

闽江口地区地下空间开发利用适宜性评价

唐勇^{1,2}

(1. 福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350025;
2. 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福建 福州 350025)

摘要: 为了综合评价闽江口地区地下空间开发的适宜性,在调查闽江口地区地下空间开发利用现状的基础上,采用模糊层次分析法建立综合评价模型,以局部小尺度区域为例验证该评价模型的有效性,并以此模型评价闽江口地区在0~10 m深度范围内,地下空间开发的适宜性.结果表明:在闽江口地区总面积1 587 km²中,适宜进行地下空间开发的面积约为566 km².

关键词: 地下空间;地质环境;适宜性;评价模型;模糊层次分析法;闽江口地区

中图分类号: TU 470(257)

文献标志码: A

随着城镇化进程的加快,土地资源和既有规划的限制,拥堵成为城镇化的主要问题之一.土地资源的立体开发利用即地下空间开发,是解决拥堵问题的一个行之有效的方法.然而,地下空间资源有限,其开发利用除了与公共需求相关,更重要的是地质环境,地质环境决定了其开发利用的范围与合理形式.因此,开展地下空间开发利用的适宜性评价十分必要.国外关于地下空间开发利用的研究起步较早,主要集中在地下空间开发与地质环境的关系上. Ronka 等^[1]研究了地下空间开发的有利地质环境; Cano-Hurtado 等^[2]研究了城市公共地下空间的可持续发展策略; Umnov 等^[3]研究了地下空间开发的地质环境评估方法.目前,天津^[4]、北京^[5]、南宁^[6]、南京、上海等很多城市已经对地下空间的开发利用进行了适宜性评价.闽江口地区地下空间开发利用主要集中在福州主城区,而在长乐、闽侯、马尾等地区相对较少.经统计,福州市中心城区现状地下空间建设总量约1 200万 m².福州市中心城区现状地下空间建设有着总量大、功能较单一、分布密、地下空间相互独立等^[7]特征.本文针对闽江口地区特殊的地质环境条件特点,建立与之相适应的评价模型,并对闽江口地区的地下空间开发适宜性进行了研究和评价.

1 闽江口地区地质环境

1.1 工程地质条件

闽江口地区枕鹭峰-戴云山脉,东濒东海,闽江自西北向东南流经中部.地势西高东低,呈层状下降,该地区以山地丘陵为主,平原面积较小,山区中多镶嵌小盆地.闽江口地区位于欧亚大陆板块的东南缘,在大地构造单元上分属于闽东火山断拗带和平潭-东山构造带,断裂构造十分发育,但无活动性断裂.

闽江口地区地层岩性,可分为岩类和土类两大类.岩类主要包括坚硬块状侵入岩类、坚硬块状火山岩类和半坚硬块状变质岩类.土类包括砾质土类、砂性土类、粘性土类和特殊性土类.

闽江口地区较典型的工程地质剖面图,如图1所示.图1中: h 为高程;1为坚硬侵入岩组;2为坚硬火山岩岩组;3为坚硬半坚硬火山岩岩组;4为残积土岩组;5为砾质土岩体;6为砂性土岩组;7为粘性土岩组;8为淤泥质土岩组;9为人工填土岩组;10为淤泥;11为淤泥质粘土;12为淤泥质砂;13为粘土;14为亚粘土;15为轻亚粘土;16为含砾亚粘土;17为细砂;18为中砂;19为泥质砂;20为泥质砂砾卵石;21为火山岩;22为侵入岩;23为全风化侵入岩;24为风化层与新鲜岩石界面;25为逆断层;26为正

收稿日期: 2015-04-09

通信作者: 唐勇(1982-),男,高级工程师,博士,主要从事岩土工程的研究. E-mail: tangyong8582@qq.com.

基金项目: 福建省科技重点资助项目(2012Y0101, 2014Y0101)

断层. 由图 1 可知:地层起伏大和地形分布空间差异大是闽江口地区地质条件的主要特征.

