

地下空间开发利用地质环境适宜性评价

——以长株潭城市群核心区为例

徐定芳,何阳*,范毅,杨少辉

(湖南省地质调查院,湖南长沙 410116)

摘要:随着长株潭城市群核心区建设的高速发展,城市表层空间规划远远不能满足目前的城市发展需求,因此,向城市地下空间发展是长株潭核心区发展的未来趋势.文章主要是借助层次分析法和 GIS 技术针对长株潭核心区城市群 60 m 以上地下空间开发利用进行适宜性评价分析,按照 0~15,15~40,40~60 m,3 个层段进行评价,得出长株潭城市群适宜地下空间开发利用,具有为长株潭城市群核心区地下开发利用建设提供决策的意义.

关键词:长株潭城市群;地下空间;层次分析法;GIS;适宜性评价

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)01-0070-09

Suitability Evaluation of Geological Environment for Development and Utilization of Underground Space: A Case Study of the Core Area of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration

Xu Dingfang, He Yang, Fan Yi, Yang Shaohui

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China)

Abstract: With the rapid development of the core area construction of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, the urban surface space planning is far from meeting the current urban development needs. Therefore, the development towards urban underground space is the future trend of the development of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration. This paper, mainly by means of Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS technologies, analyzes the suitability of development and utilization for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration 60m core above the underground space. According to the three layers of 0 to 15 m, 15 to 40 m, and 40 to 60 m, it is concluded that it is suitable for the underground space development and utilization of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration core area, which provides suggestions for decision-making.

Keywords: Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration; underground space; Analytic Hierarchy Process; GIS; suitability evaluation

国外对地下空间开发利用适宜性评价较早的国家是加拿大,随后的五十多年里欧洲多个国家和美国均认识到地下空间资源的重要性,在城市的建设与规划中均考虑地质环境的影响,并在欧美学者对工程地质进行了大量的探讨研究.20 世纪 80 年代后期国外地下建筑物已经从简单的延伸到相对独立实体,地铁的建设使地下空间的开发利用从内容和范围上大大拓展,功能复杂的大型综合空间不断建成使用,对城市防灾等方面城市地下空间的开发利用逐步成为城市空间的有机组成部分.Dyad Kin, Yu.D 强调地下空间的

收稿日期:2019-01-29

基金项目:中国地质调查“长株潭城市群地质环境调查与区划”资助项目(1212011220017)

*通信作者,E-mail:694612453@qq.com

重要性,指出地下空间是一种重要资源^[1];Ronka等^[2]在综合分析各类地下设施的使用现状及地下空间规划现状,提出岩石区地下空间开发适宜性应根据建设难度进行分类的分级标准,并依此建立了适用于岩石区的适宜性评价模型.国内地下空间的开发起于20世纪60年代^[3],主要是以地下管道、地铁、地下排水系统及矿井等为主,目前许多地下建筑如地下停车场、地下大型超市等发展迅猛.朱文君^[4]第一次建立地下空间资源调查的概念、调查方法模型体系,并通过北京旧城区浅层地下空间资源的调查,研究得出地面建筑及文物保护和旧城改造规划是影响北京旧城浅层地下空间资源可开发利用最主要因素;李相然^[5,6]等阐述了城市地下空间利用中的工程地质条件的研究;黄玉田等^[7]在分析北京地下空间资源的地质背景条件下综合考虑潜在价值和工程难度情况下应用灰色评估法对地下空间资源质量进行分级.

长株潭城市群核心区表层空间远不满足目前城市化的快速发展需要,而开发利用城市地下空间,是解决此矛盾的唯一途径,因此,地下空间资源开发利用逐渐成为未来长株潭城市群核心区发展趋势.长株潭城市群核心区地下空间开发利用始于20世纪五、六十年代的人防工程建设,经过多年的开发与建设,形成了以人防工程为主体的地下空间体系.非人防的地下空间开发利用尚显滞后,长沙市地下空间开发利用以人防及城市建设相结合始于20世纪80年代后^[8-13],湘潭市地下空间利用始于2001年雨湖区地下商场的建设^[14].针对长沙市地下空间开发,向元远曾对长沙市地下30 m以上进行分析评价,并提出平面规划模式和竖向规划模式^[8].区内地下空间开发利用程度较低,均为浅部和分布在建成区,主要是以地下交通、地下市政设施、仓库等空间设施^[15].深部并未进行相关的研究和开发.未解决区内深部空间的开发利用,文章主要是针对区内60 m以上深部进行适宜性研究分析,为解决长株潭城市群核心城区未来空间建设规划提供依据.

