

银川市地下空间资源综合质量评价

闫金凯¹, 赵银鑫², 王志恒³, 王志辉¹, 刘凯¹, 任天翔¹, 徐博¹

YAN Jinkai¹, ZHAO Yinxin², WANG Zhiheng³, WANG Zhihui¹, LIU Kai¹, REN Tianxiang¹, XU Bo¹

1. 中国地质科学院, 北京 100037;

2. 宁夏回族自治区地质调查院, 宁夏 银川 750021;

3. 南京大学, 江苏 南京 210046

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Ningxia Institute of Geological Survey, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

3. Nanjing University, Nanjing 210046, Jiangsu, China

摘要:城市经济的快速发展导致地面用地日趋紧张,对城市地下空间资源进行综合质量评价,进而高效合理地开发地下空间成为解决城市病问题的重要途径。以银川市为例,开展地下空间资源综合质量评价。分别建立了地下空间资源开发难度、潜在价值和综合质量评价模型,确定了包括地质条件、环境条件、社会经济条件等诸多因素在内的评价指标。采用层次分析法,结合专家问卷调查,确定各评价指标的权重。运用GIS技术,评价银川市地下空间资源开发难度和潜在价值,得出银川市地下空间资源综合质量评价结果。结果表明,银川市浅层地下空间资源开发难度主要受岩土体问题的影响,以及受生态保护要求与既有建筑设施因素的制约。潜在价值高的区域为中心城区及永宁县、贺兰县的城区,中心城区的鼓楼周边地区、火车站、汽车站等核心区域的地下空间资源综合质量等级最高。该评价结果对银川城市发展规划和地下空间开发利用具有较高的参考价值。

关键词:地下空间资源;开发难度;潜在价值;综合质量评价;层次分析法

中图分类号:TU984.11⁺3;P62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)10-1636-07

Yan J K, Zhao Y X, Wang Z H, Wang Z H, Liu K, Ren T X, Xu B. Comprehensive quality evaluation of underground space resources in Yinchuan City. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1636-1642

Abstract: The rapid development of urban economy has led to the increasing shortage of ground land. The evaluation of comprehensive quality of urban underground space resources for the efficient and reasonable use of underground space becomes an important way to solve the problem of urban diseases. Taking Yinchuan City as an example, the comprehensive quality evaluation of underground space resources was carried out. The difficulty, potential value and comprehensive quality evaluation models of underground space resources development were established respectively, and the evaluation indexes including geological conditions, environmental conditions and social and economic conditions were determined. The weight of each evaluation index was determined by using analytic hierarchy process (AHP). By using GIS technology, the difficulty and potential value of underground space resources development in Yinchuan City were evaluated, and the comprehensive quality evaluation results of Yinchuan underground space resources were obtained. The results show that the development difficulty of shallow underground space resources in Yinchuan City is mainly affected by rock and soil problems, as well as obviously restricted by ecological protection requirements and existing building facilities. The areas with high potential value are the central urban area and the urban areas of Yongning county and Helan County. The underground space resources

收稿日期:2020-06-10; **修订日期:**2021-03-25

资助项目:中国地质调查局项目《典型地区地下空间资源调查评价》(编号:DD20211314)和宁夏回族自治区财政厅财政专项《银川都市圈城市地质调查》(编号:宁财[预]发[2017]320号)

作者简介:闫金凯(1981-),男,博士,高级工程师,从事地质灾害及地下空间等方面的研究。E-mail: yanjinkaisw@163.com

around drum Tower, railway station, bus station and other core areas in the central urban area have the highest comprehensive quality grade. The evaluation results have high reference value for urban development planning and underground space development and utilization in Yinchuan City.