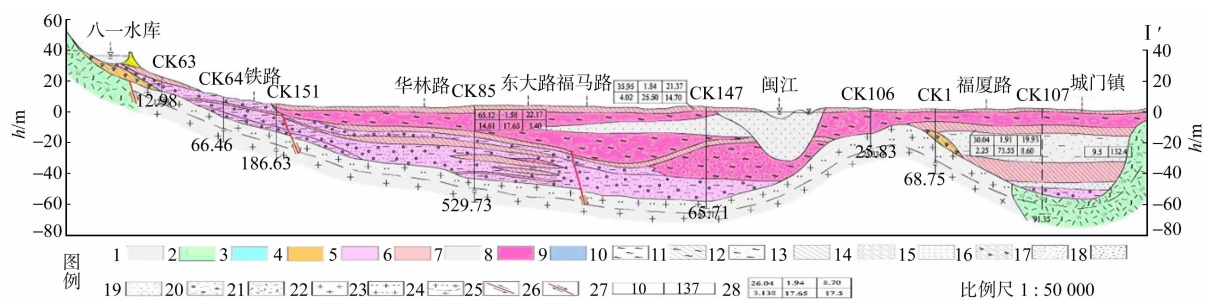


图 1 典型工程地质剖面图
Fig. 1 Typical geological section

1.2 水文地质条件

场区总体上呈现从盆地四周向盆地中心汇聚的向心状水系特征, 汇水中心偏向盆地南侧. 区内地下水除上部潜水外, 尚有承压水存在, 主要发育于龙海组冲洪积层, 厚度为 20~30 m, 以泥质砂砾卵石层为主. 此外, 一些断层破碎带和裂隙中也存在承压水, 但是一般埋藏较深.

1.3 主要工程地质问题

1.3.1 花岗岩残积土 闽江口地区大范围分布着花岗岩残积土. 花岗岩残积土是花岗岩经物理风化和化学风化后残留在原地的碎屑物. 其主要工程地质特征包括中偏低压缩性、软化性、易扰动性和崩解性. 其中, 软化性、易扰动性和崩解性是较突出的工程地质问题^[8].

1.3.2 软土 闽江口地区软土成因类型属溺谷相、海相沉积. 软土压缩模量低、抗剪强度较低、流变性、低渗透性等. 低压缩模量的土体在外荷作用下会产生较大的变形(较大的沉降或不均匀沉降). 抗剪强度较低容易导致边坡失稳. 流变性会导致较大的工后沉降, 且持续时间较长, 往往会长达十余年.

1.3.3 砂砾石层 闽江口地区因河流地质作用而广泛分布着砂、砾石层和卵石层, 是重要的含水层. 地下水会造成某些特殊土的强度降低. 由于福州主城区被闽江和乌龙江穿过, 特殊的水文地理环境导致两江周边地区含水层往往较厚, 且水量大, 给工程降水和止水提出了新要求. 此外, 抗浮施工的难度与费用也相应地提高.

2 评价模型

2.1 评价模型与方法

采用模糊层次分析法, 通过多级指标体系对整个闽江口地区的地质环境条件进行多层次评价; 由专家比较同一级指标在适宜性评价的重要性, 从而确定标度矩阵; 求解标度矩阵的特征值和特征向量, 并对特征向量进行归一化, 得到各个指标的权重. 该方法将人为主观性降到最低, 因此, 应用广泛^[9-11].

2.2 指标体系与评价标准

具有代表性和层次性的指标体系是合理评价结果的关键. 在详细分析既有勘察资料的基础上, 利用统计学方法归类, 把指标体系分为地质条件类、地下空间开发对周边环境的影响类、经济效益类 3 大类. 其中, 地质条件类(即工程地质条件)包括地形地貌、岩土体特征、水文地质条件和场地条件. 需要指出的是, 对于岩土体而言, 其主要评价标准应是抗剪强度指标, 但由于抗剪强度指标不便于量化比较, 参照同行做法, 采用承载力. 在此基础上, 结合专家意见, 确定了有代表性的地质条件指标和工程条件指标, 如表 1 所示.

评判集可采用 4~6 个等级, 文中采用 4 级(适宜, 较适宜, 较不适宜, 不适宜), 评价范围为 0~ -10 m, -10~ -30 m. 因此, 需要综合标准规范、地方法规和专家意见制定两套评价标准, 对这两个深度范围分别进行评价. 因篇幅限制, 文中仅介绍 0~ -10 m 深度范围的评价, 评价标准如表 2 所示.

