

地下空间研究丛书/“十二五”国家重点图书出版规划项目 主编 陈志龙

# 城市地下空间资源评估与需求预测

陈志龙 张平 龚华栋 编著

东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

地下空间研究丛书

陈志龙 主编

# 城市地下空间资源评估与需求预测

陈志龙

张 平 编著

龚华栋



东南大学出版社

SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

南京 · 2015

## 内容提要

城市地下空间资源评估与需求预测作为城市地下空间规划一项关键的基础性工作,对科学合理规划城市地下空间具有重要的现实意义。本书提出了城市地下空间资源评估与需求预测理论,构建了地下空间资源质量、需求和价值评估的指标体系。通过实例分析,对城市中心区、城市中央商务区、城市轨道沿线、历史街区的地下空间需求预测进行了系统研究,确定了不同类型的需求预测方法,为城市地下空间的资源有效利用提供了理论支撑。

本书可供城市规划、地下空间规划与设计,以及建筑设计等专业人员和高等院校相关专业人员学习、参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

城市地下空间资源评估与需求预测 / 陈志龙等编著

—南京:东南大学出版社,2015.11

(地下空间研究丛书 / 陈志龙主编)

ISBN 978-7-5641-6055-5

I. ①城… II. ①陈… III. ①城市规划—地下建筑物—资源评估 ②城市规划—地下建筑物—需求—预测 IV. ①TU984.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 240017 号

书 名:城市地下空间资源评估与需求预测

编 著 者:陈志龙 张 平 龚华栋

责任编辑:徐步政 孙惠玉

编辑邮箱:894456253@qq.com

文字编辑:辛健彤

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼 2 号 邮 编:210096

网 址:<http://www.seupress.com>

出 版 人:江建中

印 刷:江苏凤凰数码印务有限公司

排 版:南京新洲印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:11 字数:247 千

版 印 次:2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-6055-5

定 价:39.00 元

经 销:全国各地新华书店

发行热线:025-83790519 83791830

---

\* 版权所有,侵权必究

\* 本社图书如有印装质量问题,请直接与营销部联系(电话:025-83791830)

# 目 录

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| <b>1 绪论</b>                | / 1   |
| 1.1 城市发展对地下空间的需求           | / 1   |
| 1.2 城市地下空间开发必要性            | / 2   |
| 1.3 城市地下空间开发内在动因           | / 3   |
| <b>2 城市地下空间资源评估与需求预测理论</b> | / 5   |
| 2.1 国内外研究现状                | / 5   |
| 2.2 城市地下空间资源质量评估           | / 9   |
| 2.3 城市地下空间需求预测             | / 33  |
| 2.4 城市地下空间价值               | / 40  |
| <b>3 城市中心区地下空间需求预测</b>     | / 45  |
| 3.1 城市中心区概述                | / 45  |
| 3.2 国内外城市中心区地下空间开发利用现状     | / 49  |
| 3.3 城市中心区地下空间功能分类          | / 54  |
| 3.4 城市中心区地下空间的开发强度         | / 55  |
| 3.5 城市中心区地下空间需求预测方法        | / 56  |
| 3.6 郑州市中心城区地下空间需求预测        | / 57  |
| <b>4 城市中央商务区地下空间需求预测</b>   | / 84  |
| 4.1 城市中央商务区概述              | / 84  |
| 4.2 国内外城市中央商务区地下空间开发利用现状   | / 87  |
| 4.3 城市中央商务区地下空间功能分类        | / 93  |
| 4.4 城市中央商务区地下空间的开发强度       | / 95  |
| 4.5 城市中央商务区地下空间需求预测方法      | / 95  |
| 4.6 武汉王家墩商务区地下空间需求预测       | / 96  |
| <b>5 城市轨道沿线地下空间需求预测</b>    | / 109 |
| 5.1 我国轨道交通发展现状             | / 109 |
| 5.2 国内外轨道交通地下空间开发利用现状      | / 110 |
| 5.3 轨道交通沿线地下空间开发的基本原则      | / 113 |
| 5.4 轨道交通沿线地下空间开发类型         | / 114 |

- 5.5 轨道交通沿线地下空间开发土地利用特征 / 116
- 5.6 轨道交通沿线地下空间需求预测方法 / 117
- 5.7 深圳轨道交通沿线地下空间需求预测 / 118

## 6 历史街区地下空间需求预测 / 131

- 6.1 历史街区概念 / 131
- 6.2 国内外历史街区地下空间开发利用 / 132
- 6.3 历史街区地下空间开发重要性 / 138
- 6.4 历史街区地下空间开发的原则 / 140
- 6.5 历史街区地下空间开发功能需求 / 140
- 6.6 历史街区地下空间资源质量评估 / 143
- 6.7 历史街区地下空间需求量预测 / 154
- 6.8 扬州老城区地下空间需求预测 / 162