Key words: underground space resources; development difficulty; potential value; comprehensive quality evaluation; analytic hierarchy process

随着经济的快速发展和城市化进程的全面推进,城市建筑用地紧张、生存空间压缩、道路交通拥堵等问题日益凸显,严重影响人们的生活质量,制约城市的可持续发展。高效合理地开发利用地下空间已成为解决上述各问题的必要途径。科学评估城市地下空间资源开发潜力、难度、价值及综合质量是实现地下空间合理规划的重要基础工作。

地下空间资源综合质量是描述地下空间开发总体适宜性的指标,主要通过地下空间资源开发利用难易程度和资源开发的潜在价值 2 个分指标体现。诸多学者对城市地下空间资源综合质量及相关内容开展过研究^[1-19];郭建民等^[1]采用层次分析法对北京旧城区的地下空间资源潜在价值进行了评估;廖建三等^[2]对影响广州的浅层地下空间开发利用的地质因素进行了分区评价;吴立新等^[3]采用模糊综合评估方法对北京 CBD 地下空间资源质量进行了评估;王永立^[4]基于 GIS-Fuzzy 综合评判模型对天津市地下空间资源展开评估;Bobylov^[5-6]对地下空间的质量、数量及地下基础设施深度、功能进行了统计分析,同时进行了数量、质量及历史利用等方面的评价;汪侠等^[8-9]分别基于多层次灰色评价方法和模糊综合评价法对南京市鼓楼区地下空间资源开发潜力进行了评价。这些研究多以地下空间资源的潜在价值或开发潜力评价为主,综合考虑地下空间资源开发难度和潜在价值的综合质量评价研究较少。

银川市作为宁夏回族自治区首府,近些年经济发展迅速,城市用地日趋紧张。针对银川市地质条件、城市建设、社会经济发展现状,开展银川市地下空间资源综合质量评价,对银川市城市发展和地下空间的合理有序开发利用具有重要意义。本文采用层次分析法等方法,综合考虑银川市地质

特征、地下空间利用现状及社会经济条件等因素,构建银川市地下空间资源评价模型与指标,并运用 GIS 技术,分别进行银川市地下空间资源开发难度评价和潜在价值评价,在此基础上对银川市浅层(0~15 m)地下空间资源综合质量开展评价研究。

1 研究区概况

本次评价范围为银川市城区。银川市位于黄河上游宁夏平原中部,地形分为山地和平原两大部分。西部、南部较高,北部、东部较低,略呈 SW—NE 向倾斜。地貌类型多样,自西向东分为贺兰山地、洪积扇前倾斜平原、洪积冲积平原、冲积湖沼平原、河谷平原、河漫滩地等。地层为第四系、新近系和古近系,0~15 m 范围内岩性主要为砂土、粘土及砂砾石(图 1)。区内地下水类型为基岩裂隙水和第四系松散岩类孔隙水。银川市地下空间资源的开发利用处于初始阶段,开发利用程度低。地下空间利用类型主要为地下车库、地下室、管廊、地下商场和人防工程,具有开发深度浅、分布散乱、不成规模等特点。

