

文章编号: 1000-1964(2007)01-0097-06

城市地下空间资源质量模糊综合评估与 3D 可视化

吴立新^{1,2}, 姜 云^{1,3}, 车德福^{1,2}, 祝文君⁴

(1. 中国矿业大学 3S 与沉陷工程研究所, 北京 100083;

2. 东北大学 3S 与数字矿山研究所, 辽宁 沈阳 110004;

3. 黑龙江科技学院 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027; 4. 清华大学 土木系, 北京 100083)

摘要:采用模糊综合评估方法,构造了地下空间资源质量评估指标的隶属函数,并确定了隶属度,建立了权重向量与模糊关系矩阵复合运算的模糊综合评估模型.同时提出了基于 Grid + Voxel 的评估基本单元体空间划分方法.并以北京 CBD 为例,采用模糊评估模型和基本单元体划分方法,在 GeoMo^{3D} 系统中进行了地下空间资源质量评估,得到了 3D 可视化评估结果.结果表明:模糊综合评估和基于 Grid + Voxel 的基本单元体空间划分能够合理表征地下空间资源质量,是城市地下空间资源质量评估及其 3D 可视化的一种有效的新方法.

关键词:地下空间;资源质量;模糊综合评估;3D 可视化;Voxel;数字城市

中图分类号: TU 91 **文献标识码:** A

Fuzzy Synthesis Evaluation and 3D Visualization for Resource Quality of Urban Underground Space

WU Li-xin^{1,2}, JIANG Yun^{1,3}, CHE De-fu^{1,2}, ZHU Wen-jun⁴

(1. Research Institute of RS/ GPS/ GIS & Subsidence Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of RS/ GPS/ GIS & Digital Mine, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China; 3. School of Architectural Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology; Harbin, Heilongjiang 150027, China; 4. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on fuzzy synthesis evaluation, the membership function of each index for underground space resource quality evaluation was constructed, and the degree of membership was determined. A fuzzy evaluation model for compound calculation between weighted vectors and fuzzy relation matrix was established. Meantime, the spatial division method of Grid + Voxel-based evaluation cell cube was also put forward. Taking the central business district (CBD) of Beijing as an application case, the underground space resource quality was evaluated based on the model of fuzzy synthesis evaluation and the method of cell cube division, and a group of three-dimensional visualization evaluation results were obtained. The results show that fuzzy synthesis evaluation and Grid + Voxel-based cell cube division are reasonable, and is a new effective method for the evaluation and 3D visualization of underground space resource quality.

收稿日期: 2006-01-12

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(4041005); 国家杰出青年基金项目(50525414); 国家自然科学基金项目(40571137); 教育部“高校青年教师奖”专项基金联合项目

作者简介: 吴立新(1966-),男,江西省宜春市人,长江学者特聘教授,博士生导师,从事数字矿山理论与关键技术、三维 GIS 与地学建模、遥感-岩石力学、遥感应用、矿山开采沉陷与控制等方面的研究.

E-mail: awulixin@263.net Tel: 010-62331012

Key words: underground space; resource quality; fuzzy synthesis evaluation; 3D visualization; Voxel; digital city

地下空间是城市发展的重要自然资源. 城市发展空间由地面及其上部空间向地下延伸, 是世界城市发展的必然趋势, “向地下要土地、要空间已成为城市历史发展的必然”^[1-3]. 目前在很大程度上, 人类对地下空间资源的开发与利用一直处于盲目开发和碎片式开发阶段, 造成地下空间资源浪费、不合理布局以及资源开发时序混乱等问题. 合理规划与布局城市地下空间, 对保护后备资源, 促进城市可持续地开发利用地下空间资源具有重要意义. 地下空间资源质量评估及其 3D 可视化不但可以揭示地下空间可开发利用的程度和潜力, 而且有利于科学地引导地下空间开发利用, 是适度、合理、科学地开发利用地下空间资源的基础, 也是城市地下空间开发利用的依据.

目前, 国内外有关地下空间资源质量评估的研究存在两方面问题^[4-9]: 1) 现有的定性分析及因子分析方法因人为划分质量等级, 不能很好地解决城市地下空间资源质量评估的模糊性和不确定性问题; 2) 多以 2D 平面为研究分析单元, 不能准确、细致的描述地下空间资源质量的 3D 空间信息.

