

# 山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价

赵思成<sup>1</sup>, 胥 犇<sup>2</sup>, 李晓军<sup>1,3</sup>, 张万斌<sup>2</sup>, 刘保林<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023; 3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 针对山地城市核心区特殊的地形地质、区位价值、建设现状等条件, 利用三维精细化评价基本单元体划分城市地下空间, 采用层次分析法构建适宜性评价因子体系, 并建立敏感因子-模糊-变权复合模型作为评价计算方法, 实现了山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价, 可为地下空间开发三维规划提供指导和借鉴。以重庆市渝中半岛为例, 获得其 0~150 m 地下空间开发适宜性三维立体分区及深度-适宜性分区占比变化关系, 并选取典型区块对评价方法可靠性进行验证。

**关键词:** 地下空间开发; 山地城市核心区; 适宜性; 三维评价; 复合评价模型

中图分类号: TU91

文献标志码: A

## 3D Evaluation of Suitability of Underground Space Development in Core Areas of Mountainous Cities

ZHAO Sicheng<sup>1</sup>, XU Ben<sup>2</sup>, LI Xiaojun<sup>1,3</sup>, ZHANG Wanbin<sup>2</sup>, LIU Baolin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 400023, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In view of the special topography, geology, construction status and location value of underground space construction in the core area of mountainous cities, a basic unit of 3D fine evaluation is used to divide urban underground space, the analytic hierarchy process is used to determine the suitability evaluation factor system, and a sensitive factor-fuzzy-variable weight composite model is established as the evaluation calculation method. The three-dimensional evaluation of the suitability of underground space development in the core area of

mountainous cities is realized, which can provide guidance and reference for the 3D planning of underground space development. Taking the Yuzhong Peninsula of Chongqing as an example, the 3D divisions of the suitability of the 0 to 150 m underground space and the changes in the proportion of depth-suitability divisions are obtained. In addition, a typical block is selected to verify the reliability of the evaluation method.

**Key words:** underground space development; core area of mountainous cities; suitability; 3D evaluation; composite evaluation model

山地城市核心区由于地形的复杂性、地质的特殊性以及建设的密集性, 其布局很难在平面上拓展, 人-地关系矛盾突出。开发利用城市地下空间对发展区域经济, 推动社会进步, 增强城市整体防护等众多方面产生的综合效益日益明显<sup>[1]</sup>。由于城市地下空间一经开发便很难逆转, 且同一平面范围不同深度可以安排不同的功能空间<sup>[2]</sup>, 故开展山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价, 对于其地下空间三维规划及开发利用, 具有十分重要的作用。

目前, 国内外学者已针对城市地下空间适宜性评价开展了一系列的研究。彭建等<sup>[3]</sup>利用层次分析法提出了适用于东部沿海地区的地下空间开发利用适宜性评价方法; 江思义等<sup>[4]</sup>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指标体系及评价方法; 胡学祥等<sup>[5]</sup>基于模糊综合评价模型对宁波市地下空间开发适宜性进行了研究; 汪侠等<sup>[6]</sup>运用多层次灰度评价方法对南京鼓楼区进行地下空间资源开发潜力评价; 吴立新等<sup>[7]</sup>基于 GeoMo3D 系统和模糊评估模型对北京某中央商务区进行了地下空间 3D 资源质量评估。前人成果为提供了宝贵的工作

收稿日期: 2020-11-24

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金重点支持项目(U1934212); 国家重点研发计划(2018YFB2101000)

第一作者: 赵思成(1997—), 男, 博士生, 主要研究方向为城市地下空间规划. E-mail: sichengzhao@tongji.edu.cn

通信作者: 李晓军(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地下空间建模及隧道智能建造.

E-mail: lixiaojun@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

基础,但仍存在局限之处:①多以平原城市一般城区作为研究背景,针对山地城市核心区地下空间的适宜性评价尚无系统性的研究和总结;②多以大跨度分层或大尺寸三维体素的方式划分地下空间,无法满足复杂地下空间三维精细化分析的需求;③评价因子权重及质量等级的确定过于主观,不能很好解决其模糊性、敏感性和权重的“木桶效应”等问题。

针对山地城市核心区地下空间三维规划的需求,本文利用三维精细化评价基本单元体划分城市地下空间;在前人研究成果的基础上,结合山地城市核心区地形地质、区位价值及建设现状等特点建立适宜性评价因子体系;将敏感因子模型、模糊综合评价法以及变权思想进行优化复合建立评价计算模型,最终实现山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价。最后以重庆市渝中半岛为例,对其0~150 m地下空间进行开发适宜性三维评价,并选取典型区块对评价方法可靠性进行验证。

## 1 三维精细化评价基本单元体

由于影响山地城市核心区地下空间开发的地形

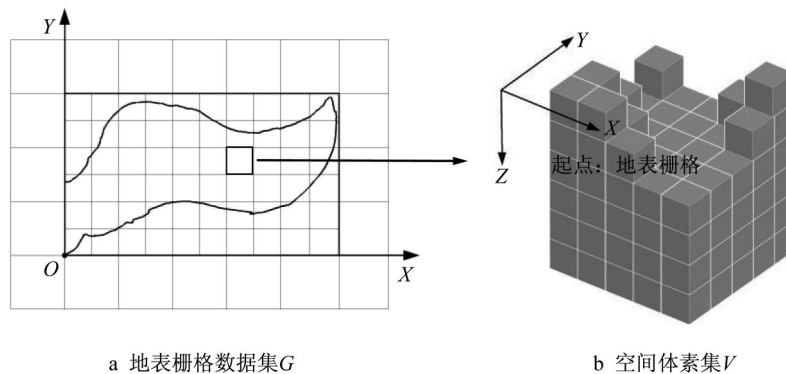


图1 三维精细化评价基本单元体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D refined evaluation basic units

