

基于城市规划的城市地下空间开发适宜性评价探讨

易荣¹, 阎浩¹, 祁民¹, 张征¹, 董子源¹, 王悦², 江媛³, 曾娇³, 贾开国⁴

(1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300; 2. 国务院国资委研究中心, 北京 100053; 3. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 4. 中冶一局城市安全与地下空间研究院有限公司, 北京 101100)

[摘要] 随着城市化进程的持续推进, 城市地下空间开发利用的重要性日益凸显。但各城市地下空间资源开发存在盲目性, 未能与城市规划要求充分对接, 亟须构建面向城市地下空间开发的适宜性评价体系。本文阐述了城市规划与地下空间开发间的关系, 提出在城市规划指导下进行地下空间开发的重要性。针对不同的城市类型, 需要采取针对性的探测技术, 评价地质、环境、资源和技术经济等方面, 并根据评价结果划分开发适宜性等级。研究认为, 在城市规划指导下, 运用开发适宜性评价体系, 可以实现地下空间的有序可持续利用。

[关键词] 城市规划 地下空间 地质探测 适宜性评价

[中图分类号] TU9; P642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2024)02-0339-09

Yi Rong, Yan Hao, Qi Min, Zhang Zheng, Dong Ziyuan, Wang Yue, Jiang Yuan, Zeng Jiao, Jia Kaiguo. Suitability evaluation of urban underground space development based on urban planning[J]. *Geology and Exploration*, 2024, 60(2): 0339-0347.

0 引言

随着中国城镇化的不断推进, 城市人口密集度增加, 地上空间越来越紧张(程光华等, 2013a)。而城市地下空间资源丰富, 大量的地下空间可供开发利用, 这为缓解地面空间压力、实现立体城市建设提供了可能。然而, 目前许多城市在地下空间的开发上存在盲目性, 缺乏对地下空间资源的整体考量和规划, 未能与城市规划要求充分对接, 导致资源浪费和城市病问题(徐军祥等, 2015; 束昱等, 2015)。例如, 北京作为超大城市, 截止到2020年, 城区人口密度已达132人/km², 且继续保持增长态势(国务院第七次全国人口普查领导小组办公室, 2020)。北京地下可利用层深度基本在50 m以浅(石晓冬, 2006), 可利用的总面积约为9亿km²(陈志龙等, 2013), 但目前的开发使用主要集中在地下停车场、人防、地下交通等领域, 这种地下空间的利用未与城市发展的总体规划衔接, 造成全域空间上的

浪费。另外, 一些城市地下空间的开发导致城市病问题, 如郑州地下商业空间过度开发, 其最大沉降已达每年111.2 mm(孙琳, 2016); 20世纪90年代, 上海市地区城市现代化建设, 导致最大年沉降量达15.6 mm(张容国和杨子凡, 2022); 深圳地铁施工对周边地下管网影响缺乏评估等(刘婉莹, 2022)。因此, 亟须在新版城市规划的指导下, 加强对地下空间开发适宜性的研究, 以科学地开发和利用城市地下空间。

城市地下空间开发适宜性是指在一定的技术条件和经济条件下, 城市地下空间能够满足城市发展需求和功能要求的程度。城市地下空间开发适宜性评价是保障地下空间安全利用和合理开发的重要前提, 也是城市地下空间规划和设计的基础。前人对城市地下空间开发适宜性的研究进展主要体现在: 一是建立了不同的评价指标体系, 综合考虑了地质环境、地表环境、经济发展、社会需求、地下空间开发现状等多方面因素, 反映了城市地下空

[收稿日期] 2023-12-16; **[改回日期]** 2024-01-12; **[责任编辑]** 郝情情。

[第一作者] 易荣(1964年-), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事城市地下空间开发利用和管理等方面的研究。E-mail: yirong@cmgb.cn。

[通讯作者] 阎浩(1981年-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事环境地质和城市地质等方面的研究。E-mail: 45137564@qq.com。

间开发利用的可行性、必要性和优先性(龙睿, 2020; 田聪等, 2021; 钱七虎, 2023; 陈华强等, 2023)。二是采用了不同的评价方法,如层次分析法、专家打分法、综合指数法、模糊综合评价法、地理信息系统等,确定了评价指标的权重,对城市地下空间开发利用适宜性进行了定量或定性的评价(王凯, 2019; 李鹏岳等, 2021; 杨华勇等, 2021)。三是开展了不同城市的案例研究,如北京、上海、深圳、南京、武汉等,根据各自的城市特点和发展需求,对城市地下空间开发利用适宜性进行了分区、分级、分层的评价,为城市地下空间规划和开发提供了参考依据(刘育林, 2022; 苏栋等, 2023)。但以往研究也存在以下问题:一是在评价指标的选取和权重的确定缺乏统一的标准和方法,存在一定的主观性和随意性,影响了评价结果的客观性和可比性;二是未能基于中国不同城市的地质类型开展有针对性的评价模型,未充分考虑不同城市地下空间开发利用的差异性和专属性,难以反映城市地下空间开发利用的实际情况和未来趋势。

