doi: 10.12097/gbc.2023.04.019

广东省中山市地下空间开发利用三维适宜性评价

罗跃春^{1,2},陈开明^{1,3},龙明滔^{1,3},江贵荣^{1,3},侯卫生⁴,张澄博⁴ LUO Yuechun^{1,2}, CHEN Kaiming^{1,3}, LONG Mingtao^{1,3}, JIANG Guirong^{1,3}, HOU Weisheng⁴, ZHANG Chengbo⁴

1. 广东省珠海工程勘察院, 广东珠海 519000;

2. 广东省岩土基础工程技术研究中心, 广东珠海 519000;

3. 广东省地质局第一地质大队, 广东珠海 519000;

4. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275

1. Zhuhai Engineering Investigation Institute of Guangdong Province, Zhuhai 519000, Guangdong, China;

2. Geotechnical Foundation Engineering Technology Research Center of Guangdong Province, Zhuhai 519000, Guangdong, China;

3. The First Geological Brigade of Guangdong Geological Bureau, Zhuhai 519000, Guangdong, China;

4. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China

摘要:【研究目的】地下空间资源是重要的国土资源,为了将地下空间资源保护好、开发好,进行地下空间资源开发利用适宜性 评价十分必要。【研究方法】基于 Python、Paraview 软件,通过双线性插值方法和层次分析法实现了中山市-100~0 m 全地下 空间域的适宜性三维评价。评价模型采用了 8192 个钻孔数据,建立了标贯击数、含水率、内摩擦角、压缩模量、抗压强度 5 个单 因数的三维数据,此外提取了岩土条件、水文地质条件、不良地质条件、资源敏感性、开发利用价值等作为主体层的 21 个单因素 二维数据,通过变权思想实现了三维和二维数据的耦合计算。【研究结果】建立了中山全市地下-100~0 m 分析空间域,并将 空间域划分为 1.28 亿个单元,每个单元赋予了 21 个单因子属性值,通过层次分析法和双线性插值实现了中山市地下空间适宜 性三维评价,最后通过 paraview 实现可视化。【结论】中山市地下空间开发利用适宜性总体较好,对于基坑与桩基础工程适宜 良及以上占比 88%,对于隧道工程适宜性良及以上占比 83.5%。

关键词:中山市;地下空间;适宜性;三维评价

创新点:利用 8192 个钻孔,建立了中山市-100~0 m 地下空间开发利用适宜性三维评价模型,评价模型综合考虑了 26 个单因子。

中图分类号: P642; TU91 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)05-0848-10

Luo Y C, Chen K M, Long M T, Jiang G R, Hou W S, Zhang C B. 3D suitability evaluation of underground space development and utilization in Zhongshan City of Guangdong Province. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(5): 848–857

Abstract: [Objective] Underground space resources are important national resources. For the scientific and rational protect and develop them, it is necessary to conduct suitability evaluations for the development and utilization of underground space resources. **[Method]** Based on Python and Paraview software, the 3D suitability evaluation of $-100 \sim 0$ m underground space of Zhongshan city was realized by bilinear interpolation method and analytic hierarchy process. The data of 8192 bore holes was collected and analyzed, and five 3D data of single factor (spt blow count, water content, internal friction angle, compression modulus and compressive strength) was obtained. In addition, the geotechnical conditions, hydrogeological conditions, adverse geological conditions, resource sensitivity and development value were selected as theme layer, them contain 21 signal factor 2D data. The coupling calculation of 2D and 3D data is realized based on the variable weight method. **[Results]** The spatial domain of the underground $-100\sim 0$ m in Zhongshan city

资助项目:中山市自然资源局项目《中山市多要素三维城市地质调查项目》(编号:442000-201903-2019001-0011 (ZZ21909738)) 作者简介:罗跃春(1986-),男,博士,高级工程师,从事岩土工程、地下空间工程研究。E-mail:355529942@qq.com

收稿日期: 2023-04-12;修订日期: 2023-10-14

was established an analyzed, and the spatial domain was divided into 128 million units, each of which is assigned 21 single factor attribute values. Then, a three-dimensional evaluation of the suitability of underground space in Zhongshan city through AHP and bilinear interpolation, and finally visualized it through Paraview software. **[Conclusions]** The suitability of development and utilization of the underground space of Zhongshan City is overall good, with more than 88% area suitable for foundation pit and pile foundation projects, and more than 83.5% area suitable for tunnel projects.

