

李浩, 杨强, 罗旋, 等. 贵安新区生态新城岩溶区地下空间利用适宜性评价[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 176-187.

DOI: 10.11932/karst2021y38

贵安新区生态新城岩溶区地下空间利用适宜性评价

李浩^{1,2}, 杨强³, 罗旋^{1,2}, 王兵虎^{1,2}, 邵长庆^{1,2}, 王思源^{1,2}, 乐琪浪³

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300304; 2. 自然资源部地质环境监测工程技术创新中心, 天津 300304; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要:以贵安新区生态新城为例, 在分析研究区地质环境条件基础上, 提出了地下空间利用概念模型, 建立了基于地下水系统单元的分区、分层地下空间利用适宜性评价体系和评价方法, 利用 ArcGIS 平台对典型岩溶区进行了地下空间利用适宜性评价, 提出了针对性的地下空间利用建议。结果表明: (1) 地下空间适宜性较好以上面积半地下占 36.11%、浅层占 44.06%、次浅层占 43.94%, 半地下空间利用主要受地形起伏程度、地层岩性破碎程度影响, 浅层地下空间利用主要受地质构造、地层岩性、地表水系、岩溶发育程度、地下工程建筑影响, 次浅层地下空间利用受地下水、岩溶发育程度和构造影响; (2) 基于地下水系统单元和 ArcGIS 平台建立评价方法较为方便实用, 评价结果经验证较为可靠; (3) 地下空间开发利用过程中应准确划分地下水系统, 查清地下水动态, 重视涌水、岩溶塌陷等灾害。建立的评价方法及评价结果为典型岩溶区地下空间利用、国土空间规划、地质灾害防治提供借鉴和指导。

关键词: 贵安新区; 岩溶区; 城市地下空间; 适宜性评价

创新点: 提出了岩溶区地下空间利用概念模型, 建立了基于地下水系统单元的分区、分层地下空间利用适宜性评价体系和评价方法。

中图分类号: TU984.113 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0176-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

近年来, 随着我国城市化进程不断加快, 地面和地上空间开发利用逐渐饱和, “交通阻塞、土地资源紧张、地面噪音、城市灾害”等各类“城市病”日趋严重^[1-3], 合理开发利用城市地下空间, 是缓解城市资源匮乏、改善环境状况、提升居民生活品质的重要途径, 具有重要现实意义^[4-5]。21世纪以来, 很多大中城市如北京、上海、武汉、成都、沈阳、重庆、哈尔滨、大连、苏州、郑州等, 都相继开始进行各类大规模地

下空间的开发, 取得了良好的效果^[6-9]。近年来, 随着岩溶区城市发展和勘察、施工技术的进步, 岩溶区的地下空间开发利用也屡见不鲜, 广州市率先运营5条穿越岩溶区的地铁线路^[10], 济南、长沙、武汉、南宁、贵阳等岩溶城市也开展了轨道交通等地下空间的利用^[11-12], 但岩溶区地下空间开发利用方面存在诸多问题, 2019年12月1日广州地铁施工中发生地面塌陷事故, 贵阳地铁1号线施工过程中出现了涌水突泥等事件。贵安新区作为黔中高原台面的典型岩溶山地城市^[13], 独特的岩溶地貌决定了其城市

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221747); 中国地质调查局地质调查二级项目“黔中城市群综合地质调查”(DD20190268); 2019年度自然资源部杰出青年人才资助项目“地质灾害风险评价与管控技术方法研究”

第一作者简介: 李浩(1990—), 男, 工程师, 主要从事工程地质和地质灾害研究工作。E-mail: lhao@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 杨强(1980—), 男, 高级工程师, 从事地质灾害和综合地质调查研究。E-mail: yangqiang@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2021-12-02

发展中不仅面临人地矛盾等共有问题,还面临岩溶塌陷、基坑岩溶涌水等工程地质问题^[14-16],地下空间具有不可再生、利用方式难以变更的属性^[17],贵安新区“高端化、绿色化、集约化”发展模式,“多层次、一体化”的轨道交通网络体系构建,以及地下其他综合设施系统的建设均对地下空间资源利用提出了极高的要求。当前贵安新区对于城市岩溶地下空间资源利用还处于规划和实施的初期阶段,更亟需在地下空间大规模开发之前,查清地下空间结构特征,探索研究适合岩溶区地下空间适宜性评价的方法并进行示范。

在前人研究的基础上,结合贵安新区城市地下空间建设规划,选取典型区,在综合地质调查、工程勘察、地下水动态监测等工作的基础上,以不同岩溶水文地质单元(含水介质)为基础,建立评价模型,分析相关指标层的贡献率,采用专家-层次分析法,提出了黔中高原台面白云岩岩溶区城市地下空间利用适宜性评价方法,分区、分层评价了生态新城地下空间利用适宜性,提出了针对性的利用建议,对服务贵安新区贵安站、地铁S1号线及周边地下综合管廊建设具有指导意义,对促进岩溶区城市地下空间科学开发利用和资源、生态环境保护,具有现实意义。

1 研究区概况

贵安新区2014年1月6日设立,是国务院批复设立的第八个国家级新区。研究区位于贵安新区直管区生态新城湖潮乡境内,总面积2 km²,西至沪昆高铁(贵安站),东至碧桂园贵安一号,北侧为水库,南至京安大道,是贵安新区核心城区,承担行政、交通枢纽、文化、商务、商业服务中心等重要功能。《贵安新区直管区近期建设规划》中明确提出生态新城地下空间近期建设主要为区域内中央活力区站前广场及部分行政、文化、商务、商业等现代服务业功能的打造,同时结合轨道S1线、综合管廊、地下道路等项目的建设,梳理并整合建设沿线地下空间系统。

研究区是黔中高原台面保存完整的少数地区之一,地形相对高差多小于100 m,平均海拔1 250 m左右,高度范围1 223~1 314 m之间,整体略呈西高东低走势,主要为高原丘陵,以及附属于丘陵之中的山间盆地及局部湖泊,由于研究区处于开发建设