评价标准由 3 种方法确定: 第一, 规范里有明确规定的(如地下水腐蚀性参照 GB 50021-2001《岩土工程勘察规范》(2009 年版)); 第二, 需结合地方经验的(如岩土体组合、地形地貌, 这种有地方特点的指标); 第三, 借助专家意见(如工程造价等).

表 1 指标体系表
Tab.1 Index system table

一级指标	二级指标	三级指标	一级指标	二级指标	三级指标
地形地貌	地物类型		地下空间 开发的 影响	地面沉降	
	地面坡度			管线	
岩土体特征	土体承载力			地热	
	岩体承载力			周边建筑	
	压缩系数			古迹	
	软土厚度		场地稳定性		区域沉降速率
	岩土体组合				地质构造
		孤石	场地条件		滑坡
	特殊工程地质问题	大差异软弱分界面 砂土液化		次生地质灾害	崩塌 洪水
水文地质条件	渗透性 高渗透性潜水含水层厚度 突涌稳定安全系数 坑底承压水与基坑底关系 地下水腐蚀性		单位面积 造价	支护工程造价 抗浮措施造价 地下水控制 地下结构	

表 2 评价标准表
Tab.2 Evaluation standard table

指标	适宜	较适宜	较不适宜	不适宜
地物类型	广场、绿地、无建筑空地	低矮建筑、厂房	中层建筑	立交桥、铁路、高层建筑、河流、生态林地
地面坡度	<10%	10%~20%	20%~30%	>30%
土体承载力	>250	150~250	100~150	<100
岩体承载力/kPa	800~2 000	600~800	350~600	<350 或>2 000
压缩模量/MPa	>30	10~30	5~10	<5
软土厚度/m	0	0~5	5~10	>10
岩土体组合	残坡积土、粘性土、岩层	粘性土夹砂层（卵石）、砂层	粘性土淤泥互层、淤泥质土	淤泥、淤泥夹砂卵石层
特殊工程地质问题	无	有可忽略问题	有需要处理问题	问题加多,规模大,需花大代价
渗透性/cm·s ⁻¹	<10 ⁻⁶	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁶	10 ⁻² ~10 ⁻⁴	>10 ⁻²
高渗透性潜水含水层厚度/m	0	0~3	3~6	>6
突涌稳定安全系数	>1.1	0.9~1.1	0.7~0.9	<0.7
地下水腐蚀性	微	弱	中	强
坑底承压水与基坑底关系	距离基坑底板>0.8 倍水头高度	距离基坑底板 0.6~0.8 倍水头高度	距离基坑底板 0.5~0.6 倍水头高度	距离基坑底板<0.6 倍水头高度
地面沉降/mm	0~40	40~80	80~120	>120
管线	无管线	有少量易改线管线	有大量难改线管线	有不可改线管线
地热	无地热	地热深度不在影响范围之内	地热深度在影响范围内	地热深度在开挖深度内
古迹	无影响	有轻微影响	影响中等	影响较大
周边建筑	无影响	有轻微影响	房屋开裂、倾斜	周边建筑功能失效
区域沉降速率/mm·a ⁻¹	<1	1~2	2~5	>5
地质构造	无活动断裂	有非全新活动断裂	有微弱全新活动断裂	有中、强全新活动断裂
崩塌滑坡	无滑坡	有少量小型滑坡	有大量中小型滑坡	有大型滑坡
洪水	无	有洪涝灾害,但场区无淹没	局部洪水淹没	大部洪水淹没
支护工程造价	专家打分,定性评价			
抗浮措施造价				
地下水控制				
地下结构造价				

2.3 隶属函数与权重的确定

根据各个指标体系对地下空间开发适宜性的影响规律确定隶属. 确定隶属函数的常用方法有 Del-

phi 法、概率统计法、三分法、相对比较法、对比平均法等^[12]. 文中采用的隶属函数模型主要为以下 3 种.

2.3.1 统计模型 针对难以定量计算的指标,如地表建筑,采用统计模型. 对于地表建筑,可分别统计各类建筑所占面积的百分比,以此作为该指标的隶属度. 需要指出的是,专家打分结果也采用统计模型计算其隶属度. 其表达式为

$$V_i = S_i / \sum_{j=1}^4 S_j. \tag{1}$$

式(1)中: V_i 为隶属度; S_i 为评判等级 i 所对应的统计结果.

