

德州市中心城区地下空间资源潜力研究

颜翠翠^{1,2}, 康凤新³, 谭志容¹, 杨询昌¹, 冯克印⁴, 桑 可¹, 王世浩¹, 孙晓晓¹

(1. 山东省地勘局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东 德州 253072;
2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 3. 山东省地质矿产勘查开发局 济南 250013;
4. 山东省国土空间生态修复中心, 济南 250014)

[摘 要]为合理评价德州市中心城区地下空间资源潜力,研究工作从水文及水文地质、工程地质、环境地质、生态环境保护以及人类工程活动5个方面建立了由16个评价单因子组成的地下空间开发利用潜力评价指标体系,根据层次分析法评估结果将德州市中心城区地表以下不同深度内的地下空间划分为“可充分开发”、“不可充分开发”、“慎重与限制开发”三个等级区,并结合城市建设及环境条件,基于GIS平台开展了中心城区地下空间开发利用潜力评价。研究结果能够较为准确地反映地下空间开发利用潜力状况,具有实际的应用价值,可以为政府部门的管理和决策提供信息支持。

[关键词]德州;地下空间;层次分析法;开发利用潜力;评价

[中图分类号]P642 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2021)04-0456-010

1 引言

在二十一世纪,随着社会经济和人口的快速增长,城市建筑群逐年增加,市区范围不断向外扩展(Mao-sheng Zhang, 2020; 李晓昭等, 2019; 黄强兵等, 2019; 蒋旭等, 2018; Zhi-Long Chen, 2018)。城市生存环境日益恶化,同时地上可利用空间越来越匮乏,综合各方面的因素,地下空间的开发利用成为城市拓展的一个发展方向。地下空间是指在地球表面以下的土层或岩层中天然形成或经人工开发而成的空间,是人类宝贵的自然资源之一(Li Xiaozhao, 2016)。开发利用地下空间可以扩展新的使用空间,满足多功能要求,缓解地面上住宅、交通、生产及生活设施的用地紧张能够节约能源,提供安静和无大气污染的环境可以与地面防灾功能配合,实现防灾功能互补(任念等, 2020; Zhou Dankun, 2019; 孙利萍等, 2018; Zhu

Hehua, 2016; 柳昆等, 2011)。在建筑发展史上,19世纪是桥的世纪,20世纪是地上空间的世纪,21世纪将是地下空间的世纪。但是,受地质环境的控制,地下空间资源开发利用潜力,首先要清楚地掌握研究区域地下空间资源开发利用潜力过程中所涉及到的影响因素及所存在的问题,对未开发区域进行科学的评价并制定开发利用规划,保障城市地下水空间资源潜力合理有序开发利用,保障城市健康发展。

文章在系统地分析德州市水文及水文地质、工程地质、环境地质、生态环境保护以及人类工程活动等因素的基础上,建立德州市城市地下空间资源开发利用评价模型,开展了德州市城市地下空间开发利用地质环境适宜性评价(江思义等, 2019; 周琦等, 2019; 彭俊婷, 2015; 李恺, 2009; 郭建民等, 2005),估算了地下空间开发利用资源潜力。为德州市城市地下空间开发利用提供地学依据,对指导德州市城市地下空间开发利用规划具有重要意义。

[收稿日期]2021-06-03 [修回日期]2021-09-10

[基金项目]山东省地质矿产勘查开发局项目,山东省地下空间资源潜力调查,鲁地字(2020)4号。

[作者简介]颜翠翠(1989—),女,博士研究生,工程师,主要从事水工环地质等工作。E-mail:1422364257@qq.com。

2 研究方法

2.1 研究区环境条件

此次研究以德州市城市总体规划(2021—2025年)划定的德州市中心城区范围作为研究区范围,总面积261.3 km²,包括城区的建成区和规划区,行政区划上自西向东包括商贸开发区、德城区、河东新区和高铁新区,西以德州市行政界线为界、南以南外环、东以京沪高铁东待建的快速路36号线、北以北外环为界。极值坐标为东经116°13'04"~116°28'49",北纬37°22'09"~37°30'51",根据地下空间与地表的距离关系以及地下空间开发利用性质和功能,对地下空间资源竖向分层按地面下0~30 m、30~100 m、100~200 m进行评价(图1)。

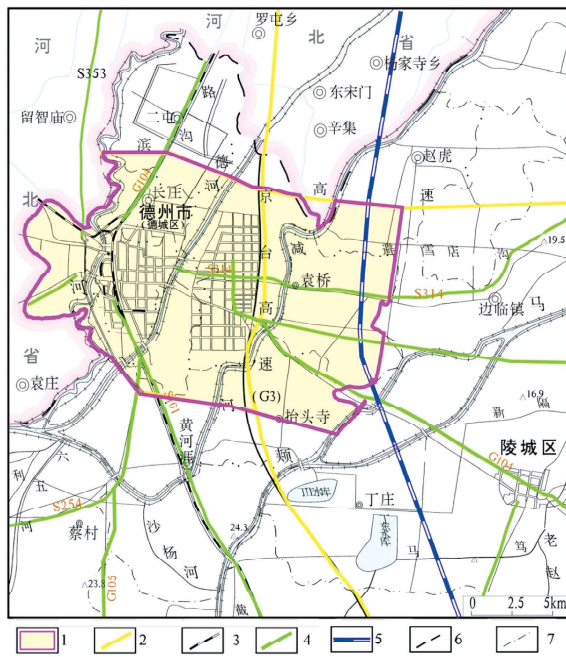


图1 研究区范围交通位置图

Fig. 1 Traffic location map of the study area

1—研究区范围;2—已建高速公路;3—已建铁路;4—公路;5—已建高铁;6—省界;7—县市区边界

2.2 评价方法

由于涉及地下空间资源开发利用的影响因素较多,各个评价因素具有不同属性、不同定性或定量标准、不同度量标准,而且评价因素之间具有多层次性及多复杂性等特点,采用精确的确定性模型来求评价因素的权重是不现实的。因此,可以