阶段,地貌受到人为建设改造的影响较大,多为开挖深沟和堆积高地。研究区受中八-广顺宽缓复式向斜影响较大,向斜核部位于研究区西部,向斜轴向呈近南北向,枢纽波状起伏,核部地层为三叠系中统花溪组(T₂h),两翼倾角5°~20°,卷入地层为三叠系中下统安顺组,受该宽缓褶皱的影响,区内地层产状较缓,靠近褶皱核部及断层带其岩体破碎。受燕山期构造作用影响,区内构造发育,多为正断层,断层带附近见断层角砾岩残块,靠近断层附近节理裂隙发育,还见有“S”状挠曲变形。研究区地层主要为三叠系中下统安顺组(T_{1,2}a)、中统花溪组及河谷低洼地带零星第四系(Q),岩性为薄层、中厚层-厚层块状白云岩、细晶白云岩、溶塌角砾白云岩夹薄层泥质白云岩、白云质泥岩(图1)。区内地层绝大部分为碳酸盐岩,因气候温和多雨,岩溶发育强烈,岩溶裂隙、管道普遍,地下水系统复杂,严重制约了地下空间的开发利用。

2 评价方法选择

国外对地下空间资源利用研究较早,多结合城市发展规划开展研究,国内从上个世纪末逐渐关注并开展地下空间的适宜性评价。由于城市地下空间适宜性评价涉及影响因素较多,前人研究选择方法不一,主要包括层次分析法、专家打分法、多目标线性加权函数法、变权法、模糊评估法、熵权法等方法^[18-29],也出现了利用三维地质模型进行评价的新方法^[30-31]。前人在评价指标体系及评价流程做了很好的探索,但关于岩溶区地下空间利用评价较少,存在评价概念模型不清晰,评价指标选择不统一,评价方法不成熟等问题。对比以上方法,专家-层次分析法能够把复杂问题中的各因素划分成相关联的有序层次,可以实现定量分析与定性分析相结合,是一种较好的权重确定方法,该方法在前期地质调查资料丰富详实的基础上,评价流程简单,结果验证程度高,可在岩溶区进行推广。评价流程如下:

(1)建立评价概念模型:根据岩溶区的地貌特点及地下空间利用形式,以不同的岩溶地下水系统单元为评价分区,在综合物探解译和工程地质勘察成果的基础上,建立垂向分层评价模型;

(2)确定评价因子:根据岩溶区地质环境特点,参考前人成果,筛选出影响岩溶区地下空间利用的



图1 研究区综合地质图

Fig. 1 Comprehensive geological map of the study area

地质环境条件、生态环境敏感性要素及建设利用现状等要素,确定目标层和准则层,通过专家打分法确定各评价因子并分级赋值;

(3)确定准则层、指标层权重:利用层次分析法,构造判断矩阵,对各个评价因子进行重要性排序,通过一致性检验后,确定指标层权重;

(4)利用 ArcGIS 平台实现评价:对每个指标层进行分级,根据分级特征并进行赋值(A_i),设定有利于地下空间开发因素其属性值高,并设定 $0 < A_i \leq 10$,最后利用多目标线性加权函数法进行计算,其基本表达关系式为: $I_i = \sum A_i W_i$ 。式中 I_i 为各层的适宜性评价指标的分值, A_i 为各评价因子分级取值, W_i 为各评价因子的权重取值。根据结果自动分级,最后通过反演校正,得到评价结果。

3 适宜性评价

3.1 评价模型建立

查清地下地质结构与岩溶发育程度,划分区域地下水系统单元是建立岩溶区地下空间评价模型的

关键。由于研究区相关内容较少,也缺乏岩溶区地下空间利用相关规范,故本次评价模型主要依据生态新城规划中对地下空间的利用形式及地下地质结构进行确定。

论文以综合地质调查、综合物探、工程地质勘查、地下水动态监测成果为基础,划分了区域岩溶发育程度及地下水系统边界,确定了横向以不同地下水系统划分评价单元,垂向上以地下空间利用形式及地质结构划分分层的评价单元。

3.1.1 垂向岩溶发育程度

受区域地壳发生间歇性抬升/下降等构造运动的影响,研究区岩溶发育分布在垂向上具有分层性。据钻孔资料揭露,区内垂向岩溶发育可划分: I 区(高程 1 228~1 253 m)、II 区(1 206~1 228 m)和 III 区(1 158~1 206 m)。I 区弱岩溶化岩层:溶蚀现象微发育或少发育,仅局部见少量溶孔,孔径多大于 3 mm,以不规则状为主,少充填钙质、泥质或无充填,无充水现象; II 区强岩溶化岩层:以出现溶洞为主要特征,溶洞高以 2.0~3.5 m 为主,充填物主要为流塑

状红黏土, 充填度不等(2%~30%), 无充水现象; 溶孔多发育, 孔径以 0.5~30.0 mm 为主, 以不规则状为主, 次为椭圆状、圆状, 多半充填钙质、泥质, 均未见充水现象。钻孔揭露溶洞主要出现在 ZK04 和 ZK06, 大致呈北东走向, 与区内主要构造方向一致。Ⅲ区中岩溶化岩层: 溶孔较发育, 局部微发育, 孔径以 0.1~50.0 mm 为主, 以不规则状为主, 次为椭圆状、圆状, 局部半充填钙质、泥质, 部分钙质已形成晶型较好的方解石, 无充水现象。

3.1.2 平面岩溶发育程度

研究区及附近平面上岩溶发育具有不均匀性, 具体表现在不同构造部位、不同地层岩性上发育程度的不均匀性, 大致可以划分为 3 个岩溶发育区(图 1)。其中 A 区为强岩溶化发育区, 基本对应于强褶皱构造变形区, 发育溶隙、溶孔、溶洞和溶潭, ZK04、ZK06 和 ZK07 就分布于该区; B 区为中岩溶化发育区, 基本对应于中构造变形区, 溶隙、溶孔和溶潭较发育, 未见溶洞发育, ZK01 和 ZK05 分布于该区; C 区为弱岩溶化发育区, 基本对应于弱构造变形区, 发育溶潭, 溶隙、溶孔发育或微发育, ZK02 和 ZK03 就分布于该区。

