

王新伟, 张漓黎, 郭尚其, 等. 基于 AHP 和 GIS 技术的桂林规划城区工程建设适宜性评价[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 163-175.

DOI: 10.11932/karst2023y026

基于 AHP 和 GIS 技术的桂林规划城区 工程建设适宜性评价

王新伟^{1,2}, 张漓黎³, 郭尚其¹, 叶宗达², 江凡²

(1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004; 2. 自然资源部南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 广西南宁 530018; 3. 广西壮族自治区桂林水文工程地质勘察院有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 文章采用 AHP 方法赋权计算桂林市规划城区工程建设适宜性的评价指标权重, 基于地理信息系统平台利用多因素综合法计算其工程建设适宜性指数, 使用 GIS 空间分析技术对桂林规划区工程建设适宜性进行分区可视化评价。结果表明: 桂林规划城区的工程建设适宜性整体较好, 以适宜、较适宜为主, 其中适宜区与较适宜区分别占总面积的 3.1% 和 48.3%, 适宜性差区为 11.4%, 不适宜区为 37.2%。建议桂林规划城区建设选址应在适宜区和较适宜区, 避免适宜性差区, 重大建设选址避开不适宜区; 在适宜性差区应注意现有地质灾害和可能诱发的地质灾害、地基不均匀沉降等问题的防治; 不适宜区建议规划为生态用地, 作为桂林旅游城市的生态屏障。

关键词: 工程建设适宜性; 层次分析法; 桂林市规划城区; 岩溶环境; 地理信息系统

创新点: 以层次分析法获取指标权重、采用 GIS 明确桂林市工程建设适宜性分区, 并可视化评价。

中图分类号: P208; P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0163-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

近年来, 随着中国经济的稳步发展, 对未来城市城区拟建工程场地的建设适宜性评价是城市规划的工作基础。城市工程建设适宜性常涉及规划区的各地质体, 包括工程地质条件、水文地质条件、区域构造条件及工程建设场地自身地质体引发的各种工程地质问题, 如地基沉降、地面塌陷等^[1-4]。评估未来城市的工程建设适宜性, 可为扩容城市格局、提高城市安全保障、解决“大城市病”等问题提供重要的指导和决策依据。

目前城市工程建设适宜性相关问题逐渐成为研

究热点, 工程建设适宜性评价理论、评价方法和结果应用上正处于快速发展阶段, 其适宜性评价理论与方法也逐步向定量化、综合化和智能化方面发展。田洪水等^[1]从地基土的时空分布和力学性质分析济南市地基适宜性; 熊彩霞等^[2]评价煤矿采空区的工程建设适宜性, 预测了未来地表沉降程度; 俞跃平等^[3]提出“地面结合、由点到面”的定量方法评价绍兴中心城区的工程建设适宜性; 杨子生^[5-6]和陈绪钰等^[7]采用 GIS 结合多因素评价模型、适宜性指数法与极限法, 分别评估云南德宏傣族景颇族自治州和四川泸州市的城镇建设用地适宜性; 梅芹芹等^[8]利用限制因素法与层次分析法对江苏沿海软土区的建

资助项目: 国家重点研发计划课题“漓江流域喀斯特自然景观修复与植被生态功能提升关键技术研发及试验示范”(2019YFC0507503); 桂林市可持续发展重大专项项目“典型废弃采石场生态修复及综合利用关键技术集成与示范”(20180101-2)

第一作者简介: 王新伟(1988—), 男, 工程师, 主要从事水工环地质及地质环境治理修复工作。E-mail: wangxinwei1012@163.com。

收稿日期: 2022-08-08

筑用地进行适宜性评价;黄敬军等^[9]和范峻恺等^[10]从孕灾环境、承灾体、海绵体改造适应性方面提出海绵城市工程建设适宜性评判指标的相关体系;沈春竹等^[11]运用特尔斐法、线性拟合预测、Kaya 分级模型等方法分析江苏省各城市资源环境承载力和建设适宜性,识别出影响建设用地扩展的限制性因素。以上学者的研究主要集中于工程建设适宜性评判指标和评价模型方面,为未来规划区工程建设的适宜性评价与相关指标体系提供了较成熟的科学理论,而由于岩溶型城市自身碳酸盐岩导致的特殊工程地质条件,对其未来规划区的工程建设适宜性评价仍较少^[4],在岩溶型城市工程建设适宜性的评价方法、评价指标和指标权重方面仍需进行更深入的研究。

桂林是典型的岩溶型城市,其地质环境复杂,生态环境脆弱。本文针对桂林地区特殊的岩溶地质环境,从工程地质角度出发研究桂林规划城区(简称规划区)的地形地貌、地层岩性、特殊地质状况、区域

地质构造、水文地质条件等,指出岩溶等不良地质作用,并对岩溶发育等级进行划分与分区。在此基础上,采用层次分析(Alytic Hierarchy Process, AHP)评价模型建立多层次评价因子,构建基于 GIS 平台的多因素评价指标、多层次综合评价方法对桂林市未来规划城区的工程建设适宜性进行评价,并对评价体系进行可靠性验证,以期为桂林城市城区的未来规划、各类工程建设设施选址、重大基础科学设施及土地优化布局提供理论依据,也为相关类型岩溶型城市的工程建设适宜性评判指标体系与评价方法提供参考和指导。