文中地物类型指标是采用统计模型,以各等级地物类型的面积百分比作为评价向量.

2.3.2 0-1 模型 对于难以量化和统计的指标,采用 0-1 模型,如地层组合. 这类指标有严格的判断标准,符合某级标准,则该级的隶属度为 1,其余均为 0. 其中,岩土体组合、孤石、地下水腐蚀性等指标采用 0-1 模型.

2.3.3 梯形或半梯形模型 对于可量化模型,如岩土体承载力、地面沉降等,采用梯形或半梯形模型隶属度计算(指标越小越适宜情况,对于越大越适宜的指标则相反),即

$$V_1 = \begin{cases} 1 & x_i \leq u_1, \\ (u_2 - x_i)/(u_2 - u_1) & u_1 < x_i \leq u_2, \\ 0 & x_i > u_2, \end{cases} \tag{2}$$

$$V_2 = \begin{cases} 0 & x_i \leq u_1, \\ |(u_2 - x_i)/(u_2 - u_1)| & u_1 < x_i \leq u_2, \\ |(u_3 - x_i)/(u_3 - u_2)| & u_2 < x_i < u_3, \end{cases} \tag{3}$$

$$V_3 = \begin{cases} 0 & x_i \leq u_2, \\ |(u_2 - x_i)/(u_2 - u_1)| & u_2 < x_i \leq u_3, \\ |(u_3 - x_i)/(u_3 - u_2)| & u_3 < x_i < u_4, \end{cases} \tag{4}$$

$$V_4 = \begin{cases} 0 & x_i \leq u_3, \\ (u_2 - x_i)/(u_2 - u_1) & u_3 < x_i \leq u_4, \\ 1 & x_i > u_4. \end{cases} \tag{5}$$

式(2)~(5)中: V_1, V_2, V_3, V_4 均表示隶属度; u_1, u_2, u_3, u_4 为评价标准; x_i 为变量取值. 地面坡度、土体承载力等可量化指标采用梯形或半梯形模型.

合理的权重是安全评价模型的关键,常用的有专家经验法、调查统计法以及层次分析法. 其中,专家分析法和调查统计法易受人为主观因素影响;层次分析法因受人为主观因素影响相对较小而被广泛采用. 层次分析法通过将各评价因素两两比较判断每一因素的相对重要性,在层次结构内进行合成,以得到决策因素相对于目标的重要性总顺序,从而为决策提供判定依据的方法. 层次分析法标度矩阵的确定方法参见文献[6]. 经过比较得出各级指标的标度矩阵 S ,即

$$\begin{aligned} S_A &= \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}, & S_B &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1/2 & 1/2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1/2 & 1/2 & 2 \\ 2 & 3 & 2 & 1 & 1 & 3 \\ 2 & 3 & 2 & 1 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, & S_C &= \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \\ S_D &= \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, & S_E &= \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}, & S &= \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 3 & 1/3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1/5 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1/5 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1/5 & 1 \\ 3 & 5 & 5 & 5 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & 3 & 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

工程造价指标的各二级指标按同等重要考虑. 由此,确定的权重分别为

$$\begin{aligned}r_A &= (0.67, 0.33), & r_B &= (0.15, 0.08, 0.15, 0.27, 0.27, 0.08), \\r_C &= (0.14, 0.43, 0.43), & r_D &= (0.08, 0.20, 0.52, 0.20), \\r_E &= (0.12, 0.21, 0.38, 0.21, 0.07), & r_F &= (0.25, 0.25, 0.25, 0.25), \\R &= (0.20, 0.08, 0.08, 0.08, 0.20, 0.36).\end{aligned}$$

3 评价步骤与结果

3.1 模型验证

为了验证该模型的有效性,选取了福州八一七路南街地下空间作为评价对象.南街地下空间改造工程位于福州市鼓楼区八一七路南门兜-东街口地铁区间段,南起南门兜地铁站,北至东街口地铁站.因篇幅有限,其基本地质资料参见《福州市八一七路南街地下空间改造工程岩土工程勘察报告》.