1 地质条件

1.1 地形地貌

研究区地形地势总体上沿湘江两岸向外依次为低平的冲积~冲湖积平原、红土岗地、丘陵,大部分地区海拔低于300 m,一般处于40~200 m.

1.2 地层岩性

地层出露较为齐全,除缺失志留系外,各系地层均有出露.其中以白垩系出露最广,青白口系和第四系次之.岩浆岩以酸性-中酸性侵入岩为主,主要分布于北部.花岗岩形成时代为侏罗纪(早燕山期)、白垩纪(晚燕山期),岩性为细粒二长花岗岩、中粒黑云母二长花岗岩.

1.3 地质构造

研究区位于扬子陆块东南缘江南地块中段,湘东-湘东北燕山块断带北部,属扬子板块和华南板块之间前中生代多期复合造山带,由于经历了多期次、多旋回的复杂地质过程,呈现出复杂的构造变形迹象.前白垩纪的隆-坳构造和白垩纪-古近纪的盆-岭构造组成了本区主体构造格架.就前白垩纪构造格局而言,本区自北西向东依次为长沙-青山铺NE向构造-岩浆隆起带、九江-坳陷、鹤岭隆起带、杨嘉桥-湘潭-株洲坳陷、宏厦桥-普迹构造岩浆岩带.隆起带内主要出露前泥盆纪地层,坳陷带内主要出露上古生界.就白垩纪-古近纪构造格局而言,NE-NNE向的白垩纪-古近纪断陷盆地与盆地间的山岭组成了典型的盆-岭构造,盆-岭构造是区域地壳伸展时期形成的一种典型的构造样式,同一伸展体系内的各种变表样式较完整,其地表地质构造样式与深部构造作用也趋于一致.现将测区划分为宁乡-铜官断陷盆地、捞刀河-莲花断褶山岭、长沙-湘潭断陷盆地、株洲断陷盆地、易家湾-普迹断褶山岭.

1.4 水文地质条件

根据研究区地层组合、岩性特征、地下水赋存条件及水动力特征,将区内地下水划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩孔隙裂隙溶洞水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水和基岩裂隙水4个类型.其中松散岩类孔隙水具有双层结构,上部为粘土、砂质粘土,下部为砂、砂砾、砂砾石层,其中下部砂砾石层富水性中等-丰富.碎屑岩孔

隙裂隙溶洞水分为覆盖型及埋藏型,岩性主要为一套杂色厚层状灰质砾岩、钙质砂岩夹灰质砾岩组成,其富水性中等,单井涌水量 147.0~649.7 m³/d.碳酸盐岩类裂隙岩溶水含水岩性为一套海相碳酸盐岩,主要由灰岩、白云质灰岩、硅质灰岩及部分泥质灰岩组成,按照分布情况可分为裸露型、覆盖型及埋藏型 3 个类别,富水性中等-丰富,以埋藏型富水性丰富为主,富水性中等单井涌水量为 148.0~432.2 m³/d,富水性丰富单井涌水量为 1 110.3~1 970.0 m³/d.

2 地下空间开发利用现状

研究区地下空间开发利用现状主要为:地下交通工程、地下市政工程、地下公共空间、地下综合管廊,其中地下交通工程主要包括地铁、城际铁路、过江隧道、地下停车场、地下通道,地下市政工程主要包括管道、仓储、垃圾填埋场,地下公共空间主要为地下商业广场,其主要开发利用类别及规模详见表 1.

表 1 研究区主要开发利用类别及规模

类别	名称	长度/km	开发深度/m	面积/km ²	总体积/(10 ⁴ m ³)
地下交通工程	地铁工程	地铁 1,2 号线(地下)	57.03	0~30	342.18
	隧道工程	浏阳河、年嘉湖、营盘路、南湖路湘江隧道	11.80	13.5~28.5	49.21
	地下停车场	长沙中心城区主要停车场		0.141	
地下市政工程	管道	主要城区地下管线数据库建设	15 088.00		
	垃圾填埋场	垃圾填埋场	2.91	13.5~18.5	2.033 40
地下公共空间	地下商场	长沙中心城区主要地下商业空间		0.067 18	
地下综合管廊	综合管廊	长株潭核心区主要地下综合管廊建设	62.63		

3 地下空间开发利用存在的主要问题

地下工程建设除人防工程、地下室、地下停车场、地下商场、地下仓储外,还有地铁、地铁换乘站点、过江隧道及地下管网廊道等,大大扩展了城市拓展空间.从已建成的各类地下空间建设和营运中遇到的重大工程地质问题主要有岩溶、地下水、影响岩土体稳定和变形的软土、流砂、卵石及强风化残积土、断裂,特别是活动断裂等将对地下工程建设造成因地下系统补、径、排条件改变而疏干或雍高地下水位,因岩溶溶洞及充填物软土、流砂造成地面岩溶塌陷、建筑物洞室失稳破坏,导致重大经济和人类生命财产损失.

