

# 沈阳地下空间开发的霍尔三维研究\*

齐锡晶<sup>1</sup>, 韩新刚<sup>1</sup>, 邓李杰<sup>2</sup>

(1.东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819; 2.沈阳工程学院, 沈阳 110163)

**摘要:**基于城市地下空间的概念,梳理了城市地下空间开发的利弊、制约因素。以沈阳市为例,通过实地调研了解其城市地下空间开发现状,总结了其地下空间开发中所存在的问题;结合城市地下空间开发利用项目的特点,归纳了影响其开发与管理的因素,引入霍尔三维理论对城市地下空间开发项目的全寿命周期展开分析,并建立适用模型;邀请多位沈阳业内专家对模型变量就沈阳情况进行评分,将各因素在不同阶段对不同目标的影响进行量化,探寻特定阶段下对特定目标起主导作用的因素,为沈阳城市地下空间的合理开发与综合利用提供参考和依据;最后,论文从霍尔三维角度提出了优化沈阳城市地下空间开发的对策建议。

**关键词:**霍尔三维模型;城市地下空间;开发;管理;寿命周期

中图分类号:TU984

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)03-0573-06

## Hall Three-dimensional Research on Underground Space Development

Qi Xijing<sup>1</sup>, Han Xingang<sup>1</sup>, Deng Lijie<sup>2</sup>

(1.College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P.R.China; 2.Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110163, P.R.China)

**Abstract:** This paper is based on urban underground space conception, combing the pros and cons, restricting factors of urban underground space development. Then Shenyang is taken as a example, not only the status quo is found out through the field investigation and research, but also the problems of Shenyang are summarized. This paper combines with characteristics of underground space projects, and summarizes factors which affects the development and management of them. Hall three-dimensional theory is introduced in urban underground space development project life cycle analysis at this time, meanwhile a suitable model is established. And then variables in the model is rated according to the situation of Shenyang by industry experts, the impact of various factors at different stages for different target can be quantified. So it's very clear that which factors play a leading role in each particular stage for each specific goal, these will provide the reference and basis for Shenyang urban underground space reasonably development and comprehensive utilization. Finally, the paper puts forward optimizing countermeasures and suggestions from the perspective of Hall three-dimensional for Shenyang urban underground space development.

**Keywords:** Hall three-dimensional model; urban underground space; development; management; life cycle

\* 收稿日期:2017-12-23(修改稿)

作者简介:齐锡晶(1963-),男,辽宁沈阳人,博士,教授,主要从工程管理、房地产和城市地下空间等领域的教学与科研工作。E-mail:qixijing63@163.com

通讯作者:韩新刚(1991-),男,河北邯郸人,硕士生,主要从事城市地下空间开发与利用研究工作。

E-mail:13644900561@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51204029)

## 0 引言

进入21世纪以来,国内各大城市都掀起了开发地下空间的浪潮,尤其是各城市地铁的大规模建设,将地下空间的开发带入了全新的时代,超大型地下综合体项目也纷纷在各大城市中心商业区落户。

然而,繁荣的景象并不能掩盖地下空间项目建设的高风险性。地下空间项目投资大,建设周期长,受地质条件影响大,工程复杂,目前又尚未出现一种系统有效的理论方法对影响其开发与管理的各类因素进行分析研究,因而导致其开发管理存在一定的盲目性。本文引入霍尔三维理论,对城市地下空间项目寿命周期内各阶段影响因素进行系统分析,以期有助于引导建设单位找到影响地下空间项目开发与管理中的关键因素,提高项目开发与管理效率,促进沈阳城市地下空间的合理有序开发。

## 1 沈阳城市地下空间及其开发利用

### 1.1 城市地下空间概念的界定

城市地下空间是指在城市地下岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的地下空间,具有恒湿性、隐蔽性、密蔽性和抗震性等特性。

城市地下空间作为城市的宝贵资源,开发容量和潜力巨大。开发利用城市地下空间,不仅可以提高城市土地利用价值,扩充城市中心区空间容量,缓解地面用地的不足,还可以减少对城郊及乡村土地的侵蚀,改善环境<sup>[1]</sup>。此外,打造立体化城市,还有助于引导城市空间科学布局、良性扩张和有序发展,提高城市行为的组织能力<sup>[2]</sup>,促进城市经济和社会的健康发展。

