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重点项目(2024BEG02033);宁夏自然科学基金(2023AAC03960);2024年度宁夏回族自治区青年科技托举人才培养项目

第一作者简介: 余思汗(1992-),男,工程师,主要从事地震应急技术、地震灾害仿真与GIS应用研究工作。E-mail:251400967@qq.com。

通信作者: 林旭川(1984-),男,研究员,主要从事区域震害模拟与钢结构抗震减震研究。E-mail:Linxc03@gmail.com。

Seismic damage analysis of the Yinchuan *M*4.8 and *M*4.6 earthquakes through simulation and field investigation

Yu Sihan[1], Chen Wenkai[2], Lin Xuchuan[3], Chen Xianan[3], Yuan Xiaoxiang[4], Liu Gang[5], Lei Qiyun[1], Jin Tao[1]

(*1.Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China;*
2.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;
3.Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;
4.Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China;
5.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: On January 2, 2025, two earthquakes measuring 4.8 and 4.6 in magnitude struck Yongning County and Jinfeng District, respectively, in the central Yinchuan Fault Basin in Ningxia, resulting in significant social and economic repercussions. To quickly assess the seismic damage from these two events and facilitate subsequent seismic fortification efforts in the region, this study employs nonlinear elastoplastic time-history analysis to simulate and assess seismic damage to building clusters in key affected areas. This analysis is based on refined ground motion, geological, and three-dimensional building models. The results reveal that building damage was predominantly concentrated within a 5 km radius of the epicenter, primarily characterized by minor damage due to the inadequate seismic resistance of older structures and self-built homes. The maximum intensity at the epicenter reached Ⅵ, with no moderate or severe damage observed. The simulation results further revealed the amplification effect of the basin′s sedimentary layers on ground motion and their psychological impact. This research offers valuable insights for enhancing the seismic resilience and disaster response capabilities of cities with a significant number of older buildings, as well as for urban earthquake emergency response and risk management.

Keywords: Yinchuan *M*4.8 and *M*4.6 earthquakes; seismic damage simulation; earthquake emergency response; rapid assessment; building seismic damage

0 引言

据中国地震台网测定，2025年1月2日10时1分17秒在宁夏回族自治区银川市永宁县(38.40°N，106.22°E)发生4.8级地震，震源深度10 km，同日16时43分31秒又在宁夏银川市金凤区(38.41°N，106.26°E)发生4.6级地震，震源深度10 km。连续发生的两次中强地震，震中位置相差约4 km，时间相差约5 h。地震发生后，迅速获取准确灾害信息是应急处置和灾害评估的关键环节[1]。

地震灾害评估是灾后应急救援与决策的核心支撑，但连续发生的中强地震会显著加剧灾害的复杂性与不确定性，对评估方法的时效性和准确性提出更高要求。传统方法主要依赖地面调查与遥感技术，虽能获取宏观灾情，却存在数据更新滞后、难以动态反映灾害演化过程等局限。尤其在连续地震场景下，两次震害的叠加效应使得依赖静态数据的评估模式难以满足应急需求。近年来，震害模拟技术已成为突破传统方法瓶颈的重要手段，学者们在该领域开展了广泛研究。例如，文献[2-5]的研究，通过采用楼层多弹簧模型，实现了城市建筑物各楼层地震影响的精确计算；陆新征等[6]基于物理驱动的建筑群多尺度模型，实现了城市地震灾害的多尺度模拟。尽管现有研究在单次地震震害模拟

中取得进展，但针对连续两次地震的动态评估仍存在明显不足。本文将震害模拟仿真技术应用于本次地震评估，在建筑物基础数据完备且获取地震动输入数据后，可在15 min内完成计算并生成初步仿真结果。通过现场调查地震破坏程度、灾害空间分布及人员感受，对比分析模拟结果与真实情况的差异，重点评估两次地震间结构损伤累积效应。该研究突破了震害模拟技术在时效性与实用性上的瓶颈，为推动其从学术研究向应急救援实战转化提供了关键技术支撑，对提升地震灾害应急响应与决策的科学性具有重要意义。