图片来源 / 169

表格来源 / 171

# 1 绪论

城市建设离不开城市规划,城市地下空间开发利用作为城市建设不可忽视的组成部分,同样也离不开规划。从 20 世纪 90 年代中期起,我国北京、上海、深圳、南京、杭州等 20 多个大中城市先后编制了地下空间专项利用规划,对城市未来地下空间开发的规模、布局、功能、开发深度、开发时序等做了较为全面系统的规划。对地下空间资源进行开发利用的迫切需求从一个侧面反映了我国城市生活中越来越被关注的种种矛盾,同时也表明地下空间作为新型城市空间资源,其在集约化利用土地、缓解交通及环境矛盾,实现城市和谐发展中的重要作用在逐渐被认识并加以利用。我国不少城市在近年来加速的工业化与城市化进程中出现用地结构松散、低密度扩张、人均用地指标普遍超标等现象。目前新一轮城市规划的编制和修编正在全面展开,这为在我国地下空间规划的编制和实践中探索与地面规划接轨、实现城市上下部空间系统和谐整合提供了良好的契机。而对地下空间的利用功能、建设规模量及布局形态等方面进行前期需求预测分析,是合理配置协调上下空间资源的重要途径,是地下空间规划编制、制定规划控制指标的关键基础性研究工作。在我国大规模展开地下空间规划编制实践的迫切需求下,探索科学合理的地下空间需求预测体系与方法将具有重要的理论指导价值与现实意义。

## 1.1 城市发展对地下空间的需求

城市地下空间的开发利用不是孤立的或偶然的,而是城市发展到一定阶段的产物,受城市发展的客观规律所支配,同时也受到世界政治、经济、军事形势变化,以及各国地理位置、经济条件上的差异的影响。尽管各国各地区各城市在地下空间利用上千差万别,各有特色,但是有一个共同点,就是只有当城市在现代化发展过程中出现了对地下空间的需求,城市又具备了开发的能力,这时为了满足这种需求而进行一定程度的开发才是合理的。一般来说,当城市出现以下几种情况时,应被视为产生了对地下空间开发的客观需求<sup>[1]</sup>:

(1) 城市发展用地严重不足,地面空间容量接近饱和,容积率过高,建筑密度过大,高层建筑过多,导致绿化率过低和环境恶化。与此同时,土地利用的效率不高,城市不断沿水平方向向四周呈粗放式扩展。在这种情况下,开发利用地下空间有可能在不增加或少增加城市用地的条件下使城市空间容量适当扩大,使城市环境得到一定的改善,土地利用效率有所提高,城市呈集约型发展。

(2) 城市交通矛盾发展到严重程度,经常发生大面积、长时间交通堵塞,单纯靠在地面上增加路网和拓宽街道已不可能疏导过大的车流量和人流量。这时,即使要付出更高的代价,也只能通过修建地下铁道、地下高速路和地下步行道以缓解地面交通矛盾。此外,当车辆的数量增多到不可能在道路两侧占路停放,地面上又没有多余土地可供建造

多层停车库时,地下停车场可以满足大量停车的需要。

(3) 地下交通的发展,必然导致沿线或周围土地的升值,因此在地下交通设施沿线,特别是在大站和线路交汇的节点,就产生了开发地下商业空间的吸引力。由于交通与商业的互动作用,可以产生很高的经济效益,既可在一定程度上弥补地下交通设施经济效益之不足,又可与地面上的商业形成互补,使城市更加繁荣。

(4) 城市市政设施严重落后,容量不足,设备和管线陈旧,事故频发。市政管线多分散直埋,占用价值最高的浅层地下空间;市政设施多建在地面,占用土地,有的对环境造成二次污染,有的对城市安全构成隐患。同时,管线和地面设施遇重灾时很容易被破坏,修复需要较长时间,影响城市交通和居民生活。

(5) 当城市受到战争或其他自然和人为灾害的威胁时,开发利用地下空间可以有效地起到综合防灾减灾的作用,有些作用是地面空间无法替代的。

(6) 如果城市处于不良的气候条件下,如严寒、酷暑、风沙、多雨雪等,开发利用地下空间可使相当大部分城市活动摆脱不良气候的影响。

(7) 为了城市的安全,需要建立能源和物资的战略储备,供发生战争和灾害时使用,部分也可用于平时的周转。地下空间的封闭、隐蔽、热稳定等特性,对于建立能源和物资储备系统最为有利。

## 1.2 城市地下空间开发必要性

充分利用地下空间有利于扩大城市的空间容量,提高城市的集约程度,消除城市人车混杂的局面,使交通更加顺畅,商业更加繁荣,有利于增加地面绿地,改善城市的生态环境,提高人们的生活的环境质量和生活的便利性,这些都对创建和谐城市、实现城市的和谐发展有着重要的现实意义<sup>[2]</sup>。

(1) 缓解城市交通矛盾。交通是城市功能中最活跃的因素,是城市和谐发展的关键问题。由于我国城市化进程加快,城市人、车激增,而基础设施相对滞后,行车缓慢、交通堵塞的问题在很多城市尤为突出。如北京市自 20 世纪 90 年代中期以来,机动车拥有量年均增长率超过 10%,目前已达 180 多万辆,这使干道平均车速比 10 年前降低 50% 以上,而且正以每年递减 2 km/h 的速度继续下降,市区 183 个路口中,严重阻塞的达 60%,阻塞时间长达半个小时。然而在城区新建道路代价昂贵,高架道路不仅影响城市景观,且产生的噪音和震动也让人难以忍受。发达国家的经验表明,只有发展高效率的地下交通,形成四通八达的地下交通网,才能有效解决交通拥挤问题。加拿大蒙特利尔地下交通网是由东西两条地铁轴线、南北两条地铁轴线及环形地铁线和伸向城区中心地下的两条郊区火车道组成的。城区中心的 60 多个高层商业、办公及居住建筑综合大厦通过 150 个地下出入口及相应地下通道与这个地下交通网络的站台相连接。中心区以外的人流上班、进行公务及商业活动时,通过郊区火车或由自备汽车到达中心区边缘的地铁车站,自备汽车停在附近的地下停车场,然后乘地铁到达目的地车站,有效减少了城区中心区的机动车数量,改善了交通环境。我国北京、上海、广州等特大城市的高效、快速、大运量的地铁网络充分证实了地下铁路和公路能够在上下班高峰时有效疏散人流和车流,缓和地面交通。

