



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·规划与设计系列

总主编 钱七虎 副总主编 朱合华 黄宏伟

城市地下空间低碳化设计与评估

俞明健 范益群 胡昊 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·规划与设计系列

城市地下空间低碳化设计与评估

俞明健 范益群 胡 昊 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

城市地下空间低碳化设计与评估/俞明健,范益群,胡昊编著. —上海:

同济大学出版社, 2015. 12

(城市地下空间出版工程/钱七虎主编, 规划与设计系列)

ISBN 978-7-5608-6170-8

I. ①城… II. ①俞… ②范… ③胡… III. ①城市空间—地下建筑物—节能—建筑设计—研究 IV. ①TU92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 318646 号

城市地下空间出版工程·规划与设计系列

城市地下空间低碳化设计与评估

俞明健 范益群 胡昊 编著

出品人: 支文军

策划: 杨宁霞 季慧 胡毅

责任编辑: 吕炜

责任校对: 徐春莲

封面设计: 陈益平

出版发行	同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn (上海市四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021-65985622)
经 销	全国各地新华书店、建筑书店、网络书店
排版制作	南京新翰博图文制作有限公司
印 刷	上海中华商务联合印刷有限公司
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	10.75
字 数	268 000
版 次	2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5608-6170-8
定 价	98.00 元

版权所有 侵权必究 印装问题 负责调换

内容提要

本书为国家“十二五”重点图书出版规划项目、国家出版基金资助项目。

本书从我国(特别是上海市)低碳建筑建设过程中面临的困难和存在的问题出发,依托上海虹桥商务区低碳建设导则的编制,首次结合地下空间的综合开发,提出了低碳地下空间的理论框架和技术体系,建立了低碳地下空间评估指标体系和评价标准。

本书主要成果包括:首先,在对国内外城市低碳建筑及建筑碳排放量最新发展趋势及特征等进行总结的基础上,结合上海世博会园区地下空间开发的实践,提出了低碳地下空间的理论框架及其集成技术体系。其次,从影响低碳地下空间评估的因素分析出发,提出了低碳地下空间评估指标,建立了评估指标体系及评价标准。第三,针对低碳地下空间评价中主要存在的问题进行分析,研究绿色建筑体系标准用于城市地下空间低碳评价的适用性。最后,基于我国地下建筑运行中的能耗特点,结合我国能源生产、利用过程中的碳排放特点和数据,阐述了碳排放现场检测技术,分析了建筑和环境碳排放的计量,建立了地下空间工程全生命周期碳足迹计算器开发的应用技术。

在以上成果的基础上,结合温州“绿轴”和“3号街心公园”低碳地下空间设计,梳理了低碳地下空间开发建设若干主要技术,并对两处地下空间全生命周期碳足迹进行了计算;在此基础上论证了低碳技术方案的减排效果,并提出了当地可持续能源利用的方案。

随着我国城市地下空间综合开发的不断扩大,在地下空间开发过程中引入低碳地下空间的理论与技术体系十分必要,具有重要意义和前瞻性。本书最后,对此进行了简要的讨论。

本书可供从事城市地下空间开发、规划、设计、施工、管理的设计师、工程师,以及高等院校相关专业师生参考阅读。

《城市地下空间出版工程·规划与设计系列》编委会

学术顾问

叶可明 中国工程院院士
孙 钧 中国科学院院士
郑颖人 中国工程院院士
顾金才 中国工程院院士
蔡美峰 中国工程院院士

主 任

钱七虎

副主任

朱合华 黄宏伟

编 委(以姓氏笔画为序)

王 剑	王 曦	王恒栋	卢济威	庄 宇	苏 辉
杨石飞	杨彩霞	束 昱	张 竹	张安峰	陈 易
范益群	胡 昊	俞明健	贾 坚	顾国荣	郭东军
葛春辉	路 姗				

作者简介

俞明健 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司总工程师,城市交通与地下空间设计研究院院长,教授级高级工程师。享受国务院政府特殊津贴专家,上海领军人才。