但就地下建筑本身而言,其逃生方向与大火蔓延方向一致,其隐蔽和密闭特性又加大了救灾难度,从而增加了其火灾与其他灾害控制和预防方面的成本;其次,地下空间中自然光难以进入,空气不易流通,给人以阴暗、潮湿的感觉,导致了人们长期以来对地下空间有偏见,而这些偏见对地下建筑的租售有着非常消极的影响;再加上近年来房地产业的快速发展与电商冲击,地上商业地产过剩的趋势已逐渐显现,这使得地下空间的商业开发与销售更是雪上加霜<sup>[3]</sup>。

### 1.2 沈阳城市地下空间的特点及开发利用现状

沈阳城区宏观地貌为冲洪积扇,地面标高一般在30.0~70.0 m,地层构成主要以砂土、圆砾为主;城区地下含水层一般厚度为18.0~30.0 m<sup>[4]</sup>。

截至2015年末,沈阳地下空间已竣工的1407个项目,建筑面积约1 175.89万m<sup>2</sup>;在建的1004个项目,项目面积约2 608.3万m<sup>2</sup>。本文通过对沈阳金廊、太原街、中街和三好街等地下空间重点开发区域进行调研,发现其具有如下特征:不同区域开发强度差异明显,地下空间布局分散;功能涵盖商业、停车、餐饮等,其中以商业为目的的开发占主导地位,而停车场仅是伴随商业开发的附属开发,体量严重不足,公共停车设施更是匮乏;业态较单一,与周围地上部分不协调,导致部分项目空置烂尾;再有就是为城市服务的功能性开发比较匮乏。

### 1.3 沈阳城市地下空间开发利用存在的问题

地下空间项目投资大、建设周期长、工程复杂,项目开发与管理缺乏相应系统性理论与方法的支持;城市地下空间各管理部门间缺乏交流机制与平台,存在信息壁垒;地下空间项目融资模式较单一,BT、BOT、PPP等融资模式运用非常少;地下空间相关政策法规存在缺陷,投资者关心的地下建筑物权属登记、容积率计算等问题均未明确规定,使得投资地下空间项目的开发商的权益未得到法律保障。

## 2 霍尔三维结构模型的建立与应用

### 2.1 霍尔三维结构模型的建立

霍尔三维结构<sup>[5]</sup>将系统工程整个活动过程分为前后紧密衔接的7个阶段和7个步骤,同时考虑完成这些阶段和步骤所需要的各种专业知识和技能,形成了由时间维、逻辑维和知识维所组成的三维空间结构。城市地下空间开发与管理涉及因素众多,涵盖了城市经济、工程技术、社会和法律等多个系统,且各系统因素交错耦合,因此,急需系统方法对其展开分析。本文采用霍尔三维结构模型对影响城市地下空间开发与管理的多系统因素展开分析,以期有助于沈阳城市地下空间的合理有序开发。

本文将时间维对应到城市地下空间项目的全寿命周期,并针对其特性,将时间维的7个阶段做出适当改进后进行划分,见表1。逻辑维在城市地

下空间项目中对应建设项目的预期目标,具体包括安全、质量、进度和经济效益、社会效益以及生态环境效益。知识维对应项目开发与管理中所需的知识、技术与外在条件,包括艺术、法律、工程技术、地质环境、区位与地域、城市宏观方面。霍尔三维结构模型如图1所示。

表1 时间维的划分  
Table 1 Time dimension division

时间维	项目建设
规划阶段	项目建议书
	初步可行性研究
	详细可行性研究
拟定方案阶段	初步设计
	技术设计
	施工图设计
研制阶段	工程采购
	施工组织设计
生产阶段	施工准备
安装阶段	组织施工
运行阶段	设备安装
	生产准备
	竣工验收
	投产运营
拆除阶段	项目拆除
	项目后评估