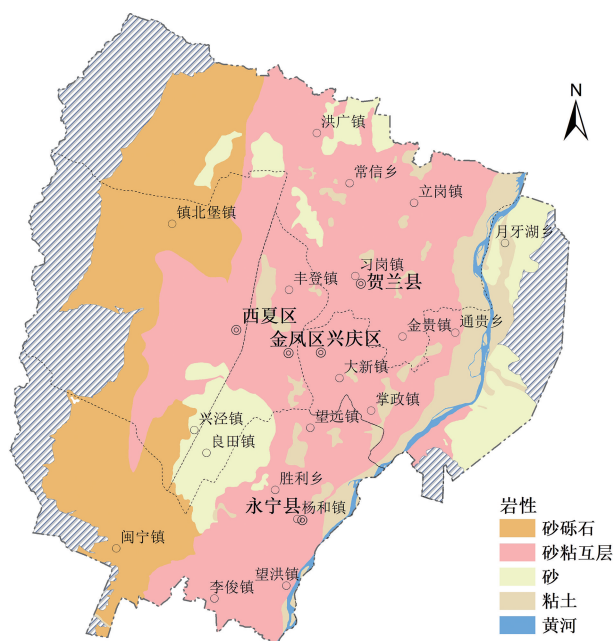


图 1 银川市地层岩性分布图

Fig. 1 Distribution map of stratum lithology in Yinchuan City

2 评价指标体系

2.1 评价方法

影响地下空间资源综合质量评价的因素较多,这些因素相互联系、相互制约,具有较高的复杂性和多层次性,用精确的数据模型来求各影响因素的权重向量难度较大,一般采用层次分析法来解决该类问题。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是一种定性和定量相结合、多准则决策评价方法,通过研究分析决策目标和影响因素的内在关系将复杂问题层次化和数学化,建立简洁明确的层次分析结构模型,构造判断矩阵计算影响因素相对决策目标的权重值,最终排出各方案优劣顺序^[20]。然后,采用多因子综合评判模型,将评价指标评分按照权重叠加,利用 GIS 技术实现评价结果。

2.2 评价模型

(1) 地下空间资源开发难度评价模型

地下空间资源的开发难度主要由工程地质条件和城市环境制约因素构成。对于银川地区来说,影响地下空间资源开发难度的控制指标见表 1,其评价模型为:

$$S_d = \alpha \sum_{j=1}^m w_j \sum_{k=1}^n w_{jk} u_{jk} \quad (1)$$

式中: u_{jk} 为第 j 个指标层中第 k 个指标的值; w_{jk} 为第 j 个指标层中第 k 个指标的权重; w_j 为第 j 个主题层的权重; S_d 为开发难度的评价结果; α 为难度折减系数,通常开挖深度越深,其施工难度越大。根据以往经验,本次评价对应于浅层地下空间,折减系数取 1。

(2) 地下空间资源潜在价值评价模型

地下空间资源的潜在价值是对地下空间资源所在城市区位可能获得的经济、社会和环境效益期望水平进行的综合评价。通过大量调研,最终确定了银川市地下空间资源开发的潜在价值评价指标 (表 2)。利用多因素加权平均的方法,基于社会经济条件的地下空间资源潜在价值评价模型为:

$$S_e = \alpha \sum_{j=1}^m w_j u_j \quad (2)$$

式中: u_j 为第 j 个指标的数值; w_j 为第 j 个指标的权重; S_e 为潜在价值的评估结果; α 为价值折减系数,开挖深度越深,开发潜在价值越小。

表 1 浅层地下空间资源开发难度评价指标

Table 1 Evaluation index of development difficulty of shallow underground space resources

目标层	主题层	指标层
地下空间资源开发难度	地形地貌	地面标高
		地形坡度
	不良岩土体	地层岩性
		砂土液化
	水文地质	富水性
		潜水埋深
	水资源保护	二级水源地
	生态敏感性	生态空间敏感性
	既有建筑物	建筑物类型

(3) 地下空间资源综合质量评价模型

地下空间资源开发的综合质量通过对地下空间资源开发难度和潜在价值进行叠加计算获得,体现了地下空间资源在地质、环境和社会经济条件等诸多因素影响下的综合价值。地下空间资源综合质量评估模型的计算公式为:

$$S = w_d S_d + w_e S_e \quad (3)$$

式中: w_d 、 w_e 分别为自然因素与社会经济因素的权重; S_d 、 S_e 分别为资源开发难度和潜在价值评估值; S 为综合质量。

2.3 评价指标权重

本次研究采取层次分析法 (AHP) 和指标影响程度比较来获取指标权重。层次分析法通过两两对比矩阵确定评价指标权重,可以对人的主观判断 (定性分析) 进行定量化,帮助决策者保持思维过程的一致性,将各种评价指标之间的差异数值化,从而确定这些指标的权重。各评价指标的权重见表 3、表 4、表 5。

表 2 地下空间资源潜在价值评价指标

Table 2 Evaluation index of potential value of underground space resources

目标层	主题层	指标层
地下空间资源潜在价值	社会经济条件	区位条件
		人口状况
		交通状况
		商业基准地价
		城市用地类型

表 3 银川市浅层地下空间资源开发难度指标权重

Table 3 Weight of development difficulty index of shallow underground space resources in Yinchuan City