## 2 适宜性评价因子体系

山地城市核心区具有异于平原城市的地下空间开发制约因素:①地形地貌复杂,起伏较大;②以岩石地层为主,地层拓扑关系复杂;③断层、褶皱等地质构造发育;④地下水以松散岩类裂隙水与基岩裂隙水为主,分布零散;⑤由于岩体的风化差异,易诱发滑坡等地质灾害;⑥地下空间开发程度高,地下建构物密集。此外,核心区是城市经济发展的关键区域,商业服务、交通换乘等区位价值要素是其地下

地貌、地层条件、建设现状等众多因素与高程信息密切相关,只有进行精细化三维分析,才能准确合理地评价开发适宜性。而针对城市级别的地下空间精细化分析,若按照传统三维地理信息系统(3D GIS)和三维地学模拟系统(3D GMS)先建模再分析的方法<sup>[7-8]</sup>,需要划分上亿级别的评价单元,计算资源需求较高。因此,本文基于二维地表栅格(Grid)建立了压缩数据结构,在计算中通过数据索引获取三维体素(Voxel)属性。

以评价区域包围矩形顶点 $O$ 作为二维坐标原点, $X$ 、 $Y$ 轴方向与2000国家大地坐标系(CGCS2000)一致;以地表单元体作为 $Z$ 轴坐标原点,以地球参考极方向作为 $Z$ 轴方向。进而以单位长度 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 划分评价区域,在地表区域形成地表栅格数据集 $G$ ,在三维空间区域形成空间体素集 $V$ ,其中的三维体素即为城市地下空间开发适宜性评价基本单元体,如图1所示。基于地表栅格 $g_{xy}$ 的数据结构存储了对应地下空间的评价因子数据及深度信息,在计算中通过数据映射的方式获取三维体素 $v_{xyz}$ 的评价因子数据。

空间开发利用需要重点考虑的因素<sup>[9]</sup>。

在对前人研究<sup>[9-10]</sup>归纳总结基础上,结合上述山地城市核心区地下空间特点,采用层次分析法(AHP)<sup>[3]</sup>构建开发适宜性评价因子体系,如图2所示。

## 3 敏感因子-模糊-变权复合评价计算模型

根据城市地下空间的核心特征,在分析现有模型的基础上,本文建立敏感因子-模糊-变权复合模

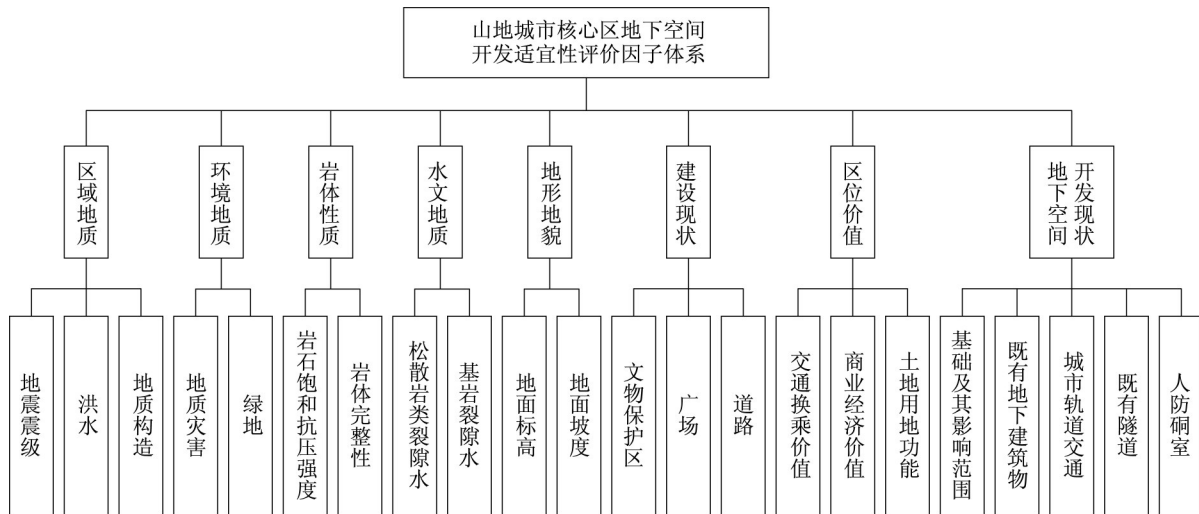


图2 山地城市核心区地下空间开发适宜性评价因子体系

Fig. 2 Evaluation factor system for suitability of underground space development in core areas of mountainous cities