1 研究区概况

1.1 地形地貌与地层岩性

研究区地处南岭山地西南部,总体地势北高南低,为侵蚀溶蚀地貌、构造剥蚀地貌及侵蚀堆积地貌(图 1),以侵蚀溶蚀地貌为主,其面积约占研究

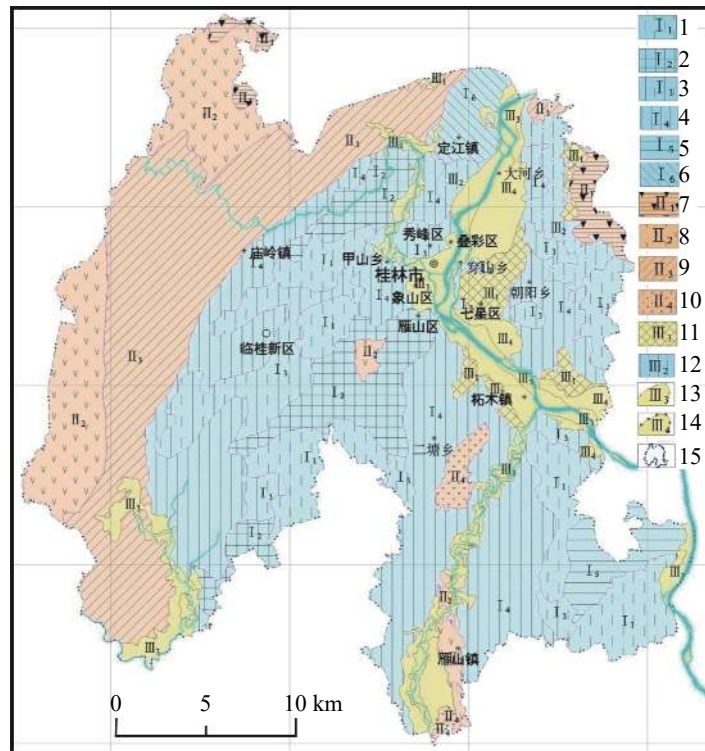


图 1 研究区地形地貌图

- 1.峰丛洼地 2.峰林谷地 3.峰林平原 4.孤峰平原 5.溶岭谷地 6.溶丘平原 7.低山陡坡 8.丘陵 9.缓坡丘陵
- 10.波状丘陵 11.山前坡洪积裙 12.垄岗台地 13.I 级阶地 14.II 级阶地 15.桂林规划城区界线

Fig. 1 Geomorphological map of the study area

- 1. peak-cluster depression 2. peak-forest valley 3. peak-forest plain 4. isolated-peak plain 5. karst-ridge valley 6. karst-hill plain 7. low mountain with steep hillslope 8. hill 9. hill with gentle slope 10. undulating hill 11. foreslope flood apron 12. ridge platform 13. Class I terrace 14. Class II terrace 15. boundary of planned urban areas in Guilin

区的 70%，分布地层主要包括泥盆系、石炭系、三叠系、白垩系、古近系及第四系(图 2)。其地层由老至新分别为：(1)泥盆系中统信都组(D_{2x})，以杂色的粉砂岩、粉砂质泥岩为主；(2)泥盆系中统一上统的东岗岭组(D_{2d})、唐家湾组(D_{2t})、桂林组(D_{2g})、融县组(D_{3r})、五指山组(D_{3w})、东村组(D_{3d})、额头村(D_{3e})，岩性以石灰岩、白云岩为主，局部夹有泥岩；(3)石炭系下统的尧云岭组(C_{1y})、英塘组(C_{1yt})、船埠头组(C_{1c})、鹿寨组(C_{1z})、黄金组(C_{1h})、罗城组(C_{1l})，以石灰岩、白云岩为主，局部夹有泥岩、薄层硅质岩；(4)白垩系上统的罗文组(K_{2l})，下部为砖红色—杂色砾岩、角砾岩，上部为粉砂岩、粉砂质泥岩夹含砾砂岩；(5)古近系邕宁群(E_y)，下部为紫红、棕红、黄灰等杂色砾岩、砂砾岩、泥质砾岩，上部为紫红、砖红、褐黄色砂岩、泥质砂岩、泥岩；(6)第四系(Q)，包括冲积层、堆积层、残积层、洪积层。研究区的地貌类型与对应地层岩性见表 1 所示。

1.2 地质构造

桂林市规划城区在历史上受到印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动等多期次构造运动变形的影响，形成以 NE-SW 走向为主的复杂构造格局，以近 SN 向、NE-SW 向和 NW-SE 向断裂为主(图 2)，其中近 SN 向断裂主要为长蛇岭断裂、灵川断裂、芦笛岩断裂、尧山断裂、良丰断裂，NE-SW 向断裂为寨江断裂、双潭圩断裂、大平圩断裂，NW-SE 向断裂为大河断裂、拓木断裂、上月断裂。

1.3 水文地质条件

根据地下水条件，规划区的地下水类型主要为第四系松散层孔隙潜水、碳酸盐岩岩溶水、不纯碳酸盐岩溶洞裂隙水、碎屑岩基岩裂隙水四大类：

(1)第四系松散层孔隙潜水 该地下水主要分布于漓江、相思江的河漫滩、I 级和 II 级阶地的砂卵石层中，以第四系松散沉积物作为主要储水层。

(2)碳酸盐岩岩溶水 该地下水主要分布于碳酸

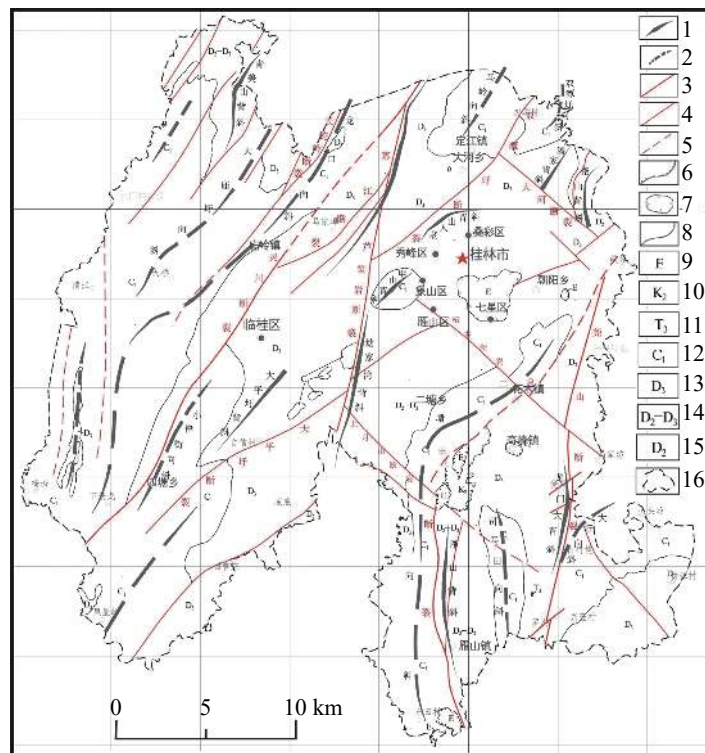


图 2 研究区构造地质图

- 1.背斜 2.向斜 3.主干断裂 4.实测断裂 5.推测断裂 6.地层角度不整合界线 7.构造盆地 8.地质界线 9.古近系 10.上白垩统
- 11.上三叠统 12.下石炭统 13.上泥盆统 14.中-上泥盆统 15.中泥盆统 16.桂林规划城区界线