1　区域研究概况

1.1　地震及构造背景

宁夏永宁县与金凤区分别发生的4.8级和4.6级地震，震中位于宁夏北部拉张断陷区——银川断陷盆地中部（图1）。该区域地处鄂尔多斯地块与阿拉善地块的交界地带。自新生代以来，受太平洋板块持续向西俯冲及印度板块和亚洲板块强烈碰撞的双重影响，鄂尔多斯地块周边逐渐形成一系列断陷盆地，银川断陷盆地即为其中之一。银川断陷盆地内部及边界分布多条NE向或NNE向活动正断层，晚第四纪时期活动尤为强烈[7]。历史记载的最大地震为1739年银川—平罗8.0级地震，震中位于银川隐伏断裂西支南段[8]。该区域地质构造复杂，中小地震活动频繁，自1970年有仪器记录以来，共发生16次3级以上地震。其中，2025年1月2日永宁4.8级地震为该区域历史最大地震，上一次4级以上地震为2012年11月20日发生的永宁4.5级地震。

1.2　社会影响

2025年1月2日，宁夏银川市永宁县与金凤区分别发生4.8级和4.6级地震，根据中国地震局工程力学研究所强震动观测中心发布的峰值加速度分布图及仪器烈度结果，结合现场居民反馈，确定永宁县、金凤区、兴庆区震感强烈，并据此估算强有感范围（图2）。银川市周边石嘴山市、吴忠市等区域

