

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.155>



城市地下空间适宜性评价研究国内外现状及趋势

谭飞, 汪君, 焦玉勇*, 马邦闯

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 城市地下空间的开发利用是城市可持续发展的必然途径. 科学合理的城市地下空间适宜性评价可为城市的立体规划提供决策依据. 因此, 对城市各区域开展地下空间的适宜性评价就显得尤为重要. 从城市地质模型的可视化、地下空间适宜性评价指标、权重体系、评价模型、评价模式及评价系统这6个方面, 系统梳理了城市地下空间适宜性评价的国内外研究现状; 围绕城市地下空间适宜性评价指标的量化、城市地下空间适宜性评价可视化结果的可靠度以及城市地下空间适宜性立体化评价系统的普适性这3个关键问题, 探讨了城市地下空间适宜性评价的主要内容和未来发展方向. 旨在促进城市地下空间适宜性评价工作的深化, 为城市地下空间的开发与利用提供一定的指导.

关键词: 城市地下空间; 适宜性评价; 指标量化; 三维地质建模; 立体评价; 地质工程.

中图分类号: P64

文章编号: 1000-2383(2021)05-1896-13

收稿日期: 2020-08-06

Current Situation and Development of Urban Underground Space Suitability Evaluation

Tan Fei, Wang Jun, Jiao Yuyong*, Ma Bangchuang

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The development and utilization of urban underground space is an inevitable way of urban sustainable development. Scientific and reasonable evaluation of urban underground space suitability can provide decision-making basis for urban three-dimensional planning. Therefore, it is very important to evaluate the suitability of underground space in different areas of cities. The research status quo of urban underground space suitability evaluation is systematically reviewed from the aspects of urban underground space suitability evaluation visualization, evaluation index, weight system, evaluation model, evaluation mode and evaluation system. Then, the main content and future development direction of urban underground space suitability evaluation are discussed, which focuses on the key issues such as the quantification of urban underground space suitability evaluation index, the reliability of visualized results of urban underground space suitability evaluation and the universality of three-dimensional evaluation system of urban underground space suitability. In this paper, it may deepen the evaluation of the suitability of urban underground space and provide some guidances for the development and utilization of urban underground space.

Key words: urban underground space; suitability evaluation; index quantification; 3D geological modeling; three-dimensional evaluation; geological engineering.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41920104007, 51879245); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (Nos. CUGCJ1821, CUG170645).

作者简介: 谭飞 (1985—), 男, 教授, 主要从事城市地下空间开发利用研究. ORCID: 0000-0001-6237-8947. E-mail: tanfei@cug.edu.cn

***通讯作者:** 焦玉勇, E-mail: yyjiao@cug.edu.cn

引用格式: 谭飞, 汪君, 焦玉勇*, 等, 2021. 城市地下空间适宜性评价研究国内外现状及趋势. 地球科学, 46(5): 1896—1908.

0 引言

随着经济的不断发展和城市化进程的不断加快,预计我国到2030年城镇化率将达到70%,城市人口总数将超过10亿人,长远来看,2050年我国城镇化率将靠近或超过80%的上限,这必然导致城市用地趋近饱和,人地矛盾加剧.地下空间的开发越来越受到人们的重视,被认为是解决城市人口、资源、环境三大危机的重要措施,是城市走可持续发展道路的重要途径(Chen *et al.*, 2018).然而,地下空间具有不可再生性,“先到先得”的地下空间使用策略已经越来越不适合于城市的可持续发展,盲目开挖极易造成地下建筑物布局不合理以及诱发地质灾害等问题(Admiraal and Cornaro, 2016).因此,如何进行合理的城市地下空间开发就显得尤为重要.

城市地下空间的开发利用是在地表以下一定范围内岩土体(地质体)中进行的,其地质条件是地下空间开发利用的基础.一方面地质体的性质对地下空间开发利用有制约作用,另一方面地下空间开发利用也会影响原有的地质环境,对已有地下建筑的稳定性造成影响(Zheng and Wei, 2008; Huang *et al.*, 2013).因此,在城市地下空间开发之前,查明研究区域的地质环境要素以及已有城市地下空间分布状态就显得十分重要.

从2004年开始,中国地质调查局开展了多轮城市地质调查工作,以北京、上海等6个不同地质类型城市为试点,重点开展城市三维地质结构调查等(程光华等, 2019).在获得研究区域地质资料以及已有地下空间的分布状态后,能够反映地下空间分布和岩土变化的三维地质模型就凸显出重要性.一个大范围、精细的三维地质模型不仅在理清城市地下空间现状中发挥重要作用,还可以指导针对地质薄弱地区进行详细地质调查,为城市地下空间适宜性评价提供重要基础资料(Thierry *et al.*, 2009; Dong *et al.*, 2015).因此,在城市地下空间的开发过程中,建立一个精细的三维地质模型是进行城市地下空间适宜性评价的关键.

城市地下空间的开发利用需要进行合理的规划,离不开对研究区域的地下空间进行适宜性评价(Hou *et al.*, 2016).城市地下空间的适宜性评价是一个综合性问题,涉及地形地貌、建设条件、地理位置等因素(Zhao and Lee, 1996;何守阳等, 2019;汪

莹等, 2019; Zhou *et al.*, 2019),既有确定性指标,又有非确定性指标,影响因素多,评价难度大.除此以外,城市地下空间是三维立体的,对城市地下空间进行评价,离不开三维建模技术的支持(Jørgensen *et al.*, 2015; 李兆亮等, 2016; 张夏林等, 2020).近年来,国内外学者在该领域做了大量的研究工作(Anagnostopoulos and Mamanis, 2011; Youssef *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2014; 余翔宇和徐义贤, 2015; Guo *et al.*, 2019),但研究成果比较分散,缺乏系统总结,总体上依然存在概念模糊等问题,导致评价理论的适用性和评价结果的可比性较差.

本文通过系统梳理国内外城市地质模型的可视化、地下空间适宜性评价指标、权重体系、评价模型、评价模式及评价系统等方面的研究现状,围绕城市地下空间适宜性评价指标的量化、城市地下空间适宜性评价可视化结果的可靠度以及城市地下空间适宜性立体化评价系统的普适性等科学问题,重点论述城市地下空间适宜性评价方面研究的主要内容与发展方向.希望本文有助于我国城市地下空间适宜性评价工作,为未来城市的地下空间开发与利用提供指导.

1 城市地下空间适宜性评价研究现状

地质调查及城市地下空间的适宜性评价是地下空间规划设计的前提.随着城市地下空间的不断发展,地下空间适宜性评价方法的研究也日益完善,诸多城市已将这些研究成果成功应用于地下空间的规划与建设.要对某一特定区域的城市地下空间进行适宜性评价,首先应该利用地质资料对该区域的地质情况以及地下空间现状进行可视化;其次,选择合适的评价指标,并进行合理的赋权;最后,通过适当的评价模型,在一定的评估模式下,形成一套完整的评价系统,得出该区域适宜性评价等级.

1.1 城市地质模型的可视化

地质模型可视化是指采用适当的数据结构建立地质特征的数学模型,利用计算机技术将数学描述以2D、3D图像的形式予以实现.基于可视化的结果实现二维、三维空间中的地质构造解释,描述研究区域的地质构造情况以及进行地下空间适宜性评价.