为解决“停车难”的问题,在很多发达国家的现代化城市主要是修建地下停车库。地下停车库的突出优点是容量大、用地少、布局接近服务对象。因此,在地下街、地下综合体的建设中,应当使停车场的面积保持适当的比例,特别是结合地铁车站修建地下库,方便换乘,减轻城市中心区的交通压力,既提高地铁的利用率,又减轻了由汽车造成的公害。风景秀丽的瑞士,为解决停车问题,在日内瓦湖底修建了五层的地下停车场,虽然工程量巨大,但保护了生态环境,综合效费比高。

(2) 改善城市生态环境。我国城市的不均衡发展导致城市大气污染严重,绿地面积大量减少,水资源缺乏,噪音污染严重超标。这些恶劣的生存环境对人们身心健康造成严重伤害,城市地下空间开发,将部分城市功能转入地下可以有效减少大气、噪音、水等污染,节约城市用地,改善交通拥挤,增加绿化面积,提高城市环境质量,是实现城市、人与环境和谐发展的重要方法。

国外城市地下空间开发的一个重要观点是:把一切可转入地下的设施尽可能逐步转入地下。世界各国开发利用地下空间的实践表明,可转入地下的设施包括交通设施、市政基础设施、商业设施、文化娱乐体育设施、防灾设施、储存以及生产设施、能源设施、研究实验设施等。如美国的波士顿拆除穿过市中心的六车道高架路,改为建设八车道至十车道的地下高速路,原有的地面变成林荫路和街心公园。

(3) 提高城市综合防灾能力。城市作为一定区域的经济中心区和人口聚集区,一旦遭到自然灾害或人为毁坏往往造成巨大损失。从自然灾害方面看,我国是一个地震多发、水旱风灾频繁的国家,在多种自然和人为灾害的威胁下,我国城市总体抗灾能力还相当脆弱,成为城市和谐发展严重的制约因素。加强城市总体抗灾能力,应在现有条件下采取必要的措施,有效抗御和减轻灾害的破坏,并为救灾及灾后恢复创造有利的条件。地下空间处于一定的土层或岩层覆盖下,具有很强的隐蔽性、隔离性和防护性,具有多种抗御外部灾害的功能,如果形成体系和网络,具有能长期坚持和机动性好等优势。因此,在多种综合防灾措施中,应充分调动城市地下空间的防灾潜力,建立以地下空间为主体的城市综合防灾空间体系,为城市居民提供安全的防灾空间。

### 1.3 城市地下空间开发内在动因

(1) 城市集约化发展。城市地下空间具有较大的容量,可为城市提供充足后备空间资源,城市可开发地下空间资源一般是城市总面积乘以开发深度,再乘以 0.4 的系数。如果取合理开发深度为 100—150 m,当城市平均容积率为 80% 时,可将城市空间扩大 26—40 倍,其数量相当可观<sup>[3]</sup>。据一项研究成果,北京市旧城区 62.5 km<sup>2</sup> 范围内浅层地下空间资源,可供合理开发面积为 41.2 km<sup>2</sup>;当开发深度为 10 m,合理开发系数为 0.4,地下空间资源量为 1.65 亿 m<sup>3</sup>;以地下二层为计,可提供建筑面积 0.55 亿 m<sup>2</sup>,比旧城区现有建筑面积 0.42 亿 m<sup>2</sup> 增加了 0.13 亿 m<sup>2</sup>。此外,《大连市城市地下空间利用规划纲要》中考虑近期开发浅层地下空间(深度 30 m),开发面积为城市建设用地的 30%,乘以 0.4 可利用系数,则地下空间开发资源量为 5.8 亿 m<sup>3</sup>,可提供建筑面积 1.94 亿 m<sup>2</sup>,超过现有大连市房屋建筑面积(5 921 万 m<sup>2</sup>)。由此可见城市地下空间资源的巨大潜力<sup>[4]</sup>,如果得



到合理开发,做到在有限的土地面积上开发尽量多的使用空间,必将产生难以估量的经济效益,并在很大程度上加强城市的集约化发展。

(2) 城市地下空间规划编制工作广泛开展。当前,中国地下空间开发已经进入了一个加速期,地下空间规划编制得到了充分重视。很多城市将地上、地下统筹规划,编制各个层次的法定性文件,指导地下空间合理、高效、可持续地利用。中国城市地下空间规划起步于 20 世纪 90 年代初期,其理论基础来源于城市规划。在实践上,将一系列专业规划如人防设施规划、地铁规划、市政设施规划加以整合。国内目前编制城市地下空间总体规划的城市有北京、上海、重庆、天津、深圳、南京、青岛、杭州、厦门、常州等 40 多个,规划中明确了地下空间开发功能、规模和需求,这些规划将成为指导该城市地下空间利用的法定性文件,为下一阶段科学合理地开发利用地下空间奠定基础。此外,许多城市在旧城改造和新城建设时,充分认识到开发利用地下空间的重要性,结合地面规划编制了地下空间控制性详细规划<sup>[5]</sup>,如:北京朝阳 CBD、杭州钱江新城核心区、武汉王家墩商务区等,通过控制性详细规划的编制,对该区域地下空间的开发深度、强度、需求、规模等进行了确定,从而提出了地下空间布局结构和形态。如:杭州钱江新城地下空间控制性详细规划,明确了地下空间开发量为 260 万  $\text{m}^2$ ,以波浪文化城为核心,以地铁换乘站为重点,形成十字形地下空间结构,开发深度为 30 m。