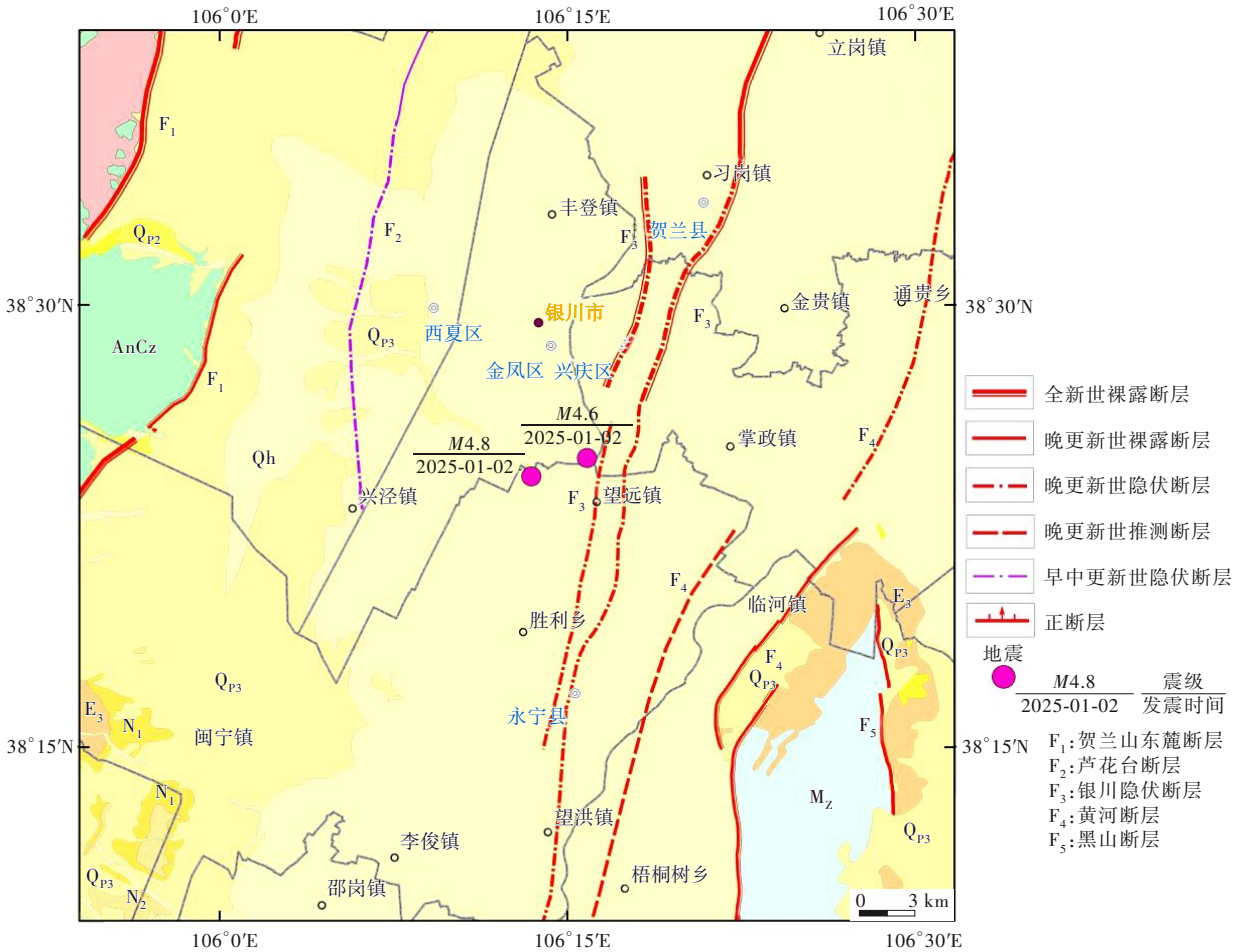


图1　震区活动构造图

Fig. 1　Active tectonic map of the earthquake area

亦报告明显震感。地震宏观震中位于永宁县与金凤区交界,部分区域地震烈度达6度。



图2 估计地震强有感范围示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the estimated strong-motion felt area

根据银川市各级政府排查核查结果,此次地震灾害造成永宁县、金凤区、兴庆区多个乡镇(街道)受灾。农村地区出现个别农户院墙倒塌、房屋开裂现象;城市地区有个别小区单元楼瓷砖脱落、墙体裂缝。银川承天寺塔避雷针移位,海宝塔部分瓦片掉落。地震共致6人轻微伤,均及时送医并出院,无人员死亡。部分老旧房屋震损严重,存在居住安全隐患,已对住户实施紧急转移。各级党委、政府高度重视灾区救助,迅速组织力量开展抗震救灾,调配物资、部署救援队伍。在各方努力下,灾区社会秩序稳定,救灾及恢复工作有序推进。

2 重点区域建筑群震害模拟

2.1 建筑群震害模拟方法

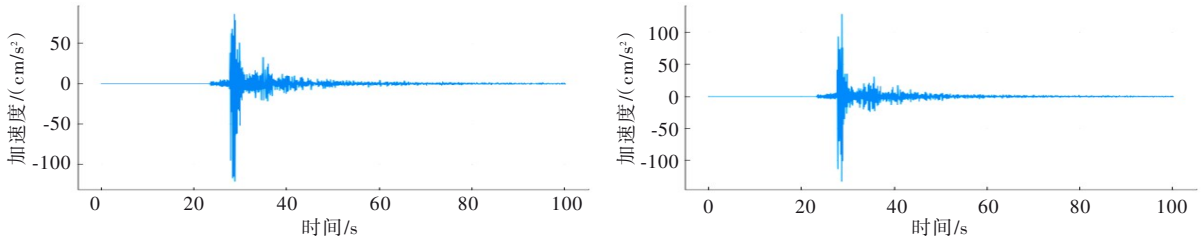
建筑物作为地震灾害的直接承灾体,其受震害程度直接反映地震灾害的严重性。地震灾害模拟仿真技术是一种基于计算机技术与数值模拟方法的地震发生过程及灾害效应模拟技术[9-11]。其原理以地震波传播理论为基础,通过台站实测地震波型数据,运用有限元法、有限差分法等数值计算方法,生成区域地震动数据;基于结构动力学原理建立结构运动方程,采用弹塑性时程分析法计算建筑物地震动响应[12-13];最终,通过数据融合技术整合多源信息,结合可视化技术直观呈现模拟结果,以表达地震造成的灾害情况[14]。

