

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.016

# 地下空间综合单元环境质量的简易评价法

张继刚<sup>1</sup>, 揭天琪<sup>2a</sup>, 刘勇<sup>2b</sup>, 刘炜<sup>3</sup>

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 重庆大学 a. 土木工程学院;

b. 城市建设学院, 重庆 400045; 3. 四川美术学院 建筑艺术系, 重庆 401331)

**摘要:** 本文通过建立地下空间综合单元概念, 进一步将多学科研究应用在对地下空间综合单元环境质量的认知与分析中。文章从多维相关因素走向一致性的角度, 整合与地下空间相关的土木工程、节能、视场景等跨学科的相关内容, 提出了对构筑物地下空间综合单元环境质量的ESVA简易评价方法。在土地资源稀缺的情况下, 地下空间综合单元概念的提出, 及其对环境质量的简易评价方法的探讨, 以期对日渐受到重视的地下空间的综合开发和利用提供参考。

**关键词:** 空间单元; 地下空间综合单元; 环境质量; ESVA 综合评价

**中图分类号:** TU91      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2016)S2-0079-11

## Simple evaluation of ESVA on the environmental quality of underground space comprehensive unit

Zhang Jigang, Yang Haiqing, Liu Yong, Liu Wei

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065; 2a. School of Civil Engineering;

2b. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045;

4. Architecture Art Department, Sichuan Fine Arts Institute, Chongqing, 401331)

**Abstract:** This paper tries to further apply the frontal complexity study to the cognition and analysis of the environmental quality of underground space comprehensive unit. By integrating the interdisciplinary courses such as underground civil engineering, energy conservation, visible scene and transportation, the author proposes the simple ESVA evaluation approach to environmental quality of the underground space comprehensive unit from the perspective of multi-dimensional factors leading to coherence. Considering the scarce land resources, this paper aims to present reference for the integrated development and evaluation on the ever-frequently addressed underground space development.

**Key words:** space unit; underground comprehensive space unit; environmental quality; ESVA comprehensive evaluation

### 1 空间综合单元与地下空间综合单元的概念及其意义

目前, 关于单元的研究比较多, 譬如关键生态单元“the Key Ecological Unit”<sup>[1]</sup>、门控社区单元“Gated Community Unit”<sup>[2]</sup>、通勤单元“Commuting Unit”<sup>[3]</sup>、城市改造单元“the Transformed Unit”<sup>[4]</sup>、

住房单元(HU)“Housing Unit”<sup>[5]</sup>、中央投诉单元“a Central Complaint Unit”<sup>[6]</sup>, 此外, 还有诸如低碳单元“Low-carbon Unit”、生态单元“Ecological Unit”、陆地地面单元“Terrestrial Units”、邻里单元“Neighbourhood Unit”、种族单元“the Racialized Unit”、阶层单元“the Class-stratified Unit”等, 而本文所研究的单元, 指基于城市地上地下功能综合利

用的空间界域;空间综合单元,指在一定范围的空间界域内,将影响空间使用的不同影响因素,综合在一起进行研究的对象;地下空间综合单元,指在地下(一般而言是指总平面中设定的±0以下)的空间界域内将影响地下空间使用的不同影响因素,综合在一起进行研究的对象。其涉及的内容根据不同单元的特征,具有多维性和复杂性的特征。通过分析复杂的单元影响因子与因子之间的相互作用,可以对空间综合单元有更进一步的深入了解。

1)开展地下空间综合单元研究,根据地下空间单元的空间特点和倾向性,可以划分出包括商业空间综合单元、居住空间综合单元、交通空间综合单元、防灾空间综合单元、市政空间综合单元以及复合空间综合单元等等的类型细分,有利于结合智能控制、信息集成、低碳指引、公众参与、循环技术等等,这样的空间综合单元可以做出各自不同的特色。

2)开展地下空间综合单元研究,包括地下商业、地下居住、地下静态交通、交通转换、平战结合、物质储备、地下人防、地下工厂、特殊设备、地下水源、地下通风、地下防潮、地下能源、地下通讯等等的综合利用,是一项非常重要的工作。

3)结合地下空间综合单元研究,进一步开展地上地下空间一体化研究,其涉及的内容相当广泛,包括地上地下交通一体化、地上地下防灾一体化、地上地下生态设计一体化、地上地下暖通一体化等,内容丰富、意义深远。

4)结合地下空间综合单元研究,可以进一步应用在其它复杂空间中,譬如:地震带可以作为一个复杂综合单元进行研究,综合地震带单元域中地上地下各种环境因子的构成和微弱变化(如区域性地下深层观察、区域性地下空间形变、大气因子变化、地表应力因子变化、动植物因子变化等等),从而为地震的监测和分析提供综合性的思路和方法。除此之外,地面河流流域及其地上地下影响区域、森林分布及其地上地下影响区域等,也可以作为复杂性的流域综合单元和森林综合单元开展研究,等等。

本文以地下空间综合单元为例,选择地下空间综合单元中的地铁换乘站空间综合单元和地下商业空间综合单元为例,提出了 ESVA 简易综合评价法。

## 2 ESVA 研究的理论解析

多系统的叠合具有效益积聚性、共生性,并整体上呈现复杂性。多维叠合的效益积聚性研究认为:

1)叠合效应因各系统叠合共藕形式的不同表现为整体效应倍减、倍增的积聚特征;2)单个系统的变化会影响或制约到其它系统,乃至整体的叠合效应,且相互间具有不可分割的共生性;3)多维叠合思想不倾向单因素决定论,影响事物发展变化的因素是多元、多层次、多侧面的,而且是变化的;4)城市所有空间和场所的实际外显和内在功能协作,都是多维多系统相互交叉干扰并走向一致性的复杂过程,并遵守着复杂性变化的一般规律。

ESVA 是多系统叠合理论在城市构筑物地下空间评价中的具体运用,是指为综合提高城市构筑物地下空间的可靠性、安全性、节约性、舒适性、美感度、调适性和特殊情况下的应变性而进行的整合研究。其内容主要包括土木工程(Engineering)、疏散(Scatteration)、节能(Saving energy)、场景(View)、通风与防潮(Ventilation and Anti-moisture)、人防和防灾(Air defense works and Disaster prevention)多学科的关键性因素影响,综合以上各项内容概括为 ESSVVA,简称 ESVA。

