

空间韧性视角下地下公共空间规划策略研究*

——以武汉市为例

Planning Strategy of Underground Public Space from the Perspective of Spatial Resilience: A Case Study of Wuhan City

何源 田燕 李智勇 贾潞娟 范李兴 HE Yuan, TIAN Yan, LI Zhiyong, JIA Lujuan, FAN Lixing

摘要 为提高地下公共空间韧性水平,从空间韧性视角出发,探究地下公共空间在构建韧性城市中的地位与作用,以及规划应对策略。通过对地下公共空间韧性表征的分析,创新性地提出韧性溢出理论构想,以描述地下公共空间对城市系统的韧性支撑与其自身韧性建设的关系。以此为基础,分别使用定性、定量研究方法对武汉宏观及微观层面的地下公共空间现状韧性溢出效应进行评价。结合地下空间规划体系,从空间设计、制度创新和治理水平3个层面提出规划应对策略。

Abstract To improve the resilience level of underground public space, from the perspective of spatial resilience, this paper examines the status and role of underground public space in building a resilient city and explores planning strategies. From the analysis of the characterization of the resilience of underground public space, the theory of resilience spillover is innovatively proposed to describe the relationship between the resilience support effect of underground public space on the urban system and its resilience construction. Based on this, this study uses quantitative and qualitative research techniques to evaluate the resilience spillover effect of the underground public space at the macro and micro levels in Wuhan. Combining the underground spatial planning system, this paper proposes planning strategies from three aspects: spatial design, system innovation, and governance level.

关键词 空间韧性;地下公共空间;韧性溢出;规划策略

Key words spatial resilience; underground public space; resilience spillover; planning strategy

文章编号 1673-8985 (2022) 05-0060-07 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20220510

作者简介

何源

武汉理工大学土木工程与建筑学院
硕士研究生, heyuan202106@163.com

田燕

武汉理工大学土木工程与建筑学院
教授, 博士生导师

武汉市自然资源与规划局 总工程师

李智勇

武汉理工大学土木工程与建筑学院
博士研究生

武汉理工大设计研究院有限公司 工程师

贾潞娟

武汉理工大学土木工程与建筑学院
硕士研究生

范李兴

武汉理工大学土木工程与建筑学院
硕士研究生

尽管地下空间系统对构建韧性城市的贡献已被广泛认可,但现有的研究成果中,有关地下公共空间在韧性城市中的地位与作用的研究仍相对欠缺,且相关研究多立足于防灾视角,缺乏空间层面的探讨。在可见的未来,地下公共空间还将承载更多的城市公共活动,强化空间韧性势在必行。为此,规划亟需深刻反思地下公共空间的韧性缺失问题,以提升空间韧性为导向,在空间设计、制度创新及治理水平等层面上做出响应。

1 理论研究基础

1.1 从韧性到空间韧性

韧性的词源是拉丁语的“resilio”,最初是

回复原位之意,然而经过各学科不断发展,韧性理论在被规划学者接受的过程中出现了概念分化^[1]。这一方面是因为韧性理论包括品质韧性及过程韧性的不同解释倾向,前者相比于后者更关注研究对象的韧性机能(见图1);另一方面是规划学者在引入新理念时习惯性地站在空间资源配置的学科基础上去理解^[2]。在这种背景下,生发于奈斯特龙和福克关于大堡礁研究中的“空间韧性”理论,逐渐演化为城市韧性研究的前沿领域。多位学者的研究表明,空间的连通性、空间布局、内外组分相互作用、异质性和多样性等均对空间韧性有显著意义,艾伦在总结其观点后提出:空间韧性是系统的空间属性对产生韧性反馈的贡献,建基于

*基金项目:2022年湖北省自然资源科技项目“城市CBD核心区地下空间空气品质的典型空间形态CFD模拟与优化研究”(编号ZRZY2022KJ26)资助。

复杂系统的不对称性、连通性和信息交换^[3]。国内外规划学者在引用空间韧性概念时,普遍寄希望于通过对空间形态、功能、组织的调整,以空间规划的方式激发城市面对扰动的适应性、稳健性和恢复性。

1.2 相关研究进展

长期以来,关于地下空间韧性的探讨集中于岩土工程领域,对象主要是地下基础设施、施工安全、材料韧性和防灾韧性,少有针对空间韧性的探讨。这是由于地下空间的发展与技术进步密不可分,理论进展必然与地下空间从工具属性向空间属性价值回归的过程相适应。与其他地下系统相比,地下公共空间的空间属性更强,是规划、建筑学者在地下开展韧性研究的最佳对象。分析防灾方向论文发现,地下公共空间面对的灾害风险包括火灾、洪涝、恐怖袭击等。该类研究偶有涉及应灾韧性评价体系,但囿于单一灾种,往往对空间属性论述不深,更少从规划上提出应对策略。

