

文章编号: 1674-9057(2019)02-0402-08

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2019.02.019

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

江思义¹, 吴福¹, 王启耀², 刘庆超¹, 李海良¹, 潘晓丽³

(1. 广西壮族自治区地质环境监测总站, 广西 桂林 541004; 2. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061;
3. 广西壮族自治区桂林水文工程地质勘察院, 广西 桂林 541002)

摘 要:以桂林市规划中心城区为例,选取了12个影响岩溶地区地下空间开发利用的地质环境因素(地貌类型、地下水富水性、地下水位埋深、地下河对地下空间开发的影响程度、土体厚度、土体地基适宜性、岩体结构、岩溶塌陷易发程度、岩溶发育程度、断裂构造、特殊性土发育程度、人类工程活动强度),利用地质环境要素通过专家-层次分析法建立了岩溶地区地下空间开发适宜性评价指标体系和评价方法,并通过MapGIS软件实现可视化。依据预测分区指标计算,将研究区浅层地下空间资源开发利用适宜性划分为:适宜性好(I)区的面积为34.43 km²;较好(II)区412.34 km²;较差(III)区397.71 km²;差(IV)区35.52 km²。

关键词:岩溶地区;专家-层次分析定权法;地下空间;地质环境;MapGIS

中图分类号:TU91

文献标志码:A

0 引言

随着城市地下空间开发利用的不断发展,岩溶地区的勘察与施工技术也日益进步,使岩溶地区的地下空间开发利用成为可能^[1]。广州地铁九号线作为“全国第一条在岩溶区动土的地铁线路”,如今已经成功运营,随后广州又继续开发了5条穿越岩溶区的地铁线路;长沙、武汉、南宁、贵阳等城市的地铁线路也穿越了岩溶区域^[2-5]。六盘水市处于典型的岩溶地区,在其被列为“全国首批地下综合管廊建设试点城市”后,各方积极推进,为岩溶区的管廊施工建设积累了宝贵经验^[6]。

鉴于岩溶地区地下空间的开发成本高、难度大,针对岩溶地区地下空间开发利用的影响因素、现状与对策的研究较少,且对岩溶地区地下空间的适宜性评价尚无系统的研究和总结。目前从地质角度对非岩溶区地下空间开发利用进行评价研

究的成果很多:胡学祥等^[7]根据地质条件,利用ArcGIS软件对宁波市地下空间开发适宜性进行了评价;彭建等^[8]基于ArcGIS软件并利用层次分析法提出了适用于某地级市的地下空间开发利用适宜性评价方法;张璐等^[9]针对工程地质问题利用地理信息系统对某城市地下空间开发利用适宜性进行了评价;刘运来等^[10]基于地质环境要素并利用MapGIS对武汉市主城区的地下空间利用适宜性进行了研究;欧孝夺等^[11]利用层次分析法对南宁市地下空间开发适宜性进行研究。针对不同的城市,选取合适的评价因子,再利用恰当的评价方法成为地下空间评价研究的关键。

本文在前人研究成果的基础上,结合岩溶地区地质环境条件,将专家打分法和层次分析法相结合,提出了一种基于MapGIS结合地质环境要素对岩溶地区地下空间开发适宜性评价的方法。评价以桂林市的地质环境为基础,专家打分法和层

收稿日期:2018-06-25

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(12120114022101);广西壮族自治区国土资源厅、桂林市人民政府地质调查项目(桂国土资办[2014]70)

作者简介:江思义(1987—),男,硕士,工程师,研究方向:地质调查和岩土工程勘察,370333108@qq.com。

通讯作者:吴福,高级工程师,404630357@qq.com。

引文格式: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.

次分析法相结合为理论依据,通过 MapGIS 软件对评价结果实现可视化,为岩溶地区地下空间的规划和开发利用提供技术支撑。

1 评价方法研究

城市地下空间的评价方法有很多^[12],目前应用比较成熟的有模糊数学法^[13]、灰色评估法^[14]、层次分析法(AHP)^[8,11]和专家打分法^[9],以及将其中两种及以上的方法相互结合或改进后再使用^[10]。

对以上方法进行对比和总结发现,层次分析法有以下优点:①适用于离散模型,尤其适用于无结构特性的系统评价以及多目标、多准则、多时期的系统评价;②步骤简单明确,容易被决策者了解和掌握。结合专家打分法直观、简便的特点,专家-层次分析定权法在地质环境评价中已得到应用^[15]。基于 MapGIS 平台利用专家-层次分析定权法从地质环境条件的角度对城市地下空间开发适宜性进行评价,该方法简便实用,有利于环境地质调查成果的转化。

本文结合研究区地质环境条件,将专家打分法和层次分析法相结合,利用 MapGIS 的制图与空间分析功能,提出了一种基于 MapGIS 利用地质环境要素对岩溶地区地下空间开发适宜性评价的方法。具体步骤如下:

(1)根据研究区地质环境条件,参考前人的经验,筛选出评价因子,再通过专家打分法最终确定研究区地下空间开发利用的地质环境适宜性分区评价因子。

(2)利用地质调查成果,通过 MapGIS 按各因子的影响程度大小对研究区进行分区,按影响程度大小最多分4类区,最少分2类区,并按因子的影响程度利用边界值法进行评分,根据评分结果对各区进行参数赋属性。

(3)运用层次分析法确定各评价因子的权重数。

(4)根据研究区的实际情况,参考前人的经验,制定地质环境适宜性分区因子及影响程度分级表,利用 MapGIS 软件的属性管理系统,开发出因子的适宜性指数计算程序,通过程序评价计算出各单元网格的适宜性指数(FQI)值。每个分区适宜性指数计算采用适宜性因子判别分值与对应的影响因子权重值的乘积来表示,即

$$FQI = \sum_{i=1}^m R(i) \cdot G(i),$$

式中: FQI —适宜性指数; $R(i)$ —各影响因子的权重值; $G(i)$ —对应影响因子的判别分值。 FQI 越大,表示该区的地下空间开发利用的地质环境适宜性越差;反之,则该单元的地下空间开发利用的地质环境适宜性越好。

(5)通过 MapGIS 软件自动生成 FQI 等值线图,根据各评价单元实际情况对等值线进行修正,从而得到研究区适宜性分区图,并作出适宜性评价。

2 研究区适宜性评价

2.1 研究区概况

研究区包含桂林市主城区、临桂新区,总面积为 880 km²,其中岩溶区面积为 603.35 km²。桂林作为国际旅游名城,提高土地资源的集约化利用水平,加快解决城市交通拥堵、城市内涝、减少管线事故等问题,有地下空间开发的需求和规划。通过开展城市土地地下空间开发利用调查,解决建设中遇到的地质环境容量问题,为桂林城市规划和基础设施建设及管理提供技术支撑。

城市地下空间开发深度的选择和确定直接影响到地下空间开发利用的成本和效益,涉及到适用对象和适用范围。根据本区目前地下空间的开发利用现状并结合其他城市的地下空间开发利用规划,桂林市城市地下空间在竖向上拟分为3层:Ⅰ级空间域(深度0~30 m),为近期民用建筑与地下服务设施及浅层地铁主要利用空间域;Ⅱ级空间域(深度30~50 m),为中期深层地铁及大型地下设施利用空间域;Ⅲ级空间域(50~100 m),为21世纪远期重点开发利用空间域。本文以桂林市Ⅰ级空间域(深度0~30 m)为例进行详细说明。

研究区主要为岩溶地貌,同时分布有膨胀性泥岩、软土及淤泥质土。河流阶地及碳酸盐岩区地下水水量丰富,水位埋深较浅,地下河、塌陷、断裂等,这些地质环境特点是制约其地下空间开发利用的重要因素。

首先进行了环境地质调查,获得了研究区1:5万工程地质图、1:5万水文地质图、1:5万遥感解译图、构造纲要图、地下水位埋深等值线图、地下水入渗系数分布图、岩溶地面塌陷易发程度分区

图、岩溶发育程度分区图、地下河对城市建设影响现状评价图、第四系土体结构及土体厚度等值线图、特殊土分布图、研究区内钻孔及水文地质监测孔的分布及相关数据,以及研究区岩土体的原位试验和室内土工试验结果等。

2.2 评价因子的选取

根据研究区的实际情况,结合其他城市地下空间开发利用经验、前人研究资料,采用专家打分法,选择的岩溶地区地下空间开发利用评价因子包括:地形地貌 B_1 (地貌类型 C_1)、水文地质条件 B_2 (地下水富水性 C_2 、地下水位最小埋深 C_3 、地下河对地下空间开发的影响 C_4)、工程地质条件 B_3 (土体厚度 C_5 、土体地基适宜性 C_6 、岩体结构 C_7)、不良地质条件 B_4 (岩溶塌陷易发程度 C_8 、岩溶发育程度 C_9 、断裂构造 C_{10} 、特殊性土发育程度 C_{11})、人类工程活动 B_5 (人类工程活动强度 C_{12})。岩溶地区地下空间开发适宜性评价指标体系如图 1 所示。

为了达到地下空间开发利用的地质环境适宜性评价目的,结合地质调查成果,又收集了研究区相关图件及数据资料,从施工难易程度和对环境地质的影响角度,分别对各评价因子的资料进行分析处理,得出各因子的分区计算图,下面对各个评价因子进行详细叙述。

