

# 基于地震易损性的城市防灾韧性与规划策略融合研究

## Research on Integration of Urban Disaster Resilience and Planning Strategies Based on Seismic Fragility

费智涛 周利敏 郭小东 马东辉  
FEI Zhitao, ZHOU Limin, GUO Xiaodong, MA Donghui

**摘要：**当前城市防灾韧性量化测度纳入规划仍存在困难，体现在损失和恢复概率模型缺乏、融合思路难明确、框架接口未打通等方面。为解决上述问题，本研究首先借鉴城市抗震防灾规划经验，分析了韧性视角下的新需求与易损性模型理念纳入的适用性。其次采用文献研究方法梳理了地震领域基于经验法、模拟方法和综合法的易损性研究的共同假设与模型形式，并进一步推广到多影响灾种、多评估对象的城市易损性研究等新方向。然后提出基于易损性理念的城市防灾韧性与规划策略的融合思路、融合框架和融合接口：一是探讨了损失和恢复过程及其概率模型的韧性曲线阈值点与规划策略的互动关系；二是给出了易损性理念下系统多类型规划对象与设防、布局、设施和管制策略在减少损失、提升恢复方面的关联矩阵，拓展韧性规划策略类型；三是打通了工程、空间作为不同层级的载体与防灾韧性的融合接口。笔者以我国东部某县级市中心城区抗震防灾规划中建筑物的韧性策略为例，通过“韧性目标设定—损失恢复评估—差距计算分析—保障恢复策略”的技术路线验证了融合框架的有效性。研究表明，易损性模型理念可为城市防灾韧性定量评估提供概率化的工具，提出的思路框架具备一定的可操作性，便于与规划目标进行差异对比分析和策略制定，有望推动城市防灾韧性与规划策略的融合。

**Abstract:** Currently, integrating the quantitative measurement of urban disaster resilience into spatial planning remains challenging, primarily manifested in the lack of probabilistic models for loss and recovery, unclear integration approaches, and unconnected framework interfaces. To address these issues, this study first draws on the experience of urban seismic disaster prevention planning to analyze the new demands from a resilience perspective and the applicability of incorporating the vulnerability model concept. Through a literature review, the common assumptions and model forms of vulnerability research in the seismic field-based on empirical, simulation, and comprehensive methods—are systematically reviewed and further extended to new directions in urban vulnerability research encompassing multi-hazards and multi-evaluation objects. Furthermore, this paper proposes an integration approach, framework, and interface connecting urban disaster resilience with planning strategies based on the vulnerability concept. First, it explores the interactive relationship between planning strategies and the threshold points on resilience curves representing loss and recovery processes and their probabilistic models. Second, it provides an association matrix linking multi-type planning objects with strategies for fortification, spatial layout, facilities, and regulation aimed at mitigating losses and enhancing recovery, thereby expanding the typology of resilience planning strategies. Third, it links engineering and spatial elements as hierarchical carriers with disaster resilience, establishing a functioning integration interface. Taking the building resilience strategy in the seismic disaster prevention planning of the central urban area of a county-level city in eastern China as a case study, the effectiveness of the integration framework is validated through a technical route of “resilience goal setting—loss and recovery assessment—gap calculation and analysis—guarantee and recovery strategy”. The findings indicate that the vulnerability model concept provides a probabilistic tool for the quantitative assessment of urban disaster resilience. The proposed conceptual framework demonstrates practical operability, facilitates comparative gap analysis against planning goals and strategy formulation, and is expected to drive the deep integration of urban disaster resilience and planning strategies.

**关键词：**城市防灾韧性；“规划—韧性”融合框架；易损性模型；韧性评估；城市抗震防灾规划

**Keywords:** urban disaster resilience; “planning-resilience” integrated framework; fragility model; resilience assessment; urban earthquake disaster prevention planning

国家自然科学基金“复合灾害情景下城市应急服务设施系统协同鲁棒优化与防灾韧性提升”(52278472)，北京市自然科学基金“防灾韧性驱动的综合灾害适应性城市应急服务设施系统优化配置研究”(8232004)

**作者：**费智涛，博士，广州大学公共管理学院，特聘副研究员。milksifei@163.com

周利敏（通信作者），广州大学公共管理学院，教授，博士生导师。xplm9703579@sina.com

郭小东，北京工业大学建筑与城市规划学院，北京工业大学城市与工程安全减灾中心，教授，博士生导师。guoxd7797@163.com

马东辉，北京工业大学建筑与城市规划学院，北京工业大学城市与工程安全减灾中心，研究员，博士生导师。donghuima2022@163.com

城市面临的各类自然灾害威胁着人类的生命财产安全，联合国减少灾害风险办公室数据显示，2000—2023年间，在自然灾害造成的全球人员伤亡中地震约占50%，我国每年因地震灾害造成的损失超100亿美元<sup>[1]</sup>。为了应对灾害风险，我国从1980年代开始进行了诸多研究和实践，城乡防灾减灾理念经历了从灾害管理到风险管理，再到防灾韧性的转变<sup>[2,3]</sup>，防灾规划由各类单灾种为主的规划向综合性防灾规划演变，韧性规划已有实践探索<sup>[4]</sup>。然而，韧性概念的宽泛化正使得理念沦为“陈词滥调”<sup>[5]</sup>，如何在操作层面进一步强化规划实践中的韧性量化测度技术似乎缺少一种环节与抓手。作为一种表征不同灾害强度下承灾体发生各种破坏状态概率的模型，易损性（fragility）使韧性这一理念有了进一步的学术意义，特别是在结合韧性量化曲线模型进行量化的分析研究时，具有较好的融合前景<sup>[6,7]</sup>。目前，有关易损性的研究多聚焦于工程单体微观层面<sup>[8]</sup>，城市易损性的概念虽尚未明晰，但在我国抗震防灾规划中已经出现了具体尝试。本研究首先分析韧性视角下城市抗震防灾规划的新需求，基于文献综述介绍易损性概念、方法和表达的发展历程，以及易损性模型的基本假设与应用拓展，继而瞄准韧性与规划的融合这一关键技术问题，提出面向规划的防灾韧性融合思路、融合框架与融合接口，并以城市韧性抗震防灾规划为例，探讨易损性理念在提出规划韧性目标、计算损失情景、进行目标—能力差距分析、提出灾前保障、灾后恢复策略等方面的具体实践。