## 3 地下空间综合单元环境质量的 ESVA 简析

众所周知,当今城市人口高密度化和地价持续高涨,地下空间的开发利用,已作为解决这些问题的重要辅助手段之一。对于山地城市来说,因受地形限制,地下空间的充分利用显得尤为重要。地下空间环境质量,指人们生活在地下空间时,周围环境所能满足人们需求的能力。随着地下空间的广泛开发与利用,地下空间环境质量评价越来越受到人们的关注,为当地居民和后代创造一个永久性可持续发展的地下空间环境,科学可行的地下空间环境质量评价方法就变得尤为重要,地下空间环境质量的评价主要受到以下几个方面因素的影响。

### 3.1 地下空间土木工程(Engineering)

土木工程是地下空间开发的基础,也是地下空间环境质量的基本要求,只有在土木工程安全的基础上才能使地下空间环境质量拥有基本的保障。土木工程包括环境工程和结构工程两个方面。环境工程是外因,其内容包括有关地质结构与构成、地震断裂带、地下空洞、地下河、滑坡、泥石流、洪灾、大型地下危险设施如输气管、地下油库、炸药库等环境灾害预防工程等。坡地城市地下空间环境工程依照其地形变化特征和其功能设置的不同,一般都具有不同的空间形式,从简单的点对点的形式到十字形式、

环型空间、网络型空间应有尽有。结构工程是内因,是根据外因条件并结合使用特点综合而形成的具体结构技术方案的实施工程。坡地城市依据其特有的地形变化特征,出现了一些半地下的覆土建筑、吊脚楼、多层次大高差的地下空间形式,如重庆的洪崖洞、城市规划展览馆等。

对于地下土木工程安全的评价而言,首先应明确维护、监测与评价的有效技术法规依据,了解和分析构筑物工程的环境地质概况、原始设计技术资料和使用概况。然后根据概况特点,确定评估方法,譬如规范法进行支护设计验算法、数值模拟分析法等等,也可以采取几种方法相互校正,最后进行分析、验算和对比,根据验算和对比分析的结果,得出安全评价的综合结论,需要进行安全支护的,需提出可行性建议。

### 3.2 地下空间节能(Saving Energy)

构筑物地下空间节能降耗的技术水平是地下空间环境质量评价重要的影响内容之一。其内容主要包括围护结构的节能措施、通风空调节能措施、照明节能措施、可再生能源利用与节能措施等。

其一,维护结构与节能措施:空间围护结构的保温隔热材料一般选择导热系数较小、不燃或阻燃材料,目前有胶粉聚苯颗粒保温浆料、石膏保温浆料、内贴砂加气砌块等系统;其二,通风空调节能措施:节能型空调冷热源设备目前采用的主要有水源热泵、地源热泵、蓄能空调(冰蓄冷、水蓄冷空调)、三联供(冷、热、电)设备等;另外,除人工通风系统外,半人工的空气竖井系统利用内外热压差可形成自然的空气流通,也能起到节能的作用;其三,照明节能措施:按照一般的思路,建筑照明的节能措施一般包括选用节能灯具、合理规划照明方案、根据时段选择照明的不同组合方式以及利用智能的感光调节系统自动调节光源等等;另外,还有一些更加针对性的将天然光线引导至室内的节能措施:1)在中厅的墙面涂刷或安装反射材料,或在窗户内外视线以上部位设置反光板;2)采用棱镜玻璃改善室内天然光分布;3)导光管及光导纤维的使用;4)全自动跟踪太阳的采光装置,其代表是近年来国外流行的“桑帕普”太阳光光导照明系统,该系统无论在晴天、阴天还是下雨天,都能高效地把室外的自然光线通过采光罩采入系统内;其四,可再生能源利用与节能措施:美国2005年8月公布的能源新法案(EPACT,2005)包含了《能源政策与节约法案》(CPCA)的修正案,政府鼓励使用太阳能等;消费者购买家用太阳能设施开

支的30%可以用来抵税(参注释①);德国2000年颁布了《可再生能源促进法》(KEL);德国政府于2002年出台《节省能源法案》,规定新建建筑必须是符合标准的低能耗建筑;2003年德国政府又制定了“住所改造计划”,采用节能技术改造建筑(参注释②);此外,节能降耗新技术内容还包括节水设备、新型绿色设备等技术。

### 3.3 地下空间疏散(Scatteration)

构筑物地下空间的通风、采光等都可以靠人工技术得以较好地解决。但是,构筑物地下空间中的方向感和移动中的定位却是个难以解决的问题,尤其在复合式空间组合中,并由此影响到疏散效率和安全感的效果等,从而影响地下空间环境质量。

疏散(Scatteration)的前提是方向感,在方向感正确的前提下,结合便捷的通道(Passage)、生动的指示(Dispersion)、应急照明(Illuminating)、和完善的消防设备等而保证综合的解决疏散问题。因此判断构筑物地下空间综合质量的一个重要方面就是其对方向感、疏散指示和消防设备的考虑是否更规范地满足使用要求,其内容包括:1)方向感与指示标识系统:方向感能够给人以心理上的安全感,方向的迷失会造成心理上的恐慌,尤其在灾害事件发生的应急情况下。复杂空间中能够提供方向判断依据的重要条件是生动明确的指示标识系统。2)疏散距离和疏散出口:一般情况下,保证空间中的每一处满足拥有两个方向的疏散出口时,是比较理想的。但在最不利情况下,也应满足国家与地方设计规范的中疏散距离和疏散出口设置的要求。3)疏散与消防应急设备:构筑物地下空间中应按相关规范要求,配备有效的预警报警系统、自动喷淋、自动排烟、自动照明指示的联动系统是配合疏散十分重要的安全条件。

坡地城市地下空间疏散具有复杂性,其空间组织不光有平面上的位移,同时包括垂直方向的位移,即人在地下空间中不光要解决水平层面的疏散问题,还要针对其竖向高差解决垂直层面的疏散。加上要在不同水平面上处理与地面的关系,人流导向性问题,增加了疏散的复杂性。