2.2.1 地貌类型 C_1 地貌类型直接决定了浅层地下空间开发时的难度大小。根据地貌图,研究区地貌类型共 13 类,结合各地地下工程施工反馈的资料,将溶丘平原、垄岗台地、缓坡丘陵定为 I 类区; I 级阶地、II 级阶地、山前坡洪积裙定为 II 类区;溶岭谷地、孤峰平原、峰林平原、丘陵定为 III 类区;低山陡坡、峰丛洼地、峰林谷地定

为 IV 类区,最终得出研究区内地貌因子对地下空间的影响分区图。

2.2.2 地下水富水性 C_2 在地下空间开发过程中,地下水对实际工程有重大的影响。富水性作为衡量地下水开采时含水层出水能力的指标,富水性等级能较好地反映出地下水对工程实际的影响。研究区内富水性根据综合水文地质图中单井涌水量进行划分。其中,富水性丰富区域为 IV 类区、中等区域为 III 类区、微弱区域为 II 类区、富水性弱的区域为 I 类区。结合研究区水文地质图,最终得出研究区内富水性对地下空间的影响分区图。

2.2.3 地下水位最小埋深 (丰水期) C_3 开发区域的地下水位埋深将影响到施工的手段和进度,施工过程中是否采取抽水降低地下水位埋深的方法,也将直接影响到周围的地质环境。研究区除山体外,孤峰平原、峰林平原、漓江阶地等地形平坦区丰水期地下水位多小于 5 m,溶余堆积区虽在施工时部分钻孔未遇地下水或少数孔地下水位较深 (达 5~10 m),但主要是由于上覆第四系红黏土不含水,下伏岩溶水不均匀,岩溶水一般具微承压性,一旦揭露该层水,地下水位往往稍有上升,总体上稳定水位在 3~5 m 为主。在碎屑岩区山体地段地下水位一般大于 10 m,以 10~15 m 为主;在灰岩山体段地下水位大于 15 m。

在地下水水位埋深等值线图的基础上,地下水位埋深 >30 m 区域为 I 类区、20~30 m 为 II 类区、10~20 m 为 III 类区、<10 m 区域为 IV 类区,绘制出地下水位埋深对地下空间的影响分区图。

2.2.4 地下河对地下空间开发的影响 C_4 地下河对城市浅层地下空间开发建设的环境影响主要表

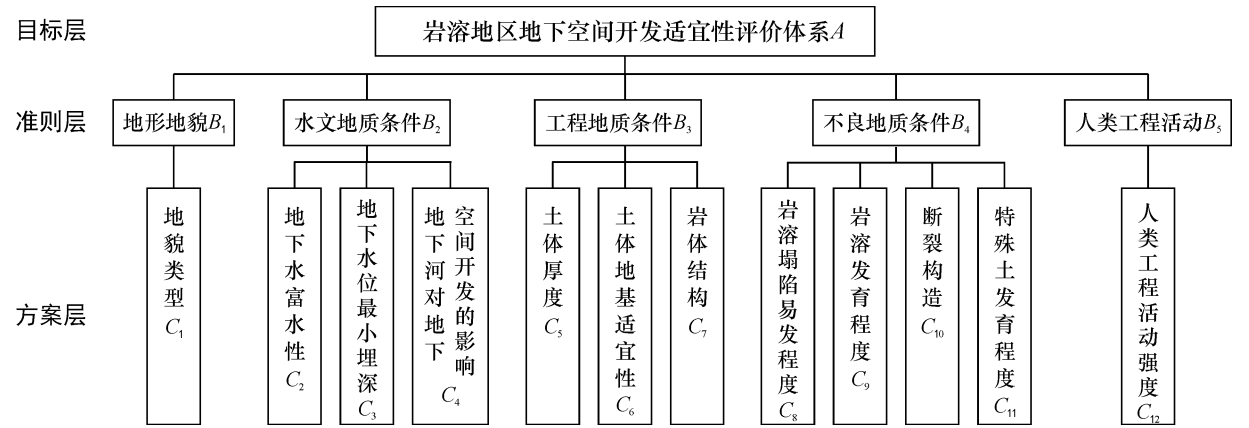


图 1 岩溶地区地下空间开发适宜性评价指标体系

Fig. 1 Index system for evaluating the suitability of development of underground space in karst area

现为地下河对周围环境产生的负效应,负效应越强,越不利于地下空间资源开发利用,适宜性越差。根据桂林市地下河对城市建设的影响评价图,按地下河影响范围内地质环境条件及城市规划特征,将研究区地下河对城市建设的影响为4个级别:地下河对地质环境无影响的区域,包括碎屑岩区域、地下河流域所在地下水单元以外区域为Ⅰ类区;地下河对地层环境影响弱区为Ⅱ类区;中等区为Ⅲ类区;影响强烈区为Ⅳ类区,依此得到地下河对地下空间的影响分区图。

