

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2020.11004

城市地下空间资源开发利用适宜性评价现状及发展趋势

李鹏岳, 韩浩东, 王东辉, 王春山

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:为进一步提高地下空间开发利用适宜性评价结果的可靠性和应用性,引导城市地下空间资源协同利用、合理开发,本文系统总结了国内外地下空间适宜性评价的现状,从城市地下空间资源开发适宜性评价指标体系、权重确定、评价模型及评价系统等方面论述了已取得的主要进展和成果。在此基础上,提出了未来适宜性评价的发展方向:建立三维立体化的评价体系,并将现代科技从底层融入评价系统,提高评价结果的可靠性;拓展评价结果的产品属性,满足不同阶段、不同用户实际需求,打造适宜性评价服务各级用户的新模式。

关键词:地下空间资源;开发利用;适宜性评价

中图分类号:P64

文献标识码:A

前言

国外城市地下空间的开发利用较早,成就较高的是日本、美国、欧洲等发达国家^[1]。21世纪,我国地下空间开发进入快速发展时期,“十二五”时期,我国城市地下空间年均增速达到20%以上^[2-3]。大规模的地下空间开发利用在满足城市发展需要的同时,也引发了一系列问题^[4-9]。因此,地下空间开发利用的合理性、安全性、可持续性成为人们研究的热点^[10-13],其中,地下空间开发利用适宜性评价,被认为有利于城市进行地下空间规划,愈发受到关注^[14]。

地下空间开发利用适宜性评价是一个综合性强、复杂度高的问题,其不仅涉及地质、构造、地貌、地理等地学因素,也涉及人口、经济、交通、区位等社会因素^[15-17]。国内外专家学者进行了大量的研究^[18-24],取得了较好的成果。但由于缺乏统一、系统的理论支撑,研究成果较为分散,缺乏系统、成熟的解决方案,导致评价结果的普适性和实用性较差,适宜性评价体系也亟待深入研究。

本文通过系统梳理国内外城市地下空间资源

开发适宜性评价指标体系、权重确定、评价模型及评价系统等方面的研究现状,围绕地下空间资源开发利用适宜性评价体系建立的科学性、评价方法的合理性、评价结果的应用性等方面,探讨了城市地下空间资源开发利用适宜性评价的未来发展趋势,以期推动适宜性评价工作的进步,进而为城市地下空间规划提供指导。

1 适宜性评价研究现状

1.1 适宜性评价指标

国内外学者对评价指标的选择大多建立在对研究区影响因素分析的基础上,采用层次分析法等决策方法,综合研究者的经验而确定。

美国明尼苏达大学的Sterling等人^[25]在明尼阿波利斯-圣保罗市做的一项城市地下空间开发利用规划中,根据明尼阿波利斯市砂岩为主体的地质条件,将岩石层、土层分布、水文地质分布以及地形坡度与地下空间开发利用的空间形式作为适宜性评价的影响因素,给出了可开发利用的地下空间资源的分布范围和适宜的开发利用空间形式。Boivin^[26]把沉积物厚度、地面起伏度、基岩地质等因

收稿日期:2020-10-24; 改回日期:2020-11-09

作者简介:李鹏岳(1987—),男,硕士,工程师,主要从事工程地质、环境地质的研究。E-mail:283932524@qq.com

通讯作者:韩浩东(1986—),男,博士,工程师,主要从事工程地质的研究。E-mail:603223034@qq.com

资助项目:中国地质调查局项目(DD20189210)

素作为评价指标,获得了加拿大魁北克市的开发难度分级。Ronka 等人^[27]对芬兰的一项名为“Underground Space in the Planning and Land Use”的研究中,根据岩石区建设难度的地下空间分类,建立了岩层区的地下空间资源开发利用适宜性的评价模型。Wang 等人^[28]通过研究表明,影响城市地下空间潜力评价的5个主要影响因素是地质特征、地价和位置条件、经济发展水平、地下空间的开发优势,以及“与城市规划的兼容性”。欧刚^[29]运用层次分析法从地质结构、地形地貌、岩土体特征、水文地质条件、地质灾害与环境地质等5方面为准则层建立地质环境适宜性评价模型。曹亮^[30]利用地形地貌、建筑场地类别、不良岩土体条件,水文地质特征和地质灾害等5个方面为评价因素,基于目标加权函数建立了数学评估模型。江思义^[31]使用岩土体特征、地下水情况、特殊地质条件、区域地壳稳定性、地质灾害易发性,以及地面建(构)筑物和浅部已开发地下空间等作为评价指标,对南宁市(西津幅)地下空间开发适宜性进行了评价。张璐^[32]通过分析可能出现的工程地质问题,建立地形地貌、地层岩性及工程地质特性、水文地质条件和地质构造等4方面的指标体系,对研究区进行了适宜性评价。