主题层	权重	指标层	权重	权重总序
地形地貌	0.100	地面标高	0.5	0.050
		地形坡度	0.5	0.050
不良岩土层	0.214	地层岩性	0.5	0.107
		砂土液化	0.5	0.107
水文地质	0.259	富水性	0.6	0.155
		潜水位埋深	0.4	0.104
水资源保护	0.185	二级水源地	1	0.185
生态敏感性	0.158	生态空间敏感性	1	0.158
既有建筑物	0.084	建筑物类型	1	0.084

2.4 评价指标分级量化

对地下空间资源开发难度和潜在价值评价指标进行分级量化,每个指标基本划分为 4 个级别,并逐一对划分级别后的单个要素指标进行赋值,根据银川市的实际情况,评价指标不同级别的评分情况见表 6、表 7。根据银川市城市地质调查成果,制作各评价指标的分区图,部分指标分区如图 2 所示。

2.5 评价结果等级划分

采用前述的评估模型和方法,基于 ArcGIS 的空间分析功能,将各单因子图层加权叠加,采用分值区间评价分配的原则,对评价结果进行等级划分(表8)。

3 评价结果及分析

3.1 地下空间资源开发难度评价

银川市浅层地下空间资源开发难度分级如图 3

表 4 地下空间资源潜在价值指标权重

Table 4 Weight of potential value index of underground space resources

主题层	权重	指标层	权重	权重总序
社会经济条件	1	区位条件	0.345	0.345
		人口状况	0.115	0.115
		交通状况	0.230	0.230
		商业基准地价	0.172	0.172
		城市用地类型	0.138	0.138

表 5 地下空间资源综合质量权重

Table 5 Weight of comprehensive quality index of underground space resources

指标	权重
地下空间资源开发难度	0.2
地下空间资源潜在价值	0.8

所示,表 9 为相应的开发难度分级说明。银川市地下空间资源开发难度评价结果显示以下特征:浅层地下空间资源开发难度受岩土体问题的影响,以及受生态保护要求与既有建筑设施因素的制约明显。

3.2 地下空间资源潜在价值评价

通过对研究区的人口、交通、经济、用地类型等因素进行加权整合,可以得出研究区的地下空间资源潜在价值分布图(图 4)。

潜在价值高的区域为中心城区,以及永宁县、贺兰县城区,面积共计 213.6 km²,占 4.9%。其中,兴庆区鼓楼周围主要为核心区住宅和商业区,受区位地理位置影响,该区域商住用地密集,地下空间的需求比较大,具有较大的开发潜力。

表 6 地下空间资源开发难度指标分级评分

Table 6 Graded scoring of development difficulty index of underground space resources

主题层	指标层	一级	二级	三级	四级
		1	0.67	0.33	0
地形地貌	地面标高/m	950~1200	1200~1500	1500~2000	>2000
	地形坡度/°	<5	5~10	1~30	>30
不良岩土层	地层岩性	砂粘互层	砂	粘土/淤泥	砂砾石
	砂土液化	无液化	轻度液化	中度液化	重度液化
水文地质	富水性/(m ³ ·d ⁻¹)	<500	500~1000	1000~3000	>3000
	潜水位埋深/m	>15	10~15	5~10	<5
水资源保护	二级水源地	水源地外			水源地内
生态敏感性	生态空间敏感性	非敏感区	市县级	省级	国家级
既有建筑物	建筑物类型	非建筑区	低层建筑	中层建筑	高层建筑