2.2.5 土体厚度 C_5 从地下空间开发利用的施工难易度考虑,土体厚度是影响地下空间建设的重要因素,在不考虑其他因素情况下,土体越厚越有利于地下空间建设,反之则为不利。

研究区第四系主要分布于河流阶地、尧山洪积扇、孤峰平原、峰林平原及岩溶谷地中,漓江阶地厚度10~56 m,尧山西侧坡洪积层厚8~30 m,最厚达40 m,岩溶平原、岩溶谷地中厚度一般3~8 m,局部大于10 m,区内土体厚度变化较大。在第四系土层等厚图的基础上,以土体厚度>30 m区域为Ⅰ类区、10~30 m区域为Ⅱ类区、5~10 m区域为Ⅲ类区、<5 m区域为Ⅳ类区,绘制出土体厚度对地下空间的影响分区图。

2.2.6 土体地基适宜性 C_6 土体地基适宜性对地下空间开发利用适宜性的影响程度主要表现为建筑地基的适宜性越好,地下岩土体更稳定,也更适宜地下空间开发利用。根据建筑地基适宜性分区图,将建筑地基适宜性好区定为Ⅰ类区、较好区定为Ⅱ类区、一般区定为Ⅲ类区、差区定为Ⅳ类区,得到土体地基适宜性对地下空间的影响分区图。

2.2.7 岩体结构 C_7 工程地质岩组类型对施工有较为直接的影响,不同岩性组合其岩体结构、岩石强度对施工的难易程度有很大的影响。

据工程地质资料,庙岭以西属低山丘陵、缓坡丘陵区,出露地层为鹿寨组(C_{1l})、五指山组(D_3w),以薄层泥岩、页岩为主,间夹少量粉砂岩或硅质岩、泥质灰岩,总体上以软岩、极软岩为主夹较硬岩;0~10 m段总体上岩层为强风化状、散体状结构,呈破碎、较破碎状。古近系、白垩系、三叠系均为零星分布,其泥质粉砂岩、泥岩强风化厚度在15~30 m(0~10 m为散体状),该区域定为Ⅳ类区;信都组(D_2x)以泥质粉砂岩、砂岩为主,

夹少量页岩,0~10 m段呈强-中风化状,均为碎裂状结构,该区域定为Ⅲ类区;船埠头组(C_{1c})、尧云岭组(C_{1y})、东岗岭组(D_2d)泥质灰岩夹页岩、泥岩以较硬岩为主,浅层岩体裂隙发育但总体较完整,呈中层夹薄层状,层状构造,该区域定为Ⅱ类区;泥盆系灰岩、白云质灰岩,浅层岩体裂隙局部发育,总体较完整,为整体块状结构,该区域定为Ⅰ类区。得到岩体结构对地下空间的影响分区图。

2.2.8 岩溶塌陷易发程度 C_8 岩溶地面塌陷对地下空间建设影响较大,可能使已有地下空间渗漏地下水、建筑损坏失稳等,使拟建和在建的地下空间场地不稳定,甚至破坏隔水层,导致地下水涌出,增加施工难度,塌陷对场地、地基可能造成的危害不容忽视。

研究区内发生过岩溶地面塌陷403处,并且主要发生在中心城区工程集中区域,根据研究区岩溶地面塌陷易发程度分区图,将非易发区定为Ⅰ类区、低易发区定为Ⅱ类区、中易发区定为Ⅲ类区、高易发区定为Ⅳ类区,从而得到岩溶塌陷易发程度对地下空间的影响分区图。

2.2.9 岩溶发育程度 C_9 地下岩溶发育对地下工程建设影响较大,岩溶发育区岩面起伏大、浅层溶洞发育易造成岩溶地基不均匀沉降,增加工程难度,且强岩溶区往往地下水位较浅、水量丰富,岩面可能存在土洞或岩溶地面塌陷发育,均可能影响地下工程的边壁和地基的稳定,不利于地下空间开发利用。裸露型岩溶区溶洞发育,主要影响人防洞室、隧洞等地下工程稳定性。覆盖型岩溶区下伏特征主要为溶沟槽、溶洞、地下河、溶潭等。

研究区可溶岩分布区约603.35 km²,约占研究区总面积的68%,岩溶发育程度分为弱、中等、强烈3个级别。根据研究区岩溶发育程度分区图,将非岩溶区定为Ⅰ类、岩溶弱发育区定为Ⅱ类、中等发育区定为Ⅲ类、强发育区定为Ⅳ类,得到岩溶发育程度对地下空间的影响分区图。

2.2.10 断裂构造 C_{10} 断裂对工程开挖的影响表现为两方面:一方面,由于断裂的地面错动直接损害跨越该断层即将修建的建(构)筑物,有些断裂错动时附近有伴生的地面变形,容易引起工程开挖过程中塌方,在断裂附近的地下工程将会增加设计及施工难度及经费;另一方面,伴有地震发生的活断层,强烈的地震对较大范围内工程开挖的损害。

