

基于建筑高度和地层厚度的城市 地下空间占用深度快速评估方法

——以杭州市为例

杨洋^{1, 2, 3)}, 苏晶文^{1, 2)}, 郑红军^{1, 2)}, 蔡磊^{1, 2)}, 蔡小虎^{1, 2)},
王睿^{1, 2)}, 邢怀学^{1, 2)}, 李云峰^{1, 2)}, 程光华^{1, 2)}

1) 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京, 210016;

2) 自然资源部城市地下空间探测评价工程技术创新中心, 南京, 210016;

3) 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙, 410083



内容提要:城市高密度的建筑物事实上占据了位于其下部一定深度的地下空间资源,其占用深度对城市地下空间(UUS)网络化开发具有重要影响,因此,在UUS规划前,需要掌握规划范围内地下空间占用深度和空间分布格局。UUS占用深度除地下建筑物深度外还包括下部地基持力层深度,其与建筑高度和场地地质条件相关。笔者等提出基于建筑高度和地层厚度的UUS占用深度快速评估方法,以杭州主城区为研究对象,通过实测建筑高度数据和收集建筑基础数据建立评估数学模型,利用百度建筑数据和杭州三维地质模型生成的地层厚度数据,并基于GIS平台的空间分析,实现了对杭州市主城区建筑地下空间占用深度的快速评估。研究成果为城市地下空间规划所需的大范围地下空间占用情况提供了高效的评估手段。

关键词:建筑高度;地层厚度;地下空间;占用深度;快速评估模型

随着我国城市化水平的快速提升,城市地下空间(Urban underground space, UUS)开发利用总体规模已处于世界领先地位(朱合华等,2019),尤其是超大特大城市逐步走向深层化和网络化(程光华等,2019;李晓昭等,2019;唐鑫等,2022),对地下空间资源的科学评价至关重要(葛伟亚等,2021)。传统UUS资源评价主要集中在基于地质条件的开发适宜性评价(邢怀学等,2022;苟富刚等,2023),但忽视既有建筑的影响导致成果社会应用性不强的问题。越来越多学者提出UUS资源调查评价除地质条件外,还应关注既有建筑地下空间要素,杨洋等(2022)提出UUS全要素应包含全空间地理信息、全功能建筑信息和全要素地质信息,强调已开发地下空间占用对地下空间资源评价的重要性。赵旭东等(2014)在对城市历史文化街区地下空间资源开发质量评估时,充分考虑了地面建筑层对地下空间资源开发的影响。Xi Yue等(2022)在UUS资源质量三维精细评价方面,考虑了城市地表建筑、地下建

筑和人防工程等控制性因素。但是上述研究都是只关注建筑物自身在平面和深度上的影响,而忽视了建筑下部地基持力层对建筑物安全的保障作用。

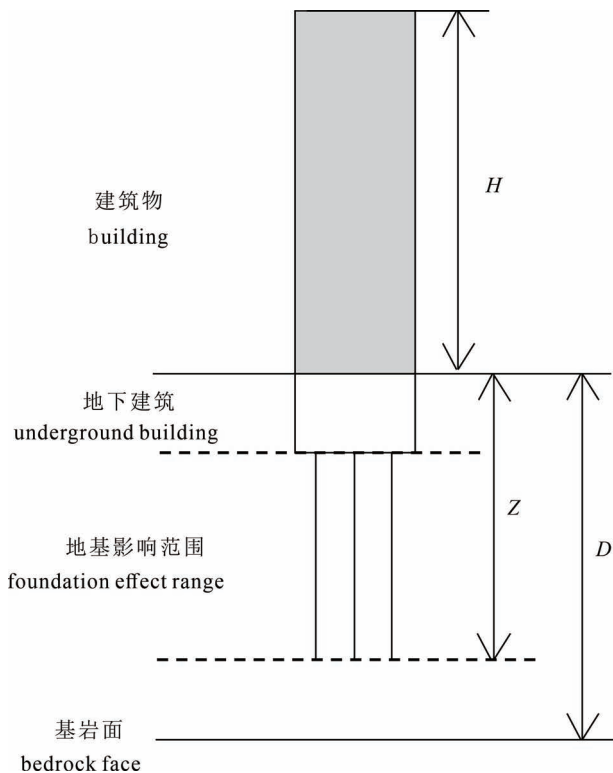
建筑地下空间占用深度的精准掌握面临着资料收集难和调查统计工作量大的难题,有学者提出依据建筑高度来估算建筑地基占用深度,如Shao Jizhong等(2022)按照建筑高度类型给出了占用深度经验值,何静等(2019)给出了不同建筑层数对应的地下空间开发深度经验取值,但都存在忽略了地质条件对建筑地基占用深度的影响。李宏钊等(2021)提出了遥地耦合探测技术,综合考虑了建筑高度和地质条件对占用深度的影响,给出了较小开发范围内浅基础建筑占用深度统计值,但对于城市大范围尺度和高层建筑深基础占用深度评估缺乏普适性。

笔者等以杭州为研究区,提出一种适用于松散层厚覆盖区的基于建筑高度和地层厚度的UUS占用深度快速评估方法,首先通过实测建筑高度数据

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42071256)、中国地质调查局项目(编号:DD20221732)的成果。