然而,地下空间开发利用的影响因素繁多,现在选取评价指标往往依赖评估者的经验,根据研究对象的不同、开发利用方式的不同、服务对象的不同而采用不同的评价标准。迄今为止,有关评价指标的选取在学术界尚未形成统一的标准。

1.2 适宜性评价指标权重

评价指标权重的确定是多目标决策的一个重要环节,权重的赋值合理与否,对评价结果的科学性起着至关重要的作用;若某一因素的权重发生变化,将会影响整个评判结果。因此,权重的赋值必须做到科学和客观,这就要求寻求合适的权重确定方法。国内外专家学者采用层次分析法、专家调查法(Delphi)等方法进行了赋权方面的研究。

彭俊婷^[33]、彭建等^[34]采用专家问卷调查法和层次分析法进行权重确定,对某地级市地下空间开发利用适宜性进行评价。张晓峰^[35]结合专家意见构建城市地下空间安全评价体系,运用层次分析法确定指标体系的权重,然后运用模糊综合评价模型对北京市地下空间进行评价。刘健等^[36]采用层次分析法确定指标权重,采用多目标线性加权函数建

立评价数学模型,利用GIS叠加生成适宜性评价图对苏州城市规划区浅层和次浅层地下空间资源开发适宜性进行评价。夏友等^[37]采用层次分析法确定指标权重,对郑州市城市地下空间进行了评价。甄艳等^[38]采用层次分析法建立了一套基于地理国情的地下空间开发利用适宜性评价指标体系与模型,借助GIS空间分析功能,对研究区的地下空间资源开发利用适宜性进行了评价。彭建兵^[39]提出了中国城市地下空间地质结构的分类方法,为地下空间适宜性评价时指标分层赋权提供了一种新的思路。陈绪钰^[40]采用模糊赋权法和层次分析法相结合的方法计算评价指标的权重,对泸州市规划中心城区工程建设适宜性进行了评价。

以上研究者大多采用主观赋权法进行了评价,其赋权方法较为单一,较少涉及到客观赋权法,例如,最大熵技术法^[41]、主成分分析法^[42]、变异系数法^[43]、简单关联函数法^[44]、可拓理论^[45]等。此外,针对主观赋权法和客观赋权法的优缺点,学者又提出了主客观综合集成赋权法,这类方法将主观赋权法和客观赋权法结合在一起使用,从而充分利用各自的优点,是一种较为科学合理的方法。

地下空间适宜性评价指标赋权时,还应该考虑不同区位、层位和不同服务对象等情况,采取相应的赋权方式。如:地下水对地下空间开发利用的影响,其主要的指标为富水性以及水压,在浅层富水性指标权重较水压大,随着深度的增加,水压的权重应逐渐增大。因此,在对地下空间适宜性分层进行评价时,评价指标权重应随深度发生变化,在地下空间适宜性评价指标赋权过程中,应结合研究对象和评价区域对评价指标进行分析。

1.3 适宜性评价方法及模型

近年来,国内外研究人员将模糊数学、灰色关联度、可拓学等模型应用于地下空间适宜性评价当中,增加了评价结果的合理性。姜云^[46]基于可变模糊集理论建立了地下空间资源质量可变模糊评估模型,以北京中央商务区为例,对地下空间资源质量进行了评估。郑强^[47]基于区位理论、土地系统理论、土地可持续利用理论及可拓理论,以地质、经济、社会效应等因素为切入点,构建综合评价模型,对城市地下空间开发潜力展开实证研究,并提出城市地下空间合理开发对策。吴炳华等^[48]采用模糊综合评判法,以地质构造、水文地质条件、工程地质条件为评价指标,对宁波地下城市地下空间(0~