3.1.3 地下水系统单元

区内地下河的展布受岩性、地质构造、地形地貌等因素的控制, 加之区内白云岩厚度大, 基岩裸露且连续分布, 岩溶作用强烈, 地表落水洞、岩溶洼地、岩溶潭多呈串珠状排列, 地下岩溶个体溶隙、溶洞等也发育, 相对隔水层分布连续, 因此形成相对独立的地下河管道系统。研究区 10 m 埋深范围内共展布地下河 2 条, 其中南侧发育 1 条, 自北西向南东贯穿工作区, 场区外北侧发育 1 条, 由中八水库经四方井至研究区北侧外以地下河形式出流地表。根据监测资料(点号/平均水位)反映, 研究区西南侧地下水埋深一般为 0.5~8.0 m, 补给区由皂角坝村至 G18 号监测点处, 水位埋深 0.5~2.0 m, 水力坡降为 6.9%, 由 G14 号监测点所代表的人工建筑物内稳定水位至 G10 号监测点, 水力坡降为 9.8%, 反映了地下河系统排泄区段水力梯度加大, 水循环速度加快的反剖面特征。G18 号监测点与 G14 号监测点间存在水头高度陡然变化的特征, 考虑到在高铁站南东侧大面积开挖地下设施, 可以认为人为工程活动引起了区

域地下水流场的变化。G14 号监测点所在位置为地铁 S1 号线基坑工程处, 地面开挖深度达 7 m, 对地形地貌改造较大, 基坑内由于野鸡坡地下河补给, 常年积水, 监测期平均水位高程 1 238.383 m。其北侧 G15 号监测点, 与其水平距离为 101 m, 监测期平均水位高程 1 242.054 m。根据长期监测, G14 号监测点水头长期高于 G15 号监测点, 但 G14 号监测点展现的曲线为欠补给水位在长期稳定缓慢下降的动态特征, G15 号监测点展现曲线为受降雨补给影响的山区雨源性地下河的动态特征, 二者应无直接水力联系。反映出两个监测点间为地下水分水岭所在。综合地表水流场特征, 将研究区划分为三个地下水系统, 中八地下河系统(Ⅰ)、野鸭坡地下河系统(Ⅱ)和寅贡寨分散排泄地下水系统(Ⅲ)(图 1, 图 2)。

据垂向地质特征, 建立了地下空间分层利用概念模型, 主要分半地下空间(人工平直地面以上)、浅层地下空间(0~地下 8 m)、次浅层地下空间(地下 8~20 m)开展评价(图 3)。半地下空间: 不同于平原区, 岩溶区半地下空间没有明确的地上地下分界线, 地表的溶丘、洼地可作为半地下空间利用的主要部分, 可安排地表建筑、商业服务、涵洞、人防等; 浅层地下空间: 其分区界限主要受岩溶区地下水位、岩溶发育程度的影响, 本层以开挖管廊中较稳定的潜水面为界限进行评价, 是利用程度及人员活动最频繁的区域, 可安排综合管廊、商业服务、公共步行通道等; 次浅层地下空间: 均位于地下, 即使开发利用后人员的可达性较浅层稍差, 主要安排人防、地铁交通、深层商业设施、设备用房等。

3.2 评价因子选取

岩溶区地下空间的利用受到地质环境条件、生态环境敏感性、建设利用现状三大因素控制, 结合前人研究, 建立了生态新城地下空间利用适宜性评价体系(图 4), 本文选取地形地貌、工程地质条件、环境地质条件、水文地质条件、水生态环境、地下空间利用现状、地表空间利用现状等因素作为评价因子, 采用专家打分法, 根据其对于地下空间开发利用的优劣性进行 A_i 赋值(表 1)。