例如地铁 3 号线过湘江隧道既是水下隧道,又是穿越岩溶发育区(图 1).岩溶主要发育在湘江东、西河汉.据其勘察资料可知,溶洞多数以串珠状分布,垂向由西往东呈阶梯状依次变深,在河西汉较浅,东西两侧较深.溶洞多数有充填,充填物主要为砂、卵石及粘性土,与湘江联通,岩溶水与河水贯通,具承压性.

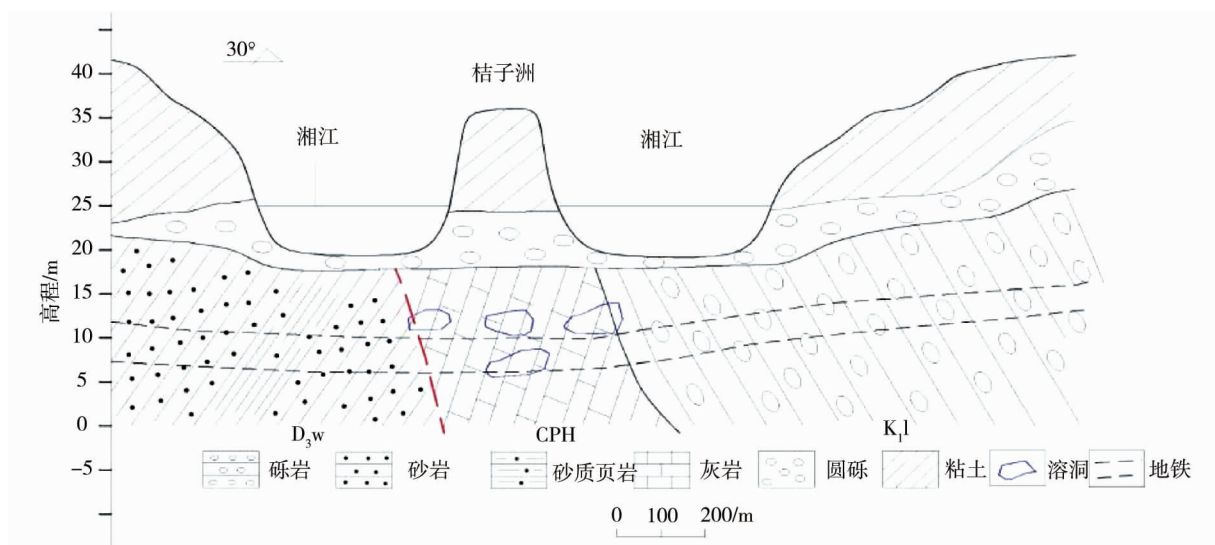


图 1 地铁 3 号线过江隧道工程地质剖面

岩溶岩面起伏,导致上覆土层地基压缩变形不均;洞穴顶板变形造成地基和隧道围岩支护体系的失稳;岩溶水的动态变化往往产生突泥、突水,给施工和建筑物使用造成极大的危害;土洞坍塌形成地表塌陷;溶蚀作用还会导致岩体的渗透性变异,给工程治水带来难题。

地铁 1 号线新建西路站附近与新开铺-坪塘活动断裂(F_{30})呈大角度相交.该断裂长约 30 km,北北东向,倾向南东,为逆断层.该断裂第四纪以来活动明显,造成南东盘(相对上升)卵石层比北西盘(相对下降)卵石层高出近 30 m(图 2).受该断裂及次级断裂及后期侵蚀作用的共同影响,该处呈现“断塞塘”地貌特征,与湘江连通后形成湘江支流.根据资料,断裂北西盘钻孔钻至 60.20 m 深度仍未见基岩.该活动断裂造成第四系卵石层垂直错动,场地地基土均匀变差,加大了施工难度.断裂北西盘第四系卵石层厚度增加,导致含水层厚度变大,给工程排水带来极大困难。