Key words: Zhongshan City; underground space; suitability; 3D evaluation

Highlights: A three-dimensional evaluation model for the suitability of underground space development and utilization in Zhongshan City was established using 8192 boreholes, and 26 single factors were considered in this model.

随着中国城市化进程迅速推进,城镇人口聚集 现象越来越明显。根据专家预测,到 2030 年中国城 镇化覆盖率将达到 70%, 而城镇人口将超过 10 亿, 预计到 2050 年城镇化覆盖率将接近 80%(谭飞等, 2020)。因此,可以预测,未来中国城镇用地紧张局 面将较难得到缓解,人口数量与土地资源之间的矛 盾会越来越突出。普遍认为,科学合理地开发利用 地下空间资源是解决城市人口过度聚集、土地资源 短缺、环境恶化危机的重要手段之一,也是城市维 持可持续发展的必经之路。地下空间的开发利用指 在地表以下空间中进行工程建设,从而拓展城市的 空间资源。工程地质条件、水文地质条件是地下空 间开发的环境基础,对地下空间开发具有重要影 响,另外,地下空间开发不可避免地会改变地下空间 环境,如地下空间构成、地下水路径等。地下空间 资源是有限的,且开发利用后一般不可逆,为了将地 下空间资源保护好、开发好,开展地下空间资源开 发利用适宜性评估必不可少。合理的地下空间评估 不仅对城市地下空间规划具有重要参考意义,也对 各类工程建设的设计、施工、组织等具有前期指导 作用。

地下空间开发利用适宜性评估应考虑尽可能多的因素,通过层次排序确定出重要因素和次要因素, 但受限于对地下空间认识的局限性和片面性,不同 学者进行地下空间开发利用适宜性评估选取的评价 因子往往不同。如南昌市中心区地下空间适宜性评 估(蒋杰等,2021),选取的评价因子包括地形地貌、 工程地质条件、水文地质条件等16个因子。北京市 海淀区地下空间开发地质环境适宜性评价仅选取了 8个因子(姜婷,2019)。而东部沿海地下空间评价, 包括建设现状、工程地质、水文地质等17个因子(柳 昆等,2011)。尽管这些评价因子有一部分是一致 的,但最终评价结果不具有普遍性。

关于地下空间适宜性评估方法,目前主要为层

次分析或基于层次分析法改进的评估方法。常见的 评估手段为二维评价,如长沙、郑州、济南等城市的 地下空间适宜性评估就是基于 GIS 软件的二维评价 (吴文博, 2012; 夏友等, 2014; 江思义等, 2019; 秦品 瑞等,2019;王振宇,2019;何静等,2020)。地下空间 具有立体性,其空间范围内的地质条件一般会随深 度发生变化,同时地表因子对深层地下空间开发影 响较小,因此二维评价较难准确反映地下空间的真 实情况。近年来,随着计算机计算能力和三维建模 技术的发展,出现了一批基于三维模型的地下空间 评价(史玉金等,2008;方寅琛等,2017;章梦霞,2019; 郝英红等,2021;蒋杰等,2021;薛涛等,2021),但它 们也存在缺点。三维地下空间评价所需数据量巨 大,现有三维地下空间评价考虑的因素很少,较难全 面反映岩土条件、水文地质条件、不良地质条件等对 地下空间开发利用的约束作用。此外,大多数三维 评价范围较小、深度较浅,一般为围绕一个区或某中 心的浅层或次浅层开展,缺乏区域性的三维地下空 间评价。

因此,本文开展了中山全市域-100~0 m 地下空 间资源适宜性三维评价。评价按"三维叠加二维"的 方式进行,首先建立全空间域三维模型,将三维数据 赋值于模型上,接着将二维数据按沿深度变权重的 方法赋值到三维模型中,最后通过层次分析法对三 维模型上的数据进行分析,得到三维的地下空间适 宜性评价模型。本次分析共涵盖了 26 个因子。

1 区域概况

中山市位于广东省中南部,地处珠江三角洲中 南部,粤港澳大湾区的核心区,其地形是在华南准地 台的基础上,经过漫长的气候变化和风雨侵蚀,形成 的以冲积平原为主、低山丘陵台地错落其间的水乡地 形地貌。区域南北狭长,东西短窄,分为北部、南部 平原区和中部山地区及滩涂、水域区。平原面积约 1242 km², 占全市面积的 68%, 山地面积约 400 km², 占 25%, 河流占 7%, 滩涂面积约 150 km²。全市海岸 线约 57 km, 濒临珠江口伶仃洋一带, 大部分属淤泥 质海岸。