3.3 评价指标权重

分层对地下空间进行评价首先需要确定每层的评价指标层, 半地下空间主要利用凸出岩溶溶丘等,

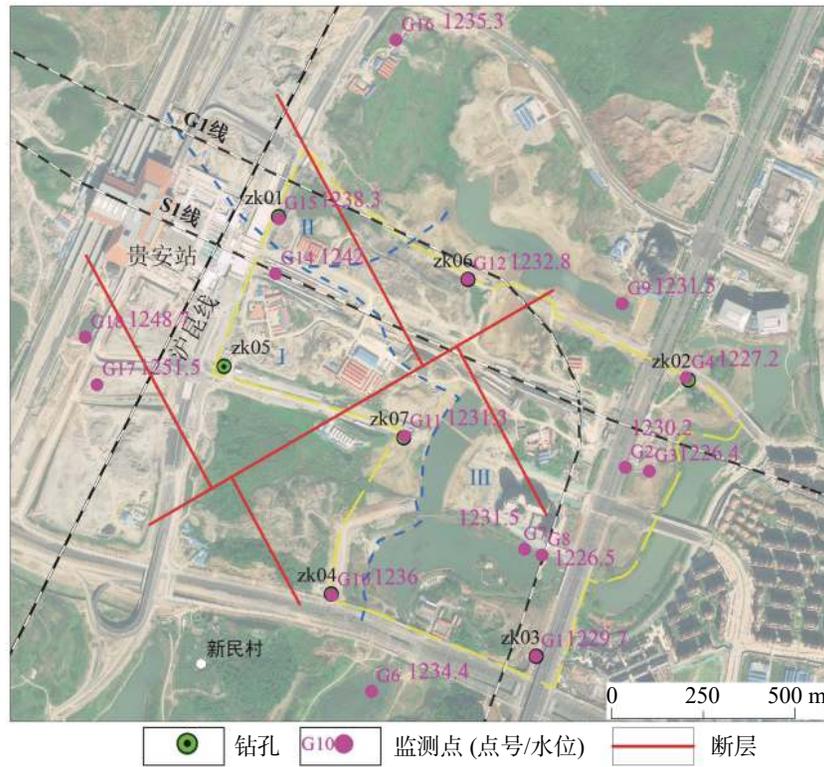


图 2 地下水监测点分布及平面分区图

Fig. 2 Distribution map of groundwater monitoring points

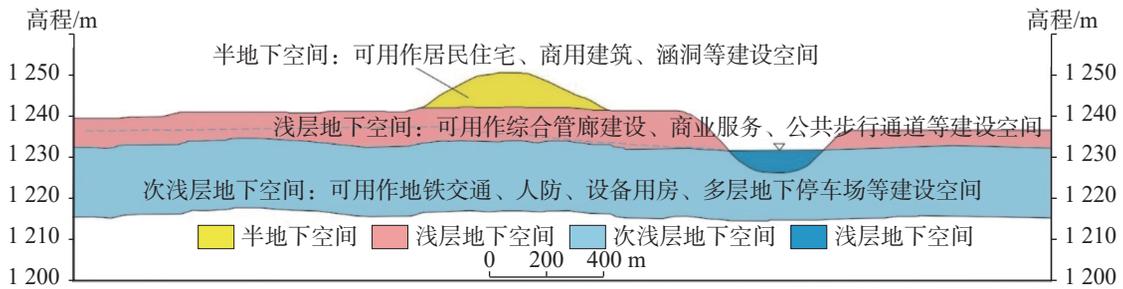


图 3 贵安新区生态新城地下空间适宜性评价概念模型

Fig. 3 Suitability evaluation model of underground space in Gui'an New Area

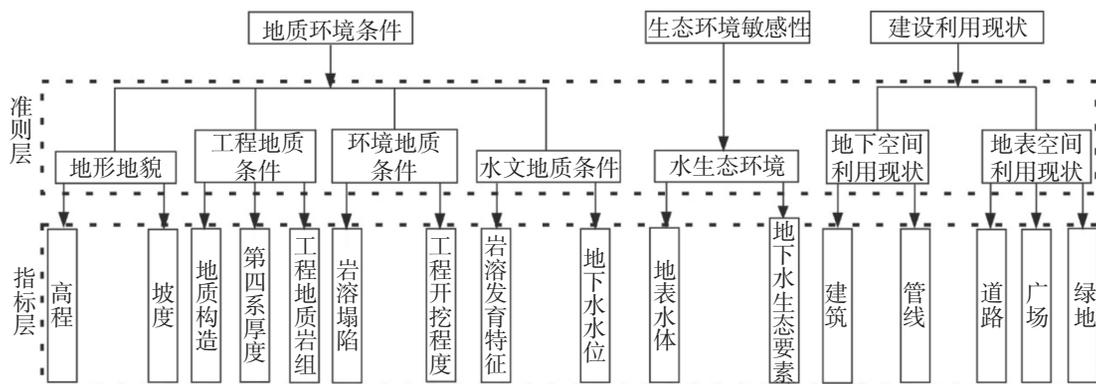


图 4 贵安新区生态新城地下空间利用评价体系

Fig. 4 Evaluation system of underground space utilization of the eco-friendly town in Gui'an New Area

表 1 研究区地下空间利用适宜性评价因子分级及赋值表

Table 1 Grading of factors of suitability evaluation for underground space utilization in the study area

指标层	因子说明	分级	分级说明	Ai分值 (专家打分法)
相对高度/m	研究区地貌类型单一, 相对高度是决定半地下空间利用的重要因素	10~20	适宜性好, 适合用于半地下空间开发利用, 有一定的空间	9
		20~50	适宜性较好, 全部位于地表层以上, 利用工程建设难度稍大, 经济成本较高	5.5
		50~70	适宜性较差, 较难利用	4
		70~100	适宜性差, 相对高差较大, 难利用, 即使利用, 经济成本巨大	1
坡度/°	主要影响半地下空间的利用, 坡度大不利于半地下空间的利用	0~15	适宜性好, 坡度较缓, 易于利用, 可利用山体空间大	9
		15~30	较适宜, 坡度中等, 也较容易利用	6.5
		30~50	适宜性较差, 也可以利用, 但利用经济成本较大	3
		>50	适宜性差, 多位于陡峭的溶丘顶部, 有可利用空间较少	1
地质构造/m	区内断裂、褶皱构造发育, 按照与褶皱轴迹线、断裂的距离及交叉影响范围确定	0~20	适宜性差, 受构造影响大	1
		20~50	适宜性较差, 受构造影响较大	3
		50~100	适宜性较好, 受构造影响较小	5
		>100	适宜性好, 受构造影响小	9
第四系厚度/m	研究区第四系发育较少, 整体影响程度低, 根据其对开挖条件难易程度进行分级	<1	适宜性好, 第四系厚度较薄, 开发难度低, 成本小	9
		1~5	适宜性较好, 开发难度中等	6.5
		>5	适宜性较差, 土地难以利用, 开发工程量稍大	4.5
工程地质岩组	不同工程地质岩组、岩溶发育程度、结构强度、物理力学特征、差异较大, 对地下空间有直接影响	较坚硬层状碳酸盐岩岩组	适宜性较好, 涉及地层 T_2h^{1-3} 、 $T_{1-2}a^3$ 、 $T_{1-2}a^{2-3}$ 、 $T_{1-2}a^{2-2}$ 、 $T_{1-2}a^{2-1}$, 细晶白云岩、溶塌角砾白云岩、泥质白云岩, 岩溶较发育, 岩体完整性好, 结构坚硬	6.5
		碎屑岩与碳酸盐岩互层岩组	适宜性较差, 涉及地层 T_2h^{1-2} 、 T_2h^{1-1} , 白云质泥岩、泥质白云岩夹细晶白云岩、凝灰岩, 岩溶发育, 较破碎, 呈碎块状	3
		残坡积红黏土	适宜性差, 以碳酸盐岩红土为主, 多呈褐黄色、黄褐色、色泽明亮, 结构软弱	1
		低易发	适宜性好, 无岩溶塌陷现象或者距离塌陷点位置较远	9
岩溶塌陷	岩溶塌陷灾害是影响岩溶区地下空间利用的重要因素	中易发	适宜性较差, 距离塌陷点位置较近, 有一定影响	5
		高易发	适宜性差, 发育有岩溶塌陷或者距离近, 影响较大	1
		低	适宜性好, 基本无开挖破坏, 对地下空间影响较小	9
工程开挖条件	指是否破坏地表地下的原有空间属性, 是否影响地下空间的后期施工、建设	中	适宜性较好, 有小规模的破坏及开挖, 有一定影响	6.5
		高	适宜较差, 原有半地下空间或者地下空间被破坏, 难以利用	3
		强	适宜性差, 岩溶发育直接造成地下空间难以利用, 施工难度大, 可能遭遇突水突泥、塌陷等工程地质问题	1
岩溶发育特征	岩溶发育特征是岩溶区地下空间利用的最关键因素	中	适宜性较差, 增加地下空间利用难度	5
		弱	适宜较好, 岩体结构完整, 突水突水概率低, 利于利用	7