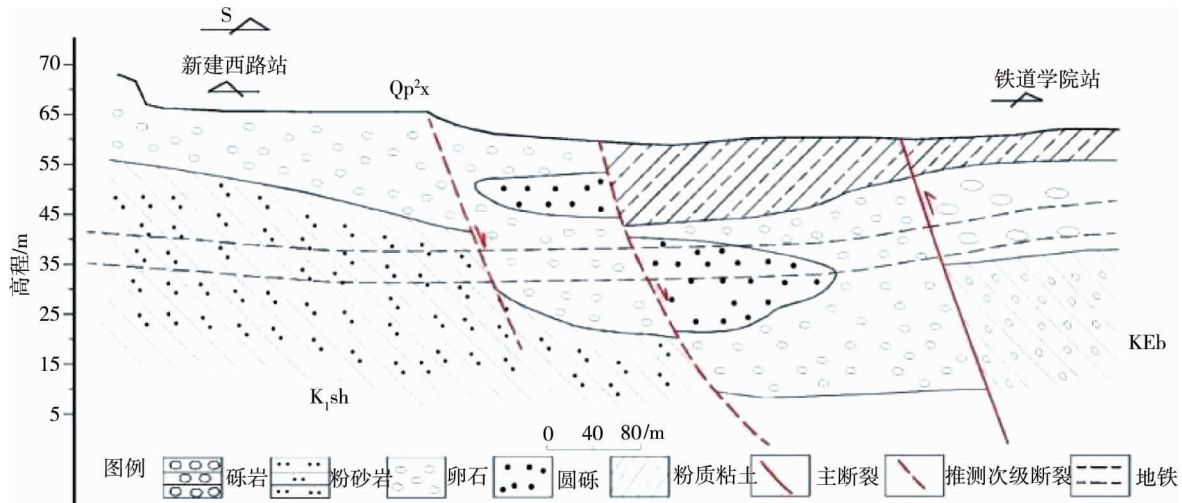


图 2 地铁 1 号线新建西路站—铁道学院站活动断裂剖面

4 地下空间开发利用主要影响因素

地下空间开发利用适宜性一般受到多因素的影响,例如经济成本、已有地面及地下建筑物对地下空间开发利用的影响、地质环境条件等.因此,对于地下空间开发利用过程中也应考虑其他地质环境发生变化导致的安全问题.姜涛^[16]等人在“地下空间安全评价方法综述”中提到,在下空间开发利用过程中,导致安全问题的主要有人为因素和自然因素,人为因素主要是施工不当导致的渗水、土体滑坡、管线破坏、基坑坍塌、土方坍塌、涌陷等 6 种因素.自然因素主要是地形地貌、建筑场地类别、不良岩土条件、水文地质、地质灾害等 5 种因素,更具体的因素有地表水体、承压含水层厚度、承压含水层单井涌水量、岩溶塌陷、采空区塌陷、地面沉降、地裂缝、沙土液化^[17-19].本文仅从地质环境条件的因素来探讨地下空间开发利用的适宜性^[20].对地形地貌、地质构造、岩土体类型、地下水环境以及不良地质作用五大地质环境因素进行分析。

4.1 地形地貌

区内地貌类型主要为低平的冲积-冲湖积平原、红土岗地、丘陵,主要对 0~15 m 深度范围地下空间的开发利用有较大影响,主要影响地下空间的开发布局、走向、地下与地上的联通形式以及开挖方式。

4.2 地质构造

区内地质构造发育,且具多期次、多旋回等复杂特点,地质构造对地下空间开发利用的影响主要体现在断层的影响,主要影响基坑及硐室的稳定性、涌水突水、不均匀沉降等地质环境问题。

4.3 岩土体类型

研究区岩体划分为陆相碎屑岩泥岩、泥质粉砂岩类夹页岩类,陆相砾岩、砂岩类,海相石英砂岩、砂岩夹页岩类,海相页岩、泥岩、粉砂岩类,海相灰岩、泥灰岩、泥质灰岩、硅质灰岩类,海相厚层状纯碳酸岩类,

浅变质粉砂岩、砂质板岩、板岩类,浅变质石英砂杂砂岩夹板岩类,花岗岩类,共9大类。土体类型主要有粘性土、岩浆岩风化残积粘性土、陆相沉积泥岩与泥质粉砂岩风化残积粘性土、红粘土、软土、砂类土、卵砾类土、陆相沉积砾岩风化卵砾类土及漂砾类土10类,岩土体的物理力学特征的差异性决定区内地下空间开发的难易程度,岩土体对地下空间的开发利用影响主要体现在岩体强度、软化系数及完整性,土体的结构及承载力和特殊土的分布及其特征。

4.4 地下水

区内地下水类型主要分为松散岩类孔隙水、碎屑岩孔隙裂隙溶洞水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水和基岩裂隙水4个类型,地下水的分布情况、富水性及含水层岩性等对地下空间开发的影响主要体现在涌水和突水,给工程施工和后期投入使用运行造成较大影响。