中山市内河网密度较大,共有支流 289 条,全长 977.1 km。区内水量丰富,但以过境客水为主。根据 地下水的赋存形式、含水介质条件,区内地下水类型 可分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。北部和南部 三角洲平原区主要为松散岩类孔隙水,以孔隙承压 水形式赋存,且以咸水为主。中部低山丘陵区以基 岩裂隙水为主,周边的山间谷底、山前冲洪积平原区 为松散岩类孔隙水,为中山市淡水资源的主要出露 地区。第四系含水层有多个沉积中心,主要沿北西 向展布,北东向次之。在区域东北部(东圃镇—阜沙 镇—民众镇一带)第四系含水层厚度较大,钻孔揭示 最高可达 52.4 m,东北部第四系含水层整体在 18 m 以上,其他地区大多在 3~9 m 之间。

中山市内出露地层以第四系松散堆积物为主, 其成因类型复杂,主要为河口三角洲沉积,局部为陆 相沉积,岩相岩性及沉积物厚度多变;在北部、中部 和南部出露有小面积的寒武系、泥盆系、侏罗系和白 垩系;在五桂山区域出露基岩以中生代花岗类岩石 为主。中山市内主要有侏罗系、寒武系、泥盆系、白 垩系等,零星出露面积较小。

中山市域范围内断裂构造发育,褶皱构造一般 规模较小,其主干断裂总体上可以分为2组:一组为 北东向断裂,包括古镇-南沙断裂束、五桂山北断裂、 大涌-民众断裂、榄边-板芙断裂、南朗-深湾断裂、五 桂山南断裂、平沙断裂束;另一组为北西向断裂,包 括西江断裂、顺德-崖口断裂、黄圃-南朗断裂束。

根据调查分析,目前中山市-100~0 m 地下空间 总体开发率仅为 4%,中山市核心区域总体开发率达 35% 左右,且核心区域的地下空间资源开发利用的 主要类型是基础和水系。整体看,中山市地下空间 资源开发利用程度较低。根据中山市主城区地下 空间规划,中山市未来将部署 3 条地铁,3 个一级地 下空间交通枢纽,5 个二级地下交通枢纽,以及大量 的地下通道、灾害防治中心、市政设施等。同时,随 着国家"粤港澳大湾区"战略的提出,以及深中通道、 深茂铁路等重大交通设施的建设,中山市的几何中 心区位优势大幅提升,其地下空间开发需求愈发 强烈。

2 方法步骤

本次分析主要基于收集的 8192 个钻孔数据和 相关野外调查数据,钻孔点位分布和孔深如图 1 所 示。依据岩性组合、沉积构造、沉积物颜色特征,划 分了 2 个组级岩石地层单位,即礼乐组(Qp³l)和 桂洲组(Qhg),并进一步细分为 6 个段及 2 个层级地 层单位。礼乐组自下而上划分为南沙段(Qp^{3ns})、光 明村层(Qp^{3gn})、石排段(Qp^{3sp})、西南镇段(Qp^{3x})和 三角层(Qp^{3sj}),桂洲组(Qhg)自下而上划分为杏坛段 (Qh^{xt})、横栏段(Qh^h)、灯笼沙段(Qh^d)。

本次评价技术路线如图 1 所示。首先确定评价 区坐标和范围,基于 Python 语言建立三维空间域模 型,利用 voxel 网格划分方法划分全空间域单元,单 元为六面体,其尺寸沿 X、Y、Z轴分别为 100 m、100 m 和 1 m,共计 1.28×10⁹ 个单元。提取 8192 个钻孔(钻 孔分布及孔深如图 2 所示)数据,并按 VTK 规则属 性数据体的方式进行组织,存储于相关文件中,接着 将属性数据投影至空间域模型上,利用多尺度双线 性插值算法,获得全空间域内单元的各因子值。再 根据层次分析法(AHP)确定各因子权重,对各因子 进行耦合计算,得到各单元的评价值,最后通过 Paraview 进行可视化。

3 评价指标体系

本次评价以 AHP 方法的基本思想为依托,将评 价因子分成目标层(A)、主题层(B)和指标层(C)3 个 层次。评价中三维数据 5 个,分别为标贯基数、含水 率、内摩擦角、压缩模量和抗压强度;二维数据 21 个,通过沿深度变权重实现数据三维化。一般 对于不同城市的地质条件和发展需求,其评价因子 选取存在差异。依据《城市地下空间开发地质环 境适宜性评价技术规范》(DB41/T 2120—2021), 选取地形地貌、岩土条件、水文地质条件、不良地