#### 参考文献

- [1] 王敏. 城市发展对地下空间的需求研究[D]. 上海:同济大学,2006.
- [2] 陈志龙,王玉北. 城市地下空间规划[M]. 南京:东南大学出版社,2005.
- [3] 马仕. 上海城市发展对地下空间资源开发利用的需求预测研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [4] 刘俊. 城市地下空间需求预测方法及指标相关性实证研究[D]. 北京:清华大学,2009.
- [5] 路姗. 大城市和谐发展对地下空间资源开发利用的需求预测研究[D]. 上海:同济大学,2009.

## 2 城市地下空间资源评估与需求预测理论

城市地下空间开发利用是城市建设和发展不可缺少的组成部分。地下空间需求量是地下空间规划中一个关键参量和重要依据。城市是一个大而复杂的系统,城市地下空间仅是城市系统中的一个子系统,对城市地下空间需求量预测,不可避免地要综合城市系统中一系列复杂的问题,并给予较完善的解决。

城市地下空间需求预测目的可以简要概括为以下两点:

- (1) 改变城市发展的模式,拓展城市空间容量,完善城市功能,改善城市环境,提升城市活力与品质。
- (2) 对城市地下空间需求规模做一个科学的估算和预测,引导城市地下空间资源能在一个较为科学合理的限度和范围内进行有序开发。

### 2.1 国内外研究现状

#### 1) 国外研究现状

R. Monnikhof<sup>[1]</sup>等提出定性判断设施适合建在地上还是地下的方法,认为影响地下空间开发需求的因素包括:人口密度、建筑密度、就业密度、交通强度、功能混合性等。

Nikolai Bobylev<sup>[2]</sup>针对德国柏林亚历山大广场地下空间开发利用现状,根据地下空间开发密度、城市公共空间和绿地面积、每日通勤人数等因素,划分大小两个地下空间开发区域。通过对两个区域内地下空间数量、开发深度、开发功能和建造时间等指标的分析,结合城市开发空间、道路和建筑区域所占土地用地比例,提出亚历山大广场内地下空间开发需求总量、不同功能所占比例和不同开发深度地下空间可利用资源量。

Jaakko Ylinen<sup>[3]</sup>提出以岩石区、环境影响和投资等因素对地下空间资源进行评估分类,并对城市地下空间功能可开发深度提出具体建议。

D. J. Boivin<sup>[4]</sup>研究加拿大魁北克城市地下空间开发利用时,用地图来表达地下土体和基岩的厚度、倾向等空间分布信息,并以此进行可视化辅助决策。

J. Edelenbos<sup>[5]</sup>等对荷兰城市地下空间进行评价时,提出将投资、内外部的安全性对环境和居民的影响因素均列入评价指标。

T. Hulme and J. Zhao<sup>[6]</sup>将地质、水文、环境、心理、地面发展、社会、经济以及政治等因素均作为评估的因素,对新加坡地下空间规划需求预测和位置的选择进行研究。

S. Durmisevic and S. Sariyildiz<sup>[7]</sup>通过对地下车站的分析,利用神经网络分析法处理数据,得出可综合考虑多个影响因子的评估方法。

J. Pasqual and P. Riera<sup>[8]</sup>从经济学角度,推出地下空间暗含价格,并提出评估具体城市地下空间价格的实用性程序,该程序适用于三维环境,并可用于经济决策及城市规划等方面。

P. M. Maurenbrecher and J. Herbschleb<sup>[9]</sup> 基于工程地质数据库对荷兰阿姆斯特丹隧道建设适宜性进行分析,通过数据库和地理程序制定地形地质专题图,为隧道的规划提供参考依据。

Kimmo Ronka<sup>[10]</sup>等提出根据岩层区建设难度的地下空间分类,建立岩层区地下空间资源开发利用适宜性的评价模型和需求预测模型。

J. Taboada<sup>[11]</sup>等针对矿山采石场的规划,建立地下岩体质量和需求指标,利用 GIS 技术对不同质量的区域进行划分和需求预测。

## 2) 国内研究现状

陈立道等<sup>[12]</sup>对上海市地下空间需求量进行了预测。以城市人口为参数,通过预测得到未来年份的城市人口,根据各类指标计算人均总用地量,两者相乘得到各年用地总需求量,对比各年市区实际土地面积,得到地下空间总需求量。1997 年,陈立道等<sup>[13]</sup>提出地下空间总体规划应运用系统工程方法进行,其中地下空间开发预测内容包括:住宅小区地下空间、城市地下交通、城市地下公共设施、地下管线、人防工程、城市经济条件、地下空间开发技术发展等。人防工程发展预测可采用仿真模型方法研究人防建设规模。对城市住宅小区、城市交通、公共设施、地下管线等的地下空间需求预测,可采用相关树法、数学模型预测方法、趋势外推法、专家集体预测法。陈立道<sup>[13]</sup>提出的两个观点是地下空间需求预测方法研究的基本出发点:一是采用系统工程方法;二是各分项的需求预测可采用数学模型预测法。