近年来,主持了上海外滩通道工程、上海东西通道工程、上海北横通道工程、深港西部通道深圳侧接线工程、上海世博园区市政基础设施项目、外滩交通枢纽工程、虹桥交通枢纽地下空间、武汉王家墩商务核心区地下空间、无锡锡东新城高铁商务区地下车行通道工程、济南高新区汉峪金融商务中心 A 区地下空间等项目的设计。

主编国家、行业、协会及地方标准规范 5 部,并先后主持了上海市科委等资助的科研课题数十项,包括:“世博园区地下空间的综合利用和开发技术研究”、“城市地下快速路建设关键技术研究”等。

多次获上海市科技进步奖、国家及上海市优秀设计奖、上海市优秀工程咨询奖。

范益群 工学博士,教授级高级工程师,英国皇家特许工程师,上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司城市交通与地下空间设计研究院副总工程师,中国岩石力学与工程学会地下空间分会理事、上海市土木工程学会地下工程专业委员会理事、上海市勘察设计标准化专业委员会委员。

作为专业负责人、负责人或审核人承担过多项大型地下空间项目的规划设计工作,同时参与、主持国家、住房和城乡建设部、上海市科委及国资委等多项科技攻关项目,包括科技部“863”项目 2 项、住房和城乡建设部项目 2 项、上海市科委项目 6 项、上海市国资委项目 1 项等。编制国家、行业 and 上海市地方标准 4 部,参编国家、行业和地方标准 6 项,编写专著 2 部,参编 1 部。

曾获得中国土木工程学会第五届优秀论文一等奖、上海市科协第八届青年优秀科技论文二等奖,多次获得华夏建设科学技术奖,参与负责项目获全国优秀工程勘察设计行业三等奖、上海市优秀工程勘察设计二等奖、上海市优秀工程咨询成果一等奖等数项。

胡 昊 哲学博士,上海交通大学教授、博士生导师,英国皇家特许工程师,英国土木工程师学会会士(Fellow)。上海交通大学交通运输工程学科负责人,工程管理研究所所长。担任英国土木工程师学会中国教育培训中心主任,中国建筑学会建筑经济分会理事,中国建筑学会建筑经济学术委员会委员,上海市楼宇科技研究会副理事长,上海市绿色建筑促进会标准化委员会副主任等。

主持国家自然科学基金、国家社会科学基金等纵向课题 30 余项,国际合作科研项目 6 项,在国内外核心学术期刊发表论文 100 多篇,其中 SCI/SSCI、EI 收录 50 余篇。其成果获上海市决策咨询研究成果奖、上海市科技进步奖、ICTPP 2011 最佳论文奖等奖项。

■ 总 序 ■

PREFACE

国际隧道与地下空间协会指出,21 世纪是人类走向地下空间的世纪。科学技术的飞速发展,城市居住人口迅猛增长,随之而来的城市中心可利用土地资源有限、能源紧缺、环境污染、交通拥堵等诸多影响城市可持续发展的问题,都使我国城市未来的发展趋向于对城市地下空间的开发利用。地下空间的开发利用是城市发展到一定阶段的产物,国外开发地下空间起步较早,自 1863 年伦敦地铁开通到现在已有 150 多年。中国的城市地下空间开发利用源于 20 世纪 50 年代的人防工程,目前已步入快速发展阶段。当前,我国正处在城市化发展时期,城市的加速发展迫使人们对城市地下空间的开发利用步伐加快。无疑 21 世纪将是我国城市向纵深方向发展的时代,今后 20 年乃至更长的时间,将是中国城市地下空间开发建设和利用的高峰期。

地下空间是城市十分巨大而丰富的空间资源。它包含土地多重化利用的城市各种地下商业、停车库、地下仓储物流及人防工程,包含能大力缓解城市交通拥挤和减少环境污染的城市地下轨道交通和城市地下快速路隧道,包含作为城市生命线的各类管线和市政隧道,如城市防洪的地下水道、供水及电缆隧道等地下建筑空间。可以看到,城市地下空间的开发利用对城市紧缺土地的多重利用、有效改善地面交通、节约能源及改善环境污染起着重要作用。通过对地下空间的开发利用,人类能够享受到更多的蓝天白云、清新的空气和明媚的阳光,逐渐达到人与自然的和谐。

