

doi: 10.12029/gc20190301

杨文采, 田钢, 夏江海, 杨波. 2019. 华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景[J]. 中国地质, 46(3): 447-454.

Yang Wencai, Tian Gang, Xia Jianghai, Yang Bo. 2019. The prospect of exploitation and utilization of urban underground space in hilly areas of South China [J]. *Geology in China*, 46(3): 447-454(in Chinese with English abstract).

华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景

杨文采, 田钢, 夏江海, 杨波

(浙江大学地球科学学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 地下工程设施的最大优点是节能和安全。节能来自于地下的恒温环境, 安全来自于封闭的环境, 很少人为的干扰。本文基于杭州市西湖一带山体结构特点和地下空间开发适宜性分析, 提出华南丘陵地区的城市地下空间开发有广阔的利用前景。具体阐述了如何保持优秀生态环境的科学问题, 可利用地下空间的分类和特点, 可利用地下空间的调查内容和方法。针对当前地下空间开发利用存在的问题, 提出了华南丘陵地区城市地下空间开发利用的建议。

关键词: 丘陵地区; 地下空间; 开发利用; 科学问题; 分类调查; 调查方法

中图分类号: P642.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)03-0447-08

The prospect of exploitation and utilization of urban underground space in hilly areas of South China

YANG Wencai, TIAN Gang, XIA Jianghai, YANG Bo

(School of Geosciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: The greatest advantage of underground engineering facilities lies in energy saving and safety. Energy-saving comes from the underground constant temperature environment, whereas safety comes from the closed environment as well as relatively insignificant artificial interference. The development of urban underground space in the hilly areas of South China has a broad prospect of utilization. This paper reports the preliminary results of the project on the development and utilization prospects of urban underground space, including the scientific problem as to how to maintain excellent ecological environment, the classification and characteristics of underground space, the investigation contents and investigation methods of usable underground space. Aimed at tackling the problems existent in the exploitation and utilization of urban underground space, the authors put forward some suggestions on the development and utilization of urban underground space in the hilly areas of South China.

Key words: hilly areas; underground space; development and utilization; scientific problems; classification; investigation methods

About the first author: YANG Wencai, male, born in 1942, professor, Academician of Chinese Academy of Sciences, majors in

收稿日期: 2019-05-06; 改回日期: 2019-05-20

基金项目: 浙江省院士行业科技战略咨询项目(41574111)资助。

作者简介: 杨文采, 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事固体地球物理学研究; E-mail: yangwencai@cashq.ac.cn, yang007@zju.edu.cn。

continental dynamics and geophysical data processing and analysis; E-mail: yangwencai@cashq.ac.cn, yang007@zju.edu.cn.

Fund support: Supported by Academician Consultant Project of Zhejiang Province(No. 41574111).

1 引言

在合理保护生态环境的前提下,对城镇地下空间的适度开发和有效利用是中国高速发展的城镇化进程中面临的一个重大课题。雄安新区在地上、地下打造“两个雄安”的规划建设先进思想,对城市地质工作适应自然资源改革需求提出了新的理念和要求。习近平总书记在“十九大”的报告中对城市地质工作提出了新要求,“要求城市地质工作适应自然资源改革需求,加快自然资源资产评估和清单建立,查清城市空间资源和用途,科学划定三条红线,加快环境污染评估,实施流域环境和近岸海域综合治理。”李克强总理在2017年的政府工作报告中也提出了“统筹城市地上地下建设,加强城市地质调查”的要求。在浙江省院士行业科技战略咨询项目的支持下,我们基于杭州市西湖一带山体结构特点和地下空间开发适宜性分析,提出华南丘陵地区的城市地下空间开发有广阔的利用前景,相关认识对于其他丘陵地区的城市地下空间开发具有一定参考意义。