收稿日期:2023-10-07;改回日期:2024-03-20;网络首发:2024-07-20;责任编辑:李明,章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.062

作者简介:杨洋,男,1991年生,硕士,主要从事城市工程地质和地下空间调查评价研究;Email: yyang_a@mail.cgs.gov.cn。

图1 地下空间占用深度(Z)示意图Fig. 1 Schematic diagram of underground space occupancy depth (Z)

和收集建筑地基资料数据建立快速评估数学模型,然后利用研究区范围内建筑高度数据和三维地质模型生成的地层厚度数据,基于GIS平台评估了杭州主城区建筑地下空间占用深度和平面布局。评估方法可为松散层厚覆盖城市大范围地下空间占用深度的快速评估提供新的手段。

1 UUS 占用深度快速评估方法

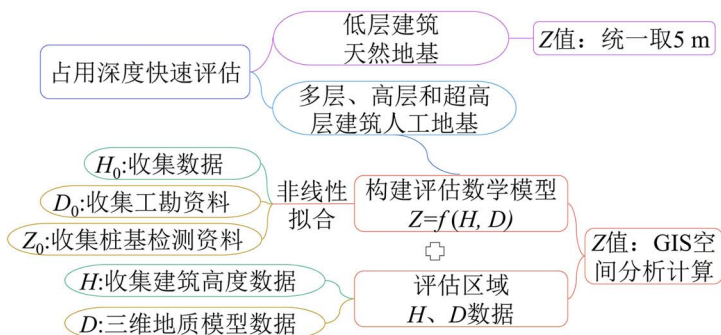


图2 UUS 占用深度快速评估流程图

Fig. 2 Flow chart for rapid assessment of the occupancy depth of UUS (Urban underground space)

1.1 UUS 占用深度定义

由于建筑地基持力层是承受建筑上部结构荷载的地层,其直接影响上部建筑的安全稳定,如2009年上海13层楼整体倾倒事故正是由于建筑桩基失稳导致房屋倾倒。此外,城市地下隧道修建亦会造成桩基持力层失稳,熊巨华等(2013)分析了隧道开挖对邻近单桩竖向受力特性影响,随着平均地层损失比的增加,桩处土体自由场竖向位移和桩身沉降不断增大。因此,笔者等所述UUS占用深度是指城市范围内建筑物占用其地表以下的深度,除地下建筑本身外,还包括了持力层的地基影响范围,如图1所示, Z 代表了UUS占用深度。已有研究表明,建筑地下空间的影响范围主要与建筑高度、基础面积、基础形式和地质结构有关(李宏钊等,2021; Shao Jizhong et al., 2022)。

对于低层建筑,其地下空间占用深度主要是天然地基持力层底层深度,参照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)对条形基础、独立基础等地基受力层的规定,一般为基础底面以下1.5~3倍基础底面宽度且不小于5m,笔者等参考实际施工经验和便于计算,将天然地基占用深度 Z 统一设定为5m。对于多层、高层和超高层建筑,其地下空间占用深度主要是人工地基的处理深度,不同地区不同类型建筑采用的基础类型有差异,对于松散层厚覆盖尤其是东部沿海地区普遍分布软土层,根据收集资料情况,多层以上建筑一般采用桩基础,笔者等以此为研究对象,确定其地下空间占用深度为桩底深度即桩长,其受建筑物高度 H 和地质条件(同一地区主要影响因素为地层厚度 D)的影响较大。

1.2 快速评估方法

笔者等以杭州为例,根据上述UUS占用深度定义,其占用深度的评估对于低层建筑和多层、高层和超高层建筑采用不同的方法。对于低层建筑的天然地基,UUS占用深度统一设定为5m;对于多层、高层、超高层建筑的人工地基,UUS占用深度 Z 与建筑高度 H 和地层厚度 D 一般呈非线性相关,因此关键是构建 $Z=f(H, D)$ 的非线性数学模型。在此基础上,对获取的城市范围内 H 和 D 数据,通过GIS空间分析,计算得到 Z 的空间分布,评估流程如图2。

评估数学模型通过研究区内抽样调查获取统计样本(建筑高度 H_0 、地层厚度 D_0 和占用深度 Z_0),采用MATLAB非线性多项式拟

合建立 $Z=f(H, D)$ 。通过对杭州市主城区内占用地下空间调查,受限于桩基检测报告收集数量,本次研究共获取了 99 组 H_0 、 D_0 、 Z_0 的统计样本(表 1)。其中 H_0 在调查时按照行政单元均匀分布的特点,通过激光测距仪实测获得, D_0 和 Z_0 分别通过收集城建档案资料中对应的工程勘察报告和桩基检测报告获得。

为建立评估数学模型并验证模型精度,按照验证数据占建模数据量 10% 的标准,利用表 1 前 90 组 H_0 、 D_0 、 Z_0 的统计样本数据进行 MATLAB 非线性多项式拟合,如图 3 所示,得到模型方程如式(1)所示,模型决定系数 R^2 为 0.72。

$$Z=0.0217H+0.6315D-0.0002H \times D+12.03 \quad (1)$$

将表 1 后 9 组 H_0 、 D_0 、 Z_0 数据代入到模型进行验证,对调查值与预测值进行线性拟合,如图 4,其验证拟合精度 R^2 达 0.89,对于区域快速评估,该模型精度较高。