国内外学者首先从二维角度对城市地下空间

适宜性进行评价,利用二维 GIS 的空间分析等功能开展了大量的城市地下空间适宜性平面评价。江思义等(2019)以南宁市西津幅的环境地质调查结果为例,通过 MapGIS 空间分析功能,得到南宁市规划区地下空间开发利用的适宜性分区图;彭建等(2010)基于 ArcGIS 软件的空间分析功能,完成了某地级市地下空间开发利用适宜性的 2D 可视化表达。但是地下空间在本质上是三维的,需要借助三维地质建模和可视化,才能更加直观地分析并解决地下空间适宜性评价问题。

针对三维地质建模方法,国内外众多学者进行了大量的研究,并取得较多研究成果。刘修国等(2006)将地质面之间的几何、拓扑关系纳入到线性框架模型之中,在准确表达复杂地质体各要素空间几何形态与相互关系的基础上,实现地层交错情况下断层面、地层面模型及复杂地质体三维模型的准确构建,以达到三维可视化的目的。Li *et al.*(2014)先进行了空间数据、剖面的解译等预处理并且对这些数据进行空间整合,然后利用非均匀有理 B 样条构建地质界面,最后形成三维地质模型,并进行三维可视化操作。余翔宇和徐义贤(2015)利用岩石样品物性测量实验数据提取出物性参数及其对应地质属性的映射关系,然后进行三维建模,实现三维可视化。

在此基础上,学者们相继开展了城市地下空间适宜性三维评价工作。吴立新等(2007)基于 GeoMo3D 系统对北京 CBD 的城市地下空间适宜性进行 3D 评估分析与 3D 可视化表达。叶菁等(2016)采用 Voxel 模型对佛山市东平新城区域进行三维剖分,建立了断裂面的三维缓冲区,实现了城市地下空间适宜性的 3D 评估分析。

从 2D 平面到 3D 立体可视化技术的发展,在一定程度上为城市地下空间适宜性评价提供了支持。但是,现有建模方法的适应能力有限,在解决复杂区域性模型构建等方面仍面临着难题,如:三维模型构建中对断层的厚度不能完全呈现等。除此之外,现有研究对城市地下空间三维地质透明化的程度如何界定以及适宜性评价结果透明表达等问题的研究还不够,有待深入地开展上述问题研究。

1.2 城市地下空间适宜性评价指标

国内外学者相继采用层次分析法等统计决策方法分析了城市地下空间适宜性的主要影响因素。Sterling and Nelson(1982)在对 Minneapolis-St. Paul

做地下空间规划时,根据研究区域的地质条件,综合考虑岩体条件、水文地质、地形坡度等因素的影响,通过综合叠加法建立了 Minneapolis 地下空间开发适宜性的指标体系。Zhao and Lee(1996)从地质、水文、环境、社会等多方面建立新加坡地下建筑适宜性评价的指标体系。王法等(2012)综合考虑地质灾害、地质构造、周围环境等影响因素,构建了北京市中心城区基坑工程地质条件适宜性评估指标体系。蒋旭等(2018)分析了地质条件、地质灾害和地质构造等影响因素,构建了天津市中心城区地下空间开发利用地质条件适宜性评价指标体系。Zhou *et al.*(2019)以中国南通市为例,从开发难度以及潜在价值等方面考虑,运用层次分析法,确定了城市地下空间适宜性评价的指标体系。

影响地下空间适宜性评价的因素错综复杂,其中最主要的因素为地形地貌、岩土体特征等。迄今为止,其评价指标的选取在工程界和学术界都尚未达成统一的标准,现行的做法通常是经验选取法,依据不同的研究对象制定不同的评价标准。但是,不同的地下结构类型、开挖方式等对城市地下空间的适宜性影响不同。同一区域,由于地下结构类型、开挖方式不同,所选择的评价指标不同,该区域的适宜性评价等级必然存在差异。

1.2.1 不同的地下结构类型 地下结构类型种类繁多,比如:基坑、隧道、地下街等。不同的地下结构类型所占据的地下空间不同,对地下空间开发利用的适宜性影响不同。以两种主要的地下结构类型:隧道与基坑为例,对其进行适宜性评价,关键指标的选取直接影响评价结果的合理性。