对各评价因素进行规范化和统一化,并对整体问题进行层次分解和重新构造,建立多目标的综合评价指标体系和模型来解决这一问题(彭建等,2010)。因此,本文运用层次分析法对德州市中心城区开发潜力进行评价,建立评估指标体系,构建评价模型,确定评价标准。利用AHP法确定各因子的权重,利用GIS的空间计算功能进行运算和分级,最终得到德州市中心城区地下空间开发潜力评价。

3 评价模型

3.1 评价指标体系

城市地下空间开发的地质环境质量评价系统是一个多层次、多因素的复杂系统,影响和控制地质环境质量优劣的因素很多,在选取中,结合德州市城市本身的特点,按分级、分序、抓主、淡次的原则,采用穷举-剔除法(郑桂森等,2017;Sebastian B,2016;Nikolai B,2010;康钦容等,2010;Sterling R. L.,2006;钱七虎,1998),我们构建的德州市城市地下空间资源多层次评价体系(表1)。

该体系中,以城市地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价为目标层,选取城市地下空间资源评价的主要影响因素为第一级(主题层),将各因素中的若干影响因子作为第二级(指标层),基于层次分析法(AHP)构建了城市地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价的层次结构模型,并研究确定了各层次影响因素的重要性,形成因素论域U。

3.2 指标的量化

在进行城市地下空间开发利用适宜性评价时,需要对各项评价指标进行量化,而对于不同地形、地质、水文条件的城市,即使相同指标,有时差别还很大。由于定性指标量化没有统一、公认的计算公式,一般是以同一因素在不同方案中的作用进行相对比较来确定的。这就要掺入人的主观意识,因此可以说定性指标量化工作任意性较大,不同决策者和不同领域专家,甚至相同领域专家对同一指标所赋的值都不一定相同。

为解决定性指标定量化过程中出现的差异问题,最重要的是重视领域专家的经验 and 意见,同时

还应中和考虑不同专家、决策人和统称使用者的意见。目前定性指标定量化的方法主要有专家评判法、特尔斐(Delphi)方法、二元对比法、层次分析法、改进层次分析法等多种方法,这些方法的一

个共同特点就是在确定标度时,都必须依靠领域专家的知识 and 经验(刘运来等,2017;吴立新等,2007;徐军祥等,2012)。现以德州市为例,对其各项指标量化情况如表2所示。

表1 地质环境质量影响因素分级

Table 1 The influencing factors classification of the geological environment quality

A-目标层	B-主题层	C-指标层	指标层对主题层的影响
德州市城市地下空间 资源开发地质环境 适宜性评价	水文地质条件(B ₁)	地下水位最小埋深(C ₁)	B ₁ = g(C ₁ , C ₂ , C ₃)
		地下水富水性(C ₂)	
		地下水腐蚀性(C ₃)	
	工程地质条件(B ₂)	地下水位最小埋深(C ₁)	B ₂ = g(C ₄ , C ₅ , C ₆ , C ₇ , C ₈)
		地形地貌(C ₄)	
		断裂构造(C ₅)	
		岩土层综合分区(C ₆)	
		软土(C ₇)	
	环境地质条件(B ₃)	粉土、砂土液化程度(C ₈)	B ₃ = g(C ₉ , C ₁₀)
		地面累计沉降量(C ₉)	
		沉降速率(C ₁₀)	
	生态资源保护(B ₄)	地下矿产资源(C ₁₁)	B ₄ = g(C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄)
		地下水资源(C ₁₂)	
	人类工程活动(B ₅)	地表水体(C ₁₃)	B ₅ = g(C ₁₅ , C ₁₆)
		历史文化遗产(C ₁₄)	
地面空间地物类型(C ₁₅)			
已开发地下工程(C ₁₆)			
第一级对地质环境质量的影响	A = f(B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₅)		