### 3.4 地下空间场景(View Underground)

地下场景与地上场景相比较,由于其隐蔽性,长期不为城市景观研究所重视。但随着土地资源的日渐稀缺和对开发利用地下空间的日渐增加,地下场景的影响也开始在城市景观研究中渐露端倪,因为地下场景独特的视觉环境和营造特点,配合无限广阔的技术支持与开发空间,地下场景因此拥有更多

地机会发展成为一支景观的奇葩,因此也成为影响地下空间环境质量的重要因素之一。与地上场景一样,地下场景涉及到场景的自然生态内涵、文化内涵、形态美学内涵等,而特别地,地下场景还具有地下视环境的独特温度、湿度、声环境、视维度、视域、视廊、视感受等等,同时,由于地下空间的室内特征倾向,地下场景还具有特别的技术虚拟特征。在经过虚拟与特别的技术处理的地下空间中,也可以使用虚拟的美景度(参注释③)进行评价,主要是通过SBE法,定性与定量因子相结合进行评价,定性因子如形态、通透性、色彩、质感、安全感等,定量因子如高度、视廊、冠幅、阴影、距离等。技术虚拟与虚拟美景度的应用,将为地下场景的开发带来广阔的研究空间与前景。

在坡地城市环境中,地下场景结合地上化的常用手法有:1)结合中庭采光顶棚的设计方法;2)采用反光式采光窗井设计方法;3)采用下沉式阳光间的设计方法等等。除此之外,地下场景的开发利用,还涉及到复杂的空间转换关系,譬如构筑物地下空间的地上化的综合转化措施、方向感导引措施、交通导引措施、通风转换措施、照明转换措施、排水与防潮措施、视景转换措施、室内外的视线联系或场景适时传导技术、视频现实增强技术以及增加安全感的措施等等。

### 3.5 地下空间通风与防潮 (Ventilation and Anti-moisture)

为提供健康舒适的居住、活动环境,采取必要、合理的通风形式对构筑物的地下空间而言就显得尤为重要,也因此成为影响地下空间环境质量的重要因素之一。构筑物地下空间的通风主要包括自然通风和机械通风两种方式。在实际应用中,这两种通风形式往往不是单独采用的,通常根据具体条件综合利用。依据空间通风的具体应用条件,又可以将其分成以下几种形式:1)机械送风,机械(或自然)排风;2)自然进风,机械排风;3)自然通风。即自然进风、自然排风,其作为一种经济而有效的通风方式,在构筑物空间的通风工程中日益受到重视。自然通风的动力主要依靠空间内外空气容重差引起的自然重力,即热压。室外新鲜空气经室内热源加热,使室内空气温度升高,造成了室内外的空气温度差,从而引起容重差,通过竖进、排风风道形成自然通风循环。在冬季或过渡季节,对室外气温较低的地区,自然通风能力更显得不可忽略。

另外,为改善人工通风和空气自然交换的条件,

采用通风竖井和可旋转的风斗是坡地条件下可供选择的非常节能的半人工通风方式。良好的通风还可以降低结露,结露是温度突然降低时,因空气收缩而引起的湿气释放,譬如温湿的空气遇到温度较低的墙面时容易发生结露等等。然而,由于工艺要求和地理条件的限制,往往不一定能形成自然通风的“良好”条件。因此,目前在通风设计中,为确保安全仍然以机械通风方式为主;但是,在多山多丘陵的地区,在设计中应尽可能注意组织好自然通风的循环通路,即将自然通风作为机械通风的补充通风(尤其是过渡季节),如此可以更有效地提高通风系统运行的经济性。

### 3.6 地下空间人防和防灾 (Air Defense Works and Disaster Prevention)

由于地下空间的隐蔽性,地下空间天然地承担了作为人防工事的功能,所以地下空间人防和防灾也是影响地下空间环境质量的重要因素之一;详细的人防地下空间包括:人防级别、人防单元划分、防爆与滤洗硝、战时物质储存、战时用水与排污、战时通讯、战时指挥等等。由于人防问题的专业性和特殊性,因此,地下空间中的人防设计、工程施工、人防用品、工程验收、管理维护,必须由专业的人防单位或机构负责。具体到地下空间中的人防设计,由于其针对的是特殊时期、特殊情况下的防护设计,因此其必须由具备人防资质的设计单位或专业的人防设计机构进行技术设计,而尤以专业的人防设计机构为主。

构筑物地下空间防灾主要是指对自然灾害的预防,包括地震、滑坡、泥石流、和洪灾等可能对地下空间带来的灾害。一般地,规划布置中应注意对地质断裂带的避让;滑坡、泥石流是山地地区汛期常发的自然灾害,构筑物的用地选择,应尽量避开滑坡、泥石流的中、高易发区;构筑物选址应注意对地下暗河、溶洞、工程管道等的勘察与避让,尤其在喀斯特地形环境中应特别注意;构筑物防洪一方面是出入口的防洪设计,另一方面是合理的水道设计,一般而言,处于山坡高处的构筑物比坡脚的构筑物更容易排除洪水,所以处于坡脚和滨水的构筑物(水文、水工构筑物与特别授权的临时构筑物除外)要设计在洪水位以上,一般地,能够保证在50年一遇洪水位以上是比较理想的。

## 4 地下空间环境质量 ESVA 综合评价与计算方法探讨

### 4.1 构筑物地下空间环境质量 ESVA 综合评价与计算的模拟边界与环境

4.1.1 评价要素与权值模拟 影响地下空间综合质量的因素经过分析萃取,主要包括五个方面:土木安全(Engineering)、疏散与照明(Scatteration)、节能(Saving Energy)、场景(View Underground)与美景度、通风与防潮(Ventilation and Anti-moisture/Moisture Preventing)、人防和防灾(Air Defense Works and Disaster Prevention),以上内容统称 ESSVVA,简称 ESVA。每个部分又可以进一步详细分解为若干个影响因素,限于篇幅,本文中仅提供两级因子及建议权重作为参考,以此类推。