针对以上问题,本文以城市规划为导向,构建了基于城市规划的地下空间开发利用适宜性评价的指标体系,明确了城市地下空间地质探测的逻辑路径;细化了不同地质类型的城市探测技术的要素需求;扩充了开发适宜性评价要素的评价内容,并依照城市规划的需求,提出了开发适宜性划分标准,为城市地下空间规划和开发提供了新的思路 and 参考。

1 地下空间开发与城市规划

1.1 城市规划与地下空间利用

城市规划与地下空间利用紧密相连,相互影响。地下空间利用的规划需要与城市规划相协调,以确保地下空间的合理利用和城市的整体发展目标相一致。城市规划需要充分考虑地下空间的潜力和限制,将地下空间视为城市发展的重要资源,并将其纳入城市规划的整体框架中。

地下空间在城市规划中具有多重作用。一方面,可以缓解城市地面空间的压力,提高土地利用效率。城市人口的增加和经济的发展导致了土地资源的紧张,而地下空间的利用可以有效地扩大城市的空间容量。另一方面,地下空间可以提供各种公共设施和服务设施,如地下商业街、地下停车场、地下交通枢纽等。这些地下设施的建设可以减少

地面上的交通拥堵和环境污染等问题,并提供便利的服务让渡人居环境。此外,地下空间还可以用于城市的防灾减灾和环境保护。例如,地下避难所和地下仓储可以提供紧急避难和物资资源储备,而地下垃圾处理设施可以减少城市垃圾的处理压力(路德春等, 2023)。

然而,地下空间利用在城市规划中也面临着一些挑战。一是地下空间利用需要解决土地权属和管理的问题。与地面空间相比,地下空间的土地权属较为复杂,涉及到多个部门和利益相关方的协调。二是地下空间的规划和设计需要考虑地下环境的特殊性。地下空间的建造需要充分考虑地下水位、土壤条件、地下岩层等因素,以确保地下空间的安全和可持续利用。此外,地下空间利用还需要解决地下设施与地面设施的衔接问题,以实现地下空间与地面空间的无缝衔接和协调发展(武文婷, 2023)。

为有效利用地下空间,城市规划需要采取一系列措施。一是建立健全的地下空间规划体系,明确地下空间利用的定位和发展方向;二是加强地下空间的管理和监管,确保地下空间的合法利用和正常运行。同时,需要加强对地下空间利用技术和设施的研究和创新,提高地下空间利用的效率和可持续性。最后,需要加强地下空间利用的宣传和推广,提高公众对地下空间利用的认识和支持(江媛, 2023)。

城市规划与地下空间利用密切相关,地下空间利用在城市规划中具有重要作用。然而,地下空间利用也面临着一些挑战,需要采取一系列的措施来促进其合理利用和可持续发展。只有充分发挥地下空间的潜力,才能实现城市的可持续发展和提高居民生活质量的目标(图1)。

1.2 地下空间开发的城市规划适宜性

地下空间开发的城市规划适宜性要综合考虑环境、经济和社会等因素。因此,在进行地下空间开发之前,必须进行全面的规划和评估,确保能够最大程度地满足城市的需求,且对城市的环境、经济和社会产生积极的影响(章梦霞, 2019)。

(1) 环境因素

地下空间的开发可能对周围环境产生一定的影响。例如,地下开发可能导致地下水位下降,影响地下水资源的供应。此外,地下空间的开发还可能引发地质灾害,如地震和地面塌陷等。因此,在

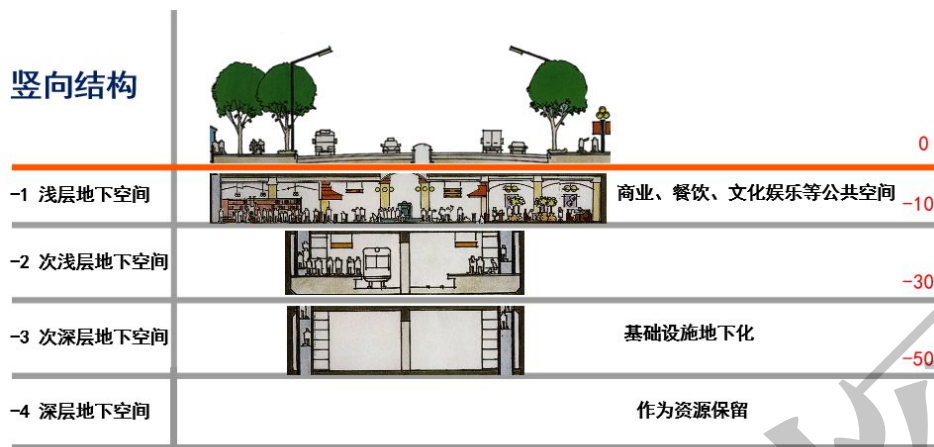


图1 城市地下空间开发示意图

Fig. 1 Diagram showing development of urban underground space

进行地下空间开发之前,必须进行全面的环境评估和风险评估,确保开发不会对环境造成不可逆转的损害(文丹,2023)。

(2)经济因素

地下空间的开发需要巨大的投资,包括地下基础设施建设、地下空间设计和施工等方面的费用。因此,地下空间的开发必须经济可行,能够为城市带来可观的经济效益。此外,地下空间的开发还需要考虑土地利用效益。在土地资源有限的情况下,地下空间的开发可以提高土地的利用率,增加城市的建设面积(马鑫,2023)。