30m)进行了适宜性评价。王振宇等^[49]利用层次分析法和专家调查法确定各指标因素权重的基础上,还运用模糊综合评价法,以城市条件、自然条件、区域条件、经济技术条件为评价指标,对长沙城市地下空间开发利用进行了适宜性评价。王寓霖^[50]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。张晶晶等^[51]建立了基于变权理论的地下空间开发地质环境适宜性评价模型,即敏感因子-综合指数-变权评价模型,对郑州市地下空间开发环境进行了评价,取得了较好的评价效果。刘昆等^[52]提出了新的评价模型结构——地质评价和建设现状评价模型,建立了一套适用于中国东部沿海地区的地下空间资源开发利用适宜性的评价模型。

然而,层次分析法模型虽然计算简单,但是权重确定人为性大,模糊综合评价方法计算复杂,对指标权重矢量的确定依赖评估者经验,因此主观性较强。可拓模型在评价过程中对指标取值较为敏感,在数据差别较大时,容易导致评价结果出现偏差,变权模型的评价结果虽然离散性较好,易于分级评价,但其是否符合客观实际尚未在学术界得到统一的肯定。运用模糊集层次分析(FAHP)和逼近理想解排序法(TOPSIS)构建综合评价模型^[53],能够较好地解决指标的随机性和模糊性问题,有一定的参考意义。

1.4 适宜性评价系统

在经历评价指标的选取,指标权重的确定以及评价模型的构建后,选择一个合适的评价系统对于是否能够快速有效的完成评价工作尤为重要。大量学者进行了尝试。Boivin总结了加拿大Québec城市的一项规划期限为四年的地下空间规划,把沉积物厚度、地面坡度、下伏岩石地质情况等因素基于透明度叠加起来,最终确定了开发难度分级并计算了相应的容量。胡学祥^[54]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,针对宁波市地质环境条件,利用层次分析法和模糊综合评判方法,开展了宁波市地下空间开发适宜性评价研究。刘运来^[55]结合MAPGIS平台进行二次开发对武汉市主城区浅层(0~15m)地下空间开发利用地质环境适宜性展开综合评价。方寅琛^[56]系统介绍了嘉兴城市地质调查工作中地下空间开发适宜性评价新思路,对如何利用三维地质模型进行评价做了比较深入的探讨,取

得了较好的效果,但其评价指标中三维数据较少,评价结果精度有待考证。

现阶段的城市地下空间适宜性评价系统并没形成一套完整、成熟的系统,评价结果的精确性、可靠性有待进一步发掘。未来可考虑将庞大的地质数据置于云端,利用服务器强大的运算功能,并结合大数据及人工智能技术(AI)进行自动化的成图和评价。

2 适宜性评价需关注的关键问题

2.1 评价体系的科学性

评价体系的科学性依赖于评价指标量化的科学性、评价结果的可靠性以及评价系统的普适性等方面。

指标量化是评价过程中最基础也是最重要的一个环节,指标取值的大小将直接影响评价结果,因此,如何科学的进行指标取值成为适宜性评价首当其冲的一个关键科学问题。现阶段的指标取值多依赖于规范、指南等行业标准,其量化取值大多适用于地表建筑,是否适用于地下空间评价尚无定论。以地铁施工为例,其主要风险因素为易发生变形的软土、易产生突涌水的地下水以及活动断层等。现有的评价指标多适用于浅表层基坑开挖。为了定量分析其对地下隧道的影响,可以采用ANSYS、FLAC 3D、PFC等数值模拟的方法进行研究,并结合已有监测数据进行约束分析,从而实现指标的科学量化工作。

现有评价大多数将地下空间开发人为划分为多个层位,按照不同层位进行“切片式”评价,其评价的过程是将某个层位地质体“压缩”成一个面进行2D计算,其过程损失了地质体三维信息,评价结果仅可作为粗略的规划参考,无法满足详细规划的需求^[57]。从2D评价的实例不难看出,要想得到准确的计算结果依赖于三维地质模型,且受限于三维地质模型的精度,模型的准确度将直接影响地下空间适宜性评价结果的可靠性。现有空间构模方法归纳为基于面模型、基于体模型和基于混合模型的3大类构模体系,如表1所示。

为了控制三维地质建模的精度,需要对三维地质结构模型进行误差修正,在具体实现时,需要引入“数据模型的可视化交互技术”,使得三维地质结构模型不再仅仅是由计算机根据一定的地质数据和建模规则自动生成的“静态”模型,而是由地质人员、

