

山前冲积平原型城市地下空间开发利用地质适宜性评价 ——以成都市为例

李鹏岳,王东辉,李胜伟,韩浩东,王春山,徐如阁,田凯

LI Pengyue, WANG Donghui, LI Shengwei, HAN Haodong, WANG Chunshan, XU Ruge, TIAN Kai

中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081

Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China

摘要:地下空间开发具有不可逆性,不合理的开发将对宝贵的地下资源造成巨大浪费。为提高地下空间资源的合理开发与有序利用,有必要对地下空间开发利用适宜性进行前期评价。以地下空间多资源协同开发利用与地质环境问题互馈响应为立足点,提出了一种基于“地质资源”、“地质结构”、“地质问题”的评价模型——地质资源评价和地下空间开发难度评价,并采用层次分析法、模糊综合评判法、限制性要素扣除法等数学方法进行分层综合评价,最终建立了一套适合于山前冲积平原型城市地下空间资源开发利用的地质适宜性评价模型。评价结果显示,研究区浅层地下空间因已有构筑物的影响,适宜性较差,而中深层地下空间更适宜开发。该结果可为研究区地下空间开发规划和建设提供科学依据和有效指引,从而加强城市地下空间开发利用规划的合理性、科学性。

关键词:城市地下空间;适宜性评价;开发利用;山前冲积平原

中图分类号: TU984.11⁺3;P5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)10-1644-12

Li P Y, Wang D H, Li S W, Han H D, Wang C S, Xu R G, Tian K. Geological suitability evaluation of underground space development and utilization in piedmont alluvial plain cities: An example of Chengdu. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40 (10): 1644-1655

Abstract: The development of underground space is irreversible, and the unreasonable development will cause a huge waste of valuable underground resources. In order to improve the rational development and orderly utilization of underground space resources, it is necessary to make a preliminary evaluation of the suitability of underground space development and utilization. Based on the cooperative development and utilization of multi-resources in underground space and the reciprocal feed-back response of geological environment problems, an evaluation model based on "geological resources", "geological structure" and "geological problems" was proposed, that is, geological resources evaluation and difficulty evaluation of underground space development. Finally, a set of geological suitability evaluation model suitable for the development and utilization of underground space resources in piedmont alluvial plain city was established by using mathematical methods such as analytic hierarchy process, fuzzy comprehensive evaluation method and deduction method of restricted factors. The evaluation results show that the shallow underground space in the study area is not suitable for development due to the influence of existing buildings, while the middle-deep underground space is more suitable for development. The results can provide scientific basis and effective guidance for the development planning and construction of underground space in the study area, thus reflecting the rationality and scientificity of urban underground space development and utilization planning.

Key words: urban underground space (UUS); suitability evaluation; development and utilization; piedmont alluvial plain

收稿日期:2020-06-07;修订日期:2021-06-20

资助项目:中国地质调查局项目《成都多要素城市地质调查》(编号:DD20189210)、《成渝地区双城经济圈成绵乐发展带资源环境综合地质调查》(编号:DD20211402)

作者简介:李鹏岳(1987-),男,硕士,高级工程师,从事工程地质、环境地质调查与研究工作。E-mail:283932524@qq.com

2019 年中国城市化水平已达 60%, 随着城市化进程的不断深入, 人口膨胀、住房紧张、交通拥堵等“城市病”日益凸显, 与此同时, 城市的发展也在经历由外延扩张式向内涵提升式转变, 城市不再是“摊大饼”式的扩张, 在有限的空间内发展需要强有力的国土空间规划。目前, 向地下要空间被认为是行之有效的解决方法^[1-2]。作为解决“城市病”的一剂良药, 地下空间开发利用达到了前所未有的规模^[3], 其开发利用方式也日趋多样^[4]。然而, 正是近年来大规模的地下空间开发利用, 也引发了大量的工程地质、环境地质问题, 甚至工程事故^[5-6]。无计划盲目地开发地下空间资源不仅造成生命财产的损失, 也在一定程度上浪费和破坏了宝贵的地下空间资源^[7]。因此, 在开发利用之前, 对地下空间资源开发适宜性进行评价, 将有利于指导地下空间资源的合理规划和有效利用, 提高地下空间资源利用的效率和能力。

自 20 世纪 80 年代, 美国、加拿大、芬兰、意大利等国家就开始了对于地下空间开发利用的探索, 其地下空间开发利用适宜性评价主要基于影响地下空间开发的约束性要素, 从地质、区位、价值等方面, 采用综合叠加、透明度叠加等方法进行评价^[8-12]。中国对地下空间的研究起步较晚, 但随着经济的发展, 特别是到了 21 世纪初, 对地下空间开发利用适宜性的研究呈现出百花齐放的状态, 国内学者从工程地质、环境地质、灾害地质、地震地质等不同方面, 运用层次分析法、专家问卷调查法、最不利等级判别法、排除法、模糊数学等方法对地下空间资源量、开发利用适宜性等进行评价, 取得较好的评价结果^[13-19]。然而, 以往的评价大多从地质结构及地质问题的角度出发, 选取影响地下空间开发利用的因素作为评价指标, 但地下空间除包含的空间属性外, 还蕴含了地下水、浅层地热能、天然建筑材料、文物古迹等地质资源^[20-21], 对地下空间的开发还应综合考虑此类资源的协同利用。本文从地质资源保护的角度出发, 以地质资源的协同开发与地质环境问题互馈响应进行适宜性评价, 以期找到资源保护与地下空间开发的平衡点, 从而指导地下空间合理、有序地开发。

1 评价模型

对于事物的评价, 其评价模型显得至关重要,

直接决定了评价结果的内涵与外延。针对地下空间资源适宜性评价, 以往大多数做法是以问题为出发点, 评估各类问题对结果的影响程度, 较少考虑地下空间的资源属性, 更缺乏对资源保护的统筹规划。本文以地质资源的协同开发利用与地质环境问题的互馈响应为立足点, 分别开展地质资源评价和地下空间开发利用难度评价。地下空间开发利用地质适宜性评价模型如图 1 所示, 该模型的核心问题包括: 根据不同地质条件, 分区、分层使用层次分析、模糊数学法进行开发难度评价, 然后与地质资源评价结合, 建立城市地下空间开发利用地质适宜性评价技术方法体系。