对于基坑(图 1)来说,地下水为导致基坑不稳定的最主要的影响因素之一。地下水进入基坑,容易造成流砂、边坡失稳、地基承载力下降等不良地质现象,易产生安全事故。

对于隧道(图 2)来说,当隧道跨越断裂带时,断裂的差异运动会使隧道产生竖向张拉,超过其强度时便会破坏,当断裂破碎带发生水平方向的蠕动时还可能对隧道产生剪切破坏。

不仅如此,同一指标对于这两种不同地下结构类型的影响也是不一样的,需要在对这两种不同地下结构类型进行适宜性评价中,考虑不同的工程指标。

例如:软土具有明显的流变特征。对于基坑工程,开挖时易产生侧向变形和剪切破坏,导致支护

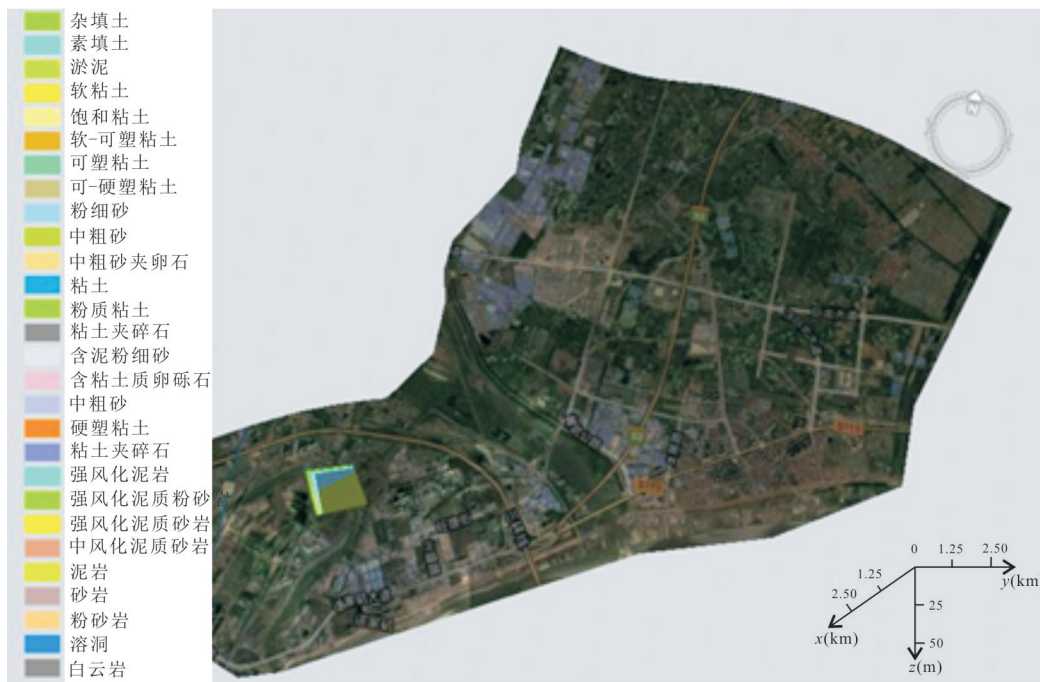


图 1 基坑开挖

Fig.1 Foundation pit excavation

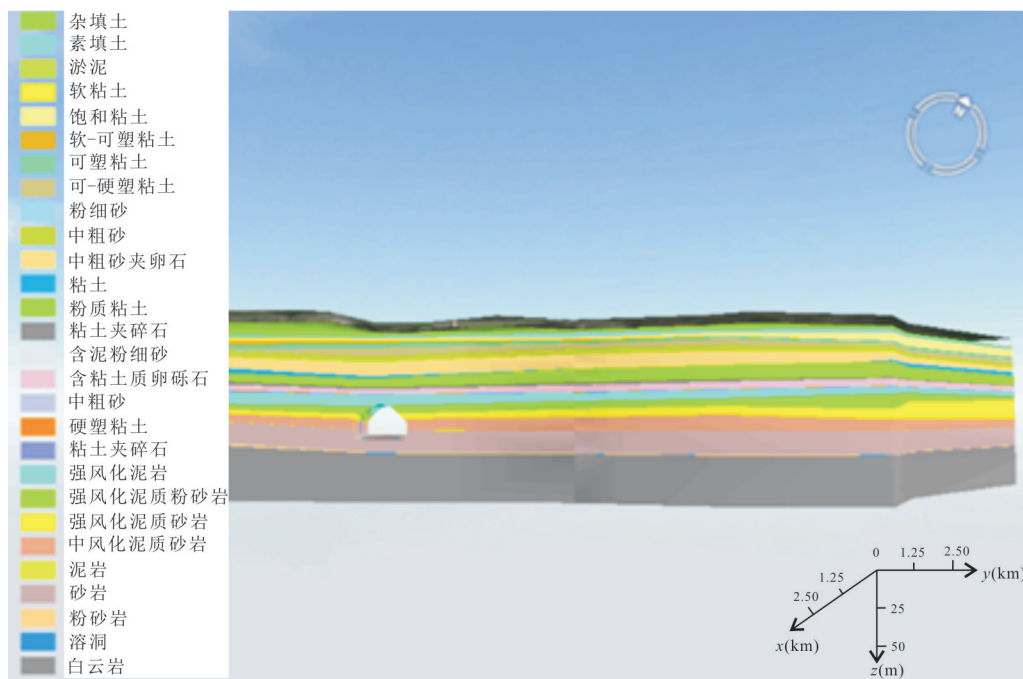


图 2 隧道开挖

Fig.2 Tunnel excavation

结构变形或边坡失稳,在进行适宜性评价中,应考虑锚杆属性、布置方式等作为评价的工程指标;对于隧道工程,软土流变及次固结变形会导致隧道纵向和横向长期缓慢变形,且变形收敛时间长,在进行适宜性评价中,应考虑管片拼接质量、注浆加固、

管片壁厚等作为评价的工程指标.

1.2.2 不同的开挖方式 作为城市地下空间主要的地下结构类型,隧道的开挖方式主要有明挖法、钻爆法和盾构法等.对于明挖法来说,明挖施工对地下空间适宜性影响涉及到的指标除了水文地质

条件、岩土体特征等主要影响因素外,还要考虑边坡支护、坡率、隧道埋深等因素.对于盾构法来说,盾构施工对地下空间适宜性影响涉及到的指标除了地形地貌、地质构造等主要因素外,还要考虑切削刀具、切口环压力、泥浆输送速度等因素.对于钻爆法来说,除了岩土体特征、不良地质作用等主要因素外,还需要考虑钻眼爆破参数、炸药种类等因素.

其次,同一地质指标对于不同的开挖方式所产生的影响也是不同的.需要依据不同的研究对象合理选择一些辅助指标.例如:相同的地层组合对不同开挖方式的影响.对于明挖法来说,开挖过程中,当地层软硬不均现象明显时,软弱地层存在较大的蠕变性,容易引起边坡变形开裂以及下滑,在进行适宜性评价中,应考虑将边坡的稳定性等作为辅助指标;对于盾构法来说,当地层上软下硬、软硬不均现象明显时,容易引起盾构施工的实际曲线偏离设计方向,盾构掘进控制难度大,在进行适宜性评价中,应考虑比贯入阻力等作为辅助指标.对于钻爆法来说,当地层软硬不均现象明显时,容易引起爆破的范围增大,影响周边建筑物的稳定性,在进行适宜性评价过程中,可以考虑将周边已有建筑的安全性作为一个辅助指标.

此外,伴随着城市化进程的加快,后期的城市地下空间开发,如城市地铁施工、基坑开挖等,必然会破坏原有的地应力平衡,导致地层变形,进而对已有地下建筑的稳定性造成影响;另一方面,为了保持已有地下建筑的稳定性,后期的地下空间开发必然会受到已有的地铁区间、建筑物桩基、桥墩等已有地下建筑的制约.现有研究对这部分内容缺乏整体考虑,未能凸显已有地下建筑对后期地下空间开发的影响,有待进一步探讨和改善.

最后,由于缺乏相应指标属性量化的研究,评估工作多依赖专家经验,难以控制指标分级与专家打分的不确定性影响.现阶段数值模拟技术飞速发展,对指标的量化工作是否可以通过引入有限元法、有限差分法等数值模拟技术来进行,需要进一步研究.

1.3 城市地下空间适宜性评价指标的赋权

在地下空间适宜性评价的过程中,评价指标权重的赋值是评价结果是否合理的关键.在这方面,国内外学者采用专家问卷调查法、熵权法等方法对城市地下空间适宜性的影响因素进行了赋权研究,取得了大量成果.姜云等(2009)采用熵权法和可变

模糊集组合来确定地下空间适宜性评估指标权重,有效降低了指标赋权的主观性.张玉敏(2012)采用层次分析法对哈尔滨市核心城区的工程地质条件、水文地质条件等因素进行赋权,对该区域的地下空间适宜性进行了评价.吴炳华等(2017)运用层次分析法和专家打分法对影响宁波市地下空间开发适宜性的影响因子进行赋权.刘运来等(2017)采用指数标度对层次分析法传统的 Saaty 标度进行改进,并引进最优传递矩阵对判断矩阵进行优化,对影响武汉市主城区地下空间适宜性的评价因子进行权重的赋值.

但现阶段的城市地下空间适宜性评价的指标定权方法偏单一,大多采用层次分析法、熵值法,较少涉及到其他主、客观赋权方法,如:主观赋权方法中的关联矩阵法(古林法)(王磊等,2010)、环比评分法(孙建梅和杨迪,2019)等,以及客观赋权方法中的主成分分析法(颜惠琴等,2017)、变异系数法(张运书等,2019)、CRITIC 法(朱迪等,2019)、粗糙集理论(陈舞等,2019)等.组合赋权法将主观权重与客观权重进行组合,是一种科学合理的方法,使评价结果更加合理.相关学科利用遗传算法(Anagnostopoulos and Mamanis, 2011)等进行组合赋权,值得借鉴.

