

doi: 10.12029/gc20230104001

苏栋, 黄茂隆, 韩文龙, 陈湘生. 2024. 城市深层地下空间地质环境韧性评估模型与应用[J]. 中国地质, 51(1): 157-169.

Su Dong, Huang Maolong, Han Wenlong, Chen Xiangsheng. 2024. Evaluation model of geological environment resilience in the urban deep underground space and its application[J]. Geology in China, 51(1): 157-169(in Chinese with English abstract).

# 城市深层地下空间地质环境韧性评估模型与应用

苏栋<sup>1,2,3</sup>, 黄茂隆<sup>2</sup>, 韩文龙<sup>2</sup>, 陈湘生<sup>1,2,3</sup>

(1. 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室(深圳大学), 广东深圳 518060; 2. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 3. 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室(深圳大学), 广东深圳 518060)

**提要:**【研究目的】评估城市深层地下空间地质环境韧性有助于提高城市地下空间开发利用的安全性, 减少灾害事件造成的经济损失。【研究方法】本文从城市深层地下空间的灾害事件严重度、地质体脆弱性、抵御力、恢复力和适应力等方面出发, 建立了城市深层地下空间地质环境韧性多因素综合评估模型, 并结合某城市一起突发事件的相关数据对评估模型进行了应用。【研究结果】评估模型具有较高操作性和可行性, 可在各种复杂地质环境的城市中开展深层地下空间韧性评估工作; 所评价灾害事件的严重度为 5.601, 属严重水平; 地质体的暴露性为 5.735, 灾损敏感性为 6.146, 脆弱性综合评价结果为 35.247, 属脆弱地质体; 预警能力指数为 1.00, 防灾能力指数由原来的 5.66 提高至灾后的 7.00, 故抵御力综合评价结果由 15.38 提高至 19.02; 通过填砂、地下注浆等措施后, 恢复力为 2.00, 且由于地质环境趋于稳定, 地质环境适应力综合分析为 1.00。【结论】若受灾害影响, 地质环境韧性水平的演化可分为正常、受灾、抵御、恢复、适应和新的正常水平 6 个阶段, 韧性水平曲线呈现出先减小再增大后趋于稳定, 且在受灾和抵御的节点处达到最小值。

**关键词:** 地质环境韧性; 城市韧性; 深层地下空间; 评估模型; 城市地质调查工程

**创新点:** 提出城市深层地下空间地质环境韧性评估模型, 填补了城市深层地下空间地质环境韧性评价方法的空白, 为深层韧性地下空间建设提供了基础理论。

中图分类号: TU95 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0157-13

## Evaluation model of geological environment resilience in the urban deep underground space and its application

SU Dong<sup>1,2,3</sup>, HUANG Maolong<sup>2</sup>, HAN Wenlong<sup>2</sup>, CHEN Xiangsheng<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling (Shenzhen University), Shenzhen 518060, Guangdong, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 3. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities (Shenzhen University), Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

**Abstract:** This paper is the result of urban geological survey engineering.

收稿日期: 2023-01-04; 改回日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(52090081, 51938008)与深圳市自然科学基金(JCYJ20210324094607020)联合资助。

作者简介: 苏栋, 男, 1978 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程、韧性地下空间方面的研究; E-mail: sudong@szu.edu.cn。

通讯作者: 韩文龙, 男, 1991 年生, 博士, 主要从事隧道与地下工程、韧性城市方面的研究; E-mail: hanwl0417@126.com;

陈湘生, 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事隧道与地下工程、韧性城市方面的研究; E-mail: xschen@szu.edu.cn。

**[Objective]** Evaluating the geological environment resilience of urban deep underground space contributes to improving the safety of urban underground space during development and utilization, and reducing the economic losses caused by disasters. **[Methods]** In this paper, a multi-factor integrated evaluation model for the geological environment resilience of urban deep underground space was proposed from the aspects of the severity of event, the vulnerability of geological body, the resistant ability, the restoring ability and the adaptability. The evaluation model was applied to analyze a catastrophic engineering accident in a city by virtue of the relevant data. **[Results]** The evaluation model is highly operational and feasible, and can be used for resilience assessment of urban deep underground space with various complex geological environments. For the studied accident, the severity index of the event is 5.601, which is categorized as a severe level. The exposure index is 5.735, the sensitivity index to disaster damage is 6.146, and the vulnerability index is 35.247, so the geological body is vulnerable. The early warning capacity index is 1.00, the disaster prevention capability index is increased from 5.66 to 7.00, so the resistant index is increased from 15.38 to 19.02. The recovery is 2.00 after sand filling and grouting. The adaptability index is 1.00 because the geological environment tends to be stable. **[Conclusions]** If affected by a disaster, the evolution in the geological environment resilience can be divided into six stages, i.e., the normal stage, the affected stage, the resisting stage, the recovering stage, the adapting stage and the new normal stage. The resilience curve shows a decrease and then an increase before reaching stable again. The resilience level reaches a minimum value at the turning point of the affected stage and the resisting stage.

**Key words:** geological environment resilience; urban resilience; deep underground space; evaluation model; urban geological survey engineering

**Highlights:** A model for assessing the geological environment resilience of urban deep underground space is proposed to fill the gap in the method of assessing the geological environment, which provides basis theory for the construction of resilient deep underground space.

**About the first author:** SU Dong, born in 1978, professor, doctoral supervisor, engaged in the research of resilient underground space, geotechnical and underground engineering; E-mail: [sudong@szu.edu.cn](mailto:sudong@szu.edu.cn).

**About the corresponding author:** HAN Wenlong, born in 1991, Ph.D., engaged in the research of tunneling and underground engineering; E-mail: [hanwl0417@126.com](mailto:hanwl0417@126.com);

CHEN Xiangsheng, born in 1956, professor, doctoral supervisor, member of the Chinese Academy of Engineering, engaged in the research of tunneling and underground engineering; E-mail: [xschen@szu.edu.cn](mailto:xschen@szu.edu.cn).

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52090081, No. 51938008), Natural Science Foundation of Shenzhen Municipality (No. JCYJ20210324094607020).

## 1 引 言

发展城市地下空间是解决交通拥堵、土地资源紧张、环境污染等社会问题的有效手段(孙钧, 2019; 雷升祥等, 2022)。城市深层地下空间相较于地表空间、浅层地下空间, 具有更强的独立性与封闭性, 不仅有利于城市深层地下空间点状、线状、网络状空间的大规模发展, 还具有更好的隔音、恒温、恒湿等性能, 能满足地下物流系统、地下电力系统、地下交通系统、民防空间、地下储库空间、地下生产空间、文化设施空间等要求(万汉斌, 2013), 国外已开发的项目包括新加坡海床 150 m 以下的裕廊岛地下储油库(李地元和莫秋喆, 2015)、日本东京深层排水系统(苟德菲, 2020)、罗马地下 120 m 深的尼亚萨利娜图达盐矿博物馆(张彬等, 2019)等。

近年来, 我国城市地下空间得到了迅速的发展, 但也面临突发灾害造成人员伤亡和重大经济损失的问题。围绕韧性城市的发展理念, 国内外学者相继开展了城市地下空间韧性研究。Goldbeck et al. (2019)通过动态网络模型对相互依赖的城市基础设施进行韧性评估, 并对伦敦地铁和电力网络的案例进行研究; Huang and Zhang. (2016)认为结构物在被扰动阶段和恢复阶段之间还存在演化阶段, 基于此建立了适用于隧道结构韧性的评价模型, 并对隧道结构受损的工程案例进行了详细分析; 黄亚江等(2021)基于火灾影响, 根据韧性概念建立环境、人员、设备、管理 4 个方面的安全韧性评估体系, 对上海人民广场地铁的火灾韧性进行评估; 闫绪娴等(2022)基于 Bow-Tie—贝叶斯网络模型分析了地