1.1 地质资源评价

结合评价区实际情况, 选择优质地下水资源及文物古迹资源作为地质资源评价内容, 其评价结果分为 3 个等级, 限制开发(需要保护, 禁止开发的地质资源)、协同开发(可适当开发的资源)、可开发(可充分开发的资源)。

1.1.1 水资源评价

水资源是人类赖以生存的基础, 城市水资源供应更是制约城市发展的重要因素, 因此, 查明城市地下水资源状况对于城市供水安全保障有着重要的意义。根据《天然矿泉水资源地质勘探规范 GB/T 13727—2016》、《供水水文地质勘察规范 GB 50027—2001》, 将优质地下水和优质矿泉水作为地质资源加以保护(表 1), 在开发利用地下空间时应注意防范及协同开发。

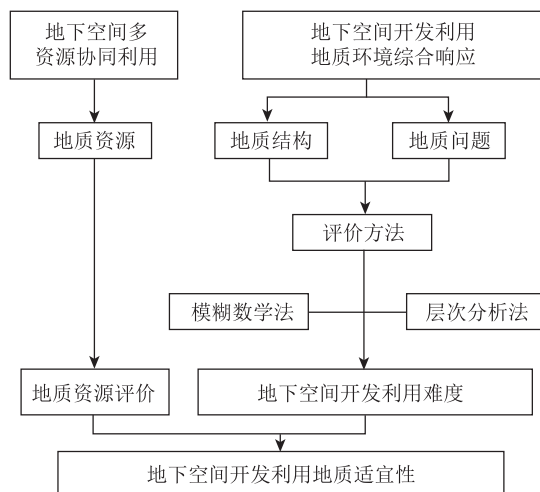


图 1 地下空间开发利用地质适宜性评价模型

Fig. 1 Evaluation model of geological suitability for underground space development and utilization

表 1 水资源评价分级

Table 1 Classification of water resource evaluation

等级	限制开发	协同开发	可开发
地表水	地表水水源地	生态湿地、湖泊、河流	其他地表水体
地下水	优质地下水(矿泉水水源等)	富水地段	其他地下水

1.1.2 文物古迹资源评价

文物古迹资源作为一种蕴涵历史文化,具有高科技研价值且不可再生的资源,赋存于地下空间资源当中。对地下文物古迹资源的评价将有助于地下空间合理的开发利用,其评价分级见表 2。

1.2 地下空间开发利用难度评价

1.2.1 评价方法

采用层次分析法和模糊综合评判方法对地下空间资源开发利用难度进行评价。层次分析法是一种对多目标进行分析决策的方法,将多目标的复杂问题分解成若干个因素,并按关系分组形成层次结构,通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序(权数)和总排序,从而确定层次中各因素的相对重要性,使用层次分析法进行权重确定被大多数学者所接受并采用^[22-25],是一种较合理科学的方法。模糊综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价^[26-28],即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。它具有结果清晰、系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决。地下空间开发利用适宜性评价由于具有不确定性和无法直接验证的特点,使用模糊数学的方法进行评价,能够较好地反映评价各因素对评价结果的影响程度,从而获得较准确的评价结果,减少人为干预评价结果造成的差异。

1.2.2 评价步骤

(1) 构建隶属度矩阵

隶属度矩阵可通过评价因素集和评判集完成,

表 2 文物古迹资源评价分级

Table 2 Evaluation and classification of cultural relics and historic sites

等级	限制开发	协同开发	可充分开发
资源类型	高研究价值/国家级、省级文物保护	较高研究价值/市级文物保护	较低研究价值

其中,评价因素集指组成该评价体系的影响因素,假设影响因素有 n 个,分别为 $u_1, u_2, \dots, u_n$,则评价因素集 U 可以表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,同理,假设评判标准有 m 个,分别表示为 $v_1, v_2, \dots, v_m$,则评判集 V 可以表示为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,之后进行单因素评判,确定各评判因素 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 对评价等级 $v_1, v_2, \dots, v_m$ 的隶属度 r_{nm} 。则 n 个评判因素的评判决策矩阵 R 为:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) 确定因素集权重向量 W

采用层次分析法确定复杂系统各评价指标的相对权重。对于评价指标 u_a 和 u_b ($a=1, 2, \dots, n, b=1, 2, \dots, n$),可按照九标度指标重要程度判断表(表 3)确定它们之间的相对重要程度。

为了保证应用层次分析法得到的评价指标相对权重基本合理,需进行一致性检验,可按式(2)计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (2)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为最大特征根的值, m 为评价因子个数。

根据一致性指标 CI ,按照式(3)计算一致性比例 CR ,即:

$$CR = \frac{CI}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n CI_i} \quad (3)$$

式中, CI 为一致性指标, n 代表不同的评价因子。

当一致性比例 $CR \leq 0.1$ 时,认为判断矩阵具有较好的一致性,当一致性比例 $CR > 0.1$ 时,认为判断

表 3 指标重要程度取值

Table 3 The values of the index's importance

相对重要程度	取值	其他说明
u_a 与 u_b 同等重要	1	
u_a 与 u_b 稍微重要	3	重要程度介于上述两相邻
u_a 与 u_b 明显重要	5	判断取值之间时,可取中间
u_a 与 u_b 强烈重要	7	值 2、4、6、8
u_a 与 u_b 极端重要	9	

矩阵的一致性不可接受,需进行适当的修正。

因素集权重向量 W 表示为 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_n\}$,其中 w_n 表示为第 n 个因素的权重。