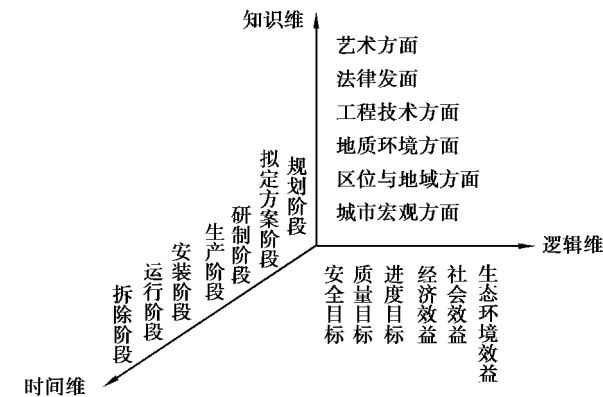


图1 霍尔三维结构简图

Fig. 1 Hall three-dimensional structure diagram

2.2 模型变量的确定

影响沈阳城市地下空间项目开发与管理

素众多,本文从知识维入手,保证模型变量的全面性。在各方面因素选取中,先罗列影响因素并进行整合,最后采用主因素分析法进行筛选得到该层面最主要的影响因素。

在艺术方面,艺术化设计<sup>[6]</sup>正逐渐成为现代地下建筑标新立异的新竞技平台,同时也是地下建筑活动经营的保障。该方面选取艺术化设计为模型变量。

在法律方面,涉及地下建筑权属登记关系到其是否可计入成本、转让出售或抵押,以实现资金回笼;容积率计算规则(体现了政府对地下空间开发的鼓励态度)。该方面选取权属登记、容积率计算作为变量。

在技术方面,施工勘察技术为地下空间开发的实施提供了有力保障,该部分选施工勘察技术为变量。

在地质环境方面<sup>[7]</sup>,地下建筑周围被围岩介质包围,城市地下空间资源的质量特征与开发难度受其影响明显高于地上建筑。所以地质环境方面选取岩土体条件<sup>[8]</sup>及水文地质条件<sup>[9]</sup>作为模型变量。

在区位与地域方面,项目区位条件对项目地下空间开发影响巨大,并直接关系到项目的销售和运营。而周围地上与地下空间开发现状则直接影响到项目地下开发的难易程度。所以该方面选取区位条件<sup>[10-11]</sup>、周围地上与地下空间开发现状作为变量。

在城市宏观方面,城市地下空间的开发与城市性质与规模、人均建设用地指标、容积率等城市规划指标以及城市发展前景密切相关。所以该方面选取城市规划指标、城市经济增长速度<sup>[12]</sup>为模型变量。

2.3 模型分析

本文采用专家评分法确定知识维10个因素对时间维各阶段及逻辑维各目标的影响大小,在沈阳邀请20名行业专家和从事地下空间项目开发工作5年以上的管理人员参与评分。受篇幅限制,本部分直接给出权重计算结果,时间维各个阶段权重见表2,逻辑维各个目标权重见表3。在表2中, $\alpha_{ij}$  ( $i=0,1,2\cdots 9;j=1,2,3,4,5,6,7$ )代表不同变量在不同阶段的影响大小;在表3中, $\beta_{ij}$  ( $i=0,1,2\cdots 9;j=1,2,3,4,5,6$ )代表不同变量对不同逻辑目标的影响大小。