(3)社会因素

地下空间的开发应该符合城市居民的需求和利益。例如,在城市人口密集的地区,地下空间的开发可以提供更多的公共设施和服务,如地下商场、地下停车场和地下交通枢纽等。此外,地下空间的开发还可以改善城市的居住环境,减少噪音和空气污染。因此,地下空间的开发应该与城市的整体规划和发展目标相协调,以满足城市居民的需求(孙利萍,2017)。

2 地质地下空间与城市规划

2.1 城市规划在地质地下空间方面的内涵

城市规划是指对整个区域空间进行全面、统一、规范的布局和利用,以实现经济、社会和生态环境的可持续发展。在这个过程中,地质地下空间的合理利用和管理成为了一个重要的方面。地质地下空间是指地球表面以下的地质体积,包括地下岩层、矿产资源、水资源、地热资源等。城市规划在地

质地下空间方面的内涵可从以下四个方面表达:

(1)城市规划要进行地质地下空间的调查和评价,也就是“地质调查先行”。通过对地质地下空间的详细调查和评价,可以了解该区域的地质构造、地质作用、地下岩层特征、地下水资源、矿产资源等情况,为城市规划提供科学依据。在进行调查和评价的过程中,需要运用适当的地质探测技术,如地震勘探、电磁法勘探、重力勘探等,以获得准确的地质地下信息(程光华,2013b)(表1)。

(2)城市规划要进行地质地下空间的合理布局。在城市规划中,对地质地下空间的合理布局是至关重要的,布局不仅要考虑经济发展的需求,还要兼顾环境保护和可持续利用的原则。例如,在空间规划中,需要将地下管网、地铁线路、地下车库等设施合理布置,以实现城市交通的高效运行。在矿产资源开发中,需要考虑到资源的分布和开采的可行性,以保护地质环境并实现资源的有效利用(张杰和李晓春,2023)。

(3)城市规划要进行地质地下空间的管理和保护。地质地下空间的管理和保护是城市规划的重要任务之一。通过建立健全的地质地下空间管理机制和相关法律法规,可以加强对地质地下空间的保护和监管,预防地质灾害的发生,保护地下水资源的安全,并合理利用地热资源等。同时,还需要进行地质地下空间的监测和评估,及时掌握地质地下空间的变化情况,为规划调整和决策提供科学依据(徐生钰等,2022)。

(4)城市规划要进行地质地下空间的综合利用和协调发展。地质地下空间的综合利用和协调发

表 1 地质调查先行的作用
Table 1 The role of geological survey in advance

地质调查先行的作用	说明	举例
查明地质条件	地质调查先行可以揭示城市地下空间的地质构造、地质灾害、地下水、地温能等地质要素的分布、特征、规律和演化，为城市地下空间的开发利用提供基础数据和地质图件。	通过地质调查先行，可以确定城市地下空间的开发深度、范围、形式和类型，为城市地下空间的规划和设计提供空间支撑。
评估地质灾害	地质调查先行可以分析城市地下空间的地质灾害类型、程度、危险性和影响范围，为城市地下空间的区块利用和划分提供风险评估和防治依据。	通过地质调查先行，可以识别城市地下空间的滑坡、泥石流、岩溶、地裂缝、地面沉降等地质灾害，为城市地下空间的安全保障提供预警和应对。
支撑地下空间规划	地质调查先行可以综合考虑城市地下空间的地质条件、地质灾害、地下水、地温能等地质因素，为城市地下空间的功能定位、空间布局、建设标准、管理制度等提供科学依据和专业意见。	通过地质调查先行，可以优化城市地下空间的网络化和分层化原则，为城市地下空间的协同化利用提供目标和路径。
保障地下空间安全	地质调查先行可以摸清城市地下空间的地质动态变化，为城市地下空间的建设、维护和更新提供技术支持和服务。	通过地质调查先行，可以掌握城市地下空间的地质环境变化，为城市地下空间的生态化和人性化提供要求和保障。

展是提高土地资源利用效率的重要途径。在国土空间规划中,要通过合理规划和布局,实现地质地下空间的多功能利用,如地下交通、地下储存、地下工程等。同时,还需要加强地上地下空间的协调发展,以提高土地资源利用的效益,这需要加强各相关部门之间的协作,共同推动地质地下空间的综合利用和协调发展(杨华勇等,2021)。

可以看出,城市规划在地质地下空间方面的内涵是多方面的,涉及到地质地下空间的调查和评价、合理布局、管理和保护、综合利用和协调发展等诸多因素,只有充分重视地质地下空间的规划和管理,才能实现城市空间的可持续发展,进一步提升经济社会发展的质量和效益。因此,城市规划在地质地下空间方面的工作具有重要的意义和价值。