对于城市区域建筑高度 H 数据,大范围内的高精度实测将耗费大量人力财力,近年来应用遥感数据反演建筑高度成为主要的评估方法(田峰等,2017;李宏钊等,2021;Yang Chen et al.,2022;Wu Wanben et al.,2023),形成了较多开源建筑高度数据产品。对于城市区域地层厚度 D 数据,随着城市三维地质建模和应用(屈红刚等,2018;Guo Jiateng et al.,2021;薛涛等,2023),可获取城市任意范围内的地层厚度 D 数据。

表 1 杭州市主城区建筑高度(H_0)—地层厚度(D_0)—占用深度(Z_0)调查数据

Table 1 Survey data of building height (H_0) — soil layer thickness (D_0) — occupancy depth (Z_0) in main urban area of Hangzhou

序号	H_0 (m)	D_0 (m)	Z_0 (m)	序号	H_0 (m)	D_0 (m)	Z_0 (m)	序号	H_0 (m)	D_0 (m)	Z_0 (m)
1	78.6	48	40	34	54	62.2	62	67	45	42.1	48.8
2	67.4	49	38	35	100	60	55	68	51	47.2	45
3	99.1	47	45	36	36	61	59	69	57	43	42.9
4	115	54.1	48.3	37	48	43.3	50	70	83	42.2	41
5	53	47.5	43.7	38	87	60	46	71	52	51	46
6	78	51	45	39	42	32	36	72	62.4	22	26
7	100	27.7	30	40	81	56	50	73	20	36.9	18
8	49	54	48	41	108	57	40	74	102	62	45.5
9	77	52.8	48	42	165	55	44	75	71	55	46
10	93	52.5	43.6	43	175	58	53	76	83	61.6	51.4
11	59.9	53.6	47	44	258	62	66	77	53.6	62	49
12	103	54.8	45	45	160	60	45	78	20	46	42
13	103	54.5	45.6	46	150	61	44	79	82	60	45
14	102.6	55.1	45.3	47	15	40	37	80	91	60	46
15	71.4	57	45	48	61	49.1	39	81	83	63	38
16	95	55	46	49	85	27.6	45	82	151	62.5	49.9
17	109	58	48	50	61	43	49	83	150	57.9	46
18	100	58	48	51	21.3	53	40	84	69	63	57.5
19	103	57	51	52	79.8	55	43	85	94	63	52
20	52	59	40	53	99	49.7	43	86	44	58	51
21	9.8	23.4	25	54	15.8	38	39	87	36	8.4	12.5
22	47.6	30	45	55	20	11	15	88	74	15.3	17.7
23	35	40	42	56	22.5	18.3	25	89	66	18.2	27
24	61	36	47	57	35	36.3	31.5	90	18	25.2	24.6
25	30.6	34	30	58	25	34	26	91	56	31.1	43.1
26	61	48	52	59	27	16.7	19.8	92	10	29.5	33.5
27	33	38	42	60	33	9.3	19	93	140	34.8	37.3
28	86	36	28	61	42	15.5	19.1	94	33	45.3	42
29	82	58	50	62	20	10.6	25	95	21	4.5	10.5
30	30	40	30	63	34	25.6	28	96	54	23.8	26
31	90	42	38	64	54.4	41.5	50.8	97	41	27.1	29
32	104	74	76	65	59	44.5	48	98	87	51.2	60.6
33	101	78.3	65	66	41	45.5	49.9	99	17	26	25

2 杭州市主城区地下空间占用深度评估

2.1 研究区概况

研究区为杭州市主城区(包括上城区、拱墅区、

西湖区、滨江区、萧山区、余杭区、临平区和钱塘区),UUS 占用情况呈现随地表建筑连片分布。研究区地貌类型较复杂,包括平原区及山麓沟谷区,第四系沉积物厚度变化大,沉积类型复杂多样,区内第四系厚度最深超过 100 m。杭州主城区地下空间开

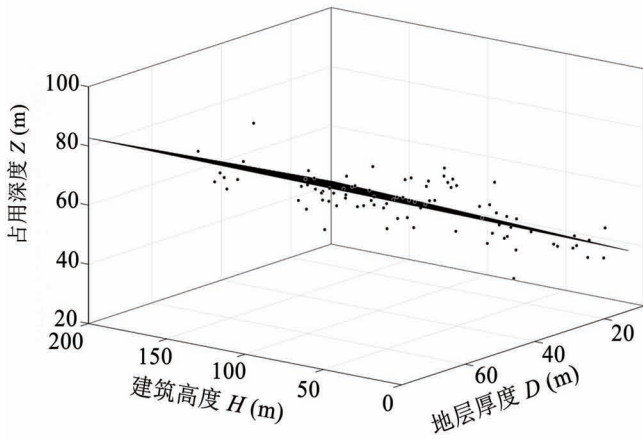


图3 占用深度(Z)-建筑高度(H)-地层厚度(D)关系
Fig. 3 Relationship between occupancy depth Z, building height H, and soil layer thickness D