Fig. 2 Tectonic geology of the study area

- 1. anticline 2. syncline 3. trunk fracture 4. measured fracture 5. presumed fault 6. boundary of stratigraphic angular unconformity 7. tectonic basin 8. geological boundary 9. Palaeogene 10. upper Cretaceous Series 11. upper Triassic Series 12. lower Carboniferous Series 13. upper Devonian Series
- 14. middle-upper Devonian Series 15. middle Devonian Series 16. boundary of the planned urban area in Guilin

表 1 桂林规划城区地貌类型与地层岩性

Table 1 Geomorphic and lithologic features of planned urban areas in Guilin

地貌类型	地貌亚区	分布位置	基岩岩性	地表土体
侵蚀溶蚀地貌区 (I)	峰丛洼地(I ₁)、峰林谷地(I ₂)、峰林平原(I ₃)、孤峰平原(I ₄)、溶岭谷地(I ₅)、溶丘平原(I ₆)	整个规划城	上泥盆统、下石炭统的石灰岩、白云岩	主体: 堆积红黏土; 局部: 残积土、冲积层和洪积层
构造剥蚀地貌区 (II)	低山陡坡(II ₁)、丘陵(II ₂)、缓坡丘陵(II ₃)、波状丘陵(II ₄)	规划区西北部及东部偏北部分地区	以泥盆系、白垩系、古近系的砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩为主, 其余为不纯的泥灰岩、灰岩	局部有残积土和坡积土
侵蚀堆积地貌区 (III)	前坡洪积裙(III ₁)、垄岗台地(III ₂)、河流阶地(III ₃)	分布于漓江、桃花江、良丰江两岸	未见	第四系冲积层、冲洪积层和坡积层

盐岩的溶蚀孔隙、溶蚀裂隙、溶蚀孔洞和溶洞中, 具有不均匀性, 富水性差异大, 其中以靠近漓江的孤峰平原、峰林平原区域内的泥盆系上统的融县组(D_{3r})、东村组(D_{3d})、额头村组(D_{3e})、桂林组(D_{3g})的石灰岩、白云岩含水量丰富^[12], 单井涌水量为 1.15~3.19 L·(s·m)⁻¹, 泉流量一般为 10~39 L·s⁻¹, 其他岩溶区的含水量中等—贫乏。

(3) 不纯碳酸盐岩溶洞裂隙水 以泥盆系额头村组(D_{3e})和石炭系英塘组(C_{1yt})、尧云岭组(C_{1y})、黄金组(C_{1h})的钙质白云岩、灰岩夹硅质条带含水量丰富^[12], 其余不纯碳酸盐岩含水量较为贫乏。

(4) 碎屑岩基岩裂隙水 该地下水主要分布于碎屑岩的构造裂隙、层间裂隙和风化裂隙中, 信都组(D_{2x})、鹿寨组(C_{1lz})砂岩、砂页岩和榴江组(D_{3l})硅质岩、硅质岩夹页岩中的裂隙水含水量中等, 单井涌水量为 0.18~2.93 L·(s·m)⁻¹, 泉流量一般为 0.08~1.2 L·s⁻¹; 而鹿寨组(C_{1lz})页岩、砂岩、砂页岩, 罗文组(K_{2l})砾岩、钙质页岩、钙质粉砂岩, 三叠系扶隆坳组(T_{3f})泥页岩、页岩夹砂岩, 古近系邕宁群(EY)砾岩、砂岩、泥岩含水量贫乏。

1.4 历史地震状况

规划区在大地构造上位于扬子陆块与南华活动带的交切部位。历史上以桂林市为震中的地震, 其震级均小于 5 级, 1970 年以来均小于 3 级。在以往地震中, 没有产生规模较大的滑坡、岩崩, 砂土液化、地面沉降等地震效应现象。研究区地震动反应谱特征周期为 0.35 s, 地震动峰值加速度为 0.05 g, 属于地震烈度的 VI 度区, 其地震活动频率低、地震强度低, 区内地壳相对稳定, 说明桂林市规划城区的区域稳

定性良好。

1.5 工程地质问题

桂林城区的滑坡、崩塌、泥石流不发育, 主要为局部峰林陡坎或孤峰在雨季发育零星崩塌地质灾害, 而影响桂林城区建筑地基最大的不良地质为岩溶。根据《岩溶地区工程地质调查规程》(DZ/T 0060—93)^[13], 将桂林城区岩溶分为强烈发育区、中等发育区、弱发育区及非岩溶区, 其描述如表 2 所示, 其分区见图 3。

2 评价方法

2.1 评价指标体系

影响城市工程建设适宜性的因素较多, 对于不同的地形地貌、地质构造、水文地质条件所考虑的因素也不尽相同^[4, 10-15]。本文对桂林市规划城区的工程地质特征、工程地质问题的调查和综合分析, 对不同评价指标因素的岩溶型城市工程适宜性限制的影响程度进行了评估, 参考前人对其余工程建设适宜性的研究成果^[3-9, 16-19], 选取影响岩溶型城市工程建设适宜性关键性与敏感性的影响因素。利用层次分析法建立桂林市规划城区工程建设适宜性的层次评价模型, 以工程建设适宜性分区作为目标层(A 层), 选取一级评价指标包括地形地貌(B1)、工程地质条件(B2)、水文地质条件(B3)、不良地质作用(B4)作为准则层(B 层), 设置地形坡度(C1)、地貌单元(C2)、土体地基承载力(C3)、岩石地基承载力(C4)、特殊土分布(C5)、土体厚度(C6)、土体结构(C7)、地下水埋深(C8)、地表水系(C9)、岩溶影响(C10)和断裂