型,以期使评价计算更加贴近实际情况。评价结果共分为4个等级,分别为适宜(I级),较适宜(II级),较不适宜(III级),不适宜(IV级)。评价流程如图3所示。

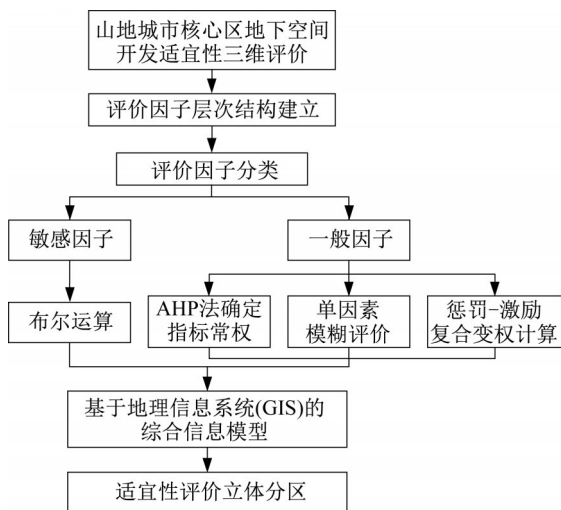


图3 山地城市核心区地下空间适宜性三维评价流程

Fig. 3 3D suitability evaluation process of underground space in core areas of mountainous cities

3.1 评价因子敏感性分类

建立复合评价计算模型,首先要对评价因子的敏感性,即其与地下空间开发相互作用关系中的地位进行分类。第一类评价因子称之为一般因子,若质量较差,花费可承受的代价即可改善。第二类评价因子称之为敏感因子,若其质量较差,则完全无法进行地下空间开发或需要不可承受的经费投入<sup>[11]</sup>。

对于一般因子,通过模糊-变权综合评价方法给予权重及得分;对于敏感因子,若某区域存在,则采用布尔运算将其判定为不适宜区。

3.2 单项因子模糊评价

在适宜性评价计算过程中,评价因子存在边界不清,等级划分呈一定模糊性的问题。本文引入模糊数学中隶属度的概念,用属于各个级别的可能性来反映模糊性<sup>[12]</sup>。经过敏感性分类后的一般因子包括定量因子和定性因子,分别通过构造隶属函数和采用模糊定性方法<sup>[13]</sup>确定隶属度。

对于定量因子,根据评价影响方向划分为正向因子与反向因子,分别通过式(1)~(2)对因子数据值进行标准化。

x\_0 = (x - a\_min) / (a\_max - a\_min) \* l\_n + sum\_{i=1}^{n-1} l\_i

x\_0 = L - sum\_{i=1}^{n-1} l\_i - (a\_max - x) / (a\_max - a\_min) \* l\_n

式(1)~(2)中:x为评价因子数据原始值;x\_0为评价因子数据标准值;a\_max, a\_min分别为各原始评价等级区间的最大值及最小值;l\_i为各评价等级的标准化区间长度;L为各区间标准化长度之和;本文考虑研究区实际情况及运算资源限制,取L=10, l\_i=2.5。

根据模糊数学理论及相关研究<sup>[12]</sup>,结合评价因子数据统计分布规律,组合多种Cauchy分布模型,构建评价因子定义域下的隶属度分布,如图4所示。

图4中,定量因子关于4个等级的隶属函数如式(3)~(6)所示:

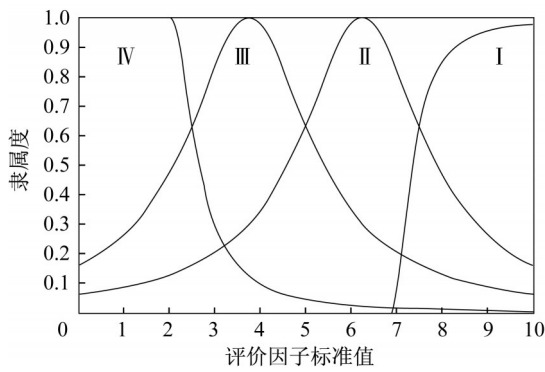


图 4 地下空间适宜性评价因子得分隶属度分布

Fig. 4 Distribution of subordination degree of underground space suitability evaluation factors' score

$$\mu'_IV(x_0) = \begin{cases} 1 & , x_0 \leq 2 \\ \frac{1}{1 + 2.2956(x_0 - 2)^2} & , x_0 > 2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu'_III(x_0) = \frac{1}{1 + 0.3673(x_0 - 3.75)^2} \quad (4)$$

$$\mu'_II(x_0) = \frac{1}{1 + 0.3673(x_0 - 6.25)^2} \quad (5)$$

$$\mu'_I(x_0) = \begin{cases} 0 & , x_0 \leq 6.875 \\ \frac{1}{1 + 0.2242(x_0 - 6.875)^2} & , x_0 > 6.875 \end{cases} \quad (6)$$

对隶属函数计算结果归一化,得到定量因子隶属度  $\mu_i$ ,如式(7)所示:

$$\mu_i = \frac{\mu_i(x_0)}{\sum_{j=1}^4 \mu_j(x_0)}, i = I, II, III, IV \quad (7)$$

对于定性因子,综合本文评价因子特征及专家观点,构建隶属度分布见表 1。

表 1 定性因子隶属度分布表

Tab. 1 Distribution of subordination degree of qualitative factors

定性因子 评价等级	适宜性等级隶属度 $\mu_i$			
	I	II	III	IV
I	0.80	0.15	0.05	0.00
II	0.10	0.80	0.05	0.05
III	0.05	0.10	0.70	0.15
IV	0.00	0.10	0.20	0.70

由式(3)—(7)及表 1 分别计算定量和定性因子数据的隶属度。最终,通过如式(8)获得单项因子的

评价值  $x'$ :

$$x' = (0 \quad 3.3 \quad 6.6 \quad 10) \begin{pmatrix} \mu'_IV \\ \mu'_III \\ \mu'_II \\ \mu'_I \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 3.3 惩罚-激励型复合变权及评价综合得分