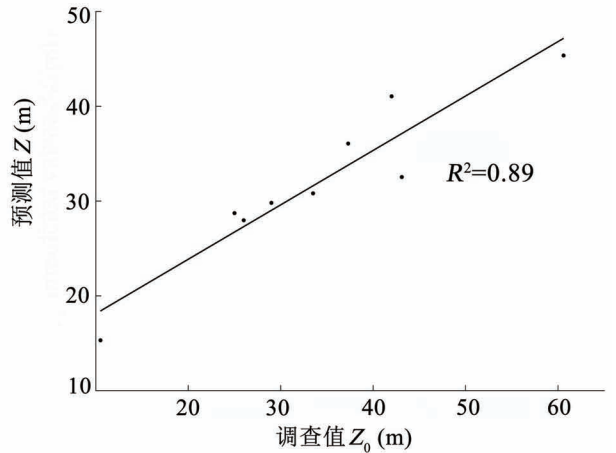


图4 杭州市主城区占用深度预测值与调查值关系
Fig. 4 Relationship of predicted values of occupancy depth with survey values in main urban area of Hangzhou

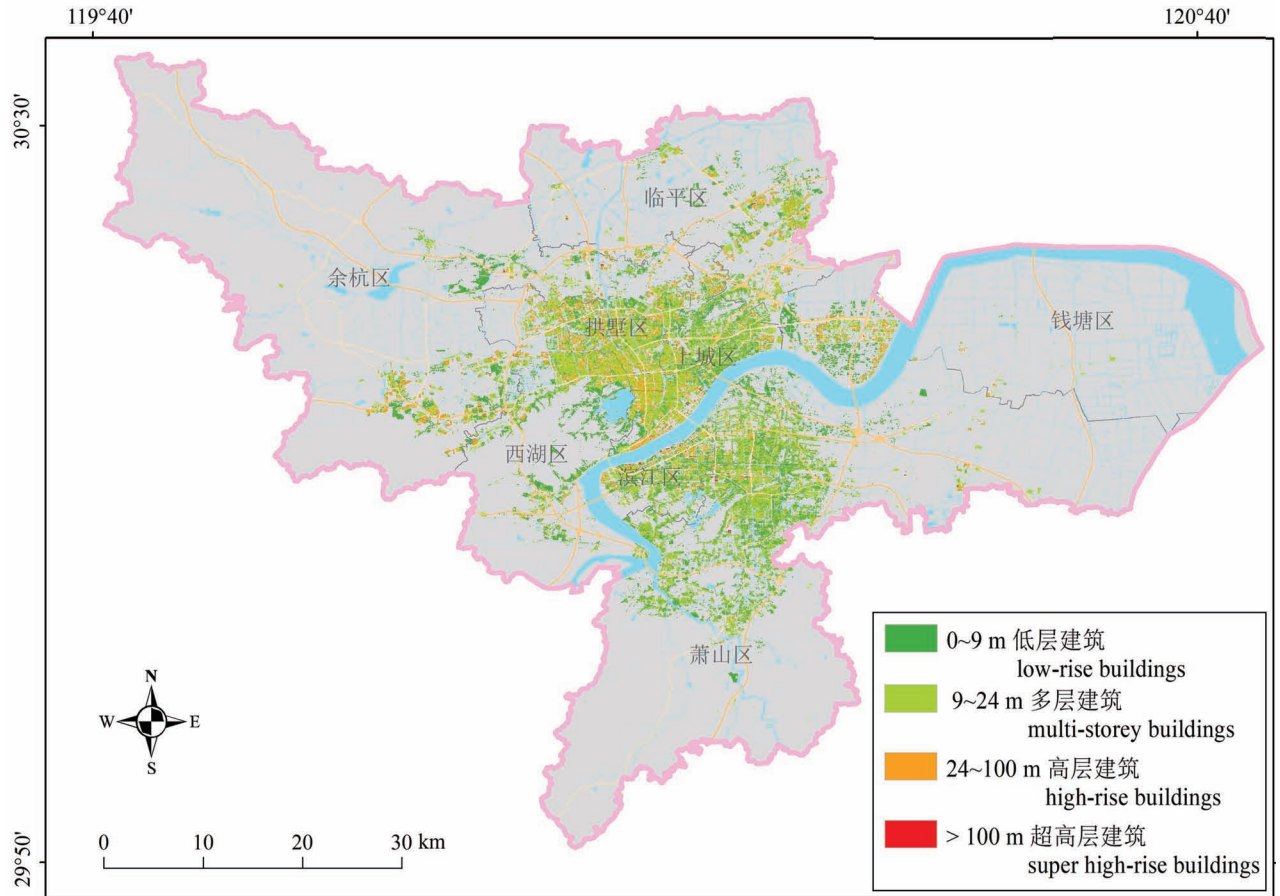


图5 杭州市主城区建筑高度分布图

Fig. 5 Spatial distribution of buildings height in main urban area of Hangzhou

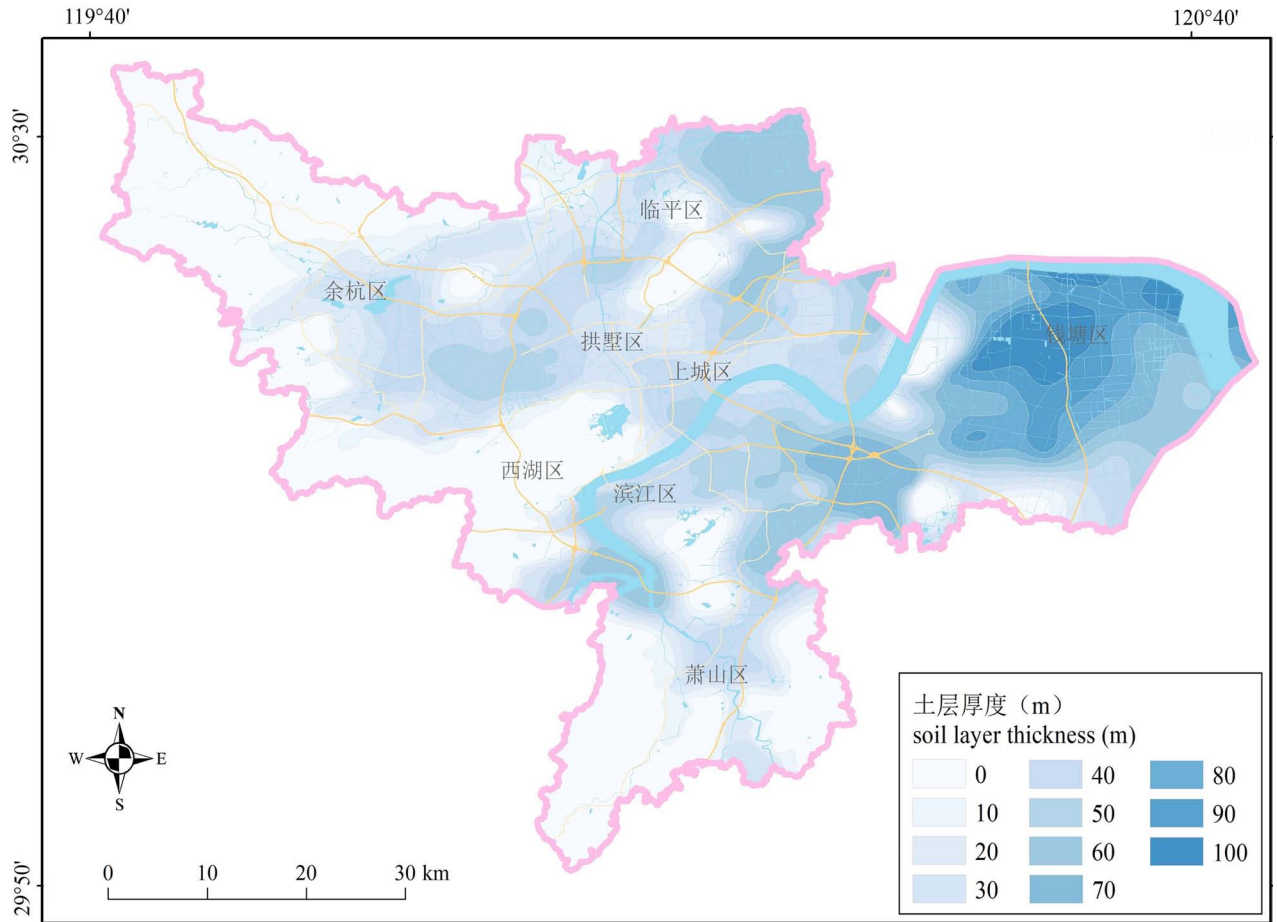


图 6 杭州市主城区土层厚度分布图

Fig. 6 Spatial distribution of soil layer thickness in main urban area of Hangzhou

发利用较发达,目前正迈向深层化和网络化,掌握其地下空间占用深度可为地下空间开发利用的科学规划提供基础。

2.2 研究区建筑高度与地层厚度分布