表 2 规划区岩溶发育特征

Table 2 Karst development characteristics of planned urban areas in Guilin

分类	分布	占比	地层岩性	地貌	描述
岩溶强烈发育区	桂林城区中心的漓江两岸和临桂新区	15.4%	融县组(D _{3r})纯灰岩、桂林组(D _{3g})灰岩	峰林、孤峰和岩溶平原	洞穴化程度为1 509.0~2 016.2 m·km ⁻² ; 面岩溶率为0.85~0.87; 点岩溶率为3.73~4.50个·km ⁻² ; 钻孔线岩溶率为7.47%~12.52%
岩溶中等发育区	中部、西南部、北东侧与东南侧的漓江两岸强烈岩溶区的外围地带	29.1%	融县组(D _{3r})、桂林组(D _{3g})、东村组(D _{3d})、唐家湾组(D _{2t})、东岗岭组(D _{2d})灰岩、白云岩; 尧云岭组(C _{1y})灰岩夹硅质岩	峰林平原和峰丛平原	洞穴化程度为214.7~773.4 m·km ⁻² ; 面岩溶率0.37~0.79; 点岩溶率为1.52~2.80个·km ⁻² ; 钻孔线岩溶率为0.93%~4.74%
岩溶弱发育区	东南侧雁山区、北东侧定江镇、西南侧临桂新区	25.0%	尧云岭组(C _{1y})、黄金组(C _{1h})、英塘组(C _{1yt})灰岩含燧石灰岩; 船头埠组(C _{1c})燧石灰岩	溶丘平原、丘陵、缓坡丘陵	洞穴化程度为19.92~28.23 m·km ⁻² , 点岩溶率为0.24~0.57个·km ⁻² , 钻孔线岩溶率为2.18%
非岩溶区	西部和东部边缘地带	30.5%	泥盆系(D _{2x} 、D _{2d} 、D _{3l} 、D _{3w} 、D _{3r})砂岩、粉砂岩、硅质岩夹页岩; 石炭系(C _{1z})泥岩; 罗文组(K _{2l})、邕宁群(EY)砾岩、砂岩、泥岩、页岩	丘陵、垄岗台地、河流阶地	无

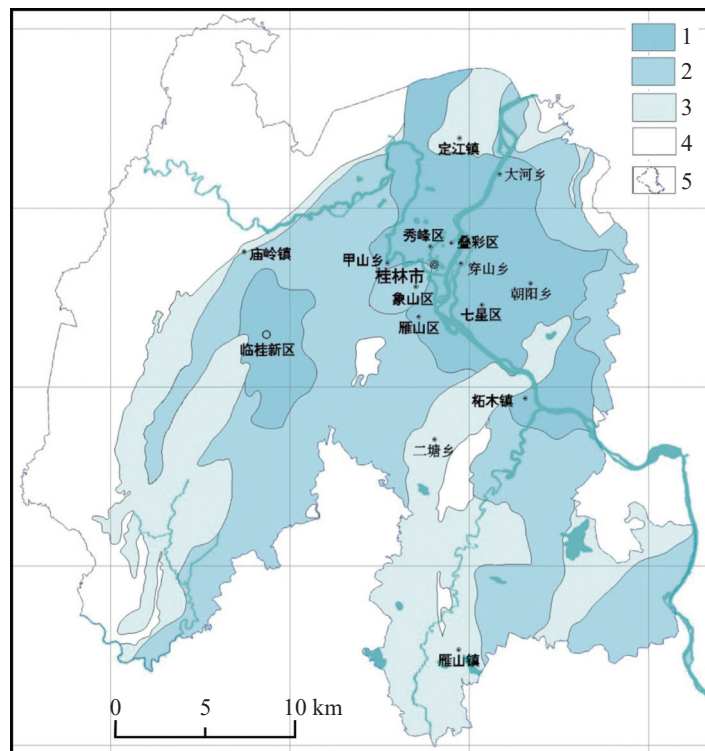


图 3 桂林规划城区岩溶分区图

1. 强烈岩溶发育区 2. 中等岩溶发育区 3. 弱岩溶发育区 4. 非岩溶区 5. 规划区范围

Fig. 3 Karst zoning map of planned urban areas in Guilin

- 1. the area with intense karst development
- 2. the area with karst development at a medium level
- 3. the area with weak karst development
- 4. non-karst area
- 5. the range of planned areas

影响(C11)11个评价因子作为二级评价指标为方案层(C层)。根据各评价指标因子对桂林市规划城区

工程建设的影响程度进行定量分级,赋予不同分值,定义评分标准为(0, 10]的连续区间,赋予(7.5, 10]、

(5,7.5]、(2.5,5]、(0, 2.5] 的分值标准, 其分值越大表明适宜性程度越高, 各个二级评价因子的工程适宜性分值标准见表 3。

2.2 评价模型

采用多因素综合评价模型来获取规划区的工程建设适宜性程度, 公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (1)$$

式中: P 为工程建设适宜性指数, 分值越大表示城市的工程建设适宜性程度越好; w_i 为第 i 个评价指标权重; x_i 为第 i 个评价指标因子的量化分值; n 为评价指标因子的总数。

2.3 确定评价因子权重

比较各层级评价指标因子的重要性, 并将其转化为矩阵, 根据评判专家打分意见, 按“1~9”比例尺度确定各评价因子分数^[10-11,18], 最大边界设置为 10, 最小边界为 0, 构建判断矩阵; 再求取该判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量, 并将判断矩阵的特征向量归一化处理, 从而获得各评价指标因子的权重组成向量; 根据求得的一致性比例系数, 若其值小于 0.1 则表明判断矩阵满足一致性检验标准, 得到

相应权重; 若其值大于等于 0.1, 则表明该判断矩阵不具有 consistency, 需重新构建新判断矩阵, 直至小于 0.1; 最后将各级别评价指标权重相乘, 从而得到各个评价因子的综合权重(表 4)。其一级评价因子的 A-B1/B4 判断矩阵的一致性系数为 0.0311, 二级评价因子的 B1-C1/C2、B2-C3/C7、B3-C8/C9、B4-C10/C11 判断矩阵的一致性系数分别为 0、0.0009、0、0, 均满足一致性检验。

3 适宜性等级与步骤

3.1 适宜性等级划分

根据评价模型公式(1)计算得到各个评价栅格单元(100 m×100 m)的工程建设适宜性指数(P), 运用 GIS 的克里金插值生成 P 值的等值线图, 并综合参考工程建设适宜性的相关研究成果^[4-5, 10-12, 15], 结合岩溶型城市特征和 P 值分布特征, 将工程建设适宜性划分为 4 个等级, 分别为: 适宜区(I 区: $P \geq 5.00$)、较适宜区(II 区: $2.50 \leq P < 5.00$)、较差区(III 区: $1.00 \leq P < 2.50$); 不适宜区(IV 区: $P < 1.00$)。