表2 地质评价指标量化

Table 2 Quantification of geological evaluation index

评价指标	地质环境适宜性评价分级及量化			
	优秀	良好	中等	差
地下水富水性	<100 m ³ /d	500 ~ 1 000 m ³ /d	1 000 ~ 3 000 m ³ /d	>3 000 m ³ /d
地下水腐蚀性	腐蚀性微	腐蚀性弱	腐蚀性中	腐蚀性强
地下水位最小埋深	>15 m	10 ~ 15 m	5 ~ 10 m	<5 m
地形地貌	平原	平原	平原	平原
断裂构造	一般性断裂 > 100 m 或活动性断裂 > 500 m	一般性断裂 50 ~ 100 m 或活动性断裂 250 ~ 500 m	一般性断裂 10 ~ 50 m 或活动性断裂 50 ~ 250 m	一般性断裂 < 10 m 或活动性断裂 < 50 m
岩土层综合分区	地层综合得分 0.8 ~ 1.0	地层综合得分 0.6 ~ 0.8	地层综合得分 0.4 ~ 0.6	地层综合得分 0.2 ~ 0.4
软土	无软土分布	—	有软土分布	—
砂土液化	未液化	—	轻微至中等液化	—
沉降量	600 ~ 800 mm	800 ~ 1 000 mm	1 000 ~ 1 300 mm	>1 300 mm
沉降速率	<10 mm/a	10 ~ 30 mm/a	>30 mm/a	—
地下矿产资源	符合矿产资源规划地热矿山	拟新设地热矿区	拟规范地热矿区	持证地热矿山
地下水源地	无水源地	自备水源地(分散式水源地)	小型水源地(<1万 m ³ /d)	中型水源地(1 ~ 5万 m ³ /d)
地表水体	>100 m	50 ~ 100 m	30 ~ 50 m	0 ~ 30 m
历史文化遗产	县级	市级	省级	国家级
地面空间地物类型	无特殊用地类型	低层、多层建筑物	主干路, 历史文物保护单位、地质遗迹	高层、超高层建筑、立交桥
已开发地下工程	未开发	开发较小	地下管线	地铁、隧道、人防

3.3 各指标权重参数的确定

针对研究区具体地质环境特点,通过调查咨询,选取水文及水文地质、工程地质、环境地质、生态环境保护以及人类工程活动 5 个方面作为一级评价因子,在此基础上,选取地下水位最小埋深、地下水富水性、地下水腐蚀性、地形地貌、断裂构造、岩土层综合分区、软土、粉土、砂土液化程度、地面累计沉降量、沉降速率、地下矿产资源、地下水资源、地表水体、历史文化遗产、地面空间地物类型、已开发地下工程作为二级评价因子。

运用层次分析法建立表征各个影响因素之间层次关系的指标权重评价体系,咨询相关专家,获取评价指标的判断矩阵,通过 yaahp 软件计算出各指标的权重。

运用层次分析法求评价模型中指标权重的步骤:

(1) 首先形成阶梯层次结构。

(2) 构造判断矩阵,并求最大特征、特征向量,并进行一致性检验。

本次层次分析法各因子权重的确定,是利用中国科学评价研究中心张建华教授的 Yaahp 软件进行验证与计算。由于 0~30 m、30~100 m 和 100~200 m 评价深度不同,各因子对其影响程度有所不同,所以分别进行权重的确定。

(3) 指标权重总排序,根据前述 AHP 理论依据,需要计算同一层次所有元素相对于上一层次的相对重要性的权值,即层次总排序,为模糊综合评判模型的进一步运算做准备。

指标综合权重的计算方法: $W_i = W_{BK} \times W_{Ci}$

根据下表将地下空间开发地质环境适宜性评价指标体系的指标因素总权重向量记为: $W = (W_1, W_2, W_3 \dots \dots, i$ 为二级评价因子的个数。指标因素权重的大小,表明因素对目标评判的重要程度(汪侠等,2010)。见表 3(0~200 m)。

表 3 德州市中心城区地下空间开发的地质环境适宜性评价体系权重取值

Table 3 Wight value of geological environment suitability evaluation system of underground spatial development in downtown Dezhou

主题层	主题层权重			指标层	指标层权重			权重总序		
	0~30 m	30~100 m	100~200 m		0~30 m	30~100 m	100~200 m	0~30 m	30~100 m	100~200 m
水文地质条件 (B ₁)	0.311 8	0.283 8	0.283 8	地下水埋深最小埋深(C ₁)	0.370 7	0.081 1	0.065	0.115 6	0.023	0.018 4
				地下水富水性(C ₂)	0.070 2	0.342	0.573 6	0.021 9	0.097 1	0.162 8
				地下水腐蚀性(C ₃)	0.559 1	0.576 9	0.361 4	0.174 3	0.163 7	0.102 6
工程地质条件 (B ₂)	0.487 7	0.521 7	0.521 7	地形地貌(C ₄)	0.053 4	0.046 4	0.047 7	0.026	0.024 2	0.024 9
				断裂构造(C ₅)	0.034 7	0.038 2	0.036 9	0.016 9	0.019 9	0.019 3
				岩土层综合分区(C ₆)	0.104 3	0.115 3	0.103 1	0.050 9	0.060 2	0.053 8
				软土(C ₇)	0.505	0.456 3	0.509	0.246 3	0.238 1	0.265 5
				粉土、砂土液化程度(C ₈)	0.302 6	0.343 8	0.303 3	0.147 6	0.179 4	0.158 2
环境地质条件 (B ₃)	0.108 3	0.104 5	0.104 5	地面累计沉降量(C ₉)	0.2	0.2	0.2	0.021 7	0.020 9	0.020 9
				沉降速率(C ₁₀)	0.8	0.8	0.8	0.086 6	0.083 6	0.083 6
				地下矿产资源(C ₁₁)	0.070 6	0.227 2	0.227 2	0.004 1	0.012 7	0.012 7
生态资源保护 (B ₄)	0.057 5	0.056	0.056	地下水资源(C ₁₂)	0.308	0.612 8	0.612 8	0.017 7	0.034 3	0.034 3
				地表水体(C ₁₃)	0.577 5	0.102 4	0.102 4	0.033 2	0.005 7	0.005 7
				历史文化遗产(C ₁₄)	0.043 9	0.057 6	0.057 6	0.002 5	0.003 2	0.003 2
人类工程活动 (B ₅)	0.034 7	0.034	0.034	地面空间地物类型(C ₁₅)	0.142 9	0.142 9	0.142 9	0.005	0.004 9	0.004 9
				已开发地下工程(C ₁₆)	0.857 1	0.857 1	0.857 1	0.029 7	0.029 1	0.029 1