## 1 从建构物地震易损性到“城市易损性”

### 1.1 城市韧性抗震防灾规划的新需求

韧性的概念最早由城市安全与防灾减灾领域引入城市规划与研究中<sup>[9]</sup>。以地震为例，城市抗震防灾规划作为一项应对地震的城市专项规划，传统的做法首先是基于区域历史地震情况和场地情况，结合研究区所在的地震动参数分区，确定城市“小震不坏、中震可修、大震不倒”的工程设防目标；其次针对城市物理建成环境（如建筑物、基础设施等）的脆弱性情况评估震害结果，确定多遇地震、设防地震和罕遇地震下的损失和伤亡后果场景；最后提出基于抗震防灾目标和后果的设防、布局、设施和规划管控要求。

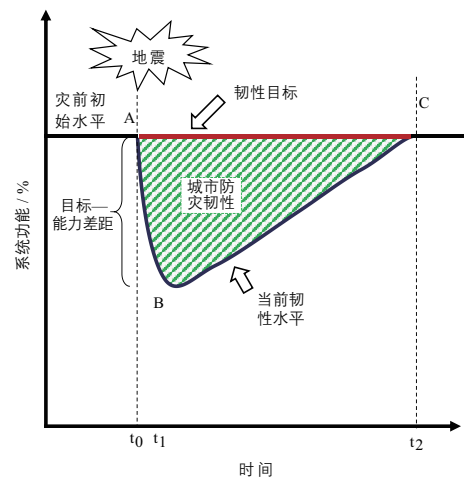
传统城市抗震防灾规划更多聚焦物质环境空间，通过工程技术手段强化城市物理环境，保障城市安全。韧性城市理念更加强调在空间、工程、管理和社会多系统维度将多种灵活措施有机融入规划，使城市在遭受一定程度的灾害或突发事件后能够保持正常运行，并快速恢复原有功能<sup>[2]</sup>。以韧性量化曲线视角来看，城市韧性抗震防灾规划需要研究规划目标与城市抗震韧性能力的关系（图1），易损性在针对城

市各类型物质空间对象系统的防灾韧性能力评估阶段具有适用性。

### 1.2 建构物地震易损性的多元发展

易损性研究起源于1970年代的抗震防灾领域，用于表征地震灾害作用导致工程结构破坏的概率<sup>[10]</sup>。早期学者们通过实地震害调查，发展出一种基于经验的易损性分析过程，即首先给出建筑物的损伤指标，基于多种结构类型的建筑在不同强度地震下具有相同的破坏概率这一假定，开发了地震破坏概率矩阵（DPM: Destructive Probability Matrices）这一评估工具<sup>[11]</sup>。1980年代后，一种基于结构的震害指数评估方法“易损性指标”被大量使用，用于反映地震强度与结构响应之间的关系<sup>[12]</sup>。震害指数是一种融合了专家经验的间接方法，通过对影响结构易损性因素（如场地、平面立面和非结构构造等）的相对重要性进行加权计算，评估目标建筑的易损性。随着理论和实践的不断深入，基于无标度地震强度等级（PSI: Parameterless Scale of Intensity）的易损性函数于1990年代被陆续开发出来<sup>[13,14]</sup>。与DPM相比，基于PSI的易损性函数是一种连续性的数学表达，将其进行可视化即为易损性曲线（fragility curve）。建构物地震易损性研究发展见图2。

易损性曲线的横轴是地震强度，通常可使用峰值加速度（PGA）、地震烈度或有效峰值加速度等地震动强度参数进行表达，为了降低输入地震强度的不确定性，也可以采用与工程结构基本周期对应的谱加速度、谱位移等参数进行表达<sup>[15,16]</sup>。基于正态分布或对数正态分布的描述假定<sup>[17]</sup>，采用经验调查法、模拟仿真法或综合法获得震害数据推导易损性曲线<sup>[18,19]</sup>（式1）。



注： $t_0$ 指系统功能处于A点的初始时刻； $t_1$ 指系统功能下降至B点的时刻； $t_2$ 指系统功能恢复至C点的时刻。

图1 城市韧性抗震防灾规划的需求示意

$$P[DS \geq ds | IM] = \Phi \left( \frac{\ln(IM) - \mu}{\beta} \right) \quad (1)$$

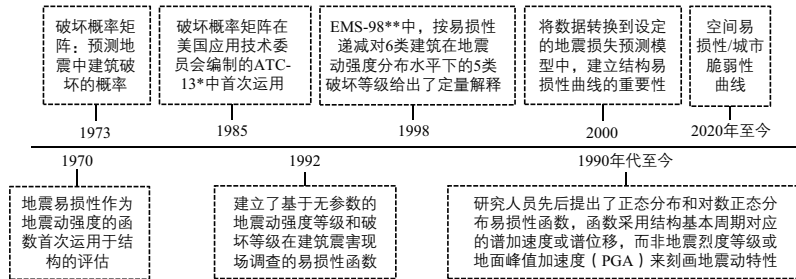
式中， $\Phi(\cdot)$  为标准正态累积分布函数， $\mu$  为对数震害均值， $\beta$  是用来定义对数正态分布的对数标准差。 $IM$  为地震强度参数（如 PGA 等）， $P[DS \geq ds | IM]$  表示在给定地震强度下，工程处于  $DS$  破坏状态的超越概率（图 3）。

地震易损性研究提供了一种损失估计的概率框架，为估算城市韧性的因灾损失和能力下降提供了工具，在考虑更多空间尺度、对象系统和灾害类型时同样具有适用性。为了探究在单体、社区和城市等多个空间尺度上的易损性，群体易损性分析进一步发展<sup>[20]</sup>，如全球地震模型基金会（GEMF: Global Earthquake Model Foundation）基于调查统计汇总并开发了全球易损性模型<sup>[21]</sup>，在更广泛的时空尺度探讨各个国家和地区的建筑地震易损性。为了考虑城市不同对象，如生命线系统<sup>[22]</sup>、历史遗迹<sup>[17,23]</sup>等，美国联邦应急管理局（FEMA: Federal Emergency Management Agency）制定的《美国多灾害风险评估系统》（HAZUS: Hazards U.S. Multi-Hazard）手册给出了城市建筑物、交通设施系统（高速公路、