新冠肺炎疫情使得规划学者通过回顾城市抗疫表现审视城市空间与韧性之间的关联,加速了空间韧性理论转向研究地下空间的进程,地下空间层面的韧性研究明显增加。黄莺等^[4]基于韧性曲线和复杂网络理论,模拟了地铁网络在不同受灾场景下的最优恢复策略;向姮玲^[5]通过建立地下轨道交通步行路径设计要素与人群行为特征的评价体系,探讨韧性视角下地下步行空间设计的要点。但此类研究多是利用图论对地下公共空间进行的拓扑分析,缺乏定量的韧性评价。

2 地下公共空间韧性研究

2.1 地下公共空间的韧性表征

(1) 为高密度城区提供冗余空间

大规模、多样化的地下公共空间建设可释放地上开敞空间,提升空间品质,保护城市生态格局,这一点在高密度城区表现得尤为突出。例如:通过建设地下车库和地下环路将车流引入地下,可极大减轻地上交通压力,促进地上道路转化为生活性街道或绿道,降低机动

车道对地上公共空间的切割效应。武汉已经建成的王家墩商务区和在建的汉口滨江商务区均采用这种模式,缓解了热岛效应并保证了街区的生活气息。

(2) 为城市提供可靠的避难、疏散服务

地下公共空间的物理特性决定了它相较于地上空间在面对扰动时具有更高的稳定性。往往被视为应急防灾避难的缓冲空间,在实践中常与人防工程广泛融合,起到临时避难以及物资、人员转运的作用。武汉近年来在“平战结合”思想的指导下,结合重点地段地下空间建设,探索出一条“地铁+人防工程+地下商业街+地下停车场”的开发模式,每年创造人防停车位超1万个。一个“平战结合、相互连接、四通八达”的地下公共空间系统为人防事业的发展提供了空间载体。

(3) 提供更新契机,激发旧城活力

根据城市触媒理论,以地铁、地下街为代表的地下公共空间的开发建设会释放强大的正外部性,刺激旧城自发更新,从而吸引更多服务配套跟进,改善人居环境,提高区域整体韧性水平。武汉旧城面积大,人口密度高,基础设施及公共服务配套紧张,域内多文物古迹及历史文化风貌地段。利用地铁建设的契机,对站点周边的空间进行修补改造,结合站域空间的特色小品设置,探索出旧城更新与名城保护并重的地下空间利用模式。

(4) 地下公共空间自身的韧性特征

这一点在以往的地下空间韧性研究中常常被忽略,伴随着心理学、景观等多学科对地下公共空间的研究,其内涵逐渐丰富、韧性特征范畴不断拓展。地下公共空间人员活动密集,规划、建设、运营均有完善的组织形态,属于空间属性较强的社会生态系统,其所包括的韧性特征如图2所示。其中,鲁棒性^①、多样性和冗余性是复杂系统的固有属性,分别指的是系统的强健程度、组分的丰富程度和系统的备份程度。考虑到地下公共空间具有较为封闭、方向感模糊等特性^[6],本文在鲁棒性和冗余性的基础上分别拓展出了空间舒适性、连通性,以期有的放矢地指导地下空间的韧性提升(见图2)。

2.2 韧性溢出理论构想

通过对韧性表征的梳理,发现地下公共空间的空间韧性既包括其对城市的韧性服务,又包括自身的韧性机能。与韧性服务论中将地下空间视为状态稳定的韧性提升工具不同,这意味着地下公共空间的空间属性与韧性机能之间存在辩证关系,是一个动态的概念。由此,笔者在韧性服务论的基础上进行更新,提出“韧性溢出”的理论构想。它的含义是:韧性机能会从互相耦合的空间系统之间由具备较高韧性水平的系统通过物质、人员的流动,服务、功能的补充等方式向低韧性空间系统溢出(见图3)。

具体到本文的研究对象,韧性溢出构想表现为:由于地下公共空间与其他空间系统在空间上存在耦合关系,通过对地下公共空间的韧性建设,拉高系统韧性机能,就可形成在灾前提供冗余空间、灾中保障人员安全、灾后助力快速恢复的空间韧性支撑。此外,由于蕴含空间与韧性的辩证关系,其概念还可以进行适度