3.4 评价模型的建立

依据上述中心城区地下空间资源潜力多层次评价指标体系,构建德州市中心城区地下空间资源潜力模糊综合评价的因素集U为:

$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}\}$ {水文及水文地质条件,工程地质条件,环境地质条件,生态资源保护,人类工程活动}

而 U_{11} 又包括以下因素, $U_{11} = \{U_{111}, U_{112}, U_{113}, U_{114}\}$ 其它各主题因素集依

次类推,实际上是对影响因素先分大类,然后在一类中的再分小类,这样就反映了影响因素的层次性。

根据德州市中心城区地下空间资源各影响因素对地下空间开发潜力的影响,建立评语集合V如下:

$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{优, 良, 中, 差\} = \{I, II, III, IV\}$

分别表示德州市中心城区地下空间资源潜力等级。

4 评价结果分析

4.1 地质环境适宜性评价

按照突显性、系统科学性、定性和定量指标结合及可操作性原则,进行研究区地下空间资源

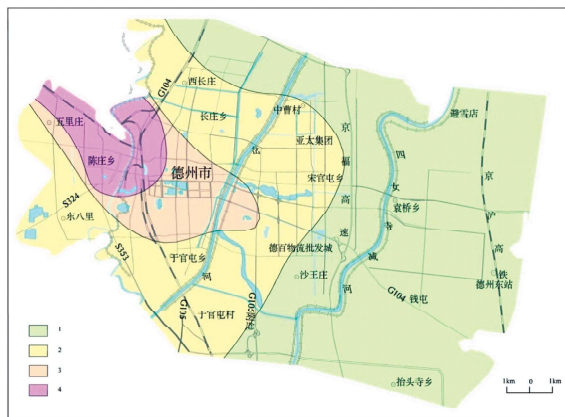


图3 德州市中心城区地下空间资源开发适宜性分区图(0~30 m)

Fig. 3 Zoning Map of suitability for Development of Underground Space Resources in the downtown Dezhou city (0~30 m)

1—适宜性优区;2—适宜性良区;3—适宜性中区;4—适宜性差区

开发地质环境适宜性评价的指标体系选择,然后根据 AHP 层次分析法确定各指标体系的权重(焦玉国,2014;Aviad S,2009);将各个因子按照科学性与可操作性的原则进行单因子图的编制,并根据模糊评价模型的要求建立相应的属性结构,确保各因子图的科学实用性;然后利用 GIS 强大的空间分析运算功能,分别对 0~30 m、30~100 m、100~200 m 因子图进行叠加运算,得到整体综合评价图。将研究区划分为四个质量区:地下空间开发利用适宜性优区(I区)、良区(II区)、中等区(III区)、差区(IV区)(图2-5、表4)。

4.2 地下空间潜力评价

德州市中心城区地下空间资源开发潜力评价是根据影响德州市中心城区地下空间资源的自然条件,城市空间类型,规划条件等,将地下空间资源的可开发程度分别划分为充分开发区、不可充分开发区、难以(慎重)开发区,在此基础上分析各

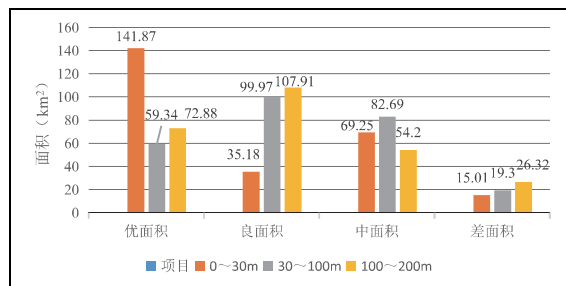


图2 地质环境适宜性分区统计柱状图

Fig. 2 Statistical histogram of geologic environmental suitability zoning

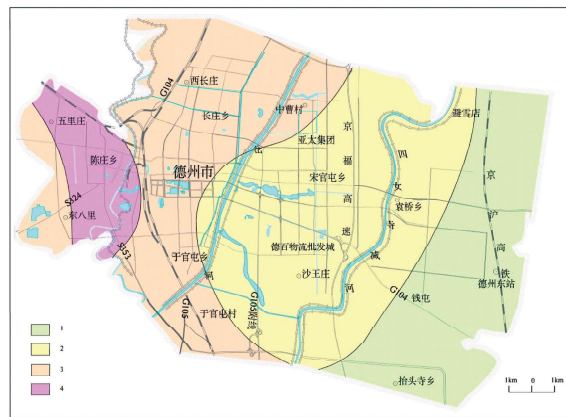


图4 德州市中心城区地下空间资源开发适宜性分区图(30~100 m)