2.2 地震动数据及预处理

地震动数据源自宁夏地震台震后提供的震中附近3个强震动台站记录,这些台站场地条件一致,均位于第四纪覆盖的盆地软土层上,因此无需进行场地效应校正。同时,需收集区域地层、地形、剪切波速及历史地震数据,根据仿真需求建立1 km×1 km(边长)精度的地质模型,并确定格网内各建筑物的地震动放大系数。获取地震动数据后,首先进行格式预处理,提取EW向与NS向分量,再转换为震害模拟仿真系统可读取的格式(图3)。基于地震动衰减关系模型,采用空间插值方法对地震动分区处理,生成格网化数据,并将网格内数据作为该区域的地震动输入,用于计算建筑物地震动响应。

2.3 建筑物三维模型建立

建筑物的三维模型是震害模拟的核心数据,需同时参与地震动响应计算与震害情景模拟渲染,因此对模型有较高要求。在数字化快速发展的时代,三维建模技术已成为多领域的关键支撑。三维白模作为一种独特的建模方式,其生成流程基于二维



(a) EW向 (b) NS向

图3 某台站实测地震动结果

Fig. 3 Recorded ground motion results at a station

框架数据，通过计算机图形学算法实现平面信息到立体模型的转换[15]。相较于复杂三维建模方法，白模数据量较低且计算效率高。针对震害模拟需求，建筑物三维模型需采集二维空间轮廓及建筑年代、结构类型、建筑面积、层数等属性信息，以满足物理属性建模要求。基于层高与面积可估算结构周期与质量，结合建筑年代和结构类型可初步构建银川市的延性物理模型（图4）。分析表明，银川市老城区部分20世纪80年代建造的砖混多层建筑及城中村自建房抗震性能总体较差。

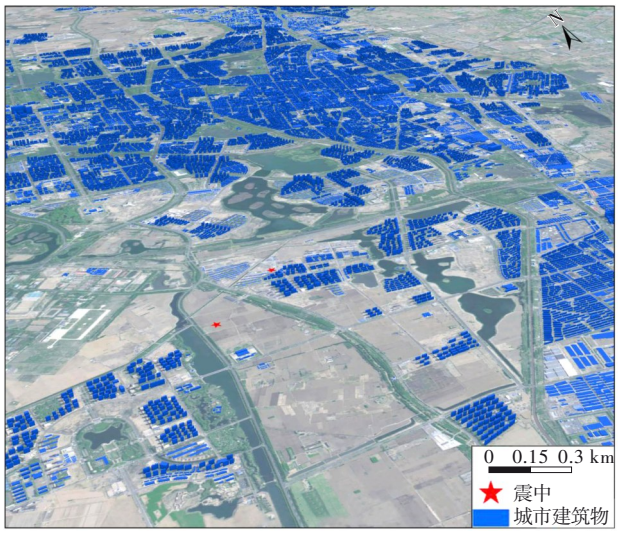


图4　银川市城区建筑物三维模型

Fig. 4　Three-dimensional building model of Yinchuan urban area

2.4　仿真结果分析

2.4.1　建筑物震害仿真分析

本研究采用建筑物三维模型作为震害仿真输入数据，运用弹塑性时程分析法，获取每栋建筑物在地震动作用下的楼层响应及统计信息[16]。损伤等级评定依据《建（构）筑物地震破坏等级划分》[17]中的指标进行判定：损伤指数基于震害调查的震害指数定义，其中屈服点之前部分定义为基本完好（震害指数0～0.1），屈服点至临界倒塌点之间部分分别对应轻微破坏（0.1，0.3］、中度破坏（0.3，0.55］和严重破坏（0.55，0.85］，临界倒塌点之后部分定义为毁坏及倒塌（0.85，1.0］。假设多层结构每层质量与刚度均相等，则线性结构体系的动力平衡弹塑性时程分析法计算公式可表达为式（1）：

$$\boldsymbol{M}\ddot{x}(z)+\boldsymbol{C}\dot{x}(z)+\boldsymbol{K}x(z)=-\boldsymbol{M}\boldsymbol{I}\ddot{x}_g(z) \quad (1)$$