经模型计算得到该地区的评判向量为(0.26,0.30,0.28,0.16),该区域在 0~−10m 深度范围内是较适宜进行地下空间开发的.由于地铁沿线的地下空间开发均经过全方位评估,评价结果与相关部门的评价结果基本一致,故该模型为有效的.

3.2 评价过程与结果

根据勘探钻孔布置间距,合理确定网格划分,确保每个网格至少包含一个勘探钻孔^[13],最终确定网格大小为 2 km×2 km,共计 440 个网格.在此基础上,按照评价标准对每个网格进行数据收集与评价.并将评价结果作为 1 个字段,录入 GIS 系统并绘制云图.为了更直观地反应结果,分别对工程地质条件、水文地质条件和适宜性的评价结果进行了统计.工程地质条件与水文地质条件的适宜性评价结果,如图 2 所示.0~−10m 范围的地下空间开发适宜性评价结果,如图 3 所示.

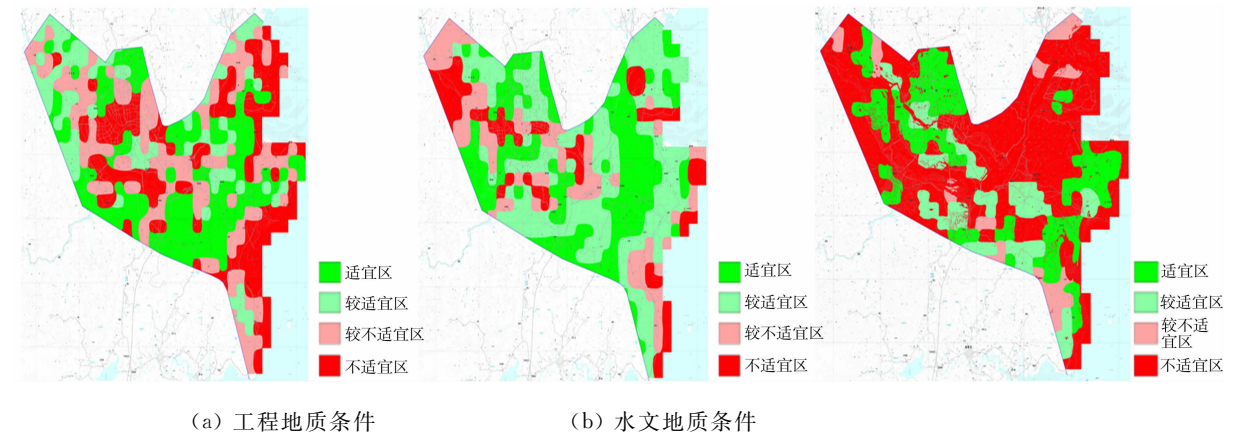


图 2 工程地质条件与水文地质条件的适宜性评价结果

Fig.2 Suitability evaluation result of engineering geological conditions and hydrogeology conditions

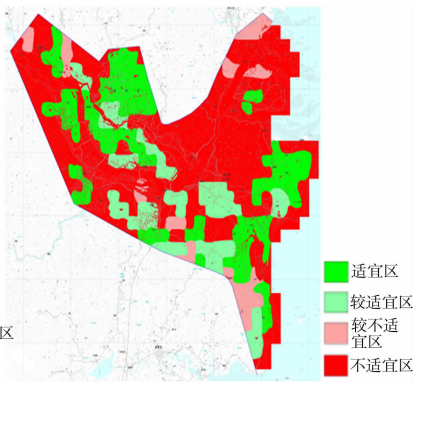


图 3 地下空间开发适宜性评价

Fig.3 Suitability evaluation result of underground space development

由图 2,3 中可知:1) 适宜范围相对较广,福州主城区大部分地区是适宜的,包括鼓楼区、晋安区、台江区、仓山区,除个别地方地表水较丰富,或者存在古迹等不适宜外,都为适宜或较适宜;2) 主城区以外适宜开发地下空间的区域也相对集中,大学城大部区域、甘蔗镇一带、南屿镇、尚干镇等,除此以外,长乐市及沿海也有大片区域适宜进行地下空间开发;3) 不适宜地区主要集中在福州盆地周边,闽江沿线,及长乐市的部分区域.这部分地区要么地势起伏较大,要么存在生态保护区,要么地表水发育,要么工程地质条件较差.