Fig. 4 Zoning Map of suitability for Development of Underground Space Resources in the downtown Dezhou city (30~100 m)

1—适宜性优区;2—适宜性良区;3—适宜性中区;4—适宜性差区

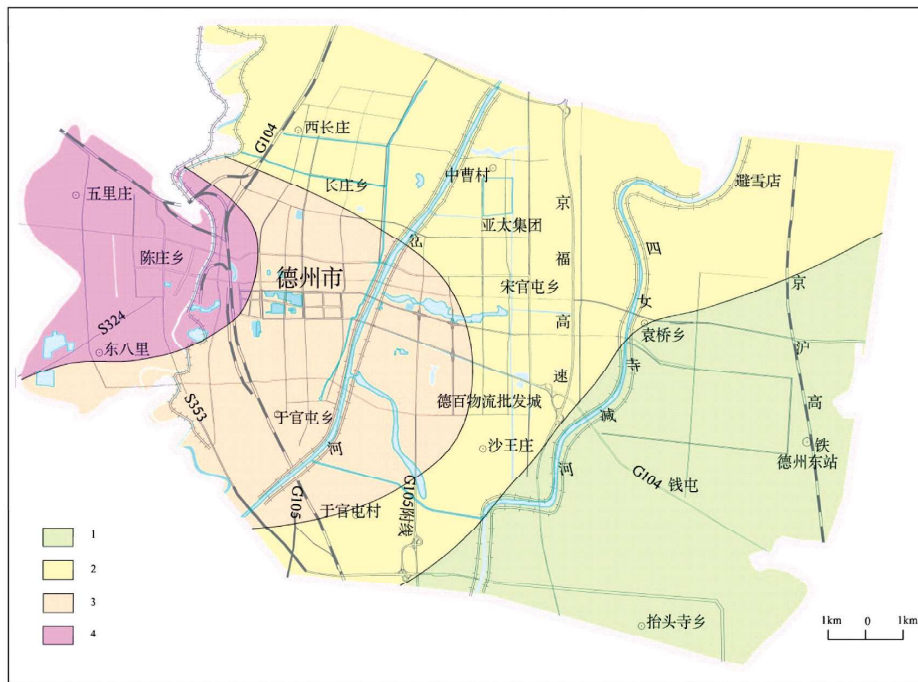


图5 德州市中心城区地下空间资源开发适宜性分区图(100~200 m)

Fig. 5 Zoning Map of suitability for Development of Underground Space Resources in the downtown Dezhou city (100~200m)

1—适宜性优区;2—适宜性良区;3—适宜性中区;4—适宜性差区

表4 德州市中心城区地下空间地质环境适宜性分区特征一览表

Table 4 List of characteristics of underground space geological environment suitability zoning in downtown Dezhou city

适宜性分区	分布特征		
	0~30 m	30~100 m	100~200 m
适宜性优区 (I)	面积约 141.87 km ² , 占 54.3%, 分布在经济开发区-高铁新区一带。上层粉土, 下层粉土和粘性土互层, 无软土分布。地面累计沉降量 500~700 mm, 平均沉降速率 10~40 mm/a, 危险性中等	分布在经济开发区的席辛庄-宋官屯-沙王庄村一带, 面积 59.34 km ² 。处于经济开发区东缘, 砂层不发育, 地下水赋存在粉土中, 地下水富水性弱, 水位埋藏深度 3~8 m, 地下水腐蚀性微-弱。	主要分布在减河以东地段, 面积 72.88 km ² , 占总面积的 28%。水文地质条件较好, 深层地下水水资源丰富, 水质较好, 地面累计沉降量小于 500 mm, 年沉降速率小于 30 mm, 地面稳定; 土地资源丰富, 所以属于工程地质建设条件优区。
适宜性良区 (II)	分布在东长庄-宋官屯-于官屯一带, 面积 35.18 km ² 。主要发育断裂为芦家河-曹村断裂, 属非活动性断裂; 地层结构为粉土, 局部有软土分布, 地面累计沉降量 600~700 mm, 平均沉降速率 30~40 mm/a, 危险性中等。	主要分布在东长庄-小刘庄和新湖-东七里铺两个地段, 面积 99.97 km ² 。地层结构为粘性土、粉土互层结构, 有软土分布。地下水主要赋存在粉土中, 地下水富水性弱, 水位埋藏深度 2~5 m 左右, 地下水腐蚀性弱。	主要分布在长庄-宋官屯-避雪店一带, 面积 107.91 km ² , 占总面积的 41%。水质较好, 有一定的开采潜力; 属于高层工程建设适宜区, 地面累计沉降量 500~800 mm, 年沉降速率 30~50 mm, 地面较稳定; 而且地下空间开发利用条件优良。
适宜性差中区 (III)	分布在老城区一带, 面积 69.25 km ² 。地层岩性以粉土为主, 中部地段有软土分布。地面累计沉降量 700~800 mm, 平均沉降速率 30~50 mm/a, 危险性中等, 人类工程建设密集, 地下空间开发深度内地下水富水性弱, 水位埋藏深度 2~5 m, 地下水腐蚀性弱-中。	分布在长庄乡-萧何庄-于官屯乡一带, 面积 82.69 km ² 。地下空间开发深度内砂层不发育, 地下水主要赋存在粉土中, 地下水富水性弱, 水位埋藏深度 2~5 m, 地下水腐蚀性除岔河南部两侧为腐蚀性中等外, 其它地段腐蚀性为弱。	分布在老城区一带, 面积 54.20 km ² , 占总面积的 21%。水文地质条件一般, 深层地下水开采潜力小, 浅层地下水矿化度一般大于 2 g/l, 水质极差; 属于高层工程建设适宜区; 普通工程建设一般适宜区; 靠近沉降中心区, 局部地面累计沉降量大于 800 mm, 年沉降速率大于 50 mm, 地面较不稳定; 地下空间开发利用条件优中-良。