铁路、机场等）和公共事业系统（如给排水、油气、电力等）的易损性模型，以此为基础可用于多水准地震灾害影响下的损失估计<sup>[23]</sup>。此外，易损性模型的分析思路被广泛拓展到了洪水<sup>[24,25]</sup>、大风<sup>[26,28]</sup>、滑坡<sup>[29]</sup>、地面沉降<sup>[30]</sup>等多种类型灾害的分析中（表 1）。

### 1.3 韧性规划尺度需求导向下的“城市易损性”

相较于工程易损性服务下的工程防灾措施，“城市易损性”的概念或将在更大的空间尺度上研究损失和韧性问题，特别是规划层面的多种韧性评估，进而有效支撑规划与政策制定。近年来已有学者开展了探索性研究，表明在更大尺度和视角考虑灾害风险与韧性是必要的<sup>[31]</sup>。维贝等（Wiebe et al.）以地块（parcel）为单元研究了俄勒冈州锡赛德市（Seaside）某社区的海啸—洪涝损伤<sup>[32]</sup>，分别考虑了 9 m、13 m 和 25 m 洪水水深强度下以及相同灾害强度下地块单元处于不同破坏状态的比例。考虑到美国基于区划的地块上允许的建筑类型较为单一，此研究的单元易损性仍属于工程单体易损性在单元上的直接表达（图 4）。



注：\* 指应用技术委员会（Applied Technology Council）报告《加利福尼亚州地震灾害评估数据》（Earthquake Damage Evaluation Data for California）。\*\* 指 1998 年欧洲宏观地震烈度表（European Macroseismic Scale 1998）。

图 2 建构物地震易损性研究发展

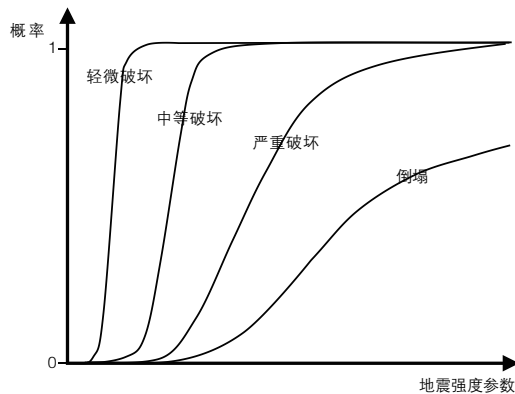


图 3 易损性曲线的形式

表 1 不同灾害易损性模型采用的强度参数与概率分布

灾种	灾害强度参数	拟采用的概率分布
地震	烈度、峰值加速度、峰值速度（PGV）、峰值位移、谱加速度、谱位移	对数正态分布
洪水	深度、流速	正态分布
大风	3 秒最大风速、10 分钟持续风速	极值分布、对数正态分布
泥石流	碎片高度	三角分布
滑坡	体积、速度、深度、位移和面积范围；滑坡强度（冲击能量、平均速度或潜在可侵蚀土壤带的深度）	
地面沉降	地面沉降距离	对数正态分布
疫情	易感人群结构	Delta 分布、幂律分布、泊松分布

注：空白格表示不涉及。  
资料来源：参考文献 [7,22-30]

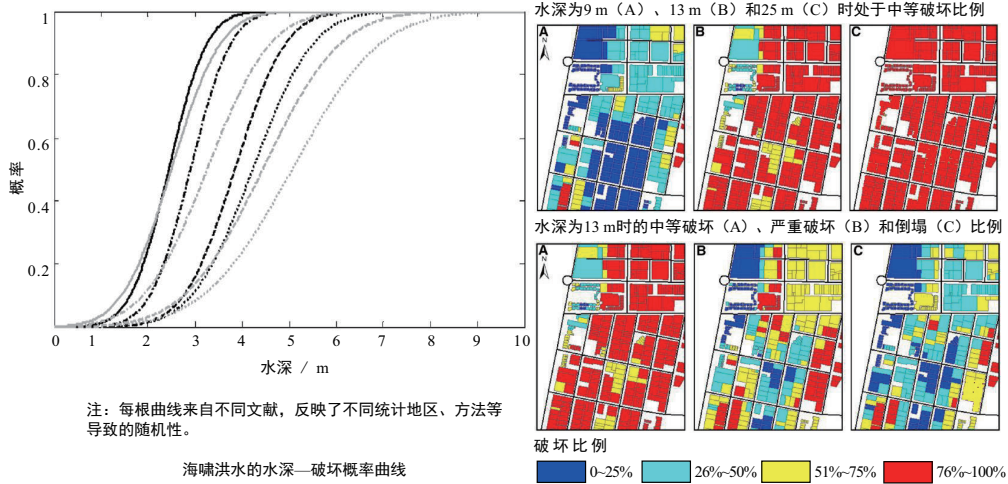


图 4 基于地块单元易损性的社区海啸—洪涝损伤评估

资料来源：作者根据参考文献 [32] 绘制

高迪奥等 (Gaudio et al.) 通过单元内处于某一地震强度下破坏状态建筑物占单元内建筑物总数的比例作为平均震害，进一步对“城市易损性”的表达进行了尝试<sup>[33]</sup>。随后，基于混合方法 (hybrid methodology) 的城市单元易损性曲线 (Urban Compartment Fragility Curves) 概念于 2022 年由圣多利等 (Sandoli et al.) 提出<sup>[34]</sup>，标志着“城市易损性”概念首次被模型化。该模型与工程易损性具有理念一致性，采用混合方法将研究单元内的单体易损性参数进行平均化，提升为城市单元的易损性参数  $\bar{\mu}$  (式 2) 和  $\bar{\beta}$ ，这样就可以预测多水准灾害下单元内处于不同破坏状态部分的比例 (图 5)。