Fig. 1 Technology roadmap



图 2 钻孔分布及孔深 Fig. 2 Distribution and depth of the borehole

质条件、资源环境敏感性、安全性及开发利用价值 条件作为评价模型的主题层。对于指标层的选取 和分级标准,参考国内地下空间适宜性评价方法 (柳昆等,2001;吴文博,2012;夏友等,2014;姜婷, 2019;江思义等,2019;秦品瑞等,2019;王振宇, 2019;何静等,2020;蒋杰等,2021),并征求中山市 管理部门意见综合确定。评价模型指标的选取, 反映了国内目前对于地下空间开发利用适宜性评 价的总体认识,同时考虑了中山市地下空间规划的 需求。

根据中山市建设实际情况,本次评价分了基坑 与桩基础工程和隧道工程,它们对不同因子的敏感 性并不完全相同,区别主要在于地表条件对隧道工 程影响较小,而古河道对隧道工程影响较大,因此需 对这些因子进行微调,鉴于篇幅本文不再给出隧道 工程评价指标体系分配权重表。本次共咨询5位专 家并对咨询结果进行整理,利用 Yaahp 软件建立判 断矩阵,得到各因子权重(表1)。基坑与桩基础工程 和隧道工程权重判断矩阵一致性比率 *CR* 分别为 0.07 和 0.06,均小于 0.1,一致性检验通过。

4 评价结果

4.1 单因素评价

适宜性评价基于单因素评价结果,各单因素评 价分级准则如表 2 所示。根据表 2 分级准则各单因 素评价分为4级(图3)。各单因素评价等级所占比 例如表3所示。关于各评价因子对地下空间因子的 影响,因为本次选取的因子较多,详见文献(史玉金 等,2008:方寅琛等,2017:章梦霞,2019:郝英红等, 2021; 蒋杰等, 2021; 薛涛等, 2021)。以上文献中并 未提到单位面积 GDP 和人口密度,本文补充如下: ①地下空间开发的需求迫切性和规模一般受人口密 度分布影响较大,对于人口密集的地区其人均地表 面积相对较小,为缓解地面压力,其地下空间开发的 规模和深度越大,其开发迫切性越强,在这些区域进 行地下空间开发社会效益和经济效益越显著;②地 下空间开发的投入一般较巨大,为了回笼开发成本, 国内地下空间目前大多与商业设施挂钩。人均 GDP 越高的区域其消费水平和层次越高,利于商业 设施设置,提高地下空间开发的经济可行性。

2025 年

	→晒旱(D)	之照日 桓季		指标层权重			
	土迦层(B)	土巡伝仪里	指你层(U)	0~15 m	15~30 m	30~50 m	50~100 m
	地形地貌B1	0.0583	地形坡度C1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	土体条件(土体分布区域)		标贯击数C2	0.3038	0.3038	0.3038	0.3038
岩 十		0.1382	含水量C3	0.0730	0.0729	0.0729	0.0729
			摩擦角C4	0.3116	0.3116	0.3116	0.3116
本体			压缩模量C5	0.3116	0.3116	0.3116	0.3116
条			中风化基岩面埋深C6	0.3108	0.3108	0.3108	0.3108
件	岩体条件(岩体分布区域)	0.1381	基岩面起伏C7	0.1958	0.1958	0.1958	0.1958
D2			岩石抗压强度C8	0.2003	0.2003	0.2003	0.2003
			基岩岩性C9	0.2931	0.2931	0.2931	0.2931
水文地质条件B3		0.0545	地下水富水性C10	0.4270	0.4270	0.4270	0.4270
			地下水腐蚀性C11	0.5730	0.5730	0.5730	0.5730
			淤泥质软土厚度12	0.6500	0.5500	0.2500	0.1500
	不自地岳冬//JD4		透水性砂土厚度C13	0.2500	0.200	0.0500	0.0500
不良地质余件B4		0.1351	古河道卵砾石厚度C14	0.0500	0.1500	0.6000	0.6000
			风化类岩土厚度C15	0.0500	0.1000	0.1000	0.2000
			应急水源地分布C16	0.1700	0.1700	0.1000	0.1000
		0.0586	地质遗迹分布C17	0.3000	0.3000	0.2000	0.1000
			固体矿产及矿泉水资源分布C18	0.2900	0.3500	0.4900	0.5300
			地热资源分布C19	0.0800	0.1300	0.2100	0.2700
			大型地表水体分布C20	0.1600	0.0500	0.0000	0.0000
安全性B6		0.2856	地下空间利用现状C21	0.3900	0.3900	0.3900	0.3900
			地质灾害发育情况C22	0.1900	0.1500	0.0500	0.0500
			断裂构造稳定性C23	0.4200	0.4600	0.5600	0.5600
			单位面积GDPC24	0.3425	0.3425	0.3425	0.3425
开发利用价值B7		0.1316	人流密度C25	0.3895	0.3895	0.3895	0.3895
			土地利用类型C26	0.268	0.268	0.268	0.268