表 7 地下空间资源潜在价值指标分级评分

Table 7 Graded scoring of potential value index of underground space resources

主题层	指标层	一级	二级	三级	四级
		1	0.67	0.33	0
	区位条件	I 级区位	II 级区位	III 级区位	IV 级区位
	人口状况/(万人·km ⁻²)	>0.09	0.06~0.09	0.03~0.06	<0.03
社会经济条件	交通状况	需求 I 级	需求 II 级	需求 III 级	需求 IV 级
	商业基准地价/(元·m ⁻²)	>4832	2776~4832	1471~2776	<1471
	城市用地类型	商业金融及居住用地	交通用地	工业用地	生态用地与水面

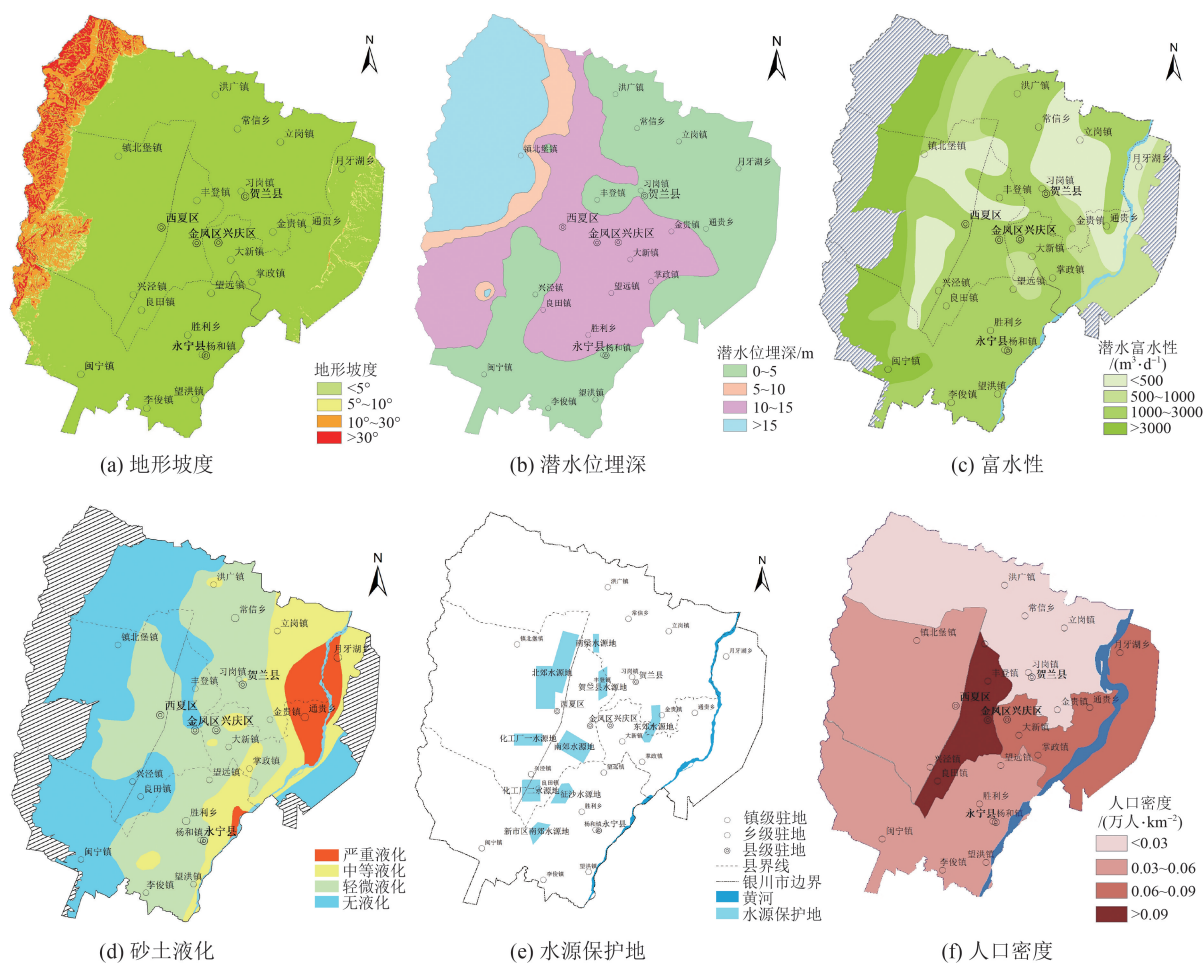


图 2 评价指标分区图

Fig. 2 Partition maps of evaluation index

潜在价值较高的区域主要位于中心城区、永宁县、贺兰县城区的周边,面积共 125.3 km²,占 2.87%。受人口密度的影响,该区域人口密度较集中,考虑到住宅区域的停车、民防需求,该区域具有部分开发潜力。