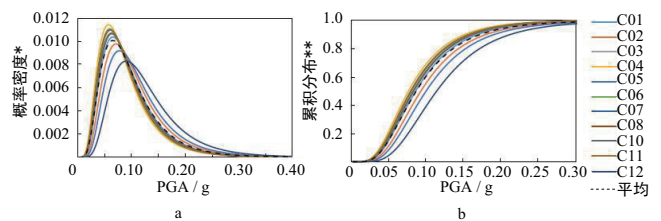
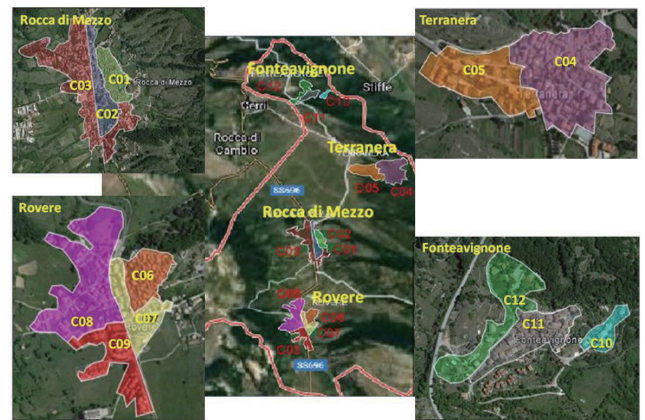
$$\bar{\mu} = \frac{\sum \mu_i N_i}{N_{tot}} = \sum_i \mu_i (B_{\%})_i \quad (2)$$

上式中， $\bar{\mu}$  为单元的平均易损性， $\mu_i$  为第  $i$  类建筑物的易损性参数均值， $N_i$  为第  $i$  类建筑物数量， $N_{tot}$  为单元内所有类别建筑物总数， $B_{\%}$  为单元内第  $i$  类建筑的百分比。另一易损性参数  $\bar{\beta}$  采用统计的方法重新计算标准差。考虑到圣多利采用的单元划分与规划的需求有一定差异，费智涛等进一步发展了上述方法，引入城市功能空间单元的概念，将工程易损性进一步推广至城市功能空间，并使用徐州市的案例进行了验证<sup>[35]</sup>。

## 2 融合思路、框架与接口类型

### 2.1 融合思路：将城市易损性纳入韧性曲线模型

目前，基于韧性曲线模型的定量评估方法成为各领域测度城市防灾韧性的共同基础，易损性作为损失估计的基础被广泛应用<sup>[36-38]</sup>，特别是在度量韧性曲线的下降段时较为方便<sup>[39]</sup>。在量化评估恢复过程时同样可以采用这种思路，表



注：\* 概率密度：在某一地震强度附近，建筑破坏达到某等级的概率的密集程度。

\*\* 累积分布：不同地震强度下，建筑破坏达到某等级的概率之和。

图 5 基于混合方法的空间单元易损性模型构建

资料来源：作者根据参考文献 [34] 绘制

达恢复过程受损失程度的影响以及不确定性，一般可基于恢复时间的经验概率密度函数或预期进行设定。在规划中通过设定目标<sup>[37]</sup>或采用已有国内标准<sup>[40]</sup>、国际标准<sup>[41-42]</sup>给出恢复时间的取值。

图6展示了基于易损性理念的城市防灾韧性量化曲线表达。韧性量化曲线下降点  $B \in [b, b']$  以及恢复点  $C \in [c, c']$  共同围合的浅灰色区域表达了城市某类系统或对象因灾损失和灾后恢复的不确定性。损失和恢复可以根据研究对象、领域和视角的差异，分别针对城市空间、功能、人口、经济或社会等维度开展评估。

在规划中，通过设定不同韧性目标，考虑不同阶段和空间的施策将影响城市因灾损失和灾后恢复的曲线路径。例如：提升灾前城市的工程设防标准将改变B点的易损性区间，通过合理配置多种防灾设施提升城市抵抗灾害的能力，都能够减少损失并提升B点的性能值。再如：预先规划灾后是否需要一定比例的转移避难、救治，需要考虑哪些关键设施

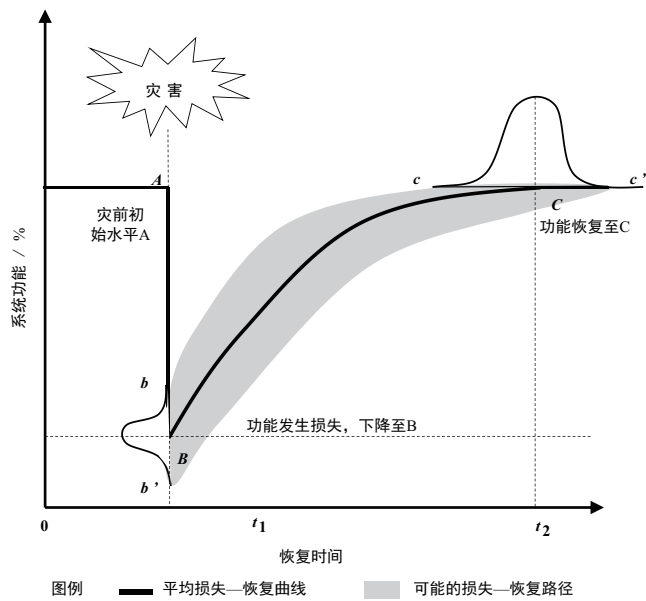


图6 基于易损性理念的系统韧性损失和恢复评估  
资料来源：作者根据参考文献[37]绘制

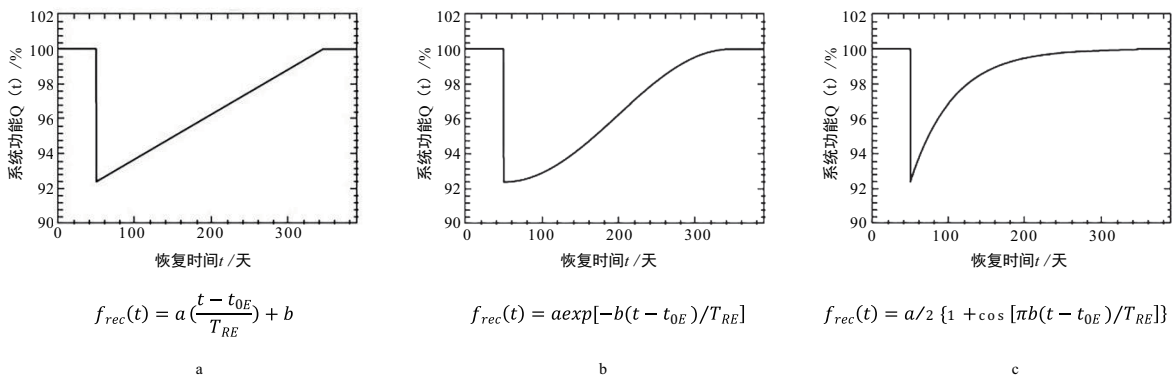
设备优先保障启用等恢复策略，也能改变C点的恢复区间，有效提升恢复速度。城市易损性的融入可为防灾规划全过程纳入损失不确定性情景的考虑<sup>[37]</sup>，完善防灾韧性量化评估的技术，进而为优化韧性规划决策提供便利。

