

特大型城市地下空间资源承载能力评价方法探索 ——以上海市为例

刘婷¹, 王寒梅^{1*}, 史玉金¹, 王志辉², 陈大平¹

LIU Ting¹, WANG Hanmei^{1*}, SHI Yujin¹, WANG Zhihui², CHEN Daping¹

1.上海市地质调查研究院,上海 200072;

2.中国地质科学院,北京 100037

1. *Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China;*

2. *China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

摘要:“十二五”以来,特大型城市空间需求急剧膨胀与空间资源有限的矛盾逐渐凸显,地下空间的开发利用进入快速发展阶段。在此形势下,了解地下空间承载能力对地下空间科学规划和合理利用具有重要意义。从承载本底(反映地下空间资源禀赋与环境容量优劣程度)和承载状态(反映地下空间资源供容能力与经济社会发展的匹配程度)2个角度建立地下空间承载力评价指标体系,进行地下空间承载力评价的研究,为特大型城市地下空间的开发利用提供技术支持。以上海中心城区为例进行评价,借助三维建模技术,立体展示地下空间资源承载能力。结果表明,上海中心城区地下空间资源承载能力总体较好,可进一步合理开发地下空间,提高空间利用率,缓解空间资源有限的压力。

关键词:特大型城市;地下空间资源;承载能力;评价方法

中图分类号:P962;TU984.11⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)10-1609-08

Liu T, Wang H M, Shi Y J, Wang Z H, Chen D P. Exploration on evaluation method of underground space resources carrying capacity of megacity: A case study of Shanghai. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1609-1616

Abstract: Since the "Twelfth Five-Year Plan", the contradiction between the rapid expansion of space demand and the limited space resources in megacities has become increasingly prominent. The development and utilization of underground space has entered a rapid development stage. Under this situation, understanding the carrying capacity of underground space is of great significance for scientific planning and rational utilization of underground space. From two perspectives, carrying background (reflecting the endowments of underground space resources and the pros and cons of the environmental capacity) and carrying actuality (reflecting the matching degree of the capacity of the underground space resource and the economic and social development), the evaluation index system was built, and evaluation of underground space carrying capacity was studied to provide technical support for the development and utilization of underground space in megacities. The central city of Shanghai with limited space resources was selected as a case to evaluate the underground space carrying capacity, and the bearing capacity of underground space resources was displayed in three dimensions with the help of 3D modeling technology. The results show that the carrying capacity of the underground space resources in the central city of Shanghai is generally good, and the underground space can be further developed rationally to improve the urban space utilization and alleviate the pressure of limited space resources.

Key words: megacity; underground space resource; carrying capacity; evaluation method

收稿日期:2020-06-10;修订日期:2021-03-25

资助项目:中国地质调查局项目《上海济南等典型城市地下空间开发利用综合地质调查》(编号:DD20179611)、上海市科学技术委员会项目《中浅层地下空间三维地质模型及环境物理场研究》(编号:19DZ 1200902)

作者简介:刘婷(1991-),女,硕士,工程师,从事城市地下空间资源调查评价工作。E-mail:liuting582@163.com

*通信作者:王寒梅(1976-),女,博士,教授级高工,从事城市地质调查工作。E-mail:hanmeiw@163.com

特大型城市是中国社会、经济、文化和人口的中心^[1],近几十年来经历了快速城市化发展的过程^[2]。“十二五”以来,特大型城市空间需求急剧膨胀与空间资源有限的矛盾日益突出,面临着越来越大的空间制约挑战。在此形势下,城市地下空间作为新型国土资源,是解决人地矛盾、释放城市空间、优化设施布局、保障城市安全的一项宝贵资源^[3-5],地下空间资源的开发利用进入了快速发展阶段。然而地下空间的开发不同于地面规划,具有不可逆性,因此对于地下空间的开发利用需要更加科学合理的规划,才能真正提高城市空间资源利用率,避免资源的浪费^[6]。故建立特大型城市地下空间资源承载能力评价方法,科学评价地下空间承载能力,可为合理、有效、可持续地开发地下空间资源提供支撑,最大限度发挥地下空间资源在高效容纳城市功能、促进土地集约化利用等方面的优势,缓解城市空间需求与空间资源紧缺的矛盾,对于缓解特大型城市土地资源紧张、改善城市环境、提高城市综合承载能力具有重要意义。