本文基于 AHP 研究地下空间资源质量评估指标体系, 采用模糊综合评估确定地下空间资源质量, 并基于 Grid + Voxel 划分评估基本单元体, 在 GeoMo^{3D} 中进行建模、评估与可视化.

1 评估指标体系

城市地下空间资源质量是指在一定的技术条件下, 城市地下空间可开发利用的难易程度或潜力. 城市地下空间资源质量是一个受多种因素综合影响的系统结果, 经分析比较认为: 其主要影响因素有工程地质条件、水文地质条件、岩土体条件、地

上与地下空间条件 4 个方面(注: 这里的工程地质条件不含岩土体条件).

地下介质包括岩石和土两种类型. 以地下空间资源质量为目标层(A), 选取城市地下空间资源质量的主要影响因素为准则层(B), 将各因素中的若干影响因子作为指标层(X), 基于层次分析法(AHP)^[10-12]构建了城市地下空间资源质量的层次结构模型, 并研究确定了各层次影响因素的重要性, 形成因素论域 $U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_{13})$, 见表 1.

表 1 地下空间资源质量的层次结构及指标重要性

Table 1 A hierarchical structure and the weight of each index for urban underground space resource quality		
目标层(A)	准则层(B)	指标层(X)
地下空间资源质量	工程地质条件 (0.282)	活断层及地裂缝 u_1 (0.460)
		滑坡等 u_2 (0.221)
		地震烈度 u_3 (0.319)
	水文地质条件 (0.227)	地下水赋存类型 u_4 (0.324)
		地下水补给 u_5 (0.275)
		渗透系数 u_6 (0.234)
		地下水的腐蚀性 u_7 (0.167)
	岩土体条件 (0.165)	黏聚力 u_8 (0.250)
		内摩擦角 u_9 (0.250)
		分层承载力标准值 u_{10} (0.250)
		压缩模量 u_{11} (0.250)
	地上下空间条件 (0.326)	地面空间类型 u_{12} (0.600)
		已有地下空间的影响 u_{13} (0.400)

2 模糊综合评估模型

2.1 评判论域

评判论域是由评估等级构成的集合, 将城市地下空间资源质量分为 5 级, 即评判论域为 $V = (, , , ,) = (\text{很好}, \text{好}, \text{一般}, \text{差}, \text{很差})$. 依据《岩土工程勘察规范》(GB50007-2002)、工程实践经验及模糊综合评估理论^[13-14]确定的地下空间资源质量各指标等级标准见表 2.

表 2 地下空间资源质量各指标等级标准

Table 2 Grade standard of each index for underground space resource quality					
指 标	等 级				
	(很好)	(好)	(一般)	(差)	(很差)
活断层与地裂缝的影响	无	小	一般	大	很大
区域地质灾害(滑坡等)	无	很少发生	有时发生	常发生	频繁发生
地震烈度(度)	<3	6	7	8	>9
受影响的地下水赋存类型	上层滞水	潜水	上层滞水 + 潜水	承压水	潜水 + 承压水
地下水补给	补给很少	补给较少	补给一般	补给较多	补给充足
渗透系数/(m·d ⁻¹)	<0.001	0.01	0.1	1	>10
地下水的腐蚀性	无	弱	一般	强	很强
黏聚力/kPa	>50	40	30	20	<10
内摩擦角/(°)	>40	35	30	20	<10
承载力标准值/kPa	>300	250	200	150	<100
压缩模量/MPa	>20	16	12	8	<4
地面空间类型	绿地或广场	道路	可拆建建筑物	一般建筑物	保护或重要建筑物
受已开发地下空间的影响	无	较小	一般	较大	及河湖水域等 很大

2.2 隶属函数与隶属度

由表 1 可知,指标体系中包括定量指标和定性指标,而定量指标又包括正指标和逆指标.定量正指标意味着指标值越大,地下空间资源质量越好,如黏聚力、内摩擦角、承载力标准值及压缩模量;定量负指标则意味着指标值越大,地下空间资源质量越差,如地震烈度、渗透系数;定性指标是指指标值与地下空间资源质量等级是定性的关联,如活断层与地裂缝的影响、地面空间类型等.对于定量正指标,依据评判论域,采用如下梯形隶属函数,可构造黏聚力、内摩擦角、承载力标准值及压缩模量 4 个评估指标.