研究区建筑高度数据利用百度建筑数据,其中超高层建筑($H > 100$ m)占比 0.2%,主要位于中心城区、滨江区和临平区新建设超高层建筑;高层建筑($H > 24$ m)占比 9.2%,多层建筑($H > 9$ m)占比 42.6%,如图 5 所示。

研究区地层厚度数据通过杭州市三维地质模型提取,该模型是根据全市 21618 个钻孔标准层数据构建的第四系工程地质层组融合基岩露头属性的三维工程地质模型。在此基础上,按照 10 m 间隔标准提取了研究区内 100 m 以浅的基岩埋深(土层厚度)等值线,土层厚度分区如图 6 所示,整体呈现“西薄东厚”的格局。

2.3 评估结果

综合建筑高度分布图和地层厚度分布图,根据

公式(1),利用 ArcGIS 的空间分析计算得到杭州市主城区地下空间占用深度 Z 分布(图 7),其中近 39% 地下空间占用深度为 5 m,广泛分布于城市低层建筑区;近 36% 位于 30~50 m 区间内,密集分布于城市建筑群,是杭州市多层和高层建筑的主要占用深度。评估结果显示杭州市东部钱塘区目前地下空间仅零星占用,但该区地层较厚,存在软土、砂土等工程地质性质较差土体,在地下空间开发时需注意防控沉降、地面塌陷等地质安全风险。