2.2 城市规划指导下的地下空间布局

城市规划在现代城市规划中扮演着至关重要的角色。这是一种通过科学的方法来合理规划和组织土地使用的过程,旨在最大限度地提高土地资源的利用效率,并满足人们对居住、工作、休闲和交通等方面的需求。而作为城市规划的一部分,地下空间的合理布局和利用也越来越受到重视。

地下空间布局是指对地下资源进行规划和管理,以实现城市的可持续发展。在城市规划的指导下,地下空间布局需要考虑城市的整体规划、土地利用、城市功能的配置和人居环境的改善等因素。这不仅涉及到现有的地下设施,如地铁、地下停车场和地下通道等,还涉及到未来的地下发展,如地下商业中心、地下公园和地下水处理设施等。这种布局思维,正是“总体规划引领”的诠释。

(1)地下空间布局需要与城市的整体规划相协调。在城市规划的指导下,在地下空间的布局中应考虑城市的总体结构和功能,即城市空间的总体规划层面。地下空间的布局应该与地上空间的规划相统一,确保地下空间与地上空间之间的协调和平衡。例如,在城市中心地区,地下空间可以用于商业和办公用途,增加城市的商业和办公容量,减轻地上空间的压力。

(2)地下空间布局需要与土地利用相结合。在城市规划的指导下,地下空间的布局应根据土地资源及其潜力进行合理规划。通过合理利用地下空间,可以避免土地浪费,提高土地利用效率。例如,城市中的地下停车场可以解决市区停车位不足的问题,减少地面停车位的需求,从而节约土地资源(钱七虎,2023)。

(3)地下空间布局还需要考虑城市功能的配置。在城市规划的指导下,地下空间的布局应根据城市功能需求进行合理规划。不同的城市功能需要不同类型的地下设施来支持和满足需求。例如,地铁系统是城市交通功能的重要组成部分,需要在地下空间进行合理布局,以便提供便捷的交通服务(唐玉程,2022)。

(4)地下空间布局还应考虑人居环境的改善。在城市规划的指导下,地下空间的布局应注重人居环境的舒适和安全。通过合理规划和设计,可以创建一个舒适、安全、整洁的地下空间,为人们提供更好的居住和生活环境。例如,地下公园和休闲区域可以提供舒适的休闲和娱乐场所,为居民提供更多的户外活动选择(罗婧,2020)。

地下空间布局在城市规划中非常重要。通过科学合理地规划地下空间的布局,可以最大限度地提高土地资源的利用效率,并满足人们对城市功能和人居环境的需求。只有通过城市规划的指导,地下空间布局才能实现有效的整合和优化,为城市的可持续发展做出贡献。

3 城市地下空间地质探测研究

3.1 地质探测的要求

(1)针对城市地下空间开发的不同类型和规模,需要满足工作区的地质探测范围和密度要求。应充分考虑城市发展现状与规划,科学设定探测密度,如重要规划区块的钻孔密度要求。明确规定不同稠密区划的钻探率要求,以及重点关注区域的详细探测密度(李广才等,2023)。

(2)要全面规定地质探测中需要强制使用的基本方法,这主要包括岩心钻探、各类地球物理勘探、水文地质与工程地质测试等。应根据地质条件特点,提出优先使用的探测手段组合。规定重要工程地质指标的测试方法,以及数据处理、解释流程。还应明确规定对测试质量的监管要求。

(3)针对地质探测后的成果报告撰写提出规范性要求,包括报告的基本构成、地质图绘制规范、图表表达要求、数据统计格式等。报告内容应当全面反映调查区域的地层岩石特征、地下水流动特征、岩土力学参数、环境本底质量等情况,规定报告编写程序和审核流程,明确报告反映信息的精度标准,以及结果表达的客观、规范性要求。尤其是上述内容要让城市规划人员能够解读,使之更加便利的将地质参数转化为规划线条。

(4)要对地质探测获得的原始资料及处理后的地质信息进行规范化管理,明确数据库建设、数据共享使用、保密规定等要求。重点工程区域的地质资料需要限制获取范围,还应明确数据使用权限,保障数据安全。同时,也要规定提交地质资料的时间节点和接收部门(国土资源部,2017)。

(5)对承担城市地下空间地质探测项目的单位应提出资质条件要求,如相关技术人员的配备、设备达标等要求。还需建立地质探测项目质量考核制度,以及不良行为处罚机制。规范要求各级政府相关部门落实考核工作,确保探测单位的合法合规运作。

(6)要对地质探测项目的质量管理提出规定性

要求,建立质量标准体系。明确质量管理机构及监督检查流程和监管措施。重点是规定数据质量控制,对采样、测试、分析各环节制定质量控制规范,确保结果准确可靠。

(7)地质探测中还需要开展地质灾害隐患监测与评估,明确监测与预警技术方法,提出预警信息发布机制,还应根据情况提出地质环境治理与保护措施建议,同时,规定地质监测与地下开发项目的管理部门衔接,确保监测环节的落实(魏子新等,2010)。

3.2 不同类型城市的探测技术针对性

(1)平原城市 平原地区地层以第四纪松散沉积物为主,如粉土、粉砂等。地层相对单一且厚度大,重点需要开展广域深层动力钻探,确定覆盖层厚度分布情况。通过取心和原位测试确定软土的物理力学参数,为建筑设计提供地基处理方案。还需要划定土层工程区划,评估不同深度土体的承载力。平原城市还要防治因地下水过度开采引起的地面沉陷灾害,需进行水文地质钻探,监测地下水位变化。