表 1 3D 空间构模法分类
Table 1 Classification of methods for 3D spatial modeling

面模型	体模型		混合模型
	规则体元	非规则体元	
不规则三角网	结构实体几何	四面体格网	TIN-CSG 混合
格网	体素	金字塔	TIN-Octree 混合或 Hybrid 模型
边界表示模型	八叉树	三棱柱	Wire Frame-Block 混合
线框或相连切片	针体	地质细胞	Octree-TEN 混合
断面序列	规则块体	非规则块体	
断面 - 三角网混合		实体	
多层 DEMs		3DVoronoi 图	
		广义三棱柱	

建模人员、地质数据、建模规则共同影响、相互反馈的动态、可交互、可评估、可修正的模型^[58]。由于数据的有限性,三维空间建模必然会进行空间插值,因此插值方法将会直接影响建模精度,可以考虑选择部分钻孔作为建模数据来源,训练自动化三维建模,最后通过提取虚拟钻孔信息与真实钻孔资料进行对比,匹配度越高,建模精度越好,而三维地质建模的质量越高,后期适宜性评价结果的精度和可靠度将越好。

一个好的评价系统具有较强的普适性,其主要体现在对适宜性评价的长远考虑。以平面为单元进行的适宜性评价,难以精确体现评价结果的边界,因此,建立三维立体化评价系统将成为评价的终极形态。三维立体评价的根基在于三维地质模型,进行三维评价时,其评价单元不再是平面 2D 的,而是实实在在的存在于空间中的三维实体单元,该实体评价单元除了体现地质体的几何特征外,还赋存有地质属性信息,利用三维建模软件的空间分析功能,将地质几何特征与属性信息结合起来,构建三维矢栅一体化模型,来实现城市地下空间适宜性的立体化评价。

2.2 评价结果应用性

评价结果是否具有较强的应用性,体现在其是否满足了设计的目标,是否满足了用户的需求,是否分层级进行评价。

以目标为导向的评价能够更好的找准定位。地下空间作为一种不可再生的地质资源,其一旦被开发利用,具有很强的不可逆性。因此,对地下空间资源开发利用适宜性进行评价时,首先要明确评价的基本原则,地下空间是在开发中保护还是在保护中开发,对蕴藏在地下空间当中的地质资源是优

先予以保护,还是协同利用,对地下空间资源的占用是物尽其用还是克制利用?只有在这些基本原则框架下的评价才符合地下空间开发的需求,才能有较好的应用性。

明确出口才能保证评价工作的用户满意度。地下空间资源适宜性评价是合理开发利用地下空间的前置性工作,但不同的用户对该项工作的需求不近相同。从自然资源管理的角度出发,地下空间资源作为土地资源的垂向延伸,其属性是地下空间资产确权的基本要素,因此,其关注的要点是地下空间资源的质量、边界,是地下空间资源的分层确权;从国土空间规划的角度出发,地下空间是国土空间的重要组成部分,是城市综合承载力的重要保障,是城市防灾韧性的前沿阵地,在生态文明建设的时代背景下,“生态优先,节约优先,高质量发展”是国土空间规划的主旋律。因此,其关注的要点是如何强化底线约束,从而有效服务于生态优先,如何集约有效开发地下空间,并弹性预留发展空间;从工程实践的角度出发,其关注的要点是地下空间所赋存的地质结构是否满足开发的要求,是否存在影响开发的地质问题,如何经济安全地开发地下空间。总而言之,只有明确了评价的出口产品才能使评价具有较强的生命力和更好的服务。

分层次的评价有利于管理和使用。以地下空间规划为例,在其总体规划阶段,控制性详细规划阶段所关注的内容是大不相同的。另外,不同的规划区域,其侧重点也不近相同,以北京为例(图 1),其初步构建了“全市—分区—特定地区”的地下空间分级规划体系,且不同层级、不同地区的专项规划结合实际选择编制类型和精度。因此,地下空间适宜性评价作为地下空间规划的前置工作,其与不