此外,在进行地下空间适宜性评价指标赋权过程中,除了考虑赋权方法,还应考虑不同区域、不同对象评价指标的赋权情况.对于不同的研究对象,同一指标有可能赋权不同.如:软土对于基坑工程来说,开挖时易产生侧向变形和剪切破坏,导致支护结构变形,属于不利因素,赋权要小;但对于盾构开挖地下空间,软土反而有利于盾构掘进,属于有利因素,赋权要大.

因此,在地下空间适宜性评价指标赋权过程中,应结合具体研究对象以及研究区域对评价指标具体分析.

1.4 城市地下空间适宜性评价模型

近年来,国内外学者将神经网络法、模糊综合评判法、可拓法等数学模型应用于城市地下空间适宜性评估,提升了模型筛分和选取的合理性. Durmisevic and Sariyildiz (2001)通过分析地下车站,采用神经网络法处理数据,最终建立综合多个影响因素的评价模型.曹文贵和张永杰(2006)根据鲁布革水电站工程地下厂房的实际情况建立评价指标体系,将模糊数学理论引入到评价中,建

立了模糊综合评价模型.Youssef *et al.* (2011)结合 GIS 技术、遥感技术和层次分析法,综合多种因素建立了基于工程地质条件的适宜性评价模型,识别潜在的工程地质灾害对工程建筑的影响.Wang *et al.* (2013)以南京市鼓楼区为例,采用结构方程模型(SEM)方法对城市地下空间的适宜性进行了评价.王寓霖和阳富强(2019)采用熵权法和可拓物元理论建立了地下空间火灾风险的熵权可拓评价模型.

但是,模糊综合评判法在评价过程中对于因素权重的确定过于依赖专家经验;可拓模型在评价过程中无法体现评价对象的模糊性,且易忽略评价过程中的关键约束条件;神经网络算法计算复杂,获取的样本代表性不强,拟合速度难以控制;结构方程模型在评价过程中无法体现评价对象的模糊性,且在评价过程中需要大量的样本数据.这些评估模型虽然可以考虑地下空间适宜性评价问题的某一类单一形式的不确定性,但很少考虑一定区间内的多种信息类型交叉交融的不确定性,不能连续化表达城市地下空间适宜性评估的量化结果.近期发展的有限区间云模型(Guo *et al.*, 2019)、模糊集理论(申建红等,2019)等能较好地解决评价指标的随机性和模糊性问题,有一定借鉴意义.

1.5 城市地下空间适宜性的评价模式

在城市地下空间适宜性评价过程中,选择合适的评价模式是评价过程中重要的一环.目前,在我国城市大规模开发地下空间的进程中,以北京、上海为代表城市的浅层地下空间日渐趋于饱和,深层地下空间的开发利用已成为未来城市建设的趋势,城市地下空间适宜性评价显得越来越重要.而适宜性评价离不开合理的评价模式.

黄静莉和王清(2015)探讨了长春市在地表以下 0~3 m、3~15 m、15~30 m 深度区域内岩土体的分布特性,从而对研究区域内城市地下空间进行分层适宜性评价.Lu *et al.* (2016)从地表以下 0~15 m、15~30 m、30~50 m、大于 50 m 深度范围内对武汉市武昌火车站进行分层适宜性评价.洪文二等(2019)对新安庆西高铁站规划区地面以下 0~10 m、10~15 m、15~30 m 地下空间开挖难度进行评价,以期达到适宜性评价的目的.地下空间在垂直层面上的分层化趋势越来越明显.张弛(2007)和陈珺(2015)通过搜集相关地下空间规划文件资料,统计出国内外地下空间开发较为成熟的城市地下

表 1 主要城市地下空间分层埋深				
Table 1	Underground space layered depth of main cities			
城市	浅层埋深 (m)	中层埋深 (m)	次深层埋深 (m)	深层埋深 (m)
北京	0~10	10~30	30~50	50~100
上海	0~15	15~40		>40
广州	0~15	15~30		
天津	0~10	10~30	30~50	>50
东京	0~15	15~30	30~100	>100
成都	0~15	15~30	30~50	50~100
南京	0~15	15~40		>40

分层体系,如表 1 所示.从划分深度看,多数城市将地下 15 m 作为浅层界限,也有部分城市以地下 10 m 为浅层界限,绝大部分城市将地下 30 m 定义为中层界限,少部分城市有以地下 40 m 为中层界限.就次深层而言,国内基本上以地下 50 m 为界限.深层地下空间的开发目前大都处于规划阶段,尚未进行有效的开发,部分城市以地下 100 m 作为深层界限.

随着城市地下空间开挖的深入,土地平面上的功能布局已经被突破,产生垂直方向上的要素配置,同一区域的地上、地下空间可具有住宅、商业、交通等多种功能,各类要素在纵向上呈现异质性并相互影响.因此,城市地下空间竖向分层开发需要有合理的模式,使不同深度的城市地下空间开发能够依照一定的原则在相应的空间层次发展相关功能设施,避免地下空间开发在空间占用上的矛盾,保证合理、和谐地开发利用地下空间(Li *et al.*, 2016).然而,不同深度地下空间的利用体现的是多功能、多要素的空间聚集,强调的是多功能、多要素如何协同开发而发挥出最大的综合效益,需要评价技术支撑描述功能及要素间的关系.但是现有的评价模式主要是面对地下空间开发进行分层平面评价,未能全面考虑地下不同空间、不同功能类型的立体化利用行为,缺乏对城市地下空间适宜性的立体评价.

1.6 城市地下空间适宜性的评价系统

在城市地下空间适宜性评价实践中,部分学者系统地对适宜性评价做了一定的工作.胡学祥等(2016)利用 ArcGIS 和 C#程序,开发了基于 Fuzzy-AHP 的宁波市地下空间开发适宜性评价系统,能够较为合理地评价地下空间开发的适宜性.但是,该评价系统只是基于二维平面开发的,缺乏对地下空间适宜性的三维立体评价.现阶段的城市地下空间适宜性评价系统没有形成一套成熟的系统,没有完

全实现自动化成图以及适宜性分区.可以考虑以 ACCESS 为数据库支撑,利用 VC++ 和 OpenGL 从底层开发城市云地质平台,将各类地质数据置于云端统一进行分类、存储、挖掘和分析,将多种评价方法以程序形式导入平台中,在云端实现城市地下空间开发适宜性的云评价模式,实现用户共享.

2 城市地下空间适宜性评价的关键科学问题

综上所述,城市地下空间适宜性评价基本集中在地质模型的可视化、指标选择、权重体系、评价模型、评价模式及评价系统等方面,缺乏对城市地下空间适宜性评价指标的量化、城市地下空间适宜性评价可视化结果的可靠度以及城市地下空间适宜性立体化评价系统的普适性等科学问题的深入探讨,对应的影响规律有待进一步研究.

2.1 适宜性评价指标的量化

指标量化工作对于提高地下空间适宜性评价的准确性起到至关重要的作用.迄今为止,由于缺乏相应指标属性量化的研究,评估工作多依赖专家经验,难以控制指标分级与专家打分的不确定性影响.以隧道为例,隧道施工的主要风险为隧道失稳、涌突水、临近建筑物变形等,诱发这些风险的主要因素包括软土厚度、岩土体特征、地下水、活动断层

以及已有地下建筑的影响范围等.为了定量分析各因素对隧道开发的影响,可以采用有限元法等数值模拟方法对隧道开发引起的地层变形进行研究.