研究区构造格局复杂,北部北东向构造断裂较发育,南部区段南北向、北西向断裂构造较发育,有灵川大断裂、芦笛岩断裂、尧山断裂等区域性构造分布,一般区域性构造破碎带宽 50~200 m,次一级的断裂影响带在 10~50 m。综合考虑断裂影响,现按断裂分布密度、影响带交叉范围等,划分出不发育区或较发育两个区:断裂不发育区定为Ⅰ类区,断裂较发育区定为Ⅳ类区,得到地质构造对地下空间的影响分区图。

2.2.11 特殊性土发育程度 C_{11} 特殊土发育程度对地下空间开发利用适宜性的影响程度主要表现为特殊性土发育的地区影响地下空间边壁稳定,以及使地基不均匀沉降,特殊土越发育,地下空间开发利用施工难度、成本越大。

研究区对地下空间有影响的特殊性土主要包括软土、淤泥质土、膨胀性土,研究区局部峰林谷地及岩溶平原区地表或基岩面分布有 0.5~3.0 m 软黏土或地表淤泥质土,局部溶槽中软黏土厚度达 9.0 m,膨胀性土主要指具有膨胀性的红黏土、黏土,厚度一般小于 8 m。根据研究区的特殊土分布图,将特殊性土不发育区定为Ⅰ类、较发育区定为Ⅲ类、发育区定为Ⅳ类,得到特殊土对地下空间的影响分区图。

2.2.12 人类工程活动强度 C_{12} 人类工程活动主要包括现有地面建筑、地下建筑,抽取地下水对地下水流场的改变,爆破振动、钻孔施工注水灌浆对地下岩土体的影响等。综合上述可能影响的人类活动,将研究区人类活动程度强烈区定为Ⅱ类、中等区为Ⅲ类、程度弱区为Ⅳ类,得到人类工程活动对地下空间的影响分区图。

2.3 评价因素权重计算和分级赋值

2.3.1 基于层次分析法的岩溶地区地下空间开发利用分区评价层次结构模型 以岩溶地区浅层(≤ 30 m)地下空间开发利用分区为目标层(A 层),地形地貌(B_1)、水文地质条件(B_2)、工程地质条件(B_3)、不良地质作用(B_4)、社会经济条件(B_5)这 5 个一级指标为准则层(B 层),地下水富水性、土层厚度、断裂构造、岩溶发育程度等 12 个二级影响因素为方案层(C 层)。一级因子依次记为 $B_1 \sim B_5$,二级因子依次记为 $C_1 \sim C_{12}$,建立层次结构模型(图 1)。

浅层地下空间建设规划以建设地下人防(兼

停车)、地下商业、地下交通、仓储、地下污水处理等环境设施为主,主要采用明挖方式建设。据工程主要特点考虑:地貌类型、地下水富水性、地下水最小水位埋深、地下河对地下空间建设的影响、土体厚度、土体地基适宜性、岩体结构、岩溶塌陷易发程度、岩溶发育程度、断裂构造、特殊土发育程度、人类工程活动强度等 12 个影响因素。

2.3.2 构建判别矩阵及层次总排序 通过对城市地下空间开发利用影响因素的分析,利用层次分析 1~9 标度法(表 1)表示因素之间的影响强弱,逐项就各层中的因子对上一层目标的相对重要性进行两两比较,构造判别矩阵;同时,参考专家意见,确定其相对重要性并赋以相应的分值,构造判断矩阵;再计算最大特征根、对应的特征向量,各层次的单排序以及进行判断矩阵一致性检验,其计算结果见表 2~5。

2.3.3 岩溶地区地下空间开发利用的地质环境适宜性评价因素分级赋值 分区指标量化分级是在适宜性分级基础上,通过对研究区各因子影响因素、因子数据统计分析,确定因子强和弱两个极限值,按照各评价因子对研究区影响程度,以阈限或递减规律取值来实现量化分级,各因子的量化分级详见表 6。

表 1 判断矩阵的标度及含义

Table 1 Scale and implication of the discrimination matrix	
标度	含义
1	两个因素相比,具有相同重要性
3	两个因素相比,前者比后者稍重要
5	两个因素相比,前者比后者明显重要
7	两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	两个因素相比,前者比后者极端重要
2、4、6、8	上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} ,那么因素 j 与因素 i 的重要性之比 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

表 2 分区因子判别矩阵 $A-B$

Table 2 Partition factors judgment matrix $A-B$						
A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	$W_{B_i}(k=1,2,3,4,5)$
B_1	1	1/8	1/4	1/9	1/2	0.038 2
B_2	8	1	2	1/2	4	0.272 3
B_3	4	1/2	1	1/4	2	0.136 1
B_4	9	2	4	1	8	0.485 3
B_5	2	1/4	1/2	1/8	1	0.068 1