表 2 时间维影响因素及权重

Table 2 Time dimensional factors and their weights

模型变量	规划阶段		拟定方案		研制阶段		生产阶段		安装阶段		运行阶段		拆除阶段	
	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%
艺术化设计	$\alpha_{0,1}$	10.7	$\alpha_{0,2}$	15.1	$\alpha_{0,3}$	13.1	$\alpha_{0,4}$	10.9	$\alpha_{0,5}$	12.2	$\alpha_{0,6}$	15.4	$\alpha_{0,7}$	11.3
权属登记	$\alpha_{1,1}$	10.3	$\alpha_{1,2}$	2.9	$\alpha_{1,3}$	4.8	$\alpha_{1,4}$	5.6	$\alpha_{1,5}$	6.4	$\alpha_{1,6}$	7.5	$\alpha_{1,7}$	5.3
容积率计算	$\alpha_{2,1}$	10.1	$\alpha_{2,2}$	6.2	$\alpha_{2,3}$	3.9	$\alpha_{2,4}$	4.8	$\alpha_{2,5}$	6.1	$\alpha_{2,6}$	6.7	$\alpha_{2,7}$	3.8
施工勘察技术	$\alpha_{3,1}$	6.7	$\alpha_{3,2}$	10.3	$\alpha_{3,3}$	12.4	$\alpha_{3,4}$	14.3	$\alpha_{3,5}$	10.7	$\alpha_{3,6}$	11.5	$\alpha_{3,7}$	13.5
岩土体条件	$\alpha_{4,1}$	9.7	$\alpha_{4,2}$	12.5	$\alpha_{4,3}$	12.1	$\alpha_{4,4}$	13.3	$\alpha_{4,5}$	9.1	$\alpha_{4,6}$	10.3	$\alpha_{4,7}$	12.6
水文地质条件	$\alpha_{5,1}$	9.0	$\alpha_{5,2}$	11.8	$\alpha_{5,3}$	11.9	$\alpha_{5,4}$	13.2	$\alpha_{5,5}$	8.6	$\alpha_{5,6}$	10.1	$\alpha_{5,7}$	12.3
区位条件	$\alpha_{6,1}$	11.5	$\alpha_{6,2}$	7.2	$\alpha_{6,3}$	12.5	$\alpha_{6,4}$	11.5	$\alpha_{6,5}$	13.6	$\alpha_{6,6}$	13.5	$\alpha_{6,7}$	11.7
周围开发现状	$\alpha_{7,1}$	10.6	$\alpha_{7,2}$	10.5	$\alpha_{7,3}$	11.4	$\alpha_{7,4}$	12.9	$\alpha_{7,5}$	12.8	$\alpha_{7,6}$	8.1	$\alpha_{7,7}$	11.9
城市规划指标	$\alpha_{8,1}$	10.3	$\alpha_{8,2}$	13.2	$\alpha_{8,3}$	6.8	$\alpha_{8,4}$	5.2	$\alpha_{8,5}$	9.4	$\alpha_{8,6}$	4.0	$\alpha_{8,7}$	8.2
城市经济增长速度	$\alpha_{9,1}$	11.1	$\alpha_{9,2}$	10.3	$\alpha_{9,3}$	11.1	$\alpha_{9,4}$	8.3	$\alpha_{9,5}$	11.1	$\alpha_{9,6}$	12.9	$\alpha_{9,7}$	9.4

表 3 逻辑维影响因素及其权重

Table 3 Logical dimensional factors and their weights

模型变量	安全目标		质量目标		进度目标		经济效益		社会效益		生态环境效益	
	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%	符号	权重 /%
艺术化设计	$\beta_{0,1}$	9.3	$\beta_{0,2}$	13.7	$\beta_{0,3}$	12.4	$\beta_{0,4}$	14.4	$\beta_{0,5}$	12.9	$\beta_{0,6}$	9.8
权属登记	$\beta_{1,1}$	4.5	$\beta_{1,2}$	2.5	$\beta_{1,3}$	3.3	$\beta_{1,4}$	13.8	$\beta_{1,5}$	11.4	$\beta_{1,6}$	7.3
容积率计算	$\beta_{2,1}$	4.5	$\beta_{2,2}$	3.2	$\beta_{2,3}$	2.0	$\beta_{2,4}$	13.6	$\beta_{2,5}$	11.7	$\beta_{2,6}$	6.9
施工勘察技术	$\beta_{3,1}$	18.8	$\beta_{3,2}$	16.4	$\beta_{3,3}$	16.8	$\beta_{3,4}$	6.4	$\beta_{3,5}$	13.4	$\beta_{3,6}$	13.8
岩土体条件	$\beta_{4,1}$	14.1	$\beta_{4,2}$	15.8	$\beta_{4,3}$	13.5	$\beta_{4,4}$	9.2	$\beta_{4,5}$	7.2	$\beta_{4,6}$	13.5
水文地质条件	$\beta_{5,1}$	13.6	$\beta_{5,2}$	15.3	$\beta_{5,3}$	12.8	$\beta_{5,4}$	6.2	$\beta_{5,5}$	6.3	$\beta_{5,6}$	12.5
区位条件	$\beta_{6,1}$	11.9	$\beta_{6,2}$	2.8	$\beta_{6,3}$	12.5	$\beta_{6,4}$	14.7	$\beta_{6,5}$	10.6	$\beta_{6,6}$	9.3
周围开发现状	$\beta_{7,1}$	12.5	$\beta_{7,2}$	7.6	$\beta_{7,3}$	13.1	$\beta_{7,4}$	5.3	$\beta_{7,5}$	9.6	$\beta_{7,6}$	8.7
城市规划指标	$\beta_{8,1}$	4.2	$\beta_{8,2}$	12.6	$\beta_{8,3}$	8.5	$\beta_{8,4}$	3.9	$\beta_{8,5}$	7.4	$\beta_{8,6}$	9.6
城市经济增长速度	$\beta_{9,1}$	6.6	$\beta_{9,2}$	10.1	$\beta_{9,3}$	5.1	$\beta_{9,4}$	12.5	$\beta_{9,5}$	9.5	$\beta_{9,6}$	8.6