1)一级因子对 ESVA 综合质量的权重建议

X1 土木安全(Engineering); X2 节能(Saving energy); X3 疏散与照明(Scatteration); X4 场景(View Underground); X5 通风与防潮(Ventilation and Anti-moisture); X6 人防和防灾(Air defense works and Disaster prevention)。

2)二级因子权重建议

X1 土木安全(Engineering)包括: X11 结构安全性; X12 结构节约性; X13 结构美观性; X14 结构先进性; X15 结构建设难度(时效性)。

X2 节能(Saving energy)包括: X21 节能效益高; X22 建设投资节约; X23 后期维护管理费用低; X24 稳定性与使用寿命长。

X3 疏散与照明(Scatteration)包括: X31 水平疏散满足规范; X32 疏散有两个及以上出口; X33 明确的方位显示系统; X34 具有完善的应急疏散指示系统。

X4 场景(View Underground)包括: X41 功能适用性; X42 交通便捷性; X43 无压抑感(压抑度); X44 无围闭感(开敞度); X45 符合人的尺度、考虑残疾人等(人性化); X46 场所色彩、形态、文化氛围等的特色感。

X5 通风与防潮(Ventilation and Anti-moisture)包括: X51 新风效果好; X52 投资节约; X53 后期维护管理费用低; X54 稳定性与使用寿命长; X55 防潮、防结露效果好。

X6 人防和防灾(Air defense works and Disaster prevention)包括: X61 人防设施或异地人防; X62 防地震措施; X63 防泥石流、滑坡等地灾措

施; X64 防洪涝灾害措施。

4.1.2 评价方向的确定 地下空间综合质量的评价,对于同一对象一般可以做出两种判断,一种是正判断,即对评价对象所做的肯定和满意程度判断,相反地另一种是负判断,即对评价对象所做的否定和不满程度的判断。本文中拟以正判断为评价方向。

4.1.3 目标影响评价 进行地下空间综合质量影响因素的评价,首先应确定系统的目标。目标之于整个系统起着牵一发而动全身的作用,目标规定了所有系统内因子的地位和所起作用的正负与强弱。

4.1.4 评价要素影响作用的加权规则 不同角度和侧面的要素对城市地下空间综合质量皆具影响力,但其影响的程度和方式却千差万别,因而,在对要素本身进行评定之前,应首先确定其对城市地下空间综合质量影响作用的大小,即确定各要素的影响权值。权值的确定遵循下面三条规则: 1)同一评价目标、同一评价层次、同一性质的要素权值一致原则。 2)不同层次、同一性质的评价要素权值自定原则。 3)不同层次、不同性质要素的权值自定原则。

4.1.5 评价量纲的确定 城市地下空间综合质量要素的评价可采用专家和普通使用者意见的综合调查结果为依据,依据的主要内容为专家、普通使用者对评价对象分散的评价结果,评价采用“优秀、良好、一般、较差”四级选择,无量纲。

### 4.2 城市地下空间综合质量模糊评价模型

城市地下空间特定环境质量的评价涉及众多评价因素,不少评价因素难以量化,其评价通常采用专家或相关人员评分或进行等级评价,由于等级评价结果具有模糊性,其综合评价可采用模糊综合评价方法,由于评价指标的多层次性,可采用多级模糊综合评价法,下面是应用多级模糊综合评价法对城市空间特定环境质量进行综合评价的步骤。

4.2.1 确定地下空间特定环境质量模糊综合评价的评价集 城市地下空间综合质量要素的评价可采用专家和普通使用者意见的综合调查结果为依据,依据的主要内容为专家、普通使用者对评价对象分散的评价结果,评价采用“优秀、良好、一般、较差”四级选择,即取模糊综合评价的评价集为:  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优秀, 良好, 一般, 差}\}$ 。

4.2.2 确定地下空间特定环境质量模糊综合评价的指标集 由于篇幅的原因,本文详细列出地下空间特定环境质量综合评价指标体系中前两个层次指标,各个中间指标下边还可有不同层次的指标,为了方便起见,这里假设各二级指标仅有三级(明细级)

评价指标,则评价指标集分为三个层次,一个一级评价指标集:  $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6\}$ , 6 个形如  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in_i}\}$  的二级评价指标,其中  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ , 如  $X_1 = \{X_{11}, X_{12}, \dots, X_{15}\}$ 。假设每个二级评价指标下分别有  $n_{11}, n_{12}, n_{13}, n_{14}, n_{15}, n_{21}, \dots, n_{64}$  个三级指标(这里不妨设为明细评价指标),则这些评价指标构成了整个模糊综合评价体系中  $n_{11} + n_{12} + \dots + n_{64}$  个形如:  $X_{ij} = \{X_{ij1}, X_{ij2}, \dots, X_{ijn_j}\}$  的三级评价指标集,这些三级评价指标构成了综合评价的单因素评价集:  $X = \{X_{111}, X_{112}, \dots, X_{11n_{11}}, X_{121}, \dots, X_{12n_{12}}, \dots, X_{641}, \dots, X_{64n_{64}}\}$ 。

4.2.3 确定各层次评价指标相对于其上一层次评价指标的重要性权重 多级模糊综合评价需要确定中间各层次评价因素相对其上一层评价指标的相对重要性权值,确定权值的方法有多种,可用层次分析法,也可利用专家调查法确定。本文根据经验及专家意见,对城市地下空间特定环境综合评价指标体系中一二级评价指标给出了建议性权重。用  $\sum_{l=1}^{n_{ij}} \alpha_{ij}(l) l = 1, 2, \dots, n_{ij}$  表示指标因素  $X_{ijk}$  相对其上级评价指标  $X_{ij}$  的相对重要性权重,权向量为  $\alpha_{ij} = (\alpha_{ij}(1), \alpha_{ij}(2), \dots, \alpha_{ij}(n_{ij}))$ , 其中  $\alpha_{ij}(l) \geq 0$ ; 用  $\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_i(j) j = 1, 2, \dots, n_i$  表示评价因素  $X_{ij}$  相对于其上级评价因素  $X_i$  的相对重要性权重,权向量为  $\alpha_i = (\alpha_i(1), \alpha_i(2), \dots, \alpha_i(n_i))$ , 其中  $\alpha_i(j) \geq 0$ ; 用  $\sum_{i=1}^6 \alpha(i) i = 1, 2, \dots, 6$  表示一级评价指标因素  $X_i$  相对于环境质量总目标的重要性权重,权向量为  $\alpha = (\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(6))$ , 其中  $\alpha(i) \geq 0$ 。