此外，图6的BC段恢复过程具有不确定性。规划提供的不同灾后恢复策略将影响BC段的走势。奇梅拉罗等（Cimellaro et al.）总结了恢复过程的3种模型，分别为线性恢复模型、指数恢复模型和三角函数恢复模型<sup>[43]</sup>。线性恢复模型适用于灾后没有任何关于准备、资源和反应信息的情景，是一种最简单的形式（图7a）。指数恢复模型为开始基于本身资源，随着外来资源流入，恢复速率由慢到快，到一定水平后速率再次变慢（图7b）。三角函数恢复模型适用于灾后缺乏组织和有限资源的情景，如社区自组织和互助下，最初恢复较快，之后由于缺乏资源导致恢复速率快速下降（图7c）。恢复过程受到灾后不同阶段的政策、资源和是否再次受灾（如次生灾害）等多方面因素影响。

## 2.2 融合框架：以规划策略干预系统防灾韧性

由2.1小节可知，防灾韧性可基于功能损失和恢复两个方面进行评估。规划作为一种工具和手段，可通过不同操作工具下的多种策略提升系统性能，以达到减少损失和加快恢复的目标。例如：提升多水准灾害设防，优化功能系统空间布局，配置防灾设施和提出上述内容治理要求等。本研究提出的面向规划的城市防灾韧性融合框架分为3个层次：上层是系统的韧性表达，底层是韧性的机理表达，规划策略位于中部，面向不同对象，从工程单体到功能空间，再到防灾管理，使系统在面临灾害扰动时具有韧性，减少因灾损失，提升恢复效果（图8）。

基于防灾韧性的理念分析<sup>[44]</sup>，防灾韧性可从结构、空间和功能满足等不同维度来限定研究目标和构建研究系统。



注：图中公式里， $f_{rec}(t)$ 为t时刻的系统功能， $t_{0E}$ 、 $T_{RE}$ 分别为初始恢复时刻和总恢复时间，a和b为系数。

图7 灾后恢复过程模型  
资料来源：参考文献[43]



是由一个系统状态转变为另一种系统状态的过程，一般采用扰沌模型进行测度<sup>[55-56]</sup>；本研究中规划策略的作用处于灾害影响下的一种系统状态，因此仅对工程韧性和空间韧性进行探讨。

图 10 展示工程韧性评估、空间韧性评估作为接口，衔接点状、线状和网状的规划系统对象类型。图 11 以建筑物系统、基础设施系统和应急服务系统为例，说明不同系统对象类型的评估方法选取。

其中，点状对象采用工程韧性评估方法，得到城市工程单体、重要节点或空间单元的韧性评估结果，易损性模型和恢复时间的概率密度函数支撑了损失和恢复的计算。

线状对象采用工程韧性 + 空间韧性的评估方法，如城市的供水、供电等基础设施系统，既包括水厂、泵站、管网，或变电站和输电线路等物理设施对象，也包括功能连接等空间关系。对于物理设施对象，使用工程韧性评估方法，通过易损性模型和恢复时间的概率密度函数进行计算；对于空间关联，则使用空间韧性评估方法，如基于图论等复杂网络方法进行计算。

网状对象在点状、线状对象的基础上聚焦紧急服务，如城市的灾后医疗、避难和消防等<sup>[57]</sup>，同样可采用工程韧性 + 空间韧性的评估方法。

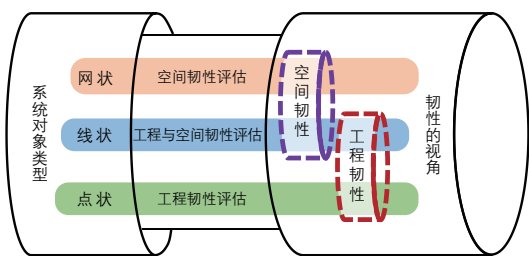


图 10 系统对象与防灾韧性的融合接口

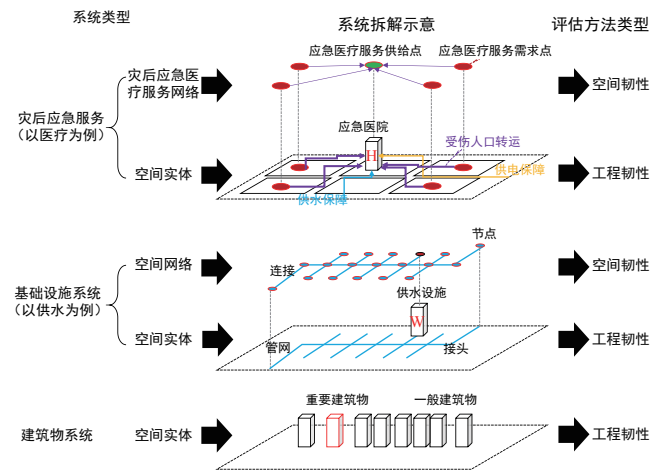


图 11 城市系统对象类型与防灾韧性评估方法对应

### 3 实证研究：城市韧性抗震防灾规划实践

N市是位于我国东部的县级市，中心城区面积约7 500 hm<sup>2</sup>，城市建设基础整体较好，相关资料较为丰富。参照《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)，研究区位于峰值加速度0.10 g分区、反应谱特征周期0.40 s分区，城市的抗震设防烈度为7度设防。根据2.2小节构建的融合框架，规划可通过不同策略提升城市应对灾害的能力，以减少损失、加快恢复。因此，N市的韧性抗震防灾规划编制分为提出韧性目标、计算损失情景、进行目标—能力差距分析、提出灾前保障和灾后恢复策略4个步骤。限于篇幅，考虑设防、布局、设施和管制4类策略中凸显技术创新的管制类策略为案例策略，聚焦灾前保障、灾后恢复两个方面，仅选用大震水准下的建筑物系统作为案例评估对象。