尽管地下空间具有恒温性、恒湿性、隐蔽性、隔热性等特点,但相对于地上空间,地下空间的开发和利用一般周期比较长、建设成本比较高、建成后其改造或改建的可能性比较小,因此对地下空间的开发利用在多方论证、谨慎决策的同时,必须要有完整的技术理论体系给予支持。同时,由于地下空间是修建在土体或岩石中的地下构筑物,具有隐蔽性,与地面联络通道有限,且其周围临近很多具有敏感性的各类建(构)筑物(如地铁、房屋、道路、管线等)。这些特点使得地下空间在开发和利用中,在缺乏充分的地质勘察、不当的设计和施工条件下,所引起的重大灾害事故时有发生。近年来,国内外在地下空间建设中的灾害事故(如 2004 年新加坡地铁施工事故、2009 年德国科隆地铁塌方、2003 年上海地铁 4 号线建设事故、2008 年杭州地铁建设事故等),以及运营中的火灾(2003 年韩国大邱地铁火灾、2006 年美国芝加哥地铁事故等)、断电(2011 年上海地铁 10 号线追尾事故等)等造成的影响至今仍给社会带来极大的负面

效应。因此,在开发利用地下空间的过程中需要有高水平的专业理论和技术方法作指导。在我国城市地下空间开发建设步入“快车道”的背景下,目前市场上的相关书籍还远远不能满足现阶段这方面的迫切需要,系统的、具有引领性的技术类丛书更是匮乏。

目前,城市地下空间开发亟待建立科学的风险控制体系和有针对性的监管办法,《城市地下空间出版工程》丛书着眼于国家未来的发展方向,按照城市地下空间资源安全开发利用与维护管理的全过程进行规划,借鉴国际、国内城市地下空间开发的研究成果并结合实际案例,以城市地下交通、地下市政公用、地下公共服务、地下防空防灾、地下仓储物流、地下工业生产、地下能源环保、地下文物保护等设施为对象,分别从地下空间开发利用的管理法规与投融资、资源评估与开发利用规划、城市地下空间设计、城市地下空间施工和城市地下空间的安全防灾与运营管理等多个方面进行组织策划,这些内容分而有深度、合而成系统,涵盖了目前地下空间开发利用的全套知识体系,其中不乏反映发达国家在这一领域的科研及工程应用成果,涉及国家相关法律法规的解读,设计施工理论和方法,灾害风险评估与预警以及智能化、综合信息等,以期成为对我国未来开发利用地下空间较为完整的理论指导体系。综上所述,丛书具有学术上、技术上的前瞻性和重大的工程实践意义。

本套丛书被列为“十二五”时期国家重点图书出版规划项目。丛书的理论研究成果来自国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)、“十一五”国家科技支撑计划、“十二五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金项目、上海市科委科技攻关项目、上海市科委科技创新行动计划等科研项目。同时,丛书的出版得到了国家出版基金的支持。

由于地下空间开发利用在我国的许多城市已经开始,而开发建设中的新情况、新问题也在不断出现,本丛书难以在有限时间内涵盖所有新情况与新问题。书中疏漏、不当之处难免,恳请广大读者不吝指正。

刘七虎

2014年6月

■ 前 言 ■

FOREWORD

二氧化碳的过度排放将导致全球气候变暖,而全球气候变暖会对整个人类的生存和发展造成严重威胁。统计数据显示,在中国每建成 1 m^2 的房屋,便会释放出约 0.8 t 碳。同时,建筑物为维持自身功能,例如采暖、空调、通风、照明等需耗费大量的能源,碳排放量很大。因此,建设绿色低碳建筑项目,实现节能技术创新,建立建筑低碳排放体系,需注重建设过程的每一个环节,以便有效控制和降低建筑的碳排放,从而形成可循环持续发展的模式。使建筑物在建造、使用及拆除过程中都能够达到低碳节能的标准,是社会发展的必由之路,也是我们义不容辞的责任。