利用 GIS 软件对适宜作为地下空间的区域进行了统计,闽江口地区 0~−10 m 深度范围内可进行地下空间开发的总面积为 566 km²(总面积为 1 587 km²).由此可见,目前闽江口地区地下空间的开发利用率并不高,基本集中在主城区.

4 结束语

在分析大量地质资料的基础之上,通过统计学的方法提取部分有效参数,利用模糊层次分析法,对

福州盆地内地下空间开发适宜性进行评价。从评价结果的分布规律可以看出:在 0~—10 m 深度范围内,福州盆地内大部分地区是适宜进行地下空间开发的,尤其是中心城区,除个别高层建筑比较密集、地下空间开发利用已经较高的地区,如鼓楼区;不适宜的地区主要是靠近山地、河流的地区。经统计,相对适宜进行地下空间开发的地区面积为 566 km²。需要指出的是,文中评价的结果是相对的,仅仅是从地质环境和技术经济的角度出发所得到的结论。从纯技术的角度讲,是没有不可逾越的障碍的,只是代价更大,风险更大。

参考文献:

[1] RONKA K,RITOLA J,RAUHALA K. Underground space in land-use planning[J]. Tunnelling Underground Space Technol,1998,13(1):39-49.

[2] CANO-HURTADO J J,CANTO-PERELLO J. Sustainable development of urban underground space for utilities [J]. Tunnelling Underground Space Technol,1995,14(3):335-340.

[3] UMNOV V A,RUDYAK M. S,KALININ A R. Methodical approaches to cost evaluation of underground space[J]. Gornyi Zhurnal,2003(4/5):23-26.

[4] 齐波,张一飞. 天津市中心城区地下空间资源开发利用适宜性评价探讨[J]. 城市地质,2010,5(2):25-29.

[5] 王法,张亚芹,王军辉,等. 北京市中心城基坑工程地质条件适宜性评价方法研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(增刊 1):739-743.

[6] 欧孝夺,杨荣才,周东,等. AHP 法在南宁市地下空间开发地质环境适宜性评价中的应用[J]. 桂林工学院学报, 2009,29(2):474-480.

[7] 广州市城市规划勘测设计研究院,福州市规划设计研究院. 福州市中心城区地下空间利用专项规划[M]. 福州:福州市城乡规划局,2013:10-15.

[8] 简文彬,李润. 福州轨道交通建设中的岩土工程问题[J]. 工程地质学报,2010,18(5):748-752.

[9] 王燕青,张秀燕. 基于模糊层次分析法的民用机场安全风险管理[J]. 中古安全科学学报,2008,18(6):116-120.

[10] 浦传金,苏华友,肖正学,等. 模糊层次分析法在地基处理方案优选中的应用[J]. 西南科技大学学报:自然科学版, 2005,20(1):15-19.

[11] 田林钢,靳聪聪,巴超. 改进的模糊层次分析法在海堤工程安全评价中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2013,46 (3):317-321.

[12] 肖盛燮,王平义,吕恩琳. 模糊数学在土木与水利工程中的应用[M]. 北京:人民交通出版社,2004:22-24.

[13] 周国华,郑志强,柳文广,等. 闽江口地区地质环境调查[R]. 福州:福建省地质调查研究院,2014.

Suitability Evaluation of Underground Space Development
in Minjiang Estuary Area

TANG Yong^{1,2}

(1. Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350025, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou 350025, China)

Abstract: Based on the survey of present exploitation in the underground space development of Minjiang estuary area, the underground space development suitability of Minjiang estuary area was evaluated comprehensively. The comprehensive evaluation model was established by the fuzzy analytic hierarchy process (AHP). Taking a small scale part of area as an example, the effectiveness of the model was verified, then the underground space development suitability in Minjiang estuary area was evaluated by this model in the depth of 0 to —10 m. The results indicate that the area appropriate for underground space development is about 566 km² in the total Minjiang estuary area of 1 587 km².

Keywords: underground space; geological environment; suitability; evaluation model; fuzzy analytic hierarchy process; Minjiang estuary area