目前关于资源环境承载力分类研究已较系统^[7-8],然而,关于地下空间资源承载力评价方法的研究较薄弱,对地下空间资源承载能力的定义没有统一规定。根据对承载能力定义的理解,本文地下空间资源承载能力以地下空间资源为承载主体,表示在最大发展水平下的供地能力,即地下空间资源的最大开发容量。本文在查阅相关资料的基础上,基于国内外地下空间资源数量和质量评价工作^[9-10],考虑人类活动对地下空间资源的影响,开展了地下空间资源承载能力评价方法的研究,初步探索了地下空间资源承载能力评价方法。

1 地下空间资源承载力评价方法研究

地下空间资源承载力评价工作分为资料收集、评价指标体系构建、承载能力评价、对策建议的研究。地下空间资源承载力的评价研究主要有3个方面的关键问题:①评价单元,包括网格单元和行政单元,行政单元又可以根据其评价的尺度不同,采用县、乡镇、区等为单元;②评价指标,需根据地下空间资源开发利用特点,遵循简便、实用、可操作的原则,构建地下空间资源承载能力评价体系;③评价方法,层次分析法、模糊综合评价法、熵值法、综合加权指数法等地下空间资源承载能力评价中

均可应用^[11]。

1.1 资料收集与整理

针对不同评价区域,收集不同比例尺的水文地质、工程地质和环境地质调查资料(省域以1:50万~1:100万比例尺为主,重点区域及城镇以1:1万~1:25万比例尺为主),收集地上地下构筑物利用情况的数据和资料,最新发布的地下空间专项规划、土地利用总体规划等规划类资料,以及地方经济与社会发展相关报表、自然保护区种类及范围等资料,国民经济改革及发展、人口、能源、国土资源、环境等近5年的统计年鉴资料。

1.2 评价指标体系构建

根据地下空间资源禀赋和开发利用特点,基于地下空间资源承载能力评价的栅格尺度,遵循简便、实用、可操作的原则,从承载本底和承载状态的基本内涵(承载本底反映资源禀赋与环境容量的优劣程度,承载状态反映资源供容能力与经济社会发展的匹配程度)分析,选取可直观反映地下空间资源禀赋与环境容量优劣程度的可利用资源量占比与质量差区体积占比为地下空间资源承载本底指标,选取反映地下空间资源供容能力与经济社会发展匹配程度的地下空间开发指数为地下空间资源承载状态评价指标,构建地下空间资源承载能力评价指标体系(表1)。

1.3 评价方法

1.3.1 承载本底评价

(1) 可利用量占比

可利用量占比指在考虑已有建构筑物影响范围单位面积可利用地下空间资源量的比值。主要通过全面、系统收集地上和地下地籍信息、已有地下空间利用状况(地下空间开发规模、工程形态、埋置深度、功能用途等信息)等,对收集的各类信息进行分类整理,统计地下空间构筑物(桩基、无桩基础、

表1 评价指标体系

Table 1 Evaluation index system

评价因子	评价指标	
	本底评价	状态评价
地下空间资源	可利用量占比	地下空间开发指数
	质量差区体积占比	

注:地下空间资源质量分级由岩土体特征、水文地质条件、不良地质条件等综合评价得出,反映地下空间资源开发本身地质体质量的好坏

地铁隧道、地下室、地下管廊等)及水域的面积和深度,与地上建筑物不同,任何形式的地下建构筑物影响的都不只是本身所占用的部分空间,故在考虑人类活动构建的建构筑物的影响范围内,设定不同类型已有建构筑物的影响区域,具体参考依据如下。

①建筑物天然基础:《岩土工程勘察规范》^[12]及上海工程建设经验对天然地基浅基础压缩层厚度估算,深度(竖向制约深度) H 按天然地基浅基础压缩层以下(1~1.5) b (b 为天然地基基础宽度)的深度考虑。

②建筑物桩基础:根据《高层建筑岩土工程勘察标准》^[13]中群桩桩基沉降计算深度(竖向制约深度) H 按桩端平面以下(1~1.5) b (b 为假象实体基础宽度)的深度考虑。

③轨道交通:根据《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》中在上海市人民政府(93)37号令地铁保护区(隧道中心线两侧各30m,车站中心线两侧各50m)。

利用建构筑物影响范围内单位面积可利用地下空间资源量的比值作为承载本底评价的指标,更能避免新建工程对已有建构筑物的扰动和破坏,更好地表达地下空间资源可开发利用的禀赋。

(2)质量差区体积占比

质量差区体积占比为地表单位面积下质量差体积占比,其中质量评价是基于地质环境条件影响下地下空间资源本身地质体质量的好坏。本文仅以特大型城市上海为代表的滨海软土城市为例,进行地下空间资源质量评价。