(2)山区城市 山区多发育有较为复杂的地质构造,需要通过详细的地质填图识别主要的断裂带、塌陷带范围。进行岩石抗压抗剪试验,评估基岩力学稳定性。针对山体阶地堆积的碎屑物要确定其粒径组成、坡度等,防治滑坡灾害。山区河流沉积也需仔细测试,确定岸坡稳定系数。针对岩体边坡要进行岩石裂隙测量,进行抗滑稳定性计算等。

(3)岩溶城市 石灰岩丘陵地区多发育岩溶地貌,需要重点开展钻探和地球物理方法综合应用,如电磁法勘探,精细判断地下岩溶空洞分布情况。要通过对地表塌陷的调查分析,确定溶洞可能分布范围。利用钻孔摄像等手段,直接识别地下溶洞规模。通过取心和测试确定覆盖层厚度及力学参数,评估溶洞上方地基稳定性。岩溶城市需要建立完善的岩溶监测预警系统,一旦发现溶洞迹象,要及时采取支护措施,防治地质灾害发生。

(4)盆地城市 断陷盆地多发育断裂带、褶皱带等构造,需要通过深部构造探测确定其空间分布。重点关注活动的断层和褶皱带,评估其对地下水系统和地热场的控制作用。利用热物理测试确定盆地内部热流分布特征。另外,盆地边缘地带需关注山前断裂使岩体受风化、裂隙带对土壤和地下水的

传导影响。针对盆地内低洼处软土厚积区域,重点进行工程地质参数测试。

(5)沿海城市 沿海地区主要发育海积平原,要大范围进行浅层和深层土质钻探,确定厚度分布。利用原位试验确定软土的力学参数,防治地面沉降。重点关注滩涂环境对地下水的影响,通过电性探测判断淡水-盐水界面分布。利用化学分析监测地下水盐水入侵情况,提出防治对策。另外,沿海地区涌泥灾害多见,需要针对海相沉积地层进行稳定性评估(彭建兵等,2019)(表2)。

表2 不同类型城市的探测技术

Table 2 Detection techniques for different types of cities

城市类型	探测技术
平原城市	微重力、高密度电法、浅层反射地震、面波勘探、探地雷达
山区城市	高精度磁法、电磁感应法、探地雷达
岩溶城市	电磁感应法、探地雷达、高密度电法、微重力
盆地城市	浅层反射地震、面波勘探、高密度电法、微重力
沿海城市	电磁感应法、探地雷达、高密度电法、高精度磁法

4 城市地下空间开发适宜性评价体系

4.1 开发适宜性评价要素

(1)地质条件评价 需要进行全面的地质调查,评估地层沉积环境、岩土力学性质是否满足空间开发需要;分析岩溶分布是否影响项目安全;关注地下水流动模式是否稳定;确定周边环境地质条件是否适宜。

(2)环境容量评价 开展声环境和空气质量调查,预测并评估项目建设和运营后的环境噪声和污染物浓度是否超过标准;提出相应的环保措施或限制,控制环境影响在允许范围。

(3)资源评价 对项目选址范围内的地下水、地热资源情况进行调查评估;分析项目对资源的开发利用方式是否合理;提出资源可持续利用的建议。

(4)城市发展评价 分析项目的功能定位是否符合城市发展战略和规划要求;是否重复建设与其他项目存在职能重复;项目规模是否适宜等。

(5)技术评价 需要对项目的总体设计方案进行技术评审,检查方案是否遵循相关规范要求;项目的功能布局、空间尺度、建筑结构等方面是否合理;项目的总体技术路线是否科学可行。

(6)经济评价 需要对项目进行成本分析和效益分析,评估项目的总投资是否合理,经济效益是否可行;计算投资的回收期和投资收益率,分析财

务可持续性。

(7)管理与信息化 需要检查项目数据管理系统是否健全,能够充分记录和追溯项目信息;评估运营管理制度是否规范合理;项目应急预案是否完善,能否有效响应各类突发事件。

4.2 开发适宜性评价方法

(1)定量评价方法

建立评价指标体系,量化指标赋值,运用数理统计方法,如层次分析法等对指标进行计算,得到量化的评价结果,能直观反映问题严重性。

(2)定性评价方法

组织专家团队,针对难以定量描述的因素,通过讨论评分等方式进行专业判断,形成定性评价结论,反映专家意见。

(3)现场考察法

实地观察开发选址周边地质环境特征,开展地质勘查、水文测试等原位考察,采集样本进行室内分析,获取原始数据。

(4)类比分析法

搜集国内外类似类型地下空间开发项目案例,分析这些案例的地质条件、设计方案、运营管理模式,为当前方案决策提供参考借鉴。

(5)模型模拟法

建立计算机仿真模型,输入不同开发方案参数,模拟地下空间施工建设和运营过程,评估各种方案的技术经济效益。

(6)成本效益分析法

预测开发建设和运营成本,测算开发效益和收益,进行成本收益比例分析,提供决策依据。

4.3 开发适宜性划分标准

开发适宜性划分标准是一个重要的工具,在地下空间开发领域中起着至关重要的作用。通过科学地评估地下空间的地质条件、环境风险以及技术经济因素,我们能够准确地划分出不同的开发区域等级。