我们在大力倡导上部可持续建筑、绿色建筑、低碳建筑的同时,也不应忽略城市未被充分利用的地下空间。开发利用好这一空间可在不增加城市用地的情况下扩大城市的容积,改善功能,缓解诸多“城市病”,提升城市现代化水平,为城市的集约可持续发展作出贡献。地下建筑的设计要在低碳建筑设计理念的指导下,贯彻健康、舒适、合理便利、安全导向、绿色生态、文化艺术等原则,并利用开天窗、下沉广场、地下中庭、采光井等技术解决好地下建筑自然采光、通风等问题,使地下建筑真正成为绿色建筑、低碳建筑。

目前,我国对地下空间工程设施的低碳化设计尚缺乏相关指导,随着地下空间工程设施的新技术、新材料和新方法越来越多,设计人员往往无所适从,甚至错误应用,对地下空间的设计如何应用新技术减少碳排放,如何设计得更科学、合理,已显得十分重要与迫切。

本书在国内外低碳化技术与评估方法现状调查的基础上,对地下空间工程设施低碳化设计进行系统研究,总结现有工程取得的经验教训,以供业内人士参考。

在本书的组织和编写过程中,得到了相关单位的大力支持和帮助,限于篇幅,不一一列出,在此谨表谢意。

感谢同济大学出版社对本书出版发行的大力支持以及所付出的辛勤劳动。

书中不足之处,敬请读者批评指正。

俞明健

2015年9月于上海

■ 目 录 ■

CONTENTS

总序

前言

1	绪论	1
1.1	人类对地下空间的开发历程	2
1.2	地下空间的类型	5
1.2.1	地下交通空间	5
1.2.2	地下市政公用设施空间	9
1.2.3	地下公共服务空间	10
1.2.4	地下仓储空间	11
1.2.5	地下物流系统	11
1.2.6	地下防灾空间	12
1.2.7	地下综合体	13
1.3	地下空间的特点	14
1.4	低碳地下空间的相关概念	15
1.5	构筑低碳地下空间的理论框架	17
1.5.1	地下空间开发与低碳关系	17
1.5.2	地下空间低碳化设计	18
1.5.3	地下空间低碳化评估	19
2	国内外研究现状	21
2.1	地下空间开发利用现状及节能价值研究	22
2.2	适用于地下空间的节能技术和能耗研究	25
2.3	针对于现阶段建筑的低碳评估研究	27
2.4	建筑碳排放计量研究	28

2.4.1	全生命周期评价理论	28
2.4.2	建筑碳排放的计算与测试	29
2.4.3	建筑碳排放交易和碳审计的引入	30
2.4.4	建筑碳排放计量软件开发	30
3	低碳地下空间建设的集成技术体系研究	33
3.1	低碳地下空间的技术原则	34
3.1.1	低碳规划	34
3.1.2	节地措施	34
3.1.3	节材措施	34
3.1.4	节能措施与节能设备	34
3.1.5	节水措施	35
3.1.6	绿化储碳	35
3.2	低碳地下空间建设的集成技术体系	36
3.2.1	地下空间建设的低碳技术体系分类	36
3.2.2	低碳地下空间的主要技术	36
4	上海世博会园区低碳地下空间建设的集成技术体系	49
4.1	世博园地下空间规划总体思路	50
4.1.1	时间维度	50
4.1.2	空间维度	50
4.2	世博园地下空间规划设计	51
4.2.1	地下市政设施规划	51
4.2.2	地下交通设施规划	52
4.2.3	地下公共空间规划	54
4.3	世博轴及地下综合体工程建设	55
4.3.1	世博轴空调节能技术	56
4.3.2	世博轴半逆作施工技术	59
4.3.3	世博轴雨水回收处理技术	61
4.3.4	世博轴智能化管理技术	65
4.4	其余主要建筑地下空间特色	66
4.4.1	中国馆及其地下空间特色	66
4.4.2	主题馆及其地下空间特色	67
4.4.3	世博中心及其地下空间特色	68
4.4.4	世博演艺中心及其地下空间特色	68