① 质量评价指标体系

通过分析地下空间开发的主要地质环境问题,选取城市地下空间资源质量为目标层,选择基岩条件、工程地质条件、水文地质条件、不良地质问题、地下空间开发现状等主要影响因素为准则层,将各因素中的若干影响因子作为指标层,基于层次分析法^[14]分层构建地下空间资源评价的层次结构模型(表2),并通过建立模型指标结构、确定判断矩阵、层次单排序及一致性检验确定各层次研究因素的权重。

② 模糊综合评价

评判论域:具体隶属函数与隶属度计算方法参照文献相关研究^[15]。评判论域由评价等级构成,可

表 2 地下空间资源评价的层次结构模型

Table 2 The hierarchical structure model for underground space resource evaluation

目标层	准则层	指标层
地下空间资源质量	基岩条件	基岩埋藏特征 基底稳定性
	工程地质条件	土体埋藏特征 土体物理性质
	水文地质条件	含水层特征 水文地质参数
	不良地质问题	古河道 砂土液化 地面沉降 浅层气
	地下空间开发现状	地下空间开发利用情况
其他	应急水源地 浅层地温能 地下固体矿产 地质遗迹	

将评判论域划分为4个等级,即 $V=(I, II, III, IV)$,分别代表很好、好、一般、差。

评估模型:根据模糊数学理论,设评价对象集 $X=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$,质量因素集 $U=\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$,称 u_i 为质量因子,评价等级集 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$,对每个质量因子给出统一的标准,并且以数字的形式出现。

对每一个评价对象 x_k ,通过抽样检验,每一个质量因子 μ_i ,都有一个测定值 y_i ,得到对应于 x_k 的测定指标向量 $Y_k=(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$,这样 $\mu_{ij}(y_i)$ 便可以表示 x_k 相对于因子 μ_i 隶属于等级 v_i 的程度,取

$$R_k = \begin{bmatrix} \mu_{11}(y_1) & \mu_{12}(y_1) & \dots & \mu_{1m}(y_1) \\ \mu_{21}(y_2) & \mu_{22}(y_2) & \dots & \mu_{11}(y_2) \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \mu_{n1}(y_n) & \mu_{n2}(y_n) & \dots & \mu_{n1}(y_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

则 R_k 是关于 x_k 的 U 与 V 之间的模糊关系矩阵。

通过给定权重分配 $A=(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$,

$$a_i \in [0, 10] \sum_1^n a_i = 1,$$

计算 $B_k = A \cdot R_k = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m)$, 依据最大隶属度原则, 可得到评估结果, 即 $b_{j_0} = \max_{1 \leq j \leq m} b_j$ 。

③ 模型构建与评价

收集研究区的钻孔资料, 进行地质模型构建和属性建模, 依据钻孔分布密度及研究精度, 划分不同精度的 3D 空间单元体, 根据评价指标体系, 将各指标因子特征通过三维空间分析对 3D 空间单元体进行赋值, 进行地下空间质量评价, 进而计算地下空间质量差区体积占比。

(3) 分级标准

地下空间承载本底分级标准采用专家打分法确定(表 3)。

(4) 综合评价

承载本底评价反映了研究区地下空间开发利用现状、地下空间开发风险, 遵循地下空间开发利用安全至上的原则, 承载本底综合评价在以上 2 个评价指标评价的基础上, 采用短板效应, 进行综合评价。

1.3.2 承载状态评价

地下空间开发指数是一个综合指标, 由就业指数、经济指数、地价指数、开发灾害指数等构成, 采用指数分析法进行计算。其中, 地价指数为报告期地价与基期地价的百分比, 是反映土地价格随时间变化的趋势与幅度的相对数, 是地价波动情况和评定合理地价的重要指标; 就业指数指评价区域内地下空间开发带动的就业情况, 反映了地下空间开发对研究区的民生改善程度, 用从事地下空间开发利用的从业人员占总从业人员的百分比来度量; 地下空间经济指数反映地下空间开发对当地 GDP 的贡献程度。采用专家打分法确定分级标准(表 4)。

表 3 地下空间资源承载本底分级标准

Table 3 The grading standard of carrying background of the underground space

承载本底	I	II	III	IV	V
可利用量占比	≥90%	[80%, 90%)	[70%, 80%)	[60%, 70%)	<60%
质量差区体积占比	≤20%	(20%, 40%]	(40%, 60%]	(60%, 80%]	>80%