式中：$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$和$\boldsymbol{K}$分别是结构体系的质量、阻尼系数以及刚度的矩阵；$\ddot{x}(z)$、$\dot{x}(z)$和$x(z)$分别是结构体系的加速度、速度以及位移偏量。采用瑞利阻尼理论，得出$\boldsymbol{C}=\alpha\boldsymbol{M}+\beta\boldsymbol{K}$，通过计算结构的周期和阻尼比可确定$\alpha$和$\beta$的值。结合建筑结构类型、建造年代、辅助设防类型和场地类别，建立建筑结构物理模型，得到各参数的质量、阻尼系数和刚度矩阵（$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$）。其中，结构质量$\boldsymbol{M}$根据面积和高度估算，参数$\boldsymbol{C}$和$\boldsymbol{K}$根据高度、我国大震反应谱、大震地震剪力与结构承载力和延性的关系式进行推算。

震害模拟结果（图5）表明，银川南部靠近震中区域的建筑物震害程度显著高于其他区域。其中，永宁县望远镇、胜利乡一带的建筑物受损情况最为突出，轻微损坏等级建筑占比显著。银川市区内虽有一定数量的轻微损坏建筑，但空间分布较为分散，经实地调查显示，主要为20世纪七八十年代建造的多层建筑及城中村自建房。此外，西夏区城市南部轻微损坏情况相对集中，受损建筑以工业园区简易房为主，此类建筑的低抗震性能是导致集中受损的关键因素。现场调查数据显示，本次地震最大烈度达6度，永宁县、金凤区及兴庆区部分区域处于该烈度范围内。值得注意的是，实际调查烈度分布范围与本研究建筑物震害评估结果在空间方向及集中区域上高度一致。所有区域建筑物震害均未达到中度及以上等级，与评估结果基本吻合，表明本次震害模拟具有较高的可靠性与准确性。

2.4.2　室内人员感受分析

基于震害模拟，建筑物内人员感受情况可通过地震动作用下的响应特性推断。响应参数（如楼层加速度、位移、层间位移角）直接影响人员感知：较强的楼层加速度易引发明显晃动感，较大的层间位

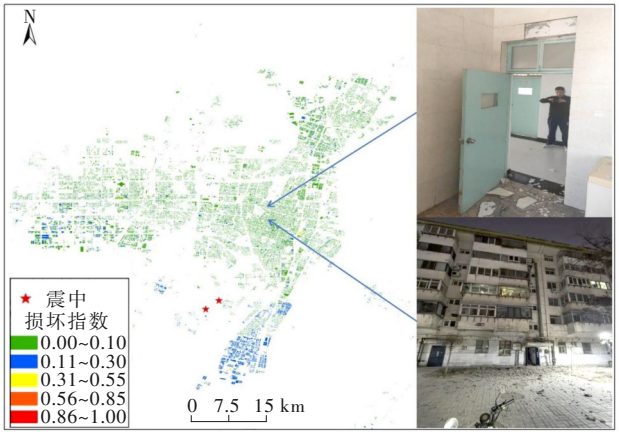


图5　建筑物震害模拟结果

Fig. 5　Simulated seismic damage results of buildings

移角则可能触发恐慌情绪，甚至导致人员失去平衡或摔倒。受银川盆地沉积层放大效应影响，本次地震导致永宁县、金凤区和兴庆区绝大多数建筑物内人员感受达到“强度有感”等级，表现为建筑物剧烈晃动、悬挂物大幅摆动及室内人员显著恐慌；部分区域甚至达到“剧烈有感”等级，建筑物晃动极剧烈，内部物品倾倒或掉落，室内人员恐慌情绪严重（图6）。震后走访调查及室内监控显示，居民普遍感受到强烈晃动，许多人出现严重恐慌，甚至短期内不敢进入室内，对生产生活造成较大影响。仪器记录显示，永宁县、金凤区部分区域楼层加速度峰值达0.12g～0.17g；兴庆区某高层建筑内，监控录像显示悬挂灯具摆动幅度约30°，与仿真预测的加速度区间一致。对比分析表明，震害模拟计算结果与实际人员感受在物理参数阈值及空间分布特征上高度一致。该研究为科学评估地震对室内人员的影响提供了依据，并为灾后心理干预、科普宣传等工作提供了重要科学支持。