3 结论

(1) 笔者等提出的城市地下空间占用深度快速评估方法主要通过小样本的调查统计,利用 MATLAB 非线性拟合获得精度较高的占用深度评估数学模型,适用于松散层厚覆盖城市大范围地下空间占用深度的快速评估。

(2) 利用笔者等提出的评估方法集成研究区建筑高度数据和三维地质建模数据,利用 GIS 空间分

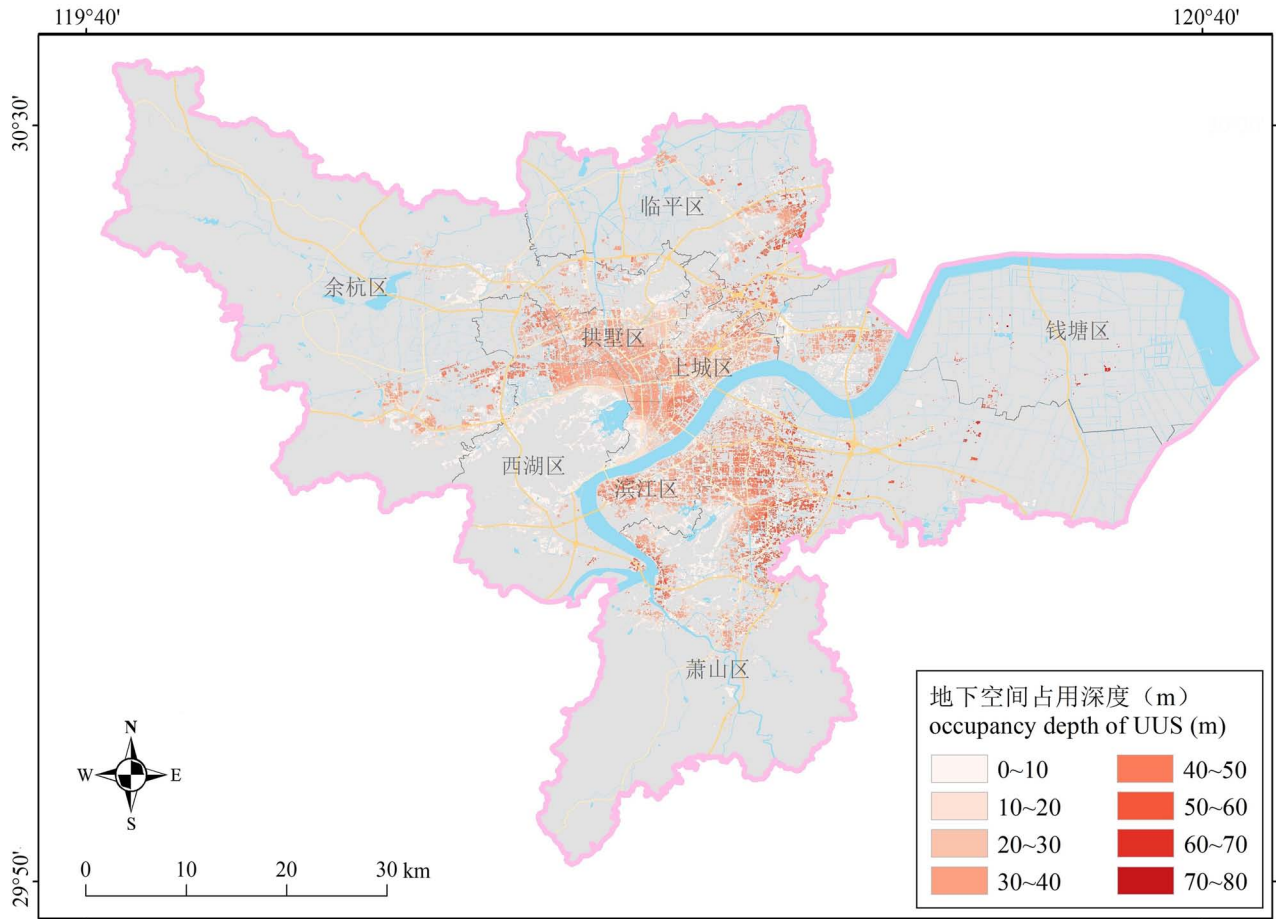


图7 杭州市主城区地下空间占用深度分布图

Fig. 7 Spatial distribution of occupancy depth of UUS in main urban area of Hangzhou

析对地下空间占用深度和平面分布格局进行评估,成果可为城市地下空间总体规划所需的大范围地下空间占用情况提供基础数据参考,评估精度受控于评估数学模型精度、建筑高度数据精度和三维地质模型精度。

(3)笔者等提出的快速评估方法根据研究区特点,主要针对低层建筑的天然地基和多层以上建筑的桩基,未考虑其它基础类型的多层以上建筑地基,未来拟根据研究对象和数据集成情况,开展考虑不同基础类型的城市地下空间占用深度评估。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

程光华, 苏晶文, 李采, 杨洋, 赵牧华, 王睿. 2019. 城市地下空间探测与安全利用战略构想. 华东地质, 40(3): 226~233.
葛伟亚, 王睿, 张庆, 邢怀学, 周洁. 2021. 城市地下空间资源综合利用评价工作构想. 地质通报, 40(10): 1602~1608.