1.3.3 承载能力评价

依据构建的评价指标体系, 综合地下空间资源承载本底与承载状态的分级评价, 进行地下空间资源承载能力分级, 分级原则见表 5, 对地下空间资源进行承载能力评价。

1.4 对策建议

根据承载能力评价结果, 了解资源禀赋好和环境容量大的区域空间分布格局, 对适宜地下空间开发且承载能力中等以上的区域, 提出进一步工作的建议, 充分考虑经济社会发展基础、现状及需求, 进一步明确功能定位和未来发展需求。

2 实证研究

上海作为特大型城市的代表之一, 是中国重要的经济中心和长三角龙头城市, 本文以空间资源紧缺的中心城区为示范单元, 根据构建的地下空间资源承载力评价方法, 进行上海中心城区地下空间资源承载能力评价, 为合理规划利用地下空间资源提供技术支撑。结合《上海城市总体规划 2017—2035》对地下空间开发总体格局的规划, 在地下 0~100 m 范围内开展地下空间资源承载能力评价。同时, 目前大多数地下建筑物一般分布在 40 m 以内, 40~100 m 范围受人类影响程度低, 故在此范围开展地下空间资源承载能力评价, 为今后地下空间资源统一管理和合理开发利用提供支持。

上海中心城区面积约 664 km², 人口高度聚集, 地下空间开发强度高, 属于地震活动频度低、强度不大的浅源少震区, 区内基底较稳定。工程建设影响范围内主要为晚更新世以来海陆交替相, 以海相为

表 4 地下空间资源承载状态评价分级标准

Table 4 The grading standard of carrying actuality of the underground space

承载状态	I (盈余)	II (均衡)	III (超载)
地下空间开发指数	≥60%	[40%, 60%)	<40%

表 5 地下空间资源承载能力等级

Table 5 Carrying capacity level of the underground space resource

承载能力等级	承载本底等级					
	I	II	III	IV	V	
承载状态	盈余	强	强	较强	中	较弱
等级	均衡	强	较强	中	较弱	弱
	超载	较强	中	较弱	弱	弱

主的松散堆积物,岩性以粘性和砂性土为主。本文采用栅格大小为 100 m×100 m 的网格单元对地下空间资源承载力进行评价。

2.1 承载本底评价

2.1.1 可利用量占比

通过收集地下空间利用状况,根据规范标准和前人研究成果,确定上海不同类型地下构筑物的影响区域:建筑物天然基础,上海工民建天然地基基础宽度一般为 15 m,故竖向制约深度为 15~22.5 m,考虑上海实际情况,竖向制约深度(影响区域)取 20 m;建筑物桩基础,上海一般实体基础宽度为 20 m,故竖向制约深度为 20~30 m,结合上海地区特点,选取桩端底部以下 25 m 作为受桩基础制约的空间;根据《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》,取 30 m 作为地下轨道交通影响范围;结合上海中心城区不同类型水域底部深度,考虑不同水体地下开发的工法,黄浦江以其水面以下 20 m 为制约空间,苏州河、川杨河、蕴藻浜均为 10 m,其他水系为 8 m。依据地下空间资源数量承载本底分级标准进行评价。

结果(图 1)表明:0~100 m 范围内,I 级为 61%,主要分布在宝山、嘉定和浦东新区,II 级 8%和 III 级 8%零散分布于杨浦、宝山、嘉定、闸北、徐汇、闵行,IV 级 10%、V 级 10%,地下空间资源开发利用程度高,主要集中在静安、虹口、黄浦;40~100 m 范围内,I 级 90.9%、II 级 2.5%、III 级 6.1%、IV 级 0.3%、V 级 0.2%,地下空间开发利用程度低;整体看,中心城区 100 m 以浅地下空间资源开发利用程度高的地区集中在静安、虹口、黄浦。

2.1.2 质量差区体积占比

本次三维地质结构模型的构建是基于区内 598 个深度大于 70 m 的钻孔。依据钻孔分布密度,将研究区 100 m 以浅的范围划分为 100 m×100 m×0.5 m 的 3D 空间单元体。根据构建的地下空间资源质量评价指标体系,计算地下空间资源质量,图 2 为地下空间资源质量评价结果。

在地下空间资源质量评价结果的基础上,计算了地下空间质量差区体积占比,并根据质量差区体积占比分级标准(表 3)进行了评价。

结果(图 3)表明:0~100 m 范围内,I 级 17.9%、II 级 77.6%、III 级 4.5%、IV 级 0%、V 级 0%;40~100 m 范围内,I 级 8.6%、II 级 64.3%、III 级