续表

适宜性分区	分布特征		
	0~30 m	30~100 m	100~200 m
适宜性差区 (IV)	分布在陈庄乡五里庄-杨家圈后院一带,面积 15.01 km ² 。主要发育断裂沧东断裂,属活动性断裂;30 m 深度内地层岩性以粉土为主,局部有砂层,地面累计沉降量大于 800 mm,平均沉降速率大于 50 mm/a,危险性大,人类工程建筑相对较多,地下水富水性中-弱,水位埋藏深度 2~3 m,地下水腐蚀性中-弱。	分布在陈庄乡五里庄-杨家圈-长庄乡后院一带,面积 19.30 km ² 。基本无软土分布;地面累计沉降量大于 800 mm,平均沉降速率大于 50 mm/a,危险性大,周边部分已建工程有发现因地面沉降而引起的开裂现象;人类工程建筑相对较多,水位埋藏深度 2~3 m,地下水腐蚀性弱。	分布在陈庄乡一带,面积 26.3 km ² ,占总面积的 10%。水文地质条件较好,属于高层工程建设适宜区、普通工程建设一般适宜区;属于地面沉降中心区与深层地下水漏斗中心区,地面累计沉降量大于 800 mm,年沉降速率大于 50 mm,地面较不稳定;地下空间开发利用条件较差。

用地类型下可供开发的地下空间资源蕴藏量(李鹏岳,2020)。地下空间资源可开发程度受多种因素影响,具体可包括:岩溶分布区、采空区、不稳定江岸区、地裂缝、文物保护单位、生态保护区、水资源与泉脉保护区,道路、绿地、山体、水体、地面建设区,农田、新增规划建设区等因素。

根据完成各项评价之后,设计地下空间资源量计算模型,每一种地物类型扣除一定的深度。一部分是借鉴《城市地下空间资源评估与开发利用规划》(宋敏聪,2012)这本书,一部分是根据德州市情况确定的,一部分是综合情况分析的出来的(表 5-6)。

表 5 各用地类型下地下空间资源量计算模型

Table 5 The calculation model of underground space resources under various land use types

用地类型	容量计算方式
城市建筑物	根据建筑类型低层、中层、高层分别扣除 10 米、30 米、50 米(或到基岩为止)的深度
城市绿地	扣除植被保护层 3 米
城市水体	扣除 10 米
城市道路与广场	扣除 5 米的覆盖层
文物、自然保护区、重要地质遗迹	当前层位深度
已开发地下空间(人防、轨道交通等)	扣除 30 米的影响深度

表 6 各用地类型下地下空间资源量计算

Table 6 Calculation of underground space resources under various land use types

序号	地物类型	面积(m ²)	扣除深度(m)	0~30 m	30~100 m	100~200 m
				扣除体积(m ³)	扣除体积(m ³)	扣除体积(m ³)
1	高层建筑物	12428554	50	372856620	248571080	0
2	多层建筑物	93680724	15	1405210860	0	0
3	低层建筑物	119136532.8	6	714819196.8	0	0
4	水体	1941810	10	19418100	0	0
5	绿地	2011461	3	6034383	0	0
6	道路用地及广场	141995	5	709975	0	0
7	地面沉降	1375238	30	41257140		
8	地质遗迹历史	1246282	30	37388460	0	0
9	已开发地下空间	29337403.2	30	880122096	0	0
合计扣除			3477816831	248571080	0	

根据上述计算模型,对德州市中心城区 0~30 m,30~100 m,100~200 m 的地下空间资源量进行评估。地下空间资源潜力的可开发程度分级见图 6。

据 MAPGIS 统计,德州市中心城区范围内地表 200 米以浅范围内地下空间的天然总蕴藏量保守估计约为 522.6 亿立方米。其中 0~30 m 为

78.39 亿立方米,其中 30~100 m 为 182.91 亿立方米,其中 100~200 m 为 261.3 亿立方米。

经计算(详见表 6)0~30 m 地下空间资源量扣除为 34.78 亿立方米,30~100 m 地下空间资源量扣除为 2.49 亿立方米,100~200 m 地下空间资源量扣除为 0 亿立方米。