铁洪涝灾害在灾前预防、灾中抵御、灾后恢复三个维度的韧性特征;郑刚等(2022)通过梳理韧性评价方法与指标,提出了单一安全系数设计、可靠度设计、鲁棒性设计及可恢复性设计的岩土与地下工程韧性设计方法。

目前的韧性评价模型侧重于扰动影响下的基础设施(Huang and Zhang, 2016; Monstadt and Schmidt, 2019; Wang et al., 2022)、隧道结构(魏强等, 2021; 林星涛等, 2022)等的性能演化分析,且聚焦于地下结构物的韧性,而对地质环境韧性的研究较为匮乏。有学者提出通过地质环境承载力来表征城市地下空间发展潜力的方法(张杰等, 2021; 席茜等, 2021; 李念春等, 2021; 支泽民等, 2022),但这并不适用于地质环境的韧性评价;城市地质环境韧性包括鲁棒性、恢复性和适应性,目前大多数采用多因素综合方法得到的地质环境承载力是静态的,只对承载性能进行评价,不具备适应性要求的学习能力,因此无法准确描述城市地质环境韧性的演化特性。

鉴于此,本文在城市韧性多因素综合评估模型(赵冬月等, 2022)的基础上,以城市深层地下空间地质环境为研究对象,提出并细化了灾害事件严重度、地质体脆弱性、抵御力、恢复力、适应力等 5 个韧性指标,构建城市深层地下空间地质环境韧性评估模型;并结合某地深层地下空间突发事件对评估模型进行了应用与验证,以期在城市深层地下空间的韧性评估和高质量发展提供理论基础。

## 2 城市深层地下空间地质环境韧性评估模型

### 2.1 地质环境特征

地质环境作为地下空间的载体,其稳定性对城市深层地下空间的重要性远高于浅层地下空间。地质环境的稳定性取决于地层岩性、承压水、高地应力分布以及周边地下建筑物布局等。在某些分布有富膏盐红层的地区,施工过程加剧地下水的循环,造成膏盐矿物的溶蚀而形成溶蚀孔洞或洞穴,导致地基承载力下降(李华等, 2020)。在某些花岗岩地层中的深部地下空间易发生崩塌地质灾害(邓日朗等, 2022);岩溶发育程度高的地区,地下水赋存条件复杂,具有表层带岩溶水系统、岩溶地下河与管道流系统等多种类型,受地下水位波动的影响

易引发岩溶坍塌(潘宗源等, 2017; 夏日元等, 2022);高地应力地区,由于应力迅速释放,在地下空间开发过程中时常发生岩爆灾害(周英豪等, 2022);高承压水地区,施工时在开挖面上形成较大的水头差,极易发生流砂或管涌,造成上部土体下沉,进而引发地面沉降、坍塌、滑坡等一系列地质灾害(郑启宇等, 2020; 兰韡等, 2022);在深厚软土地区,施工时不仅要注意因土层的承载力低导致建筑物沉降等问题,还需要兼顾临近地下建筑物的安全,如在邻近地铁隧道的软土地层中开挖深大基坑需要严格控制深圳基坑围护体系和邻近地铁设施的变形(刘兴旺等, 2022)。

### 2.2 地质环境韧性的含义及度量

城市地下空间通常是指城市在地表以下开展工程经济活动所开发利用的空间。其划分目前没有明确的划分,有地下 30~50 m 为中深层地下空间,50 m 以下为深层地下空间。本文中深层含义包括中深层和深层。深层地下空间地质环境韧性是指城市中深层或深层地质体受地下工程活动影响时维持或恢复其承载功能的能力。具体来说,城市深层地下空间地质环境韧性以地质环境作为研究对象的一种时空演变综合评价,包括考虑影响地质体的承载能力的主要因素,以及考虑人为干预条件下地质环境的抵御能力与恢复能力、适应能力 3 部分。从自然环境角度出发,影响地质体的承载能力主要因素包括灾害事件严重程度与地质体的脆弱性。而在人为干预下地质体在短时间内恢复稳定性、提高承载能力与地质环境抵御力、恢复力和适应力有关。这 5 个韧性指标充分体现地质环境韧性的鲁棒性、可恢复性以及适应性 3 大特征,与城市韧性发展理念相符。

### 2.3 评估指标体系与方法

#### 2.3.1 评估指标体系

基于鲁棒性、可恢复性和适应力这 3 个韧性基本要求,通过分析城市深层地下空间地质环境韧性影响因素,本文选取灾害事件严重度、地质体脆弱性、抵御力、恢复力和适应力作为一级指标,并遵循科学性、区域性、数据可获取性和定性定量相结合的原则,选取与一级指标相对应的 10 个二级指标,建立城市深层地下空间地质环境韧性评估体系(图 1)。

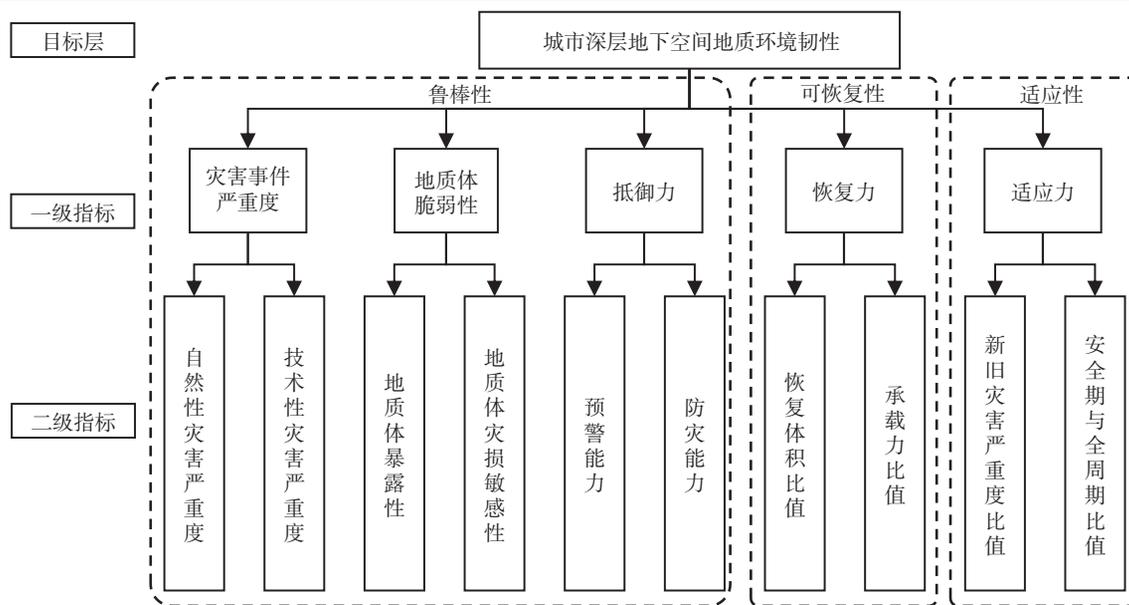


Fig.1 Evaluation index system of the geological environment resilience in the urban deep underground space