3.2 评价步骤

将规划区首先利用 GIS 平台进行坐标化和网格

表 3 桂林规划城区工程建设适宜性评价指标体系及评价因子定量分级表
Table 3 Index of suitability evaluation and quantitative grading of evaluation factors for the construction engineering in planned urban areas of Guilin

一级评价因子	二级评价因子	定量分级标准					
		边界[10]	(7.5,10]	(5,7.5]	(2.5,5]	[0,2.5]	边界[0]
地形地貌(B1)	地形坡度/°(C1)	<5	5~10	10~20	20~30	30~45	>45
	地貌单元(C2)		峰林平原 孤峰、溶丘平原 山前坡洪积裙 台地与河流阶地	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		
工程地质条件(B2)	土体地基承载力/kPa (C3)	>250	200~250	150~200	100~150	50~100	<50
	岩石地基承载力/kPa (C4)	>4 500	4 000~4 500	3 000~4 000	2 000~3 000	1 500~2 000	<1 500
	特殊土分布(C5)		不发育		局部发育	发育	
	土体厚度/m (C6)	<2	2~5	5~10	10~30	30~40	>40
水文地质条件(B3)	土体结构(C7)		单层		双层	多层	
	地下水埋深/m (C8)	>20	15~20	10~15	5~10	0~5	0
	地表水系(C9)		大型地表水体 周边500 m, 塘、 沟200 m以外	大型地表水体 周边200~500 m、 沟200 m以内	大型地表水体 周边200 m	地表水 之下	
	不良地质(B4)	岩溶影响(C10)	非岩溶区	弱发育	弱—中发育	中等发育	强发育
	断裂影响(C11)	无断裂	无断裂	有断裂	有断裂	活动断裂	

表 4 各层评价因子权重表
Table 4 Weight coefficient of evaluation factors

指标层	B1	B2	B3	B4	指标综合权重(w_i) ($i=1,2,\dots,11$)
	$W_{B1}=0.1647$	$W_{B2}=0.6105$	$W_{B3}=0.1532$	$W_{B4}=0.0716$	
C1	$W_{C1}=0.6667$				0.1098
C2	$W_{C2}=0.3333$				0.0549
C3		$W_{C3}=0.4968$			0.3033
C4		$W_{C4}=0.0514$			0.0314
C5		$W_{C5}=0.1193$			0.0728
C6		$W_{C6}=0.2003$			0.1223
C7		$W_{C7}=0.1322$			0.0807
C8			$W_{C8}=0.6667$		0.1021
C9			$W_{C9}=0.3333$		0.0511
C10				$W_{C10}=0.5000$	0.0358
C11				$W_{C11}=0.5000$	0.0358

化,以 100 m×100 m 的栅格单元按表 1 在 GIS 软件中对各评价单元内进行赋值或克里金插值,将各区域内的评价指标体系量化后作为层次分析模型(AHP)数据输入,按照公式(1)计算出各评价单元的工程建设适宜性评价指数,然后利用克里金插值获得规划区工程适宜性指数等值线;再对研究区工程适宜性等值线图进行栅格单元重采样赋值,根据模糊评价结果判定该区域建筑地基适宜性等级,最后将网格按适宜性

级别连片成图,根据工程适宜性等级评价进行分类处理获取综合评价分区图(图 4)。

4 适宜性评价

根据上述评价指标因子与综合评价方法进行计算分析后,评价结果见表 5 和图 4 所示,具体为:

(1)规划区工程建设适宜性较好,以适宜、较适

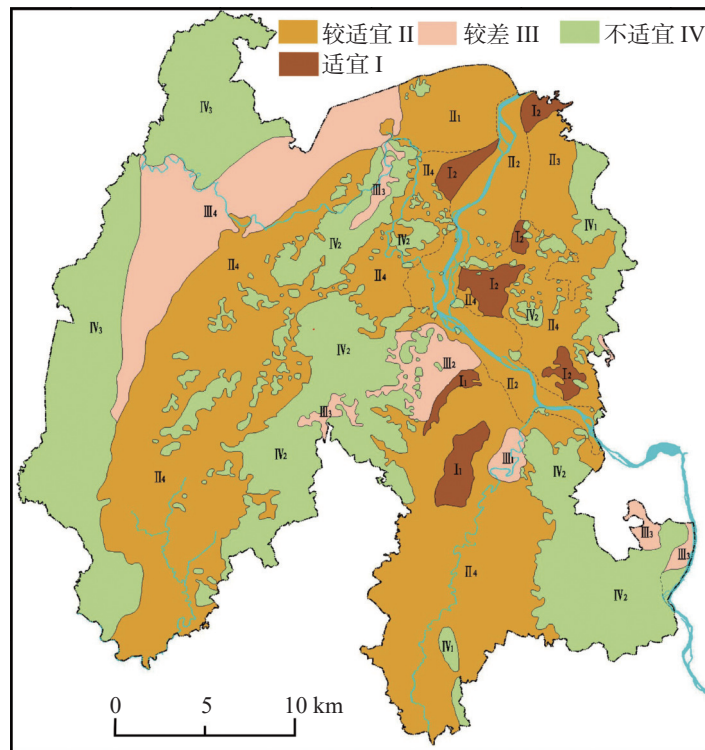


图 4 桂林规划城区工程建设适宜性评价分区图

Fig. 4 Zoning map of planned urban areas in Guilin based on suitability evaluation on engineering construction

表 5 桂林市规划城区工程建设适宜性分区表
Table 5 Table of zoning planned urban areas in Guilin based on suitability evaluation on engineering construction

分区	区段号	分布范围	地形 坡度/ $^{\circ}$ (C1)	地貌 单元 (C2)	土体地基 承载力 f_{sk}/kPa (C3)	岩体地基 承载力 f_{rk}/kPa (C4)	特殊性 土分布 (C5)	土体 厚度/m (C6)	土体 结构 (C7)	地下水 埋深/m (C8)	地表 水系 (C9)	岩溶 影响 (C10)	断裂 影响(C11)	分区说明	
														说明	备注
I 适宜区	I ₁	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	无		
	I ₂	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	中等发育	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 桃花江小于 200 m	中等发育	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—中发育, 中等发育 为主	无		
II 较适宜区	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次之, 局 部>30	单层	<5, 尧山山 脚10~15	无	弱—中等发 育, 中等发育 为主	有		
	II ₄	雁山区朝阳 乡西面至大 圩、临桂区庙 岭镇至四塘 乡南面	<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	中等发育	有		