在地下空间适宜性评价问题中,常用的决策模型是常权综合模型  $\sum_{j=1}^m \omega_j x_j$  (其中  $\omega_j$  为因素权重,满足

$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1; x_j (j=1, 2, \dots, m)$  为因素状态值),因素权重

$\omega_j$  不随状态值变化。而实际情况下,某项因子的评价价值过低或极高应大幅度影响该单元的综合评价结果,因此采用常权综合模型存在片面性,可能会导致不科学的结果<sup>[14]</sup>。为此,本文采用惩罚-激励复合型变权综合决策模型,通过“惩罚”和“激励”的方式提高评价价值过低或极高的因子权重,使其更为符合实际情况。

变权综合决策模型计算式如式(9)—(10):

$$w_j(X') = w_j S_j(X') / \sum_{k=1}^m w_k S_k(X') \quad (9)$$

$$M = b_s \left( \sum_{j=1}^m w_j(x'_1, \dots, x'_m) x'_j \right) \quad (10)$$

$j = 1, 2, \dots, m$

式(9)—(10)中: $M$ 为评价单元适宜性综合得分; $X' = (x'_1, \dots, x'_m)$ 为经过 3.2 节模糊化后的因子评价向量; $W = (w_1, \dots, w_m)$ 为评价因子常权向量; $S(X') = (S_1(X'), \dots, S_m(X'))$ 为评价因子状态变权向量; $W_j(X') = w_j(x'_1, \dots, x'_m)$ 为与因子评价价值相关的变权向量,是  $W$  和  $S(X')$  的归一化 Hadamard 乘积; $b_s$  为与敏感因子相关的布尔数,根据计算单元体内是否存在敏感因子,分别取  $b_s = 0$  或  $b_s = 1$ 。

变权综合模型的重点在于通过构造均衡函数确定状态变权向量<sup>[15]</sup>。综合考虑本文评价因子特点及专家意见确定均衡函数相关系数<sup>[12]</sup>,函数形式如下式(11):

$$S(x'_j) = \begin{cases} 0.2 \ln \frac{1}{x'_j} + 0.7 & , 0 < x'_j \leq 1 \\ -0.2x'_j + 0.9 & , 1 < x'_j \leq 3 \\ 0.2 + 10(0.4 - 0.1x'_j)^2 & , 3 < x'_j \leq 4 \\ 0.2 & , 4 < x'_j \leq 8 \\ 0.3 \ln \frac{0.2}{1 - 0.1x'_j} + 0.2 & , 8 < x'_j \leq 10 \end{cases} \quad (11)$$

根据山地城市核心区工程建设经验,结合评价因子的分布特征及其影响,确定评价单元综合得分 $M$ 与适宜性等级对应关系见表2。

表2 地下空间适宜性评价等级划分  
Tab. 2 Classification of suitability evaluation of underground space

评价等级	I级	II级	III级	IV级
单元综合得分(M)	$\geq 7.5$	5.0~7.5	2.5~5.0	$\leq 2.5$

## 4 实例研究

### 4.1 评价区域概况

研究区主体为重庆市渝中半岛,总面积为18.9

$\text{km}^2$ ,具有典型山地城市核心区特征:地形坡地面积大,层次性明显;基岩为泥岩与砂岩互层,地层拓扑关系复杂;地质构造发育,常有岩体崩塌产生,易形成危岩;两江交汇且降雨集中,常发生斜坡变形破坏;地下空间开发利用程度高,建构筑物密集;商业中心、交通枢纽、旅游景点等地下空间重点发展区域多,经济辐射能力强。为验证评价计算方法可靠性,本文以研究区东侧含滨江山麓等典型特征且为渝中半岛发展重心的解放碑区块作为评价结果验证区,如图5所示。

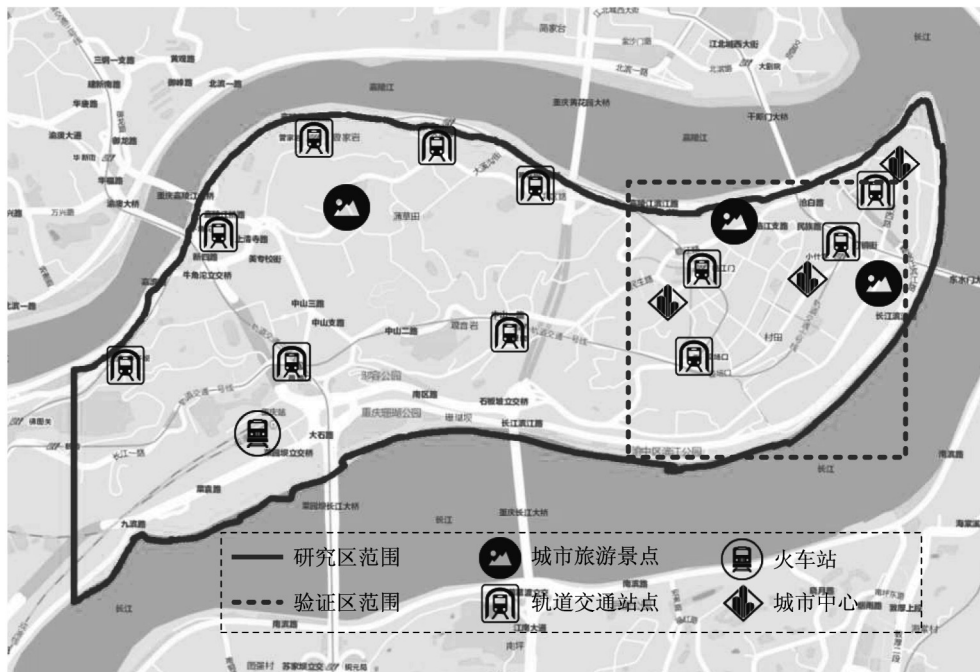


图5 研究区、验证区范围及地下空间重点发展区域

Fig. 5 Research area, verification area, and key development areas of underground space