(3)模糊综合评判

基于各评价指标的相对权重向量 W 和隶属度矩阵 R ,可根据式(4)所示的广义模糊合成运算得到模糊综合评判集 B :

$$B=W\circ R=\{w_1,w_2,\cdots,w_n\}\circ\begin{pmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1m}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2m}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\r_{n1}&r_{n2}&\cdots&r_{nm}\end{pmatrix}\quad(4)$$

其中,“ $\circ$ ”表示模糊算子,意义见表 4。

本文中,选择 $M(\cdot,\oplus)$ 进行模糊计算,最后,根据隶属度最大原则作出最终评判。

1.3 适宜性综合评价

为将地质资源的评价结果纳入到整体评价体系中,在进行地下空间资源开发利用适宜性综合评价时,要结合地质资源和地下空间开发难度进行耦合评价,将限制开发的地质资源区域,作为地下空间资源不适宜开发区,在协同开发的地质资源区域,可将地下空间开发难度评价等级上调一级作为适宜性评价的结果(表 5);在进行地下空间开发利用难度评价时,可将因素分为限制性因素和影响因素,限制性因素对于评价结果具有一票否决制,如活动断层附近 200 m 范围内作为禁止开发区,则需要在原有模糊评价的基础上,叠加断层 200 m 缓冲区作为最终的评价结果,对于不具活动性的一般断层则直接参与模糊评价。

2 研究实例

2.1 地理位置

研究区位于成都市天府新区西北部片区,主要涉及的行政区为双流区、温江区及新津县局部,北至温江区与郫都区边界,东临白家镇、华阳镇,南抵永安镇,西侧以杨柳河为界,总面积 225.14 km²。

2.2 地质概况

研究区位于典型的山前冲积平原——成都平原南部,海拔高程在 449~590 m 之间,地势西南高、北东低,地貌类型多元,由平原河漫滩、一级阶地、二级阶地,条带状平坝,宽谷垄岗,中谷圆弧状、坪状低丘和平谷圆顶状、爪状中丘组成(图 2)。2 条

表 4 模糊算子及其特征				
Table 4 Characteristic table of fuzzy operator				
特点	模糊算子(°)			
	$M(\wedge,\vee)$	$M(\cdot,\vee)$	$M(\vee,\oplus)$	$M(\cdot,\oplus)$
体现权数作用	不明显	明显	不明显	明显
综合程度	弱	弱	强	强
利用 R 信息	不充分	不充分	比较充分	充分
类型	主因素突出型	主因素突出型	加权平均型	加权平均型

注: $\wedge$ 表示取小, $\vee$ 表示取大, $\cdot$ 表示相乘, $\oplus$ 表示相加

表 5 地下空间资源开发利用地质适宜性评价分级					
Table 5 Evaluation grade of geological suitability for development and utilization of UUS					
适宜性		地下空间开发利用难度			
		低	较低	较高	高
地质资源	限制开发	差	差	差	差
	协同开发	好	好	较好	较差
	可充分开发	好	较好	较差	差

隐伏断裂以东北—南西向从研究区北西侧通过。

研究区第四系土层广泛分布,呈现出典型的“河流二元”结构特征^[29],上部为土层,以粉质粘土、粉土为主,局部含有砂土、软土等,浅表层多有 0.5~1 m 的填土层;下部为卵砾石层,砾石含量 20%~60%,砾径 2~10 cm 为主,局部可见 0.5~0.8 m 的大漂砾,砾石成分以石英岩为主,其磨圆度较好。

卵砾石层中普遍含水,是该地区地下水活跃的地层,最新的勘查资料显示,研究区该层水量丰富,单孔出水量最大可达 2500 m³/d。

研究区矿泉水类型为偏硅酸、锶型,其主要分布于地下较深位置的白垩系红层(K₂j)砂岩裂隙孔隙层间含水岩组中,该含水层富水程度较好且比较均一,单井出水量一般为 100~500 m³/d,水化学类型主要为 HCO₃-Ca 型、HCO₃-Ca·Na 型,矿化度一般小于 1 g/L。

在研究区西南侧,出露白垩系灌口组(K₂g)(图 3),其岩性主要为泥岩、砂岩、粉砂质泥岩不等厚互层,岩性结构复杂多变,无特定规律。钻孔资料显示,在地下 100~200 m 范围内,钙芒硝富集,其水中 SO₄²⁻ 离子含量明显升高,最高可达 4000 mg/L。

2.3 影响因素及评价指标层次结构

由于地质资源评价依据现有规范或相应评价

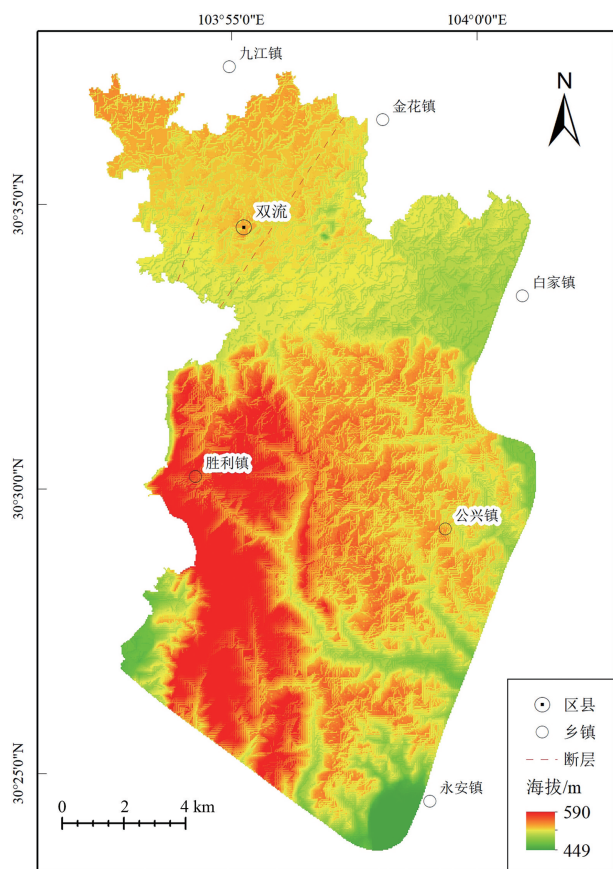


图2 研究区地貌图

Fig. 2 Geomorphology of the study area

指标进行单因素评价,不进行模糊评判,因此,本文不再一一列出,仅对影响成都市地下空间资源开发利用难度的因素进行剖析,从地质结构和地质问题2个方面进行论述。

2.3.1 地质结构

(1) 地形地貌

在浅层地下空间开发利用过程中,地形地貌对地下空间有重要影响,不同的地貌类型,其适合的地下空间开发利用方式不同,施工工艺不同,施工难度不一,造价也相差较远,从地貌图(图2)可以看出,研究区相对高差最大可达141 m,因此,在浅层地下空间评价时地貌因素须考虑。