隧道开挖有多种不同的方式,这里以盾构法施工为例.首先,整理地勘资料以及支护材料参数,通过有限元等数值模拟软件建立模型;通过有限元等数值模拟方法模拟出各因素对盾构法隧道施工的影响范围,进而进行指标的量化工作.这里以已有地下建筑的影响范围这一评价因子为例,通过研究区域内的岩土层参数、隧道支护结构参数,利用有限元法数值模拟分析区域内地下空间开发过程对岩土体的影响程度,依据已有地下建筑的稳定性划分影响区域,并结合监测数据验证数值模拟的准确性,从而定量分析已有地下建筑造成的影响(图 3),实现已有地下建筑对城市地下空间适宜性评价的量化工作.其他指标如岩土体特征、水文地质条件、不良地质作用以及地质构造等,同样也可以通过数值模拟方法来进行量化.

2.2 适宜性评价可视化结果的可靠度

三维地质结构模型建立的准确性,直接影响城市地下空间适宜性评价可视化结果的可靠性.城市地下空间的三维地质模型不仅要表现出地质对象本身的构造几何形态,还要体现出地质对象之间的相互接触关系.现有的空间数据模型主要分为 3 类(朱良峰等,2004):(1)基于体元的体模型,如三维

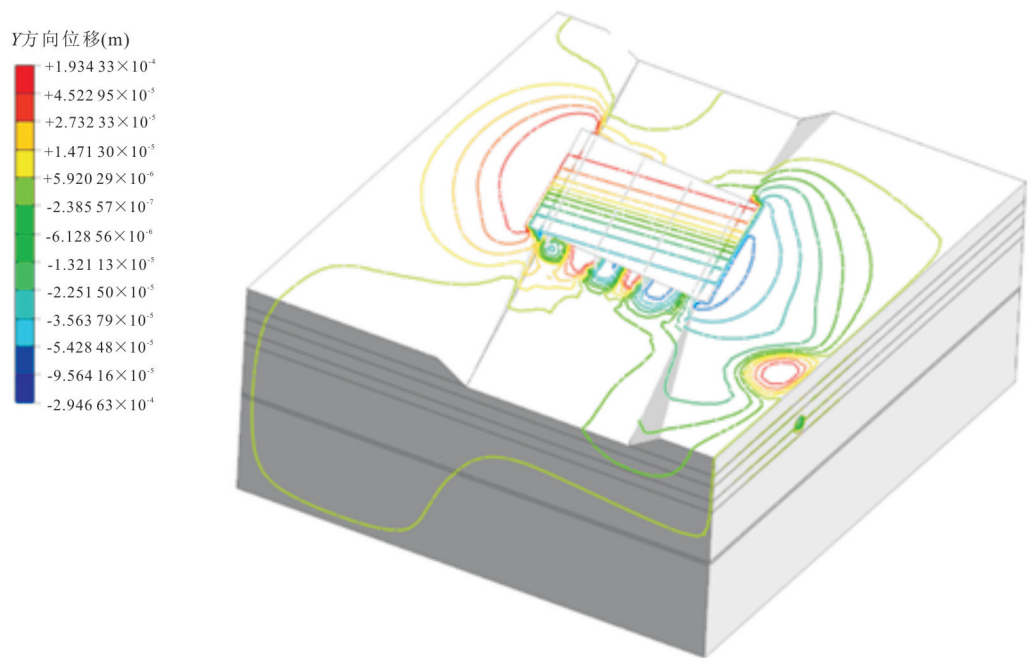


图 3 已有桥梁桩基对隧道开挖的影响范围

Fig.3 Influence scope of existing bridge pile foundation on tunnel excavation

栅格结构、不规则四面体结构(TEM)等;(2)基于矢量的面模型,如面片结构(TIN)、非均匀有理B样条函数等;(3)混合模型,如Octree + TEN等.这些现有的空间数据模型主要侧重于表达地质对象的几何特征,难以表达地质对象本身蕴含的地质含义和地质关系.因此,三维地质模型的空间数据模型必须包含地质概念模型、几何模型和拓扑模型.

现阶段,三维地质建模中所用的地质信息主要是空间数据.在实际勘察工作中得到的原始数据大多是离散的,散乱地分布在研究区域内.为了能够全面准确地展现地质体的空间展布特征,在三维地质建模过程中对空间数据进行插值是必不可少的,所选择的插值方法精确度是否达到了要求,直接影响三维地质模型表达的可靠性和准确性.因此,验证建好的三维地质模型与实际地质情况是否符合,对于提高城市地下空间适宜性评价可视化结果可靠度至关重要,目前这方面研究较少.可考虑按照如下思路进行研究:首先,将研究区域的地质资料进行整理,选取部分钻孔资料作为训练样本,选择适当的数据模型以及插值方法进行三维地质建模.其次,在建好的三维地质模型的基础上,通过插入虚拟钻孔(图4),获得训练样本中虚拟钻孔的地层信息.最后,将同一位置虚拟钻孔地层信息与真实钻孔地层信息进行对比分析,匹配精度越高,三维地质模型越准确.三维地质模型的精度越高,后期的地下空间适宜性评价可视化结果越可靠.

2.3 适宜性立体化评价系统的普适性

随着城市地下空间开发的深入,以往城市地下空间适宜性分层评价是以平面单元来进行的,

难以界定评价单元的利用类型及边界,未能全面考虑地下不同空间、不同功能类型的立体化利用行为.因此,城市地下空间的立体化评价系统的建立显得至关重要.

城市地下空间适宜性的立体评价是建好三维地质模型的后续,它的结果是从宏观上去体现某一特定区域适不适合进行开发利用.其具体思路如下:首先,地质条件因素的提取是从三维空间中进行,不再像以往按照诸如0~15 m、15~30 m、30~50 m等固定分层区间进行评价,而是按照任意深度进行信息提取,如在纵向上对0~50 m空间划分为若干个单元,通过控制评价间隔区间来提高评价的精度.其次,考虑研究区域内某一个区块需要进行的不同地下结构类型以及开挖方式、已有地下建筑的影响范围等工程因素,通过定量分析将工程信息赋予最小单元;再者,利用三维建模软件的空间分析功能,将地质信息与工程信息结合起来,以达到协同开发评价的目的.最后,构建适用于空间体功能的城市地下空间立体化利用评价空间模型,引进BIM、系统仿真等技术,实现城市地下空间适宜性的立体化评价.

3 城市地下空间适宜性评价的未来趋势

基于城市地质模型的可视化、地下空间适宜性评价指标选择、权重体系、评价模型、评价模式及评价系统等方面的研究成果,具体从评价指标筛选与量化、指标赋权、适宜性评价模型、三维地质建模、立体化评价系统对城市地下空间适宜性评估的未来趋势进行详细叙述.

3.1 评价指标筛选与量化

影响地下空间适宜性评价的因素错综复杂,国内外针对城市地下空间适宜性指标体系的研究中,最主要的因素为地形地貌、岩土体特征等.由于评价指标选择的合理性与否直接关系到最终结果的可靠性,在建立评价指标等级标准体系时应具有系统性、代表性、存异性、易获取、易量化这5项原则(Poisel *et al.*, 2009).因此,城市地下空间评估指标的筛选应遵循以下原则:需要顾及不同城市地质环境条件的共性与特殊性,综合考虑指标易量化、易获取、区位差异等特性.

