

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.06.11

岩溶地区建设用地质环境适宜性评价 ——以广西桂林规划中心城区为例

江思义¹ 吴 福¹ 刘庆超¹ 李海良¹ 潘晓丽²

(1. 广西壮族自治区地质环境监测总站, 广西 桂林 541004;

2. 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: 本文对岩溶地区建设用地质环境适宜性进行研究, 利用地质环境要素通过专家-层次分析法对岩溶地区建设用地开发适宜性进行评价, 并通过 MapGIS 软件实现可视化。文中以桂林市规划中心城区为例, 选取了地形坡度、地貌单元、土体地基承载力、岩体地基承载力、特殊性土分布、土体厚度、土体结构、地下水埋深、地表水系、岩溶发育程度、断裂构造 11 个影响岩溶地区建设场地开发利用的地质环境因素, 建立了岩溶地区建设用地开发适宜性评价指标体系和评价方法, 并对研究区进行了评价, 其成果可为桂林市规划中心城区的建设用地开发利用的整体规划提供指导和借鉴。

关键词: 岩溶地区; 专家-层次分析定权法; 建设用地; 地质环境; 适宜性评价

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)06-0084-10

Suitability evaluation of construction land development in karst area: taking city planning center of Guilin as an example

JIANG Siyi¹, WU Fu¹, LIU Qingchao¹, LI Hailiang¹, PAN Xiaoli²

(1. The Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. The Guangxi Zhuang Autonomous Region Guilin Hydrogeological and Geological Survey Institute, Guilin, Guangxi 541002, China)

Abstract: This paper studies the suitability of construction land development in karst areas, evaluates the suitability of urban construction land development through the expert-analytic method using geological environment elements, and realizes visualization through MapGIS software. Taking the planning central urban area of Guilin city as an example, 11 geological and environmental factors affecting the development and utilization of construction land in karst areas were selected: Topography slope, geomorphic unit, soil foundation bearing capacity, rock foundation bearing capacity, special soil distribution, soil thickness, soil structure, ground water depth, surface water system, karst development degree and fracture structure, the evaluation index system and method of suitability for underground space development in karst area were established, and the evaluation was carried out for the research area. The results can provided guidance and reference for the overall plan of construction land development in city planning center of Guilin.

Keywords: karst region; expert-analytic hierarchy process; construction land; geological environment; suitability evaluation

收稿日期: 2019-02-19; 修订日期: 2019-03-04

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号)

第一作者: 江思义(1987-), 男, 湖北天门人, 硕士, 工程师, 主要从事地质调查和岩土工程勘查与设计工作。E-mail: 370333108@qq.com

0 引言

地质环境适宜性评价是指对地质环境适合于人类生产和生活的程度进行评定、分区和说明^[1]。建设用地地质环境适宜性评价是城乡规划布局的基础,对可能作为城乡发展用地的自然环境条件及其工程技术上的可能性与经济性,进行综合质量评定,可为城乡发展用地现状分析、土地利用规划、土地资源合理开发利用提供科学可靠的基础依据^[2-3]。城乡发展用地的规划与开发成为了国土规划的重要组成部分,地质环境调查服务于国土资源规划,在城乡规划过程中,对环境地质调查成果的转化进行研究成为一个十分重要的课题^[4]。

建设场地地质环境适宜性评价的理论、方法和应用在广度和深度上均得到飞速发展,评价更加综合化、定量化和智能化,应用领域越来越广泛^[2]。目前从地质环境角度对非岩溶区建设用地地质环境适宜性进行评价研究的成果很多,如张丽等^[5]根据地质条件,运用加权平均综合指数法对长江三角洲经济区工业用地的地质环境适宜性进行了评价研究;俞跃平等^[6]从工程地质特征出发,采用“点面结合、由点到面”的定量评价方法,对绍兴中心城区建设用地进行了适宜性评价;杨子生^[7-8]以云南省德宏州为例,采用“极限条件法”与“适宜性指数法”相结合的技术方法,并运用GIS技术,对山区城镇建设用地的适宜性进行了评价;杨丽芝等^[9]基于工程地质环境要素对济南市的轨道交通建设用地适宜性进行了研究;薛继斌等^[10]利用优度评价法,构建村级土地利用规划中的建设用地适宜性评价指标体系,定量评价试点村建设用地适宜性状况;童欣等^[11]在系统分析武汉市地质环境背景和主要地质环境问题的基础上,探讨了国土规划和地质环境的相互作用关系,进而构建了武汉市地质环境综合评价与区划的思路和流程。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建设用地地质环境适宜性评价研究的关键。因此更加合理、有效、科学地评价城乡建设用地的地质环境适宜性有待继续研究。

鉴于岩溶地区地形地貌复杂,生态环境脆弱,目前针对岩溶地区土地利用的研究多集中在土地利用与地下水^[12]、土壤^[13]、生态服务功能^[14]等方面的研究,而针对岩溶地区建设用地的影响因素、现状与对策,以及对岩溶地区建设用地的适宜性评价尚无系统的研究和总结。