陈志龙等<sup>[14]</sup>提出预测地下空间需求量的“生态法”,依据生态城市指标推导城市空间总需求量,减去地面空间量得到地下空间需求量。“生态法”模型将生态城市目标引入需求预测,明确城市地下空间需求预测不能忽视城市发展目标的导向作用。采用专家问卷调查法得到地下空间需求量的 5 个影响因素:地面容积率、土地利用性质、区位、轨道交通、地下空间现状。基于这 5 个因素建立需求预测模型<sup>[15]</sup>,对模型中的地下空间需求强度指标,采用专家系统经验赋值法来标定。

童林旭、祝文君<sup>[16]</sup>在厦门市地下空间开发利用规划的编制中,采用了分系统单项指标法预测厦门城市地下空间需求量,其中居住区需求量分别以居住区新增建筑量和人口增长规模两个指标进行估算,地下公共设施需求量分别以当前年公共设施建设量和公共设施用地发展规模进行估算校核,此外还对其他系统、区域、设施等的需求规模进行估算,并得到城市总体地下空间需求量。该方法是对系统工程方法及数学模型预测方法的综合应用,方法应用的关键在于单项指标的标定。

罗兰<sup>[17]</sup>通过实证调查研究手段,选取了日本东京 7 条地铁线,对沿线各站域范围地下空间开发强度、轨道交通客流、土地功能类型、容积率、地价等指标进行数据调查和多元线性回归分析,验证和确定站域地下空间开发强度和用地类型、客流量、地价综合指标的相关性。基于理论探讨和实证调查研究结果,构建基于地铁站域类型的地下空间功能适宜性以及开发强度等级规划要素的指标体系。

俞泳等<sup>[18]</sup>对地下公共空间和城市活动指标的关联性进行研究,分析地下公共空间开发时机与人均国民生产总值、城市规模、城市气候、交通量,以及地下公共空间开发量与地铁建设量、零售总额、交通量、容积率等指标的关系,为大规模地下公共空间开发提供

决策依据。

刘俊<sup>[19]</sup>针对影响地下空间开发强度的土地—交通特征因素,借鉴城市空间经济学相关理论,对主要的土地—交通特征因素——地价、容积率、用地类型、轨道交通量的影响机理进行分析,表明地价是推动地下空间开发的主要经济动力,用地类型和客流量反映人的活动方式所对应的地下空间功能特征和需求强度,归纳影响地下空间开发强度的土地—交通特征指标。

黄玉田等<sup>[20]</sup>将北京市中心区地下空间资源按地下深度及城市功能的适用性划分为5个级别,并基于因子分析和灰色评估法对北京市中心区地下空间资源质量和需求预测进行分析和评估。

童林旭<sup>[21]</sup>对北京二环以内(涉及原东城、西城、崇文、宣武等4区)6 215 km<sup>2</sup>范围内的道路、广场、空地、绿地、水面、建筑物、文物古迹等的占地面积进行调查,并基于平面面积分析方法对调查区内地表以下10 m内浅层单建工程、地道、防空地下室、公用设施管道、地下铁道、人行过街地道等地下工程所占有地下空间面积进行调查,将调查区内地面与地下空间保留空间范围、可开发利用的地下空间范围相叠加,得到北京市可供开发的地下空间范围(以面积表达)的分析与评估结果。

姜云等<sup>[22]</sup>提出城市地下空间容量评估基础研究,包括指标体系、评估模型、评估平台与评估示范等四个方面,并且分析城市地下空间开发利用容量评估指标体系构建的原则,并基于层次分析法建立容量评估模型。

综上所述,归纳总结国内地下空间规划需求预测方法主要有以下几种<sup>[23]</sup>:

(1) 功能需求预测法

功能需求预测法是根据城市地下空间使用功能类型进行分类,并对其功能进行细化,根据不同类型地下空间功能分别进行量的确定和预测,得出地下空间需求规模,根据城市发展需求确定其地下空间规划总量,技术路线如图 2-1 所示。

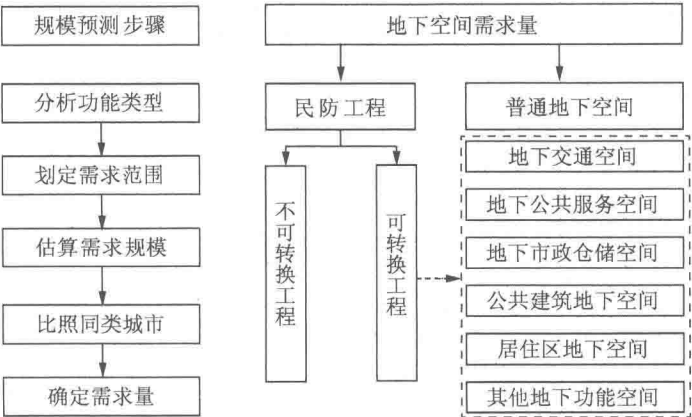


图 2-1 地下空间功能需求预测法技术框架

(2) 建设强度预测法

建设强度预测法是通过地面规划建设强度计算城市地下空间需求量,即上位规划和

建设要素影响和制约地下空间开发规模与强度,将用地区位、地面容积率、规划容量等规划指标归纳为主要影响因素,并在此基础上将城市规划范围内建设用地划分为若干地下空间开发层次进行需求规模预测,剔除规划期内保留的用地,确定各层次范围内建设用地新增地下空间容量,得出城市地下空间需求总量,其技术路线如图 2-2 所示。