续表 5

		分区说明											
分区	区段号	分布范围	地形 坡度/ $^{\circ}$ (C1)	地貌 单元 (C2)	土体地基 承载力 f_{sk}/kPa (C3)	岩体地基 承载力 f_{rk}/kPa (C4)	特殊性 土分布 (C5)	土体 厚度/m (C6)	土体 结构 (C7)	地下水 埋深/m (C8)	地表 水系 (C9)	岩溶 影响 (C10)	断裂 影响(C11)
较差区 III	III ₁	雁山区奇峰镇	<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
不适宜区 IV	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	东南侧翁里村至竹江村一带,临桂县以东与庙岭镇以东一带	>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—强发育	有
	IV ₃	庙岭镇以北至上全村一带,水口村、独峰村、大桥村一带	>30	丘陵	—	<2 000	不发育	<5,零星10~30	—	<5	金灵水库、石脉水库、焦额底水库、绕江水库等	非岩溶区	有

宜为主。适宜性好(I)的地区面积为 27.3 km², 占总面积的 3.1%, 主要分布于雁山区的界头村西北面和奇峰镇西面(I₁)、漓江两岸的三里店、金鸡岭、乌石街、铁山、茶店村、董家巷一带(I₂); 较适宜性(II)的地区面积为 424.9 km², 占总面积的 48.3%, 主要分布于研究区漓江上游的定江镇(II₁)、漓江两岸(II₂)、尧山西面坡洪积扇(II₃)、相思江两岸的朝阳乡西面至大圩与太平河庙镇至四塘乡南面(II₄)。因此, 工程建设适宜和较适宜的开发潜力大, 可满足近期城市规划用地的需求。适宜和较适宜的地区可成为主要城市规划建设用地、重大工程基础建设选址的主要区域。

(2) 较差区(III)面积为 100.9 km², 占总面积的 11.4%, 主要分布于规划区南边奇峰镇(III₁), 南区瓦窑至大风山一带(III₂), 研究区东南侧边缘漓江西岸的新立村、奎塘、临桂县师范学校、扒头岭、车头村(III₃), 定江镇以西与临桂区的庙岭镇以南至四塘以北(III₄)。该分区地形具有一定起伏度, 场地平整和建设需注意切坡导致的滑坡、崩塌灾害。因此, 在工程建设规划过程中需采取相适应的工程治理措施。

(3) 不适宜区(IV)面积为 326.9 km², 占总面积的 37.2%, 主要分布于研究区东面尧山及尧山南面

(IV₁), 研究区东南侧的翁里村至竹江村一带、临桂新区以东与庙岭镇以东一带、研究区中峰丛与孤峰区域(IV₂), 研究区西北角与西侧边缘的庙岭镇以北至上全村一带和水口村、独峰村、大桥村一带(IV₃)。该分区地形起伏大、坡度大, 以山地为主, 部分为峰丛和孤峰, 场地开挖极其困难, 且更易发生崩塌灾害。因此, 不宜进行工程建设, 重大工程建设选址应避免该区, 该区占有面积较大, 需对其功能进行规划, 可适宜用于生态用地, 作为旅游城市的生态屏障。

5 评价方法可靠性

验证基于 GIS 平台的层次分析模型的可靠性, 在桂林市规划城区的 6 处典型场地用层次分析模型评价工程建设适宜性, 并与实际野外的工程勘察情况进行对比分析。由表 6 可知, 其工程建设适宜性评价结果与实际野外验证情况一致。由于工程建设不适宜区(IV 区)全部以基岩的山地、峰丛和孤峰为主, 未见大型建筑分布于该区, 适用于生态环境屏障, 可见本文提出的基于 GIS 平台的层次分析法评价工程建设适宜性可靠, 对其他岩溶型城市的工程建设适宜性评价具有重要潜在借鉴意义。

表 6 桂林规划城区典型场地工程建设适宜性评价验证表

Table 6 Verification of suitability evaluation on engineering construction in representative fields selected from planned urban areas in Guilin

序号	场地	工程地质条件	适宜性指数	评价等级	评价等级区	实际评价
1	长虹新苑经济适用房	孤峰平原地貌区, 坡度小于 5°; 持力层为硬塑状红黏土和石灰岩, 其承载力特征值分别为 250 kPa 和 4 500 kPa, 建筑地基呈单层土体, 厚度约 4 m; 无地表水, 地下水为不纯碳酸盐岩岩溶裂隙水, 其埋深大于 20 m; 场地位于弱岩溶发育区, 无断裂	7.93	适宜	I ₁	场地稳定性好, 适宜建筑
2	桂林旅游学院学术交流中心楼	孤峰平原地貌区, 坡度小于 5°; 持力层为硬—可塑状红黏土, 承载力特征值为 200~250 kPa, 下伏灰岩为良好的地基基础下卧层, 承载力特征值为 3 500 kPa, 建筑地基呈单层土体, 厚度约 5 m; 无地表水, 地下水为岩溶裂隙水, 其埋深约 16 m; 场地位于弱岩溶发育区, 无断裂	6.84	适宜	I ₂	地稳定性好, 为均匀地基, 属建筑地基适宜性好
3	桂林水文工程地质勘察院集资商住楼	孤峰平原地貌区, 坡度约 14°; 持力层为硬塑状红黏土, 其承载力特征值 180 kPa, 下伏泥质灰岩可作为良好的持力层, 承载力特征值 2 000 kPa, 特殊土局部发育, 建筑地基呈双层土体, 厚度约 8 m; 无地表水, 地下水为不纯碳酸盐岩溶洞裂隙水, 其埋深约 12 m; 场地位于弱岩溶发育区, 无断裂	4.08	较适宜	II ₁	场地稳定性好, 局部地基不均匀, 属建筑地基适宜性较好