其次,不同开挖方式以及不同结构类型地下空间对适宜性评价的影响,应该具体问题具体对待.

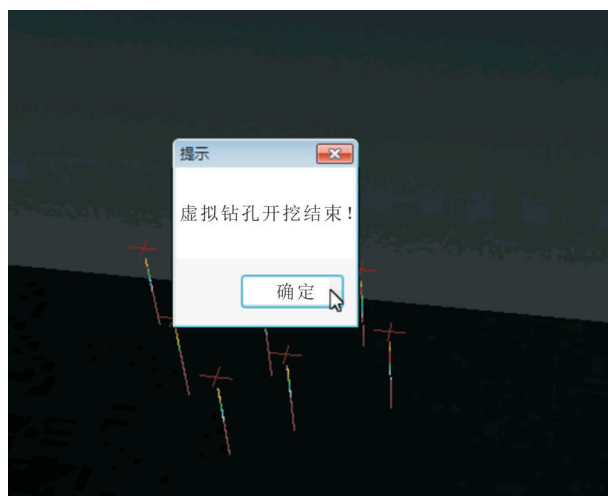


图4 虚拟钻孔

Fig.4 Virtual drilling

要考虑到城市地下空间开发与已有地下建筑的相互影响.对于不同的研究对象,所选择的指标也是不同的.要充分认识到研究对象的个性差异,这对于评价结果的合理性至关重要.

最后,针对目前缺乏相应指标属性量化的研究,在结合数值模拟技术以及现场监测数据的基础上,划分影响因子的影响等级,从而实现指标的量化,提高指标分级的合理性.

3.2 指标的赋权

在城市地下空间适宜性评价过程中,评价指标权重的赋值是关键的一步.要充分认识到同一指标,在不同的研究对象的赋权过程中,赋权比重也是千差万别的.已有研究中评估指标的赋权定权方法偏单一,大多采用层次分析法、熵值法,导致权重分配不科学,从而影响了评估结果的合理性.因此,需要在传统赋权方法的基础上,综合运用相关系数法、CRITIC法、粗糙集理论等主客观赋权方法,也可以通过遗传算法、蚁群算法等进行主客观组合赋权,以确保不同目标条件下评估指标的赋权合理性.

3.3 适宜性评价模型

在城市地下空间适宜性评价过程中,现阶段一般采用模糊综合评判法、可拓模型、神经网络法等评估模型,这些评估模型不能将评估指标间的定性定量关系有机统一起来.因此,在传统适宜性评价模型的基础上,融合传统模糊集理论、概率论等数学理论,引入有限区间云模型、模糊集等能同时考虑一定区间内信息的模糊性和随机性的评价模型,并结合深度学习等人工智能技术,使得评价方法从定性分析向半定量、定量分析方向发展.

3.4 三维地质建模

现阶段,三维地质模型数据的离散性、不均匀性和地质构造几何形态的复杂性,是城市地下空间三维建模必须面对的问题.首先,可以在对尺度空间数据融合的算法基础上,采用坐标变化方法实现多尺度地质信息的同一表示,然后采用三角网地层面模拟技术,考虑在工程重点区域进行细分建模,实现复杂地质体的快速建模.最后,可以考虑在实现地上、地下三维建模的基础上,通过研究地上、地下空间一体化模型的逻辑结构与数据结构及其表达方式,建立城市空间数据模型和属性模型,设计拓展地表求交算法,实现地上地下模型的一体化集成.

3.5 立体化评价系统

城市地下空间三维集成建模与动态可视化,以及评估过程与结果的透明表达,是城市地上地下整体规划、地下空间设计建造的重要手段.现阶段的城市地下空间适宜性评价系统不够成熟,不具有共享性.因此,需要考虑从底层开发城市云地质平台以及基于有限元法等数值分析功能模块,将各类地质数据置于云端进行操作,将评价方法程序导入平台中,运用分割技术、重构技术、网格自动生成技术等实现模型的一体化,避免竖向分层评价的局限性,结合有限元数值分析功能,在云端实现城市地下空间开发适宜性的云评价模式,实现用户共享,最终实现城市地下空间适宜性评估全流程、全过程的3D可视化.

4 结语

国内外学者分别从不同角度开展了大量的城市地下空间适宜性评估的研究与实践,取得了丰富的成果.但是,城市地下空间适宜性评价的理论体系未完全统一,城市地下空间适宜性评价的指标量化、可视化结果的可靠度以及立体化评价系统的普适性缺乏深入研究.

对城市地下空间开发利用的适宜性进行评价:首先,建立一个准确的三维地质模型至关重要,需要切实改进评估单元划分技术和插值方法;其次,指标量化不容忽视,量化指标可以减少人为主观划分指标等级的误差,提高适宜性评价结果的合理性,需要考虑如何通过数值模拟以及现场监测得到较为准确的指标量化结果;最后,立体评价方法的改进,不再仅仅局限于定性评价方法,考虑引入数值分析、人工智能等定量方法,从而使得评价方法由定性一半定性、半定量一定量分析的转变,提高适宜性评价结果的准确性,并将所有的评价流程集中到云平台中进行,实现城市地下空间适宜性评估全流程、全过程的3D可视化,为地下空间的开发提供一定的指导.

References

- Admiraal, H., Cornaro, A., 2016. Why Underground Space should be Included in Urban Planning Policy- and How This will Enhance an Urban Underground Future. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55: 214–220.