(1) 提出城市抗震防灾规划的韧性目标。目标可以综合考虑地震的灾害作用、承灾体破坏、震后城市影响和导致的最不利情景等因素，体现分类分级的思想。例如：承担重要功能的对象与一般建筑物和基础设施相比，应设置更高的保障和恢复目标。

(2) 构建城市承灾体应对地震的损失情景。建筑物和基础设施在应对多水准地震时，其破坏程度和恢复时间显然不同，采用易损性模型和恢复模型评估小震、中震、大震等灾害影响下的损失和恢复情景。如图12（左图）和12（右图）分别为N市中心城区建筑物大震情景下损失与恢复时间的计算结果。

(3) 进行目标—能力差距分析。以能力值与目标值的比值为标准，划分最终韧性等级。如图13a和13b分别为大震情景下N市中心城区建筑物实际损失与损失控制目标、实际恢复时间与恢复时间目标的比值，图13c为根据分级标准确定的建筑物韧性等级。

(4) 综合考虑规划对象的重要性、损失情景与目标差距等因素，分别提出灾前保障和灾后恢复的优先顺序规划策略（图14）。

### 4 结论与讨论

本研究针对当前规划与韧性融合在损失和恢复概率模型缺乏、融合思路难明确、框架接口未打通等方面的问题，提出易损性理念下的融合思路、融合框架和融合接口。在融合过程中，最重要的是将规划在韧性曲线模型上体现出来，因此需要通过易损性模型支撑损失和恢复等的关键阈值点计算，确定韧性曲线的形式，明确规划策略可在损失减少和恢复提升两个方面着力。在此基础上，融合框架的构建需要考虑研究系统构成、韧性机理和规划3个方面，提出