注: $CR=0.008\ 9<0.1$, 满足一致性检验,故上述特征向量 W_i 可作为权向量。

表 3 分区因子判别矩阵 $B_2 - C$

Table 3 Partition factors judgment matrix $B_2 - C$				
B_2	C_2	C_3	C_4	$W_{C_i} (i = 2, 3, 4)$
C_2	1	2	4	0.571 4
C_3	1/2	1	2	0.285 7
C_4	1/4	1/2	1	0.142 9

注：CR=0.000 0<0.1,满足一致性检验,故上述特征向量 W_i 可作为权向量。

表 4 分区因子判别矩阵 $B_3 - C$

Table 4 Partition factors judgment matrix $B_3 - C$				
B_3	C_5	C_6	C_7	$W_{C_i} (i = 5, 6, 7)$
C_5	1	1	1/2	0.250 0
C_6	1	1	1/2	0.250 0
C_7	2	2	1	0.500 0

注：CR=0.000 0<0.1,满足一致性检验,故上述特征向量 W_i 可作为权向量。

表 5 分区因子判别矩阵 $B_4 - C$

Table 5 Partition factors judgment matrix $B_4 - C$					
B_4	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	$W_{C_i} (i = 8, 9, 10, 11)$
C_8	1	1	2	4	0.363 6
C_9	1	1	2	4	0.363 6
C_{10}	1/2	1/2	1	2	0.181 8
C_{11}	1/4	1/4	1/2	1	0.090 9

注：CR=0.000 0<0.1,满足一致性检验,故上述特征向量 W_i 可作为权向量。

表 6 研究区浅层地下空间开发利用的地质环境适宜性分区因子及影响程度分级表

Table 6 Geo-environment suitability partitioning factors and influence degree ranking of shallow layer in the research area							
指标	边界值法	I	II	III	IV	边界值法	权重
	(7.5,10]	(7.5,10]	(6.25,7.5]	(1.25,6.25]	[0,1.25]	[0,1.25]	
地貌类型 C_1		溶丘平原、垄岗台地、缓坡丘陵	Ⅱ级阶地、山前坡洪积裙、Ⅰ级阶地	溶岭谷地、孤峰平原、峰林平原、丘陵	峰丛洼地、峰林谷地、低山陡坡		
评分取值	9	9	6.5	5	0.5	0.5	0.038 2
地下水富水性 C_2		贫乏	中等	丰富	丰富		
评分取值	9	9	6.5	5	0.5	0.5	0.155 6
地下水最小埋深 C_3		>30 m	30~20 m	20~10 m	≤10 m		
评分取值	9	9	7.5	3	0.5	0.5	0.077 8
地下河对地下空间开发的影响程度 C_4		无影响	影响弱	影响中等	影响大		
评分取值	9	9	6.5	5	0.5	0.5	0.039 0
土体厚度 C_5		>30 m	10~30 m	5~10 m	<5 m		
评分取值	9	9	6.5	5	1	1	0.034 0
土地地基适宜性 C_6		适宜性良好	适宜性较好	适宜性一般	适宜性差		
评分取值	9	9	7	6.25	1	1	0.034 0
岩体结构 C_7		整体块状结构	层状结构	破裂状结构	散体状结构		
评分取值	9	9	7	6.25	1	1	0.068 1
岩溶塌陷易发程度 C_8		非易发区	低易发	中易发	高易发		
评分取值	9	9	7	6.25	1	1	0.176 5
岩溶发育程度 C_9		非岩溶	弱发育	中等发育	强发育		
评分取值	10	10	7.5	3	0.5	0.5	0.176 5
断裂构造 C_{10}		不发育	—	—	较发育		
评分取值	9	9	—	—	1	1	0.088 2
特殊土发育程度 C_{11}		不发育	—	较发育	发育		
评分取值	9	9	—	6.25	1.25	1.25	0.044 1
人类工程活动强度 C_{12}		—	弱	中等	强烈		
评分取值		—	7	6.25	1	1	0.068 1

2.3.4 MapGIS 加权叠加及量化分析 因研究区面积较大,网格单元多,利用数据量很大。为此,MapGIS 软件的属性管理系统,开发出因子的适宜性指数计算程序,编制了“研究区地下空间开发利用地质环境适宜性分区评价程序”用于评价计算。该程序包含适宜性分区评价软件包,可满足地下空间开发利用地质环境适宜性分区模糊综合评价的要求。