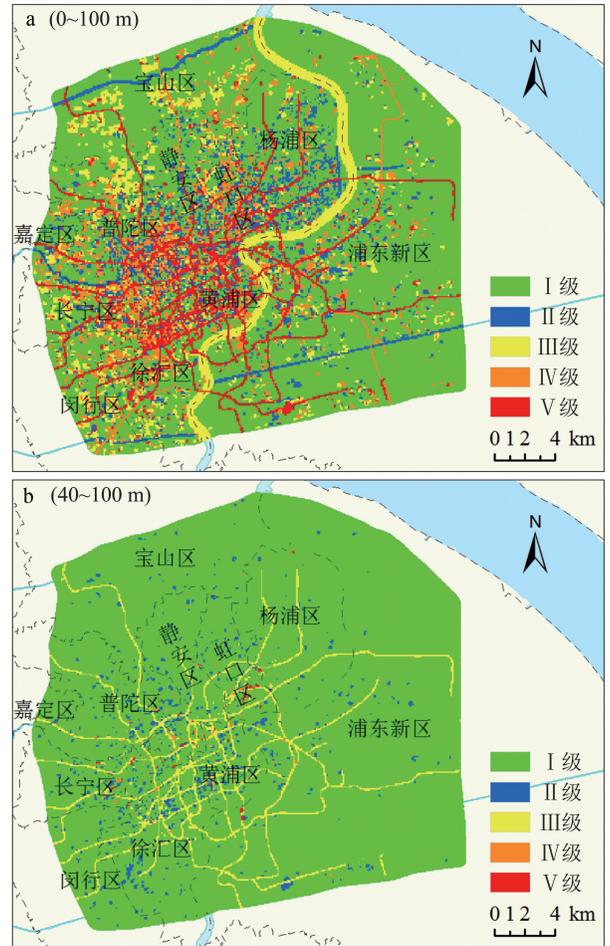


图 1 上海中心城区可利用量占比

Fig. 1 Available ratio in the central of Shanghai

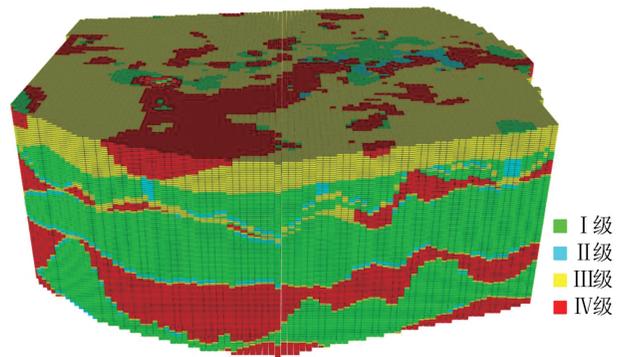


图 2 0~100 m 地下空间质量评价结果

Fig. 2 Evaluation results of 0~100 m underground space quality

27.1%、IV 级 0%、V 级 0%;综合分析表明,地下空间地质体质量较好的区域一般位于有利于地下空间开发利用的粘性土层较厚的地区。

2.1.3 综合评价结果

根据前文所述,承载本底综合评价的要求,在

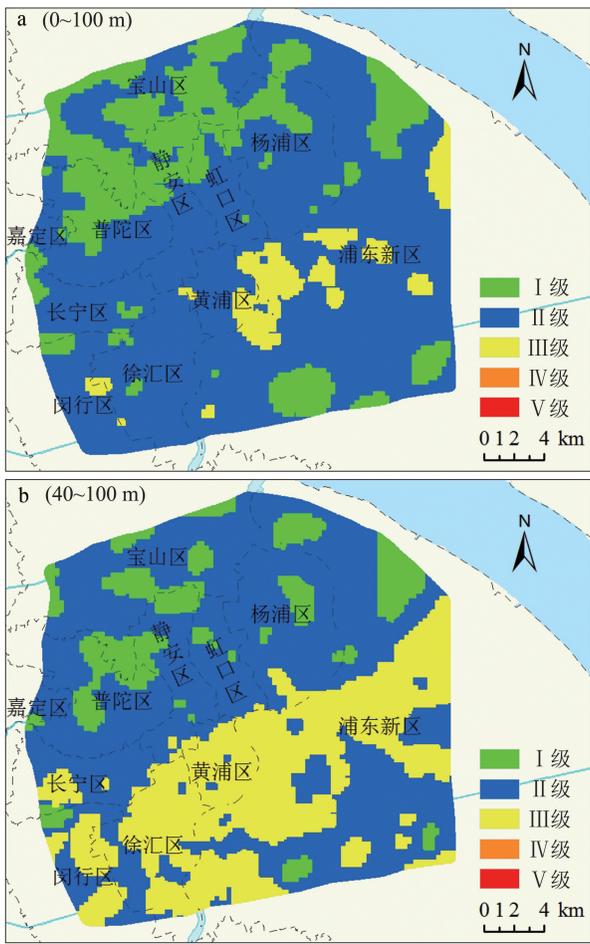


图3 上海中心城区质量差区体积占比

Fig. 3 Volume ratio of poor quality in the central city of Shanghai

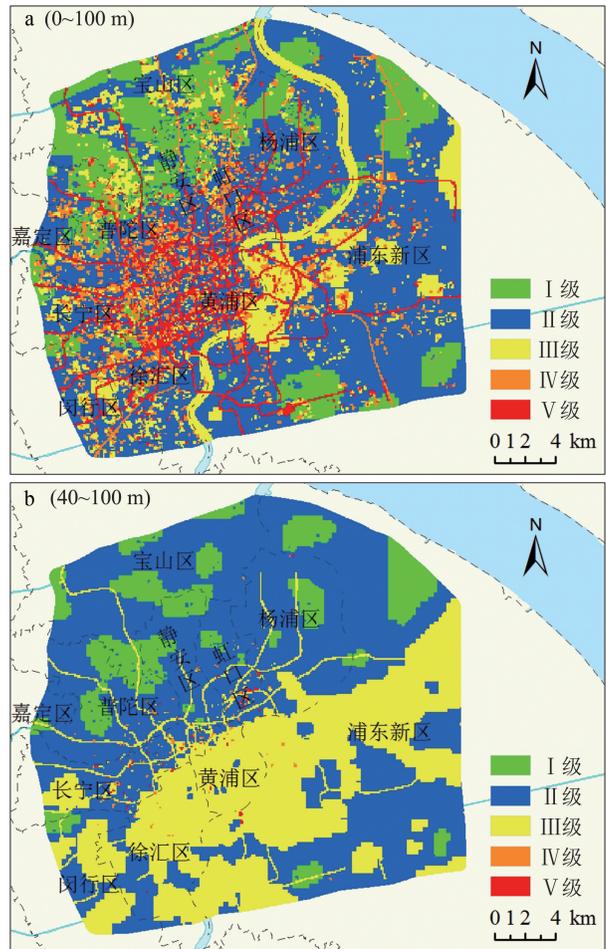


图4 承载本底综合评价

Fig. 4 Performance evaluation of carrying background

遵循地下空间开发利用安全至上原则的基础上,采用短板效应,对可利用量占比和质量差区体积占比2个指标进行综合评价。