4.5 不良地质作用

区内不良地质主要表现在岩溶、流砂2个方面。岩溶岩面起伏,导致上覆土层地基压缩变形不均,洞穴顶板变形造成地基和隧道围岩支护体系的失稳;岩溶水的动态变化常产生突泥、突水,给施工和建筑物使用造成极大的危害,土洞坍塌形成地表塌陷;溶蚀作用还会导致岩体的渗透性变异。流砂对地下空间的影响主要表现在:(1)在地下空间采用明挖法时,在地下水的作用下,流砂沿基坑侧壁涌出,造成基坑垮塌;(2)在进行人工挖孔桩施工时,由于流砂和地下水的作用,使得钢套筒变形、错位,造成人工挖孔困难;(3)在进行地下空间开发排水时,会造成周边地面出现塌陷,给周围环境及现场施工带来极大的安全隐患。

5 地下空间开发地质环境适宜性分区评价

本次地下空间开发利用地质环境适宜性评价主要针对研究区综合性的岩土工程地质问题,涉及地形地貌、地质构造、工程地质条件、水文地质、不良地质作用等准则,每一个准则又包含诸多指标因素。本文首先筛选地质环境的影响指标体系,在采用层次分析法确定各指标因素权重的基础之上,再运用综合指数模型,综合考虑各因素对地下空间开发适宜性的影响,从而获得一个定量的综合评判结果^[21,22]。

根据长株潭核心区地下空间开发利用现状以及规划资料,目前本区域地下空间利用深度最深达40 m。考虑到今后城市建设的需要,结合国外地下空间开发利用实际情况,本次研究将地下空间开发利用深度扩展到60 m。同时根据地下空间利用的不同性质及功能,对0~60 m范围内的地下空间开发利用分0~15,15~40,40~60 m共3个层次进行评价。

5.1 建立评价体系

5.1.1 目标层的确定

目标层(R)为长株潭核心区城市群地下空间开发利用地质环境适宜性的结果,根据精度和实用性,将适宜性划分为4类,即适应性好区(I)、适宜性较好(II)、适宜性较差(III)、适宜性差(IV)。

5.1.2 指标因子的选取及分级

根据对研究区影响地质环境适宜性评价的5大因素分析得出:地形地貌选取了地形坡度作为评价因子;地质构造选取了断裂密度和断裂活动性作为影响地下空间开发利用适宜性的评价因子;工程地质条件主要为岩土体类型和强度;水文地质方面选取了地下水埋深、含水层富水性特征、地下水的腐蚀性3个评价指标;区内不良地质作用主要为岩溶和流砂。

5.1.3 构建评价指标体系

以上13个地质环境对地下空间开发利用的影响因素作为评价指标层,建立了长株潭城市群核心区地下空间开发利用适宜性综合评价指标体系和分级标准,如图3。

5.1.4 因子层次分析及权重确立

各因素对地下空间地质环境质量的影响程度难以通过直接比较而得出,并进行量化,但可以对两两因素进行对比,确定两者之间的重要程度,并逐层对多个相关联因素进行分别比较(标度值为1~9),最后确

定各因素权重分配并加以量化(表 2)。

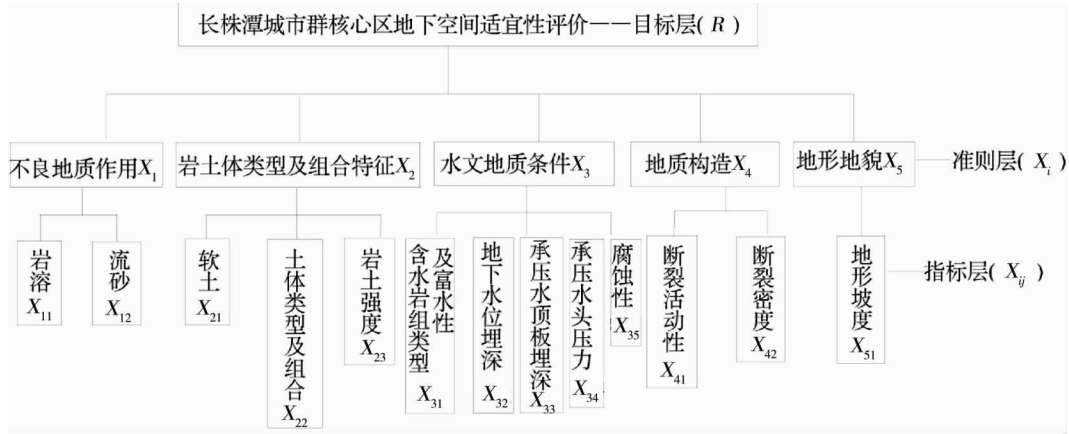


图 3 地下空间适宜性评价体系

表 2 R-X_i 的判断矩阵及计算结果

R-X _i	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	权重
X ₁	1	2	2.5	2.8	4	0.340
X ₂		1	1.5	6	8	0.270
X ₃			1	5	9	0.228
X ₄				1	9	0.115
X ₅						0.038
检验	λ _{max} = 3.000 529; CI = 0.004 12; RI = 0.58; CR = 0.007 11					