续表 1

指标层	因子说明	分级	分级说明	A _i 分值 (专家打分法)
地下水水位/m	根据地下水出露和钻孔揭露点地下水水位进行分级	<5	适宜性差,埋深浅,浮力大,对无上覆荷载的地下建筑威胁大	3
		5~8	适宜性较差,需简单处理,施工期间经济成本较高	5
		>8	适宜性较好,需要复杂处理,对次浅层空间利用影响较大	7
地表水体/m	地表水体影响地下空间利用,可能造成渗透、涌水等	<20	适宜性差,地下空间利用需要处理顶板隔水问题	1
		20~100	适宜性较差,有一定影响	3
		>100	适宜性好,对规模较小地下设施影响较小	7
地下水生态要素	地下开挖后改变地下水对地下空间利用、工程排水产生不利因素	敏感区	适宜性较好,地下水易受影响,较脆弱,对地下空间利用较适宜	3
		不敏感区	适宜性好,地下水不易受影响,一般脆弱,对地下空间利用适宜	7
地下(地表)空间利用现状	涉及地表建筑、管线等,其建设状态对地下空间利用产生一定制约	利用率高	适宜性差,后期改造成本高,可能影响工程进度	3
		利用率中	适宜性较差,后期需要对部分工程进行改造	6
		利用率低	适宜性好,区内无原有地下、地表建筑工程	9

影响其利用的主要因素包括地质环境条件、生态环境敏感性,建设利用现状对其影响较小,故不考虑;影响浅层地下空间利用因素与半地下空间有所区别,其中地质环境条件方面高程、第四系厚度等因素无影响,生态环境敏感性、建设利用现状与半地下空间评价指标体系一致;次浅层空间的利用在地下,地形

地貌等因素影响有限,重要考虑地质环境条件、生态环境敏感性本底条件对地下空间利用适宜性的影响。利用层次分析法,构造判断矩阵,满足一致性检验后,对各个因素进行权重赋值(W_i),各分层评价指标层权重见表2。

表 2 研究区各评价分层适宜性指标层权重赋值表

Table 2 Weight of the suitability index of each evaluation layer in the study area

准则层	指标层	半地下空间	浅层地下空间	次浅层地下空间
地形地貌	高程	0.0704		
	坡度	0.0704	0.0890	
工程地质条件	地质构造	0.0578	0.0465	0.0502
	工程地质岩组	0.1047	0.1027	0.0789
	第四系厚度(0.0530)	0.0318		0.0318
环境地质条件	岩溶塌陷	0.0817	0.0869	0.0919
	工程开挖程度	0.0408	0.0435	0.0459
水文地质条件	岩溶发育特征(0.0955)	0.0965	0.0730	0.0785
	地下水水位	0.1930	0.1460	0.1517
水生态环境	地表水体(0.0451)	0.1264	0.1495	0.1616
	地下水生态要素	0.1264	0.1495	0.1616
地下空间利用现状	建筑(0.0455)		0.0533	0.0582
	管线(0.0455)		0.0266	0.0291
	道路(0.0278)		0.0135	0.0138
地表空间利用现状	广场(0.0278)		0.0341	0.0275
	绿地(0.0278)		0.0341	0.0138

4 评价结果

利用 ArcGIS 平台对每个指标层进行分级赋值,并根据指标层权重运用图层叠加功能进行计算,对叠加结果进行圆滑及微小合并处理,采用自然断点法将计算结果分成四个等级,评价结果见图 5。在半地下空间,适宜性好占比 14.97%,适宜性较好占比

21.14%,适宜性较差占比 22.36%,适宜性差占比 41.52%;浅层地下空间方面,适宜性好占比 10.54%,适宜性较好占比 33.52%,适宜性较差占比 33.28%,适宜性差占比 23.66%;次浅层地下空间中,适宜性好占比 27.3%,适宜性较好占比 16.64%,适宜性较差占比 26.45%,适宜性差占比 29.6%,次浅层地下空间利用适宜性以适宜性差和较差为主(占比 56.05%)。