根据评价结果,可以将地下空间开发区域划分为三个等级。

一级区域是指那些具备地质条件稳定、岩溶等地质灾害风险低、地下水环境良好以及技术经济评估结果良好的区域。这些区域具备充分的开发潜力,可以成为重点开发利用的地区。

二级区域是指那些存在一定地质或环境风险的区域,其技术经济评估结果一般。对于这些区

域,我们需要严格控制开发的密度和强度,以防止潜在的风险以及不必要的损失。

三级区域是指那些存在地质灾害隐患、地下水严重受污染以及生态环境极为脆弱的区域。对于这些区域,我们要严禁任何形式的开发,以保护地下资源和生态环境的完整性。

要建立科学量化的评分标准,确定区划的评分规则和权重是必不可少的。我们可以根据不同等级的指标阈值进行判定,以此来划分开发的适宜性。评估结果应当形成区划图,为相关决策提供权威的科学依据。

在划分开发适宜性的过程中,需要考虑多种因素的权衡。例如,地下空间的地质情况、岩溶灾害风险、地下水环境、技术经济评估等各个方面都应被纳入考虑范围。通过综合分析这些因素,我们能够更准确地判断出每个区域的开发适宜性,为未来的开发决策提供科学的依据。通过科学地划分地下空间的适宜性,我们可以更好地保护地下资源和生态环境,提高开发的效益和可持续性。

5 结论

(1)城市规划与地下空间开发密切联系,应该充分考虑地下空间在城市规划中的重要作用。地下空间开发需要与城市规划相协调,才能实现合理利用。在城市规划中,地质调查先行对了解地下空间情况具有重要作用,应进行地质条件评价、资源评价、环境容量评价等,为地下空间开发提供依据。

(2)不同类型的城市需要采取针对性的地质探测技术,才能准确判断地下环境情况。平原城市、山区城市、岩溶城市等都有其独特的探测需求。应该构建系统的地下空间开发适宜性评价体系,采用定量定性相结合的评价方法,并划分开发适宜性等级,为地下空间的合理利用提供科学依据。在城市规划的指导下开发利用地下空间,运用开发适宜性评价体系,可以实现地下空间的有序可持续利用,符合城市可持续发展的要求。

[References]

- Chen Huaqiang, Chen Yuanhui, Zhang Junling, Tang Ling, Lu Hong. 2023. The evaluation study on Huizhou geological resources based on an urban geological survey [J]. Mineral Exploration, 14(12): 2502-2515 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhilong, Chen Jiayun, Guo Dongjun. 2013. Development and its thoughts on research of underground space and urban anti-disaster [J]. Strategic Study of CAE, 15(5): 65-70 (in Chinese).
- Cheng Guanghua, Zhai Gangyi, Zhuang Yuxun. 2013a. Work guidelines of urban geology survey in China [M]. Beijing: Science Press: 14-87 (in Chinese).
- Cheng Guanghua, Zhai Gangyi, Zhuang Yuxun. 2013b. Urban geology and urban sustainable development [M]. Beijing: Science Press: 137-164 (in Chinese).
- Jiang Yuan, Zeng Jiao, Li Ji, Yi Rong, Dong Jianjun, Wang Baicun, Chen Zhilong. 2023. Research on problems and countermeasures of urban underground space development and utilization in Fujian Province [J]. Straits Science, (5): 68-75 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangcai, Li Pei, Jiang Chunxiang, Zhang Penghui, Wang Xingyu. 2023. Advance of the application of urban geophysical exploration methods in China [J]. Progress in Geophysics, 38(4): 1799-1814 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengyue, Han Haodong, Wang Donghui, Wang Chunshan. 2021. Current situation and development trends of suitability evaluation of urban underground space resources [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 41(1): 121-128 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wanying. 2022. Study on cause mechanism and countermeasures of subway construction collapse accident [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology: 2-52 (in Chinese).
- Liu Yulin. 2022. Research on suitability of underground space development in Xiaohu modern industrial park, Shanxi Province [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University: 39-57 (in Chinese with English abstract).
- Long Rui. 2020. Research on the adaptability evaluation of underground space development and utilization in Nanning City [D]. Guilin: Guilin University of Technology: 18-34 (in Chinese with English abstract).
- Lu Dechun, Liao Yingze, Zeng Jiao, Jiang Yuan, Wang Guosheng, Qin Boyu, Du Xiuli. 2023. Development strategy for recovery resilience of urban underground space [J]. Strategic Study of CAE, 25(1): 38-44 (in Chinese with English abstract).
- Luo Jing. 2020. Study on the landscape environment design of Xi'an underground commercial space [D]. Xi'an: Chang'an University: 13-21 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xin. 2023. Study on evaluation of comprehensive benefit of urban underground integrated pipeline corridor [J]. Construction and Budget, (9): 35-37 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Land and Resources. 2017. Guideline of urban geological investigation [S]. Ministry of Land and Resources: 2-9 (in Chinese).
- Office of the Seventh National Census Leading Group of The State Council. 2020. China Census Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press: 1-20 (in Chinese).
- Peng Jiangbin, Huang Weiliang, Wang Feiyong, Liu Yang. 2019. Geological structural classification of and geological survey method for urban underground space in China [J]. Earth Science Frontiers, 26(3): 9-21 (in Chinese with English abstract).
- Qian Qihu. 2023. How much space is there for underground space utilization in China [J]. Scientific Chinese, (8): 33-35 (in Chinese with English abstract).