针对以上问题,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,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。评价以桂林市规划中心城区的地质环境为基础,专家打分法和层次分析法相结合为理论,通过MapGIS软件对评价结果实现可视化,为岩溶地区建设用地的规划和开发利用提供技术支撑。

1 评价方法研究

建设用地地质环境适宜性的评价方法有很多^[2],目前应用比较成熟的有层次分析法(AHP)^[5]、极限—一般法^[2-8]、优度评价法^[10]、专家打分法^[10]和模糊数学法^[15]等,以及将其中两种及以上的方法互相结合或改进后再使用^[16]。

进行对比分析,层次分析法有如下优点:(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。并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早就被应用^[14]。MapGIS广泛运用于国土领域,其强大的制图和空间分析功能,为国土规划提供技术支持。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建设用地地质环境适宜性进行评价,该方法简便实用,有利于环境地质调查成果的转化。具体评价步骤如下:

(1) 根据研究区地质环境条件,并参考前人的经验^[2-8],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对研究区进行分区,分区按影响程度最多分4类区,最少分2类区,并对区按因子的影响程度利用模糊综合评判法进行评分,把打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数。

(4) 根据研究区的实际情况,并参考前人的经验^[8],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,通过计算程序进行评价计算,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和对应的因子

权重值的乘积来表示。适宜性指数计算公式:

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

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 越小, 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, 表示该单元的地下空间开发利用的地质环境适宜性越好。

(5) 最后通过 MapGIS 软件自动生成 FQI 等值线图, 然后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 工程实例及评级研究

2.1 研究区概况

研究区包含桂林市主城区、临桂新区, 其总面积为 880 km^2 , 其中研究区岩溶区面积为 603.35 km^2 。桂林作为国际旅游名城, 研究区有极大的发展需求。通过开展城市地质环境调查, 解决研究区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。随着国民经济的发展, 岩溶地区大规模的工程建设日益增多, 由此引发的地质环境问题日益严重。如何充分考虑地质环境的适宜性, 有效地规划岩溶地区的开发建设, 保证建设和地质环境的协调是亟待解决的重大问题。

桂林市建筑主要分布于岩溶平原溶余堆积工程区、阶地台地松散岩类工程地质区, 建设用地类型主要为土层地基、岩溶地基。漓江、桃花江阶地台主要为土层地基, 工程地质问题主要有地基不均匀沉降、地下水影响、基坑失稳等, 且由于下伏可溶岩, 故也可能存在岩溶塌陷问题; 桂林市象山区香江国际设置地下停车人防工程, 深度约在 7.0 m , 在地下工程施工过程, 由于降排水引发周边居民区局部地面不均匀沉降、开裂。岩溶平原区地基类型主要为岩溶地基, 其工程地质问题主要岩溶塌陷、地下水环境问题。如瓦窑村地段, 第四系溶余堆积黏土厚度不大, 下伏含水岩组为碳酸盐岩裂隙溶洞水, 地下水具有微承压性, 水位埋深浅, 建设用地施工普遍揭露地下水, 建设时基坑降排地下水易诱发地面塌陷。

通过环境地质调查, 为本次研究提供了研究区的 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的试验结果。

2.2 评价因子的选取

根据研究区的实际情况, 并结合其他城市建设用地地质环境适宜性评价的研究经验、前人研究资料, 采用专家打分法, 选择的岩溶地区建设用地地质环境适宜性评价因子主要有 4 大方面: 地形地貌、工程地质条件、水文地质条件、不良地质条件; 这 4 大方面又可以细分为 11 个指标: 地形坡度、地貌单元、土体地基承载力、岩石地基承载力、特殊性土分布、土体厚度、土体结构、地下水埋深、地表水系、岩溶发育程度及断裂构造。主要以上述因素进行半定量综合评价, 对建设用地承载力进行综合分区。岩溶地区地下空间开发适宜性评价指标体系见图 1。

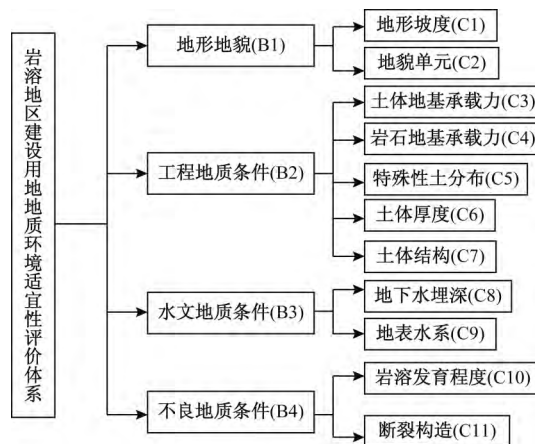


图 1 岩溶地区建设用地地质环境适宜性评价指标体系

Fig. 1 Index system for evaluating the suitability of development of karst area geological environment of construction land