### 2.3.2 评估方法

赵冬月等(2022)提出的城市韧性多因素综合评估模型是从社会角度探究灾害影响下的城市韧性, 本文将其延伸至城市地下空间领域, 从地质环境的工程角度探究灾害影响下的城市地质环境韧性, 是从社会维度到工程领域维度的拓展, 从城市领域到城市地质环境领域的应用, 不仅提高该评估模型的适用范围, 还补充了地质环境韧性领域的研究不足。因此本文综合5个因素分析城市深层地下空间地质环境韧性水平的积极与消极影响, 构建城市深层地下空间地质环境韧性水平评估模型, 如式(1)所示:

$$UGR = \frac{R \cdot B \cdot A}{D \cdot V} \quad (1)$$

式中: UGR为城市深层地下空间地质环境韧性水平,  $D$ 为地质灾害事件严重度,  $V$ 为地质体的脆弱性,  $R$ 为恢复力,  $B$ 为抵御力,  $A$ 为适应力, 以上指标均无量纲。对应韧性水平等级划分如表1所示。

#### (1) 灾害事件严重度

地质灾害事件是指地质作用对已开发或正在

开发的地下空间造成经济损失、环境破坏、人员伤亡等的灾害, 其包括以海水入侵、岩溶坍塌、地震为主的自然地质灾害和以施工扰动、地下结构物失效等工程活动引发的坍塌、流砂等人为地质灾害。因此地质灾害事件严重度  $D$  可分别用自然性灾害严重度指数  $D_N$ 、技术性灾害事件严重度指数  $D_T$  表示, 并可取二者的最大值表征灾害事件严重度  $D$ , 如式(2)所示:

$$D = \max(D_N, D_T) \quad (2)$$

灾害事件严重度的评估指标与评估方法如图2所示。当施工扰动等诱发岩溶塌陷等自然灾害时, 则将以技术性地质灾害为主导考虑灾害事件的严重度。采取灾害对地质环境直接的影响结果作为评估灾害影响程度的指标, 并采用AHP法计算权重。灾害事件严重度分级为1~9度, 对应灾害影响如表2所示。

#### (2) 地质体脆弱性

地质体脆弱性是指地质体在扰动影响下引发灾害的期望损失程度, 包括地质体的暴露性与地质体的灾损敏感性, 用二者乘积表征地质体脆弱性, 如式(3)所示:

$$V = E \cdot M \quad (3)$$

式中:  $V$ 表示地质体脆弱性,  $E$ 表示地质体的暴

表1 韧性水平等级划分

Table 1 Classification of toughness levels

韧性水平	<0.05	0.05~0.1	0.1~0.4	0.4~1.0	>1.0
等级	极低	低	中等	高	极高

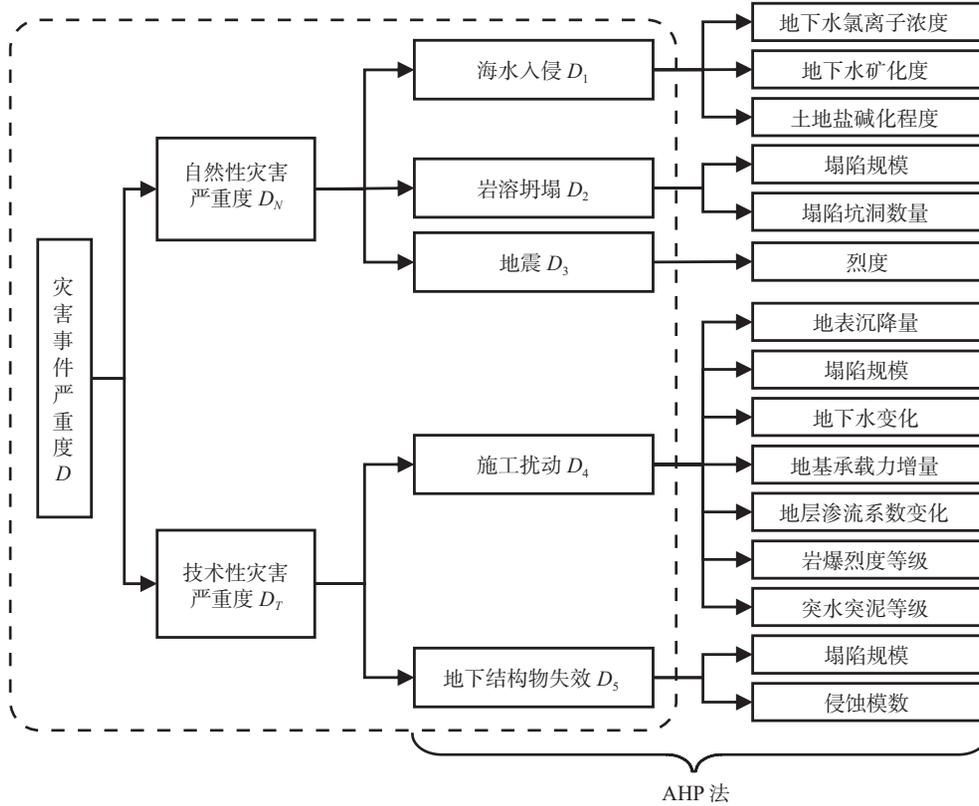


图 2 灾害事件严重度的评估指标  
Fig.2 Evaluation indicators of severity of disaster events

表 2 灾害事件影响分级

**Table 2 Classification of disaster event impact**

严重度指数 $D$	1~2	2~4	4~6	6~9
影响	轻微	中等	严重	极严重

露性,  $M$  表示地质体的灾损敏感性, 以上指标无量纲。

地质体的暴露性  $E$  是指因地质作用、扰动影响导致地质环境暴露在可变环境中的程度。可变环境可包括水环境(如地下暗河冲刷作用)、大气环境(风化作用)、断层裂缝等。地质体的灾损敏感性  $M$  是指因地质作用、扰动影响导致致灾因子诱发地质灾害的容易程度。暴露性越大, 地质环境面临的灾害风险越大; 而灾损敏感性越大, 地质环境越不稳定。因此本文对标相应的灾害事件, 结合工程经验, 采用相应的评估指标表征地质体的脆弱性(图 3), 对应地质体脆弱性分级如表 3 所示。

(3) 抵御力

抵御力是指在人为干预下, 地质体受到灾害影响是维持原有承载力的能力, 即通过封堵、抽水、修建挡土墙等必要措施, 控制灾害影响范围, 防止灾

害进一步扩散。地质环境的抵御力包括对灾害的预警能力与防灾能力, 评估方法如式(4)所示:

$$B = P_b \cdot e^{W_b} \tag{4}$$

式中:  $B$  表示抵御力,  $P_b$  表示防灾能力,  $W_b$  表示预警能力。

预警能力是指对地质体实时状态进行监测, 对地质体即将发生某种灾害具有一定的警告能力; 防灾能力是指对突发灾害的预防和紧急响应能力。预警能力与防灾能力的评估指标如图 4 所示。

(4) 恢复力

恢复力是指在人为干预下, 地质体快速恢复地质环境功能的能力, 即通过填砂、注浆、成桩、夯实地基等应急处理技术, 修复地质体损伤部位, 恢复并提升地质体的承载能力。地质体在经过修复技术后, 承载能力往往会成倍数增长, 因此根据加固区域与损伤区域的体积比与修复前后承载能力比值, 表征地质环境的恢复力效果, 如图 5 所示。评估方法如式(5)所示:

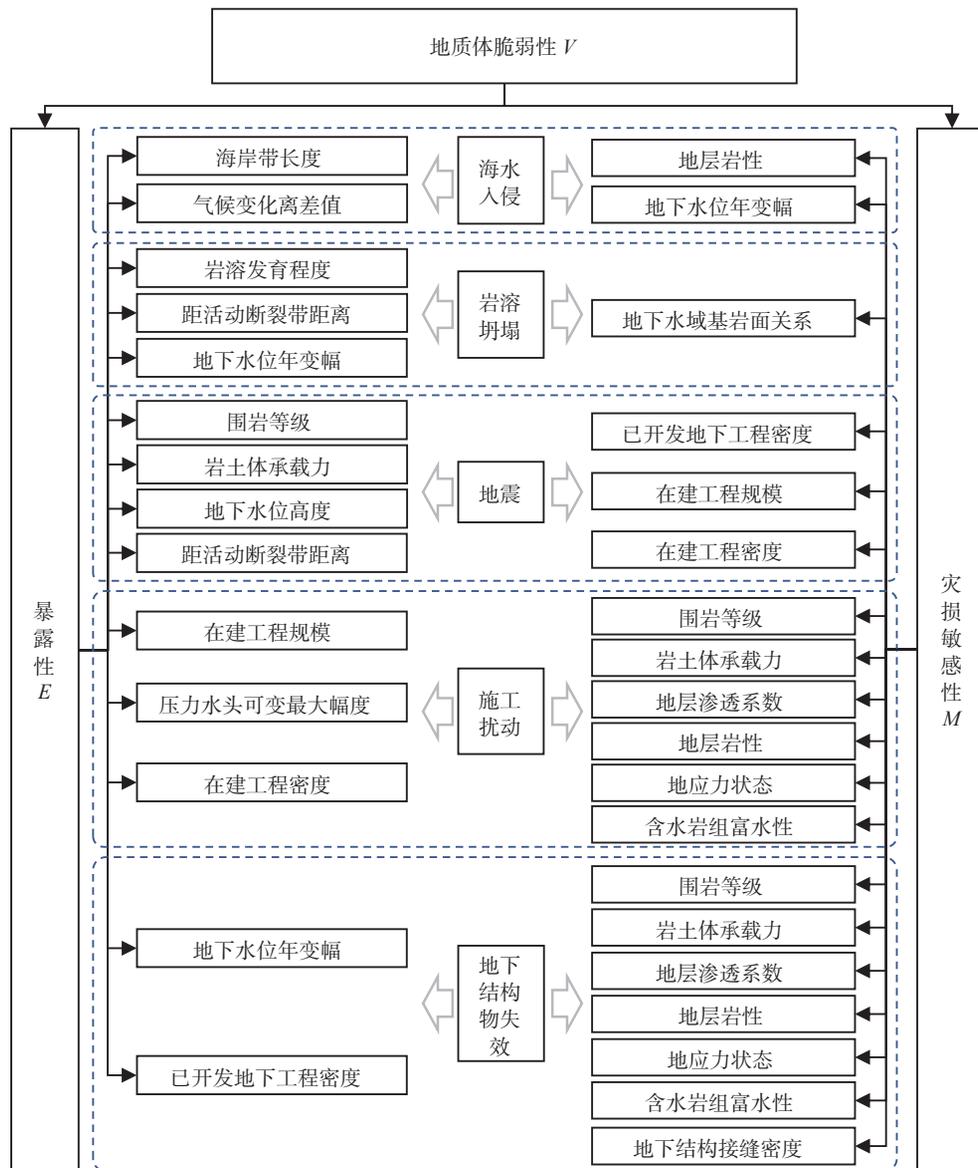


图3 地质体脆弱性的评估指标

Fig.3 Evaluation indicators of the vulnerability of geological bodies

表3 地质体脆弱性分级

Table 3 Classification of the vulnerability of geological body

脆弱性等级	<9	9~30	30~50	>50
	坚固	中等	脆弱	极脆弱

$$R = \frac{V_1}{V_2} \cdot \lg \left( \frac{F_1}{F_2} \right) \quad (5)$$

式中:  $R$  表示恢复力;  $V_1$  表示采用注浆、夯实等措施加强的地质体空间, 以体积表示;  $V_2$  表示地质体受灾范围, 即被灾害影响导致承载力散失或减弱的地质体空间, 以体积表示;  $F_1$  表示采用注浆、夯实

等措施加强的地质体承载力, 可以以强度、固结度、密实度、无侧限抗压强度等表示;  $F_2$  表示被灾害影响导致承载力散失或减弱的地质体承载力, 可以以强度、固结度、密实度等表示。

(5) 适应力

适应力是在历史灾害重现后表现出的适应能力, 即人们通过对历史灾害的经验总结与环境改善, 不断提高地质环境的承载能力与抵御能力, 避免灾害的重现或降低灾害重现对地质环境的影响。地质环境在经过环境改善后的一段时间内, 若不发生地质灾害事件, 则认为环境改善具有成效,

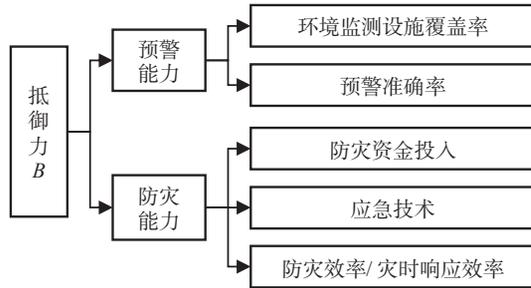


图 4 抵御力的评估指标  
Fig.4 Evaluation indicators of defense

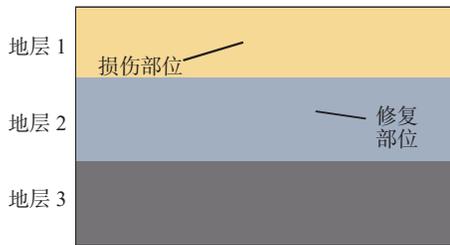


图 5 地质体恢复效果示意图  
Fig.5 Schematic diagram of geological body recovery effect

地质环境的适应力有所提升;若发生了地质灾害,则根据新旧灾害事件的严重度对比,以及地质环境在恢复后的人类工程活动中安全期与全周期的比值计算适应力。评估方法如式(6)所示:

$$A = \frac{T_s}{T} \cdot e^{-\frac{D'}{D}} \quad (6)$$

式中:  $A$  表示适应力;  $T$  表示恢复后的修复工程或运维全周期;  $T_s$  表示恢复后的修复工程或运维的安全期;  $D$  表示旧灾害事件严重度;  $D'$  表示新灾害事件严重度。当灾后未发生同类灾害,则可视为适应力最好,其数值为  $A=1$ ;当灾后修复工程或运维期间发生同类灾害,则根据严重度对比、安全期时长占比得适应力结果,其数值范围  $0 < A < 1$ 。

### 3 城市深层地下空间地质环境韧性评估案例

#### 3.1 研究区概况与突发事件起因

本文研究以某城市古河道边的  $300 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  的地质环境为研究对象,该地下空间开发类型为地铁隧道,深度在  $37.5 \text{ m}$ ,属于中深层地下空间开发;隧道联络通道的施工段在隔水层下的砂质淤泥夹粉砂层中,其中地下水压力水头在  $-3.33 \text{ m}$ ,水压较大,具有突水风险,因此采用冻结法加固暗挖

法进行施工,即将饱和土冻结成冻土再进行开挖作业。而本次突发事件起因是冻土所需的制冷设备断电导致制冷不连续,致使冻结体的温度上升至  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,远超开挖设计的  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,承压水解冻使得开挖面突水严重,并夹带着上层土体的泥沙流入隧道;隧道因内外土压力不平衡发生坍塌,进一步导致上方地层塌陷,并在地表形成漏斗型陷坑,最大深度达  $4 \text{ m}$ ,引起周边建筑物不均匀沉降,如图 6 所示。本次事件经济损失高达 1.5 亿元,属技术性灾害事件。地质剖面图与风井、地铁隧道、联络通道横截面之间的关系如图 7 所示。