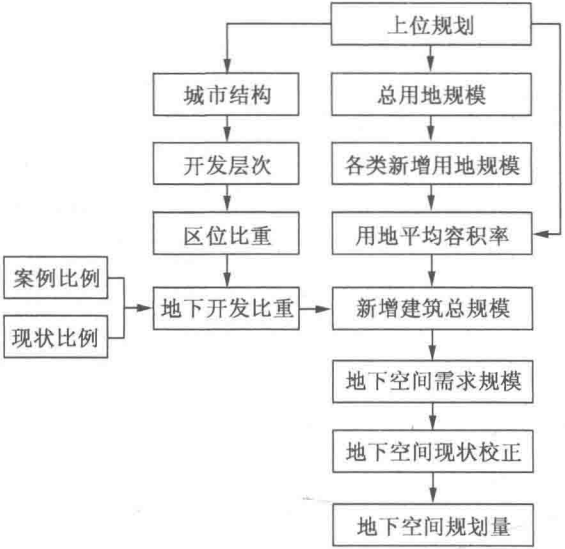


图 2-2 地下空间建设强度预测法技术框架

### (3) 人均需求预测法

城市规划用地人均指标分为:人均居住用地、人均公建用地、人均绿化用地、人均道路广场用地等,在此基础上相加得到人均生活居住用地面积。根据城市总体规划中城市生活居住用地所占城市总用地比例,推算人均用地规模;结合规划人口规模,计算得到城市地下空间需求总量。

### (4) 综合需求预测法

综合需求预测法主要从城市区位性需求、系统性需求和设施性需求等三个方面综合计算得出城市地下空间需求规模。

城市区位性需求是在城市规划中片区区块化功能分区,包括:城市中心区、居住区、旧城改造区、城市广场和大型绿地、历史文化保护区、工业区和仓储区,以及各种特殊功能区。

系统性需求主要是基础设施和公共设施,包括:地下动静态交通、物流设施、市政公用设施、物资与能源储备等。

设施性需求包括各类公共设施,如:商业、金融、办公、文娱、体育、医疗、教育、科研等大型建筑,以及各种类型地下贮库等。其技术路线如图 2-3 所示。

### 3) 国内外研究发展趋势

从国内外城市地下空间资源评估和需求预测方面分析,主要表现以下几个方面<sup>[24]</sup>:

(1) 研究目的由地下空间资源对城市功能类型(如:交通、市政、商业、文化娱乐、防

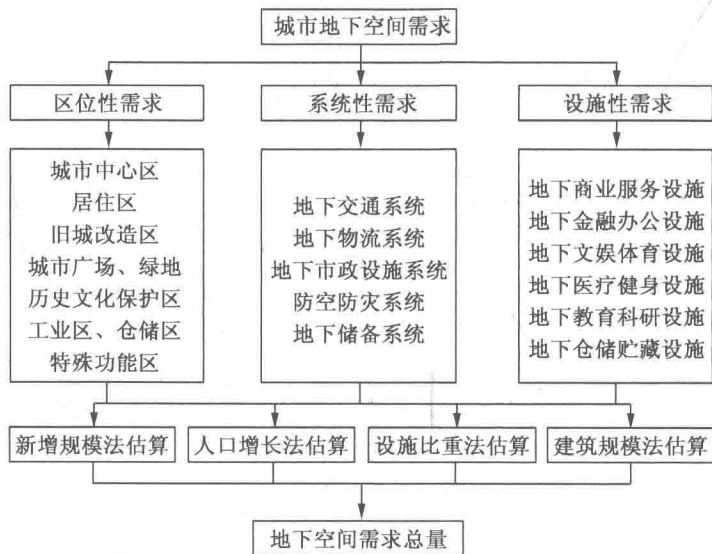


图 2-3 地下空间综合需求预测法技术框架图

灾、仓储、生产、居住等)的适应性评估向定量表征地下空间利用资源量、价值的方向发展。

(2) 地下空间资源量的内涵方面不断拓展,由最初描述一定科技水平下的地下空间特征的资源量,发展为入地协调条件下的能适应城市功能的人类可开发利用的容量。

(3) 研究内容由地下空间适应性影响因素(如:投资、内外部安全性、环境、心理等)及其适应性的评估发展为地下空间开发利用容量影响因素(如地面空间容量、地下已开发利用空间容量)及其开发利用容量和程度的综合评估。

(4) 研究方法,由定性分析向定量分析方向发展,航空遥感、AutoCAD、GIS、3D、FDS及数学模型开始用于地下空间资源评估和需求预测等方面。

(5) 研究体系趋向于动态化,地下空间资源的过去、现状和将来的演变信息建立于全面调查和评估的平台上,可以动态更新和监控,并以此成果建立初步的地下空间资源数据库和地理信息系统,实现城市地下空间信息化。

## 2.2 城市地下空间资源质量评估

地下空间资源质量通常指地下空间资源可开发利用程度的综合评价指数,可用综合指标评价后的相对分数或分级表示。地下空间资源质量评估可作为地下空间提供潜在可利用资源供给方面的依据。由于影响地下空间资源质量评价的因素较多,且各因素的属性、重要度和可比性均不相同,在进行评估和度量时,具有较大不精确性和主观经验性。因此,地下空间资源质量评价和择优是一类模糊环境下复杂系统的多层次、多属性的决策问题。