### 4.2 评价因子分类及常权权重确定

根据3.1节,结合重庆市地下空间开发工程经

验与专家意见,对评价因子进行敏感性划分,见表3。

表3 评价因子敏感性分类表

Tab. 3 Sensitivity classification of evaluation factors

类型	一级评价因子
敏感因子	地下空间开发现状
一般因子	区域地质、环境地质、工程地质、水文地质、地形地貌、建设现状、区位价值

根据一般因子对渝中半岛地下空间开发的影响程度,参考相关研究<sup>[9-10]</sup>及专家意见,建立评价因子分级标准并计算各因子的常权权重<sup>[3]</sup>。见表4。

### 4.3 评价计算结果

通过二次开发ArcGIS Engine软件,采用如第1

节所述三维精细化评价基本单元体划分方法,将研究区地下150 m范围沿X, Y, Z方向进行 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的划分。将标准化后的评价所需数据作为第3节评价计算模型的输入,根据单元计算结果判定适宜性等级。经计算,重庆市渝中半岛0~150 m

表4 山地城市核心区地下空间开发适宜性评价因子量化分级标准

Tab. 4 Quantitative grading standards for evaluation factors of suitability for underground space development in core areas of mountainous cities

一级评价因子		二级评价因子		评价单元属性	适宜	较适宜	较不适宜	不适宜
因子	权重	因子	权重		I级	II级	III级	IV级
区域地质	0.130 4	地震震级	0.018 7	地震震级M	< 4	4~5	5~6	≥ 4
		洪水	0.018 7	地面标高/m	≥ 194	179~194	164~179	< 164
		地质构造	0.093 2	平面位置	其他区域	背斜与向斜转折处	向斜轴部	背斜轴部
环境地质	0.130 4	绿地	0.032 6	单元埋深/m	≥ 5	4~5	3~4	< 3
		地质灾害	0.097 8	地质灾害险情等级	不存在	小型	中型	大型
工程地质	0.217 4	岩体性质	0.163 0	岩石饱和抗压强度/MPa	≥ 23	15~23	7~15	< 7
		岩体完整性	0.054 4	岩体完整性	完整	块状	碎裂	破碎
水文地质	0.043 5	松散岩类裂隙水	0.021 7	富水性等级	弱	微弱	中等	丰富
		基岩裂隙水	0.021 7	富水性等级	弱	微弱	中等	丰富
地形地貌	0.130 4	地面标高	0.032 6	地面标高/m	≥ 325	250~325	175~250	< 175
		地面坡度	0.097 8	地面坡度/(°)	< 10	10~30	30~50	≥ 50
建设现状	0.043 5	文物保护区	0.031 1	单元埋深/m	≥ 7	6~7	5~6	< 5
		广场	0.006 2	单元埋深/m	≥ 5	4~5	3~4	< 3
		道路	0.006 2	单元埋深/m	≥ 7	6~7	5~6	< 5
区位价值	0.304 3	交通换乘价值	0.130 4	地下交通通达度	高	较高	较低	低
		商业经济价值	0.130 4	商服中心影响度	高	较高	较低	低
		土地用地功能	0.043 5	土地等级	I级	II级	III级	IV级

地下空间开发适宜性三维立体分区结果如图6所示。

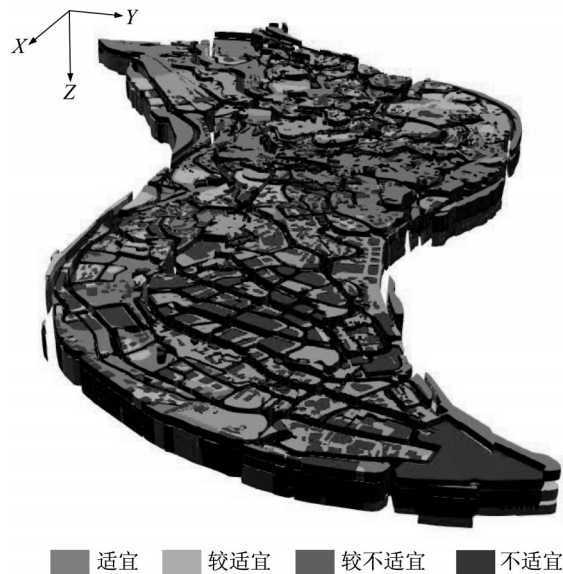


图6 研究区地下空间开发适宜性三维评价结果

Fig. 6 3D evaluation results of suitability of underground space development in the area studied

根据埋深对研究区地下空间开发适宜性评价结果统计汇总如表5所示。

根据表5,绘制深度-适宜性分区占比关系曲线如图7所示。

根据适宜性三维评价结果,选取可反映适宜性

表5 研究区地下空间开发适宜性评价结果统计表

Tab. 5 Statistics of evaluation results of suitability of underground space development in the area studied