各单元网格 FQI 值求出后,运用 MapGIS 软件自动生成 FQI 等值线图,根据各评价单元实际情况对等值线进行必要的修正,最后根据 FQI 等值线图对研究区适宜性进行分区,分区标准为: $7.00 \leq FQI$ 为地下空间开发利用地质环境适宜区; $4.50 \leq FQI < 7.00$ 为基本适宜区; $2.00 \leq FQI < 4.50$ 为适宜性较差区; $FQI < 2.00$ 为适宜性差区。桂林市浅层地下空间开发适宜性评价图见图 2,通过分析该图对研究区作出地下空间开发适宜性评价,最终得出桂林市浅层(≤30 m)地下空间开发利用地质环境适宜性分区,见表 7。

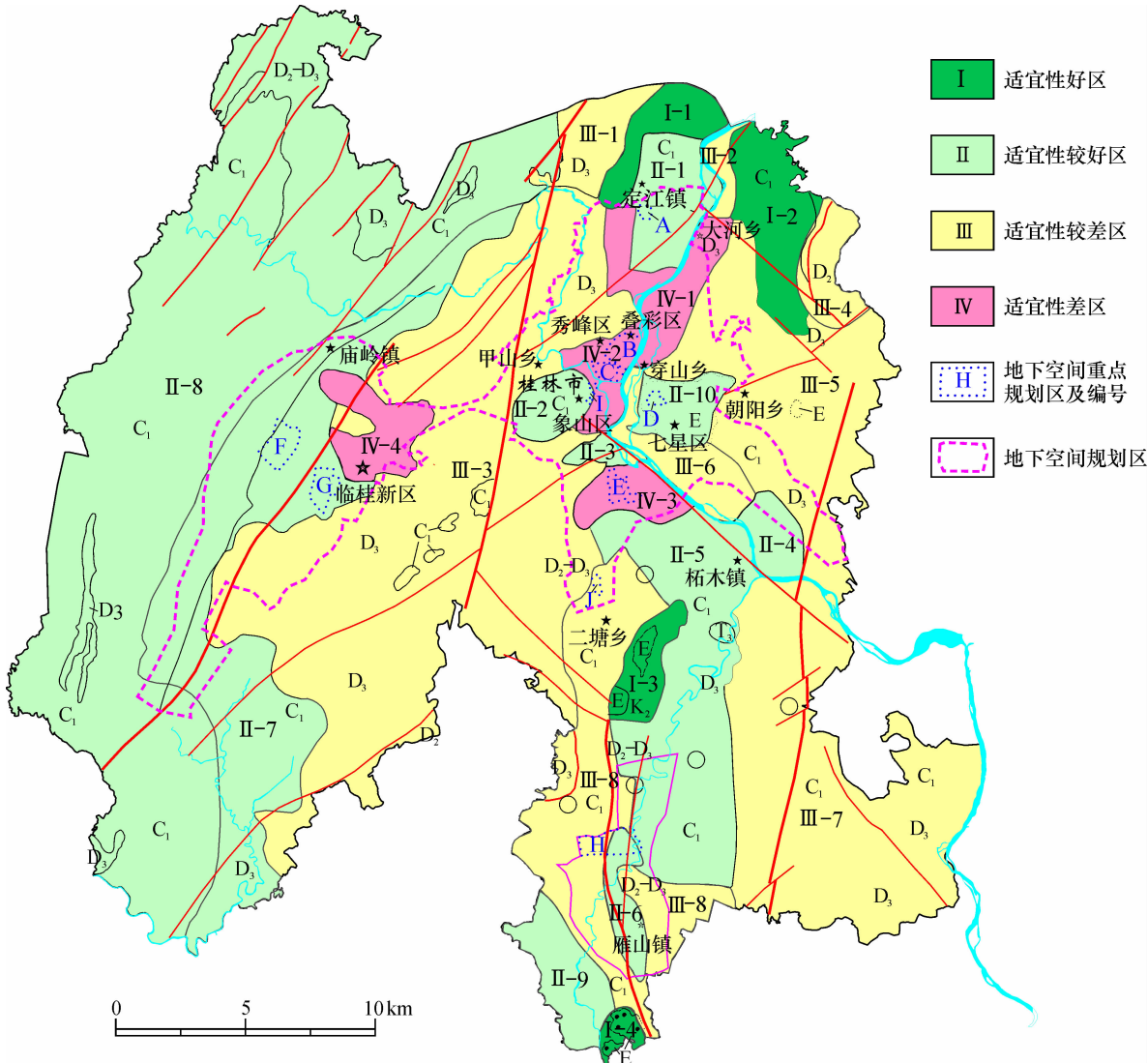


图2 桂林市浅层地下空间开发适宜性评价图

Fig. 2 Evaluation suitability of underground development for shallow-layer of Guilin
E—古近系；K₂—上白垩统；C₁—下石炭统；D₃—上泥盆统；D₂—中泥盆统