续表 6

序号	场地	工程地质条件	适宜性指数	评价等级	评价等级区	实际评价
4	秀峰区漓江西岸某楼盘	孤峰平原地貌区, 坡度约12°; 持力层为硬—可塑状红黏土, 承载力特征值为200 kPa, 中等胀缩性土; 下伏灰岩为良好持力层, 承载力特征值9 192 kPa, 建筑地基呈单层土体, 厚度约10 m; 无地表水, 地下水为碳酸盐岩岩溶水, 其埋深约12 m; 场地位于中等岩溶发育区, 有断裂影响, 无活动断裂	3.84	较适宜	II ₂	场地稳定性好, 有特殊土分布, 属建筑地基适宜性较好
5	桂林市第十八中学体育馆	孤峰平原地貌区, 坡度约14°; 持力层为硬—可塑红黏土, 承载力特征值200 kPa, 下伏灰岩可作为良好的持力层, 承载力特征值4435 kPa, 中等胀缩性土, 建筑地基呈单层土体, 厚度约9 m; 无地表水, 地下水为不纯碳酸盐岩溶洞裂隙水, 其埋深约13 m; 场地位于弱岩溶发育区, 有断裂影响, 无活动断裂	4.14	较适宜	II ₄	场地稳定性好, 有特殊土分布, 属建筑地基适宜性较好
6	春天家园职工住宅楼	漓江 II 级阶地后缘, 坡度约23°; 基础持力层及压缩层为硬塑状、可塑状、软塑状黏土和硬塑状、可塑状、软塑状含圆砾黏土, 持力层硬—可塑状黏性土承载力特征值为140~190 kPa, 软塑性黏性土承载力特征值为80~100 kPa, 特殊土发育, 建筑地基呈多层土体, 厚度约14 m; 东距离漓江约500 m, 地下水为碳酸盐岩岩溶水和第四系松散层孔隙潜水, 其埋深约为6 m; 场地位于中等岩溶发育区, 无断裂	1.95	较差	III ₂	场地稳定性好, 下伏溶沟(槽)发育, 属不均匀地基, 属建筑地基适宜性较差

6 结论

(1) 桂林市规划城区工程建设适宜性整体上以适宜性和较适宜为主, 二者占桂林规划城区总面积的 51.4%, 可满足近期城市发展规划、重大工程基础建设的用地需求, 其中适宜区占 3.1%, 较适宜区占 48.3%; 较差区占桂林市规划城区总面积的 11.4%, 在较差区平整其场地较为困难, 不宜作为大型工程场地, 在实际工程建设中需要采取必要的工程治理措施; 不适宜区占总面积的 37.2%, 该区地形起伏大, 基本为中山、峰丛、孤峰, 其占有面积较大, 可规划作为生态用地, 用于旅游城市的发展。

(2) 桂林市的岩溶地貌中发育峰林、峰丛与孤峰, 易在峰体边缘形成崩塌、滑坡等地质灾害, 而本次工程建设适宜性评价中采用 100 m×100 m 栅格单元进行评价, 而未考虑崩塌、滑坡对工程建设适宜性的评价, 今后对峰林、峰丛与孤峰边缘的相关场地建设可根据现场岩体工程质量和崩塌、滑坡的潜在影响范围对其工程建设适宜性进行精细化评价。

参考文献

- [1] 田洪水, 陈启辉. 济南市区的地基土层及地基适宜性评价[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 49-52.
TIAN Hongshui, CHEN Qihui. Characteristics of foundation soil layers and evaluation on foundation suitability in the urban area of Jinan City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(5): 49-52.
- [2] 熊彩霞, 梁恒昌, 马金荣, 张鄂芬. 煤矿采空区建筑场地地基适宜性分析[J]. 采矿安全工程学报, 2010, 27(1): 100-105.
XIONG Caixia, LIANG Hengchang, MA Jinrong, ZHANG Efen. Stability analysis of the building foundation over goaf area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 100-105.
- [3] 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(2): 84-88.
YU Yueping, TANG Baian. Engineering geological characteristics and suitability evaluation of site engineering construction in the central urban area of Shaoxing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 84-88.
- [4] 江思义, 吴福, 刘庆超, 李海良, 潘晓丽. 岩溶地区建设用地的地质环境适宜性评价: 以广西桂林规划中心城区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 84-92.
JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, LI Hailiang, PAN Xiaoli. Suitability evaluation of construction land development in karst

- area: Taking city planning center of Guilin as an example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 84-92.
- [5] 杨子生. 云南山区城镇建设用地适宜性评价中的特殊因子[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.
- [6] 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 Dai-Jinpo Autonomous Prefecture, Yunan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 64-76.
- [7] 陈绪钰, 王东辉, 倪化勇, 李明辉, 田凯. 长江经济带上游地区丘陵城市工程建设适宜性评价: 以泸州市规划中心城区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(1): 194-207.
CHEN Xuyu, WANG Donghui, NI Huayong, LI Minghui, TIAN Kai. Building suitability evaluation of hilly city in upper reaches of Yangtze River economic belt: In case study of urban central planning of Luzhou City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(1): 194-207.
- [8] 梅芹芹, 龚绪龙, 史稚栋, 苟富刚. 江苏沿海地区工程建设地质适宜性评价[J]. 地质学刊, 2018, 42(2): 317-322.
MEI Qinqin, GONG Xulong, SHI Yadong, GOU Fugang. On geological suitability evaluation of engineering construction in coastal Jiangsu area[J]. Journal of Geology, 2018, 42(2): 317-322.
- [9] 黄敬军, 武鑫, 姜素, 崔龙玉, 魏永耀, 张丽, 陆华. 海绵城市建设的地质影响及适宜性评价: 以徐州为例[J]. 地质论评, 2018, 64(6): 1472-1480.
HUANG Jingjun, WU Xin, JIANG Su, CUI Longyu, WEI Yongyao, ZHANG Li, LU Hua. Geological influence and suitability evaluation of the construction of sponge city: A case of Xuzhou[J]. Geological Review, 2018, 64(6): 1472-1480.
- [10] 范峻恺, 徐建刚, 胡宏. 基于BP神经网络模型的海绵城市建设适宜性评价方法研究: 以福建省长汀县为例[J]. 生态经济, 2019, 35(11): 222-229.
FAN Junkai, XU Jiangang, HU Hong. Research on construction suitability evaluation of sponge city based on back propagation neural network model: A case of Changting, China[J]. Ecological Economy, 2019, 35(11): 222-229.
- [11] 沈春竹, 谭琦川, 王丹阳, 陈逸, 黄贤金. 基于资源环境承载力与开发建设适宜性的国土开发强度研究: 以江苏省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1276-1286.
SHEN Chunzhu, TAN Qichuan, WANG Danyang, CHEN Yi, HUANG Xianjin. Research on land development intensity based on carrying capacity of resources and environment and suitability of development and construction: A case study of Jiangsu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1276-1286.
- [12] 杨杨, 赵良杰, 夏日元, 王莹. 珠江流域岩溶地下河分布特征与影响因素研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 562-576.
YANG Yang, ZHAO Liangjie, XIA Riyuan, WANG Ying. Distribution and influencing factors of karst underground rivers in the Pearl River Basin[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(4): 562-576.
- [13] DZ/T 0060-93. 岩溶地区工程地质调查规程[S]. 1994.
- [14] 吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 罗伟权, 潘宗源. 基于AHP和GIS技术的湖南怀化地区岩溶塌陷易发性评价[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 21-33.
WU Yuanbin, LIU Zhikui, YIN Renchao, LEI Mingtang, DAI Jianling, LUO Weiquan, PAN Zongyuan. Evaluation of karst collapse susceptibility in Huaihua area, Hunan Province based on AHP and GIS[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 21-33.
- [15] 张圻恺, 凌斯祥, 李晓宁, 孙春卫, 徐建祥, 黄涛. 九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1595-1610.
ZHANG Qikai, LING Sixiang, LI Xiaoning, SUN Chunwei, XU Jianxiang, HUANG Tao. Comparison of landslide susceptibility mapping rapid assessment models in Jiuzhaigou county, Sichuan Province, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1595-1610.
- [16] 程惠红. 曹妃甸滨海新区工程建设适宜性评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
CHENG Huihong. Appraisals of suitability to project construction in new region in Caofeidian[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [17] 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 张炳辉. 基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 577-583.
CAO Xianfa, LIU Yukang, LIU Zhikui, ZHANG Binghui. Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 577-583.
- [18] 曹继勇, 陈志龙, 郭东军. 北京市岩土体工程特征及工程适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 656-659.
CAO Jiyong, CHEN Zhilong, GUO Dongjun. The engineering character and feasibility evaluation of rock & soil in Beijing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 656-659.
- [19] 李瑞敏, 鞠建华, 王轶, 王祎萍, 曹峰, 覃小群, 申建梅, 孙自勇, 王红旗. 地质环境问题的地质指标体系框架及其构建方法[J]. 地质通报, 2011, 30(11): 1738-1743.
LI Ruimin, JU Jianhua, WANG Yi, WANG Yiping, CAO Feng, QIN Xiaoqun, SHEN Jianmei, SUN Ziyong, WANG Hongqi. Framework and design of the geoinicator system for geoenvironment problems[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(11): 1738-1743.