本底综合评价反映地下空间资源禀赋与环境容量的优劣,结果(图4)表明:0~100 m范围内,I级15.9%,在宝山、普陀北部、嘉定及浦东新区局部分布;II级48.8%,分布在杨浦、长宁、闵行与浦东新区;III级16.0%、IV级9.6%、V级9.7%,主要分布在虹口、静安、徐汇、浦东陆家嘴;40~100 m范围内,I级11.1%、II级54.5%、III级33.8%、IV级0.3%、V级0.2%,总体地下空间资源禀赋较好。

2.2 承载状态评价

在地下空间资源质量评价的基础上,综合考虑人口密度、GDP、地价、开发易损性等指数因素,采用指数分析法开展地下空间资源承载状态评价。

状态评价反映地下空间资源供容能力与经济

社会发展的匹配程度,结果(图5)表明:0~100 m范围内,I级(盈余)73.3%、II级(均衡)25.8%、III级(超载)0.9%,总体处于盈余的状态,可进行地下空间的开发和利用;40~100 m范围内,I级(盈余)26.8%、II级(均衡)20.7%、III级(超载)52.6%,其超载区主要位于地质环境条件相对不适宜开发地下空间的区域。

2.3 地下空间承载能力评价

在地下空间资源承载本底和承载状态评价的基础上,采用网格大小100 m×100 m×0.5 m的3D网格剖分,对地下空间承载能力进行了综合评价,按表5确定地下空间资源承载能力等级。

从地质环境条件、经济发展条件、人类活动影响等综合因素下的地下空间资源承载能力评价结果(图6、图7)看:0~100 m范围内,地下空间承载能力强占比43.7%、承载能力较强占比1.4%、承载