4.2.4 城市地下空间特定环境质量单因素模糊评价 对于特定的评价对象进行城市地下空间特定环境质量多级模糊综合评价,首先要确定其在各个单因素评价指标上的评价,即确定相对于某单因素评价指标,该评价对象隶属于评语集  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优秀, 良好, 一般, 差}\}$  中各评价等级的模糊隶属度。对于某些量化指标,可以根据指标的性质,由其数量构造模糊隶属度函数,对于一些很难用具体数值作分级标准常用文字描述的因素,则可运用专家评价系统,向城市居民或相关专业人士采集数据,通过数学统计分析得到隶属度。例如假设有  $m$  位评委对某个单因素评价,其中  $m_1$  位评为  $v_1$  级,  $m_2$  位评为  $v_2$  级,  $m_3$  位评为  $v_3$  级,  $m_4$  位评为  $v_4$  级, (其中  $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = m$ ), 利用总人数  $m$  分别

除  $m_1, m_2, m_3, m_4$ , 得该因素的各级评语隶属度。即第  $ijk$  个单因素相应于第  $l$  等级评语的隶属度为:

$$r_{ijkl} = \frac{\text{评 } ijk \text{ 因素为 } v_l \text{ 等级的人数}}{\text{评委总人数 } m}$$

$$(i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, n_i, k = 1, 2, \dots, n_{ij}, l = 1, 2, 3, 4)$$

对于三级评价指标集  $X_{ij} = \{X_{ij1}, X_{ij2}, \dots, X_{ijn_j}\}$  由上述第  $ijk (k = 1, 2, \dots, n_{ij})$  单因素在评语集  $V$  上的隶属度  $r_{ijkl}$  构成了评价指标子集  $X_{ij}$  相对应的模糊关系矩阵  $R_{ij}$  (即单因素评价结果):

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} r_{ij11} & r_{ij12} & r_{ij13} & r_{ij14} \\ r_{ij21} & r_{ij22} & r_{ij23} & r_{ij24} \\ r_{ij31} & r_{ij32} & r_{ij33} & r_{ij34} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{ij(n_{ij}-1)1} & r_{ij(n_{ij}-1)2} & r_{ij(n_{ij}-1)3} & r_{ij(n_{ij}-1)4} \\ r_{ijn_{ij}1} & r_{ijn_{ij}2} & r_{ijn_{ij}3} & r_{ijn_{ij}4} \end{pmatrix}$$

$$(i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, n_i)$$

4.2.5 利用模糊合成运算进行多级模糊综合评价合成计算 根据多级模糊综合评价原理,利用模糊合成运算  $\alpha_{ij} \circ R_{ij}$  计算上一层次评价因素相对于评语集  $V$  的模糊隶属度向量:

$$(r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4}) = (\alpha_{ij}(1), \alpha_{ij}(2), \dots, \alpha_{ij}(n_{ij})) \circ R_{ij}$$

若模糊合成运算为简单的加权求和运算,则  $r_{ijl} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} \alpha_{ij}(k) r_{ijkl} l = 1, 2, 3, 4$ , 则得到二级评价的模糊关系矩阵  $R_i = (r_{ijl})_{n_i \times 4} (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 。同理,利用模糊合成运算  $\alpha_i \circ R_i$  得到评价指标  $X_i$  在评语集  $V$  上的模糊隶属度向量:

$$(r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}) = (\alpha_i(1), \alpha_i(2), \dots, \alpha_i(n_i)) \circ R_i$$

在简单的加权合成运算下,其中  $r_{il} = \sum_{k=1}^{n_i} \alpha_i(k) r_{ikl} l = 1, 2, 3, 4$ , 由此类模糊隶属度向量构成了一级综合评价所需的模糊关系矩阵  $R = (r_{il})_{6 \times 4}$ , 利用合成运算  $\alpha \circ R$  得到评价对象在评语集上的最终综合评价结果,即该评价对象在城市空间特定环境质量评价总目标在评语集上的模糊隶属度向量:  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4) = (\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(6)) \circ R$ , 在加权合成运算下,其中:  $b_l = \sum_{i=1}^6 \alpha(i) r_{il} l = 1, 2, 3, 4$

### 4.3 城市地下空间特定环境质量多级模糊综合评价结果分析

对于利用多级模糊综合评价所得评价对象在评语集上的模糊隶属度向量  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ , 有如

下两种方法对评价对象质量评价等级进行最终判定。

4.3.1 利用最大隶属度准则进行评定 若  $\max(b_1, b_2, b_3, b_4) = b_k$ , 则将该评价对象的环境质量归为  $v_k$  等级。此种方法适合于对单一城市地下空间特定环境质量进行等级归类评价, 属于定性评价结果。若要对若干特定地下空间环境质量进行对比评判, 可对评语集各等级赋值, 以综合评价所得模糊隶属向量或其归一向量为权对赋值向量加权, 以加权值为数量形成综合评价结果, 以便进行多对象评价结果的比较。

4.3.2 对评语等级赋值加权进行综合评定 对评语集  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优秀, 良好, 一般, 差}\}$  中各评价等按照一定的目的要求分别赋予一定数量值, 用评语值向量表示  $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$ , 利用前面模糊综合评价最终结果, 即评价对象在评语集上模糊隶属度向量  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ , 利用如下几种加权法求数量形式的综合评价结果。

1) 简单加权法 计算  $S = BQ^T = \sum_{l=1}^4 b_l q_l$  为最后一个数值形式表达的综合评价结果。

对于其他形式的模糊合成运算, 模糊多级综合评价结果向量不一定是归一的, 可采用归一化与乘方归一化加权法计算数值形式表达的综合评价结果。

2) 归一加权法 先将隶属度向量归一化, 即各分量分别除以各隶属度和, 设隶属度向量归一化后向量为  $B' = (b'_1, b'_2, b'_3, b'_4)$ , 评语集各等级赋值向量仍为  $Q$ , 则综合评价值为:  $S = B'Q^T = \sum_{l=1}^4 b'_l q_l$ 。