(2) 断层

断层对工程建设的影响主要表现在2个方面:一是活动断层直接造成建筑物错位、损坏,因此其断层影响范围内地质条件差;二是断层形成的破碎带,其力学强度不但显著降低,且易形成良好的地

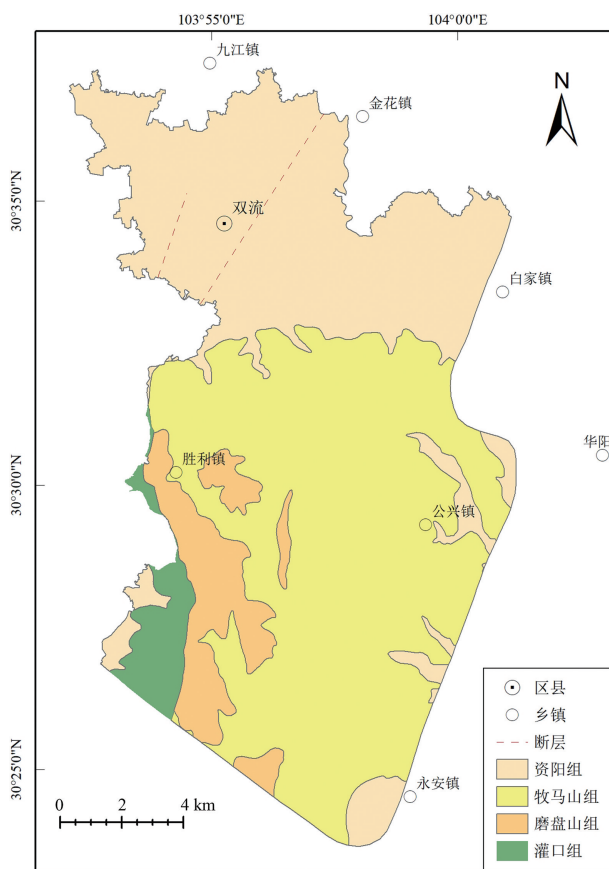


图3 研究区地质简图

Fig. 3 Simplified geological map of the study area

下水富集带,引发坍塌冒顶、涌水等工程事故。因此,汶川地震后,断裂活动性也成为研究的热点^[30],研究区发育2条北东—南西向的隐伏断裂,断裂活动性及其破碎带对地下空间的影响较大,在开发利用的过程中须慎重对待。

(3) 抗震设防等级

建筑物抗震设防等级在一定意义上反映了一个地区可能遭受区域性地震破坏力度的大小,作为区域稳定性评价的一部分,其决定了研究区宏观的地质背景特征,稳定的区域地质条件对地下空间开发有利。

(4) 已有构筑物

相比研究区南部规划区,研究区北部双流区附近,地表建筑密集,浅层地下空间开发受限,已有构筑物对浅层及中层地下空间开发利用的影响较为显著,尤其是浅层地下空间开发,可直接判定已有构筑物地基范围内为适宜性差区,地基下部区域为可开发区,但受其他地质因素的影响。

(5) 岩体质量

岩体质量工程施工意义巨大,其反映了岩体的强度及完整性,在地下空间开发过程中,其直接决定了围岩的质量等级,在岩体质量好的地方,其地下结构的稳定性好,工程投入就小,相反,在岩体质量差的地区,其本身力学强度就低,还有可能成为地下水的渗漏通道,造成额外的工程投入。研究区主要发育白垩系关口组,其岩性主要为不等厚的砂泥岩互层,岩体质量在空间上差别较大,作为评价指标可揭示地质结构对地下空间开发的影响。

(6) 岩土体承载力

土体和岩体是城市地下空间存在的环境介质,因此地下空间的开发利用与地基承载力有很大的关系。岩土体的承载力越大,地下空间开发利用的支护措施就越简单,地下结构更稳定。

(7) 土体压缩性

当建筑物基础发生不均匀沉降时,建筑物可能发生裂缝、扭曲和倾斜,影响使用和安全,严重时甚至使建筑物倒塌。因此,在不均匀或软弱地基上修建建筑物时,必须考虑土的压缩性和地基变形等方面的问题。研究区第四系沉积环境差异大,沉积厚度差别大,地下空间开发须关注此类地质结构。

2.3.2 地质问题

(1) 潜水埋深

潜水对地下空间开发利用的影响主要表现为2种方式:一是由于工程施工改变地下水流场引发的渗流潜蚀,甚至管涌;二是地下水对地下结构会产生巨大的托浮力,如果抗浮措施不力,将引发建筑结构破坏。研究区第四系发育,地下潜水埋深以2~6 m为主,以成都市地铁主要开发深度15~30 m作为参考,潜水埋深越大,对浅层地下空间开发影响越小,开发越有利。

(2) 含水层富水性

在地下空间开发利用过程中,不可避免地要与地下水进行接触,其水量的大小将直接决定开发的难度,在水量丰富的地层施工,其发生突涌、冒砂的可能性急剧加大,且造成基坑降水困难,增加施工难度。研究区第四系卵砾石层中普遍含水,单孔出水量最大可达2500 m³/d,地下空间开发时排水、隔水措施须到位。