准则层 X_i-指标层 X_{ij}的矩阵判断结果,具体见表 3~表 7。

表 3 X₁-X_{ij}的判断矩阵及计算结果

X ₁ -X _{ij}	X ₁₁	X ₁₂	W ₁
X ₁₁	1	3/2	0.6
X ₁₂		1	0.4
检验			

表 4 X₂-X_{ij}的判断矩阵及计算结果

X ₂ -X _{ij}	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	W ₂
X ₂₁	1	1.9	2.3	0.505
X ₂₂		1	1.8	0.303
X ₂₃			1	0.192
检验	λ _{max} = 3.017 529; CI = 0.008 76; RI = 0.58; CR = 0.015 11			

表 5 X₃-X_{ij}的判断矩阵及计算结果

X ₃ -X _{ij}	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	W ₃
X ₃₁	1	2	6.5	3	2.5	0.287
X ₃₂		1	3	5	1/5	0.194
X ₃₃			1	6	1/4	0.108
X ₃₄				1	1/7	0.328
X ₃₅					1	0.083
检验	λ _{max} = 3.000 711; CI = 0.000 36; RI = 0.58; CR = 0.000 61					

表6 X_4-X_{4j} 的判断矩阵及计算结果

X_4-X_{4j}	X_{41}	X_{42}	W_4
X_{41}	1	12/5	0.706
X_{42}		1	0.294
检验			

表7 X_5-X_{5j} 的判断矩阵及计算结果

X_5-X_{5j}	X_{51}	W_5
X_{51}	1	1
检验		

通过层次分析与计算,得到指标层权向量为

$$W=(0.204,0.136,0.136,0.082,0.052,0.065,0.044,0.025,0.075,0.019,0.034,0.081,0.038).$$

5.2 适宜性分区评价

5.2.1 评价模型

本文针对评价因子选取加权平均综合指数模型进行研究区地下空间适宜性评价.为便于各因子的比较,分别对评价指标进行赋值评分,按照适宜性等级从低到高分别赋值1~10.计算综合评分 R_i .权值 W 的引入可以反映出不同评价指标对地下空间开发利用适宜性的不同作用^[23,24].

综合指数法的模型如下式:

$$R_i = \sum_{j=1}^p X_{ij} \times W_j, \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 单元的综合评分; j 为评价因子; X_{ij} 为第 j 单元评价因子在第 i 评价单元的赋值; W_j 为第 j 个评价因子的权重; p 为评价因子数 $p=13$.

5.2.2 评价结果

本次采用对影响因子选取加权平均综合指数模型进行了研究区地下空间适宜性0~15,15~40,40~60 m深度进行了评价,评价结果见表8,图4~图6.对适宜性较差和适宜性差区,其分布范围、特征、存在的主要问题及防治措施建议,现简要阐述如下:

表8 地下空间开发利用适宜性评价

评价深度/m	适宜性好		适宜性较好		适宜性较差		适宜性差	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
0~15	1 668.41	57.13	640.63	25.94	492.00	16.86	118.96	4.07
15~40	1 354.82	46.41	1 370.51	46.93	158.22	5.42	36.45	1.24
40~60	1 477.78	50.62	1 357.65	46.49	68.76	2.35	15.81	0.54