2 保持优秀生态环境的地下空间开发利用理念

根据经济学家的估算,在人均收入达到中等水平后且地价快速提高的大城市,开发地下空间在成本上就可能优于开发地面空间。地下空间可以有许多用途,例如,地下车库仓储和物流体系,地下博物馆陈列馆画廊等文化服务体系,地下旅游餐饮运动等大众服务体系,地下大型电力和电子计算设施,地下重大科学实验设施,等等。地下工程设施的最大优点是节能和安全,节能来自于地下的恒温环境,安全来自于封闭的环境,因为很少有人为的干扰。对杭州这样的旅游城市来说,建设地下宾馆不仅节能,还可以促进夜间旅游。

城市地下空间开发与利用同提高人民的生活水平和幸福感息息相关。在城市地下空间开发时要保持良好的生态环境,必须考虑“三不要”和“三优先”的原则。即:不要搞地下永久性住宅,不要搞

地下会场和大型娱乐场所,不要在地表河流等水系下方进行大规模开发;优先利用无地面负荷的地下空间,优先利用地震、滑坡等地质作用相对弱的地区的地下空间,优先利用废弃矿场等环境差的区域地下空间,可以在改善和修复环境的同时增加财富。简言之,城市地下空间开发的关键科学问题是如何保持优秀的生态环境,包括:要保持优秀的自然景观不被破坏,要保持原来的地下水流状态不被改变,要保持原来的生物链不发生变化。为解决这三个科学问题,须通过调查取得地下岩体强度和孔隙度等各种数据。

地下浅地表空间的地球物理探测是数据的主要来源,而在城市采用高分辨抗干扰探测技术是关键。为此,必须全面调查可开发地下空间的类型、范围和位置,为城市科学规划提供依据。地下空间开发利用的前提是对地下空间的地质构造、水文环境以及岩土结构的调查和地球物理技术的充分运用。浙江地处华南丘陵地区,城市地下空间开发和利用面临很多特殊问题,从事丘陵地区地下空间的开发与利用研究具有地域优势。

3 可利用地下空间的分类和特点

根据杭州市的发展规划以及目前地质情况来看,城市地下空间开发利用要同时遵从以下五个原则:生态保护原则、资源保护原则、交通优先原则、开发成本原则及长远规划原则。因此,城市地下空间和城市地质环境以及地下自然资源的摸底探测应该先行。规划开发地块要地上、地下统筹考虑,地价的成本计算也应包含地上与地下两个方面。

华南丘陵地区的山体大都是尚未开发的地下空间。山体斜坡的结构分为6种类型,它们的工程地质属性和特点各不相同,开发评价级别也不一样,详见表1。

在六种类型的山体中,最有利开发的是块状山体结构,杭州市西湖一带的山体属于块状山体结构。图1是西湖一带的地质图,可见西湖一带的山体岩石为古生代砂页岩和中生代火山岩,都经历了1亿年以上的风化剥蚀,有利于地下空间开发。研

究区也有少量石灰岩含岩溶结构,必须仔细调查。

根据杭州市的地形地貌和地面建筑情况,依据地下空间利用的开挖类型,我们认为城市地下空间开发区块最佳区域可分为3种类型(图2):(1)城内无地面建筑区块的可地面开挖型;(2)生态保护山丘区域的地下开挖型;(3)为城郊未开发山前带的混合开挖型。

适于混合开挖型的城郊山前带,对新建大型地下科学城特别有利。位于深圳的中国散裂中子源基地CSNS就是这种类型地下空间开发利用的成功例证(图3a)。CSNS建在18 m深的地下,其中直线加速器隧道长240 m,环形加速器周长228 m,相当于半个足球场大小(图3b)所示。其建设内容包括一台8000万eV的直线加速器、一台16亿eV快循环