- Anagnostopoulos, K. P., Mamanis, G., 2011. The Mean-Variance Cardinality Constrained Portfolio Optimization Problem: An Experimental Evaluation of Five Multiobjective Evolutionary Algorithms. *Expert Systems with Applications*, 38(11): 14208—14217.
- Cao, W.G., Zhang, Y.J., 2006. Study on Two-Stage Fuzzy Synthetic Judgment Method with Changing Weight Value for Rock Quality Classification in Underground Structures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(8): 1612—1618 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., 2015. Research on the Master Planning for Underground Space in Beijing (Dissertation). Tsinghua University, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Chen, W., Zhang, G.H., Wang, H., et al., 2019. Risk Assessment of Mountain Tunnel Collapse Based on Rough Set and Conditional Information Entropy. *Rock and Soil Mechanics*, 40(9): 3549—3558 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z.L., Chen, J.Y., Liu, H., et al., 2018. Present Status and Development Trends of Underground Space in Chinese Cities: Evaluation and Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71: 253—270.
- Cheng, G.H., Su, J.W., Li, C., et al., 2019. Strategic Thinking of Urban Underground Space Exploration and Safe Utilization. *Resources Survey & Environment*, 40(3): 226—233 (in Chinese with English abstract).
- Dong, M., Neukum, C., Hu, H., et al., 2015. Real 3D Geotechnical Modeling in Engineering Geology: A Case Study from the Inner City of Aachen, Germany. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2): 281—300. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0640-6>
- Durmisevic, S., Sariyildiz, S., 2001. A Systematic Quality Assessment of Underground Spaces—Public Transport Stations. *Cities*, 18(1): 13—23.
- Guo, J., Wang, J.C., Liu, S.H., 2019. Application of an Improved Cloud Model and Distance Discrimination to Evaluate Slope Stability. *Mathematical Problems in Engineering*, (4): 1—17.
- He, S.Y., Lei, K., Wu, P., et al., 2019. Evaluation on Resources Function of Groundwater during Urbanization in Karst Region of Guizhou Province. *Earth Science*, 44(9): 2839—2850 (in Chinese with English abstract).
- Hong, W.E., Yan, H., Su, X.Q., 2019. Engineering Geological Evaluation and Space Development Suggestions for the Gaotie (High-Speed Rail) New District in Western Anqing City. *Geology of Anhui*, 29(2): 122—127 (in Chinese with English abstract).
- Hou, W.S., Yang, L., Deng, D.C., et al., 2016. Assessing Quality of Urban Underground Spaces by Coupling 3D Geological Models: The Case Study of Foshan City, South China. *Computers and Geosciences*, 89: 1—11.
- Hu, X.X., Liu, G.B., Tao, H.B., 2016. Research on Evaluation Suitability for the Development of Underground Space in Ningbo City Based on ArcGIS. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 12(6): 1439—1444 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J.L., Wang, Q., 2015. Importance Evaluation of Rock and Soil Mass Attribute in Underground Space Based on the Theory of Rough Set. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 11(3): 547—550, 556 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X., Schweiger, H. F., Huang, H. W., 2013. Influence of Deep Excavations on Nearby Existing Tunnels. *International Journal of Geomechanics*, 13(2): 170—180.
- Jiang, S.Y., Wang, Q.Y., Li, C.L., et al., 2019. Evaluation Suitability for the Underground Space Using Expert-Analytic Hierarchy Process. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 15(5): 1290—1299 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X., Wang, T.T., Mu, J., 2018. Research on the Application of Suitability and Resources in Underground Space Development. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 14(5): 1145—1153 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y., Wu, L.X., Che, D.F., 2009. Integrated Entropy Weight and Variable Fuzzy Sets Evaluation Approach for Underground Space Resource Quality Problem. *Journal of China University of Mining & Technology*, 38(6): 872—877 (in Chinese with English abstract).
- Jørgensen, F., Høyer, A. S., Sandersen, P. B. E., et al., 2015. Combining 3D Geological Modelling Techniques to Address Variations in Geology, Data Type and Density—An Example from Southern Denmark. *Computers and Geosciences*, 81: 53—63.
- Li, M. C., Han, Y. Q., Miao, Z. J., et al., 2014. Alternative 3D Modeling Approaches Based on Complex Multi-Source Geological Data Interpretation. *Transactions of Tianjin University*, 20(1): 7—14. <https://doi.org/10.1007/s12209-014-2171-4>
- Li, X.Z., Li, C., Parriaux, A., et al., 2016. Multiple Resources and Their Sustainable Development in Urban Underground Space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 59—66.
- Li, Z.L., Pan, M., Han, D.K., et al., 2016. Three-

- Dimensional Structural Modeling Technique. *Earth Science*, 41(12): 2136–2146 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.G., Chen, G.L., Hou, W.S., et al., 2006. 3D Complex Geological Entity Modeling Method Based on Line-Frame Model. *Earth Science*, 31(5): 668–672 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.L., Wu, J.P., Peng, P.Y., et al., 2017. Suitability Evaluation for the Utilization of Underground Space in Consideration of Geo-environmental Factors. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34(5): 58–62, 67 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Z.L., Wu, L., Zhuang, X.Y., et al., 2016. Quantitative Assessment of Engineering Geological Suitability for Multilayer Urban Underground Space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59: 65–76.
- Peng, J., Liu, K., Zheng, F.T., et al., 2010. Evaluation for the Suitability of Underground Space Exploitation and Utilization Base on AHP. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 6(4): 688–694 (in Chinese with English abstract).
- Poisel, R., Angerer, H., Pollinger, M., et al., 2009. Mechanics and Velocity of the Larchberg-Galgenwald Landslide (Austria). *Engineering Geology*, 109: 57–66.
- Shen, J.H., Gai, L.T., Wan, S.N., et al., 2019. Risk Assessment of Deep Excavation Construction Based on Fuzzy Set and Improved Evidence Theory. *Journal of Civil Engineering and Management*, 36(2): 28–34, 41 (in Chinese with English abstract).
- Sterling, R.L., Nelson, S., 1982. Planning the Development of Underground Space. *Underground Space*, 7: 86–103.
- Sun, J.M., Yang, D., 2019. Improvement and Application of Micro-Grid Comprehensive Evaluation Method. *Science Technology and Engineering*, 19(27): 186–191 (in Chinese with English abstract).
- Thierry, P., Prunier-Leparmentier, A., Lembezat, C., et al., 2009. 3D Geological Modeling at Urban Scale and Mapping of Ground Movement Susceptibility from Gypsum Dissolution: The Paris Example (France). *Engineering Geology*, 105: 51–64.
- Wang, F., Zhang, Y.Q., Wang, J.H., et al., 2012. Suitability Evaluation Method for Engineering Geology of Excavation Engineering in Beijing. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34: 739–743 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Li, P., Lü, C.X., 2010. Application of Vertex Incidence Matrix Algorithm to Independent Baselines Search and Independent Double-Difference Ambiguity Selection. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 35(6): 715–718 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Zhen, F., Huang, X.J., et al., 2013. Factors Influencing the Development Potential of Urban Underground Space: Structural Equation Model Approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38: 235–243.
- Wang, Y., Luo, Z.H., Wu, Y., et al., 2019. Urbanization Factors of Groundwater Vulnerability Assessment in Karst Area: A Case Study of Shuicheng Basin. *Earth Science*, 44(9): 2909–2919 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.L., Yang, F.Q., 2019. Evaluation of Fire Safety of Underground Space Based on Entropy Weighted Matter-Element Extension Model. *Safety & Security*, 40(1): 54–57, 61 (in Chinese with English abstract).
- Wu, B.H., Zhang, S.J., Xu, P.L., et al., 2017. Geological Environment Suitability Assessment of Underground Space Development in Ningbo City. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 13(z1): 16–21 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L.X., Jiang, Y., Che, D.F., et al., 2007. Fuzzy Synthesis Evaluation and 3D Visualization for Resource Quality of Urban Underground Space. *Journal of China University of Mining & Technology*, 36(1): 97–102 (in Chinese with English abstract).
- Yan, H.Q., Niu, W.H., Han, H.L., 2017. Objective Weight Method Based on Principal Component Analysis to Establish Index Weight. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 31(6): 519–523 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J., Hou, W.S., Deng, D.C., et al., 2016. 3D Quality Assessment for Urban Underground Space Resources Based on Variable Fuzzy Set. *Resources Science*, 38(11): 2147–2156 (in Chinese with English abstract).
- Youssef, A. M., Pradhan, B., Tarabees, E., 2011. Integrated Evaluation of Urban Development Suitability Based on Remote Sensing and GIS Techniques: Contribution from the Analytic Hierarchy Process. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(3–4): 463–473. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0118-1>
- Yu, X.Y., Xu, Y.X., 2015. A 3D Geological Modeling Based on Geophysical Data. *Earth Science*, 40(3): 419–424 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Lee, K.W., 1996. Construction and Utilization of Rock Caverns in Singapore Part C: Planning and Loca-