(3) 地下水腐蚀性

地下水所含有的侵蚀性CO₂、SO₄²⁻、Cl⁻等介质对混凝土结构物和钢结构及设备的腐蚀破坏较明显,故在工程上要对地下水的腐蚀性进行评价。研究区白垩系灌口组部分层位发育钙芒硝,在地下水活跃的地区,当该层位与地下水发生联系时,会使水中SO₄²⁻浓度显著升高,形成强腐蚀性地下水,对地下空间开发利用不利。

(4) 砂土

一方面地下工程施工降水时,砂土随着降水流失;另一方面,在砂土层进行地下盾构时,也容易出现超挖现象,造成地面沉降等灾害,因而砂土层的厚度将直接决定工程施工的成本和难度,研究区钻孔揭示,单孔砂层累计厚度可达4 m,一般地下空间开发遇到2 m厚的砂层就须采取特殊措施进行处理,因此,关注研究区砂层分布及厚度变化趋势有利于地下空间开发利用。

(5) 软土(淤泥土)

软土会导致地基产生失稳和不均匀变形,这对构筑物的地基要求高,一般来说,软土层越厚,对地下空间的开发越不利。研究区河流、坑塘发育,局部软土厚度可达1 m,地下空间开发须关注此类问题。

(6) 膨胀性粘土

膨胀土及其工程性质膨胀土是颗粒高分散、成分以粘土矿物为主、对环境的湿热变化敏感的高塑性粘土,它是一种吸水膨胀软化、失水收缩干裂的特殊土,工程界常称之为灾害性土,其产生的膨胀力不容小觑,常加剧建筑物变形甚至失稳。

(7) 有毒有害气体

地下工程在施工过程中,由于工程开挖,导致围岩层中瓦斯逸出,造成地下空间内部瓦斯浓度较高,一旦处于瓦斯气体的爆炸限值之间,会严重威胁施工安全,国内外由于忽视有毒有害气体导致工程事故的案例不在少数。浅层瓦斯气体的局地赋存,导致了研究区地下空间开发利用受到制约^[31],成都地铁在龙泉山隧道施工过程中,就曾发生过瓦斯气燃爆事故,造成了较大的损失,而研究区东南侧区域靠近瓦斯气富集地带,评价时须关注。

2.3.3 评价指标体系

根据评价原则,将地下空间开发利用难度分为难度低、难度较低、难度较高、难度高4个等级。其评价指标体系及层次结构如图4所示。

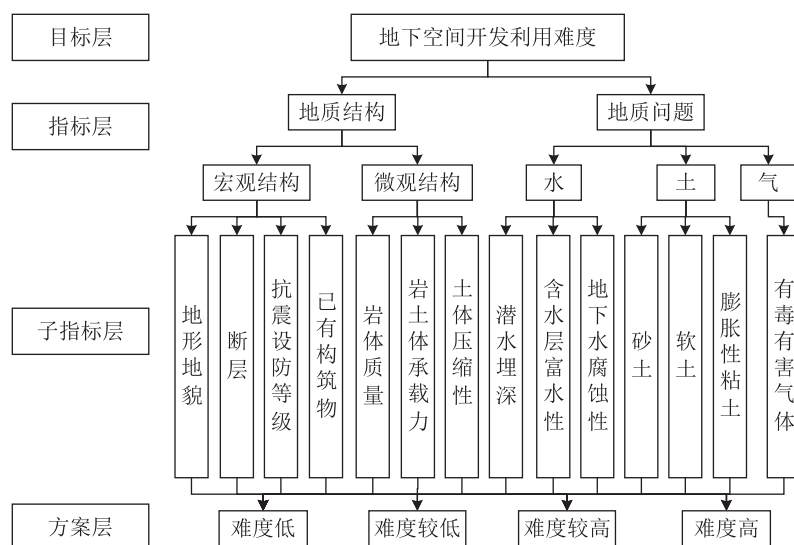


图4 评价指标体系及层次结构

Fig. 4 Evaluation index system and hierarchy diagram

2.4 权重计算

当前,被多数学者所接受的地下空间开发层数为4层,但各层位所界定的深度不统一。依据成都市地质结构特征,将研究区地下空间分为浅层(0~30 m)、中层(30~60 m)、中深层(60~100 m)、深层(100~200 m)4个层位。

不同的区域,不同的开发深度,影响地下空间开发利用的因素也不同,如影响浅层地下空间开发的地形地貌,在中层以下则不复存在,不同因素的影响力度也随着深度的改变而改变,因此,评价指标重要性等级将根据其所在层位分层确定(表6)。

表6 地下空间开发利用难度评价指标重要性等级

Table 6 The importance level of the difficulty evaluation index of underground space development and utilization

适用范围	平面分区	平原区				台地区				丘陵区				低山区			
	评价指标	0~ -30	-30~ -60	-60~ -100	-100~ -200	0~ -30	-30~ -60	-60~ -100	-100~ -200	0~ -30	-30~ -60	-60~ -100	-100~ -200	0~ -30	-30~ -60	-60~ -100	-100~ -200
地质结构	地形地貌	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○
	已有构筑物	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○
	断层	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	抗震设防等级	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	岩体质量	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	岩土体承载力	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○
	土体压缩性	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○
地质问题	潜水埋深	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	含水层富水性	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	地下水腐蚀性	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	砂土	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	软土	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	膨胀性粘土	●	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	有毒有害气体	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●

注:●表示重要性指标,○表示一般性指标

以 0~30 m 浅层地下空间为例,依据前文所述层次分析法,可确定各因子评价权重(表 7)。

2.5 隶属度矩阵

根据隶属度矩阵的定义及评价指标体系可知,评价指标集 $U=\{\text{地形地貌,已有构筑物,断层,抗震设防等级,岩体质量,岩土体承载力,土体压缩性,潜水埋深,含水层富水性,地下水腐蚀性,砂土,软土,膨胀性粘土,有毒有害气体}\}$,评判集 $V=\{\text{开发难度低,开发难度较低,开发难度较高,开发难度高}\}$,根据表 8 所示的各评价指标取值,可获取评价指标对评判集的隶属度,形成 14 行、4 列的评判决策矩阵 R。