3) 乘方归一加权法 为了突出占优势的评语等级的作用, 可将计算的多级模糊综合评价隶属向量各分量先乘方, 再归一化, 设归一化向量为  $B'' = (b''_1, b''_2, b''_3, b''_4)$  利用式  $S = B''Q^T = \sum_{l=1}^4 b''_l q_l$ 。

对各评语等级赋值, 再以模糊综合评价所得隶属向量或其归一、乘方归一向量加权得到数值形式的综合评价结果, 它综合了各个等级评价结果, 可利用该数值大小对多个评价对象的评价结果进行比较分析。

## 5 城市地下空间综合单元环境质量模糊评价实例

山地地下空间的环境质量有很多因素组成, 我

们除对各单独因素作评价外, 更重要的是要善于考察地下空间环境的综合质量。本例是根据对重庆地铁一号线、永辉超市、沙坪坝地下购物广场三个工程环境质量诸多因素的调查, 给出地下空间特定环境质量综合评价指标体系中前两个层次指标。收回有效问卷共 100 份, 影响地下空间综合质量的因素调查结果如表 1~6 所示。(工程 1 为重庆地铁一号线, 工程 2 为永辉超市, 工程 3 为沙坪坝地下购物广场)

表 1 影响土木安全调查结果

		优秀	良好	一般	较差
结构安全性	工程 1	72	26	2	0
	工程 2	51	40	8	1
	工程 3	43	44	10	3
结构节约性	工程 1	56	34	10	0
	工程 2	58	36	6	0
	工程 3	60	35	3	2
结构美观性	工程 1	40	53	5	2
	工程 2	31	42	21	6
	工程 3	27	36	28	9
结构先进性	工程 1	67	28	5	0
	工程 2	33	38	23	6
	工程 3	30	42	26	2
结构建设难度	工程 1	63	34	3	0
	工程 2	29	35	25	11
	工程 3	38	40	19	3

表 2 影响节能调查结果

		优秀	良好	一般	较差
节能效益	工程 1	33	56	9	2
	工程 2	40	53	6	1
	工程 3	37	43	18	2
建设投资节约	工程 1	23	58	14	5
	工程 2	30	47	19	4
	工程 3	21	48	26	5
后期维护管理费用	工程 1	19	55	15	11
	工程 2	36	55	8	1
	工程 3	33	40	23	4
稳定性和使用寿命	工程 1	16	73	8	3
	工程 2	20	40	32	8
	工程 3	18	44	34	4

表 3 影响疏散与照明调查结果

		优秀	良好	一般	较差
水平疏散距离	工程 1	57	39	4	0
	工程 2	27	37	29	7
	工程 3	31	40	26	3
疏散有两个及以上出口	工程 1	88	12	0	0
	工程 2	12	36	40	12
	工程 3	20	38	36	6
方位显示系统	工程 1	79	19	2	0
	工程 2	33	41	23	3
	工程 3	27	39	29	5
应急疏散指示系统	工程 1	65	32	3	0
	工程 2	28	37	27	8
	工程 3	20	35	34	11

表 4 影响场景调查结果

		优秀	良好	一般	较差
功能适用性	工程 1	44	52	4	0
	工程 2	30	48	21	1
	工程 3	33	56	10	1
交通便捷性	工程 1	47	42	11	0
	工程 2	21	42	34	3
	工程 3	33	45	21	1
无压抑感(压抑度)	工程 1	38	44	15	3
	工程 2	33	41	20	6
	工程 3	20	45	27	8
无围压闭塞感(开敞度)	工程 1	37	46	13	4
	工程 2	19	42	26	13
	工程 3	23	44	27	6
符合人的尺度、考虑残疾人等(人性化)	工程 1	22	46	27	5
	工程 2	13	32	30	25
	工程 3	18	40	28	14
场所色彩、形态、文化氛围等的特色感	工程 1	30	52	17	1
	工程 2	22	48	23	7
	工程 3	19	37	28	16

表 5 影响通风与防潮调查结果

		优秀	良好	一般	较差
通风效果	工程 1	56	42	2	0
	工程 2	31	39	23	7
	工程 3	27	40	21	12
投资节约	工程 1	40	44	12	4
	工程 2	38	42	14	6
	工程 3	42	43	11	4

续表 5

		优秀	良好	一般	较差
后期维护管理费用	工程 1	19	55	15	11
	工程 2	36	55	8	1
	工程 3	16	73	8	3
稳定性和使用性寿命	工程 1	16	73	8	3
	工程 2	20	40	32	8
	工程 3	18	44	34	4
防潮、防结露效果	工程 1	65	33	2	0
	工程 2	51	36	11	2
	工程 3	40	39	17	4

表 6 影响人防与防灾调查结果

		优秀	良好	一般	较差
人防设施或异地人防	工程 1	37	48	13	2
	工程 2	36	45	14	5
	工程 3	37	46	12	5
防地震措施	工程 1	56	42	2	0
	工程 2	52	44	4	0
	工程 3	49	48	3	0
防泥石流、滑坡等地质灾害措施	工程 1	49	47	4	0
	工程 2	50	42	8	0
	工程 3	47	50	3	0
防洪灾措施	工程 1	42	47	10	1
	工程 2	39	43	12	6
	工程 3	29	38	25	8

以工程 1 为例:

第  $ijk$  个单因素相应于第  $l$  等级评语的隶属度为

$$r_{ijkl} = \frac{\text{评 } ijk \text{ 因素为 } v_l \text{ 等级的人数}}{\text{评委总人数 } m}$$

$$(i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, n_i,$$

$$k = 1, 2, \dots, n_{ij}, l = 1, 2, 3, 4)$$

各二级因子对一级评语的隶属度如表 7~12 所示。

表 7 土木安全二级因子指标评价得分

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
结构安全性	0.72	0.26	0.02	0
结构节约性	0.56	0.34	0.10	0
结构美观性	0.40	0.53	0.05	0.02
结构先进性	0.67	0.28	0.05	0
结构建设难度	0.63	0.34	0.03	0