埋深/m	评价结果占比/%				埋深/m	评价结果占比/%			
	I级	II级	III级	IV级		I级	II级	III级	IV级
2	24.40	10.38	36.98	28.26	22	63.23	26.45	3.90	6.44
4	38.60	16.39	23.56	21.47	24	63.66	26.64	3.71	6.00
6	52.79	22.40	10.13	14.67	26	64.08	26.83	3.53	5.57
8	54.62	23.09	8.99	13.28	28	64.51	27.03	3.34	5.13
10	56.45	23.79	7.86	11.90	30	64.94	27.22	3.16	4.70
12	58.28	24.48	6.72	10.51	40	65.37	27.41	2.97	4.26
14	60.11	25.18	5.59	9.13	50	65.37	27.41	2.97	4.26
16	61.94	25.87	4.45	7.74	75	65.37	27.41	2.97	4.26
18	62.37	26.06	4.27	7.31	100	65.37	27.43	2.97	4.24
20	62.80	26.26	4.08	6.87	150	65.41	27.42	2.97	4.19

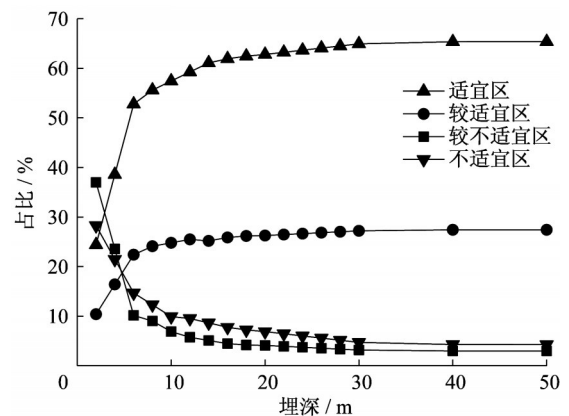


图7 研究区埋深-适宜性占比分区关系曲线

Fig. 7 Buried depth versus proportion of suitability in the area studied

变化特征的典型平面(地下2,6,18,40 m),绘制该深度的适宜性评价结果如图8所示。

结合图6~图8以及表5,分析可得以下结论:

(1) 渝中半岛4 m以内地下空间多处于第四系松散堆积层及强风化带中,工程地质条件较差,两江沿岸洪水影响较大,同时该深度范围也是地下建筑物最为密集的区域,较不适宜、不适宜区占比超过45%;该深度范围内适宜、较适宜区主要分布在经济重点发展区域,如东部解放碑区域、西南部菜园坝火车站区域等。

(2) 6~20 m地下空间主要受轨道交通、高层建筑物桩基、岩层性质等因素影响,不适宜区主要分布于东部高层建筑密集区域,较不适宜区主要分布于中南部软弱岩层分布区,占比均随深度逐渐减小;适宜区和较适宜区占比随深度逐渐增加。

(3) 20 m以下,地下建筑物分布稀少,地层强度高,开发适宜性各区占比趋于稳定,适宜区约65.37%,较适宜区约27.43%,较不适宜区约2.97%,不适宜区约4.23%。

#### 4.4 评价结果验证

以验证区地下空间开发最为密集,影响因素最为复杂的0~2 m作为典型深度范围,具体分析地下空间开发适宜性评价结果,如图9a,由于该区块不存在得分极低的评价因子,故不适宜区范围主要由敏感因子—地下空间开发现状决定。仅将地下空间开发现状因子移除后,得对比图9b。

分区统计各深度范围内已开发地下建筑物面积较验证区总面积占比,结果如图10所示。

分析图9~图10,可得以下结论:

(1) 如图9,验证区0~2 m深度范围内,适宜区占比69.1%,主要分布于北侧商业、旅游、轨道交通等行业重点发展区域辐射范围内;较不适宜区占比21.8%,主要分布于西南侧,是由于浅层分布的第四系堆积层及强风化带强度较低且滨临长江易受洪水影响。地下建筑物主要分布于适宜区及较适宜区,占比达84.4%,位于较不适宜区占比仅15.6%。