#### 3.2 地质环境韧性评估指标特征分析

##### 3.2.1 灾害事件严重度分析

灾害事件影响主要表现在地表沉降和突水突泥等,地表中央漏斗区最大沉降达  $3 \text{ m}$ ,坑洞 1 处,临近高层建筑沉降最多达到  $14 \text{ cm}$ ;还引起的周边公路的匝道沉降,影响半径  $60 \sim 70 \text{ m}$ ,影响面积约  $7000 \text{ m}^2$ ;灾情初期,大量地下水涌入隧道,水位上升速率高达  $100 \text{ L/s}$ ,可见突水点的突水速率已超过  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,为中等突水点;并且经初步勘察,隧道最大沉降达  $7 \sim 8 \text{ m}$ ;后续抢险过程中,封堵隧道出口后往上、下行线中注水以平衡隧道内外土水压力,保护隧道管片的同时,防止灾情的进一步扩散,最终上行线的水压力保持在  $0.066 \text{ MPa}$ ,下行线的水压力保持在  $0.047 \text{ MPa}$ ,可推测地下水压力水头变幅在  $4.7 \sim 6.6 \text{ m}$ 。将突发事件对地质环境的影响根据表 1 中对应的分级标准进行等级确定与赋值,并计算本次事件的严重度为  $D = 5.601$ ,计算详见表 4。该评价结果属于严重水平,说明本次灾害事件对当地地质环境影响十分恶劣,既改变了地质环境面貌,还降低了地质环境承载能力。



图 6 陷坑致泵站、音像大楼与鸿宇楼倾斜  
Fig.6 Pit caused the pump station, audio-visual building, and Hongyu building to tilt

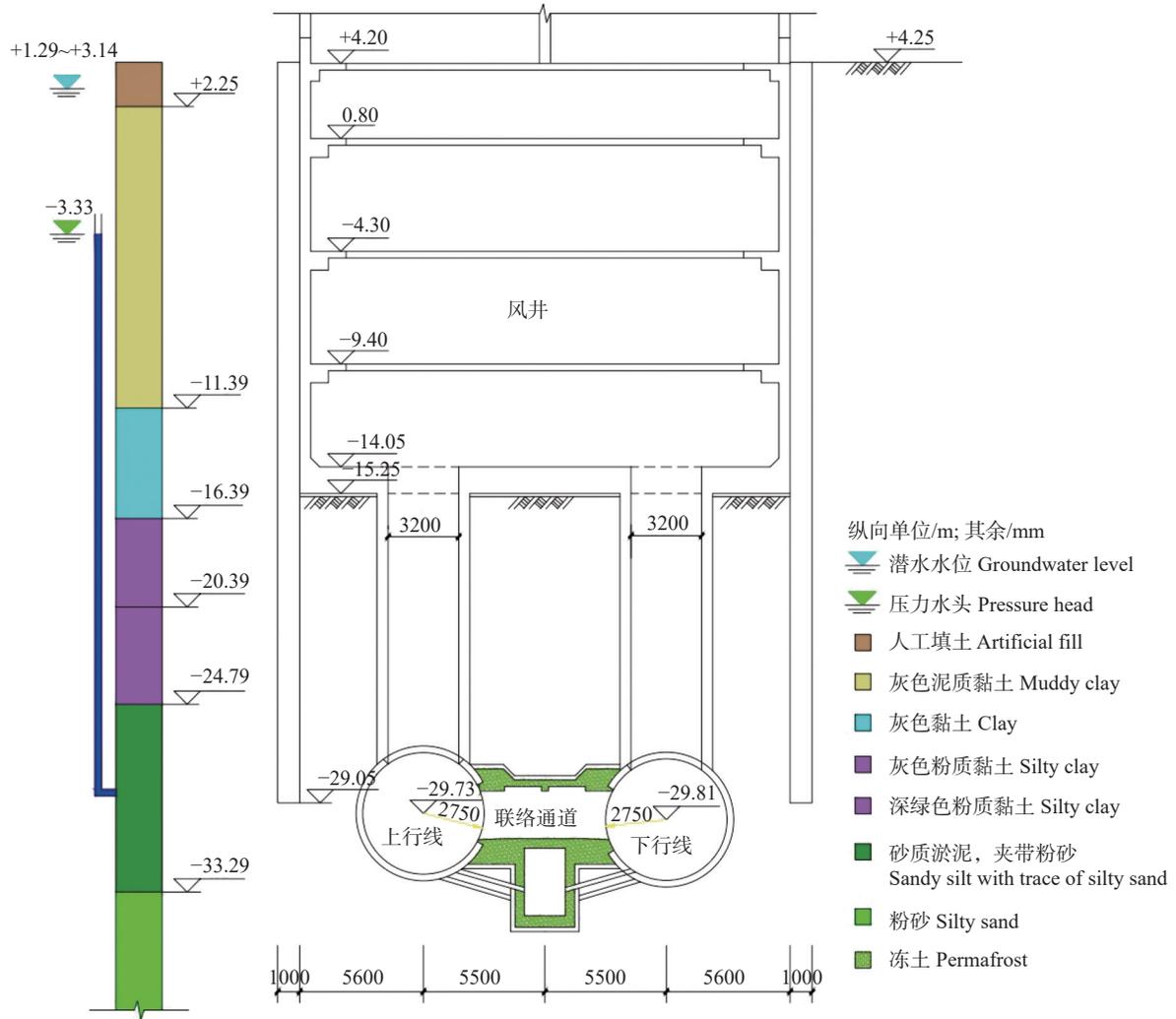


图 7 地质剖面图与风井、地铁隧道、联络通道横截面(据 Tan et al., 2021 修改)  
 Fig.7 Geological profiles with cross-sections of air shafts, underground tunnels, liaison channels (modified from Tan et al., 2021)

表 4 灾害事件严重度计算

Table 4 Calculation of disaster event severity

评估指标	分级标准	赋值量化	分级结果	赋值结果 (x)	计算权重 (w)	计算模型
地面沉降	<0.005 km <sup>2</sup> 小型/0.005~0.1 km <sup>2</sup> 中型/ 0.1~1 km <sup>2</sup> 大型/>1 km <sup>2</sup> 特大型	3/5 7/9	0.007 km <sup>2</sup>	5	0.085	$D = \sum_{i=1}^{N_1} w_i x_i$ 计算结果: D = 5.601
塌陷规模	小型: 坑洞1~3处, S≤1 km <sup>2</sup> 中型: 坑洞4~10处, S≤5 km <sup>2</sup> 大型: 坑洞11~20处, S≤10 km <sup>2</sup> 特大型: 坑洞>20处, S>10 km <sup>2</sup>	1 3 5 7	小型	1	0.121	
塌陷剖面形态特征	坛状/井状/漏斗状/碟状/不规则	1/3/5/7/9	漏斗状	5	0.143	
压力水头变化量	<2 m/2~4 m/4~6 m/6~8 m/>10 m	1/3/5/7/9	4.7~6.6 m	7	0.272	
岩土体承载力变化量	-5%/-10%/-30%/-50%/-80%	1/3/5/7/9	-80%以上	9	0.242	
岩爆烈度等级	I 级/II 级/III 级/IV 级	1/3/5/7	无岩爆	0	0.050	
突水规模	小型/中型/大型/特大型	1/3/5/7	中等突水点	3	0.086	

其中: x为指标赋值结果; w为指标计算权重; N<sub>1</sub>值暴露性的指标数量。

### 3.2.2 地质体脆弱性分析

目标工程与其他城市轨道交通工程有交集,难度大,建设费用高,为大型目标工程;并且其周边无在建其他工程;场地内岩土体分布以黏性土、粉性土等软土为主,地基承载力特征值普遍较低;土体由浅至深,土体状态由松散—稍密至中密—密实,并且深层空间(30 m 以下)的土体压缩性低,强度高,密实度高,可判定围岩等级为IV级;根据第⑦层的砂质黏土的低黏聚性、低渗透性(水平渗透系数  $5.34 \times 10^{-4}$  cm/s)等特性,可以判断该层土体易在扰动时发生液化,一旦形成突水,最大压力水头变化幅度可达 21 m,不仅会使土层失去承载能力,还会导致隧道内外土水压力不平衡导致隧道垮塌;根据以上数据,计算地质体的脆弱性,详见表 5。该评价结果表明在施工扰动的影下,地质环境暴露性较和灾损敏感性均较高,综合二者结果得地质体的脆弱性等级属于脆弱水平,即在施工扰动下易发生地质灾害。