潜在价值较低的区域面积较大,共 2544.81 km²,占 58.38%。该区域目前尚无大规模建设,人口密度较低,缺乏大型商业办公设施,如西夏区及金凤区的工业用地,考虑到民防需求及工业区的仓储用途,该区域也有一定的地下空间开发潜力,总体潜在价值较低。

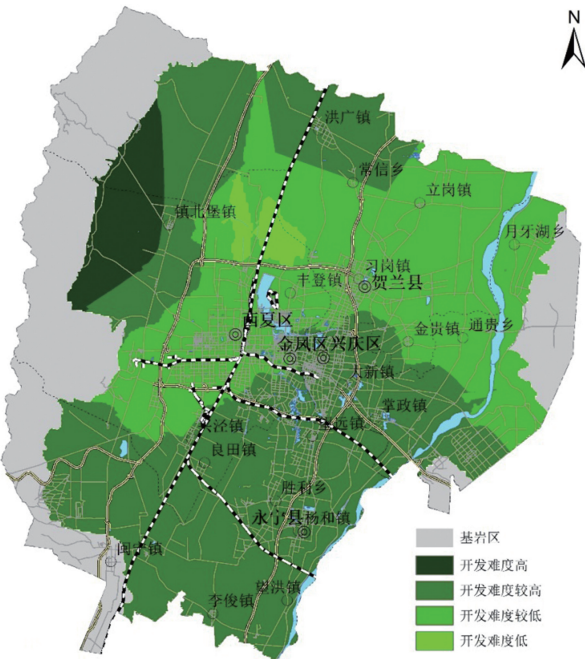


图 3 银川市浅层地下空间资源开发难度评价分区图

Fig. 3 Distribution map of development difficulty of shallow underground space resources in Yinchuan City