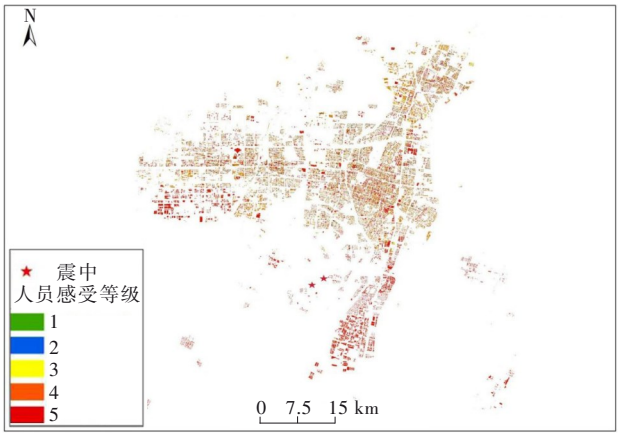


图6 建筑物内人员感受情况

Fig. 6 Occupant perception conditions inside buildings

3 结果

3.1 建筑震害评估结果

连续两次中强地震的震害调查显示，轻微损坏建筑以20世纪80年代修建的多层砖混房屋、城中村自建房为主，反映出老旧建筑与自建房抗震能力普遍薄弱。建议优先对这两类建筑开展抗震性能评估，并制定分阶段加固改造方案。此外，新建建筑需严格执行抗震设计规范，地震高风险区域应进一步优化设计参数，提升抗震设防水平。

3.2 基于震害模拟的辅助应急决策制定

基于震害仿真技术通过模拟地震动作用下建筑物的响应和破坏情况，为地震应急处置提供了重要的科学依据和决策支持，主要体现在以下几个方面：(1)震害仿真能够在地震发生后快速评估建筑物的破坏程度和分布情况，为灾情研判提供数据支持；(2)通过仿真结果，应急指挥部门可以迅速掌握重灾区、轻灾区的分布，确定救援优先级，合理调配救援资源；(3)通过分析建筑物破坏情况和人员感受强度，可以辅助评估公众的心理状态和疏散需求，为心理干预和疏散指导提供支持；(4)通过仿真结果识别高风险区域，指导重建工作的优先顺序。震害仿真技术通过提供精准的建筑物破坏评估和人员感受分析，为地震应急处置的各个环节提供了科学支撑。

3.3 评估应急处置效果

震害模拟仿真技术在本次银川地震应急处置中发挥了显著作用，应用效果突出。首先，在灾害损失评估方面，模拟结果与实际灾情高度吻合。通过仿真分析，第一时间科学评估了建筑物损失，结果显示区域内建筑未达中度损伤等级，从而准确判断本次地震不会造成人员死亡，仅可能因掉落物导致个别轻伤。这一评估为应急指挥部门制定救援策略提供了关键依据，有效避免了公众恐慌。其次，在现场调查中，仿真结果直接提供了受损建筑的精准空间分布信息，显著提升了调查效率。与传统“地毯式”排查相比，仿真技术使调查人员能够有针对性地开展勘查，避免了盲目搜索的时间损耗。得益于该技术，调查队伍在较短时间内完成现场工作，快速掌握了灾区详情，为后续救援和生产生活恢复争取了宝贵时间。

4 结论与讨论

2025年1月2日发生的银川4.8级、4.6级地震是近年来罕见的城市直下型强有感地震案例。震中位于银川城区核心地带，地震动能量传入盆地后，受沉积层放大效应显著加剧，对城市建筑群造成强烈地震作用，暴露出城市防灾体系的薄弱环节。此次事件为地震灾害应急管理和防灾减灾工作提供了宝贵经验，结合实际情况与震害模拟仿真技术应用效果，可得出以下认识：