为了达到建设用地开发利用的地质环境适宜性评价的目的, 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。

(1) 地形坡度 C_1

坡度决定了斜坡上各种物体的稳定性, 坡越陡斜坡上各种物体的稳定性越差。从山区城镇建设用地适宜性的角度来看, 坡度的影响有 2 个方面的情况: a、当山地的坡度达到一定程度时, 就归入“禁建地”或“不

宜建设区”。不同学者对不同地区所确定的坡度上限有所不同,例如,黄光宇在《山地城市学原理》(2006年)一书中认为:当山坡地的坡度 $>28.8^\circ$ 时,列为禁止开发建设的用地;杨子生等(2013年)将云南芒市“宜建地”的坡度上限确定为 25° 。b、在可以进行(或称“宜建”)山地城镇建设的坡度范围内,坡度因素主要影响着地面工程量和建设成本、生态保护难易程度等方面,进而影响到山区城镇建设用地适宜性程度大小或等级^[7-8]。

本次研究对坡度的分界值进行取整。地形坡度因子对建设用地适宜性的影响程度分为4个级别:将地形坡度 $<10^\circ$ 的区域定为建设用地适宜性I区;将地形坡度 $10^\circ\sim20^\circ$ 的区域定为建设用地适宜性II区;将地形坡度 $20^\circ\sim30^\circ$ 的区域定为建设用地适宜性III区;将地形坡度 $\geq 30^\circ$ 的区域定为建设用地适宜性IV区。最终得出研究区内坡度对建设用地开发利用的影响分区图。

(2) 地貌单元 C_2

地貌类型直接决定了建设用地开发时的难度大小。根据地貌图,研究区地貌类型共13类。根据各地地下工程施工反馈的资料,将峰林平原、孤峰平原、溶丘平原、山前坡洪积裙、垄岗台地、河流阶地定为I类区;将峰丛洼地、峰林谷地、溶丘谷地定为II类区;将丘陵、缓坡丘陵、波状丘陵、低山陡坡定为III类区,最终得出研究区内地貌对建设用地开发利用的影响分区图。

(3) 土体地基承载力 C_3

土地地质承载力决定了浅基础的类型和深度。土体地基承载力因子对建设用地适宜性的影响程度分为4个级别:将土体地基承载力 $>200\text{ kPa}$ 的区域定为建设用地适宜性I区;将土体地基承载力 $150\sim200\text{ kPa}$ 的区域定为建设用地适宜性II区;将土体地基承载力 $100\sim150\text{ kPa}$ 的区域定为建设用地适宜性III区;将土体地基承载力 $\leq 100\text{ kPa}$ 的区域定为建设用地适宜性IV区。最终得出研究区内土体地基承载力因子对建设用地开发利用的影响分区图。

(4) 岩体地基承载力 C_4

岩石地质承载力决定了深基础的类型和深度。岩石地基承载力因子对建设用地适宜性的影响程度分为4个级别:将岩石地基承载力 $>4\,000\text{ kPa}$ 的区域定为建设用地适宜性I区;将岩石地基承载力 $3\,000\sim4\,000\text{ kPa}$ 的区域定为建设用地适宜性II区;将岩石地基承载力 $2\,000\sim3\,000\text{ kPa}$ 的区域定为建设用地适宜性III区;将岩石地基承载力 $\leq 2\,000\text{ kPa}$ 的区域定为

建设用地适宜性IV区。最终得出研究区内岩石地基承载力对建设用地开发利用的影响分区图。

(5) 特殊性土分析 C_5

特殊土发育程度对建设用地地质环境适宜性的影响程度主要表现为特殊性土发育的地区,影响地基边壁稳定及使地基不均匀沉降,特殊土越发育,施工难度越大、成本越高。

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 $0.5\sim3.0\text{ m}$ 软黏土或地表淤泥质土,局部溶槽中软黏土厚度达 9.0 m ,膨胀性主要指具有膨胀性红黏土、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;特殊性土较发育区定为III类;特殊性土发育区定为IV类。最终得出研究区内特殊土对建设用地开发利用的影响分区图。

(6) 土体厚度 C_6

从建设用地开发利用的施工难度易考虑,土体厚度是影响地下空间建设的重要因素,在不考虑其它因素情况下,土体越厚越有利于地下工程建设,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 $10\sim56\text{ m}$,尧山西侧坡洪积层厚 $8\sim30\text{ m}$,最厚达 40 m ,岩溶平原、岩溶谷地中厚度一般 $3\sim8\text{ m}$,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 $\geq 30\text{ m}$ 区域为I类区、土体厚度 $10\sim30\text{ m}$ 区域为II类区、土体厚度 $5\sim10\text{ m}$ 区域为III类区、土体厚度 $<5\text{ m}$ 区域为IV类区,绘制出土体厚度对建设用地开发利用的影响分区图。