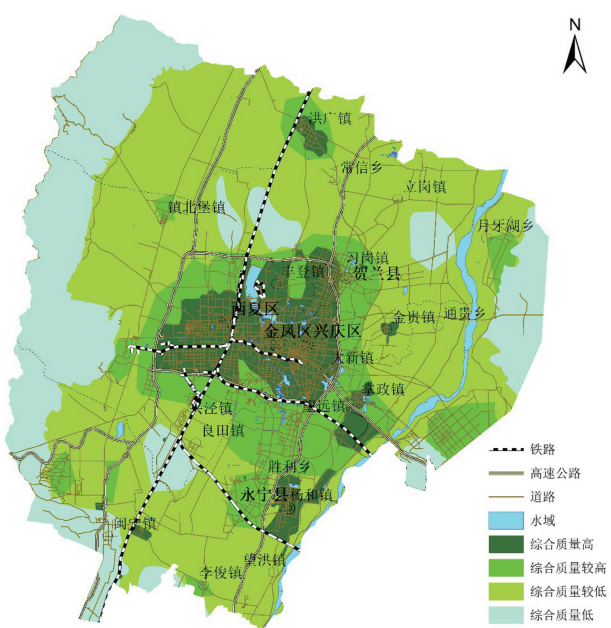


图 5 银川市浅层地下空间资源综合质量评价分区图

Fig. 5 Distribution map of comprehensive quality of underground space resources

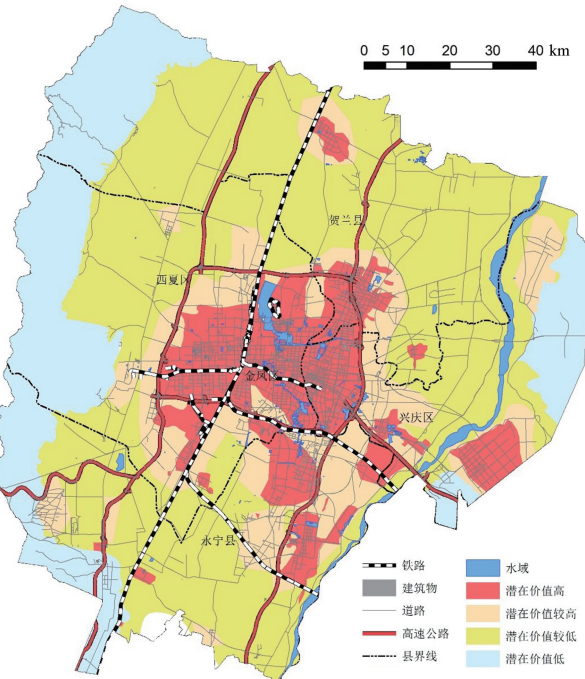


图 4 银川市地下空间资源潜在价值评价分区图

Fig. 4 Distribution map of potential value of underground space resources in Yinchuan City

潜在价值低的区域主要为以上地区之外的 1475.3 km²的范围,占 33.84%。该片区域目前除机场外尚无大规模的开发与规划,土地上多分布农田、保护区和文物遗址,开发价值低。

3.3 地下空间资源综合质量评价

采用本文阐述的评估模型和方法,基于 ArcGIS 的空间分析功能,将地下空间资源的开发难度和潜在价值进行叠加,生成浅层地下空间资源综合质量分级图(图 5)。图 4 反映了研究区的综合资源禀赋。其中,中心城区的鼓楼周边地区、火车站、汽车站等核心区域(共占地 150.8 km²)的地下空间资源综合质量等级最高,占 3.46%。城市核心区周边区域的地下空间资源综合质量等级次之,面积为 162.7 km²,占 3.73%。综合质量较低的区域面积为 2338.6 km²,占 53.65%。镇北堡镇以西的贺兰山山前地带

表 8 评价结果等级划分				
Table 8 Rank classification of evaluated results				
评价得分	0.75~1	0.5~0.75	0.25~0.5	0~0.25
开发难度等级	低	较低	较高	高
潜在价值等级	高	较高	较低	低
综合质量等级	高	较高	较低	低

表 9 银川市浅层地下空间资源开发难度分级结果

Table 9 Grading result of development difficulty of shallow underground space resources in Yinchuan City

开发难度分级	分布区域	说明	面积/km ²	占比比例/%
基岩区	主要包括贺兰山保护区及其山前地带及临黄河沿岸	主要受生态绿地及水源地分布限制,处于保护红线范围内,地下空间开发需避开该区域	1089	25
开发难度高	活动断裂带沿线及其相应避让区	工程地质条件差,主要制约因素是区域稳定性差,地下水富水性极强。一些区域为水源地、高速公路,浅层资源开发难度大	272	6.2
开发难度较高	一级阶地部分地区	工程地质条件一般,主要制约因素是砂土液化对此区域有轻微影响,同时地下水富水性强也会有一定影响。浅层资源开发难度一般	1460.3	33.5
开发难度较低	二级阶地地区	工程地质条件较好,地下空间开发难度较小	1394.6	32
开发难度低	三级阶地地区	工程地质条件良好,地下空间开发难度小	143.11	3.3