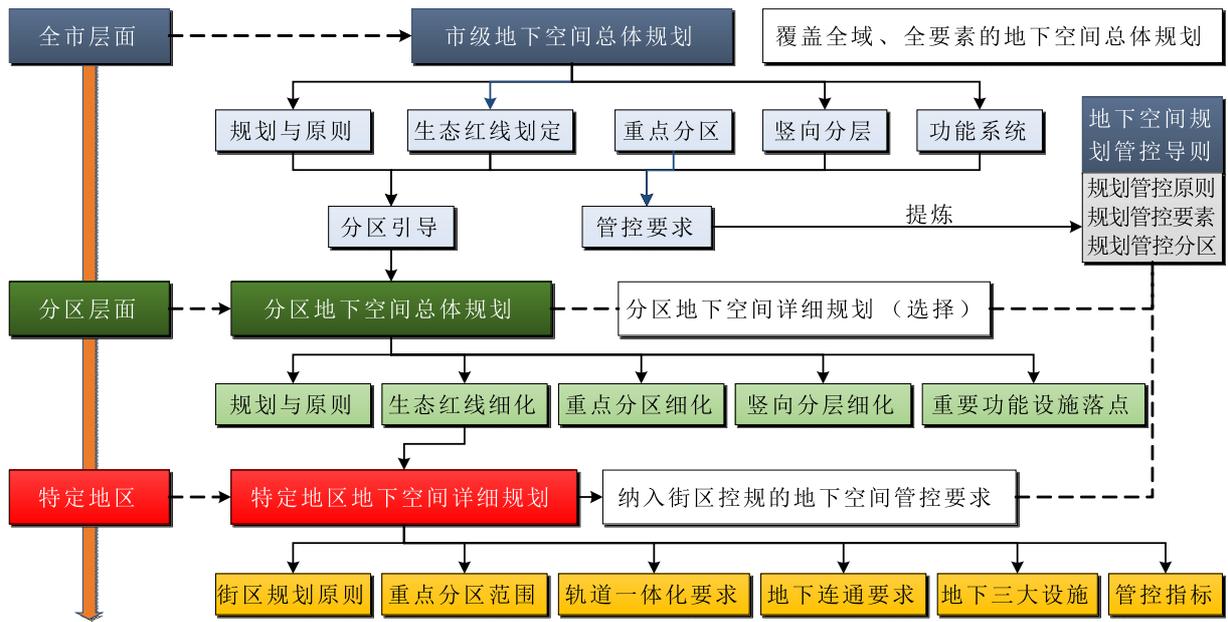


图1 地下空间分级规划体系

Fig. 1 Classification of underground space planning system

同层级规划的契合度直接决定了评价结果的应用性。

3 城市地下空间适宜性评价的未来发展趋势

基于评价的基本模式,探讨未来适宜性评价在指标选择及量化、权重获取、评价模型、三维立体化评价以及评价结果应用性等方面的发展趋势。

3.1 评价指标选择与量化

评价指标的选择对于任何评价来说都是重中之重的事情,其构成了评价体系的基本架构,决定了评价结果的合理性和有效性。而影响地下空间适宜性评价的因素较多,在错综复杂的因素中筛选适合的评价指标,首先要满足指标选择的一般性原则,即存异性、客观性、代表性、可靠性、易观察和测量等。其次,还要考虑评价的实际需求及区域特征、结合评价结果的应用性挑选指标。例如:在上海为代表的三角洲沉积平原地区,由于第四系覆盖层巨厚,其评价指标的选择应考虑土体变形、渗流、液化、水的突涌、地面沉降等问题;在喀斯特地区,由于岩溶作用强烈,其评价指标应包含断裂构造、岩溶发育特征、地下河等与岩溶密切相关的因素;在山区城市开发利用地下空间,地形地貌、地质灾害、岩土体条件则应考虑在评价因素内。总之,评价指标的选择不能一概而论,应根据评价对象所

处地质环境的特点,针对性的选取指标体系,宜准不宜散、宜精不宜多。

在指标量化取值方面,可在现有规范的基础上,结合地下开发的实际,采用以监测作为边界条件进行约束的数值模拟、物理模拟、仿真计算等手段进行研究,综合确定指标取值,合理划分评价区间。

3.2 评价指标权重获取

指标权重是指标在评价过程中不同重要程度的反映,是决策(或评估)问题中指标相对重要程度的一种主观评价和客观反映的综合度量。权重的赋值是否合理,对评价结果的科学性、合理性有着显著的作用。