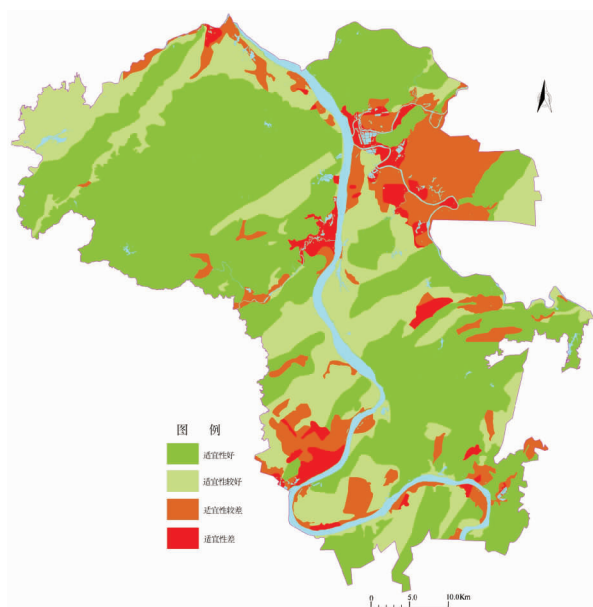


图4 (0~15 m)开发利用地质环境适宜性分区

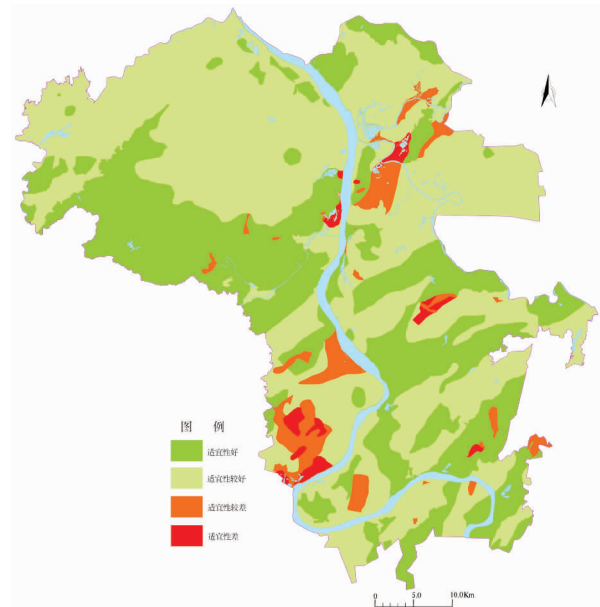


图5 (15~40 m)开发利用地质环境适宜性分区

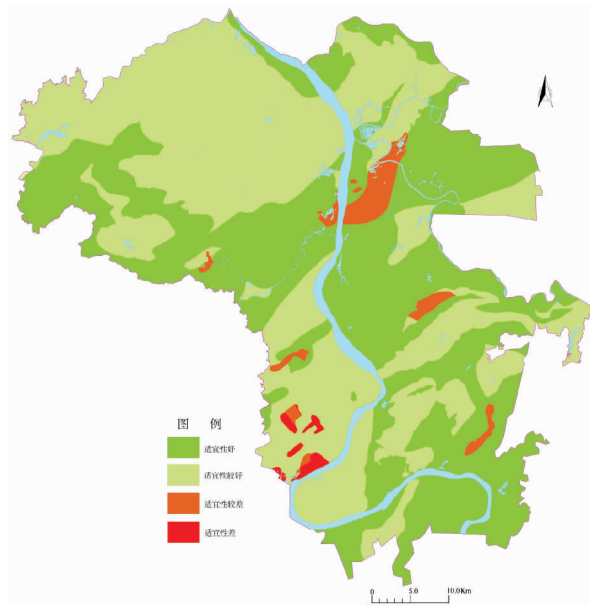


图6 (40~60 m)开发利用地质环境适宜性分区

1) 0~15 m 段

地质环境条件较差区的岩体类型主要为灰岩、白云岩、灰质砾岩,土体类型为橘子洲组、白水江组、马王堆组粘土、粉土、砂砾类土,地下水位埋深3~5 m,含松散岩类孔隙水和碳酸盐岩(含灰质砾岩)裂隙溶洞水,含水丰富,岩溶、软土、流砂等不良地质作用较发育,地质构造中等-复杂,岩溶、流砂、软土为区内主要工程地质问题。

2) 15~40 m 段

适宜性差-较差区与0~15 m段分布地段基本相同,但分布面积小了70%,岩体类型主要为坚硬状灰岩、白云岩,地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙溶洞水,含水量中等丰富,水位埋深浅,岩溶发育,地质构造中等-复杂,有活动断裂分布,对岩溶、透水、软土、流砂以及硐室稳定性应采取针对性措施。

3) 40~60 m 段

适宜性差-较差区与15~40 m段基本相同,但分布面积缩小了56%,岩体类型为红层灰质砾岩、碎屑岩裂隙溶洞水,水量丰富,地质构造复杂,有活动断裂分布,岩溶发育,建设时应应对岩溶、透水硐室稳定性采取针对性措施。

通过地下工程建设适宜性评价,在0~15,15~40,40~60 m深度段,现规划区适宜性差的面积分别只占各段总面积的4.07%,1.24%,0.54%,说明规划区该类工程建设适宜性是适宜的,从已建成营运状况看,上述问题是可解决的。

6 结论

1)长株潭城市群核心区地下空间开发利用深度一般在0~15 m,其次是40 m以内,其中,0~15 m主要是以一般地下商业、地下停车场等为主,地铁、隧道等重要工程开发利用深度为40 m以内。