根据各影响因素权重数据,通过式(1)计算可得各个因素对特定目标特定阶段的影响大小。受篇幅限制,本文仅给出经济效益的计算结果,见表4,其中加粗权重对应该阶段主控因素。

$$d_{ij} = \frac{\alpha_{ij} \times \beta_{ij}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} \times \beta_{ij}}$$

(1)

各个因素在不同阶段对综合效益的影响大小采用功效系数法计算,公式(2)中, $d_{ijn}$ 为第  $n$  个逻辑维因素对第  $j$  个阶段的影响大小。

辑目标对应的指标权重,计算结果见表5。

$$d_{ij} = \frac{\sqrt[n]{d_{ij}d_{ij2}\cdots d_{ijn}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{d_{ij}d_{ij2}\cdots d_{ijn}}} \quad (2)$$

由表可以看出:地下建筑的艺术化设计和施工勘察技术两个变量,无论是在时间阶段跨度方面还是逻辑目标广度方面,对城市地下空间开发和管理的影响都最为重大;岩土体条件在安全和质量目标下的规划阶段、生态环境效益目标下的规划阶段和拟定方案阶段起主控作用;区位条件在安全和进度目标下的规划阶段以及经济效益目标下的规划、生产、安装、拆除阶段起主控作用。

通过分析,本文发现在城市地下空间项目开发和管理过程中,同一模型变量在不同时间维阶段对不同逻辑目标的影响差异巨大。因此,在不同阶段针对不同逻辑目标,应该有的放矢,重点考虑该阶段该目标下起主控作用的影响因素,以保证城市地下空间项目管理目标的顺利实现。

表4 经济效益目标下各阶段影响因素权重

Table 4 Phase factors weights in economic benefit target

因素	时间维						
	规划阶段	拟定方案	研制阶段	生产阶段	安装阶段	运营阶段	拆除阶段
艺术化设计	15.0	23.2	19.2	16.4	17.6	20.8	17.1
权属登记	13.9	4.3	6.7	8.1	8.9	9.7	7.7
容积率计算	13.4	9.0	5.4	6.8	8.3	8.6	5.4
施工勘察技术	4.2	7.0	8.1	9.6	6.9	6.9	9.1
岩土体条件	8.7	12.3	11.3	12.8	8.4	8.9	12.2
水文地质条件	5.4	7.8	7.5	8.6	5.4	5.9	8.0
区位条件	16.5	11.3	18.7	17.7	20.1	18.6	18.1
周围开发现状	5.5	5.9	6.2	7.1	6.8	4.0	6.6
城市规划指标	3.9	5.5	2.7	2.1	3.7	1.5	3.4
城市经济增长	13.5	13.7	14.1	10.8	13.9	15.1	12.4

表5 综合效益目标下各阶段影响因素权重

Table 5 Phase factors weights in comprehensive benefits target

因素	时间维						
	规划 阶段	拟定 方案	研制 阶段	生产 阶段	安装 阶段	运营 阶段	拆除 阶段
艺术化设计	14.0	18.3	15.6	12.9	15.2	18.7	13.5
权属登记	6.7	1.8	2.8	3.3	3.9	4.5	3.1
容积率计算	6.3	3.5	2.2	2.7	3.6	3.8	2.1
施工勘察 技术	9.9	14.2	16.8	19.2	15.0	15.8	18.3
岩土体条件	12.5	15.0	14.3	15.6	11.2	12.4	14.8
水文地质 条件	10.3	12.5	12.4	13.7	9.4	10.7	12.9
区位条件	11.6	6.7	11.5	10.5	13.0	12.6	10.8
周围开发 现状	10.5	9.7	10.3	11.6	12.1	7.5	10.8
城市规划 指标	8.0	9.5	4.8	3.6	6.9	3.0	5.8
城市经济 增长	10.2	8.8	9.3	6.9	9.7	11.0	7.9