表 8 节能二级因子指标评价得分

	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
节能效益	0.33	0.56	0.09	0.02
建设投资节约	0.23	0.58	0.14	0.05
后期维护管理费用	0.19	0.55	0.15	0.11
稳定性和使用寿命	0.16	0.73	0.08	0.03

表 9 疏散与照明二级因子指标评价得分

	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
疏散满足规范且便捷安全	0.57	0.39	0.04	0
疏散有两个及以上出口	0.88	0.12	0	0
具有明确的方位显示系统	0.79	0.19	0.02	0
具有完善的应急疏散指示系统	0.65	0.32	0.03	0

表 10 场景二级因子指标评价得分

	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
功能适用性	0.44	0.52	0.04	0
交通便捷性	0.47	0.42	0.11	0
无压抑感(压抑度)	0.38	0.44	0.15	0.03
无围压闭感(开敞度)	0.37	0.46	0.13	0.04
符合人的尺度、考虑残疾人等(人性化)	0.22	0.46	0.27	0.05
场所色彩、形态、文化氛围等的特色感	0.30	0.52	0.17	0.01

表 11 风与防潮二级因子指标评价得分

	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
通风效果	0.56	0.42	0.02	0
投资节约	0.40	0.44	0.12	0.04
后期维护管理费用	0.19	0.55	0.15	0.11
稳定性和使用寿命	0.16	0.73	0.08	0.03
防潮、防结露效果	0.65	0.33	0.02	0

表 12 人防与防灾二级因子指标评价得分

	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>
人防设施健全或异地人防	0.37	0.48	0.13	0.02
防地震措施	0.56	0.42	0.02	0
防泥石流、滑坡等地质灾害措施	0.49	0.47	0.04	0
防洪灾害措施	0.42	0.47	0.10	0.01

对于结构安全性、结构节约性、结构美观性、结构先进性、结构建设难度分别给以权系数模糊集为

$$\alpha_{1j} = (0.25 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.15 \quad 0.2)$$

根据多级模糊综合评价原理,利用模糊合成运算  $\alpha_{ij} \cdot R_{ij}$  计算上一层次评价因素相对于评语集 V 的模糊隶属度向量

$$(r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4}) = (\alpha_{ij}(1), \alpha_{ij}(2), \dots, \alpha_{ij}(n_{ij})) \circ R_{ij}$$

即

$$r_{1j} = (0.25 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.15 \quad 0.2)$$

$$\begin{pmatrix} 0.72 & 0.26 & 0.02 & 0 \\ 0.56 & 0.34 & 0.10 & 0 \\ 0.40 & 0.53 & 0.05 & 0.02 \\ 0.67 & 0.28 & 0.05 & 0 \\ 0.63 & 0.34 & 0.03 & 0 \end{pmatrix} =$$

$$(0.5985 \quad 0.349 \quad 0.0485 \quad 0.004)$$

对于节能效应、建设投资、后期维护管理费用、稳定性与使用寿命分别给以权系数模糊集为

$$\alpha_{2j} = (0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25)$$

同理可得

$$r_{2j} = (0.2275 \quad 0.605 \quad 0.115 \quad 0.0525)$$

对于疏散满足规范且便捷安全、疏散有两个及以上出口、具有明确的方位显示系统、具有完善的应急疏散指示系统分别给以权系数模糊集为

$$\alpha_{3j} = (0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25)$$

同理

$$r_{3j} = (0.7225 \quad 0.255 \quad 0.0225 \quad 0)$$

对于功能适用性、交通便捷性、无压抑感(压抑度)、无围压闭感(开敞度)、符合人的尺度、考虑残疾人等(人性化)、场所色彩、形态、文化氛围等的特色感分别给以权系数模糊集为

$$\alpha_{4j} = (0.2 \quad 0.2 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.15)$$

同理有

$$r_{4j} = (0.3725 \quad 0.47 \quad 0.138 \quad 0.0195)$$

对于通风效果、投资节约、后期维护管理费用、稳定性与使用寿命、防潮与防结露效果分别给以权系数模糊集为

$$\alpha_{5j} = (0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2)$$

同理

$$r_{5j} = (0.392 \quad 0.494 \quad 0.078 \quad 0.036)$$

对于人防设施健全或异地人防、防地震措施、防泥石流、滑坡等地质灾害措施、防洪涝灾害措施分别给以权系数模糊集为

$$\alpha_{6j} = (0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25)$$

同理

$$r_{6j} = (0.46 \quad 0.46 \quad 0.072 \ 5 \quad 0.007 \ 5)$$

将得到的一级评价指标因素得分列于表 13。

表 13 一级评价指标因素得分

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
土木安全	0.598 5	0.349	0.048 5	0.004
节能	0.227 5	0.605	0.115	0.052 5
疏散与照明	0.722 5	0.255	0.022 5	0
场景	0.372 5	0.47	0.138	0.019 5
通风与防潮	0.392	0.494	0.077 8	0.036
人防与防灾	0.46	0.46	0.072 5	0.007 5

对于土木安全、节能、疏散与照明、场景、通风与防潮、人防与防灾分别给以权系数模糊集为

$$\alpha(i) = (0.2 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.2)$$

利用模糊合成运算  $\alpha(i) \cdot R_i$  得到评价指标  $X_i$  在评语集  $V$  上的模糊隶属度向量

$B = (b_1, b_2, b_3, b_4) = (\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(6)) \cdot R_i$   
即

$$B = (0.2 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.2) \cdot$$

$$\begin{pmatrix} 0.598 \ 5 & 0.349 & 0.048 \ 5 & 0.004 \\ 0.227 \ 5 & 0.605 & 0.115 & 0.052 \ 5 \\ 0.722 \ 5 & 0.255 & 0.022 \ 5 & 0 \\ 0.372 \ 5 & 0.47 & 0.138 & 0.019 \ 5 \\ 0.392 & 0.494 & 0.078 & 0.036 \\ 0.46 & 0.46 & 0.072 \ 5 & 0.007 \ 5 \end{pmatrix} =$$

$$(0.468 \ 875 \quad 0.435 \ 4 \quad 0.077 \ 225 \quad 0.018 \ 5)$$

给定评语向量值为  $Q = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)$ , 隶属度向量  $B$  归一化后变成

$$B' = (b'_1, b'_2, b'_3, b'_4) =$$

$$(0.468 \ 875 \quad 0.435 \ 4 \quad 0.077 \ 225 \quad 0.018 \ 5)$$

则综合评价值为:

$$S = B'Q^T = \sum_{i=1}^4 b'_i q_i = 100 \times 0.468 \ 875 + 80 \times 0.435 \ 4 + 60 \times 0.077 \ 225 + 40 \times 0.018 \ 5 = 87.093$$