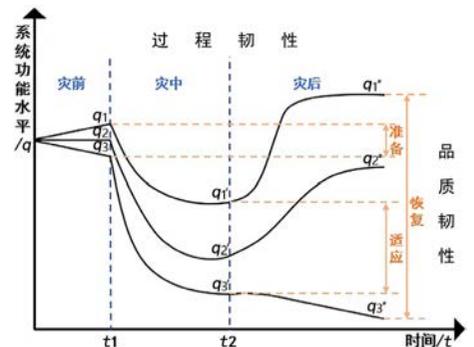


图1 不同解释倾向下的韧性理论
Fig.1 Resilience under different explanatory tendencies

资料来源:笔者自绘。

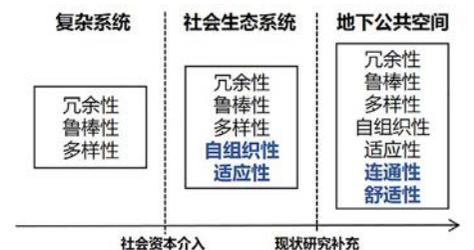


图2 地下公共空间自身的韧性特征
Fig.2 Resiliency characteristics of underground public space

资料来源:笔者自绘。

注释: ① 鲁棒性:英文robustness的音译,是国内韧性理论的习惯译法。

拓展。例如：从防灾视角出发，当面对地震、雷暴、飓风等灾害时，因具备较强的稳定性，地下公共空间可为城市提供韧性支撑；而在洪水、火灾、毒气等灾害面前，由于更具脆弱性，地下公共空间则需要针对性的韧性建设。

2.3 韧性溢出构想在空间规划中的体现

地下公共空间是与人类活动联系最为紧密的地下空间类型，它能起到保障公共利益、构建系统骨架、引导城市开发等作用，已逐渐成为地下空间系统的核心，其在规划中的重要性不言而喻^[7]。目前，涉及地下公共空间的规划主要包括地下空间、人防、轨道交通等专项规划。其中，地下空间规划已经形成较为完备的编制体系，包容性较强，是指导地下公共空间建设的重要规划类型。各地的地下空间规划尽管名称并不统一，但都建立了一套从宏观到微观，依托“总规—控规—详规+城市设计”的规划编制体系。例如：武汉的地下空间规划由确定城区地下空间结构、布局，划定开发强度分区的主城区地下空间综合开发利用专项规划，确定主导功能、开发规模、出入口位置的主城区地下空间规划导则，以及针对重点地段地下空间开发模式、空间布局、各项设施布置的地下空间规划组成^[9]。

韧性溢出构想关注宏观层面地下公共空间对城市的韧性支撑，以及微观层面韧性建设与地下空间规划体系的紧密结合。以武汉为例，在宏观层面针对主城区的地下公共空间综合利用专项规划中，应关注地下公共空间系统的布局结构和开发容量，突出其对城市的韧性支撑；而具体到重点地段或地块的地下空间详细规划中，应突出地下公共空间自身的韧性建设，提高系统韧性机能水平（见图4）。

3 武汉地下公共空间韧性溢出效应评价

3.1 宏观层面韧性支撑能力的定性研究

基于韧性溢出理论构想，本文采用定性研究的方法，总结归纳武汉地下公共空间的开发需求、利用形式和空间布局结构等现状，对宏观层面的地下公共空间的韧性支撑进行分析

和评价。

(1) 开发需求预测

武汉主城区位于江汉平原与鄂东燕山褶皱山地过渡地带，地质构造相对稳定，域内大部分地区地下空间开发适宜性较高。截至2020年，武汉主城区地下空间开发强度（建成区地下空间开发建筑面积与建成区面积之比）达到了6.55万m²/km²，人均地下空间规模为5.46 m²。得益于武汉近几年大规模的轨道交通建设，总体规模有很大提升。与国内同等级城市进行横向对比发现，武汉的地下空间开发规模已处于领先地位，但相较上海、南京、杭州等城市仍有一定差距（见表1）。按照曾灿军^[9]建立的地下空间开发强度预测模型并结合相关指标进行计算，武汉地下空间需求存在约1 300万m²的缺口，预计在未来3—4年内，仍将处于地下空间的快速发展期。

(2) 空间利用形式

武汉的地下公共空间在开发形式上可分为：位于道路、广场、绿地等公共用地下的单建地下空间及位于开发地块下的结建地下空

间。它们的功能形态、开发主体及公共性差异如表2所示。从功能形态上看，利用形式都以提供交通服务为主，人员驻留时间短，主要作为地上空间功能的一种延伸和补充。从开发主体来看，单建类地下公共空间的建设由各类专项规划引导，强调公共利益，整体性较强，构成了地下公共空间利用骨架，缺点是不够灵活，相较市场预期存在滞后或者超前的情况。而结建类地下公共空间的开发利用存在一定的自发性，开发利用形式较为灵活，但不成体系，彼此之间缺乏连接，公共性较低；较低的公共性有损地下公共空间的社会效益，导致低收入及边缘群体难以从中获益。