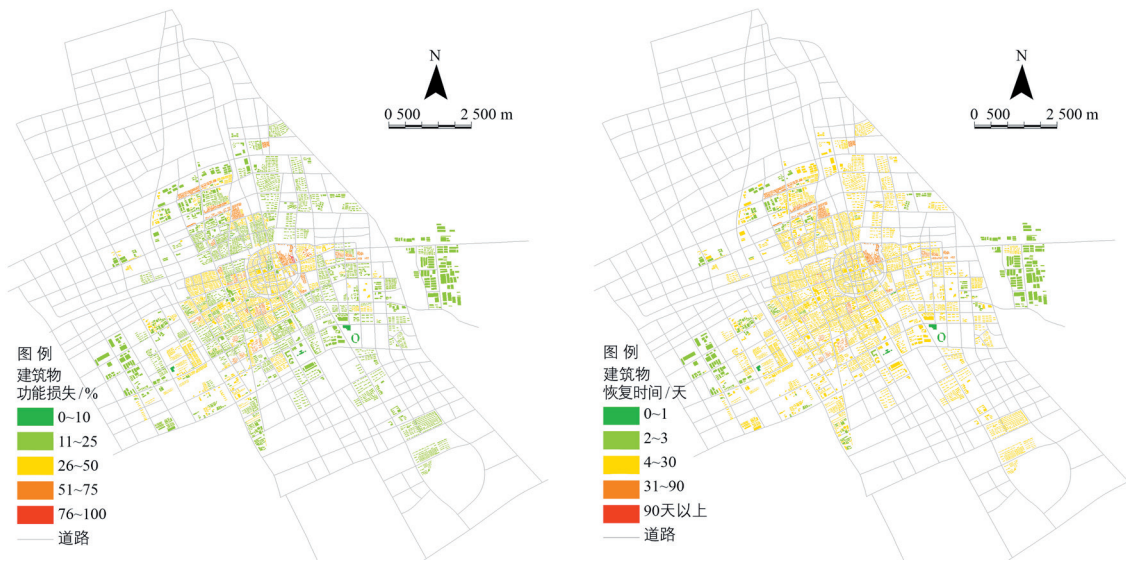


图12 大震情景下N市建筑物功能损失（左）与恢复时间计算结果（右）



图13 通过目标—能力差距分析确定N市建筑物韧性等级

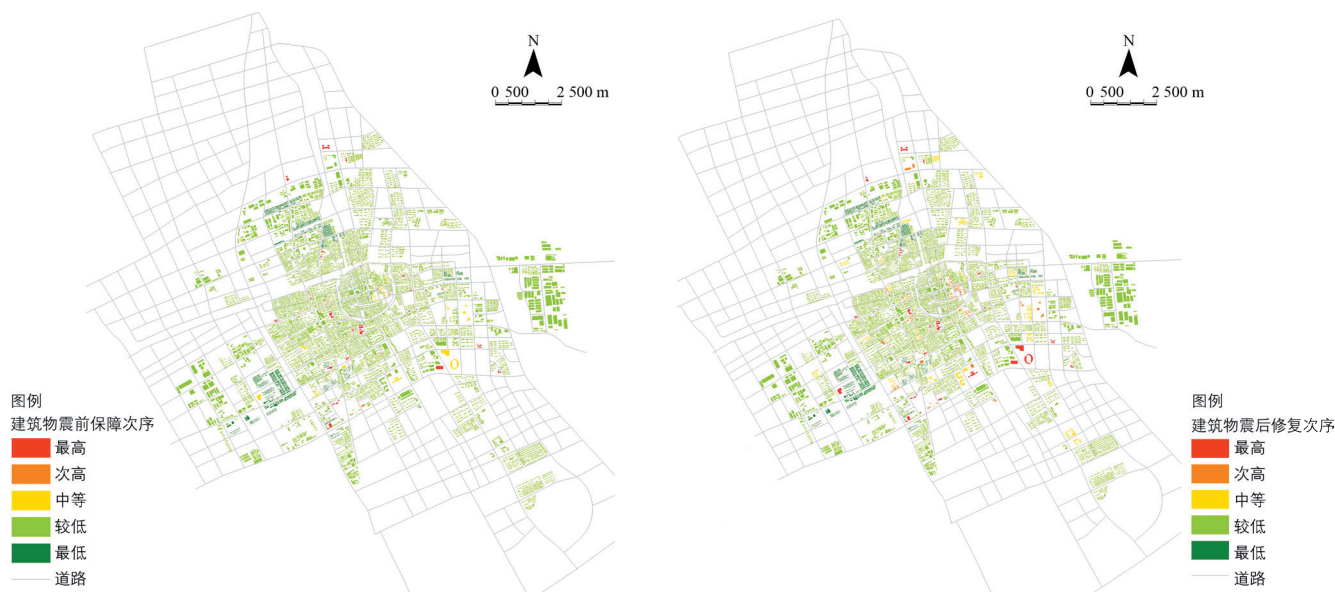


图 14 N市建筑物震前保障次序（左）和震后修复次序（右）

规划目标下考虑不同系统对象、韧性维度、特征阶段的策略，选用工程韧性、空间韧性等类型评估方法针对性地进行量化测度。本文采用城市抗震防灾规划的案例进行了实证研究，验证了融合框架的有效性，改进了城市抗震防灾规划中的韧性技术。

回顾过往研究发现，规划层面较少考虑灾害等扰动因子的深度作用，各类型专门防灾策略往往多聚焦工程层面，更多空间性的非工程策略通常难以被量化，导致传统规划策略与防灾专业评估之间存在断层，这是规划与防灾韧性研究融合困难的主要技术原因之一。这里不妨抛出两个问题供未来进一步讨论：规划建设到何种程度可谓具有韧性？城市面对各类超越工程防水准的灾害又需要怎样的韧性？易损性模型作为基于一定假设的概率模型固然有其局限性，但它为规划策略与韧性目标在技术层面的进一步融合提供了便利，衔接规划与专业工程防灾并拓展研究领域，如将工程防水拓展为“设防标准+”，将物质空间损失拓展为“功能性损失”等，全方位体现规划赋能防灾减损的作用。由于篇幅所限，本研究仅以城市抗震防灾规划中的建筑物系统进行了实证，未来可基于韧性系统的构建开展全面研究和尝试。UPI

注：文中未标注资料来源的图片均为作者绘制。

## 参考文献

- [1] UNDRR. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR)[R/OL]. (2025)[2026-04-07]. <https://www.undrr.org/gar/gar2025#download>.
- [2] 郭小东, 苏经宇, 王志涛. 韧性理论视角下的城市安全减灾[J]. 上海城市规划, 2016(1): 41-44.
- [3] 王志涛, 王晓卓. 我国城市防灾规划研究 40 年: 基于中国知网期刊文献的可视化分析[J]. 上海城市规划, 2020(4): 106-112.
- [4] 石晓冬, 张晓昕, 冯雅薇, 等. 北京市韧性城市建设的系统路径与规划实践[J]. 城市学报, 2024(6): 24-29.
- [5] AJIBADE I. Can a future city enhance urban resilience and sustainability? a political ecology analysis of Eko Atlantic city, Nigeria[J]. International journal of disaster risk reduction, 2017, 26: 85-92.
- [6] BIGLARI M, FORMISANO A. Damage probability matrices and empirical fragility curves from damage data on masonry buildings after Sarpole-zahab and bam earthquakes of Iran[J]. Frontiers in built environment, 2020(6): 1-12.
- [7] DA PORTO F, MUNARI M, PROTA A, et al. Analysis and repair of clustered buildings: case study of a block in the historic city centre of L'Aquila (Central Italy)[J]. Construction and building materials, 2013, 38: 1221-1237.
- [8] MOEHLE J, DEIERLEIN G G. A framework methodology for performance-based earthquake engineering[C]. 13th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE Vancouver, 2004, 679: 12-24.
- [9] 杨敏行, 黄波, 崔翀, 等. 基于韧性城市理论的危害防治研究回顾与展望[J]. 城市规划学刊, 2016(1): 48-55.
- [10] SILVA V, AKKAR S, BAKER J, et al. Current challenges and future trends in analytical fragility and vulnerability modeling[J]. Earthquake spectra, 2019, 35(4): 1927-1952.
- [11] WHITMAN R V. Damage probability matrices for prototype buildings[M]. Boston: Structures publication, 1973, 380: 4-7.
- [12] FACCIOLI E, PESSINA V, CALVI G M, et al. A study on damage scenarios for residential buildings in Catania city[J]. Journal of seismology, 1999(3): 327-343.
- [13] ORSINI G. A model for buildings' vulnerability assessment using the parameterless scale of seismic intensity (PSI)[J]. Earthquake spectra, 1999, 15(3): 463-483.
- [14] SPENCE R, COBURN A W, POMONIS A, et al. Correlation of ground motion with building damage: the definition of a new damage-based seismic intensity scale[C]. Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Balkema Rotterdam, 1992: 551-556.
- [15] BRAZEE R J. Reevaluation of modified Mercalli intensity scale for earthquakes using distance as determinant[J]. Bulletin of the seismological society of America, 1979, 69(3): 911-924.