(2) 如图10所示,随着深度增加,验证区地下建筑物逐渐减少,各深度范围位于适宜、较适宜区占

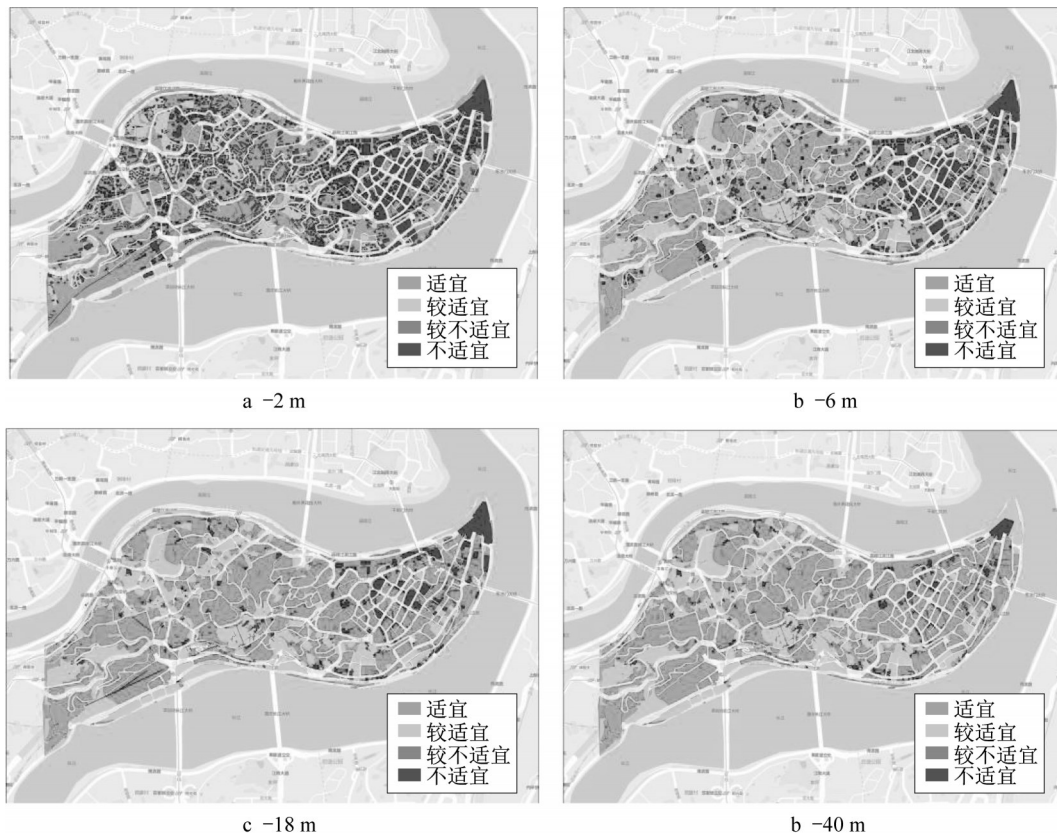


图8 研究区地下2,6,18,40 m适宜性评价结果

Fig. 8 Results of suitability evaluation at a depth of 2, 6, 18, and 40 m underground in the area studied

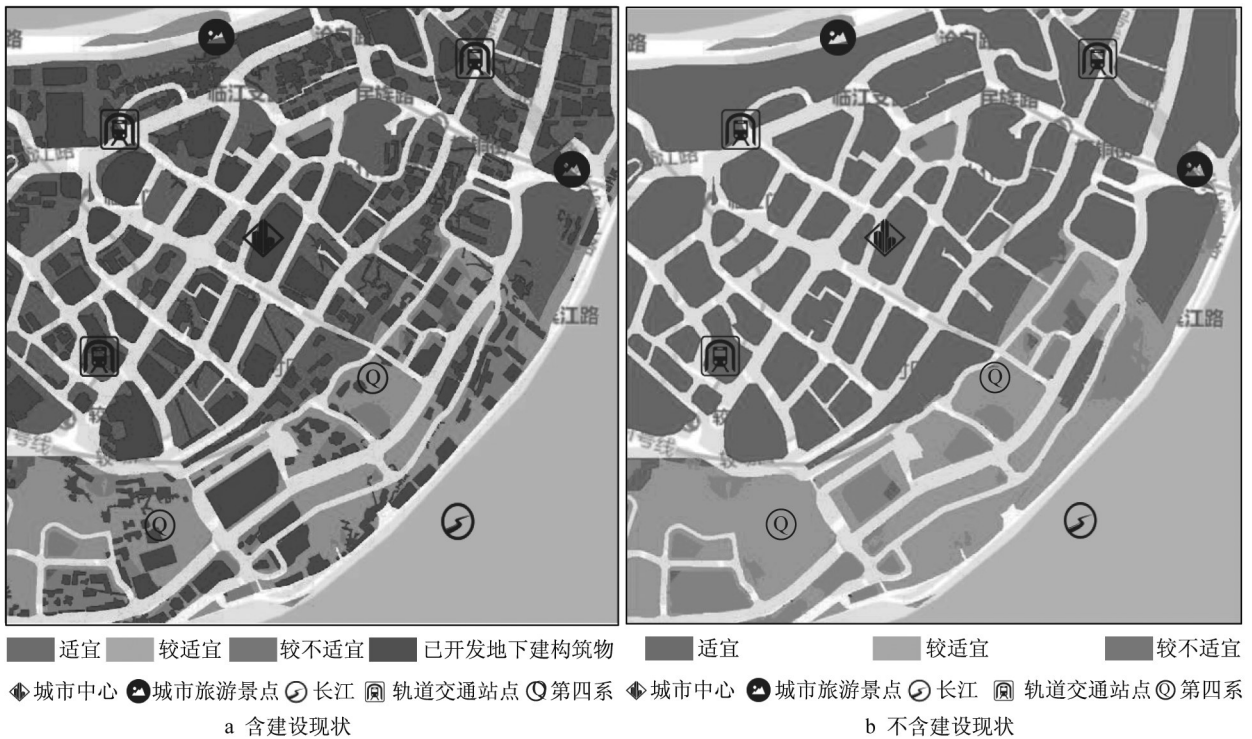


图 9 验证区 0~2 m 地下空间开发适宜性评价结果

Fig. 9 Evaluation result of suitability for development of 0 to 2 m underground space in verification area