(3) 空间布局结构

在布局结构上，武汉地下公共空间以轨道交通网络为骨架，呈现“一环多点，轴带发散”的中心放射发展态势。环内形成以主要商圈、商务区，以及火车站区的地下公共空间为节点，依托轨道交通线路的网络状布局；发展轴带上形成以轨道交通线路为线索的脊状

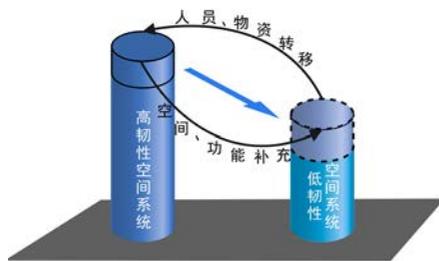


图3 韧性溢出理论模型

Fig.3 Theoretical model of resilience spillover

资料来源：笔者自绘。

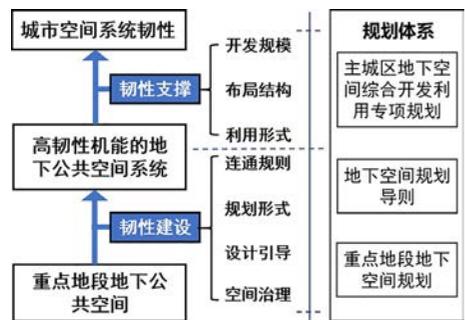


图4 武汉市地下公共空间韧性规划体系

Fig.4 Wuhan underground public space resilience planning system

资料来源：笔者自绘。

表1 武汉地下空间开发规模横向对比

Tab.1 Horizontal comparison of underground space development scale in Wuhan

城市	市区人口密度 / (千人 / km ²)	人均 GDP / 万元	城镇化率 / %	建成区地下开发强度 / (万 m ² /km ²)	人均地下空间规模 / m ²	地下空间社会主导率 / %	停车地下化率 / %
北京	1.31	16.40	86.60	7.08	4.83	48.22	36.32
上海	3.83	15.73	88.10	9.70	4.94	47.48	60.21
广州	2.06	15.64	86.46	5.30	4.50	67.70	52.93
深圳	6.73	20.35	100.00	5.57	3.85	34.53	35.87
南京	1.29	16.57	83.20	7.59	7.30	72.96	59.97
杭州	1.29	15.25	78.50	14.47	8.59	80.49	61.79
武汉	1.03	14.55	80.49	6.55	5.46	55.80	48.97

资料来源：中国地下空间发展蓝皮书2020。

布局^[10] (见图5)。在环内,地铁站点密度大且与周边结建类地下公共空间的联系较为密切,功能更为多元。在发展轴上,轨道交通站点往往结合商业综合体形成TOD核心区,人员流动呈现明显的潮汐特性。

(4) 宏观层面地下公共空间韧性支撑水平的定性研究结论

基于上述分析,笔者对宏观层面的武汉地下公共空间进行梳理:从开发需求预测上看,武汉的地下空间建设尚处于快速发展期,现有的地下公共空间存量不能满足需求,空间冗余度缺失。从开发形式上看,单建类地下公共空间功能形态较为单一,而结建类地下公共空间的公共性有待提升。从空间布局结构来看,武汉地下公共空间伴随着城市多中心发展战略形成“次聚点发展模式”,在中心区及轴带上显示出不同的发展水平,但都面临与周边结建类地下公共空间资源整合及空间连通度不够的问题。总而言之,在空间冗余度、服务覆盖范围及空间布局结构等方面,武汉市地下公共空间系统存在不同程度的韧性缺失问题,对城市的韧性支撑能力有待加强。

3.2 微观层面韧性机能水平的定量研究

本文构建针对地下公共空间的空间韧性评价理论框架,采用层次分析法(AHP)确定各项指标权重,选取武汉王家墩商务区、街道口商圈和光谷一鲁巷商圈地下公共空间案例,利用模糊评价法进行评价。

(1) 指标选取

笔者首先对法律法规、行业规范、期刊文献进行整理,结合地下公共空间特性,建立了可能影响地下公共空间韧性水平的因子集。然后利用德尔菲法对因子集进行筛选,最终构建

表2 武汉地下公共空间开发形式分析
Tab.2 Analysis of underground public space development form in Wuhan

开发形式	功能形态	开发主体	公共性
单建类地下公共空间	地铁	政府主导, 社会参与	以公共交通功能为核心, 公共性较强
	地下通道		
	地下广场		
结建类地下公共空间	地下综合体	自发建设, 政府引导	存在到访时间、目的等限制, 公共性较弱
	停车场		
	地下商业		
	地下文体		