(1) 本次宁夏地震是首次将震害模拟技术应

用于城市直下型地震应急处置工作。通过三维模型可快速定位受损建筑空间分布范围，验证了该技术在城市复杂环境中的适用性。震害模拟仿真技术为灾情评估和应急决策提供了关键科学依据，本次的成功应用成为地震应急处置领域的成功范例。建议将仿真技术纳入地震应急预案，并定期开展仿真演练，以提升地震应急处置与快速响应能力。

（2）直下型地震具有突发强震动特征，事发后城市民众普遍缺乏心理准备。恐慌引发的无序撤离易诱发公共秩序混乱，加之公众防灾知识储备不足，恐慌情绪进一步放大，干扰社会正常生产生活。建议依托媒体、社区宣传渠道定向开展防震科普与应急实操培训，提升民众灾害综合应对水平。

（3）震害仿真技术实现了地震作用下建筑集群破坏演化的高精度动态模拟，此次银川地震震后应急响应中为抗震救灾与灾后安置提供了关键数据支撑，显著提升了应急处置效率。

该成果充分展现宁夏地方政府灾害风险治理体系与治理能力现代化建设成效，凸显我国防灾减灾救灾领域独特制度优势，为国内震后快速应急处置工作积累宝贵实践经验[18-19]。由于宁夏区位特殊，区域地质条件复杂，同时受强震孕育背景与长期地震平静期叠加作用，地震灾害风险持续攀升。本次银川城市直下型强有感地震，集中暴露出城市建筑抗震韧性偏弱、应急技术落地应用不足、群众防灾减灾意识薄弱等多维度系统性短板。系统总结本次震例经验，既可形成城市直下型地震处置实操指引，依托仿真识别得到的城市抗震薄弱区，也能为区域地震灾害精细化风险治理提供精准决策支撑。

参考文献（References）

[1] 陈文凯，何少林，张苏平，等. 汶川地震甘肃省文县地震地质灾害遥感分析[J]. 西北地震学报，2011，33(4)：363-369.
Chen Wenkai, He Shaolin, Zhang Suping, et al. Analysis on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake in Wenxian County, Gansu Province, based on remote sensing information [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 363-369.

[2] 林旭川. 城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制[J]. 城市与减灾，2017(3)：18-22.
Lin Xuchuan. Numerical simulation and risk control of earthquake disaster in urban buildings[J]. City and Disaster Reduction, 2017(3): 18-22.

[3] Lin X C, Liu X Y, Hui J, et al. Assessment on detailed regional seismic damage risk of buildings based on time-history dynamic analyses [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2024, 22(6): 2903-2923.

[4] Chen X N, Lin X C, Zhang L X, et al. Method for rapidly generating urban damage scenarios under non-uniform ground motion input based on matching algorithms and time history analyses [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 152: 107055.

[5] 杜浩国，陈亮，林旭川，等. 云南红河县城区房屋地震灾害三维仿真模拟方法[J]. 地震研究，2019，42(2)：218-229.
Du Haoguo, Chen Liang, Lin Xuchuan, et al. 3D simulation method of housing earthquake disaster in Honghe Country, Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(2): 218-229.

[6] 陆新征，田源，许镇，等. 一种新型城市地震灾害模拟方法：城市抗震弹塑性分析方法[J]. 科学通报，2020，65(11)：1055-1062.
Lu Xinzheng, Tian Yuan, Xu Zhen, et al. A new urban earthquake disaster simulation method: city-scale nonlinear time-history analysis[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(11): 1055-1062.

[7] 刘保金，柴炽章，酆少英，等. 第四纪沉积区断层及其上断点探测的地震方法技术：以银川隐伏活动断层为例[J]. 地球物理学报，2008，51(5)：1475-1483.
Liu Baojin, Chai Chizhang, Feng Shaoying, et al. Seismic exploration method for buried fault and its up-breakpoint in Quaternary sediment area: an example of Yinchuan buried active fault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1475-1483.