模糊综合评价模型是以模糊变换理论为基础,以模糊推理为主的定性和定量相结

合、精确与非精确相统一的分析评判方法。所谓综合评判,是在全面考虑各种相关影响因素的情况下,对评价对象进行全面评价。其优点是:数学模型简单,容易掌握,对多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好。在实际中,由于地下空间资源综合质量影响因素大多具有模糊性,为了能够得到相对合理的综合评判结果,在对地下空间资源质量评估时采用模糊综合评判的方法。

根据模糊数学理论<sup>[25]</sup>,设评价对象集  $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ , 质量因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 称  $u_i$  为质量因子, 评价等级集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , 通常, 对每个质量因子都有统一的标准, 并且多以数字的形式出现, 质量评价标准可以给出等级的指标, 也可以是等级的范围。如表 2-1 所示, 表中括号表示以等级范围给定的标准。表中  $a_{ij}$  表示第  $i$  个质量因子属于第  $j$  级的指标是  $\geq a_{ij}$  或  $\leq a_{ij}$ , 由于评价对象  $x_i$  不同质量因子往往隶属不同等级, 因此, 对于评估应建立隶属函数及模糊关系矩阵。

表 2-1 质量因子等级表

| 质量因子      | 评 价 集                                         |                                               |     |                                                     |                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|           | $v_1$                                         | $v_2$                                         | ... | $v_{m-1}$                                           | $v_m$                                           |
| $u_1$     | $a_{11}$<br>( $a_{10} \sim a_{11}$ )          | $a_{12}$<br>( $a_{11} \sim a_{12}$ )          | ... | $a_{1,m-1}$<br>( $a_{1,m-2} \sim a_{1,m-1}$ )       | $a_{1m}$<br>( $a_{1,m-1} \sim a_{1,m}$ )        |
| $u_2$     | $a_{21}$<br>( $a_{20} \sim a_{21}$ )          | $a_{22}$<br>( $a_{21} \sim a_{22}$ )          | ... | $a_{2,m-1}$<br>( $a_{2,m-2} \sim a_{2,m-1}$ )       | $a_{2m}$<br>( $a_{2,m-1} \sim a_{2,m}$ )        |
| $\vdots$  | $\vdots$                                      | $\vdots$                                      |     | $\vdots$                                            | $\vdots$                                        |
| $u_{n-1}$ | $a_{n-1,1}$<br>( $a_{n-1,0} \sim a_{n-1,1}$ ) | $a_{n-1,2}$<br>( $a_{n-1,1} \sim a_{n-1,2}$ ) | ... | $a_{n-1,m-1}$<br>( $a_{n-1,m-2} \sim a_{n-1,m-1}$ ) | $a_{n-1,m}$<br>( $a_{n-1,m-1} \sim a_{n-1,m}$ ) |
| $u_n$     | $a_{n1}$<br>( $a_{n0} \sim a_{n1}$ )          | $a_{n2}$<br>( $a_{n1} \sim a_{n2}$ )          | ... | $a_{n,m-1}$<br>( $a_{n,m-2} \sim a_{n,m-1}$ )       | $a_{nm}$<br>( $a_{n,m-1} \sim a_{n,m}$ )        |

### 1) 建立隶属函数

地下空间资源质量评估涉及影响因素和指标较多,对于不同因素和指标应有不同隶属函数,根据模糊理论的隶属函数构建原则,隶属函数的分布主要有上型、下型和中间型三种,并且有具体的函数形式。因此,实际评价中只需依据指标的特性和等级模糊集合选择一种合适形式并确定其中参数即可。

根据此原则给出资源质量评估模型隶属函数的一般形式如下:

对表 2-1 中给出的  $a_{ij}$  的指标形式,如果是  $\geq a_{ij}$ ,显然有  $a_{i1} \geq a_{i2} \geq \dots \geq a_{im}$ ,隶属函数为:

$$\mu_{i1}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq a_{i1} \\ \left(\frac{a_{i2} - x}{a_{i2} - a_{i1}}\right)^\delta & a_{i2} \leq x < a_{i1} \\ 0 & x < a_{i2} \end{cases} \quad (2-1)$$

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} \left(\frac{a_{i,j-1}}{x}\right)^\delta & x \geq a_{i,j-1} \\ 1 & a_{ij} \leq x < a_{i,j-1} \\ \left(\frac{a_{i,j+1}-x}{a_{i,j+1}-a_{ij}}\right)^\delta & a_{i,j+1} \leq x < a_{ij}, j=2,3,\dots,m-1 \end{cases} \quad (2-2)$$

$$\mu_{im}(x) = \begin{cases} \left(\frac{a_{i,m-1}}{x}\right)^\delta & x \geq a_{i,m-1} \\ 1 & a_{im} \leq x < a_{i,m-1} \\ \left(\frac{x}{a_{im}}\right)^\delta & x < a_{im} \end{cases} \quad (2-3)$$