### 3.2.3 抵御力分析

事故的起始点在于开挖面冻土温度回升导致突水,后续调查结果表面,在事故发生前施工人员已经察觉开挖面渗水严重,且水文观测器也测得开挖面水压接近第⑦层水压,便暂停了施工,采用木板封堵出水口控制险情,但管理部门人员为赶施工

进度在已停工的情况下,擅自指挥拆除掘进面部分封板,从旁通道向下行线隧道钢管片方向用风镐凿出直径 0.2 m 的孔洞才导致突水流砂无法控制。

事故发生后,相关部门采取封堵隧道,灌水平衡隧道内外压力差的应急方案,控制险情,防止地面继续沉降。封堵措施不仅是在上下行隧道通过两道高 9 m、厚 2.7 m 的钢筋混凝土墙封堵隧道口,而且在周边隧道区间筑 8 道钢筋混凝土作为坚固防线,并向隧道内灌水,恢复隧道内的压力平衡。除此之外,通过在隧道中打塞子的方式,在距离事故发生点 160 m 的隧道内通过钻孔至隧道内浇筑混凝土,以形成塞子,阻止泥沙涌入已建成的隧道;在地表上开展地表填砂工作,在沉降漏斗区以及防汛墙倒塌处内填砂,防止沉降漏斗进一步扩大,阻止灾情的进一步扩大。由此可见,当地防灾资金充足、应急技术水平高,以及人员应急响应效率高。根据以上信息计算抵御力在灾前为 15.38,在灾后为 19.02,详见表 6。结果说明,该地质环境的抵御力在人为影响下一直处于较高的水平,灾前和灾后的抵御力水平取决于工作人员的防灾治灾效率。

### 3.2.4 恢复力分析

在经过一系列抢险措施后,地质环境具有一定的抵御能力,防止灾情进一步恶化;接着通过地下

表 5 地质体的脆弱性计算

Table 5 Calculation of vulnerability of geological bodies

评估指标	分级标准	赋值量化	分级结果	赋值结果 (x)	计算权重 (w)	计算模型	
暴露性E	在建工程规模	小型/中型/大型	3/5/7	大型	7	0.548	$V = E \cdot M$ $E = \sum_{i=1}^{N_2} w_i x_i$ $M = \sum_{i=1}^{N_3} w_i x_i$
	在建工程密度	大/小/无	7/3/0	无在建工程	0	0.211	
	压力水头可 变最大幅度	<5 m/5~10 m/10~15 m/ 15~20 m/>20 m	1/3/5 7/9	>20 m	9	0.241	
损敏感性M	围岩等级	I级/II级/III级 IV级/V级、VI级 >500 kPa	1/3/5 7/9 3	IV级	7	0.381	计算结果: $E=5.735,$ $M=6.146,$ $V=35.247$
	岩土体承载力	200~500 kPa <200 kPa	5 7	<200 kPa	7	0.269	
	地层渗透系数	高渗透性/中渗透性/低渗透性	7/5/3	低渗透性	3	0.138	
	地层岩性	土体/软硬相间岩/土石混 合体较硬岩/硬岩	9/7/5 3/1	均由第四纪土体组成, 无岩石	9	0.064	
	地应力状态	高地应力/中地应力/一般 地应力	7/5/3	一般地应力	3	0.067	
	含水岩组富水性	极强富水性/强富水性/中 等富水性	9/7/5	中等富水性	5	0.081	
		弱富水性/微富水性	3/1				

注: x为指标赋值结果; w为指标计算权重;  $N_2$ 值暴露性的指标数量;  $N_3$ 指灾损敏感性指标数量。

表 6 抵御力计算

Table 6 Calculation of defense

评估指标	分级标准	赋值量化	分级结果	赋值结果 (x)	计算权重 (w)	计算模型
预警能力 $W_b$	环境监测设施覆盖率/%	/	/	100%	/	$B = P_b \times e^{W_b}$
	预警准确率/%	/	/	100%	/	$P_b = \sum_{i=1}^{N_4} w_i x_i$
防灾能力 $P_b$	防灾资金投入	高/中/低	7/5/3	高	7	计算结果: $P_b = 5.66(7.00)$ , $W_b = 1.00, B = 15.38(19.02)$
	应急技术	水平高/中等/水平低	7/5/3	水平高	7	
	防灾效率	高/中/低	7/5/3	低	3	
	灾时响应效率	高/中/低	7/5/3	高	7	

注:  $x$ 为指标赋值结果,  $w$ 为指标计算权重,  $N_4$ 值防灾能力的指标数量。

注浆的方式,在沉降区域内进行双液注浆,总计注浆面积 6000~7000 m<sup>2</sup>,注浆量约 20000 m<sup>3</sup>浆液。采用注浆方式一方面是为了填充流砂产生的空隙,让土体更加密实,另一方面让新填充的砂更好地凝结,提高地质环境的稳定性,一定程度上恢复地质环境承载能力,方便后续对目标工程开展修复工程。

由于本事件采用地下注浆的方式,根据上、下行隧道被破坏的体积以及地表塌陷形态,考虑粉质黏土层为主,根据式(5)计算恢复力为 2.09,详见表 7。说明经过了应急处理措施后,地质环境承载能力不仅恢复原有水平,还有所提升。

### 3.2.5 适应力分析

在进行填砂、注浆等措施后,研究区地质环境趋于稳定,在之后的修复工程中,将原先建造的隧道修复完工,并投入使用。修复工程中,考虑施工安全和地质环境稳定性,对不同的修复段采取不同的加固措施,如采用超深基坑明挖修复方法的部分,采取超深旋喷桩加固以减少基坑变形;对拟采用冻结暗挖的修复方案做了调整,考虑周边高层结构的安全性和地表沉降,改用全盖挖基坑方式施工。最终在 34 个月的修复工程施工过程中,未发生地质灾害事件,目标工程顺利修复且竣工验收,说明该地质环境在经过扰动、恢复后,其适应力有所提升。将修复工程 34 个月、未发生新的地质灾

表 7 恢复力计算

Table 7 Calculation of recovery

一级指标	二级指标	数值	计算模型	
恢复力	损伤的地质体体积	11 308.95 m <sup>3</sup>	$R = \frac{V_1}{V_2} \cdot \lg \left( \frac{F_1}{F_2} \right)$	
	加强的地质体体积	20000 m <sup>3</sup>		
	损伤前地质体承载力	100 kPa		计算结果
	加强后地质体承载力	1.2 MPa		$R=2.09$

注:  $V_1$ 为加强的地质体体积;  $V_2$ 为受灾地质体体积;  $F_1$ 为加强后的地质体承载力;  $F_2$ 为受灾地质体的承载力。

害事件信息代入式(6)中得地质环境适应力结果:  $A=1$ 。

### 3.3 地质环境韧性灾害全过程评估

根据收集的数据,结合城市深层地下空间地质环境韧性水平评估模型,计算突发灾害事件严重程度、地质体的脆弱性、抵御力、恢复力以及适应力,计算实际韧性水平(表 8),并根据时间顺序绘制地质环境韧性变化图(图 8),对该突发事件造成的地质环境韧性全过程进行评估。