德州市中心城区范围内,0~30 m 可供开发的

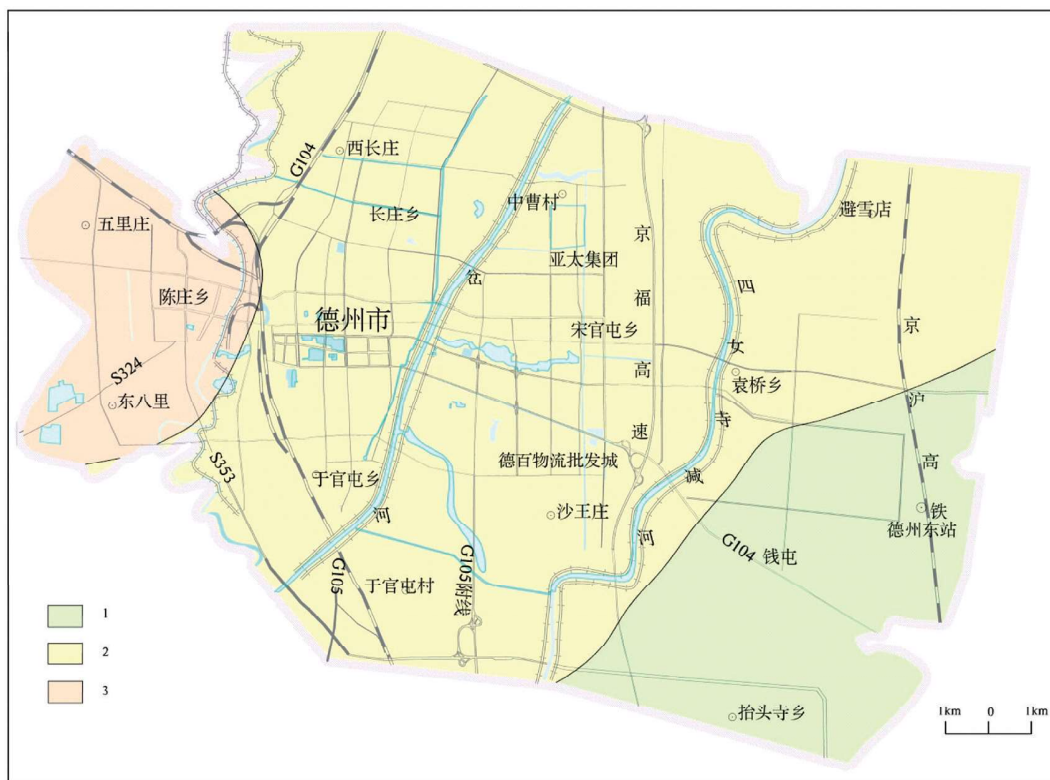


图6 德州市中心城区地下空间资源潜力可开发利用评价图(0~200 m)

Fig. 6 Evaluation chart of Underground Space Resource Potential development and Utilization in downtown Dezhou (0~200m)

1—适宜性优区;2—适宜性良区;3—适宜性中区

地下空间资源估算为43.61亿立方米,30~100 m可供开发的地下空间资源估算为180.42亿立方米,100~200 m可供开发的地下空间资源估算为261.3亿立方米,总计485.33亿立方米。

在计算容量过程中可能会遇到用地类型重合的区域,此时计算容量时采用限制性大的因素。需要注意的是,本次针对地下空间资源可供开发容量采取保守估算,所计算出数据较实际值偏小,但仍可看出地下空间资源可供开发的潜力巨大。总体而言,随着地下空间资源开发深度的增加,资源所受人类活动的扰动减少,地下空间资源的可开发程度增加。

5 结论与讨论

(1)研究区为德州市中心城区范围,面积为261.3 km²。德州市中心城区地下空间开发功能类型比较单一,开发利用仍以地下停车场为主,占德州市中心城区目前地下空间开发比例的85%。地下商业设施及市政设施分别占10%和5%。综合考虑,德州市中心城区对地下空间资源需求较

大,目前开发仅限于0~60 m,仍处于地下空间开发的一级阶段。本次研究为山东省内地下空间评价深度首次到达200米。考虑到地下空间开发利用的分层性,按不同开发层次完成分层评价,评价结果对总体规划阶段地下空间的平面布局及垂向分布具有指导意义。

(2)研究方法首先确定好地下空间评价指标体系,以地下空间资源开发地质环境适宜性评价为目标层,选取主要影响因素为一级指标(主题层),将各因素中的若干影响因子作为二级指标(指标层),基于层次分析法构建了地下空间资源开发利用地质环境适宜性评价的层次结构模型,并研究确定了各层次影响因素的重要性,最后采用模糊数学的评价方法,确定各因子的隶属度,将复杂多维的各种因素转化为相互联系的有序层次,对地下空间开发利用适宜性进行综合评价。

(3)提升完善原有的地下空间评价体系增加生态环境保护专项;本次地下空间评价体系不仅考虑了原有的水、工、环、人类工程活动条件,还对矿产、地下水资源、地质遗迹、历史文化遗产、地表河流水系等生态环境保护方面的因素进行评价。

(4)首次进行地下空间资源潜力评价,根据影响德州市中心城区地下空间资源的自然条件,城市空间类型,规划条件等。将地下空间资源潜力的可开发程度分别划分为充分开发区、不可充分开发区、难以(慎重)开发区,在此基础上分析各地类型下可供开发的地下空间资源蕴藏量。

(5)首次系统量化了地下空间资源。通过对影响咸阳市地下空间开发利用的环境地质因素及评价结果的综合分析,对各评价区提出相应的开发建议。由于城市地下空间开发具有不可恢复性,因此在开发利用时因地制宜、可持续性发展至关重要。

[参考文献]