### 3 优化地下空间开发利用的建议

从知识维角度看,沈阳市政府部门应通过地方立法来构建完善的法律法规体系,建立、健全城市地下空间开发的技术标准、质量标准和建筑规范,为沈阳城市地下空间的开发提供可靠保障。另外,还应明确沈阳地下空间权属范围及权利主体,依据“谁投资、谁所有、谁受益、谁维护”原则,允许建筑地下空间部分进行权属登记,为其通过抵押、转让和租售等方式流入市场提供便利,并引入多元融资模式,加快地下空间项目资金回笼。此外,在建筑地下空间部分容积率计算方面应给予一定折减,可根据不同区域和开发深度分别确定折减比例,以引导和控制沈阳城市地下空间的合理有序开发。

从时间维角度看,在项目寿命周期的各个阶段应有不同的侧重点,根据各因素在不同阶段的影响大小,有针对性地选取主要因素进行控制和管理。



在地下建筑的设计中应注重人性化和艺术化,加大建筑师的参与力度,重视空间环境,改善人们对地下空间的认识,提高城市地下空间的认知感。同时,在设计阶段对岩土和水文地质条件也应引起重视。

从逻辑维角度看,城市地下空间的开发不能仅以眼前的经济效益为目标,还应注重远期的社会和生态环境效益。所以其开发应分期分层,并进行长远规划,以达到综合效益最佳。此外,还应加大科研投入,重点解决制约地下空间开发的关键问题与难题,促进地下空间工程施工与勘察方面新技术、新材料、新工艺、新设备的研发与应用。

参考文献(References)

[1] 袁红,戴志中,刘新荣,等.重庆主城区地下空间利用发展阶段研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):1-5,13.(Yuan Hong,Dai Zhizhong,Liu Xinrong,et al. Development phase of underground space utilization in Chongqing urban district [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(1):1-5,13.(in Chinese))

[2] Cano-Hurtado J J, Canto-Perello J. Sustainable development of urban underground space for utilities [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(3): 335-340.

[3] 雷社平,王璐芸,程晓玲.关于中国地下商业开发与运营的思考[J].地下空间与工程学报,2017,13(增2):497-502.(Lei Sheping,Wang Luyun,Cheng Xiaoling. Thoughts on development and operation of underground business in china[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2017,13(Supp.2):497-502.(in Chinese))

[4] 于丹,苏艳丽,刘琦.沈阳城区环境地质条件及其岩土工程问题分析[A]//2010年城市地质环境与可持续发展论坛论文集[C].上海:同济大学出版社,2010:665-668.(Yu Dan,Su Yanli,Liu Qi. Analysis on urban geological conditions and geo-technical Shenyang [A]//2010 Forum on Urban Geoenvironment & Sustainable Development [C]. Shanghai: Tongji

University Press, 2010: 665-668. (in Chinese))

[5] 齐锡晶,付正义,马栋.沈阳市建筑业可持续发展的评价与对策[J].沈阳建筑大学学报,2014,16(3):268-271.(Qi Xijing,Fu Zhengyi, Ma Dong. Evaluation and countermeasures in Shenyang city construction sustainable development [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2014, 16(3): 268-271. (in Chinese))

[6] 毛露露,周晓军.探析比例和尺度在地下建筑设计中的应用[J].地下空间与工程学报,2014,10(增1):1566-1570.(Mao Lulu,Zhou Xiaojun. Exploration and analysis of the application of proportion and scale in the underground architecture designs [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(Supp.1):1566-1570. (in Chinese))

[7] Wang X, Zhen F, Huang X, et al. Factors influencing the development potential of urban underground space: structural equation model approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38(3): 235-243.

[8] Huang Y, Bao Y J, Wang Y H. Analysis of geoenvironmental hazards in urban underground space development in Shanghai[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2067-2079.

[9] Wang Y, Peng F L. Evaluation of urban underground space based on the geological conditions: a feasibility study[A]//New Frontiers in Geotechnical Engineering GSP 243 ASCE [C]. Shanghai: Tongji University Press,2014:187-197.

[10] Bobylev N. Underground space in Berlin: research into the quantification of urban underground space use[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 495-507.

[11] Bobylev N. Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: a case of urban underground space use[J]. Land Use Policy, 2009, 26(4): 1128-1137.

[12] Zhao Z W, Cao Q. The development of urban underground space from the perspective of urban economy [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 21: 767-770.