根据本文地质环境韧性水平评估曲线可知,在未受到灾害事件影响的情况下,地质环境的韧性水平主要考虑地质体的脆弱性和抵御力,如阶段①所

表 8 韧性水平计算结果

Table 8 Calculation results of toughness level

时间	初始韧性水平	实际韧性水平
$t_1$	0.436	0.436
$t_2$	0.436	0.078
$t_3$	0.436	0.096
$t_4$	0.436	0.257
$t_5$	0.436	1.441
$t_6$	0.436	1.441

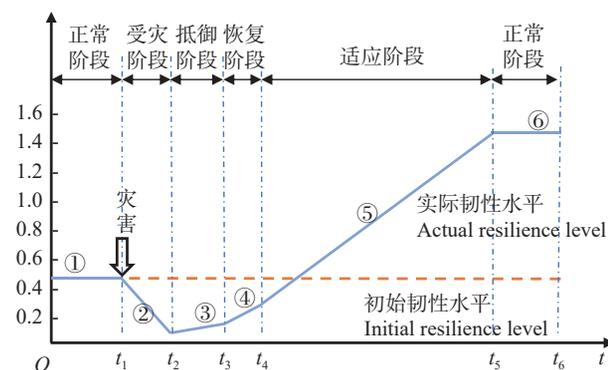


图 8 地质环境韧性水平演化曲线

Fig.8 Evolution curve of geological environment toughness level

示; $t_1$ 时刻在灾害事件影响下,开挖面从渗水到流砂,导致地质环境稳定性降低,进而造成隧道坍塌、地表塌陷等事故,此时地质环境的韧性水平骤降,由原先中等水平降至较低水平,如阶段②所示;在 $t_2$ 时刻人为干预下,通过抢险措施,封堵隧道口,平衡隧道内外土水压力,控制了灾情的进一步扩散,地质环境的韧性水平不再降低,并有少量提升,如阶段③所示;之后在 $t_3$ 时刻人为干预下,通过注浆等措施,逐渐恢复地质体承载能力,与此同时,地质体的脆弱性逐渐减弱,因此地质环境韧性水平也随之提高,但仅仅是恢复至低水平,如阶段④所示;最后从 $t_4$ 时刻开始,在长达 34 个月的修复工程中,并未发生地质灾害,可见适应力水平极高,并且将地质环境韧性水平提升到另一个新的高度,直到之后下一灾害事件出现,期间韧性水平由低水平提高至高水平,如阶段⑤所示;从 $t_5$ 时刻开始地质体又恢复到稳定,如阶段⑥所示。

### 3.4 可行性分析

本文提出的城市深层地下空间地质环境韧性水平评估模型,评估指标参数充分考虑了韧性的基本内涵,还符合地质环境韧性水平的时空演变规律。即考虑地质环境的天然条件,还考虑了城市的基础条件。该数学模型对于定性指标采用 AHP-综合指数法进行综合考虑,对于定量指标则进行无量纲处理后用于计算,便于在各种复杂地质环境的城市中开展深层地下空间韧性评估工作,具有可操作性和可行性。

## 4 结 论

(1)城市深层地下空间地质环境韧性包括考虑影响地质体承载能力的主要因素,以及考虑人为干预条件下地质环境的抵御能力与恢复能力、适应能力三个方面。

(2)细化各个指标的影响因素及其评估方法,基于灾害事件严重度、地质体脆弱性、抵御力、恢复力、适应力 5 个韧性指标,建立的城市深层地下空间地质环境韧性多因素综合评估模型具有极高可操作性。

(3)若受灾害影响,地质环境韧性水平变化可分为正常、受灾、抵御、恢复、适应和再正常 6 个阶段,韧性水平评估曲线呈现出先减小再增大后趋于稳定

的变化趋势,且在受灾和抵御的节点处达到最小值。

## References

- Deng Rilang, Chen Lingwei, Cai Junjian, Zhang Huawei, Zheng Xianchang. 2022. Evaluation of collapse susceptibility based on a contribution rate model— A case study at baiyun district, guangzhou City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 42(4): 218–226, 381 (in Chinese with English abstract).
- Goldbeck N, Angeloudis P, Ochieng W Y. 2019. Resilience assessment for interdependent urban infrastructure systems using dynamic network flow models[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 188: 62–79.
- Gou Defei. 2020. Simulation Study on Optimal Operation Strategy of Drainage System of Deep Tunnel in S Area of Guangzhou[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 1–130 (in Chinese with English abstract).
- Huang H W, Zhang D M. 2016. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51: 301–312.
- Huang Yajiang, Li Shuquan, Xiang Sisi. 2021. Evaluation of subway fire safety resilience based on AHP-PSO fuzzy combination weighting method[J]. *Journal of Catastrophology*, 36(3): 15–20, 40 (in Chinese with English abstract).
- Lan Wei, Wang Weidong, Chang Linyue. 2022. Field pumping test and soil layer deformation analysis of super large scale deep foundation pit engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 43(10): 2898–2910 (in Chinese with English abstract).
- Lei Shengxiang, Liu Zhichun, Huang Shuanglin, Du Kongze, Ding Zhengquan. 2022. Related research progress of networked expansion of urban underground space[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 18(5): 1424–1440 (in Chinese with English abstract).
- Li Diyuan, Mo Qiuzhe. 2015. The utilization of urban underground space in Singapore and the lesson that could be learned by China[J]. *Science & Technology Review*, 33(6): 115–119 (in Chinese with English abstract).
- Li Hua, Wang Liang, Han Haodong, Yang Jian, Wang Qiao, Wang Donghui, Xi Zhenzhu, Long Xia, ZhangWei, Liao Guozhong. 2020. A new method for detecting gypsum mineral salt enriched layer of urban underground space in red bed area: A case study of Chengdu International Biological City[J]. *Geology in China*, 47(6): 1793–1803 (in Chinese with English abstract).
- Li Nianchun, Zhan Xueqiang, Fen Quanlin, Xu Qiuxiao, Li Hongtao, Hao Jie, Wu Di. 2021. Evaluation of bearing capacity of geological environment in shandong province based on "bearing foundation-bearing status-bearing potential" model[J]. *Northwestern Geology*, 54(1): 222–231 (in Chinese with English abstract).