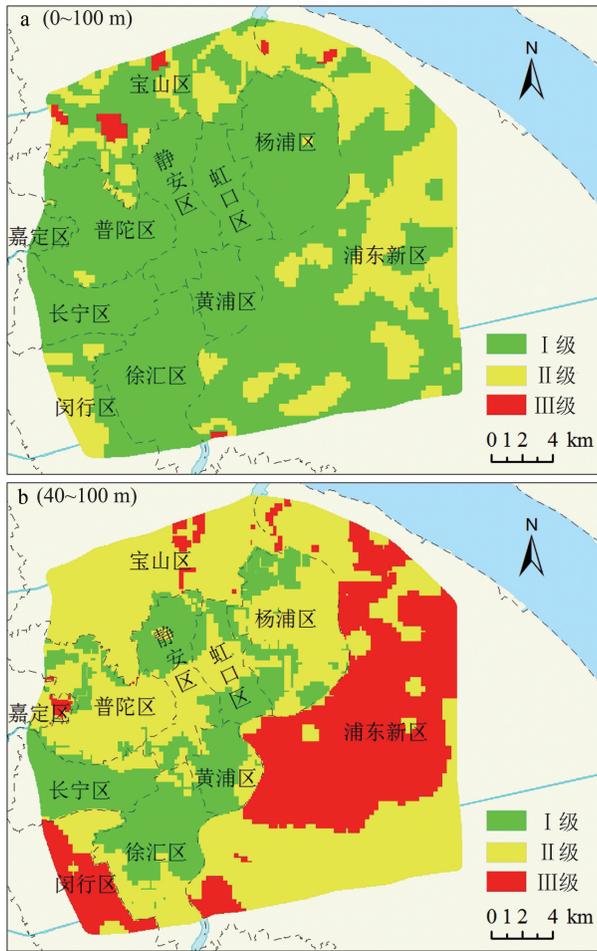


图 5 地下空间开发指数

Fig. 5 Development index of underground space

能力中等占比 16.8%、承载能力较弱占比 22.3%、承载能力弱占比 15.8%。上海中心城区地下空间资源承载能力总体较好,具有地下空间开发利用的基础支撑条件,可对地下空间承载能力较强的地区进行

合理开发利用,缓解城市资源有限的压力,对上海中心城区地下空间的规划和管理具有重大的意义。

2.4 对策建议

根据上海中心城区地下空间资源承载能力评价结果,不同深度地下空间资源承载能力差异大。0~40 m 范围内除已开发利用的区域,大部分区域地下空间承载能力为中等以上,适宜进行各类地下空间开发利用;40~100 m 范围内仅宝山及部分区域地下空间承载能力为中等以上,其余区域地下空间承载能力弱,经过分析研究,主要是因为该深度范围地质环境条件较复杂,导致地下空间承载能力相对较弱。对于上海地区适宜地下空间开发且承载能力中等以上的区域,结合《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》地下空间功能定位,统筹考虑上海中心城区社会发展现状及需求,0~40 m 范围内,建议将市政道路、公共绿地、公共活动中心、河道沿线周边和轨道交通车站周边地区作为地下空间开发利用重点区域,适宜用作各类公共服务、市政基础、交通集散功能,同时建议各类地下空间合理连通,充分发挥其空间价值、提升空间利用效率。40~100 m 范围内,可作为地下物流、地下物资储备、能源输送等功能系统建设的战略空间,因地质环境条件较复杂,深部地下工程应结合地下空间功能慎重布局,助力特大型城市地下空间资源安全有效开发利用。