$$r_1(x)=\begin{cases}1 & (x \leq b_1), \\ (x-b_2)/(b_1-b_2) & (b_2 < x < b_1), \\ 0 & (x \geq b_2); \end{cases}$$

$$r_2(x)=\begin{cases}(x-b_3)/(b_2-b_3) & (b_3 < x < b_2), \\ (b_1-x)/(b_1-b_2) & (b_2 < x < b_1), \\ 0 & (x > b_1, x \geq b_3); \end{cases}$$
$$r_3(x)=\begin{cases}(x-b_4)/(b_3-b_4) & (b_4 < x < b_3), \\ (b_2-x)/(b_2-b_3) & (b_3 < x < b_2), \\ 0 & (x > b_2, x \geq b_4); \end{cases}$$
$$r_4(x)=\begin{cases}(x-b_5)/(b_4-b_5) & (b_5 < x < b_4), \\ (b_3-x)/(b_3-b_4) & (b_4 < x < b_3), \\ 0 & (x > b_3, x \geq b_5); \end{cases}$$
$$r_5(x)=\begin{cases}0 & (x \leq b_4), \\ (b_4-x)/(b_4-b_5) & (b_5 < x < b_4), \\ 1 & (x \geq b_5). \end{cases}$$

4 个评估指标相对于 5 个地下空间资源质量等级的隶属度见表 3.

表 3 黏聚力、内摩擦角、承载力标准值、压缩模量的隶属度

Table 3 Membership degree of cohesive strength, internal friction angle, bearing capacity, and compression modulus			
评估指标	隶属度	评估指标	隶属度
黏聚力 u_8 / kPa	50 (1,0,0,0,0)	承载力标准值 u_{10} / kPa	300 (1,0,0,0,0)
	40~50 ((u_8-40)/10,(50- u_8)/10,0,0,0)		250~300 (($u_{10}-250$)/50,(300- u_{10})/50,0,0,0)
	30~40 (0,(u_8-30)/10,(40- u_8)/10,0,0)		200~250 (0,($u_{10}-200$)/50,(250- u_{10})/50,0,0)
	20~30 (0,0,(u_8-20)/10,(30- u_8)/10,0)		150~200 (0,0,($u_{10}-150$)/50,(200- u_{10})/50,0)
	10~20 ((u_8-10)/10,(20- u_8)/10,0,0,0)		100~150 (0,0,0,($u_{10}-100$)/50,(150- u_{10})/50)
内摩擦角 u_9 / (°)	10 (0,0,0,0,1)	压缩模量 u_{11} / MPa	100 (0,0,0,0,1)
	40 (1,0,0,0,0)		20 (1,0,0,0,0)
	35~40 ((u_9-35)/5,(40- u_9)/5,0,0,0)		16~20 (($u_{11}-16$)/4,(20- u_{11})/4,0,0,0)
	30~35 (0,(u_9-30)/5,(35- u_9)/5,0,0)		12~16 (0,($u_{11}-12$)/4,(16- u_{11})/4,0,0)
	20~30 (0,0,(u_9-20)/10,(30- u_9)/10,0)		8~12 (0,0,($u_{11}-8$)/4,(12- u_{11})/4,0)
	10~20 (0,0,0,(u_9-10)/10,(20- u_9)/10)		4~8 (0,0,0,($u_{11}-4$)/4,(8- u_{11})/4)
	10 (0,0,0,0,1)		4 (0,0,0,0,1)

对于定量逆指标,依据评判论域,采用如下梯形隶属函数可构造地震烈度和渗透系数 2 个评估指标相对于 5 个地下空间资源质量等级的隶属度,见表 4.

$$r_1(x)=\begin{cases}1 & (x \leq b_1), \\ (b_2-x)/(b_2-b_1) & (b_1 < x < b_2), \\ 0 & (x \geq b_2); \end{cases}$$
$$r_2(x)=\begin{cases}(b_3-x)/(b_3-b_2) & (b_2 < x < b_3), \\ (x-b_1)/(b_2-b_1) & (b_1 < x < b_2), \\ 0 & (x \geq b_3, x < b_1); \end{cases}$$

$$r_3(x)=\begin{cases}(b_4-x)/(b_4-b_3) & (b_3 < x < b_4), \\ (x-b_2)/(b_3-b_2) & (b_2 < x < b_3), \\ 0 & (x \geq b_4, x < b_2); \end{cases}$$
$$r_4(x)=\begin{cases}(b_5-x)/(b_5-b_4) & (b_4 < x < b_5), \\ (x-b_3)/(b_4-b_3) & (b_3 < x < b_4), \\ 0 & (x \geq b_5, x < b_3); \end{cases}$$
$$r_5(x)=\begin{cases}0 & (x \leq b_4), \\ (x-b_4)/(b_5-b_4) & (b_4 < x < b_5), \\ 1 & (x \geq b_5). \end{cases}$$

对于定性指标,依据专家的经验 and 知识确定隶属度,见表 5.