表1 评价指标及权重分配(基坑与桩基础工程)

4.2 适宜性评价

适宜性评价结果如图 4 所示。根据综合得分分 为适宜性差、适宜性中、适宜性良和适宜性优4个等 级。对于基坑与桩基础工程:适宜性优占比13.6%, 主要分布于五桂山、火炬开发区及翠亨新区南部;适 宜性良占比 74.4%, 分布较广泛; 适宜性中占比 11.3%,主要分布在断裂带影响范围、软土砂土及古 河道发育地区;适宜性差占比0.7%,分布在三角镇处 断裂带与较厚的软土重叠区。对于隧道工程,其适

宜性评价结果分布与基坑工程相似,但在中山北部 由于存在古河道其适宜性有所降低。对2类工程适 宜性评价结果按不同深度范围进行统计,结果如 表4、表5所示。整体看,中山市地下空间适宜性基 坑与桩基础工程比隧道工程略好。图 5 为基坑与桩 基础工程对应适宜性评价剖面图,其剖切深度为 -15 m、-50 m 和-80 m。从图 5 可以看到,适宜性随 着深度增加逐渐转好,即随深度增加适宜性中区逐 渐减小,取而代之的是适宜性良区。这主要是随深

Table 2	Evaluation	grading	standards	of the	single	factor
---------	------------	---------	-----------	--------	--------	--------

证从北左	分级标准					
11-17月1日70小	I (1分)	Ⅱ(2分)	Ⅲ(3分)	Ⅳ(4分)		
地形坡度/°	>20	10~20	5~10	<5		
标贯击数/击	<10	10~15	15~30	>30		
含水率/%	>40	30~40	20~30	<20		
内摩擦角/°	<5	5~20	20~30	>30		
压缩模量/MPa	<3	3~5	5~7	>7		
中风化基岩面埋深/m	>45	30~45	15~30	<15		
中风化基岩面起伏/°	>2.0	1.5~2.0	1.0~1.5	<1.0		
岩石抗压强度/MPa	<5	5~15	15~30	>30		
基岩岩性	火山碎屑岩	沉积砂岩	混合岩	花岗岩		
地下水富水性	中等—丰富	/	贫乏	极贫乏		
地下水腐蚀性	弱	/	/	无		
淤泥质软土厚度/m	>30	20~30	10~20	<10		
透水性砂土厚度/m	>10	5~10	2~5	<2		
古河道卵砾石厚度/m	>15	10~15	5~10	<5		
风化类岩土厚度/m	>24	16~24	8~16	<8		
应急水源地分布	二级保护区	准保护区	/	非保护区		
地质遗迹分布	保护区	/	/	非保护区		
固体矿产及矿泉水资源分布	矿区	/	/	非矿区		
地热资源分布	矿区	/	/	非矿区		
大型地表水体分布	水库	河流	/	非分布区		
地下空间利用现状(利用率)	>20%	10%~20%	5%~10%	<5%		
地质灾害发育情况	高易发区	中易发区	低易发区	非易发区		
断裂构造稳定性	一级断裂	二级断裂	小微断裂	非断裂带		
单位面积GDP	低	较低	较高	声同		
人流密度	低	较低	较高	声		
土地利用类型	生态用地	基本农田	一般耕地	建设用地		

度增加其地质条件逐渐变好,同时受地面的影响因 素变小所致。但值得注意的是,本次评价并未考虑 地下空间开发的施工技术和成本因素,相关工程建 设及规划还需考虑以上因素。

将三维立体评价结果按浅层(0~15 m)、次浅层 (15~30 m)、次深层(30~50 m)、深层(50~100 m)进 行分层厚度加权,使用 ArcGIS 叠合成地下空间资源 开发利用适宜性评价分区图。将基坑与桩基础工程 和隧道工程的评价分区图按权重 6:4 进行叠加,得 到中山市地下空间开发利用适宜性评价和资源区划 图(图 6)。中山市开发利用适宜性共分为18个区, 其中优级区 8个、良级区1个、中级区9个。各分级 比例和说明如表6所示。