(7) 土体结构 C_7

土体结构类型对施工有较为直接的影响,不同土体及其土体结构对施工的难易程度有很大的影响。将土体结构因子对建设用地适宜性的影响程度分为3个级别:将单层结构土体区域定为建设用地适宜性I区;将双层结构土体区域定为建设用地适宜性III区;将多层结构土体定为建设用地适宜性IV区。得到土体结构对建设用地开发利用的影响分区图。

(8) 地下水埋深 C_8

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 > 15 m 区域为 I 类区、地下水位埋深 10 ~ 15 m 区域为 II 类区、地下水位埋深 5 ~ 10 m 区域为 III 类区、地下水位埋深 < 5 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。

(9) 地表水系 C_9

在建设用地的开发过程中,地表水对实际工程有直接的影响。地表水系因子对建设用地适宜性的影响程度分为 4 个级别:将大型地表水体周边 500 m 或塘、沟 200 m 以外区域定为建设用地适宜性 I 区;将大型地表水体周边 500 ~ 200 m 或塘、沟 200 m 以内区域定为建设用地适宜性 II 区;将大型地表水体周边 200 m 范围内区域建设用地适宜性 III 区;将地表水体之下区域定为建设用地适宜性 IV 区。得到地表水对建设用地开发利用的影响分区图。

(10) 岩溶发育程度 C_{10}

地下岩溶发育对工程建设影响较大,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,不利于地下工程开发利用。

研究区可溶岩分布区约 603.35 km²,占研究区总面积的 68%,岩溶发育程度分为弱、中等、强烈三个级别^[17-19]。根据研究区岩溶发育程度分区图,岩溶发育程度因子对建设用地适宜性的影响程度分为 4 个级别,将非岩溶区定为建设用地适宜性 I 区;将岩溶弱发育区定为建设用地适宜性 II 区;将岩溶中等发育区定为建设用地适宜性 III 区;将岩溶强发育区定为建设用地适宜性 IV 区。得到岩溶发育程度对建设用地开发利用的影响分区图。

(11) 断裂构造 C_{11}

断裂对工程开挖的影响表现为两个方面。一方面是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加大设计及施工难度。另一方面是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,研究区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、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 不等,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,划分出不发育区和较发育两个区,断裂不发育区定为 I 类区,断裂较发育区定为 III 类区,得到地质构造对建设用地开发利用的影响分区图。

2.3 评价因素权重计算和分级赋值

(1) 利用层次分析法建立岩溶地区建设用地地质环境适宜性评价层次结构模型

以岩溶地区建设用地开发利用分区为目标层(A 层),以将地形地貌(B_1)、工程地质条件(B_2)、水文地质条件(B_3)、不良地质条件(B_4)这 4 个一级指标为准则层(B 层),以地形坡度、地貌单元、土体地基承载力、岩石地基承载力、特殊性土分布、土体厚度、土体结构、地下水埋深、地表水系、岩溶发育程度及断裂构造这 11 个二级影响因素为方案层(C 层);一级因子依次记为 $B_1 \sim B_4$,二级因子依次记为 $C_1 \sim C_{11}$,建立层次结构模型。

(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,确定它们的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、各层次单排序以及进行判断矩阵一致性检验,其计算结果见表 1 ~ 表 6。

表 1 判断矩阵的标度及含义

Table 1 The scale and implication of the discrimination matrix

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2、4、6、8	表示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 The partition factors judgment matrix A-B

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W _{Bk} (k=1, 2, 3, 4)
B ₁	1	1/6	2	2	0.164 7
B ₂	6	1	3	7	0.610 5
B ₃	1/2	1/3	1	3	0.153 2
B ₄	1/2	1/7	1/3	1	0.071 6

注: CR=0.031 1<0.1, 显然满足一致性检验, 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 B₁-C

Table 3 The partition factors judgment matrix B₁-C

B ₁	C ₁	C ₂	W _{Ci} (i=2, 3, 4)
C ₁	1	1/2	0.666 7
C ₂	2	1	0.333 3

注: CR=0.000 0<0.1, 显然满足一致性检验, 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 B₂-C

Table 4 The partition factors judgment matrix B₂-C

B ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	W _{Ci} (i=2, 3, 4)
C ₃	1	5	5	3	5	0.496 8
C ₄	1/5	1	1/3	1/3	1/5	0.051 4
C ₅	1/5	3	1	1/2	1	0.119 3
C ₆	1/3	3	2	1	2	0.200 3
C ₇	1/5	5	1	1/2	1	0.132 2

注: CR=0.000 9<0.1, 显然满足一致性检验, 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 B₃-C