表 4 地震烈度和渗透系数的隶属度

Table 4 Membership degree of earthquake intensity and permeability coefficient			
评估指标	隶属度	评估指标	隶属度
地震烈度 u_3	3 (1,0,0,0,0)	渗透系数 u_6	0.001 (1,0,0,0,0)
	3~6 ((6- u_3)/3,(u_3-5)/3,0,0,0)		0.001~0.01 (1000(0.01- u_6)/9,1000($u_6-0.001$)/9,0,0,0)
	6~7 (0,(7- u_3),(u_3-6),0,0)		0.01~0.1 (0,100(0.1- u_6)/9,100($u_6-0.01$)/9,0,0)
	7~8 (0,0,(8- u_3),(u_3-7),0)		0.1~1 (0,0,10(1- u_6)/9,10($u_6-0.1$)/9,0)
	8~9 (0,0,0,(9- u_3),(u_3-8))		1~10 (0,0,0,(10- u_6)/9,(u_6-1)/9)
	9 (0,0,0,0,1)		10 (0,0,0,0,1)

表 5 定性指标隶属度
Table 5 Membership degree of qualitative index

指标分类	隶属度	指标分类	隶属度
	(0.8,0.2,0,0,0)		(0,0,0,0.8,0.2)
	(0.2,0.8,0,0,0)		(0,0,0,0.2,0.8)
	(0,0.1,0.8,0.1,0)		

2.3 评估模型

2.3.1 单因素模糊评估模型

由于各评估指标对地下空间资源质量各单因素(如工程地质条件等)的影响程度不一定相等,因而需对各指标加权. 地下空间资源质量各单因素的评估模型为

$$B = A \circ R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} & r_{n5} \end{bmatrix},$$

式中 r_{ij} 为第 i 个评估指标在第 j 等级上的隶属度, 且选取的模糊算子为 $M(^{\circ}, +)$, 即

$$b_j = \bigvee_{i=1}^n a_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, 5).$$

各单因素的模糊综合评判集为

$$B = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5).$$

依据最大隶属原则, 可得单因素评估结果, 即

$$b_{\max} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5).$$

2.3.2 二级模糊综合评估模型

依据 4 个单因素对地下空间资源质量影响的重要性不同, 可得到第二级综合评估模型

$$C = A \circ B = A \circ \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = A \circ (b_{ij})_{5 \times m},$$

式中: A 为单因素权重向量; B 为单因素模糊综合评判集.

3 评估基本单元体的划分

评估基本单元体是指按一定的规则对地下空间进行几何划分而得到的一种 3D 空间单元体, 该单元体是城市地下空间资源质量评估中近似均质的空间单元体. 地下空间资源质量是通过基本单元体状况及其组合特征来表征的. 根据 GIS 与三维

地学模拟系统(3D GMS)中关于空间网格划分的基本原理^[15-16], 分析认为基于 Grid + Voxel 的划分方法适合于进行城市地下空间资源质量评估基本单元体的空间划分.

针对待评估区域所在的地理位置, 选择区域地理坐标 Grid, 将评估区域包络盒的某一 Grid 点作为坐标原点. 如图 1a 所示, 研究区 A 分布于 6 个标准 Grid 单元内, 区域 B 是其包络矩形, 点 O 可定义为其坐标原点. 将区域地理坐标系中的 X, Y 轴方向分作为评估区域的 X, Y 轴方向, 并以评估区的深度方向作为 Z 轴方向. 进而以一组规则尺寸 a, b, c 沿 X, Y, Z 轴剖分所要评估的 3D 空间区域, 一方面将待评估区域的地面部分进行 Grid 细分, 二方面将评估区域的 3D 空间分割成规则的 3D 立方网格, 即 Voxel, 见图 1b, 每个 Voxel 体即为城市地下空间资源质量评估基本单元体.