2)岩溶及流砂等不良地质作用是城市地下空间建设的主要影响因子,其次是岩土体工程性质和水文地质条件中的含水岩层、富水性、地下水水位埋深及地下水化学性质等。

3)长株潭城市群核心区地下空间适宜性综合评价中,0~15 m和40~60 m以适宜性评价好区为主,适宜性较好区次之,15~40 m以适宜性评价较好区为主,适宜性好区次之。3个层次中适宜性好区不良地质作用弱,土质单一,岩质坚硬,水文地质条件较好,地质构造作用弱,地势相对较平坦。其中0~15 m适宜性好区分布面积为1 668.41 km²,15~40 m适宜性好区分布面积为1 354.82 km²,40~60 m适宜性好区分布

面积为 1 477.78 km².

4) 适宜性差区主要是地质环境条件恶劣,地下岩溶发育,地质构造发育,岩体松散或破碎,岩土体工程地质条件差.3个层次中,0~15 m 适宜性差区分布面积为 118.96 km²,15~40 m 适宜性差区分布面积为 36.45 km²,40~60 m 适宜性差区分布面积为 15.81 km².通过评价可知区内适合地下空间开发利用的深度是 0~15 m 和 40~60 m.

参考文献:

- [1] Dyad Kin, Yu D. Underground space is the most important state resource; efficiency and problems of development[J]. Gornyi Zhurnal, 1998(4): 11-15.
- [2] Kimmo R, Jouko R, Kari R. Underground space in land use planning. Tunnelling and Underground Space Technology[J]. 1998, 13(1): 39-49.
- [3] 唐焱, 杨伟洪. 城市地下空间估价研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 1-8.
- [4] 祝文君. 北京旧城区浅层地下空间资源调查与利用研究[D]. 北京: 清华大学, 1992.
- [5] 李相然, 孙淑贤. 谈城市地下空间利用中的工程地质条件研究[J]. 地下空间, 1995, 15(4): 296-300.
- [6] 李相然, 陈永建, 时向东. 现代城市环境工程地质研究的关键技术与问题探讨[J]. 地质与勘探, 2001(3): 68-72.
- [7] 黄玉田, 张钦喜, 孙家乐. 北京市中心区地下空间资源评估探讨[J]. 北京工业大学学报, 1995, 21(2): 93-99.
- [8] 向远华, 黎庶. 长沙市地下空间开发利用与可持续发展[J]. 山西建筑, 2007, 33(31): 23-24.
- [9] 许兰兰, 檀丽丽. 浅析城市地下空间的利用[J]. 山西建筑, 2006, 32(16): 30-31.
- [10] 董雅滨. 城市地下空间开发探讨[J]. 工业建筑, 2006(36): 151-152.
- [11] 朱大明. 城市地下空间开发基本规律初探[J]. 地下空间, 2004, 24(3): 365-370.
- [12] 彭颖, 夏才初, 王文杰. 地下空间在我国城市立体开发中的发展[J]. 地下空间, 2003, 23(2): 35-36.
- [13] 钟羽华. 长沙市地下空间开发管理对策[J]. 国土资源导刊, 2013(10): 33-35.
- [14] 李浩洋. 地下建筑及湘潭市地下空间资源的开发[J]. 基建优化, 2002, 23(2): 36-37.
- [15] 龙墩. 城市中心区地下空间开发利用浅析[J]. 江西建材, 2017(7): 48-52.
- [16] 姜涛, 秦斯成, 宋道柱, 等. 地下空间安全评价方法综述[J]. 环境工程, 2015, 33: 661-668.
- [17] 李英民, 王贵珍, 刘立平, 等. 城市地下空间多灾种安全综合评价[J]. 河海大学学报. 自然科学版, 2011, 39(3): 285-289.
- [18] 刘宝深. 综合利用城市地面及地下空间的几个问题[J]. 岩石力学与工学报, 1999, 18(1): 93-94.
- [19] 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.
- [20] 谢含华, 陈福龙, 陶建华. 福建省中心城市地下空间开发利用问题探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2011(2): 17-23.
- [21] 胡学祥, 刘干斌, 陶还冰. 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(6): 13-18.
- [22] 邢生霞, 吴立进, 徐秋晓, 等. MapGis 为载体的层次分析法在地下空间评价中的应用[J]. 工程勘察, 2015(9): 60-66.
- [23] 史玉金, 张先林, 陈大平. 上海深层地下空间开发地质环境条件及适宜性评价[J]. 地质调查与研究, 2016(2): 52-57.
- [24] 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.