Table 5 The partition factors judgment matrix B₃-C

B ₃	C ₈	C ₉	W _{Ci} (i=2, 3, 4)
C ₈	1	2	0.666 7
C ₉	1/2	1	0.333 3

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

表 6 分区因子判别矩阵 B₄-C

Table 6 The partition factors judgment matrix B₄-C

B ₄	C ₁₀	C ₁₁	W _{Ci} (i=2, 3, 4)
C ₁₀	1	1	0.500 0
C ₁₁	1	1	0.500 0

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

(3) 岩溶地区建设用地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 7。

(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

表 7 研究区建设用地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 7 The 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]	
地形坡度(°) (C ₁)	5~10, 小于 5 取 10	<10	10~20	20~30	≥30	30~45, 大于 45 取 0	
评分取值	10	5~9.9 插值	10~19.9 插值	20~29.9 插值	30~45 插值	0	0.109 8
地貌单元(C ₂)		峰林平原 孤峰平原 溶丘平原 山前坡洪积裙 垄岗台地 河流阶地	峰丛洼地 峰林谷地 溶岭谷地	丘陵 缓坡丘陵 波状丘陵 低山陡坡			
评分取值	9	9	6	4	1	1	0.054 9
土地地基承载力 / kPa (C ₃)	200~250, 大于 250 取 10	>200	150~200	100~150	≤100	50~100, 小于 50 取 0	
评分取值	10	200~250 插值	150~200 插值	100~150 插值	50~100 插值	0	0.303 3
岩石地基承载力 / kPa (C ₄)	4 000~4 500, 大于 4 500 取 10	>4 000	3 000~4 000	2 000~3 000	≤2 000	1 500~2 000, 小于 1 500 取 0	
评分取值	10	插值	插值	插值	插值	0	0.031 4
特殊性土分布(C ₅)		不发育		局部发育	发育		
评分取值	9	9	6	4	1	1	0.072 8
土体厚度/m (C ₆)	2~5, 小于 2 m 取 10	<5	5~10	10~30	≥30	30~40, 大于 40 m 取 0	
评分取值	10	2~4.99 插值	5~9.99 插值	10~29.99 插值	30~40 插值	0	0.122 3
土体结构(C ₇)		单层		双层	多层		
评分取值	9	9	6	4	1	1	0.080 7
地下水埋深/m (C ₈)	15~20 m, 大于 20 m 取 10	>15	10~15	5~10	≤5	0~5, 等于 0 取 0	
评分取值	10	插值	插值	插值	插值	0	0.102 1

续表

指标	边界值法	I	II	III	IV	边界值法	权重
地表水系(C_9)		大型地表水体 周边 500 m 塘、 沟 200 m 以外	大型地表水体周边 500 ~ 200 m 塘、 沟 200 m 以内	大型地表水体 周边 200 m	地表水体之下		
评分取值	9	9	6	4	1	1	0.051 1
岩溶发育程度(C_{10})		非岩溶区	弱发育	中等发育	强发育		
评分取值	9	9	6	4	1	1	0.035 8
断裂构造(C_{11})		无		有			
评分取值	9	9	6	4	1	1	0.035 8
定性分析取定值 ,定量分析按照差值取							

大。为此 ,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 ,编制了“研究区建设用地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 ,然后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: $5.00 \leq FQI$ 为建

设用地适宜性好区; $2.50 \leq FQI < 5.00$ 为建设用地适宜性较好区; $1.00 \leq FQI < 2.50$ 为建设用地适宜性一般区; $FQI < 1.00$ 为建设用地适宜性差区。

最后通过 MapGIS 软件自动生成 FQI 等值线图 ,然后根据各评价单元实际情况对等值线进行修正 ,从而得到桂林市规划中心城区建设用地开发适宜性评价图(图 2) ,并通过分析该图对研究区作出了地下空间开发适宜性评价 ,最后得出桂林市规划中心城区建设用地开发利用地质环境适宜性分区表(表 8)。