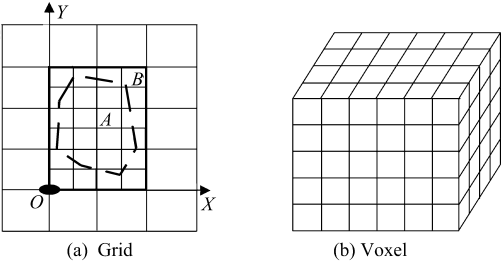


图 1 评估基本单元体 Grid + Voxel
Fig. 1 Grid + Voxel Cell for evaluation

4 实例研究

4.1 评估结果

选取北京市 CBD 地下空间资源质量评估的研究区, 地面范围为 3.76 km^2 , 地下深 50 m. 采用钻孔及地面遥感影像数据, 经提取分析处理后, 采用上述模型在 GeoMo^{3D}中进行 3D 空间建模、基本单元体划分及评估. 得到北京市 CBD 地下空间资源质量评估的基本单元体见图 2, 单因素评估结果和二级模糊综合评估结果分别见图 3、4.

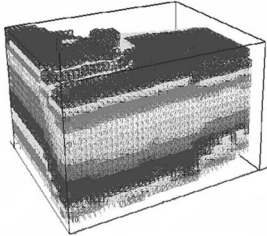


图 2 评估基本单元体 (40 m x 4 m x 2 m)
Fig. 2 Evaluation unit (40 m x 4 m x 2 m)

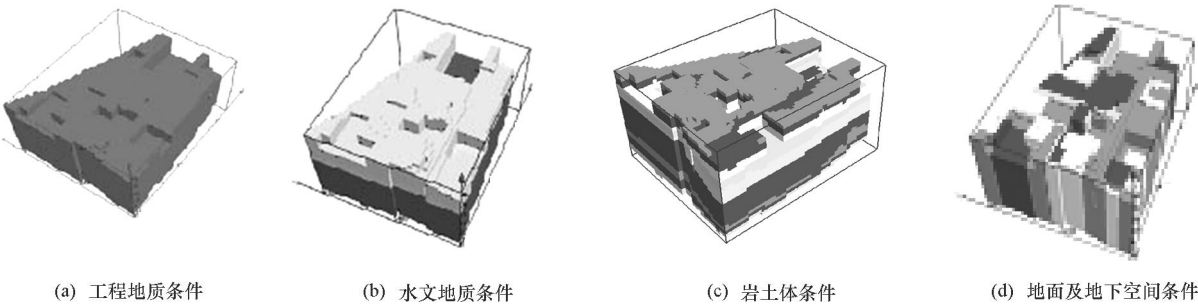


图 3 单因素评估结果
Fig. 3 Evaluation results of single factor

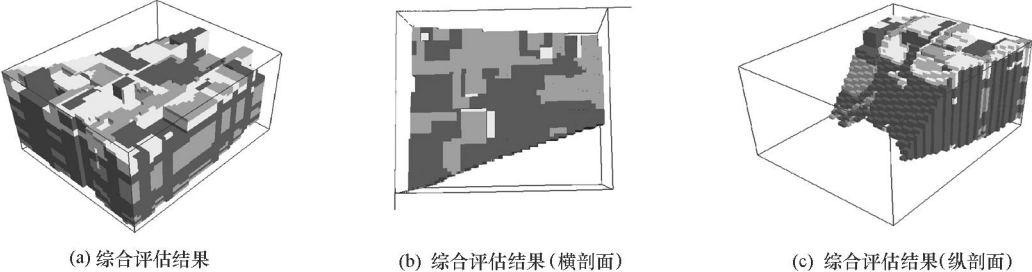


图 4 综合评估结果
Fig. 4 Result for synthetic evaluation

4.2 评估结果分析

1) 单因素评估结果

评估结果表明:北京市 CBD 地下空间资源质量的工程地质条件均为中等,水文地质条件在深度方向呈现 3 层分异,岩土体条件主要表现在深度方向呈现九层分异,地面及地下空间条件在横向和纵向均表现出分异性,并以横向为主,呈现 5 个等级.

2) 综合评估结果

综合评估结果统计见表 6. 由表 6 可知:北京市 CBD 地下空间资源质量出现了 3 个质量等级,分别为 级、 级和 级,所占体积分别为 10.80 % ,67.88 %和 21.32 %.