表1 山体(坡体)结构类型评价
Table 1 Types of hill's construction

类型	工程地质属性	工程地质性质级别	特点
1块状结构	硬质岩石,整体强度高	优良	抗风化能力较强
2层状结构	可能有结合力不强结构面,层间错动面或软弱夹层	变化	强度和变形特性均具各向异性特点
3碎裂结构	变形模量和承载能力低	差	
4散体结构	节理、裂隙发育,岩体破碎	中	容易开挖,工程复杂
5岩溶结构	石灰岩白云岩山体	变化	要求详细调查
6土山	土质山体(坡体),土林	差	强度低,容易风化

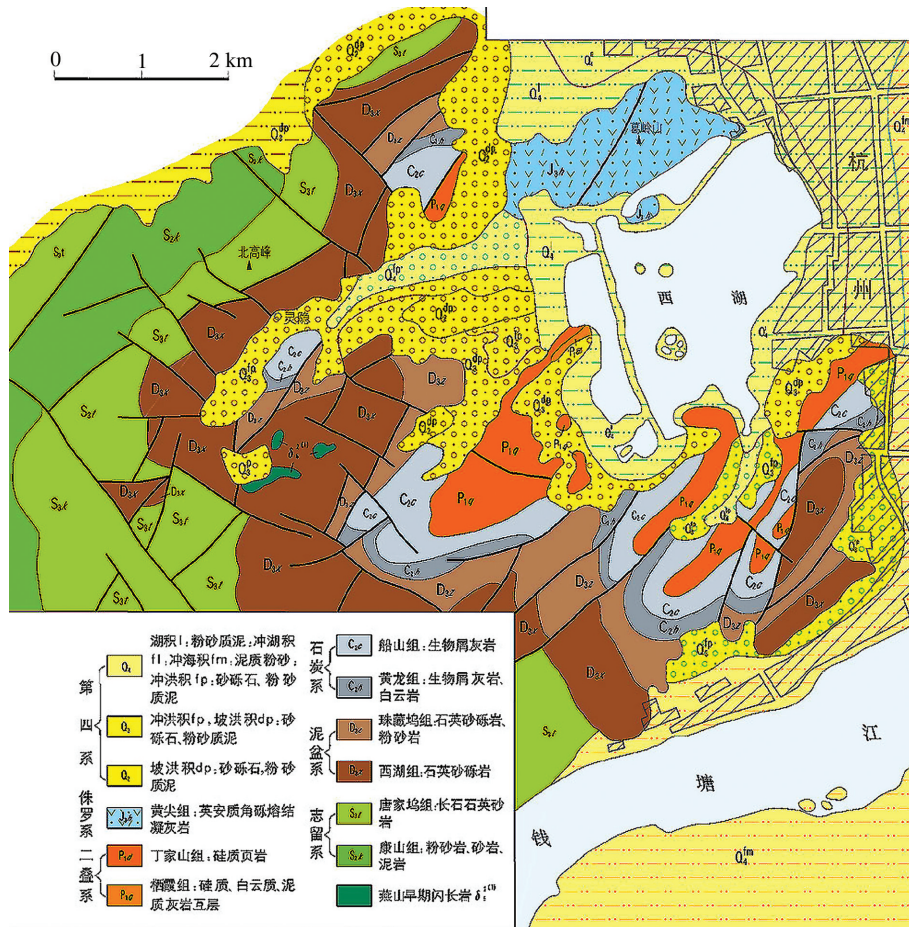


图1 杭州西湖地区地质图
Fig.1 Geological map around West Lake area in Hangzhou City

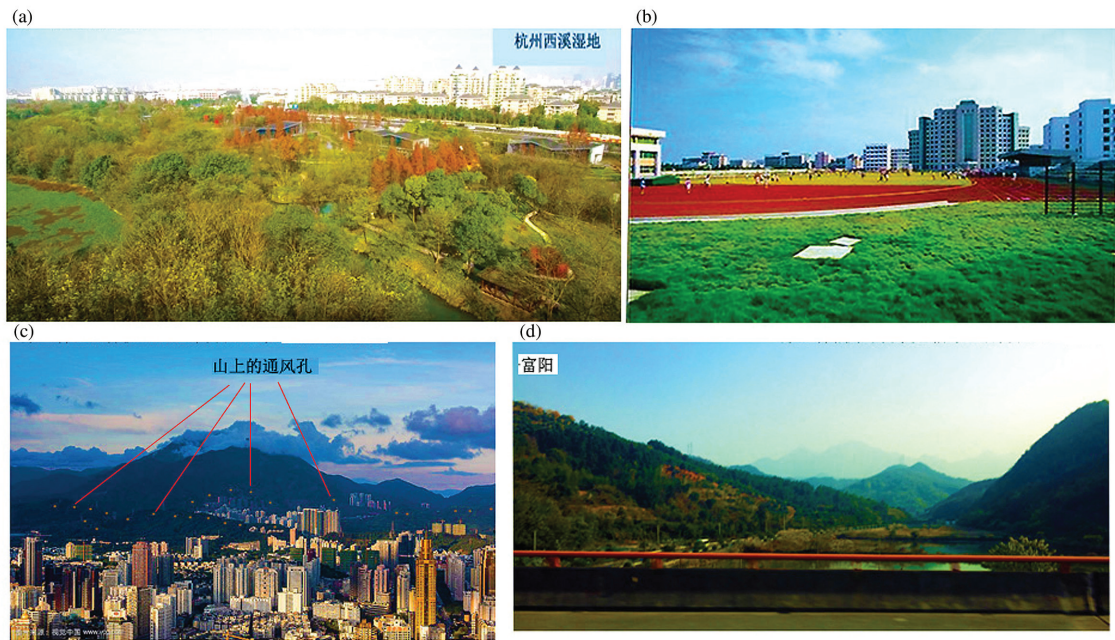


图2 三种类型地貌示意图

a、b—城内无地面建筑区块的可地面开挖型；c—生态保护山丘区域的地下开挖型；d—城郊未开发山前带的混合开挖型

Fig.2 Three types of landforms for underground utility

a, b—Possibility of direct digging from the surface; c—Underground digging in surface-protection areas;

c—Mixed digging areas