目前指标权重确定的方法有很多种,其数据获取及计算过程也不相同。其中层次分析法、专家调查法等主观赋权法由于其简单、快速的特点被多数学者使用,但其过多反映了研究者的自身经验,不甚合理;最大熵技术法、主成分分析法、变异系数法等客观赋权法,其权重客观性强,但一般计算复杂,且由于没有考虑到决策者的实际经验,容易出现权重排序与指标重要程度不匹配的情况。

针对主客观赋权法的优缺点,可综合运用层次分析法、主成分分析法、最大熵技术法、可拓法、神经网络、遗传算法、大数据集成反演等方法进行组合赋权,确保吸取各种方法的优点,提高指标赋权

的有效性、合理性、科学性。例如:对应某个研究对象,其有 n 个评价因子,可先采用层次分析法对评价因子进行两两排序,根据专家经验获取主观权重向量 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$,再利用可拓学等客观赋权算法,获取其客观权重向量 $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$,在此基础上,可采用“乘法”集成法公式进行组合权重 C 的计算,公式如下:

$$C_i = \frac{a_i \cdot b_i}{\sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i}$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; a_i 为主观权重中第 i 个评价因子的权重; b_i 为客观权重中第 i 个评价因子的权重。

进行组合权重后,既避免了专家主观评估导致的权重人为性问题,又避免了过度依赖客观赋权导致的某些指标权重排序明显与客观相违背的现象,是一种较为科学的方法。

3.3 适宜性评价模型

评价模型是将评价指标进行综合运算的复杂过程,一般与数学方法息息相关。现阶段大多数学者一般采用模糊综合评判、灰色关联度、BP 神经网络、数据包络分析等模型,这些模型具有其各自的优缺点及适用条件。未来可考虑多模型融合,基于大数据、云计算及人工智能等新科技,使得模型“活”起来,并持续优化、学习、改进评价模型。

适宜性评价模型可根据评价阶段的不同灵活选取,例如,在服务于地下空间总体规划阶段,可采用“负面清单”或者“限制性要素扣除法”等模型;在服务于地下空间控制性详细规划阶段,可采用模糊集层次分析(FAHP)和逼近理想解排序法(TOPSIS)构建综合评价模型。

3.4 三维立体化评价系统

地质体是存在于三维空间的实体,对地下空间适宜性评价应考虑如何在三维空间开展,如何使评价结果有效的三维可视化表达及服务。为此首要的任务是开展三维地质建模,其不但有地质体三维几何特征,还应赋存各类地质属性信息,并结合机器深度学习能力,提高建模的精度,保证评价结果的可靠度。在此基础上,可利用先进的矢栅一体化建模技术,给每一个三维栅格赋予地质属性,将前文所述的评价模型融入其中,即可实现真正的三维立体化评价。

三维立体评价系统还应从底层加入数值模拟技术、物理仿真模拟等技术,随模型改变而改变,由

于三维数据一般体量较大,可结合大数据、机器深度学习,利用云端强大的运算功能,实现动态的地下空间适宜性评价。

3.5 评价结果应用

评价结果是否实用、好用、易用是衡量一个评价系统是否合理的最终标准。一个好的评价应该根据评价对象的不同,满足用户的需求,满足规划的目标。为此,地下空间适宜性评价结果应具有强的目标导向和基本准则,只有找准定位才不会让评价结果有偏差;其次,将评价作为一种产品,应明确产品的受众群体,只有明确了评价的出口产品才能使评价具有较强的生命力和更好的服务。最后,适宜性评价结果不应该一概而论、一张图包揽天下,其评价结果应符合所服务对象不同阶段的需求,分层级,从粗到细,逐级评价,达到无缝衔接的效果。

4 结论

现有的适宜性评价大多是基于二维数据进行的平面栅格叠加评价,其忽略了地下空间地质体的三维空间属性,评价结果在垂向上精度十分有限;未来的适宜性评价应建立三维立体评价系统,从底层加入数值模拟、物理仿真模拟技术,并结合大数据、机器学习、人工智能等技术将评价方法进行嵌入,从而提高评价结果的精度和可靠度。

由于未结合用户的实际需求,现有的适宜性评价结果应用性较差,应转变评价理念,明确出口及受众对象,以产品输出的形式增强评价的生命力,打造适宜性评价服务各级用户的新模式。

参考文献:

- [1] 李晓昭,王睿,顾倩,等. 城市地下空间开发的战略需求[J]. 地学前缘,2019,26(3):32-38.
- [2] Zhi L C, Jia Y C, Hong L, et al. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 253-270.
- [3] 程光华,王睿,赵牧华,等. 国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J]. 地学前缘,2019,26(3):39-47.
- [4] 黄强兵,彭建兵,王飞永,等. 特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J]. 地学前缘,2019,26(3):85-94.
- [5] 易荣,贾开国. 我国城市地下空间安全问题探讨[J]. 地质与勘探,2020,56(5):1072-1079.
- [6] Mao S Z, Wang Q, Dong Y, et al. Evaluation of urban underground space resources using a negative list method: Taking Xi'an City as an example in China [J]. China Geology, 2020, 3(1): 124

- 136.
- [7] 吴文忠,张晓东,赵银鑫,等. 银川市地下空间利用现状、问题与对策建议[J]. 西北地质,2020,53(1):205-214.
- [8] 周圆心,郑桂森,何静,等. 北京平原区地下空间建设地质安全监测问题探讨[J]. 中国地质,2019,46(3):455-467.
- [9] 孙钧. 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),2019,39(5):699-709.
- [10] Admiraal H, Cornaro A. Why Underground Space Should Be Included in Urban Planning Policy - And How This Will Enhance an Urban Underground Future [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,55: 214-220.
- [11] Nathan D, Mark B, John D, et al. Going underground: An exploration of the interfaces between underground urban transport infrastructure and its environment [J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018,81:450-462.
- [12] Li X Z, Li C, Parriaux A, et al. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2016,55: 59-66.
- [13] 郭朝斌,王志辉,刘凯,等. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. 中国地质,2019,46(3):482-492.
- [14] Wout Broere. Urban underground space: Solving the problems of today's cities [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,55:245-248.
- [15] Zhu H H, Huang X B, Li X J, et al. Evaluation of urban underground space resources using digitalization technologies [J]. Underground Space,2016,1(2):124-136.
- [16] 孙利萍,李晓昭,周丹坤等. 地下空间开发与社会经济指标的相关性研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(4):4-13+25.
- [17] Zhou D K, Li X Z, Wang Q, et al. GIS-based urban underground space resources evaluation toward three-dimensional land planning: A case study in Nantong, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2019,84:1-10.
- [18] 何静,周圆心,郑桂森,等. 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,2020,16(4):955-966.
- [19] 任念,肖江,周光余,等. Evaluation of Suitability for Underground Space Development and Utilization in Changsha City[J]. Hans Journal of Civil Engineering,2020,09(6):594-602.
- [20] 郝爱兵,吴爱民,马震,等. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报,2018,39(5):513-522.
- [21] 谭飞,汪君,焦玉勇,等. 城市地下空间适宜性评价研究国内外现状及趋势[J/OL]. 地球科学:1-13[2020-11-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200618.1440.006.html>.
- [22] 蒋旭,王婷婷,穆静. 地下空间开发利用适宜性与资源量的应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(5):1145-1153.
- [23] 王东辉,倪化勇,李鹏岳,等. 城市地下空间资源综合利用实践——以成都市地质环境图集(2017)数据集为例[J]. 中国地质,2019,46(S2):21-29.
- [24] 杨文采,田钢,夏江海,等. 华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景[J]. 中国地质,2019,46(3):447-454.
- [25] Sterling R L, Nelson S R. Planning for underground space: a case study for Minneapolis, Minnesota [M]. Minnesota: The Center Press,1982.
- [26] Boivin D J. Underground space use and planning in the Quebec City area [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1990,5(1/2):69-83.
- [27] Ronka K, Ritola Jouko, et al., Underground space in land use planning [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998,13(1):39-49.
- [28] Wang X, Zhen F, Huang X J, et al. Factors Influencing the Development Potential of Urban Underground Space; Structural Equation Model Approach [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38:235-243.
- [29] 欧刚. 南宁市城市地下空间开发地质环境适宜性评价[D]. 南宁:广西大学,2008.
- [30] 曹亮. 城市地下空间开发的地质环境识别评价与建模研究[D]. 南京大学,2012.
- [31] 江思义,王启耀,李春玲,等. 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,2019,15(5):1290-1299.
- [32] 张璐,章广成,吴江鹏. 某城市地下空间开发利用适宜性评价[J]. 桂林理工大学学报,2014,34(3):488-494.
- [33] 彭俊婷,洪涛,解智强,等. 基于模糊综合评价的城市地下空间开发适宜性评估[J]. 测绘通报,2015(12):66-69+113.
- [34] 彭建,柳昆,郑付涛,等. 基于 AHP 的地下空间开发利用适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(4):688-694.
- [35] 张晓峰,吕良海,白永强,等. 城市地下空间模糊综合评价方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(1):8-13.
- [36] 刘健,魏永耀,高立,等. 苏州城市规划区地下空间开发适宜性评价[J]. 地质学刊,2014,38(1):94-97.
- [37] 夏友,马传明. 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,2014,10(3):493-497.
- [38] 甄艳,鲁小丫,李胜,等. 城市地下空间开发利用适宜性评价[J]. 测绘科学,2018,43(5):62-67+86.
- [39] 彭建兵,黄伟亮,王飞永等. 2019. 中国城市地下空间地质结构分类与地质调查方法[J]. 地学前缘,2019,26(3):009-021.
- [40] 陈绪钰,王东辉,倪化勇,等. 长江经济带上游地区丘陵城市工程建设适宜性评价——以泸州市规划中心城区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(1):194-207.
- [41] 余祖德,陈俊芳. 基于最大熵的两级逼近理想点的配送路线选择[J]. 工业工程与管理,2007(1):48-51+67.12
- [42] 洪增林,李永红,张玲玉,等. 一种基于主成分分析法的区域性地质灾害危险性评估方法[J]. 灾害学,2020,35(1):118-124.12
- [43] 刘佳,赵海军,马凤山,等. 基于改进变异系数法的 G109 拉萨—那曲段泥石流危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):63-70.
- [44] 许立波,李兴森,李绍英. 三参数区间数下基于映射的可拓区