依据预测分区指标计算，将研究区浅层地下空间资源开发利用适宜性划分为适宜性好区（Ⅰ）、适宜性较好区（Ⅱ）、适宜性较差区（Ⅲ）、适宜性差区（Ⅳ）4 种类型，计算研究区的面积为 880.00 km²，其中适宜性好区（Ⅰ）的面积为 34.43 km²、适宜性较好（Ⅱ）区的面积为 412.34 km²、适宜性较差区（Ⅲ）的面积为 397.71 km²、适宜性差区（Ⅳ）的面积为 35.52 km²。

3 结 论

以桂林市规划中心城区的地质环境综合调查成果资料作为依据，采用专家打分法分析了影响桂林市城市地下空间开发利用适宜性的地质环境因素，影响岩溶地区地下空间开发利用的地质环

境 12 个因素分别为：地貌类型、地下水富水性、地下水位埋深、地下河对地下空间开发的影响程度、土体厚度、土体地基适宜性、岩体结构、岩溶塌陷易发程度、岩溶发育程度、断裂构造、特殊性土发育程度、人类工程活动强度。不同的研究区根据其具体的调查情况为依据，通过层次分析法建立对应的评价指标体系和评价数学模型，利用 MapGIS 的空间分析功能对城市地下空间开发利用适宜性进行评价研究，其结果相对直观、科学、准确。该评价结果仅基于桂林市地质环境条件，为了让分析结果更科学合理，在详细规划阶段，还应考虑地下埋藏管线及相对保密的地下因素造成的影响，以及相邻建（构）筑物其避让宽度等。

表 7 桂林市浅层地下空间开发利用适宜性分区				
Table 7 Evaluation suitability of underground space development and utilization for shallowlayer of Guilin				
适宜性好 区编号	适宜性好 区分块编号	面积 /km ²	占总面积 比例/%	小计/km ²
I	I - 1	8.43	3.91	34.43
	I - 2	16.67		
	I - 3	7.49		
	I - 4	1.84		
II	II - 1	12.39	46.82	412.34
	II - 2	6.34		
	II - 3	1.8		
	II - 4	5.2		
	II - 5	52.76		
	II - 6	5.14		
	II - 7	82.62		
	II - 8	226.48		
	II - 9	12.33		
	II - 10	7.28		
III	III - 1	10.48	45.19	397.71
	III - 2	2.75		
	III - 3	185.68		
	III - 4	7.17		
	III - 5	52.76		
	III - 6	10.55		
	III - 7	79.18		
	III - 8	49.14		
IV	IV - 1	12.85	4.04	35.52
	IV - 2	5.95		
	IV - 3	6.85		
	IV - 4	9.87		
总面积合计/km ²		880.0(其中水域面积 10.2 km ²)		

参考文献：

[1] 刘之葵, 刘宝臣, 曹平. 岩溶地区岩土工程技术现状评述

[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 6 (3): 578 - 582.

[2] 易介民. 岩溶地区地铁隧道稳定性的数值模拟分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[3] 赵震洋. 贵阳市地下空间开发利用的现状与对策 [J]. 地下空间, 2004, 24 (5): 638 - 641.

[4] 宋小庆. 影响贵阳地下空间开发的环境地质因素分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (S2): 503 - 507.

[5] 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.

[6] 程子彦. 贵州省六盘水市地下综合管廊 PPP 项目: 攻坚喀斯特地貌难题, 将“短板”打造成“样板” [J]. 中国经济周刊, 2016 (11): 41 - 43.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 刘运来, 吴江鹏, 碰培宇, 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.

[11] 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.

[12] 郑强. 城市地下空间开发潜力研究——以天府新区为例 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 蔡鹤生, 周爱国, 唐朝晖. 地质环境质量评价中的专家—层次分析定权法 [J]. 地球科学, 1998, 23 (3): 299 - 302.

Suitability evaluation of underground space development in karst area: an example from Guilin

JIANG Si-yi¹, WU Fu¹, WANG Qi-yao², LIU Qing-chao¹, LI Hai-liang¹, PAN Xiao-li³
(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Guilin 541004, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Guilin hydrogeological and Geological Survey Institute, Guilin 541002, China)

Abstract: Taking the planning central urban area of Guilin as an example, 12 geological and environmental factors affecting the development and utilization of underground space in karst areas were selected (Geomorphic types, groundwater enrichment, groundwater level, the impact of underground rivers on underground space development, soil thickness, foundation suitability, rock mass structure, karst collapse susceptibility, the degree of karst development, fracture structure, special soil development, human engineering activities intensity). The evaluation index system and method of suitability for underground space development in karst area were established through the expert - analytic method using geological environment elements, and visualization is realized through MapGIS software. According to the predicted zoning index, the suitability of shallow underground space resources development and utilization in the study area is divided. The best suitability area is 32.59 km². The sub-level suitability area is 412.34 km². The poor suitability area is 397.71 km². And the even-worse area is 35.52 km².

Key words: karst region; expert-analytic hierarchy process; underground space; geological environment; MapGIS