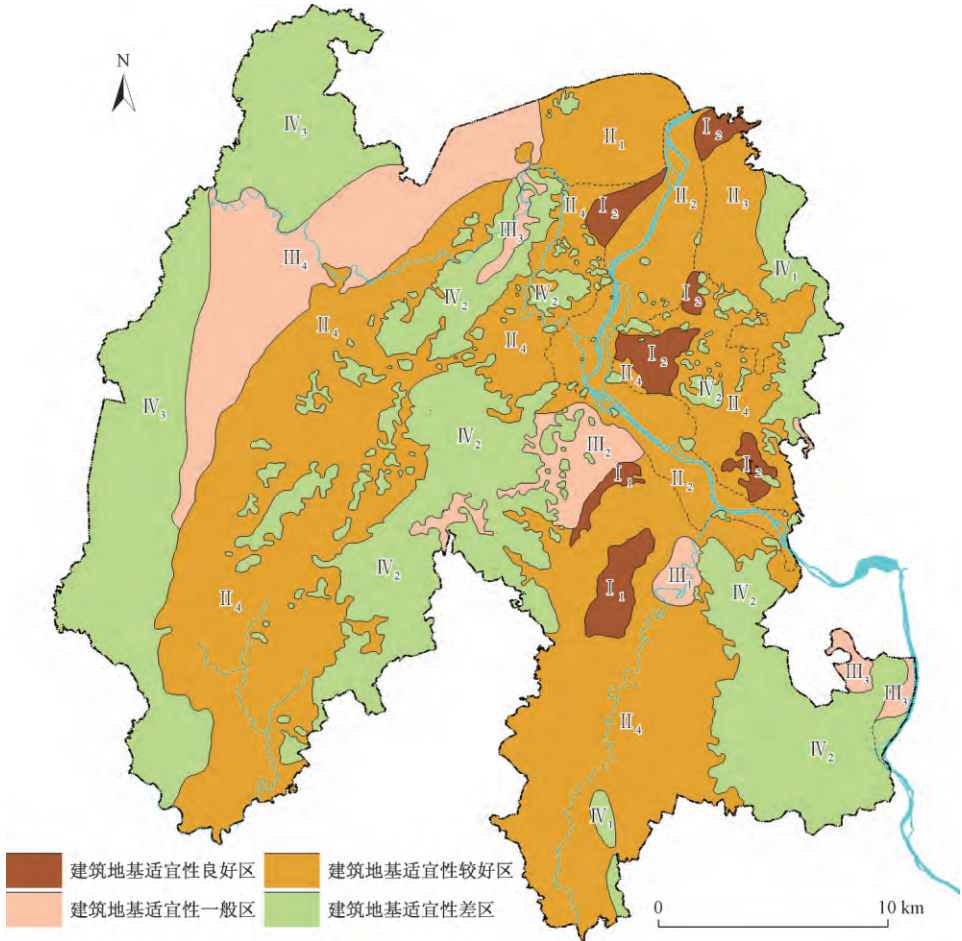


图 2 桂林市规划中心城区建设用地开发适宜性评价图

Fig.2 Evaluation suitability of construction land for shallow-layer of Shallow layer of Guilin

表 8 桂林市规划中心城区建设用土地利用地质环境适宜性分区表

Table 8 Evaluation suitability of construction land development and utilization in Shallow layer of Guilin

分区 段号	分布范围	地形坡度/ (°)(C ₁)	地貌单元 (C ₂)	分区说明							岩溶发育 程度(C ₁₀)	断裂构造 (C ₁₁)
				f _{ak} /kPa(C ₃)	岩体地基承载力 f _{ak} /kPa(C ₄)	特殊岩土 分布(C ₅)	土体厚度/ m(C ₆)	土体结构 (C ₇)	地下水位埋深/ m(C ₈)	地表水系 (C ₉)		
Ⅰ ₁ 适宜 性好 区Ⅰ	界头村西北面, 奇峰镇西面约 1.2 km 处	界头村附近<10, 奇峰镇西面10~20	孤峰平原、 波状丘陵	>200	>4 000 为主,其余 2 000~4 000	界头村 一带发育	<5 为主,局部 10~30	单层	10~15 为主,界头 村一带<5	无	非岩溶区、 弱发育	有
	三里店、金鸡岭、 乌石街、铁山、 茶店村、董家巷一带	<10	孤峰平原、 垄岗台地	>200	>4 000 为主, 三里店一带 <2 000	发育	5~30, 局部>30	单层	<5 为主, 局部 5~10	局部与 漓江距离 小于200 m	强发育	无
Ⅱ ₁	定江镇及 定江镇北面	<10,局部 灰岩山>30	溶丘平原	150~200	>3 000	不发育	<5 为主, 局部 10~30 m	单层	<5	东部距离 漓江<200 m, 西南部距离桃 花江<200 m	中等-强发育	有
Ⅱ ₂	漓江两岸	<10,局部 灰岩山>30	漓江Ⅰ、 Ⅱ级阶地	>200	>4 000	局部发育	10~30 m 为主, 局部<5, 或>30	多层	<5	漓江	弱-强发育, 强发育为主	有
Ⅱ ₃	尧山西面坡洪积扇	<30	山前洪坡积裙	>200	>4 000	不发育	10~30 为主, <5, , 局部>30	单层	<5,尧山 山脚10~15	无	弱-强发育,中 等发育为主	有
Ⅱ ₄	朝阳乡西面 至大圩	<10,局部灰 岩山>30	孤峰平原	100~200	>4 000 为主, 卫家渡一带 2 000~4 000	不发育-发育	<30	单层为主, 桃花江、良丰 河两岸双层	<5	局部与漓江 距离<200, 桃花江、良丰河	强发育	有
Ⅲ ₁	奇峰镇	<10	孤峰平原	100~200	>4 000	局部发育	<10 为主, 局部>30	良丰河 两岸双层	<5	良丰河	中等发育	无
Ⅲ ₂	南区瓦窑至 大风山一带	<10,局部 灰岩山>30	孤峰平原、 峰林平原	<100	>4 000	发育	5~30	单层	<5	无	中等-强发育	无
Ⅲ ₃	新立村、莲塘、 临桂县师范学校、 扒头岭、车头村	<10	峰林谷地、 峰丛洼地	>150	>4 000, 扒头岭一带 2 000~3 000	不发育- 发育	<5,新立村、 车头村5~30	单层	<5	桃花江、漓江	弱-强发育, 中等发育 为主	有
Ⅲ ₄	定江镇以西、 庙岭镇以南、 至四塘以北	20~30	孤峰平原、 缓坡丘陵	>200	<2 000	不发育	<5	单层	10~15 为主, 局部<5	桃花江	非岩溶区	有
Ⅳ ₁	尧山及 尧山南面	>30	低山陡坡、 峰丛洼地	—	2 000~3 000 为主	不发育	<5	—	10~15	无	非岩溶区、弱发 育-中等发育, 中等发育为主	有
Ⅳ ₂	翁里村、至竹江 村一带,临桂县以东、 庙岭镇以东一带, 及工作区中峰丛、孤峰	>30	溶岭谷地、 峰丛洼地、 孤峰平原(孤峰)	—	>4 000	不发育	<5	—	<5	白竹境水库	弱-中等发育	有
Ⅳ ₃	庙岭镇以北至上 全村一带,水口村、 独峰村、大约村一带	>30	丘陵	—	<2 000	不发育	<5,零星10~30	—	10~15, 局部<5	金灵水库、石脉水 库、蕉岭底水库、 绕江水库等	非岩溶区	有