中山市地下空间开发利用良级区及以上占比 80%以上,表明中山市地下空间开发利用整体条件 较好。部分地区受到软土厚度大、断裂带、透水性砂 土厚度大、风化类岩土厚度大、古河道卵砾厚度大等 不良地质问题的影响,其地下空间开发利用评级为 中级区,也可认为以上不良地质问题是中山市地下 空间开发利用的制约因素。



图 3 各单因素评价结果

Fig. 3 Evaluation results of each single factor

a一标贯击数分级评价; b一含水率分级评价; c一内摩擦角分级评价; d一压缩模量分级评价; e一岩石饱和单轴抗压强度评价; f一构造稳定性评价; g一地形坡度分级评价; h一中风化基岩面埋深分级评价; i—基岩岩性分级评价; j—地下水富水性分级评价; k—地下水腐蚀性分级评价; l—淤泥质软土厚度分级评价; m—透水性砂土厚度分级评价; n—古河道卵砾石厚度分级评价; o—风化类岩土厚度分级评价; p—地质灾害发育情况分级评价; q—人流密度分级评价; r—中风化基岩面起伏分级评价结果图; s—应急水源地分布分级评价结果图, t—地质遗迹分布分级评价结果图; u—固体矿产、矿泉水及地热资源分布分级评价结果图; v—大型地表水体分布分级评价结果图; w—地下空间开发利用现状分级评价结果图(15~30 m); y—地下空间开发利用现状分级评价结果图(30~50 m); z—地下空间开发利用现状分级评价结果图(50~100 m); za—单位面积 GDP 分布分级评价结果图; zb—土地性质分级评价结果图

表 3 单因素评价分级比例

Table 3Evaluation statistics of single factor

话日	分级比例					
	I (差)	Ⅱ(中)	Ⅲ(良)	Ⅳ(优)		
地形坡度	0.8%	1.1%	1.7%	96.3%		
标贯击数	6.5%	2.8%	11.4%	79.3%		
含水量	34.6%	48.6%	16.6%	0.2%		
摩擦角	24.4%	45.2%	30.2%	0.2%		
压缩模量	39.1%	21.1%	36.2%	3.6%		
中风化基岩面埋深	9.2%	48.8%	28.8%	13.2%		
基岩面起伏	4%	4%	11.3%	80.7%		
岩石抗压强度	5.6%	12.7%	69.0%	12.8%		
基岩岩性	1.0%	30.0%	18.8%	50.2%		
地下水富水性	23.3%	/	57.9%	18.8%		
地下水腐蚀性	80.1%	/	/	19.9%		
淤泥质软土厚度	4.5%	8.4%	26.8%	60.3%		
透水性砂土厚度	0.4%	1.0%	6.8%	91.8%		
古河道卵砾石厚度	0.9%	8.1%	14.8%	76.2%		
风化类岩土厚度	10.8%	52.2%	32.1%	4.9%		
应急水源地分布	2.9%	2.4%	/	94.7%		
地质遗迹分布	5.9%	/	/	94.1%		
矿产矿泉资源	1.00/	,	,			
地热资源分布	1.0%	/	/	99.0%		
大型地表水体分布	0.4%	13.2%	/	86.4%		
地下空间利用现状	19.1%	14.1%	19.5%	47.3%		
地质灾害发育情况	2.2%	35.7%	44.2%	17.9%		
断裂构造稳定性	7.1%	6.0%	5.9%	81.0%		
单位面积GDP	36.9%	38.7%	11.8%	12.6%		
人流密度	48.5%	35.7%	12.8%	3.0%		
土地利用类型	6.9%	25.3%	40.1%	27.2%		



Fig. 4 Development and utilization suitability evaluation a一基坑与桩基础工程; b—隧道工程

表 4 基坑与桩基础工程适宜性分级评价统计结果

 Table 4
 Statistical of suitability evaluation of excavation foundation engineering

穴间茹囯/m	占比/%				
王问论问册	I (差)	Ⅱ(中)	Ⅲ(良)	N (优)	
-100~0	0.7	11.3	74.4	13.6	
-15~0	0.9	14.4	69.3	15.4	
-30~-15	0.9	12.5	70.6	16.0	
-50~-30	0.6	10.2	75.7	13.5	
-100~-50	0.6	10.4	76.6	12.4	