3 结 论

(1) 针对特大型城市国土空间压力等问题,从承载本底和承载状态 2 个角度探索构建地下空间资源承载能力评价指标体系,采用先进的三维建模技

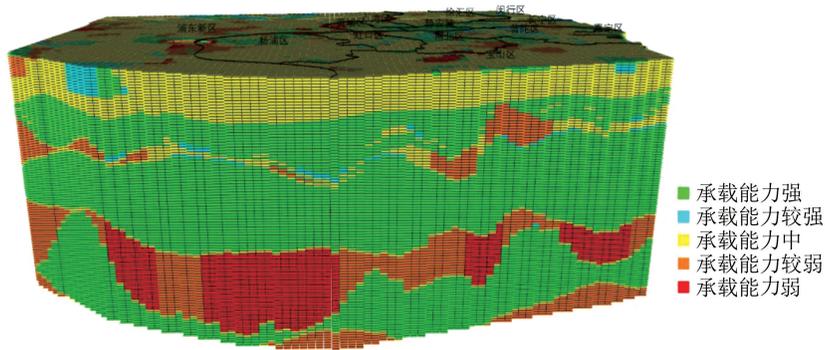


图 6 0~100 m 地下空间资源承载力

Fig. 6 Carrying capacity of 0~100 m underground space resource

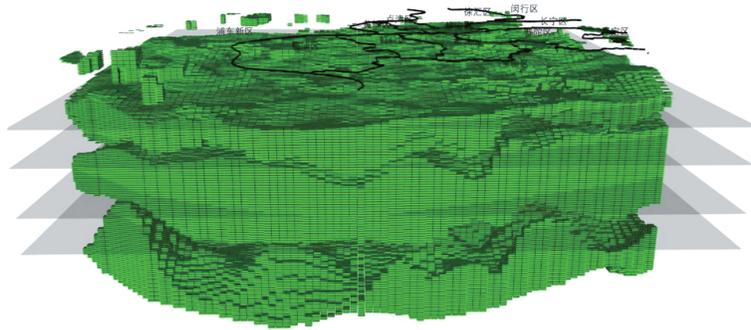


图 7 0~100 m 地下空间资源承载力强的分布区域

Fig. 7 Distribution area with strong carrying capacity of 0~100 m underground space resource

术进行地下空间承载力评价,直观反映地下空间资源承载力的分布,为确定地下空间合理开发的规模、强度和布局提供重要的支撑,对特大型城市地下空间资源的规划管理具有很好的应用价值。

(2)利用构建的地下空间资源承载力评价方法,以上海中心城区为示范单元进行地下空间资源承载力评价。结果表明:上海中心城区地下空间资源承载能力总体处于中等以上,结合地下空间功能定位、发展现状及需求,科学提出开发利用建议,保障合理有序开发地下空间资源,缓解中心城区空间资源有限的压力,对促进国土资源和经济社会可持续发展具有一定的参考价值。

本文评价方法简便易行、符合实际、具有一定的可操作性,能为地下空间资源承载能力评价提供支撑。但在实际中存在一定的局限性,由于该方法承载本底的可利用量占比基于地下空间开发利用深度进行计算,对于无法获取数据的区域将难以开展评价。在缺少建筑基础埋置深度的区域可采用如下措施进行补救:一是完善数据获取、监测措施;二是基于地面建筑类别推测工程基础类型,利用概化理论对建筑基础埋置深度进行估算。

致谢:在特大型城市地下空间资源承载能力评价方法探索的过程中,北京梦之岩科技有限公司提供了三维建模的技术支撑,审稿专家对文章提出了中肯建议,在此表示衷心的感谢。

参考文献

[1] 张欢,成金华,冯银,等.特大型城市生态文明建设评价指标体系及应用——以武汉市为例[J].生态学报,2015,35(2): 547-556.

[2] 钱敏蕾,李响,徐艺扬,等.特大型城市生态文明建设评价指标体系构建——以上海市为例[J].复旦学报(自然科学版),2015,54(4): 389-397.

[3] Bobylev N.Underground space as an urban indicator: Measuring use of subsurface[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2016, 55(5): 40-51.

[4] Wen D, Xin Z, Tianhe C.Index system and evaluation methods of resources and environment carrying capacity in principal function area division at provincial level[J].Journal of Geo-Information Science, 2011,13(2): 177-183.

[5] Chen Z L, Chen J Y, Liu H, et al.Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,71: 253-270.

[6] 王光宗.杭州市地下空间开发利用与管理研究[D].首都经济贸易大学,2017.

[7] 张茂省,王尧.基于风险的地质环境承载力评价[J].地质通报, 2018,37(2): 467-475.

[8] 殷志强,李瑞敏,李小磊,等.地质资源环境承载能力研究进展与发展方向[J].中国地质,2018,45(6): 1103-1115.

[9] Zhu H, Huang X, Li X, et al.Evaluation of urban underground space resources using digitalization technologies [J]. Underground Space, 2016,1(2): 124-136.

[10] 叶菁,侯卫生,邓东成,等.基于可变模糊集的城市地下空间资源三维质量评价[J].资源科学,2016,38(11): 2147-2156.

[11] 李小磊,柳炳利,陈国东.四川省彭山区地质环境承载能力评价研究[J].国土资源科技管理,2018,35(3): 65-73.

[12] 中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范[M].北京: 中华计划出版社,2002.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.高层建筑岩土工程勘察标准[M].北京: 中国建筑工业出版社,2018.

[14] Shapira A, Simcha M.AHP-based weighting of factors affecting safety on construction sites with tower cranes [J]. Journal of Construction Engineering and Management,2009,135(4): 307-318.

[15] 吴立新,姜云,车德福,等.城市地下空间资源质量模糊综合评估与3D可视化[J].中国矿业大学学报,2007,36(1): 97-102.