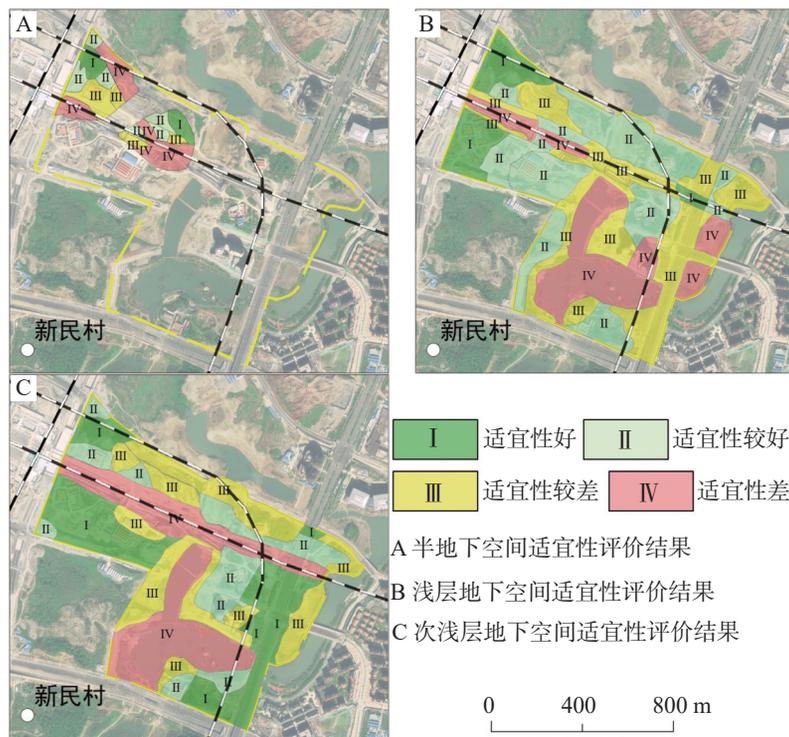


图 5 分层地下空间适宜性评价结果

Fig. 5 Results of suitability evaluation of layered underground space

5 结 论

(1)半地下空间不适宜区受地形起伏程度、地层岩性破碎程度较大,主要集中在断裂带与相对高程较低的区域,在工程开挖程度较高、地铁建设周边,半地下空间可利用程度也较低。

(2)浅层地下空间主要受地质构造、地层岩性、地表水系、岩溶发育程度、人工开挖影响较大,以适宜性差、较差区为主,适宜性较好的区域位于高铁站东侧的小部分地块,受岩溶地下水系统控制,其利用难度较大,开挖后易改变地下水流场,会造成岩溶涌水突泥或者岩溶塌陷等问题。

(3)次浅层地下空间利用受地下水、岩溶发育程

度和构造影响较大,与半地下空间的工程建设利用相关度不高,地下空间利用受浅层地铁等工程建设控制作用明显,整体看次浅层地质环境条件稍差,构造及岩溶发育区域岩体破碎,地下工程建设施工难度及成本会增高,建议地下工程建设时采取合理的基坑围护等措施,防范基坑涌水、岩溶塌陷等环境地质问题。

整体看,评价结果与实际现场较为吻合,证明建立的方法实用性较强,可进行推广应用。岩溶区地下空间受岩溶塌陷、地质构造、岩溶管道发育、地下水补径排条件等因素制约明显,建议在开发利用岩溶区地下空间前,应当先查明地下岩溶地质结构特征,进行适宜性评价,综合分析地下空间利用类型和制约因素查清岩溶水文地质条件,对于适用性差的

区域,开展合理规划或者进行前期工程处置,做到生态、经济和环境效益协调统一,在科学保护地下空间资源和生态环境的前提下,实现开发利用效益最大化。

参考文献

- [1] 程光华,王睿,赵牧华,苏晶文,杨洋,张晓波. 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. CHENG Guanghua, WANG Rui, ZHAO Muhua, SU Jingwen, YANG Yang, ZHANG Xiaobo. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 39-47.
- [2] 葛伟亚,王睿,张庆,邢怀学,周洁. 城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1601-1608. GE Weiya, WANG Rui, ZHANG Qing, XING Huaixue, ZHOU Jie. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1601-1608.
- [3] 钱七虎. 科学利用城市地下空间, 建设和谐宜居、美丽城市[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(1): 1-7. QIAN Qihu. Scientific use of the urban underground space to construction the harmonious livable and beautiful city[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(1): 1-7.
- [4] 油新华,何光尧,王强勋,张磊. 我国城市地下空间利用现状与发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 173-188. YOU Xinhua, HE Guangyao, WANG Qiangxun, ZHANG Lei. Current status and development trend of urban underground space in China[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 173-188.
- [5] 王成善,周成虎,彭建兵,樊杰,朱合华,李晓昭,程光华,戴春森,徐能雄. 论新时代我国城市地下空间高质量开发和可持续利用[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 1-8. WANG Chengshan, ZHOU Chenghu, PENG Jianbing, FAN Jie, ZHU Hehua, LI Xiaozhao, CHENG Guanghua, DAI Chunsen, XU Nengxiong. A discussion on high-quality development and sustainable utilization of China's urban underground space in the new era[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 1-8.
- [6] 陈珺,石晓冬. 北京新城中心地区地下空间开发利用探讨:以亦庄新城站前综合区地下空间开发利用研究为例[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 4(Suppl.1): 1143-1146, 1153. CHEN Jun, SHI Xiaodong. Investigation on underground space development and utilization central area of new town in Beijing: Taking the development and utilization of underground space at the integrated area in front of New Town station, Yi Zhuang as an example[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 4(Suppl.1): 1143-1146, 1153.
- [7] 杨晓刚,王睿,黄伟亮. 基于国内典型城市对比的地下空间开发利用现状及问题分析[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 69-75. YANG Xiaogang, WANG Rui, HUANG Weiliang. Status and challenges of underground space development and utilization in China based on comparative analysis of typical Chinese cities[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 69-75.
- [8] Chen Z L, Chen J Y, Liu H, Zhang Z F. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 253-270.
- [9] Lu S, Hitoshi N, Shu Y. The establishment and application of underground space safety evaluation system in Shanghai[J]. Procedia Engineering, 2016, 165: 433-447.
- [10] 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(3): 578-582. LIU Zhikui, LIU Baochen, CAO Ping. Review for present situation of technology of geotechnical engineering in karst region[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(3): 578-582.
- [11] 秦品瑞,高帅,徐军祥,李常锁,徐秋晓,丁冠涛. 济南市城市地下空间资源开发利用适宜性评价[J]. 山东国土资源, 2019, 35(6): 56-66. QIN Pinrui, GAO Shuai, XU Junxiang, LI Changsuo, XU Qiuxiao, DING Guantao. Suitability evaluation of development and utilization of underground space resources in Jinan City[J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(6): 56-66.
- [12] 张可能,张岳,廖阳,万浩然,许培浩,张云毅. 贵阳某地铁站岩溶发育特征及突水模式分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 300-306. ZHANG Keneng, ZHANG Yue, LIAO Yang, WAN Haoran, XU Peihao, ZHANG Yunyi. Analysis on karst development and water burst in a subway station[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(2): 300-306.
- [13] 杨元丽,杨荣康,孟凡涛,王乾. 黔中高原台面浅覆盖型岩溶塌陷分布及影响因素浅析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 801-807. YANG Yuanli, YANG Rongkang, MENG Fantao, WANG Qian. Brief analysis of distribution and influence factor of table-board shallow overburden type karst collapse in central Guizhou plateau[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(6): 801-807.
- [14] 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): 638-941. ZHAO Zhenyang. The current situation and strategy for development and utility of underground space in Guiyang[J]. Underground Space, 2004: 24(5)638-941.
- [15] 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(Suppl.2): 503-507. SONG Xiaoqing. Analysis on environmental geological factors affecting the exploitation of underground space in Guiyang City[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Suppl.2): 503-507.
- [16] 郝江南,袁志英. 贵阳市中华北路岩溶塌陷成因及处理[J]. 贵州大学学报, 2010, 27(3): 122-125. HAO Jiangnan, YUAN Zhiying. Causes and treatment of karst collapse in Zhonghua road(n) of Guiyang[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2010, 27(3): 122-125.