4.4.5	城市最佳实践区及其地下空间特色	69
4.5	未来世博园片区超级“地下城市”规划	69
5	低碳地下空间评估指标及指标体系建立	73
5.1	引言	74
5.2	低碳城市地下空间建筑评估指标	74
5.2.1	评价指标的选取原则	74
5.2.2	评价指标的选取	75
5.3	低碳城市地下空间建筑评估指标体系	77
5.4	低碳城市地下空间建筑评价标准	80
5.5	本章小结	84
6	绿色建筑评价标准适用性研究	85
6.1	我国绿色建筑评价标准介绍	86
6.2	绿色建筑评价体系比较分析	87
6.3	绿色建筑评价标准应用于低碳城市地下空间评价的适用性	90
6.4	改进建议	90
7	地下工程碳排放测算技术研究	95
7.1	全生命周期碳足迹	96
7.1.1	碳足迹	96
7.1.2	碳足迹全生命周期评估法	97
7.2	地下工程全生命周期碳足迹测算指标	99
7.3	现场碳足迹检测方法	102
7.3.1	用电、能的碳排放指标	102
7.3.2	建筑用材、设备的碳排放测算	103
7.3.3	建筑运营阶段的碳排放量测算	105
7.3.4	建筑绿化减少的碳排放量测算	109
7.4	建筑工程碳足迹计算软件系统	110
8	地下空间低碳技术工程应用与评估研究	113
8.1	主要低碳技术	114
8.2	低碳技术评估	115
8.3	案例一：“绿轴”地下空间全生命周期碳足迹评估	115

8.3.1 “绿轴”项目简介	115
8.3.2 “绿轴”地下空间全生命周期碳足迹计算	116
8.3.3 结果与讨论	119
8.3.4 几个低碳技术方案的减排效果分析	120
8.4 案例二:“3号街心公园”工程全生命周期碳足迹评估	121
8.4.1 “3号街心公园”项目简介	121
8.4.2 “3号街心公园”工程全生命周期碳足迹计算	122
8.4.3 结果与讨论	125
8.5 当地可持续能源的利用	126
8.6 本章小结	127
9 结语	129
附录 低碳地下空间技术导则	131
参考文献	150
索引	154



1 绪 论

1.1 人类对地下空间的开发历程

人类在地球上出现至今已有 300 万年以上的历史,在这漫长的时间里,地下空间一直作为人类防御自然威胁以及外来侵袭的防护设施而被加以利用。随着科学技术的发展,这种利用早已从自然洞穴向着人工洞穴发展。到如今,地下空间的利用形态已经变得多种多样。“如果说 19 世纪是桥的世纪,20 世纪是高层建筑的世纪,那么 21 世纪就是地下空间的世纪”,国际隧道协会曾如此预言。如今的城市存在着土地资源稀缺、人口密集、交通拥堵、城市空气污染等问题。这些城市化进程所留下的“后遗症”应该寻求有效而且集约的方式去缓解人与城市之间的矛盾。开发和利用地下空间可以扩展城市空间容量,提高城市空间的集约度,可使城市交通更有效率,也能增加城市地面绿化面积。与此同时地下空间的开发会带动商业经济的繁荣。由此可见,地下空间的多维化开发将是城市革新发展必然趋势。

地下空间利用开发经历以下四个阶段的发展。

1. 第一个阶段:穴居时代

在人类开始出现的早期,人类利用地下空间防御自然威胁。主要用石块、兽骨等工具开挖天然的洞穴并有意识地修筑以满足自身的需求。比如北京周口店遗址和被称为母系氏族公社的西安半坡遗址(图1-1),这些洞穴往往呈现出半地下空间的状态,主要是为了满足居住生活所需。之后由于黄土高原土壤特殊的性质,在山西、陕西一带较多的“地坑式”窑洞(图1-2)、“崖壁式”窑洞等都是人类常见的地下居住形式。



图 1-1 西安半坡遗址现场

资料来源:《中国军事图集》



图 1-2 陕西“地坑式”窑洞

资料来源:《中原民艺谭》——黄土高原·土窑洞(三)