类似地对工程 2、工程 3 作计算,最后比较它们的  $S$  值:

$$\text{工程 1 } S=87.093 \quad \text{工程 2 } S=81.134$$

$$\text{工程 3 } S=80.4765$$

由上述综合评价值  $S$  评判,工程 1 得分最高,环境质量最佳,工程 2 次之,再次是工程 3。

## 6 结论

本文对地下空间综合单元环境的特点和地下空间环境质量的 ESVA 评价方法作了简明的阐述,用

模糊数学方法来评价地下空间环境质量,不但叙述了模糊综合评判法的原理,而且列举了具体的例子,说明如何用模糊综合评判法对三个地下空间工程的环境质量予以简易的评价与比较。模糊综合评判法的优点使评判工作定量化、综合化、科学化,因而能获得相对合理的结果,并且计算工作简单,当环境因素较多时,也可用微机计算,也十分方便。本方法的简易评价只是撷取了影响地下空间综合单元环境质量的某几个影响因素,如有不完善之处,敬请指正。

## 7 进一步的讨论

本文提出的打造地下空间综合单元的理念和 ESVA 综合环境质量简易评价方法,一方面可以促进地上地下一体化的有机联系和动态平衡,实现地上与地下资源、人流物流、景观渗透、环境物理效益、空间集约利用等人居环境质量的综合提高;另一方面可以促进不同类型地下空间的连通性、灵活性、多功能性,以及应急防灾韧性等的提高。目前,如何实现地上地下空间单元的综合一体化、如何实现不同地下空间单元(如不同深度、不同功能、不同垂直交通方式与疏散等)的综合一体化,尚具有巨大的潜力和复杂的工作需要挖掘和开展,对应的相关研究和建设立法保障工作,也需要持续不断的完善和重视。

注释:

①中国气候变化信息网:<http://www.ccchina.gov.cn/cn/NewsInfo.asp?NewsId=13193>, 动态信息, 国外动态, 国外新能源和可再生能源节能政策及其启示。

②中国写字楼网:[http://www.chineseoffice.com.cn/z\\_jianzhu.asp?id=17707](http://www.chineseoffice.com.cn/z_jianzhu.asp?id=17707), 建筑世界, 可再生能源利用与建筑节能。

③由 Daniel 和 Boster 提出的美景度评判法 scenic beauty estimation 简称 SBE, 运用心理物理学 (psychophysical paradigm) 方法研究室外环境自然风景景观的技术, 如林区的林内和林外景观。

参考文献:

- [1] MARÍA JOSÉ, MARTÍNEZ-HARMS, RODOLFO GAJARDO. Ecosystem value in the western patagonia protected areas[J]. Nature Conservation, 2008, 16(2): 72-87.
- [2] MATTHEW DURINGTON, ANDREJ HOLM, DAVID PEDULLA, et al. Review essay-gated communities: perspectives on privatized spaces

- international[J]. Urban and Regional Research, 2011, 35(1):207-18.
- [3] MARK W H, ALAN T M. Excess commuting and the modifiable areal unit problem[J]. Urban Studies, 2002, 39(1): 131-139.
- [4] DANIEL S, PATRICK H. Legacies, change and transformation in the post-apartheid city: towards an urban sociological cartography[J]. International Urban and Regional Research, 2011, 35(1): 78-109.
- [5] SMITH S K, CODY S. Evaluating the housing unit method: a case study of 1990 population estimates in Florida[J]. American Planning Association, 1994, 60(2):209-221.
- [6] ELAINE B S. Need, awareness, and contacting propensity: study of a city with a central complaint unit [J]. Urban Affairs quarterly, September 1984, 20(1): 22-30.
- [7] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998(1):112-113.
- [8] 钱七虎. 城市可持续发展与地下空间开发利用[J]. 地下空间与工程学报, 1998(2):67-74.
- [9] 钱七虎, 戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4):649-655.
- [10] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [11] 张永兴, 王桂林, 胡居义. 岩石洞室地基稳定性分析方法与实践[M]. 科学出版社, 2005.
- [12] 耿永常. 城市地下空间结构[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005, 06.
- [13] 吉迪恩 S 格兰尼, 尾岛俊雄. 城市地下空间设计[M]. 许方, 于海漪译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [14] 束昱, 柳昆, 张美靓. 我国城市地下空间规划的理论研究与编制实践[J]. 规划师, 2007(10).
- [15] 张洁. 城市公园植物景观美学评价研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.
- [16] 防水[S]. 北京: 知识产权出版社, 2006.
- [17] 防火与消防[S]. 北京: 知识产权出版社, 2006.
- [18] 防震[S]. 北京: 知识产权出版社, 2006.
- [19] 城市抗震防灾规划管理规定[S]. 建设部, 2003, 09.
- [20] 民用建筑设计通则: JGJ 37—87[S].
- [21] 建筑设计防火规范: GBJ 16—87(2001 修订版)[S].
- [22] 高层民用建筑设计防火规范: GB 50045—95(2001 年修订版)[S].
- [23] 建筑物防雷设计规范: GB 50057—94[S].
- [24] 香港规划标准与准则——摘要[M]. 香港特别行政区政府规划署.
- [25] 城市规划条例(第 131 章). TOWN PLANNING ORDINANCE(CAP, 131)[M].
- [26] 何飞. 山地城市地下空间的空间特性与活力研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(6):32-33.
- [27] 潘鼎元. 地下空间的环境质量与模糊数学综合评价法[J]. 地下空间, 1987(3):21-34.

(编辑 吕建斌)