- [16] ROTA M, PENNA A, STROBBIA C. Typological fragility curves from Italian earthquake damage data[C]. 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland. 2006: 386-396.
- [17] 吕大刚, 于晓辉. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 41-48.
- [18] ZUCCARO G, PERELLI F L, De GREGORIO D, et al. Empirical vulnerability curves for Italian masonry buildings: evolution of vulnerability model from the DPM to curves as a function of acceleration[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2021, 19: 3077-3097.
- [19] FOTOPOULOU S, KARAFAGKA S, PITILAKIS K. Vulnerability assessment of low-code reinforced concrete frame buildings subjected to liquefaction-induced differential displacements[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2018, 110: 173-184.
- [20] DEL GAUDIO C, RICCI P, VERDERAME G M, et al. Development and urban-scale application of a simplified method for seismic fragility assessment of RC buildings[J]. Engineering structures, 2015, 91: 40-57.
- [21] MARTINS L, SILVA V. Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2021, 19: 6719-6745.
- [22] LU Q, ZHANG L, XU P, 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.
- [23] FEMA. Hazus earthquake model technical manual[S]. 2020.
- [24] THAPA S, SHRESTHA A, LAMICHHANE S, et al. Catchment-scale flood hazard mapping and flood vulnerability analysis of residential buildings: the case of Khando River in eastern Nepal[J]. Journal of hydrology: regional studies, 2020, 30: 100704.
- [25] 蒋新宇, 马雪莹, 杨丽娇. 回归分析框架下洪涝灾害脆弱性曲线构建方法综合比较研究[J]. 水利学报, 2023, 54(2): 184-198.
- [26] YANG Y H, XIN Y L, ZHOU J J, et al. Failure probability estimation of transmission lines during typhoon based on tropical cyclone wind model and component vulnerability model[C]. 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Bangalore, India, 2017, 1-6.
- [27] DAVIDSON R A, ZHAO H, KUMAR V. Quantitative model to forecast changes in hurricane vulnerability of regional building inventory[J]. Journal of infrastructure systems, 2003, 9(2): 55-64.
- [28] ZHANG S, NISHIJIMA K, MARUYAMA T. Reliability-based modeling of typhoon induced wind vulnerability for residential buildings in Japan[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2014, 124: 68-81.
- [29] CHENG H, CHEN Z, HUANG Y. Quantitative physical model of vulnerability of buildings to urban flow slides in construction solid waste landfills: a case study of the 2015 Shenzhen flow slide[J]. Natural hazards, 2022, 112(2): 1567-1587.
- [30] PEDUTO D, NICODEMO G, MACCABIANI J, et al. Multi-scale analysis of settlement-induced building damage using damage surveys and DInSAR data: a case study in The Netherlands[J]. Engineering geology, 2017, 218: 117-133.
- [31] LAGOMARSINO S, GIOVINAZZI S. Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2006(4): 415-443.
- [32] WIEBE D M, COX D T. Application of fragility curves to estimate building damage and economic loss at a community scale: a case study of Seaside, Oregon[J]. Natural hazards, 2014, 71: 2043-2061.
- [33] DEL GAUDIO C, De MARTINO G, Di LUDOVICO M, et al. Empirical fragility curves for masonry buildings after the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2019, 17: 6301-6330.
- [34] SANDOLI A, CALDERONI B, LIGNOLA G P, et al. Seismic vulnerability assessment of minor Italian urban centres: development of urban fragility curves[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2022, 20(10): 5017-5046.
- [35] FEI Z, GUO X, ODONGO J O, et al. A seismic fragility assessment method for urban function spatial units: a case study of Xuzhou City[J]. Sustainability, 2023, 15(10): 8022-8042.
- [36] LIU Z, LI S, GUO A, et al. Comprehensive functional resilience assessment methodology for bridge networks using data-driven fragility models[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2022, 159: 107326.
- [37] KAMESHWAR S, COX D T, BARBOSA A R, et al. Probabilistic decision-support framework for community resilience: Incorporating multi-hazards, infrastructure interdependencies, and resilience goals in a Bayesian network[J]. Reliability engineering & system safety, 2019, 191: 106568.
- [38] ARGYROUDIS S A, MITOULIS S A, HOFER L, et al. Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: case study on transport assets[J]. Science of the total environment, 2020, 714: 136854.
- [39] FARAHANI S, BEHNAM B, TAHERSHAMSI A. Probabilistic seismic multi-hazard loss estimation of Iran gas trunklines[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2020, 66(5): 1-26.
- [40] 住房和城乡建设部标准定额研究所. RISN-TG041-2022 城市工程系统抗震韧性评价导则[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [41] ARUP. Resilience-based earthquake design (REDiTM) rating system[EB/OL]. [2024-05-26]. [https://static1.squarespace.com/static/61d5bdb2d77d2d6ccd13b976/t/61e85a429039460930278463/1642617413050/REDi\\_Final+Version\\_October+2013+Arup+Website+%288%29.pdf](https://static1.squarespace.com/static/61d5bdb2d77d2d6ccd13b976/t/61e85a429039460930278463/1642617413050/REDi_Final+Version_October+2013+Arup+Website+%288%29.pdf).
- [42] FEMA. Seismic performance assessment of buildings, Volume 1, Methodology: FEMA P-58[S]. Washington D.C.: 2006.
- [43] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering structures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [44] 费智涛, 王志涛, 郭小东, 等. 城市韧性的机理性量化评估方法进展与融入规划探讨[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(12): 1260-1271.
- [45] 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.
- [46] CIMELLARO, PAOLO G. Urban resilience for emergency response and recovery[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016: 109-137.
- [47] 陈竞妹. 韧性城市理论下河流蓝绿空间融合策略研究[J]. 规划师, 2020, 36(14): 5-10.
- [48] 彭雄亮, 姜洪庆, 黄铎, 等. 粤港澳大湾区城市群适应台风气候的韧性空间策略[J]. 城市发展研究, 2019, 26(4): 55-62.
- [49] CAVALLARO M, ASPRONE D, LATORA V, et al. Assessment of urban ecosystem resilience through hybrid social - physical complex networks[J]. Computer-aided civil and infrastructure engineering, 2014, 29(8): 608-625.
- [50] 李艳, 陈雯, 孙阳. 关联演化视角下地理学区域韧性分析的新思考[J]. 地理研究, 2019, 38(7): 1694-1704.
- [51] 彭翀, 陈思宇, 王宝强. 中断模拟下城市群网络结构韧性研究: 以长江中游城市群客运网络为例[J]. 经济地理, 2019, 39(8): 68-76.
- [52] DCP. OneNYC 2050: building a strong and fair city[EB/OL]. [2024-05-24]. <https://onenyc.cityofnewyork.us/>.
- [53] 郭小东, 费智涛, 王志涛. 城市灾害应对的刚性、弹性与韧性[J]. 城乡规划, 2021(3): 35-42.
- [54] 翟国方. 气候变化背景下规划视角的城市雨洪灾害韧性应对: 关键概念、基本思路和通用框架[J]. 城市规划学刊, 2024(1): 29-37.
- [55] 李嘉艺, 孙隽, 郑曦. 基于适应性循环理论的区域生态风险时空演变评估: 以长江三角洲城市群为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2609-2621.
- [56] 夏陈红, 马东辉, 郭小东, 等. 适应性循环视角下的国土空间适灾韧性机理与规划响应研究[J]. 城市发展研究, 2024, 31(2): 44-52.
- [57] 王威, 李瑞, 郭小东, 等. 城市消防救援网络形态特征、抗毁性与鲁棒性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(1): 28-34.

(本文编辑: 张祎娴)