3 结论

(1) 依据预测分区指标计算,将研究区建设用地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)、适宜性一般区(III)、适宜性差区(IV)四种类型,计算研究区的面积为 880.00 km²,其中适宜性好区(I)的面积为 27.29 km²;适宜性较好(II)区的面积为 424.88 km²;适宜性较差区(III)的面积为 100.89 km²;适宜性差区(IV)的面积为 326.94 km²。

(2) 影响岩溶地区地下空间开发利用的地质环境因素细分为 11 个:地形坡度、地貌单元、土体地基承载力、岩石地基承载力、特殊性土分布、土体厚度、土体结构、地下水埋深、地表水系、岩溶发育程度及断裂构造。

参考文献:

- [1] 周爱国,周建伟,梁合诚,等.地质环境评价[M].武汉:中国地质大学出版社,2008.
ZHOU Aiguo, ZHOU Jianwei, LIANG Hecheng, et al. Assessment of geological environment [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008.
- [2] 李坤,岳建伟.我国建设用地适宜性评价研究综述[J].北京师范大学学报(自然科学版),2015,51(增刊1):107-113.
LI Kun, YUE Jianwei. Evaluation of construction land suitability in China: a review [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2015, 51(S1): 107-113.
- [3] 住房和城乡建设部.城乡用地评定标准: CJJ 132—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
Minister of Housing and Urban-Rural Development. Standard for urban land use evaluation: CJJ 132—2009 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [4] 陈元旭,马国雄.地质调查科技成果转化研究[J].中国矿业,2017,10(增刊2):59-64.
CHEN Yuanxu, MA Guoxiong. Research on the transformation of scientific and technological achievements of geological survey [J]. China Mining Magazine, 2017, 10(S2): 59-64.
- [5] 张丽,龙翔,苏晶文,等.长江三角洲经济区工业用地地质环境适宜性评价[J].水文地质工程地质,2011,38(5):124-128.
ZHANG Li, LONG Xiang, SU Jingwen, et al. Geo-environmental suitability assessment of industrial land in the Yangtze River Delta Economic Zone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 124-128.
- [6] 俞跃平,唐柏安.绍兴中心城区工程地质特征及场地工程建设适宜性评价[J].水文地质工程地质,

2011,38(3):84-88.

YU Yueping, TANG Bai'an. Engineering geological characteristics and suitability evaluation of site engineering construction in the central urban area of Shaoxing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 84-88.