- [17] 郝爱兵, 吴爱民, 马震, 柳富田, 夏雨波, 谢海澜, 林良俊, 王涛, 白耀楠, 张竞, 孟庆华. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报, 2018, 39(5): 513-522.
HAO Aibing, WU Aimin, MA Zhen, LIU Futian, XIA Yubo, XIE Hailan, LIN Liangjun, WANG Tao, BAI Yaonan, ZHANG Jing, MENG Qinghua. A study of engineering construction suitability integrated evaluation of surface-underground space in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(5): 513-522.
- [18] Zhou Y, Zhao J. Assessment and planning of underground space use in Singapore[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 55(5): 249-256.
- [19] 彭建, 柳昆, 郑付涛, 李晓军, 彭芳乐. 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.
PENG Jian, LIU Kun, ZHENG Futao, LI Xiaojun, PENG Fangle. Evaluation for the suitability of underground space exploitation and utilization based on AHP[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 688-694.
- [20] 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.
WANG Xia, HUANG Xianjin, TANG Jin. Fuzzy synthesis evaluation on the development potential of urban underground space resource[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(2): 213-218.
- [21] 欧孝夺, 杨荣才, 周东, 欧刚. 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.
OU Xiaoduo, YANG Rongcai, ZHOU Dong, OU Gang. Application of AHP to geological environment suitability assessment in Nanning underground development[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2009, 29(4): 474-480.
- [22] 江思义, 吴福, 王启耀, 刘庆超, 李海良, 潘晓丽. 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.
JIANG Siyi, WU Fu, WANG Qiyao, LIU Qingchao, LI Hailiang, PAN Xiaoli. Suitability evaluation of underground space development in karst area: An example from Guilin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(2): 402-409.
- [23] 柳昆, 彭建, 彭芳乐. 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.
LIU Kun, PENG Jian, PENG Fangle. Evaluation model for the suitability of underground space resources exploitation and utilization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 219-231.
- [24] 刘运来, 吴江鹏, 碰培宇, 章广成, 朱锐. 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.
LIU Yunlai, WU Jiangpeng, PENG Peiyu, ZHANG Guangcheng, ZHU Rui. Suitability evaluation for the utilization of underground space in consideration of geo-environmental factors[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(5): 58-62.
- [25] 汪侠, 黄贤金, 甄峰, 钟太洋. 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.
WANG Xia, HUANG Xianjin, ZHEN Feng, ZHONG Taiyang. Evaluation on development potential of urban underground space resource: Multi-level grey approach[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(8): 1122-1127.
- [26] 吴炳华, 张水军, 徐鹏雷, 马勤威. 宁波市地下空间开发地质环境适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(Suppl.1): 16-21.
WU Binghua, ZHANG Shuijun, XU Penglei, MA Qinwei. Geological environment suitability assessment of underground space development in Ningbo City[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Suppl.1): 16-21.
- [27] 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.
ZHANG Lu, ZHANG Guangcheng, WU Jiangpeng. Evaluation on the suitability of underground space exploitation and utilization in a city[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(3): 488-494.
- [28] 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]. 地下空间与结构, 2005, 1(1): 655-659.
GUO Jianmin, ZHU Wenjun. Potential value evaluation of underground space resource based on AHP method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 655-659.
- [29] 马莎, 刘聪聪, 张润华, 王甲怡, 吕敦玉. 基于熵权-层次分析法的地下空间适宜性评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 10013-10020.
MA Sha, LIU Congcong, ZHANG Runhua, WANG Jiayi, LYU Dunyu. Evaluation for suitability of underground space using entropy weight-analytic hierarchy process[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 10013-10020.
- [30] 吴立新, 姜云, 车德福, 祝文君. 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, 2007, 36(1): 97-102.
WU Lixin, JIANG Yun, CHE Defu, ZHU Wenjun. Fuzzy synthesis evaluation and 3D visualization for resource quality of urban underground space[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1): 97-102.
- [31] 方寅琛, 龚日祥, 李三凤, 潘声勇, 顾明光, 黄卫平. 基于三维地质模型的地下空间开发适宜性评价: 以嘉兴城市地质调查工作为例[J]. 上海国土资源, 2017, 38(2): 43-45.
FANG Yinchen, GONG Rixiang, LI Sanfeng, PAN Shengyong, GU Mingguang, HUANG Weiping. Suitability evaluation of underground space development based on a three-dimensional geological model, using the Jiaxing urban geological survey as an example[J]. Shanghai Land & Resources, 2017, 38(2): 43-45.