- 间简单关联函数决策分析方法[J]. 系统科学与数学, 2018, 38(11):1282-1295.
- [45] 李鹏岳, 倪化勇, 王春山, 等. 基于改进层次分析-可拓学模型的库岸稳定评价[J]. 人民长江, 2018, 49(5):52-57.
- [46] 姜云, 吴立新, 车德福. 地下空间资源质量熵权与可变模糊集组合评估[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6):872-877+896.
- [47] 郑强. 城市地下空间开发潜力研究[D]. 四川农业大学, 2013.
- [48] 吴炳华, 张水军, 徐鹏雷, 等. 宁波市地下空间开发地质环境适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1):16-21.
- [49] 王振宇, 朱太宜, 王星华. 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, 2019, 16(5):1274-1281.
- [50] 王寓霖, 阳富强. 基于熵权物元可拓模型的地下空间火灾安全评价[J]. 安全, 2019, 40(1):54-57+61.
- [51] 张晶晶, 马传明, 匡恒, 等. 郑州市地下空间开发地质环境适宜性变权评价[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2):118-125.
- [52] 柳昆, 彭建, 彭芳乐, 等. 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, 2011, 007(002):219-231.
- [53] Lu Z L, Wu L, Zhuang X Y, et al. Quantitative assessment of engineering geological suitability for multilayer Urban Underground Space [J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016, 59:65-76.
- [54] 胡学祥, 刘干斌, 陶海冰. 基于 ArcGIS 宁波市地下空间开发适宜性评价研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6):1439-1444.
- [55] 刘运来, 吴江鹏, 彭培宇, 等. 基于地质环境要素的地下空间利用适宜性评价[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(5):58-62+67.
- [56] 方寅琛, 龚日祥, 李三凤, 等. 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, 2017, 38(2):43-45.
- [57] Hou W S, Yang L, Deng D, et al. , Assessing Quality of Urban Underground Spaces by Coupling 3D Geological Models: The Case Study of Foshan City, South China [J]. Computers and Geosciences, 2016, 89:1-11.
- [58] 朱良峰, 吴信才, 潘信. 三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(4):363-371.

Current situation and development trends of suitability evaluation of urban underground space resources

Li Pengyue, Han Haodong, Wang Donghui, Wang Chunshan
(Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: This paper systematically summarizes the current situation of the evaluation of urban underground space suitability at home and abroad. It is suggested that establishing a three-dimensional evaluation system, integrating modern science and technology into the evaluation system, improving the reliability of evaluation, and expanding product values in order to meet different users are the major development trends in suitability evaluation of urban underground space resources in the future

Key words: underground space resources; utilization; suitability evaluation