Suitability evaluation on construction of planned urban areas in Guilin based on AHP method and GIS platform

WANG Xinwei^{1,2}, ZHANG Lili³, GUO Shangqi¹, YE Zongda², JIANG Fan²

(1. China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Technical Innovation Center of Mine Geological Environmental Restoration Engineering in Southern Karst Area, Ministry of Natural Resources, Nanning, Guangxi 530018, China; 3. Guilin Hydrological Engineering Geological Survey Institute Co., Ltd. of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The engineering construction of karst city is often affected by karst geological hazards. Guilin City is a typical representative of karst city; therefore, we should consider the influence of karst hazards when analyzing the suitability for engineering construction in planned urban areas of Guilin. In this study, we established a method for evaluating the construction suitability based on the analytic hierarchy process (AHP) on the geographic information system (GIS) platform. Firstly, the landform of planned urban areas in Guilin is mainly composed of peak-cluster depression, peak-forest valley, peak-forest plain, isolated peak plain, karst-ridge valley, karst-hill plain, low mountain with steep hillslope, hill, hill with gentle slope, and undulating hills. The areas intensely developed with karst are mainly located along the banks of the Lijiang River and in the Lingui district. The areas with karst development at a medium level are located in the middle and southwestern parts of Guilin City and on the periphery of the Lijiang River banks. The areas with weak karst development are mainly located at the Yanshan district, Dingjiang town, and southwestern Lingui district. The groundwater types of the study area are mainly composed of carbonate karst water, impure carbonate cave-fissure water, and clastic bedrock fissure water. For the suitability evaluation of engineering construction in planned urban areas of Guilin, the topographic slope, geomorphic unit, bearing capacity of soil foundation, bearing capacity of rock foundation, special soil distribution, soil thickness, soil structure, groundwater depth, surface water system, karst influence, and fault factors are selected as evaluation indexes, all of which have passed the consistency test of judgment matrix. The weight of these eleven evaluation indexes was calculated by AHP. Then, the engineering construction suitability index (P) was computed from multi hierarchy evaluation with AHP. The P values can be classified as $P \geq 5.00$, $2.50 \leq P < 5.00$, $1.00 \leq P < 2.50$, and $P < 1.00$, which may respectively fall into the category of suitable area, relatively suitable area, poorly suitable area, and unsuitable area for engineering construction. The zoning of planned urban areas in Guilin was visualized based on the suitability for engineering construction on the GIS spatial platform. Finally, in terms of the zoning based on suitability for engineering construction, six sites were chosen and were verified that the zoning by AHP method is consistent with that by field engineering drilling surveys. The consistency may indicate the reliability of AHP method with GIS platform.

Main conclusions can be drawn as follows, (1) The impact indexes of suitability for engineering construction of the study area include topography (slope degree and geomorphic unit), engineering geological conditions (bearing capacity of soil foundation, bearing capacity of rock foundation, special soil distribution, soil thickness and soil structure), hydrological conditions (groundwater depth and surface water system), and unfavorable geological condition (karst influence and fault factors). (2) Planned urban areas in Guilin are generally suitable for engineering construction, because suitable and relatively suitable areas account for 3.1% and 48.3% of the total area respectively, which can meet the land use needs of recent urban development planning and major infrastructure projects. However, the poorly suitable areas account for 11.4%, which are unsuitable for large-scale engineering construction and require necessary engineering treatment in practical construction. Unsuitable areas account for 37.2%, mostly located at medium-sized mountain, peak-cluster, and isolated peak. The site selection of major construction should be avoided in the unsuitable area. (3) If the major construction site is selected in a poorly suitable area, measures should be taken to prevent and control the existing and induced geological disasters and uneven settlement of foundations. The unsuitable area is proposed to be planned as the ecological land, which can serve as the ecological barrier for Guilin.

Key words construction suitability, AHP, planned urban areas of Guilin, karst environment, GIS

(编辑 黄晨晖)