Suitability evaluation of utilizing urban underground space in the karst area in Gui'an New Area

LI Hao^{1,2}, YANG Qiang³, LUO Xuan^{1,2}, WANG Binghu^{1,2}, SHAO Changqing^{1,2}, WANG Siyuan^{1,2}, LE Qilang³

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geology Survey, Tianjin, 300304, China; 2. Technology Innovation

Center for Geological Environment Monitoring Engineering, MNR, Tianjin, 300304, China;

3. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract In recent years, with the continuous acceleration of urbanization in China, the development and utilization of ground space and aboveground space have gradually become saturated, and various "urban diseases" such as traffic congestion, land resource shortage, ground noise are increasingly severe. Therefore, reasonable development and utilization of urban underground space is of practical significance to alleviate the scarcity of urban resources, improve environmental conditions, and enhance the quality of residents' life. Located in a typical karst mountainous area on the plateau of central Guizhou, Gui'an New Area not only faces common problems in its urban development such as insufficient land for human due to the unique karst landform of this area, but also faces many engineering geological problems such as karst collapse, mud and water inrush during the development and utilization of underground space. At present, the utilization of urban karst underground space in Gui'an New Area is still in the early stage of planning and implementation. It is necessary to investigate the structural characteristics of underground space, explore and demonstrate the methods applicable to evaluate the suitability of utilizing underground space in karst areas before the large-scale development of underground space.

Based on the planning of constructing urban underground space in Gui'an New Area, this study takes the ecological new town in Gui'an New Area as an example. According to different karst hydrogeological units (water-bearing media), it proposes a conceptual model for underground space utilization through comprehensive geological surveys, engineering surveys, and groundwater dynamic monitoring. This study also establishes a suitability evaluation system and method for utilizing underground space according to different zones and layers with groundwater system units. The suitability evaluation of underground space utilization in typical karst areas has been conducted by using the ArcGIS platform, and targeted suggestions have been proposed.

The research results indicate as follows, (1) For the utilization of semi-underground space, 14.97% of the space may fall into the grade of very high suitability, 21.14% of high suitability, 22.36% of low suitability, and 41.52% of very low suitability. Due to the degree of terrain undulation and rock fragmentation of the strata, the unsuitable area for utilization in semi-underground space is mainly concentrated in the fault zone and the area at relatively low elevations. In the areas with high levels of engineering excavation and subway construction, the availability of semi-underground space is also relatively low.

For the utilization of shallow underground space, 10.54% of the space may fall into the grade of very high suitability, 33.52% of high suitability, 33.28% of low suitability, and 23.66% of very low suitability. Shallow underground space mainly falls into the utilization grades of low and very low suitability because it is generally affected by geological structure, stratigraphic lithology, surface water system, karst development degree, and human excavation. The area with high suitability for utilization is located in a small part on the east side of the high-speed railway station, but it is controlled by the karst groundwater system. Consequently, this area is difficult to be utilized and the excavation is likely to change the groundwater flow field, which can cause problems such as karst water gushing, mud bursting, or karst collapse.

For the utilization of sub-shallow underground space, 27.3% of the space may fall into the grade of very high suitability, 16.64% of high suitability, 26.45% of low suitability, and 29.6% of very low suitability. The grades for the use of sub-shallow underground space mainly fall into low and very low suitability (totaling 56.05%). The utilization of sub-shallow underground space is greatly influenced by the development level and structure of groundwater and

karst, but is not closely related to the engineering construction and utilization of semi-underground space. The utilization of underground space is significantly controlled by the construction of shallow subways and other engineering projects. Overall, the geological environment conditions of sub-shallow layer are slightly poor, and the rock mass in the structural and karst development areas is broken, which increases the difficulty and cost of underground engineering construction. To prevent environmental geological problems like the water inflow of foundation pit and karst collapses, it is recommended to take reasonable measures such as the foundation pit enclosure during underground engineering construction.

(2) The establishment of evaluation method based on the units of groundwater system and the ArcGIS platform is convenient and practical, and the reliability of evaluation results have been verified.

(3) The underground space in karst areas is significantly constrained by factors such as karst collapses, geological structures, karst pipeline development, and conditions of groundwater recharge and drainage. Before the development and utilization of underground space in karst areas, it is recommended to accurately delineate the groundwater system, investigate groundwater dynamics, take precautions to geological disasters such as water inrush and karst collapse, conduct suitability evaluations, comprehensively analyze the types of underground space utilization and limiting factors, and clarify karst hydrogeological conditions. For areas with low suitability, reasonable planning or preliminary engineering treatment should be carried out to obtain ecological, economic, and environmental benefits in a coordinated way. Under the premise of scientifically protecting underground space resources and the ecological environment, the maximization of development and utilization benefits should be achieved.

The evaluation results are significant for the guidance of constructing Gui'an Station, Metro line S1, and the surrounding underground comprehensive pipe galleries in Gui'an New Area. The results are also of practical significance for promotion of the scientific development and utilization of underground space, protection of resources and ecological environment, and prevention and control of geological disasters in karst areas.

Key words Gui'an New Area, karst area, urban underground space, suitability evaluation

(编辑 张玲)

《中国岩溶》期刊被 GeoBase 数据库收录

近日,中国地质调查局岩溶地质研究所主办的《中国岩溶》期刊通过评估,正式被 GeoBase 数据库收录,这是《中国岩溶》继被国际权威数据库 Scopus、DOAJ 和 EBSCO 收录后,再一次获得国际大型权威数据库的认可,标志着《中国岩溶》的国际影响力进一步提升!

GeoBase 数据库是跨及地球科学各个领域并将其研究文献编入索引的数据库,是地学领域收录文献最广的数据库,包括:地球科学、生态学、地质学、人类与自然地理学、环境科学、海洋科学、地质力学、替代能源、污染、废物管理与自然保护等。该数据库搭载在 Engineering Village 平台,与其他 12 个涵盖

工程、应用科学数据库进行联合检索,方便用户更大范围地获取相关信息。《中国岩溶》自创刊以来,始终坚持并严格执行同行评议制度,以发表高水平研究成果为办刊理念,拥有国际化的编委会及编辑、审稿、作者队伍,始终致力于提升期刊的论文质量和学术影响力。目前,《中国岩溶》已被 GeoBase、Scopus、DOAJ、JST、CA、GeoRef 等国际知名数据库收录。

衷心感谢各位编委会专家、审稿人、作者和读者的大力支持!欢迎相关领域的科技人员踊跃投稿,《中国岩溶》期刊将不负众望,最大化地传播您的研究成果、扩大学术影响力。

(供稿:杨杨)