2.6 综合评价

利用 ArcGIS 平台强大的空间分析功能,将工作区各个评价基础图层剖分为 100 m×100 m 的评价单元,对各评价单元进行模糊综合评判,在模糊评价的基础上,叠加限制性要素及地质资源评价结果(图 5),最终形成研究区地下空间开发利用地质适宜性评价成果(图 6)。

表 7 浅层地下空间评价指标权重取值

Table 7 Weight of evaluation index for shallow underground space

一级指标	二级指标	组合权重
地质结构(0.6)	地形地貌(0.098)	0.059
	断层(0.196)	0.118
	抗震设防等级(0.049)	0.029
	已有构筑物(0.136)	0.082
	岩体质量(0.245)	0.147
	岩土体承载力(0.177)	0.106
地质问题(0.4)	土体压缩性(0.098)	0.059
	潜水埋深(0.245)	0.098
	含水层富水性(0.349)	0.140
	地下水腐蚀性(0.123)	0.049
	砂土(0.068)	0.027
	软土(0.073)	0.029
	膨胀性粘土(0.072)	0.029
	有毒有害气体(0.071)	0.028

表 8 评价指标取值

Table 8 Values of evaluation index

因子名称		评价指标分级标准				备注
一级	二级	难度低	难度较低	难度较高	难度高	
地质结构	地形地貌	≤10°	10°~25°	25°~45°	≥45°	与断层距离
	断层	≥500 m	200~500 m	100~200 m	≤100 m	
	抗震设防等级	≤5	6	7	≥8	
	已有构筑物		其他区域	构筑物影响区域	构筑物区域	BQ
	岩体质量	>550	350~550	250~350	≤250	
	岩土体承载力	≥500 kPa	500~200 kPa	200~100 kPa	≤100 kPa	
地质问题	土体压缩性	≤0.1 MPa	0.1~0.25 MPa	0.25~0.50 MPa	≥0.5 MPa	气体浓度
	潜水埋深	≥30 m	30~20 m	20~10 m	≤10 m	
	含水层富水性	差	中	较好	好	
	地下水腐蚀性	微	弱	中	强	
	砂土累计厚度	≤2 m	2~5 m	5~10 m	≥10 m	
	软土累计厚度	≤2 m	2~5 m	5~10 m	≥10 m	
	粘土膨胀性	无	弱	中	强	
	有毒有害气体	≤0.5%	0.5%~1%	1%~1.5%	≥1.5%	

注:BQ 指《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)中岩体基本质量指标

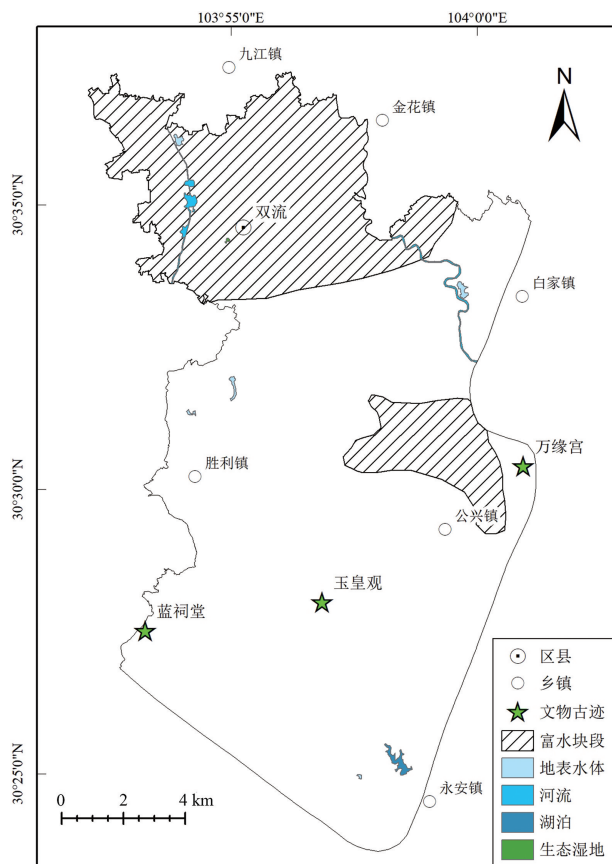


图5 研究区地质资源分布图

Fig. 5 Distribution of geological resources

评价结果显示,研究区不同层位地下空间开发利用适宜性评价结果不相同,随着深度的增加,适宜性好、较好之和所占面积比呈现出递增的趋势,适宜性较差、差面积之和则与之相反,呈现出递减的趋势。表明地下空间开发利用地质适宜性与垂向方向表现出负相关的总体态势,越向下,地下空间开发利用越有利。同时,各层位地下空间开发所面临的主要问题亦有所不同,其地下空间开发利用地质适宜性综合评价分区结果如下。

(1)浅层(0~30 m)地下空间开发利用地质适宜性评价结果见图6-a,其中适宜性好的区域占总面积的15.50%,适宜性较好占26.50%,适宜性较差占33.60%,适宜性差占24.40%,浅层地下空间总体适宜性差、适宜性较差区域集中在研究区北部及中南部地带。在北部区域,由于地表建筑较多,已有构筑物密集分布,且该地段富水砂砾卵石分布广泛,其涌水量最大可达2500 m³/d,富水砂砾卵石层一

直是研究区较难处理的地质层位,极不利于地下空间开发;中部有软土、砂土分布,且地下水埋藏较浅,腐蚀性中等、土体承载力普遍不高。综合评价认为,浅层地下空间开发适宜性较差,但在研究区中部东、西两侧因地质结构较好,地下空间面临的问题较少,地面开发强度较低等原因,其开发利用适宜性好。