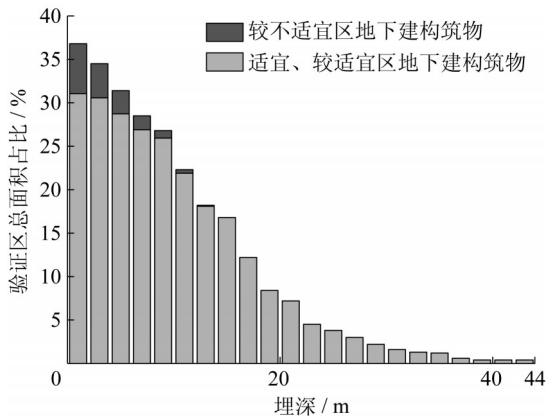


图 10 验证区已开发地下建筑物分区占比

Fig. 10 Proportion of underground buildings developed in validation area

比均远大于较不适宜区,14 m 以下位于较不适宜区占比趋近于零。由此可见,验证区已有地下建筑物选址与本文开发适宜性评价结果较为吻合。

### 5 结论

本文开展了山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价研究,主要完成工作如下:

- (1) 利用三维精细化评价基本单元体划分城市

地下空间,满足了复杂地下空间的分析需求。

(2) 在分析研究山地城市核心区地形地质、建设现状、区位价值等特征的基础上,建立了山地城市核心区地下空间适宜性评价因子体系。

(3) 结合敏感因子模型、模糊数学方法、变权理论,建立了城市地下空间适宜性评价复合计算模型。以重庆市渝中半岛为例,通过二次开发 ArcGIS Engine 软件,按照 2 m×2 m×2 m 的间距划分其 0~150 m 地下空间并进行开发适宜性评价计算。获得重庆市渝中半岛地下空间开发适宜性三维立体分区及适宜性分区占比-埋深变化结果。并选取验证区评价结果与实际建设现状进行比对,验证了评价方法的可靠性。

本文对于指导山地城市核心区地下空间三维规划,保障城市地下空间有序发展,实现集约型山地城市建设具有重要意义;并为进一步研究城市地下空间透明化提供技术储备。

#### 作者贡献声明:

赵思成:制定研究方案,计算评价模型,撰写论文。

胥霖:协助研究,收集处理原始数据。

李晓军:提出研究课题,指导撰写论文,审阅修订论文。

张万斌:协助研究,修改论文。

刘保林:协助研究,修改论文。



## 参考文献:

- [1] 彭芳乐, 乔永康, 程光华, 等. 我国城市地下空间规划现状、问题与对策[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 57.  
PENG Fangle, QIAO Yongkang, CHENG Guanghua, *et al.* Current situation and existing problems of and coping strategies for urban underground space planning in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 57.
- [2] 王洋, 彭芳乐. 地下空间社会与环境效益的定量评价模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 659.  
WANG Yang, PENG Fangle. A quantitative evaluation model of social and environmental benefit for urban underground space [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(4): 659.
- [3] 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.  
PENG Jian, LIU Kun, ZHENG Futao, *et al.* 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.
- [4] 江思义, 吴福, 刘庆超, 等. 岩溶地区建设用地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.  
JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, *et al.* Suitability evaluation of underground space development in Karst Area. An example from Guilin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 30(6): 84.
- [5] 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.  
HU Xuexiang, LIU Ganbin, TAO Haibing. Research on evaluation suitability for the development of underground space in Ningbo city based on ArcGIS [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1439.
- [6] 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.  
WANG Xia, HUANG Xianjin, ZHEN Feng, *et al.* Evaluation on development potential of urban underground space resource: multi-level grey approach [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(8): 1122.
- [7] 吴立新, 姜云, 车德福, 等. 城市地下空间资源质量模糊综合评估与3D可视化[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 6.  
WU Lixin, JIANG Yun, CHE Defu, *et al.* Fuzzy synthesis evaluation and 3D visualization for resource quality of urban underground space [J]. Journal of China University of Mining Technology, 2007, 36(1): 6.
- [8] 吴立新, 史文中, CHRISTOPHER G. 3D GIS与3D GMS中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 7.  
WU Lixin, SHI Wenzhong, CHRISTOPHER G. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS [J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(1): 7.
- [9] 瞿万波, 刘新荣, 梁宁慧. 重庆市一体化地下空间开发利用构想[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 4.  
QU Wanbo, LIU Xinrong, LIANG Ninghui. Consideration of incorporate underground space exploitation and utilization in Chongqing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 4.
- [10] 夏友, 马传明. 郑州市地下空间资源开发利用地质适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 493.  
XIA You, MA Chuanming. Geo-environmental suitability assessment of underground space resources exploitation and utilization in Zhengzhou city [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 493.
- [11] 蔡鹤生, 唐朝晖, 周爱国. 地质环境质量综合评价中的敏感因子模型[J]. 地质科技情报, 1998, 17(2): 5.  
CAI Hesheng, TANG Zhaohui, ZHOU Aiguo. Sensitive factor model of the synthetical evaluation on the quality of geo-environment [J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(2): 5.
- [12] 胥彝, 王华牢, 夏才初. 盾构隧道结构病害状态综合评价方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 201.  
XU Ben, WANG Hualao, XIA Caichu. Study on comprehensive evaluation of shield tunnel structural deflections [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 201.
- [13] BUCKLEY J J, HAYASHI Y, CZOGALA E. On the equivalence of neural nets and fuzzy expert systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 53(2): 129.
- [14] 李德清, 李洪兴. 变权决策中变权效果分析与状态变权向量的确定[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 5.  
LI Deqing, LI Hongxing. Analysis of variable weights effect and selection of appropriate state variable weights vector in decision making [J]. Control and Decision, 2004, 19(11): 5.
- [15] LIH X. Fuzzy decision making based on variable weights [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2004, 39(2/3): 163.