2. 第二个阶段:古代城市地下空间利用阶段

从产生人类文明到第一次工业革命(18 世纪 60 年代)之前的古代城市时期,人类往往单一功能地利用地下空间。开发的目的是为了创造更好的人类居住空间或者更多地利用地下空间的物理特性,起到安全、保存或采集地下资源等作用。

地下空间往往被用作宗教建筑、陵墓、采矿场、水利工程、仓库、军事地道等。例如在修建埃及金字塔时就有了地下空间的建设(图 1-3),在狮身人面像的地底下存在一个规模庞大

的地下建筑群;公元前 2200 年间的古巴比伦王朝,为了连接宫殿和寺院修建了长达 1 km 并横断幼发拉底河的水底隧道;而远在中国的秦始皇地下陵园范围 56.25 km²,相当于近 78 个故宫,地下空间面积之大在世界上亦实属罕见;同时期的罗马帝国也修筑了许多隧道工程,包括供水设施及下水管,有的至今还在使用;之后,人们对地下工程的探索也从未止息过。1628 年,在法国路易八世母亲的授意下,阿苏埃设计修建了一个伟大的引水工程,从 13 km 之外引导泉水通过地下管道流到巴黎,解决了巴黎当时的供水问题,而如今巴黎城区附近依然有许多当年采掘石膏留下的矿坑,有的高达数十米(图 1-4)。

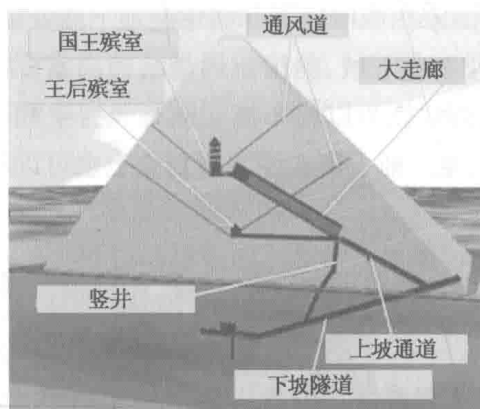


图 1-3 埃及金字塔剖面图

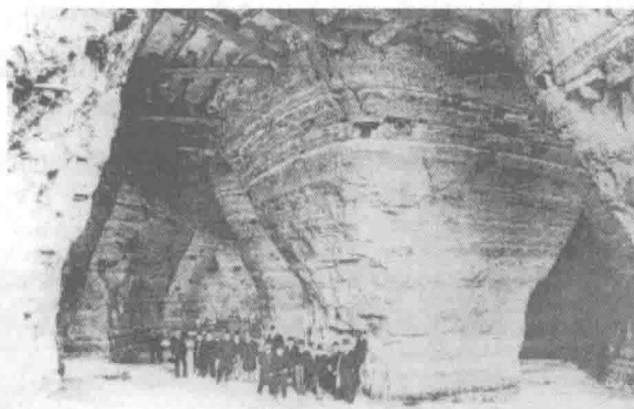


图 1-4 巴黎附近石膏矿坑

3. 第三个阶段:近代城市地下空间利用阶段

近代城市地下空间的利用主要是进行基础设施建设。在 18 世纪第一次工业革命到 19 世纪第二次工业革命之间,依附于城市基本道路在地下空间修建城市基础设施(市政管线层)形成了城市地下空间开发利用的最浅层。

1863 年,世界上第一条地铁伦敦大都会铁路诞生(图 1-5),这标志着近代城市大力开发地下空间的时期已经到来,世界各地开始了对地下空间有效利用形式的挖掘。在法国巴黎,不仅有世界著名的巴黎地下排水道(图 1-6),还有地下压缩空气管道。德国建有规模巨大的地下防空工事,可以抵御空袭、爆炸等外来威胁。波兰南部的克拉科夫市东南部名为维耶利奇卡的古老盐矿在 1978 年被列入最高级别的联合国世界文化遗产,其内部还建有一个地下教堂。



图 1-5 伦敦大都会铁路



图 1-6 巴黎蒙苏里半地下蓄水池