资料来源:笔者自制。

以地下公共空间韧性特征为准则层,包括17个指标的评价体系(见图6)。

(2) 建立判断矩阵

运用yaahp软件构建AHP评价体系和调查表。通过电子邮件、访谈等方式邀请了4位业内专家组成群决策,对指标体系的重要程度进行两两比较打分,其中两位为规划领域专家,另外两位分别来自岩土和环境工程领域。重要性评分标度如表3所示。得到每位专家的评分矩阵(见图7)。

(3) 计算权重

以专家*n*的判断矩阵为例,利用特征根法,对矩阵行进行求积开方可得到B1...B6行的绝对权重 Q_{anj} ,将该因子层的*m*个指标都如此计算,然后进行求和,最终得出专家对该指标的权重 Q_{nj} 。

$$Q_{nj} = \frac{Q_{anj}}{\sum_{k=1}^m Q_{ak}}, j = 1, 2, \dots, m; n = 1, 2, \dots, P \quad (1)$$

式中:*j*是基准层编号即矩阵行数, *k*为其中任意值, *m*为指标个数, *P*为专家组人数。

为了修正专家给出的两两比较中误差的累积,在最大限度保留专家本意的前提下,通过在Ribbon工具条中设置自动使用合适的算法,并设定一致性比例阈值0.2,当不一致判断矩阵高于此阈值,使用最大改进方向算法,否则使用最小改变算法,保证判断矩阵通过一致性检验。

而后通过如下方法得到专家组的指标权重 Q_{comj} 。

$$Q_{comj} = \frac{Q_{bj}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m Q_{bi}}}, j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$Q_{bj} = \sqrt[p]{Q_{1j} \times Q_{2j} \dots Q_{pj}} \quad (3)$$

式中:*i*是子基准层编号即矩阵列数, Q_{bj} 及 Q_{bi} 是*P*位专家指标权重的几何平均值。基于上述计算过程,可以得出地下公共空间韧性评价权重的总体指标如表4所示。

(4) 打分依据

对重点地段地下公共空间的评价体系适合采用定量的评价方式,具有较强的实践意义和普遍的实用价值。本文综合运用包括空间分析法、调研问卷法等方式对指标进行量化研究。在打分方式上,部分数据的获取依赖调研问卷,因而具有一定的主观性,尽管结合李克特量表进行了量化,但仍然属于定性打分方式。按照量化指标的数据来源进

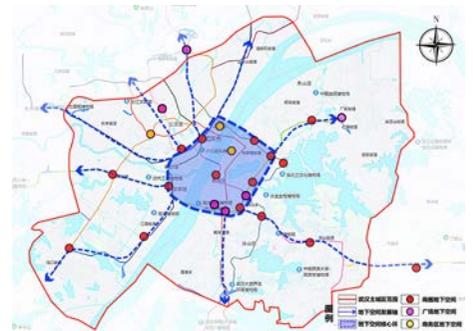


图5 武汉地下公共空间布局结构图
Fig.5 Wuhan underground public space layout structure

资料来源:笔者自绘。

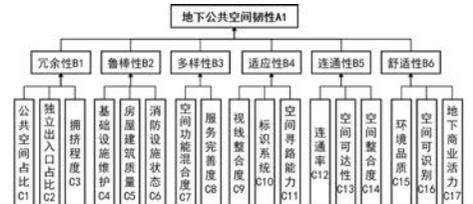


图6 地下公共空间韧性指标体系
Fig.6 Resilience index system of underground public space

资料来源:笔者自绘。

表3 重要性评分标度
Tab.3 Importance rating scale

标度	定义
1	<i>i</i> 比 <i>j</i> 同样重要
3	<i>i</i> 比 <i>j</i> 稍微重要
5	<i>i</i> 比 <i>j</i> 明显重要
7	<i>i</i> 比 <i>j</i> 强烈重要
9	<i>i</i> 比 <i>j</i> 极端重要
2、4、6、8	上述两两相邻判断中值
倒数	<i>i</i> 比 <i>j</i> 的判断 a_{ij} , 则 <i>j</i> 比 <i>i</i> 的判断 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

资料来源:笔者自制。

行分类,包括实地调研、空间句法分析和调查问卷3种。

通过实地调研获取的空间量化指标包括C1、C2、C7、C12。由实地调研及资料搜集直接获得的空间数据结合算法计算得出。

通过空间句法获取的量化指标包括C7、C9、C14、C19,需要绘制出平面图,导入depthmap,利用轴线、视线分析得出。部分数据如全局空间整合度、视线整合度还需要经过进一步的处理,算出平均值。

其他指标通过发放调查问卷的方式,结合李克特量表收集原始数据,经过进一步的处理和隶属度分析得出。该类指标属于定性打分方式,在空间绩效评价、活力评价等领域应用广泛,本文主要借鉴地下公共空间使用后评价(POE)的相关研究成果,基于韧性研究的需要设置指标和问卷,是对前两种空间指标的有益补充。