苟富刚, 李明亮, 欧健, 顾春生, 蔡田露, 毛磊. 2023. 地上地下工程建设地质环境适宜性一体化评价——以连云港城市规划区为例. 地质论评, 69(1): 396~409.
何静, 郑桂森, 周圆心, 王继明, 刘予, 李超, 刘立岩, 何哈哈. 2019. 城市地下空间资源探测方法研究及应用. 地质通报, 38(9): 1571~1580.
李宏钊, 刘长礼, 吕敦玉, 刘松波, 张云, 卓子钧. 2021. 城市建筑地基基础占用空间遥地耦合探测技术方法. 地质通报, 40(5): 798~806.
李晓昭, 王睿, 顾倩, 周丹坤, 辛温潇. 2019. 城市地下空间开发的战略需求. 地学前缘, 26(3): 32~38.
屈红刚, 潘懋, 刘学清, 于春林. 2015. 城市三维地质建模及其在城镇化建设中的应用. 地质通报, 34(7): 1350~1358.
唐鑫, 龚绪龙, 许书刚, 张其琪, 郭慧, 邓峰丽. 2022. 苏南都市圈城市地下空间资源开发利用现状与地质调查对策. 地质论评, 68(2): 593~605.
田峰, 陈冬花, 黄新利, 李虎, 姚国慧, 赵俊鹏, 丁锋, 邢菲. 2017. 基于形态学阴影指数的高分二号影像建筑物高度估计. 遥感技术与应用, 32(5): 844~850.
邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 华健, 常晓军, 蔡小虎. 2022. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究——以杭州市为例. 地质论评, 68(2): 607~614.
熊巨华, 王远, 刘侃, 孙庆. 2013. 隧道开挖对邻近单桩竖向受力特

- 性影响. 岩土力学, 34(2): 475~482.
- 薛涛, 包训栓, 朱小弟, 黄骁. 2023. 多源数据三维地质结构模型约束的属性建模方法:以北京市通州城市副中心为例. 地学前缘, 30(3): 529~536.
- 杨洋, 王睿, 赵牧华, 邢怀学, 郑红军, 张庆, 陈春霞, 李云峰, 程光华. 2022. 城市地下空间资源探测评价技术体系研究. 华东地质, 43(2): 245~254.
- 赵旭东, 张平, 陈志龙. 2014. 历史文化街区地下空间资源质量模糊综合评估. 地下空间与工程学报, 10(4): 739~744.
- 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 王昕, 韩传峰, 张冬梅, 李晓军. 2019. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战. 地学前缘, 26(3): 22~31.
- Cheng Guanghua, Su Jingwen, Li Cai, Yang Yang, Zhao Muhua, Wang Rui. 2019&. Strategic thinking of urban underground space exploration and safe utilization. East China Geology, 40(3): 226~233.
- Ge Weiya, Wang Rui, Zhang Qing, Xing Huaixue, Zhou Jie. 2021&. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources. Geological Bulletin of China, 40(10): 1602~1608.
- Gou Fugang, Li Mingliang, Ou Jian, Gu Chunsheng, Cai Tianlu, Mao Lei. 2023&. Integrated evaluation of the suitability of geological environment for above-ground and underground engineering construction——Taking the urban planning area of Lianyungang City as an example. Geological Review, 69(1): 396~409.
- Guo Jiateng, Wang Xulei, Wang Jiangmei, Dai Xinwei, Wu Lixin, Li Chaoling, Li Fengdan, Liu Shanjun, Mark Walter Jessell. 2021. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm. Engineering Geology, 284, 106047.
- He Jing, Zheng Guisen, Zhou Yuanxin, Wang Jiming, Liu Yu, Li Chao, Liu Liyan, He Hanhan. 2019&. Research and application of detection methods for urban underground space resources. Geological Bulletin of China, 38(9): 1571~1580.
- Li Hongzhao, Liu Changli, Lv Duniyu, Liu Songbo, Zhang Yun, Zhuo Zijun. 2021&. Remote sensing & engineering geology survey technology for detection of occupied space by urban building foundation. Geological Bulletin of China, 40(5): 798~806.
- Li Xiaozhao, Wang Rui, Gu Qian, Zhou Dankun, Xin Yunxiao. 2019&. Prediction of strategic demand of urban underground space development. Earth Frontiers, 26(3): 32~38.
- Qu Honggang, Pan Mao, Liu Xueqing, Yu Chunlin. 2015&. Urban 3-D geological modelling and its application to urbanization. Geological Bulletin of China, 34(7): 1350~1358.
- Shao Jizhong, Liu Guan, Yuan Hong, Song Qize, Yang Minge, Luo Dan, Zhang Xiaosi, Tan Yanran, Zhang Yuxin. 2022. Evaluation and scale forecast of underground space resources of historical and cultural cities in China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11, 31.
- Tang Xin, Gong Xulong, Xu Shugang, Zhang Qiqi, Guo Hui Deng Fengli. 2022&. Development and utilization of urban underground space resources and geological survey countermeasures in southern Jiangsu metropolitan area. Geological Review, 68(2): 593~605.
- Tian Feng, Chen Donghua, Huang Xinli, Li Hu, Yao Guohui, Zhao Junpeng, Ding Feng, Xing Fei. 2017&. Building height estimation from GF-2 image based on morphological shadow index. Remote Sensing Technology and Application, 32(5): 844~850.
- Wu Wanben, Ma Jun, Ellen Banzhaf, Michael E. Meadows, Yu Zhaowu, Guo Fengxiang, Dhritiraj Sengupta, Cai Xingxing, Zhao Bin. 2023. A first Chinese building height estimate at 10 m resolution (CNBH-10 m) using multi-source earth observations and machine learning. Remote Sensing of Environment, 291: 113578.
- Xi Yue, Li Xiaojun, Zhu Hehua, Zhang Wanbin, Zhao Sicheng, Xu, Wenyun. 2022. Three-dimensional high-precision assessment of mountainous urban underground space resources: A case study in Chongqing, China. Tunnelling and Underground Space Technology, 123, 104439.
- Xing Huaixue, Dou Fanfan, Ge Weiya, Hua Jian, Chang Xiaojun, Cai Xiaohu. 2022&. The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development and utilization. Geological Review, 68(2): 607~614.
- Xiong Juhua, Wang Yuan, Liu Kan, Sun Qing. 2013&. Effects of tunneling on vertical bearing behaviors of adjacent single pile. Rocks and Soil Mechanics, 34(2): 475~482.
- Xue Tao, Bao Xunshuan, Zhu Xiaodi, Huang Xiao. 2023&. Attribute modeling constrained by multi-source data-based 3D geological structural model: A case study in Tongzhou District, Beijing. Earth Science Frontiers, 30(3): 529~536.
- Yang Chen, Zhao Shuqing. 2022. A building height dataset across China in 2017 estimated by the spatially-informed approach. Scientific Data, 9(1): 76.
- Yang Yang, Wang Rui, Zhao Muhua, Xing Huaixue, Zheng Hongjun, Zhang Qing, Chen Chunxia, Li Yunfeng, Cheng Guanghua. 2022&. Study on exploration and evaluation technology system of urban underground space resources. East China Geology, 43(2): 245~254.
- Zhao Xudong, Zhang Ping, Chen Zhilong. 2014&. Fuzzy synthesis evaluation for resource quality of underground space in historic and cultural blocks. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 10(4): 739~744.
- Zhu Hehua, Ding Wenqi, Qiao Yafei, Wang Xin, Han Chuanfeng, Zhang Dongmei, Li Xiaojun. 2019&. Issue and challenges in urban underground space utilization in China. Earth Science Frontier, 26(3): 22~31.