- tion Selection. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(1): 81—84.
- Zhang, C., 2007. Research of Urban Underground Space Development and Plan in Chengdu (Dissertation). Southwest Jiaotong University, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.L., Wu, C.L., Zhou, Q., et al., 2020. Multi-Scale 3D Modeling and Visualization of Super Large Manganese Ore Gathering Area in Guizhou, China. *Earth Science*, 45(2):634—644 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.M., 2012. Study on Three-Dimensional Engineering Geological Structure and Suitability of the Underground Space in Harbin's Key Region (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.S., Zeng, D.F., Liu, Y.Q., 2019. Comprehensive Evaluation of Green Governance Capacity of Yangtze River Economic Belt Based on Variation of Coefficient Method. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 33(4): 56—60 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, G., Wei, S. W., 2008. Numerical Analyses of Influence of Overlying Pit Excavation on Existing Tunnels. *Journal of Central South University of Technology*, 15(2): 69—75. <https://doi.org/10.1007/s11771-008-0438-4>
- Zhou, D.K., Li, X.Z., Wang, Q., et al., 2019. GIS-Based Urban Underground Space Resources Evaluation toward Three-Dimensional Land Planning: A Case Study in Nantong, China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84: 1—10.
- Zhu, D., Mei, Y.D., Wu, Z.H., et al., 2019. Calculation of Overall Hydrologic Alteration in Middle and Lower Reaches of Ganjiang River Based on Grouping Weighting and Improved Nemerow Index. *Engineering Journal of Wuhan University*, 52(12): 1048—1055 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L.F., Wu, X.C., Liu, X.G., 2004. Study of Information System of Urban 3D Geological Data Supported by 3D GIS. *Rock and Soil Mechanics*, 25(6): 882—886 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 曹文贵, 张永杰, 2006. 地下结构岩体质量分类的变权重二级模糊综合评判方法研究. *岩石力学与工程学报*, 25(8): 1612—1618.
- 陈珺, 2015. 北京城市地下空间总体规划编制研究(硕士学位论文). 北京:清华大学.
- 陈舞, 张国华, 王浩, 等, 2019. 基于粗糙集条件信息熵的山岭隧道坍塌风险评价. *岩土力学*, 40(9): 3549—3558.
- 程光华, 苏晶文, 李采, 等, 2019. 城市地下空间探测与安全利用战略构想. *华东地质*, 40(3): 226—233.
- 何守阳, 雷琨, 吴攀, 等, 2019. 贵州岩溶山区城镇化进程中地下水的资源功能评价. *地球科学*, 44(9): 2839—2850.
- 洪文二, 严惠, 苏学权, 2019. 安庆西高铁新区工程地质评价及空间开发建议. *安徽地质*, 29(2): 122—127.
- 胡学祥, 刘干斌, 陶海冰, 2016. 基于ArcGIS宁波市地下空间开发适宜性评价研究. *地下空间与工程学报*, 12(6): 1439—1444.
- 黄静莉, 王清, 2015. 基于粗糙集的地下空间岩土体属性重要性评估. *地下空间与工程学报*, 11(3): 547—550, 556.
- 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. *地下空间与工程学报*, 15(5): 1290—1299.
- 蒋旭, 王婷婷, 穆静, 2018. 地下空间开发利用适宜性与资源量的应用研究. *地下空间与工程学报*, 14(5): 1145—1153.
- 姜云, 吴立新, 车德福, 2009. 地下空间资源质量熵权与可变模糊集组合评估. *中国矿业大学学报*, 38(6): 872—877, 896.
- 李兆亮, 潘懋, 韩大匡, 等, 2016. 三维构造建模技术. *地球科学*, 41(12): 2136—2146.
- 刘修国, 陈国良, 候卫生, 等, 2006. 基于线框架模型的三维复杂地质体建模方法. *地球科学*, 31(5): 668—672.
- 刘运来, 吴江鹏, 彭培宇, 等, 2017. 基于地质环境要素的地下空间利用适宜性评价. *长江科学院院报*, 34(5): 58—62, 67.
- 彭建, 柳昆, 郑付涛, 等, 2010. 基于AHP的地下空间开发利用适宜性评价. *地下空间与工程学报*, 6(4): 688—694.
- 申建红, 盖立庭, 万索妮, 等, 2019. 基于模糊集与改进证据理论的深基坑施工风险评价. *土木工程与管理学报*, 36(2): 28—34, 41.
- 孙建梅, 杨迪, 2019. 微电网综合评价赋权方法的改进与应用. *科学技术与工程*, 19(27): 186—191.
- 王法, 张亚芹, 王军辉, 等, 2012. 北京市中心城基坑工程地质条件适宜性评价方法研究. *岩土工程学报*, 34: 739—743.
- 王磊, 李盼, 吕翠仙, 2010. 关联矩阵法在独立基线及独立双差模糊度选择中的应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 35(6): 715—718.
- 汪莹, 罗朝晖, 吴亚, 等, 2019. 岩溶地下水脆弱性评价的城镇化因子: 以水城盆地为例. *地球科学*, 44(9): 2909—2919.

- 王寓霖, 阳富强, 2019. 基于熵权物元可拓模型的地下空间火灾安全评价. 安全, 40(1): 54—57, 61.
- 吴炳华, 张水军, 徐鹏雷, 等, 2017. 宁波市地下空间开发地质环境适宜性评价. 地下空间与工程学报, 13(z1): 16—21.
- 吴立新, 姜云, 车德福, 等, 2007. 城市地下空间资源质量模糊综合评估与 3D 可视化. 中国矿业大学学报, 36(1): 97—102.
- 颜惠琴, 牛万红, 韩惠丽, 2017. 基于主成分分析构建指标权重的客观赋权法. 济南大学学报(自然科学版), 31(6): 519—523.
- 叶菁, 侯卫生, 邓东成, 等, 2016. 基于可变模糊集的城市地下空间资源三维质量评价. 资源科学, 38(11): 2147—2156.
- 余翔宇, 徐义贤, 2015. 一种基于物性数据的深部三维地质建模方法. 地球科学, 40(3): 419—424.
- 张弛, 2007. 成都市地下空间开发与规划研究(硕士学位论文). 成都: 西南交通大学.
- 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等, 2020. 贵州超大型锰矿集区的多尺度三维地质建模. 地球科学, 45(2): 634—644.
- 张玉敏, 2012. 哈尔滨市核心城区三维工程地质结构及地下空间适宜性研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 张运书, 曾德凤, 刘雅庆, 2019. 基于变异系数法的长江经济带绿色治理能力综合评价. 山西师范大学(自然科学报), 33(4): 56—60.
- 朱迪, 梅亚东, 吴贞晖, 等, 2019. 基于分组赋权和改进内梅罗指数的赣江中下游整体水文改变度计算. 武汉大学学报(工学版), 52(12): 1048—1055.
- 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 2004. 3D GIS 支持下的城市三维地质信息系统研究. 岩土力学, 25(6): 882—886.