其中,  $\delta$  规定为当  $u_{ik}(x) = 1$  时,

$$\delta = \begin{cases} 2 & j < k \\ 1 & j > k \end{cases} \quad (2-4)$$

对表 2-1 中给出的  $a_{ij}$  的指标形式, 如果为  $\leq a_{ij}$ , 此时显然有  $a_{i1} \leq a_{i2} \leq \dots \leq a_{im}$ , 则隶属函数为:

$$\mu_{i1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_{i1} \\ \left(\frac{a_{i2}-x}{a_{i2}-a_{i1}}\right)^\delta & a_{i1} < x \leq a_{i2} \\ 0 & x > a_{i2} \end{cases} \quad (2-5)$$

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x}{a_{i,j-1}}\right)^\delta & x \leq a_{i,j-1} \\ 1 & a_{i,j-1} < x \leq a_{ij}, j=2,3,\dots,m-1 \\ \left(\frac{a_{i,j+1}-x}{a_{i,j+1}-a_{ij}}\right)^\delta & a_{ij} < x \leq a_{i,j+1} \\ 0 & x > a_{i,j+1} \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\mu_{im}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x}{a_{i,m-1}}\right)^\delta & x \leq a_{i,m-1} \\ 1 & a_{i,m-1} < x \leq a_{im} \\ \left(\frac{a_{im}}{x}\right)^\delta & x > a_{im} \end{cases} \quad (2-7)$$

对于表 2-1 中以范围  $(a_{i,j-1} \sim a_{ij})$  形式给出的指标, 则隶属函数为:

$$\mu_{i1}(x) = \begin{cases} 1 & x \text{ 介于 } a_{i0} \text{ 与 } a_{i1} \text{ 之间} \\ \frac{a_{i2}-x}{a_{i2}-a_{i1}} & x \text{ 介于 } a_{i1} \text{ 与 } a_{i2} \text{ 之间} \\ 0 & x \text{ 介于 } a_{i2} \text{ 与 } a_{im} \text{ 之间} \end{cases} \quad (2-8)$$



$$\mu_{im}(x) = \begin{cases} 0 & x \text{ 介于 } a_{i0} \text{ 与 } a_{i,m-2} \text{ 之间} \\ \frac{x - a_{i,m-2}}{a_{i,m-1} - a_{i,m-2}} & x \text{ 介于 } a_{i,m-2} \text{ 与 } a_{i,m-1} \text{ 之间} \\ 1 & x \text{ 介于 } a_{i,m-1} \text{ 与 } a_{im} \text{ 之间} \end{cases} \quad (2-9)$$

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 0 & x \text{ 介于 } a_{i0} \text{ 与 } a_{i,j-2} \text{ 之间} \\ \frac{x - a_{i,j-2}}{a_{i,j-1} - a_{i,j-2}} & x \text{ 介于 } a_{i,j-2} \text{ 与 } a_{i,j-1} \text{ 之间} \\ 1 & x \text{ 介于 } a_{i,j-1} \text{ 与 } a_{ij} \text{ 之间} \\ \frac{a_{i,j+1} - x}{a_{i,j+1} - a_{ij}} & x \text{ 介于 } a_{ij} \text{ 与 } a_{i,j+1} \text{ 之间} \\ 0 & x \text{ 介于 } a_{i,j+1} \text{ 与 } a_{im} \text{ 之间} \end{cases} \quad (2-10)$$

在实际工程中隶属函数通常采用二次抛物线分布形式,结合评价指标的分布情况,对隶属函数的一般形式进行修改和改进,隶属函数的基本形式如下:

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_{i,j-1} \\ 1 - 2 \left( \frac{a_{i,j-1} - x}{a_{i,j-1} - a_{i,j+1}} \right)^2 & a_{i,j-1} < x \leq a_{ij} \\ 2 \left( \frac{x - a_{i,j+1}}{a_{i,j-1} - a_{i,j+1}} \right)^2 & a_{ij} < x \leq a_{i,j+1} \\ 0 & x > a_{i,j+1} \end{cases} \quad (2-11)$$

## 2) 建立模糊矩阵

对每一个评价对象  $x_k$ ,通过抽样检验,对每一个质量因子  $u_i$ ,都有一个测定值  $y_i$ ,得到对应于  $x_k$  的测定指标向量  $\mathbf{Y}_k = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ,这样  $u_{ij}(y_i)$  便可以表示  $x_k$  相对于因子  $u_i$  隶属于等级  $v_i$  的程度,取:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \mu_{11}(y_1) & \mu_{12}(y_1) & \cdots & \mu_{1m}(y_1) \\ \mu_{21}(y_2) & \mu_{22}(y_2) & \cdots & \mu_{2m}(y_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1}(y_n) & \mu_{n2}(y_n) & \cdots & \mu_{nm}(y_n) \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (2-12)$$

则  $\mathbf{R}_k$  是关于  $x_k$  的  $U$  与  $V$  之间的模糊关系矩阵<sup>[26]</sup>。

## 3) 确定权重及综合评判

$$\text{给定权重分配 } \mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad a_i \in [0, 1] \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (2-13)$$

$$\text{计算 } \mathbf{B}_k = \mathbf{A} \cdot \mathbf{R}_k = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

按最大隶属度原则,若  $b_{j_0} = \max_{1 \leq j \leq m} b_j$ ,则评定  $x_k$  属于  $v_{j_0}$  级。

数据验收时的质量等级划分为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_4\} = \{I, II, III, IV\} = \{\text{很好, 好, 一般, 差}\}$ 。

依据模糊理论建立模糊综合评价模型,结合评估指标的具体分布,建立各个指标隶