(5) 案例评价

本文选取的王家墩商务区、街道口商圈、光谷—鲁巷商圈案例都是武汉地下空间开发重点地段,它们分属于一体化建设、逐步建设及大规模改扩建等3种不同类型地下公共空间,比较具有代表意义。结合实地调研,归一化数据之后,参照打分标准对公共空间韧性进行打分(见表5),在一级指标层面利用雷达图进行相互对比分析(见图8),再结合权重进行处理,得出三者的韧性综合评分结果(见表6)。计算公式如下:

$$S = \sum_{k=1}^m (Q_{comk} C_k) \tag{4}$$

	B1	B2	B3	B4	B5	B6
B1	1	1/2	3	7	2	4
B2	2	1	2	3	5	5
B3	1/3	1/2	1	4	6	2
B4	1/7	1/3	1/4	1	1/2	1/4
B5	1/2	1/5	1/6	2	1	1/3
B6	4/1	1/5	1/2	4	3	1

图7 专家n判断矩阵
Fig.7 Judgment matrix of professor n

资料来源:笔者自绘。

式中:k指代某一项韧性指标, C_k 为该项性能评分, Q_{comk} 为某一项的权重, S为结合权重的评价结果。计算得出三者的韧性评分依次为:0.788、0.623、0.837。

(6) 微观层面地下公共空间韧性机能水平定量研究结论

基于上述分析,笔者对微观层面武汉地下公共空间的韧性缺失问题进行梳理:从三者的总得分来看,自发缓慢建设的街道口商圈得分最低,一体化建设完成的王家墩商务区相比改扩建后的光谷—鲁巷商圈得分低。这说明地下公共空间的韧性水平建设与维持是一项长期的工作,有赖于合理的规划引导及日常的经营。从单项评分来看,冗余性、鲁棒性、多样性、连通性、舒适性等韧性特征占比较高,三者的差距主要体现在冗余性、连通性和舒适性上,说明空间要素对提高韧性机能有着显著贡献。总而言之,武汉地下公共空间韧性机能在空间层面表现参差不齐、发展不均衡。

4 空间韧性视角下的规划应对

4.1 加强空间设计, 打造韧性空间

上述研究表明:布局结构、冗余度、舒适性等空间要素对空间韧性影响显著。有针对性地加强空间设计与引导,可以产生激发韧性支撑

效应、提升韧性机能的条件。

在宏观层面,重视空间的平灾结合,构建整体应急的地下公共空间韧性网络,放大系统韧性支撑效应。会同消防、轨道交通、人防等部门一起调整地下公共空间建设标准,赋予空间在紧急状态下进行灵活改造的能力;鼓励采用模块化的装配技术,加快空间应急改造的速度。在此基础上,按防护等级和空间规模划分韧性枢纽及韧性节点,分别设置灾中物资储备、方舱医院等应急救灾备份空间;依托地铁线网建设韧性轴带,考虑灾中利用地铁隧道转运物资与人员的路径规划;形成以“枢纽—节点—轴带”为特征的空间韧性网络,支持各种应急流空间改造,提升空间的冗余性与适应性^[11]。

在微观层面,重视空间的环境品质,营造丰富多样且舒适便捷的空间体验,筑高地下公共空间韧性水平。鼓励农贸商场、文体公园、图书馆等普适性较高的空间地下化,丰富地下公共空间的利用形式,拓展空间服务的社会边界;建立健全以轨道交通为核心的TOD生活圈层,强化站点与公交的快速接驳,提高空间可达性及服务效率;积极探索自然采光与通风设备在地下的创新性利用,消除因封闭、黑暗和空气污染带来的负面影响,例如:借鉴纽约低线公园经验,使用导光管等主动采光设备在地下公共空

表4 地下公共空间韧性指标权重
Tab.4 Index weight of underground public space resilience

一级指标	权重	二级指标	权重	打分方式
冗余性 B1	0.214	公共空间占比 C1	0.103	定量
		独立出入口占比 C2	0.072	定量
		拥挤程度 C3	0.039	定性
鲁棒性 B2	0.139	基础设施维护 C4	0.051	定性
		房屋建筑质量 C5	0.046	定性
		消防设施状态 C6	0.042	定性
多样性 B3	0.146	空间功能混合度 C7	0.121	定量
		服务完善度 C8	0.025	定性
		视线整合度 C9	0.078	定量
适应性 B4	0.207	标识系统 C10	0.041	定性
		空间寻路能力 C11	0.088	定性
		连通率 C12	0.089	定量
连通性 B5	0.193	空间可达性 C13	0.043	定性
		空间整合度 C14	0.061	定量
		环境品质 C18	0.037	定性
舒适性 B6	0.101	空间可理解度 C19	0.049	定量
		地下商业活力 C20	0.015	定性