[8] 雷启云，柴炽章，杜鹏，等. 1739年平罗8级地震发震构造[J]. 地震地质，2015，37(2)：413-429.
Lei Qiyun, Chai Chizhang, Du Peng, et al. The seismogenic structure of the *M*8.0 Pingluo earthquake in 1739[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(2): 413-429.

[9] 袁小祥，林旭川，窦爱霞，等. 基于震前高分影像和震害仿真的建筑物震害快速评估：以四川泸定6.8级地震为例[J]. 地球物理学报，2023，66(4)：1438-1447.
Yuan Xiaoxiang, Lin Xuchuan, Dou Aixia, et al. Rapid assessment of building seismic damage based on pre-earthquake high-resolution images and seismic simulation, taking the Luding *M*6.8 earthquake in Sichuan as an example[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(4): 1438-1447.

[10] 陈夏楠，张令心，林旭川，等. 基于地震动库的城市地震灾害情景快速匹配算法研究[J]. 地震工程与工程振动，2021，41(2)：76-83.
Chen Xianan, Zhang Lingxin, Lin Xuchuan, et al. Study on matching algorithm of urban seismic scenarios based on ground motion database[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(2): 76-83.

[11] 张灿，陈文凯，林旭川. 基于地震动参数的城市建筑物震害模拟：以兰州市城关区为例[J]. 地震工程学报，2022，44(1)：172-182.

Zhang Can, Chen Wenkai, Lin Xuchuan. Earthquake damage simulation of urban buildings based on ground motion parameters: a case study of Chengguan District in Lanzhou City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 172-182.

[12] Lin X, Wang K, Zhang L, et al. Development of a simulation platform to model, assess and visualize the earthquake disasters in city level[C]//National Technical University of Athens. Proceedings of the International Conference on Natural Hazards and Infrastructure. Portugal: University of Coimbra, 2019.

[13] 陈相兆，孙柏涛，李芸芸，等. 基于CityEngine的城市建筑群三维震害模拟研究[J]. 地震工程与工程振动，2018，38(4)：93-99.
Chen Xiangzhao, Sun Baitao, Li Yunyun, et al. Research on city building agglomeration 3D seismic disaster simulation based on CityEngine[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(4): 93-99.

[14] 仇保兴，陈蒙. 数字孪生城市及其应用[J]. 城市发展研究，2022，29(11):1-9.
Qiu Baoxing, Chen Meng. Digital twin cities and its applications[J]. Urban Development Studies, 2022, 29(11): 1-9.

[15] 顾建祥，杨必胜，董震，等. 面向数字孪生城市的智能化全息测绘[J]. 测绘通报，2020(6)：134-140.
Gu Jianxiang, Yang Bisheng, Dong Zhen, et al. Intelligent perfect-information surveying and mapping for digital twin cities[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(6): 134-140.

[16] Yu S H, Lei Q Y, Liu C, et al. Application research on digital twins of urban earthquake disasters[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2023, 14(1): 2278274.

[17] GB/T 24335—2009 建(构)筑物地震破坏等级划分[S].
GB/T 24335—2009 Classification of earthquake damage grades for buildings and structures[S].

[18] 石玉成，高晓明，陈文凯，等. 甘肃夏河5.7级地震应急处置及抗震防灾启示[J]. 地震工程学报，2020，42(5)：1343-1348.
Shi Yucheng, Gao Xiaoming, Chen Wenkai, et al. Enlightenment of the emergency response and disaster prevention of the Xiahe M5.7 earthquake, Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1343-1348.

[19] 姚迪，袁小祥，林旭川，等. 基于手机位置信息的高精度动态人口数据空间化方法研究：以四川泸定6.8级地震为例[J]. 地震工程学报，2024，46(6)：1493-1500.
Yao Di, Yuan Xiaoxiang, Lin Xuchuan, et al. A high-precision dynamic population data spatialization method based on mobile phone locations: a case study of the Luding M_S6.8 earthquake in Sichuan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1493-1500.

（本文编辑：任 栋）