- Shi Xiaodong. 2006. History and future of underground space development and utilization in Beijing [J]. China Journal of Underground Space and Engineering, 2 (7) : 1088-1092 (in Chinese with English abstract).
- Su Dong, Huang Maolong, Han Wenlong, Li Aiguo, Wang Enzhi, Chen Xiangsheng. 2023. Suitability evaluation of underground space development in Shenzhen: Urban goenvironmental considerations[J]. Earth Science Frontier, 30(4) :514-524 (in Chinese with English abstract).
- Su Yu, Lu Shan, Ruan Yeqing. 2015. Urban underground space planning and design [M]. Shanghai: Tongji University Press: 7-51 (in Chinese).
- Sun Lin. 2016. Research on the genetic mechanism of land subsidence in Zhengzhou[D]. Beijing: North China Electric Power University: 1-20 (in Chinese with English abstract).
- Sun Liping. 2017. Study on socioeconomic factors and forecasting methods of urban underground space demand [D]. Nanjing: Nanjing University: 8-23 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yucheng. 2022. Research on optimization design of underground commercial space in Xinjiekou area of Nanjing based on environmental behavior[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology: 19-34(in Chinese with English abstract).
- Tian Cong, Su Jingwen, Ni Huayong, Wang Rui. 2021. Progress and prospect of urban underground space resources evaluation [J]. East China Geology, 42(2) : 147-156 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kai. 2019. Climate adptability evaluation of gymnasium in severe cold regions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology: 5-28 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zixin, Zhai Gangyi, Yan Xuexin. 2010. Urban geology in Shanghai [M]. Beijing: Geological Publishing House: 32-78 (in Chinese).
- Wen Dan. 2023. Research on the planning and utilization of underground space in key areas of urban center and the formulation of control regulations[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 39(3) : 64-69 (in Chinese with English abstract).
- Wu Wenting. 2023. Problems and countermeasures of urban underground space development [J]. Construction & Design for Engineering, (12): 242-244 (in Chinese with English abstract).
- Xu Junxiang, Qin Pinrui, Xu Qiuxiao, Wu Lijin. 2015. Geological evaluation of underground space resources development and utilization [M]. Beijing: Geological Publishing House: 2-20 (in Chinese).
- Xu Shengyu, Wen Gan. 2022. Legislation of urban underground space in China: Progress in recent ten years [J]. Natural Resource Economics of China, 35 (6) : 81-88 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huayong, Jiang Yuan, Li Zhe, Gao Jinjin, Wang Baicun. 2021. Comprehensive management strategy of underground space development in China[J]. Strategic Study of CAE, 23(4) : 126-136 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie, Li Xiaochun. 2023. Optimize urban spatial layout and promote high-quality development of urban renewal [J]. Intelligent Building & Smart City, (1) : 6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mengxia. 2019. Study on geological suitability evaluation of urban underground space development from 3D perspective[D]. Beijing: China University of Geosciences: 8-26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Rongguo, Yang Zifan. 2022. Research status and trend of land subsidence and control measures in Shanghai area [J]. Engineering and Construction, 36 (5) : 1220-1269 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 陈华强, 陈远辉, 张珺棱, 唐灵, 卢鸿. 2023. 基于城市地质调查的惠州市地质资源评价研究[J]. 矿产勘查, 14(12) : 2502-2515.
- 陈志龙, 陈家运, 郭东军, 吴涛. 2013. 地下空间利用与城市防灾研究若干新进展与思考[J]. 中国工程科学, 15(5) : 65-70.
- 程光华, 翟刚毅, 庄育勋. 2013a. 城市地质与城市可持续发展[M]. 北京: 科学出版社: 137-164.
- 程光华, 翟刚毅, 庄育勋. 2013b. 中国城市地质调查工作指南[M]. 北京: 科学出版社: 17-94.
- 国土资源部. 2017. 城市地质调查规范[S]. 国土资源部: 2-9.
- 国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 2020. 中国人口普查年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社: 1-20.
- 江媛, 曾娇, 李喆, 易荣, 董建军, 王柏村, 陈志龙. 2023. 福建省城市地下空间开发利用存在的问题及对策研究[J]. 海峡科学, (5) : 68-75.
- 李广才, 李培, 姜春香, 张鹏辉, 王兴宇. 2023. 我国城市地球物理勘探方法应用进展[J]. 地球物理学进展, 38(4) : 1799-1814.
- 李鹏岳, 韩浩东, 王东辉, 王春山. 2021. 城市地下空间资源开发利用适宜性评价现状及发展趋势[J]. 沉积与特提斯地质, 41(1) : 121-128.
- 刘婉莹. 2022. 地铁施工坍塌事故成因机理及对策研究[D]. 江苏: 中国矿业大学: 2-52.
- 刘育林. 2022. 山西省潇河现代产业园区地下空间开发适宜性研究[D]. 石家庄: 河北地质大学: 39-57.
- 龙睿. 2020. 南宁市市区地下空间开发利用适应性评价研究[D]. 桂林: 桂林理工大学: 18-34.
- 路德春, 廖英泽, 曾娇, 江媛, 王国盛, 秦博宇, 杜修力. 2023. 城市地下空间恢复韧性发展策略研究[J]. 中国工程科学, 25(1) : 38-44.
- 罗婧. 2020. 西安地下商业空间景观环境设计研究[D]. 西安: 长安大学: 13-21.
- 马鑫. 2023. 城市地下综合管廊综合效益评价研究[J]. 建筑与预算, (9) : 35-37.
- 彭建兵, 黄伟亮, 王飞永, 刘阳. 2019. 中国城市地下空间地质结构分类与地质调查方法[J]. 地质学前沿, 26(3) : 9-21.
- 钱七虎. 2023. 我国地下空间利用还有多大空间[J]. 科学中国人, (8) : 33-35.
- 石晓冬. 2006. 北京城市地下空间开发利用的历程与未来[J]. 地下空间与工程, 2(7) : 1088-1092.
- 束昱, 路姗, 阮叶菁. 2015. 城市地下空间规划与设计[M]. 上海: 同济大学出版社: 7-51.
- 苏栋, 黄茂隆, 韩文龙, 李爱国, 王恩志, 陈湘生. 2023. 考虑城市地质环