- Lin Xingtao, Chen Xiangsheng, Su Dong, Zhu Min, Han Kaihang, Chen Renpeng. 2022. Evaluation method for resilience of shield tunnel linings considering multiple disturbances and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(4): 591–601 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xingwang, Li Binghe, Chen Weilin, Mao Haihe, Zhang Ge, Sun Zhengbo. 2022. Control technology for the influence of deep and large foundation pit of 6-story basement in deep soft soil on adjacent subway tunnels[J]. *Building Structure*, 52(15): 136–141 (in Chinese with English abstract).
- Monstadt J, Schmidt M. 2019. Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities[J]. *Urban Studies*, 56(11): 2353–2371.
- Pan Zongyuan, Jiang Xiaozhen, Dai Jianling, Guan Zhende, Wu Yuanbin. 2017. Study on the mechanism of groundwater level restoration process to karst sinkholes in karst deposit drainage area: A case of Dachengqiao, Ningxiang county, Hu'nan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 36(6): 786–794 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jun. 2019. Development and some issues on exploitation and utilization of urban underground space in China and abroad[J]. *Tunnel Construction*, 39(5): 699–709 (in Chinese with English abstract).
- Tan Y, Lu Y, Wang D. 2021. Catastrophic failure of shanghai metro line 4 in July, 2003: Occurrence, emergency response, and disaster relief[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(1): 04020125.
- Wang Hanbin. 2013. The Strategy Research on Urban Underground Space in High-density Area[D]. Tianjin: Tianjin University, 1–307(in Chinese with English abstract).
- Wang J, Deng Y, Qalati S A, Qureshi N A. 2022. Urban resilience and transportation infrastructure level in the yangtze river delta[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 893964.
- Wei Qiang, Liu Jiaqi, Wang Jingchun, Wang Peng. 2021. Evaluation of safety resilience in tunnel construction based on ideal fuzzy matter element[J]. *China Safety Science Journal*, 31(8): 62–68 (in Chinese with English abstract).
- Xi Xi, Ding Zan, Ye Runqing, Niu Ruiqing. 2021. Evaluation of geological environment carrying capacity of Huangshi city based on FCE-AHP[J]. *Journal of Natural Resources*, 36(3): 646–658 (in Chinese with English abstract).
- Xia Riyuan, Lu Haiping, Cao Jianwen, Zhao Liangjie, Wang Zhe, Luan Song. 2022. Characteristics of groundwater resources of karst areas in the Southern China and water resources guarantee countermeasures[J]. *Geology in China*, 49(4): 1139–1153 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xuxian, Wang Junli, Fan Ling, Li Wenchao. 2022. Research on subway flood disaster from the perspective of resilient city—Based on Bow-Tie-Bayesian network model[J]. *Journal of Catastrophology*, 37(2): 36–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bin, Xu Nengxiong. 2019. Current status, trend and revelation of worldwide urban underground space development and utilization[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 48–56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie, Li Duo, Zhang Yun, Wei Aihua, Cheng Xin. 2021. Evaluation on the bearing capacity of geological environment based on optimized weights of game theory[J]. *Science Technology and Engineering*, 21(20): 8360–8365 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dongyue, Chen Changkun, Yi Liang, Lei Peng, Xu Lili. 2022. Research on comprehensive assessment model of urban resilience with multi-factor[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 18(5): 54–59 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Gang, Cheng Xuesong, Zhou Haizuo, Zhang Tianqi, Yu Xiaoxuan, Diao Yu, Wang Ruozhan, Yi Fan, Zhang Wenbin, Guo Wei. 2022. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering[J]. *China Civil Engineering Journal*, 55(7): 1–38 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Qiyu, Xia Xiaohe, Li Mingguang, Zhang Yangqing. 2020. Influence of dewatering in confined aquifers on wall deformation and ground settlements in deep excavation[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 54(10): 1094–1100 (in Chinese with English abstract).
- Zhi Zemin, Chen Qiong, Zhou Qiang, Xia Xingsheng, Liu Fenggui. 2022. Evaluation of geo-environmental carrying capacity of counties along the sichuan-tibet railway based on random forest[J]. *Science Technology and Engineering*, 22(24): 10451–10460 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yinghao, Wang Wenjie, Lu Xizhou, Wang Kangwei. 2022. Combination weighting prediction model and application of rock burst disaster based on game theory[J]. *China Safety Science Journal*, 32(7): 105–112 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 邓日朗, 陈凌伟, 蔡俊坚, 詹华炜, 郑先昌. 2022. 基于贡献率模型的崩塌易发性评价——以广州市白云区为例[J]. *水土保持通报*, 42(4): 218–226, 381.
- 苟德菲. 2020. 广州市 S 区深层隧道排水系统优化调度运行策略模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 1–130.
- 黄亚江, 李书全, 项思思. 2021. 基于 AHP-PSO 模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J]. *灾害学*, 36(3): 15–20, 40.
- 兰韡, 王卫东, 常林越. 2022. 超大规模深基坑工程现场抽水试验及土层变形规律研究[J]. *岩土力学*, 43(10): 2898–2910.
- 雷升祥, 刘志春, 黄双林, 杜孔泽, 丁正全. 2022. 城市地下空间网络化拓建相关研究进展[J]. *地下空间与工程学报*, 18(5): 1424–1440.
- 李地元, 莫秋喆. 2015. 新加坡城市地下空间开发利用现状及启示[J]. *科技导报*, 33(6): 115–119.
- 李华, 王亮, 韩浩东, 杨剑, 王桥, 王东辉, 席振铎, 龙霞, 张伟, 廖国忠. 2020. 红层地区城市地下空间膏盐富集层探测新方法——以成都市国际生物城为例[J]. *中国地质*, 47(6): 1793–1803.

- 李念春, 张学强, 冯泉霖, 徐秋晓, 李洪涛, 郝杰, 吴迪. 2021. 基于“承载基础-承载现状-承载潜力”模型的山东省地质环境承载力评价[J]. 西北地质, 54(1): 222-231.
- 林星涛, 陈湘生, 苏栋, 朱旻, 韩凯航, 陈仁朋. 2022. 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[J]. 岩土工程学报, 44(4): 591-601.
- 刘兴旺, 李冰河, 陈卫林, 毛海和, 张戈, 孙政波. 2022. 深厚软土 6 层地下室深大基坑对邻近地铁隧道影响控制技术[J]. 建筑结构, 52(15): 136-141.
- 潘宗源, 蒋小珍, 戴建玲, 管振德, 吴远斌. 2017. 岩溶矿床疏干区地下水水位恢复对岩溶塌陷作用机制的研究——以湖南宁乡大成桥为例[J]. 中国岩溶, 36(6): 786-794.
- 孙钧. 2019. 国内外城市地下空间资源开发利用的发展和问题[J]. 隧道建设(中英文), 39(5): 699-709.
- 万汉斌. 2013. 城市高密度地区地下空间开发策略研究[D]. 天津: 天津大学, 1-307.
- 魏强, 刘加奇, 王景春, 王鹏. 2021. 基于理想模糊物元的隧道施工安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 31(8): 62-68.
- 席茜, 丁赞, 叶润青, 牛瑞卿. 2021. 基于 FCE-AHP 的黄石市地质环境承载力评价[J]. 自然资源学报, 36(3): 646-658.
- 夏日元, 卢海平, 曹建文, 赵良杰, 王喆, 栾崧. 2022. 南方岩溶区地下水资源特征与水资源保障对策[J]. 中国地质, 49(4): 1139-1153.
- 闫绪娴, 王俊丽, 范玲, 李文超. 2022. 韧性城市视角下地铁洪涝灾害风险分析——基于 Bow1-Tie—贝叶斯网络模型[J]. 灾害学, 37(2): 36-43.
- 张彬, 徐能雄, 戴春森. 2019. 国际城市地下空间开发利用现状、趋势与启示[J]. 地学前缘, 26(3): 48-56.
- 张杰, 李铎, 张赟, 魏爱华, 程鑫. 2021. 基于博弈论优化权重的地质环境承载力评价[J]. 科学技术与工程, 21(20): 8360-8365.
- 赵冬月, 陈长坤, 易亮, 雷鹏, 许丽丽. 2022. 城市韧性多因素综合评价模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 18(5): 54-59.
- 郑刚, 程雪松, 周海祚, 张天奇, 于晓旋, 刁钰, 王若展, 衣凡, 张文彬, 郭伟. 2022. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. 土木工程学报, 55(7): 1-38.
- 郑启宇, 夏小和, 李明广, 张扬清. 2020. 深基坑降水承压水对墙体变形和地表沉降的影响[J]. 上海交通大学学报, 54(10): 1094-1100.
- 支泽民, 陈琼, 周强, 夏兴生, 刘峰贵. 2022. 基于随机森林的川藏铁路沿线县域地质环境承载力评价[J]. 科学技术与工程, 22(24): 10451-10460.
- 周英豪, 王文杰, 卢西洲, 王康伟. 2022. 岩爆灾害博弈论组合赋权预测模型及应用[J]. 中国安全科学学报, 32(7): 105-112.