Rapid assessment of the occupancy depth of urban underground space based on building height and stratum thickness

YANG Yang^{1, 2, 3)}, SU Jingwen^{1, 2)}, ZHENG Hongjun^{1, 2)}, CAI Lei^{1, 2)}, CAI Xiaohu^{1, 2)},
WANG Rui^{1, 2)}, XING Huaixue^{1, 2)}, LI Yunfeng^{1, 2)}, CHENG Guanghua^{1, 2)}

1) *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016;*

2) *Engineering Innovation Center for Urban Underground Space Exploration and Evaluation, Ministry of Natural Resources, Nanjing, 210016;*

3) *School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha, 410083*

Objectives: The high-density buildings in urban areas actually occupy the underground space resource at a certain depth below them. The occupancy depth has a significant impact on the interconnected development of urban underground space (UUS). Therefore, it is imperative to ascertain the occupancy depth and spatial distribution prior to UUS planning. The occupancy depth of UUS corresponds to the depth of the foundational load-bearing stratum, and is contingent upon factors such as building height and the geological characteristics of the site. In this paper, a rapid assessment methodology for determining the occupancy depth of UUS based on building height and stratum thickness was proposed and applied to the study area of Hangzhou main urban area. Firstly, the mathematical assessment model was formulated employing building height data from surveys and collected foundation data. Subsequently, the rapid assessment of occupancy depth of UUS in Hangzhou main urban area was achieved by the GIS-based spatial analysis using the building data sourced from Baidu and the stratum thickness data generated by Hangzhou's 3D geological model. The research results can provide an effective method of assessing the large-scale UUS occupancy requisite for UUS planning endeavors.

Keywords: building height; stratum thickness; urban underground space; occupancy depth; rapid assessment model

Acknowledgements: This paper is supported by the National Natural Science Foundation (No. 42071256) and Program of China Geological Survey (No. DD20221732)

First author: YANG Yang, male, born in 1991, master, major in geological engineering, engineer, is mainly engaged in urban engineering geology and underground space resource survey and assessment research; Email: yyang_a@mail.cgs.gov.cn

Manuscript received on: 2023-10-07; Accepted on: 2024-03-20; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.062

Edited by: LI Ming, ZHANG Yuxu