(2)次浅层(-30~-60 m)地下空间开发利用地质适宜性评价结果见图6-b,其中适宜性好的区域占总面积的22.80%,适宜性较好占39.50%,适宜性较差占19.70%,适宜性差占18.00%,次浅层地下空间评价结果呈现出明显的分界性,大致以牧马山组界限分为南北2个部分,南部比北部更适宜进行地下空间开发。北部地区存在较厚的砂砾卵石层,作为研究区水量丰富的富水地块,极不利于地下空间开发,此层位开发利用地下空间除了面临极高的流砂、管涌风险外,还面临在大粒径砾石施工时可能出现的“超挖”现象,进而引发地面塌陷问题。综合评价结果认为,中层地下空间研究区南部更适合开发,北部开发难度大的主要制约因素是富水砂砾卵石层,不建议在该区域该层位进行地下空间开发利用。

(3)中层(-60~-100 m)地下空间开发利用地质适宜性评价结果见图6-c,其中适宜性好的区域占总面积的55.60%,适宜性较好占26.60%,适宜性较差占12.50%,适宜性差占5.30%。中层地下空间总体适宜开发,研究区中部、南部主要为白垩系灌口组,岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩与泥质粉砂岩不等厚互层,该地层富水性差,为研究区相对隔水层,水力条件有利于地下空间开发,因该地层局部富集钙芒硝,需要防范地下岩土水的腐蚀性问题,但其对地下空间的影响有限;研究区北部主要的制约性要素为富水砂砾卵石层及断层破碎带,综合评价认为,中层地下空间总体适宜开发,需要注意防范的问题是断层破碎带及富水砂砾卵石层。

(4)深层(-100~-200 m)地下空间开发利用地质适宜性评价结果见图6-d,其中适宜性好的区域占总面积的27.50%,适宜性较好占63.20%,适宜性较差占8.70%,适宜性差占0.60%。深层地下空间主要面临的地质问题为北部的断层破碎带及局部的富水地层,但其面积较小,影响范围不大。与中层地下空间相比,深层地下空间有其独特的特点,

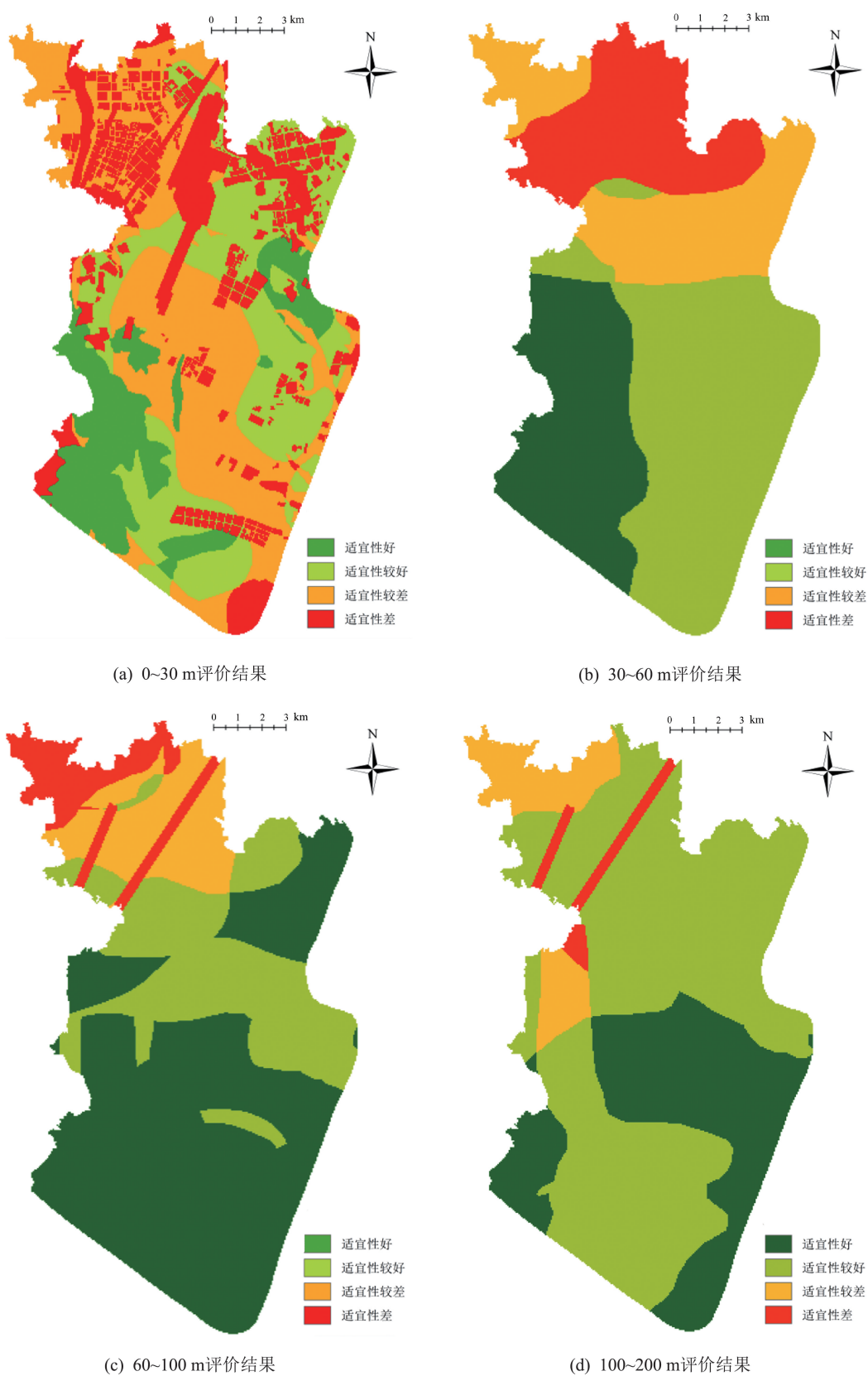


图 6 各层位适宜性评价结果统计图

Fig. 6 Statistics of the evaluation results of each layer suitability

其适宜性较好和适宜性好的面积总和最大,但适宜性好的面积小于中层地下空间区域,其原因在于该层位钙芒硝丰富,一旦地下空间开发使水力条件发生改变,极易引起钙芒硝溶蚀,从而降低岩体强度;此外,溶蚀后的液体具有极强的腐蚀性,对地下空间开发不力。综合评价结果认为,深层地下空间总体适宜开发,主要制约因素为断层破碎带,同时应注意防范钙芒硝溶蚀引起的一系列问题,进行开发时需要采取隔水及防腐蚀措施。