资料来源:笔者自制。

间设置节点绿化,改善地下空气质量。

4.2 鼓励制度创新,保障公共权益

鼓励制度创新就是要在政策、规划体系上支持空间韧性的提升,是在根本上保证地下公共空间的健康可持续发展。

首先,建立空间韧性评价制度。旨在由专业机构建立动态的地下公共空间韧性评价体系,将其作为规划、建设及管理全过程的要求。综合运用韧性打分卡等多种手段分析,评估规划决策、建设项目及管理模式对地下公共空间韧性的影响,以此为依据提出针对性的改进策略。可作为规划咨询服务外包给第三方机构,构建客观公正的规划实时反馈机制,形成对空间韧性最为有利的空间决策。

其次,突出空间规划平台属性,推动与防灾应急规划的深度融合。依托地下空间规划体系,针对战争和疫情等灾害,结合留城人口、灾害特性等制定应急空间专项规划。整合防灾空间资源配置与应急治理措施,与

地上应急避难空间一道构建整体应急的城市公共空间体系,促进防灾规划从静态的防灾设施配置转向依托空间的动态应急能力建设^{[12]21}。

最后,坚持公共利益导向,创新规划形式。借鉴日本地下街规划及地下空间聚集区特别整治法相关内容^[13],建议在重点地段地下空间规划中以地铁站点为核心划定“公共利益区域”,要求域内地下公共空间相互连通,构建完整的地下步行网络。以此为基础,推进地下街或地下综合体等利用形式的规划纳入现有规划体系。此外,在灾害发生时,为保证地下公共空间充分发挥效用,对“公共利益区域”的地下公共空间,政府应拥有紧急征用、改造的权力^{[12]22}。

4.3 提高治理水平,完善应灾能力

从中国的国情出发,以“数据支撑+基层控制+联防联控”为特色的灾情防控模式,充分体现了灾中适应性和灾后学习性,有必要在地下得到进一步加强。

首先,搭建地下空间信息平台。为了掌握地下公共空间运行状况,提供灾害早期预警,

必须建立基于物联网技术的综合信息平台。通过在地下公共空间装载感应器,可实时监测温度、湿度、CO₂等有害气体浓度及设备运行状态。结合外部气象、人员流动数据,主动识别、评估空间脆弱性。将诸如洪涝、火灾、爆炸、毒气泄漏等纳入风险监控体系,建立灾害预警机制^[14]。

其次,成立地下公共空间管理结构。地下空间规划的实施及其后期维护都需要科学的管理。建议设置以住建为主,整合人防、消防、应急管理力量等的地下公共空间管理机构。其作用有三:协调建设及改造中的各方利益,推进地下公共空间资源整合,确保规划实施;破除因物业管理条块分割导致的空间侵占及分化乱象,避免在地下出现“公地悲剧”;制定应急预案,在紧急状态下指导救灾疏散,控制灾情蔓延。

最后,组织应急演练,提高防灾避险意识。面向社会开展“地下空间开放日”活动,让民众接触并了解如人防避难及地下综合体等地下公共空间,掌握主要疏散路线和基本逃生知识;在地铁轨道站台及地下商场定期举行防灾



图8 地下公共空间案例综合韧性评价比较
Fig.8 Evaluation and comparison of resilience of underground public space cases

资料来源:笔者自绘。

表5 韧性评分语集

评分标准	描述
0.30	性能不佳,亟待补强
0.50	未有表现,评估待定
0.60	表现一般,争取提高
0.80	性能良好,巩固提升
0.95	性能卓越

资料来源:笔者自制。

表6 韧性评价结果
Tab.6 Resilience evaluation results

一级指标	加权评分 (归一化)			二级指标	评分		
	王家墩商务区	街道口商圈	光谷-鲁巷商圈		王家墩商务区	街道口商圈	光谷-鲁巷商圈
冗余性 B1	0.90	0.54	0.89	C1	0.95	0.60	0.95
				C2	0.80	0.60	0.95
				C3	0.95	0.30	0.60
鲁棒性 B2	0.73	0.56	0.85	C4	0.60	0.50	0.80
				C5	0.80	0.60	0.95
				C6	0.80	0.60	0.80
多样性 B3	0.77	0.80	0.92	C7	0.80	0.80	0.95
				C8	0.60	0.80	0.80
				C9	0.30	0.60	0.80
适应性 B4	0.67	0.72	0.80	C10	0.80	0.80	0.80
				C11	0.95	0.80	0.80
				C12	0.95	0.30	0.60
连通性 B5	0.92	0.52	0.74	C13	0.80	0.60	0.95
				C14	0.95	0.80	0.80
				C15	0.60	0.60	0.95
舒适性 B6	0.65	0.60	0.85	C16	0.80	0.60	0.80
				C17	0.30	0.60	0.80