因区位价值最低导致其地下空间资源综合质量低,面积为 1706.91 km²,占 39.16%。

4 结 论

本文采用层次分析法等方法,运用 GIS 技术,对银川市浅层地下空间资源综合质量开展评价研究,主要取得了以下认识。

(1) 构建了银川市地下空间资源的数学评价模型,提出了影响地下空间资源开发的指标及权重,开展了银川市地下空间资源的开发难度、潜在价值及综合质量评价。

(2) 银川市浅层地下空间资源开发难度主要受岩土体问题的影响,以及受生态保护要求与既有建筑设施因素的制约明显。

(3) 潜在价值高和较高的区域为中心城区与永宁县、贺兰县的城区及周边地区,其余地区开发程度小,潜在价值较低。

(4) 银川市中心城区的鼓楼周边地区、火车站、汽车站等核心区域的地下空间资源综合质量等级最高,城市核心区周边区域的地下资源综合质量等级次之。

(5) 本文综合考虑银川市地质特征、地下空间利用现状及社会经济条件等因素,在地下空间资源

开发难度评价和潜在价值评价的基础上对银川市浅层地下空间资源综合质量进行评价,评价结果对银川市城市发展和地下空间的合理有序开发利用具有一定的参考意义。此外,本文仅针对银川市 0~15 m 的浅层地下空间资源开展了评价工作,更深层地下空间资源的评价工作有待进一步开展。

致谢:成文过程中,得到南京大学李晓昭教授的悉心指导与帮助,审稿专家对本文提出了许多宝贵意见与建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 郭建民,祝文君.基于层次分析法的地下空间资源潜在价值评估[J].地下空间与工程学报,2005,1(5): 655-664.
- [2] 廖建三,彭卫平,林本海.影响广州市浅层地下空间开发利用的地质因素分析及分区评价[J].岩石力学与工程学报,2006,25(s2): 3357-3362.
- [3] 吴立新,江云,车德福,等.城市地下空间资源质量模糊综合评估与 3D 可视化[J].中国矿业大学学报,2007,36(1): 97-102.
- [4] 王永立.天津市中心城区地下空间资源评价[J].地球科学与环境学报,2008,3(2): 43-47.
- [5] Bobylev N. Mainstreaming sustainable development into a city's master plan: A Case of Urban Underground Space Use[J]. Land use policy, 2009,26(4): 1128-1137.
- [6] Bobylev N. Underground Space in the Alexanderplatz Area, Berlin:

- Research into the Quantification of Urban Underground Space Use[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 495-507.
- [7] 黄于新, 郑伟锋, 郑先昌. 深圳宝安区地下空间评估的地质环境因子评价[J]. 广东土木与建筑, 2009, (3): 46-49.
- [8] 汪侠, 黄贤金, 甄峰, 等. 城市地下空间资源开发潜力的多层次灰色评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 1122-1127.
- [9] 汪侠, 黄贤金, 汤晋. 城市地下空间资源开发潜力的模糊综合评价[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(2): 213-218.
- [10] 王海刚, 贾三满, 杨艳, 等. 基于 GIS 的城市地下空间资源综合质量评估研究[J]. 上海国土资源, 2011, 32(1): 59-62.
- [11] 吴文博, 曹亮, 刘健, 等. 苏州地下空间开发地质环境因素的分析评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(2): 131-139.
- [12] 周臻, 吴文博, 李晓昭. 基于 GIS 的苏州城市地下空间开发综合价值评价[J]. 中国水运, 2013, 13(12): 86-88.
- [13] 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.
- [14] 赵旭东, 张平, 陈志龙. 历史文化街区地下空间资源质量模糊综合评估[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 739-744.
- [15] 叶菁, 侯卫生, 刘军熙, 等. 基于可变模糊集的城市地下空间资源三维质量评价[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2147-2156.
- [16] 李霞, 何庆成, 陈亮, 等. 四川成都中心城区地下空间开发利用的地质环境制约因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 141-150.
- [17] 何静, 郑桂森, 周圆心, 等. 城市地下空间资源探测方法研究及应用[J]. 地质通报, 2019, 38(9): 1571-1580.
- [18] 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.
- [19] 吴新珍. 芜湖市城市集中建设区地下空间资源评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 9-18.
- [20] Aviad S, Meir S. AHP-Based weighting of factors affecting safety on construction sites with tower cranes [J]. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 2009: 307-318.