表 5 隧道工程适宜性分级评价统计

Table 5 Statistical of suitability evaluation of tunnel

engineering

穴间菇围/m	占比/%					
空内犯回/m ·	I (差)	Ⅱ(中)	Ⅲ(良)	N (优)		
-100~0	1.0	15.5	70.8	12.7		
-15~0	1.2	22.5	61.9	14.3		
-30~-15	1.2	19.4	64.4	14.9		
-50~-30	0.9	13.8	72.8	12.5		
-100~-50	1.0	13.0	74.5	11.6		









Fig. 6 Suitability evaluation and resource zoning map for underground space development and utilization in Zhongshan City

表 6 地下空间开发利用适宜性区划分区说明

Table 6 Description of suitability zoning for underground space development and utilization

适宜性分级	占比	分区	说 明		
优级区	21.1%	1.1% IV-1~IV-8	主要位于五桂山及南朗镇一带,地质条件好,已开发地下空间有限,同时地质灾害不明显,		
	21.170		可考虑进行深入地下空间开发		
良级区	60.7%	Ⅲ-1	地质条件较好,分布范围广,可进行大范围开发		
		∏-1	主要位于港口镇和民众镇,本区软土较厚,适合做深层地下空间开发,如深基础等,		
			不宜仅进行浅层地下空间开发		
				II -2	主要受断裂带影响,对于重要的或大型的地下空间开发应注意避开以上地区,或采取有效的抗震措施
		II -3 18.2% II -4	位于坦洲西部,本区存在较厚的透水性砂土及一级断裂,透水性对基坑开挖影响很大,不宜进行大规		
			模基坑开挖,此外本区中(微)风化岩顶面埋深超过80m,对于建设桩基础建设要求较高		
			位于东凤镇和小榄镇,本区主要存在问题是风化类岩土体较厚、古河道卵砾石较厚,		
中级区	18.2%		因此无论是以明挖还是盾构开挖方式进行地下空间开发其施工成本均较高		
		II -5	主要受断裂带影响,对于重要的或大型的地下空间开发应注意避开以上地区,或采取有效的抗震措施		
		II -6	位于横栏镇,该区软土较厚,中风化面以上土体较厚,岩石抗压强度较低		
		II -7	中风化面以上土体较厚,有湿地保护区		
		Ш -8	软土较厚,中风化面以上土体较厚		
		II -9	主要受断裂带影响,对于重要的或大型的地下空间开发应注意避开以上地区,或采取有效的抗震措施		

5 结 论

(1)本文利用 Python 建立了中山市全域 1783.67 km²,地下-100~0 m 分析空间域,并将空间域划分为 1.28 亿个单元,每个单元赋予了 21 个单因子属性 值,通过层次分析法和双线性插值实现了中山市地 下空间适宜性三维评价,最后通过 paraview 对评价 结果可视化处理。相较于其他城市地下空间适宜性 评价,本次评价具有面域广、深度大、评价因子较齐 全的特点。

(2)评价结果表明,中山市地下空间开发利用适 宜性总体较好,基坑与桩基础工程适宜性良及以上 占比 88%,隧道工程适宜性良及以上占比 83.5%,整 体看,基坑与桩基础工程的适宜性比隧道工程略好。

(3)中山市地下空间开发利用适宜性中及以下 地区主要存在软土厚度大、断裂带、透水性砂土厚度 大、风化类岩土厚度大、古河道卵砾厚度大等不良地 质问题。

References

Fang Y C, Gong R X, Li S F, et al. 2017. Suitability evaluation of underground space development based on a three-dimensional geological model, using the Jiaxing urban geological survey as an example[J]. Shanghai Land & Resources, 38(2): 43-45 (in Chinese with English abstract).