表 6 综合评估结果

Table 6 Comprehensive evaluation result		
评估等级	体积/ m ³	体积百分比/ %
	19 165 637.60	10.80
	120 459 581.51	67.88
	37 834 388.30	21.32

5 结 论

城市地下空间资源质量模糊综合评估方法首先是要通过隶属函数确定各评估指标相对于各质量等级的隶属度,再依据最大隶属原则、通过模糊算子运算确定质量等级.模糊综合评估方法克服了质量等级的人为划分问题,是解决城市地下空间资源质量评估这一模糊性和不确定性问题的有效方法.研究表明,基本单元体 Voxel 可以作为城市地下空间资源质量评估的基本单元,基于 Voxel 的空间划分有利于实现评估结果的 3D 可视化.

参考文献:

[1] ROBERTS D V. Sustainable development and the use of underground space [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11 (4) : 383-390.

[2] 吴立新,姜 云,梁 越,等.城市地下空间开发利用容量评估的基础研究[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20 (4) : 44-47.

WU Li-xin, JIANG Yun, LIANG Yue, et al. Fundamental research on capacity assessment of development and utilization of urban underground space[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20 (4) : 44-47.

[3] 童林旭. 我国城市地下空间发展的新阶段[J]. 城市发展研究, 2002, 9 (1) : 18-21.

TONG Lin-xu. A new phase of underground space development in China[J]. City Underground Space Developing Strategy, 2002, 9 (1) : 18-21.

[4] 何满潮. 深部工程的概念体系和评估指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (16) : 2854-2858.

HE Man-chao. Conception system and evaluation in indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (16) : 2854-2858.

[5] 童林旭. 地下空间与未来城市[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1 (3) : 323-328.

TONG Lin-xu. Underground space and future city [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 (3) : 323-328.

[6] JAAKKO Y. Spatial planning in subsurface architec-

- ture[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1989, 4(1): 5-9.
- [7] EDELENBOS J, MONNIKHOF R, HAASNOOT J, et al. Strategic study on the utilization of underground space in the netherlands[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(2): 159-165.
- [8] ZHAO J, LEE K W. Construction and utilization of rock caverns in singapore part C: Planning and location selection[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(10): 81-84.
- [9] 黄玉田, 张钦喜, 孙加乐. 北京市中心区地下空间资源评估探讨[J]. 北京工业大学学报, 1995, 21(2): 93-99.
- HUANG Yu-tian, ZHANG Qin-xi, SUN Jia-le. The evaluation of the resource of the underground space of downtown Beijing[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1995, 21(2): 93-99.
- [10] SRDJEVIC B. Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis[J]. Computers & Operations Research, 2005, 32(7): 1897-1919.
- [11] 李晓静, 朱维申, 陈卫忠, 等. 层次分析法确定影响地下洞室围岩稳定性各因素的权值[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊): 4731-4734.
- LI Xiao-jing, ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong, et al. Determining weight of factors in stability analysis of underground caverns by analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.): 4731-4734.
- [12] SATOH Y. An evaluation of judgment scale in the analytic hierarchy process[J]. Journal of The Operations Research Society of Japan, 1999, 42(1): 59-77.
- [13] 陈志坚, 朱代洪, 张雄文. 围岩质量综合评判模型和大坝建基面优选模型的建立[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 88-91.
- CHEN Zhi-jian, ZHU Dai-hong, ZHANG Xiong-wen. Development of adjoining rock quality comprehensive evaluation model and dam foundation building surface optimal model[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2002, 30(4): 88-91.
- [14] 许传华, 任青文. 地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1852-1855.
- XU Chuan-hua, REN Qing-wen. Fuzzy-synthetical evaluation on stability of surroundings rockmasses of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1852-1855.
- [15] 李德仁, 邵振峰, 朱欣焰. 论空间信息多级格网及其典型应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(11): 945-950.
- LI De-ren, SHAO Zhen-feng, ZHU Xin-yan. Spatial information multi-grid and its typical application[J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(11): 945-950.
- [16] 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): 5-11.
- WU Li-xin, SHI Wen-zhong, CHRISTOPHER G. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS[J]. Geography and Territorial Research, 2003, 19(1): 5-11.

(责任编辑 邓 群)