- [7] 杨子生.云南山区城镇建设用地适宜性评价中的特殊因子分析[J].水土保持研究,2015,22(4):269-275.
YANG Zisheng. Analysis on the special factors for evaluating mountainous urban construction land suitability in Yunnan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 269-275.
- [8] 杨子生.山区城镇建设用地适宜性评价方法及应用:以云南省德宏州为例[J].自然资源学报,2016,31(1):64-76.
YANG Zisheng. Land suitability evaluation for urban construction and its application in mountainous areas: A case study in Dehong Daijingpo autonomous prefecture, Yunnan Province [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 64-76.
- [9] 杨丽芝,曲万龙,刘春华,等.济南城市工程地质条件分区及轨道交通建设适宜性研究[J].水资源与水工程学报,2012,23(6):120-123.
YANG Lizhi, QU Wanlong, LIU Chunhua, et al. Analysis of suitability about the division of engineering geological condition and rail transit construction in Jinan urban area [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(6): 120-123.
- [10] 薛继斌,徐保根,李湛,等.村级土地利用规划中的建设用地适宜性评价研究[J].中国土地科学,2011,25(9):16-21.
XUE Jibin, XU Baogen, LI Zhan, et al. Suitability assessment of construction land in land use planning at village level [J]. China Land Science, 2011, 25(9): 16-21.
- [11] 童欣,甘义群,夏友.武汉市地质环境综合评价与区划[J].水文地质工程地质,2015,42(3):149-155.
TONG Xin, GAN Yiqun, XIA You. Assessment and zoning of the geological environment in the city of Wuhan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 149-155.
- [12] 贾亚男.西南典型岩溶地区土地利用与土地覆被变化对岩溶水质的影响[D].重庆:西南师范大学,2004.
JIA Yanan. The effects of land use and land cover changes on karst water quality in three typical karst regions, southwestern China [D]. Chongqing: Southwest University, 2004.
- [13] 蒋勇军.典型岩溶流域土地利用变化及其对土壤

- 质量的影响:以云南小江流域为例[D].重庆:西南师范大学,2005.
- JIANG Yongjun. Land use change and its effects on soil quality in a typical karst watershed: A case study in Xiaojiang watershed of Yunnan Province, [D]. Chongqing: Southwest University, 2005.
- [14] 王正祥. 岩溶地区土地利用变化对生态服务功能的影响分析——以重庆南川区为例[D].重庆:西南大学硕士学位论文,2011.
- WANG Zhengxiang. Analysis on impact of land use change on ecosystem service in karst area [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [15] 刘耀林,刘艳芳,夏早发. 模糊综合评判在土地适宜性评价中应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,1995,20(1): 71-75.
- LIU Yaolin, LIU Yanfang, XIA Zaofa. Land suitability evaluation based on fuzzy comprehensive judgement [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995, 20(1): 71-75.
- [16] 方大春,刘国林,王芳,等. 基于GIS的土地适宜性评价模型研究[J]. 测绘与空间地理信息,2004,27(1): 35-36.
- FANG Dachun, LIU Guolin, WANG Fang, et al. The research on the GIS-based land suitability evaluation model (LSEM) [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004, 27(1): 35-36.
- [17] 江思义,吴福,刘庆超,等. 广西桂林市规划中心城区岩溶发育特征及分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(3): 120-128.
- JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, et al. Karst development characteristics and distribution in Guilin urban planning center of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 120-128.
- [18] 吴福,江思义,刘庆超,等. 广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(5): 83-91.
- WU Fu, JIANG Siyi, LIU Qingchao, et al. Evaluation of susceptibility of karst collapse in urban planning area of Guilin City of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 83-91.
- [19] 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.
- JIANG Siyi, WU Fu, WANG Qiyao, et al. 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.

(上接第73页)

- [2] 郑先昌,卫中营. 武汉市岩溶地面塌陷诱发因素分析[J]. 城市勘测, 2004, (1): 15-22.
- ZHENG Xianchang, WEI Zhongying. Analysis of inducing factors of karst surface collapse in Wuhan [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2004, (1): 15-22.
- [3] 范士凯. 武汉(湖北)地区岩溶地面塌陷[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(增刊): 608-616.
- FAN Shikai. Karst ground collapse in Wuhan (Hubei) [J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(S): 608-616.
- [4] 杨涛,涂婧,殷美,等. 武汉市岩溶塌陷分类及防治对策[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(5): 661-664.
- YANG Tao, TU JING, YIN Mei, et al. The classification of karst collapse in Wuhan and its control measures [J]. Resources Environment & Engineering, 2013, 27(5): 661-664.
- [5] 湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查(H50E011001、H50E012001)项目成果报告[R]. 2016.
- Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse investigation in Wuhan (H50E011001、H50E012001) [R]. 2016.
- [6] 湖北省地质环境总站. 湖北江夏地区(土地堂幅)岩溶塌陷1:5万环境地质调查报告[R]. 2017.
- Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse 1:50 000 scale environmental geology investigation in Jiangxia District of Hubei Province (Tu Ditang Map) [R]. 2017.
- [7] 中国地质环境监测院,湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查项目成果报告[R]. 2016.
- China Geological Environmental Monitoring Institute, Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse investigation in Wuhan [R]. 2016.
- [8] 余泰敏,喻理传. 武汉地区砂土渗漏—漏失型岩溶地面塌陷致塌模式分析[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(6): 887-891.
- YU Taimin, YU Lichuan. Analysis of collapse-causing model of karst collapse in Wuhan [J]. Resources Environment & Engineering, 2015, 29(6): 887-891.
- [9] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 419-432.
- LUO Xiaojie. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan [J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 419-432.