- Hao Y H, Li X H, Chen Z L, et al. 2021. Study on 3D evaluation method of geological environment quality for urban underground space development: A case study of Binhu New District, Hefei City[J]. Geography and Geo–Information Science, 37(1): 11–16(in Chinese with English abstract).
- He J, Zhou X Y, Zheng G S, et al. 2020. Research on the geological suitability evaluation system of underground space resource utilization in Beijing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 16(4): 955–966(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Wang Q Y, Li C L, et al. 2019. Evaluation Suitability for the underground space using expert–analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 116(5): 21–30(in Chinese with English abstract).
- Jiang J, Ge W Y, Ma Q S, et al. 2021. Geological environment suitability assessment of underground space development in Nanchang city[J]. Geological bulletin of China, 40(5): 734–744(in Chinese with English abstract).
- Jiang T. 2019. Geological environment suitability assessment of underground space development in haidian district, Beijing[D]. Master's Thesis of Southwest Jiaotong University (in Chinese with English abstract).
- Liu K, Peng J, Peng F L. 2011. Evaluation model for the suitability of underground space resources exploitation and utilization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 7(2): 219–231(in Chinese with English abstract).
- Qing P R, Gao S, Xu J X, et al. 2019. Suitablity evaluation of development and utilization of undergound space resources in Jinan

- Tan F, Wang J, Jiao Y Y, et al. 2020. Current situation and development of urban underground space suitability evaluation[J]. Earth Science, 46(5): 1896–1908(in Chinese with English abstract).
- Shi Y J. 2008. Three dimensional geological structure survey and adaptability evaluation of underground space development in Shanghai[R]. Shanghai Geological Survey and Research Institute(in Chinese with English abstract).
- Wu W B. 2012. Research on the ecaluation for underground space resourcein Suzhou urban planning area [D]. Master's Thesis of Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- Wang Z Y, Zhu T Y, Wang X H. 2019. Study on suitability evaluation system of Changsha's urban underground space for development and utilization[J]. Journal of Rrailway science and engineering, 16(5): 1274–1281(in Chinese with English abstract).
- Xia Y, Ma C M. 2014. Geo–environmental Suitability assessment of underground space resources exploitation and utilization in Zhengzhou City[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 10(3): 493–497(in Chinese with English abstract).
- Xu T, Shi Y J, Zhu X D, et al. 2021. Research on 3D modeling method for ecaluation of unban underground space resources: a case study in Shanghai[J]. Earth Science Frontiers, 28(4): 373–382(in Chinese with English abstract).
- Zhang M X. 2019. Study on geological suitability evaluation of urban underground space development from 3D perspective[D]. Master's Thesis of China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

方寅琛,龚日祥,李三凤,等. 2017. 基于三维地质模型的地下空间开发

适宜性评价——以嘉兴城市地质调查工作为例[J].上海国土资源, 38(2): 43-45.

- 郝英红,李晓晖,陈忠良,等.2021. 城市地下空间开发地质环境质量三 维评价方法研究——以合肥市滨湖新区为例[J]. 地理与地理信息 科学,37(1):11-16.
- 何静,周圆心,郑桂森,等.2020.北京市地下空间资源利用地质适宜性 评价研究[J].地下空间与工程学报,16(4):955-966.
- 江思义, 王启耀, 李春玲, 等. 2019. 基于专家-层次分析法的地下空间 适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 116(5): 21-30.
- 蒋杰, 葛伟亚, 马青山, 等. 2021. 南昌市中心城区地下空间开发地质适 宜性评价[J]. 地质通报, 40(5): 734-744.
- 姜婷. 2019. 北京市海淀区地下空间开发地质环境适宜性评价[D]. 西 南交通大学硕士学位论文.
- 柳昆,彭建,彭芳乐.2011,地下空间资源开发利用适宜性评价模型[J]. 地下空间与工程学报,7(2):219-231.
- 秦品瑞,高帅,徐军祥,等. 2019. 济南市城市地下空间资源开发利用适 宜性评价[J]. 山东国土资源, 35(6): 58-68.
- 谭飞, 汪君, 焦玉勇, 等. 2020. 城市地下空间适宜性评价研究国内外现 状及趋势[J]. 地球科学, 46(5): 1896-1908.
- 史玉金.2008. 上海市三维地质结构调查与地下空间开发适应性评价[R]. 上海市地质调查研究院.
- 吴文博. 2012. 苏州城市地下空间资源评估研究[D]. 南京大学硕士学 位论文.
- 王振宇,朱太宜,王星华.2019.长沙城市地下空间开发利用的适宜性 评价体系研究[J].铁道科学与工程学报,16(5):1274-1281.
- 夏友,马传明.2014.郑州市地下空间资源开发利用地质适宜性评价[J].地下空间与工程学报,10(3):493-497.
- 薛涛, 史玉金, 朱小弟, 等. 2021. 城市地下空间资源评价三维建模方法 研究与实践: 以上海市为例[J]. 地学前缘, 28(4): 373-382.
- 章梦霞.2019. 三维视角下的城市地下空间开发地质适宜性评价研 究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.