- 境影响的深圳市地下空间开发适宜性评价[J]. 地学前缘, 30(4): 514-524.
- 孙利萍. 2017. 城市地下空间需求的社会经济因素与预测方法研究[D]. 南京: 南京大学: 8-23.
- 孙琳. 2016. 郑州地区典型土体变形特性及地面沉降预测[D]. 北京: 华北电力大学: 1-20.
- 唐玉程. 2022. 基于环境行为学的南京新街口地区地下商业空间优化设计研究[D]. 徐州: 中国矿业大学: 19-34.
- 田聪, 苏晶文, 倪化勇, 王睿. 2021. 城市地下空间资源评价进展与展望[J]. 华东地质, 42(2): 147-156.
- 王凯. 2019. 严寒地区体育馆气候适应性评价体系研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学: 5-28.
- 魏子新, 翟刚毅, 严学新. 2010. 上海城市地质[M]. 北京: 地质出版社: 32-78.
- 文丹. 2023. 城市中心区重点区域地下空间规划利用与控规制定研究[J]. 水电站设计, 39(3): 64-69.
- 武文婷. 2023. 城市地下空间开发存在的问题及对策[J]. 工程设计与设计, (12): 242-244.
- 徐军祥, 秦品瑞, 徐秋晓, 吴立进. 2015. 地下空间资源开发利用地质评价[M]. 北京: 地质出版社: 2-20.
- 徐生钰, 文乾. 2022. 中国城市地下空间立法: 近十年以来的进展[J]. 中国国土资源经济, 35(6): 81-88.
- 杨华勇, 江媛, 李喆, 高金金, 王柏村. 2021. 地下空间开发综合治理发展战略研究[J]. 中国工程科学, 23(4): 126-136.
- 张杰, 李晓春. 2023. 优化城市空间布局推动城市更新高质量发展[J]. 智能建筑与智慧城市, (1): 6.
- 张容国, 杨子凡. 2022. 上海地区地面沉降及防治措施的研究现状与趋势[J]. 工程与建设, 36(5): 1220-1269.
- 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]. 北京: 中国地质大学: 8-26.

Suitability Evaluation of Urban Underground Space Development Based on Urban Planning

YI Rong¹, YAN Hao¹, QI Min¹, ZHANG Zheng¹, DONG Ziyuan, WANG Yue², JIANG Yuan³, ZENG Jiao³, JIA Kaiguo⁴
(1. Institute of Mineral Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300; 2. State-Owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council, Beijing 100053; 3. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088; 4. Institute of Urban Safety and Underground Space Co., Ltd, No.1 Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101100)

Abstract: With the continuous promotion of urbanization, the development and utilization of urban underground space has become highly important. However, the development of urban underground space is generally implemented with blindness, which has not fully integrated with urban planning. It is therefore urgent to build a suitability evaluation system for urban underground space development. This work investigated the relationship between urban planning and underground space development, and proposed the significance of underground space development under the guidance of urban planning. Targeted detection techniques should be adopted for different types of cities to evaluate geological, environmental, and technological and economic aspects, and suitability levels are classified based on the evaluation results. Research suggests that under the guidance of urban planning, the use of a development suitability evaluation system can achieve orderly and sustainable utilization of underground space.

Key words: urban planning, underground space, geological exploration, suitability evaluation