- 郭建民,祝文君. 2005. 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, (05): 655-659+664.
- 黄强兵,彭建兵,王飞永,等. 2019. 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, 26(03): 85-94.
- 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[J]. 地下空间与工程学报, 15(05): 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[J]. 地下空间与工程学报, 14(05): 1145-1153.
- 焦玉国. 2014. 泰安市城区地下空间开发与环境地质影响关系分析[J]. 山东国土资源, 30(12): 59-62.
- 康钦容. 唐建新,张卫中. 2010. 改进模糊层次分析法在滑坡治理方案优化中的应用[J]. 重庆大学学报, 33(09): 98-103.
- 李恺. 2009. 层次分析法在生态环境综合评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 32(02): 183-185.
- 李鹏岳,韩浩东,王东辉,等. 2020. 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, 1-12.
- 李晓昭,王睿,顾倩,等. 2019. 城市地下空间开发的战略需求[J]. 地学前缘, 26(03): 32-38.
- 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[J]. 长江科学院院报, 34(05): 58-62+67.
- 柳昆,彭建,彭芳乐. 2011. 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, 7(02): 219-231.
- 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[J]. 地下空间与工程学报, 6(4): 688-694.
- 彭俊婷,洪涛,解智强,等. 2015. 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, (12): 66-69+113.
- 钱七虎. 1998. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, (01): 3-5.
- 任念,肖江,周光余,等. 2020. Evaluation of Suitability for Underground Space Development and Utilization in Changsha City[J]. 土木工程, 09(06).
- 宋敏聪. 2012. 基于社会经济因素的城市地下空间开发潜力评估[D]. 天津商业大学.
- 孙利萍,李晓昭,周丹坤,等. 2018. 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, 14(04): 859-868+880.
- 汪侠,黄贤金,汤晋. 2010. 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, 36(02): 213-218.
- 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价与3D可视化[J]. 中国矿业大学学报, (01): 97-102.
- 徐军祥,秦品瑞,徐秋晓,等. 2012. 济南市地下空间资源开发地质环境适宜性评价[J]. 山东国土资源, 28(08): 14-17.
- 郑桂森,王继明,何静,等. 2017. 地下空间资源的属性特征[J]. 城市地质, 12(04): 1-5.
- 周琦,杜运生,袁良军,等. 2016. 贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区地质找矿主要进展及潜力预测[J]. 贵州地质, 33(04): 237-244.
- Bobylev Nikolai. 2010. Underground Space in the Alexanderplatz Area, Berlin; Research into the Quantification of Urban Underground Space Use[J]. Water and Energy International, 67(5).
- Chen Zhilong, Chen Jiayun; Liu Hong, et al. 2018. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 71: 253-270.
- Li Xiaozhao, Li Congcong, Aurèle Parriaux, et al. 2016. Multiple resources and their sustainable development in Urban Underground Space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 55.
- Shapira A, Simcha M. 2009. AHP - Based Weighting of Factors Affecting Safety on Construction Sites with Tower Cranes [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 135(4): 307-318.
- Sebastian Bartel, Gerold Janssen. 2016. Underground spatial planning- Perspectives and current research in Germany[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 55.
- Sterling R. L. 2006. Urban Underground Space Use Planning: A Growing Dilemma[A]. 中国岩石力学与工程学会. 国际地下空间学术大会会议论文集(一)[C]. 中国岩石力学与工程学会; 中国岩石力学与工程学会, 27.
- Zhou Dankun, Li Xiaozhao, Wang Qi, et al. 2019. GIS-based urban underground space resources evaluation toward three-dimensional land planning: A case study in Nantong, China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 84.
- Zhu Hehua, Huang Xianbin, Li Xiaojun, et al. 2016. Evaluation of urban underground space resources using digitalization technologies[J]. Underground Space, 1(2).
- Zhang Maosheng, Wang Hua-qi, Dong Ying, et al. 2020. Evaluation of urban underground space resources using a negative list method: Taking Xi'an City as an example in China[J]. China Geology, 3(1).

Study on Underground Space Resource Potential in Downtown Dezhou City

YAN Cui-cui^{1,2}, KANG Feng-xin³, TAN Zhi-rong¹, YANG Xun-chang¹,
FENG Ke-yin⁴, SANG Ke¹, WANG Shi-hao¹, SUN Xiao-xiao¹

(1. The Second Hydrogeology and Engineering Geology Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (Shandong Lubei Geological Engineering Investigation Institute), Dezhou 253072, Shandong, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 3. Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250013, Shandong, China; 4. Shandong Provincial Territorial Space Ecological Restoration Center, Jinan, 250014

[**Abstract**] In order to evaluate the resource potential of underground space in the downtown Dezhou reasonably, an evaluation index system of underground space development and utilization potential composed of 16 single factors was established from five aspects of hydrology and hydrogeology, engineering geology, environmental geology, ecological environmental protection and human engineering activities. Based on analytic hierarchy process (ahp) to evaluate the results to De Zhou city center in different depth below the surface of the underground space is divided into “can make full development”, “full development”, “careful and limit the development of” three levels, and according to the urban construction and environmental conditions, based on the GIS platform to carry out the center of the city underground space development and utilization potential evaluation. The research results can accurately reflect the development and utilization potential of underground space, and have practical application value, which can provide information support for the management and decision-making of government departments.

[**Key Words**] Dezhou; Underground space; Analytic hierarchy process; exploitation potential; evaluation