资料来源:笔者自制。

演习,通过情景式模拟,熟悉灾害环境,提高工作人员疏散指挥技能,降低事故伤亡率,防止次生灾害发生。

5 结语

本文是对超特大城市地下公共空间韧性的一次探讨。立足于规划,在空间韧性视角下开展对地下公共空间的韧性研究并提出应对策略,这种研究范式填补了理论空白。此外,使用定性评价和定量评价相结合的研究方法也具有一定的创新性。不过,受地域限制,地下公共空间在各地应具有不同的发展特性,尤其对于受地形及气候影响较大的城市 and 没有条件建设地铁的中小城市,还需要因地制宜、分门别类地进行深入研究。■

参考文献 References

- [1] 李彤玥. 韧性城市研究新进展[J]. 国际城市规划, 2017, 32 (5) :15-25.
LI Tongyue. New progress in research on resilient cities[J]. Urban Planning International, 2017, 32(5): 15-25.
- [2] 许婵,赵智聪,文天祚. 韧性——多学科视角下的概念解析与重构[J]. 西部人居环境学刊, 2017, 32 (5) :59-70.
XU Chan, ZHAO Zhicong, WEN Tianzuo. Resilience: concept analysis and reconstruction from a multidisciplinary perspective[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2017, 32(5): 59-70.
- [3] 刘志敏,修春亮,宋伟. 城市空间韧性研究进展[J]. 城市建筑, 2018 (35) :16-18.
LIU Zhimin, XIU Chunliang, SONG Wei. Research progress of urban spatial resilience[J]. Urbanism and Architecture, 2018(35): 16-18.
- [4] 黄莺,刘梦茹,魏晋果,等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学,2021,36 (1) :32-36.
HUANG Ying, LIU Mengru, WEI Jinguo, et al. Research on urban subway network recovery strategy based on resilience curve[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 32-36.
- [5] 向姮玲,孙傲. 韧性视角下的地下轨道交通空间步行路径研究[C]//共享与韧性——2020年中国城市规划信息化年会论文集. 南宁: 广西科学技术出版社, 2020: 173-182.
XIANG Hengling, SUN Ao. Research on spatial walking path of underground rail transit from the perspective of resilience[C]//Sharing and resilience: proceedings of 2020 China Urban Planning Informatization Annual Conference. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2020: 173-182.
- [6] 米佳. 地下公共空间的认知和寻路实验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
MI Jia. Experimental study on cognition and pathfinding of underground public space[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [7] 奚东帆. 城市地下公共空间规划研究[J]. 上海城市规划, 2012 (2) :106-111.
XI Dongfan. Research on urban underground public space planning[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2012(2): 106-111.
- [8] 万昆. 武汉市地下空间规划编制体系研究[J]. 建筑知识 (学术刊), 2013(B11):114.
WAN Kun. Research on Wuhan underground space planning system[J]. Architectural Knowledge, 2013(B11): 114.
- [9] 曾灿军,陈卫忠. 城市地下空间开发强度预测模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14 (5) :1154-1160.
ZENG Canjun, CHEN Weizhong. A forecasting model of urban underground space development intensity[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1154-1160.
- [10] 王凯,黄云艺,陈卫忠,等. 城市地下分层空间功能定位和形态演变探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (3) :652-659.
WANG Kai, HUANG Yunyi, CHEN Weizhong, et al. Discussion on functional orientation and morphological evolution of urban underground stratification space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 652-659.
- [11] 邹昕争. 防灾韧性城市理念下地下空间总体规划布局方法研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2020.
ZOU Xinzheng. A study of layout method of the master plan of underground space from resilient city concept: take Zhangjiakou City as an example[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [12] 王世福,黎子铭. 疫情启示的新常态:空间韧性与规划应对[J]. 西部人居环境学刊, 2020, 35 (5) :18-24.
WANG Shifu, LI Zimin. New normal inspired by the COVID-19 pandemic: spatial resilience and planning response[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2020, 35(5): 18-24.
- [13] 袁红,何媛,李迅,等. 中日城市地下空间规划与管理体制比较研究[J]. 规划师, 2020, 36 (17) :90-98.
YUAN Hong, HE Yuan, LI Xun, et al. A comparative study of planning and management of underground space between China and Japan[J]. Planners, 2020, 36(17): 90-98.
- [14] 谭章禄,吕明,刘浩,等. 城市地下空间安全管理信息化体系及系统实现[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (4) :819-825.
TAN Zhanglu, LYU Ming, LIU Hao, et al. Research and realization of information and safety management system of the urban underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 819-825.