3 评价结果讨论

地下空间资源是一种不可逆的宝贵资源,一旦开发利用很难恢复,国内外由于盲目开发地下空间资源导致的一系列工程事故、环境地质问题时有发生,施工过程中突水、涌砂甚至出现地面塌陷,往往引起较大的社会反响,造成事故的原因虽然是多方面、多层次的,但此类事故完全可以在开发地下空间前通过先期的地质适宜性评价来降低风险。

本次研究的目的是为地下空间开发利用规划提供有效指引,旨在推动研究区地下空间资源的合理、有序开发,因此,在评价基本理念上,创新地将赋存在地下空间中的各类地质资源进行耦合评价,在评价中赋予其足够的分量,以达到在地下空间评价过程中资源保护优先、协同开发为主的基本评价格局。然而,目前对地下地质资源的评价及其在评价结果当中所占的权重尚未有统一的标准,但本文所采用的评价模型,以及在评价过程中充分考虑地质资源属性的评价方法,可为其他地区的地下空间开发提供一种新的思路。另外,本次研究的结果为二维静态评价,未来可考虑基于三维地质模型的动态评价。

4 结 论

(1) 将影响地下空间开发利用地质适宜性的影响因素分为地质资源、地质结构、地质问题三大类,其中地质资源包括水资源和文物古迹资源,而地质结构包括地形地貌、断层、抗震设防等级、已有构筑物等宏观结构,以及岩体质量、岩土体承载力、土体压缩性等微观结构,地质问题则归纳为水、土、气 3 类指标、7 个影响因子。

(2) 评价结果显示,随着深度的增加,研究区地下空间开发利用适宜性好、较好之和所占面积比呈

现出递增的总体趋势,浅层地下空间虽然开发难度小,但由于已有构筑物较多,其适宜开发的区域反而较小,次浅层地下空间由于存在大量的基覆界面、富水砂砾卵石层,因而开发存在一定难度,中层、深层为地下空间开发利用适宜性区域,适合大规模开发利用。

(3) 基于层次分析-模糊综合评价法,对研究区进行地下空间开发利用适宜性评价,在本次研究中取得了较科学、合理的结果,特别是统筹考虑地质资源的评价模型,可为相似地区地下空间资源评价提供一种新的思路,未来可基于三维地质模型进行立体评价,使评价结果具有动态属性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 郭超,阎长虹,刘军熙,等.基于 GIS 的东营市浅层地下空间质量评估[J].工程地质学报,2014,22(2): 334-340.
- [8] Sterling R L, Nelson S R. Planning for underground space: a case study for Minneapolis, Minnesota [M]. Minnesota: The Center Press, 1982.
- [9] Boivin D J. Underground space use and planning in the Quebec city area [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5 (1/2): 69-83.
- [10] Ronka K, Ritola J, Karl R. Underground space in land use planning [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 39-49.
- [11] de Rienzo F, Oreste P, Pelizza S. 3D GIS supporting underground urbanisation in the city of Turin (Italy) [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(1): 539-547.
- [12] Hamidreza N, Farhang S, Mohammad A. Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 358-364.
- [13] 欧孝夺,杨荣才,周东,等.AHP 法在南宁市地下空间开发地质环境适宜性评价中的应用[J].桂林工学院学报,2009,29(4): 474-480.
- [14] 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.
- [15] 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,2011,7(2): 219-231.
- [16] 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.
- [17] 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): 128-135.
- [18] 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): 62-66,71.
- [19] 江思义,吴福,王启耀,等.岩溶地区地下空间开发适宜性评价——以桂林市规划中心城区为例[J].桂林理工大学学报,2019,39(2): 402-409.
- [20] 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.
- [21] 张丽,李瑞敏,许书刚,等.江苏宜兴市地质资源环境承载力评价[J].地质通报,2020,39(1): 131-137.
- [22] 吕文凯,周金星,万龙,等.滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J].地球学报,2021,42(3): 341-351.
- [23] 蒋杰,葛伟亚,马青山,等.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,2021,40(5): 734-744.
- [24] 宋晓帅,于开宁,吴振,等.莱州湾海岸带工程地质环境质量分区[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(2): 79-89.
- [25] 李颖智,蔡五田,耿婷婷,等.区域地下水污染调查取样点布设量化分配方法[J].水文地质工程地质,2019,46(5): 24-30.
- [26] 梁乃森,钱程,穆文平,等.大牛地气田区地下水水质模糊综合评价[J].水文地质工程地质,2020,47(3): 52-59.
- [27] 张杰,毕攀,魏爱华,等.基于模糊综合法的烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价[J].中国岩溶,2021,40(2): 215-220.
- [28] 梁乃森,钱程,穆文平,等.大牛地气田区地下水水质模糊综合评价[J].水文地质工程地质,2020,47(3): 52-59.
- [29] 王羽珂,陈浩,冯兴雷,等.成都平原东郊台地中更新统合江组沉积特征及工程地质意义[J].沉积与特提斯地质,2019,39(3): 33-39.
- [30] 董顺利,李勇,乔宝成,等.汶川特大地震后成都盆地内隐伏断层活动性分析[J].沉积与特提斯地质,2008,28(3): 1-7.
- [31] 郭子奇,李胜伟,王东辉,等.浅析四川成都龙泉山城市森林公园主要环境地质问题[J].沉积与特提斯地质,2019,39(4): 90-99.