同步加速器、1个靶站以及一期3台供科学实验用的中子散射谱仪。这种采用地面上深开挖的方式建设中国散裂中子源的地下实验室,不仅节约了地面土地、美化了环境,还节约了建设成本。黄河小浪底的地下发电厂也是山前带的混合开挖成功的典范,发电厂深入地下40 m,已经安全生产了20年。

图4为基于生态保护的山体地下宾馆和文体设施的示意图。山体地下空间开发利用对解决华南丘陵地区的大城市的难题特别有意义。山体地下空间不需要空调,只需要成本很低的通风和排水。只要设计到位,山体地下空间开发利用对地面的植被和生态不会有明显的影响,因为除了多几个通风口以外,地面没有其他的改变。

4 可利用地下空间的调查内容和方法

4.1 主要调查内容

开展华南丘陵地区的地下空间开发利用研究的第一步,是应用地球物理方法技术进行可行性研究,以获得城市和周边地下的基岩性质、地质构造、地貌、土层厚度等基础图件,尤其是调查地下岩层

的岩性、强度、含水度和变形带分布,最后圈定规划区域可开发地下空间重点地段的范围,位置和类型。地球物理方法是利用无损探测地面的物理场,来侦测地下土壤岩石层的几何结构与物理性质。

4.2 地球物理调查方法

调查地下土壤岩石层的岩性、强度、含水度和变形带分布要分别应用不同的地球物理方法。岩层的岩性和地震纵波速度关系最密切,岩层的强度和地震横波速度关系最密切;而岩层的含水度和电阻率的关系最密切,土壤岩石含少量的水就会引起电阻率的明显变化。地下岩层中有多种类型的变形带,其中对地下工程影响最大的是产状比较平缓的拆离带和滑脱带。这种拆离带的规模宏大,在平时地应力处于平衡状态,如果不发生大地震不会活动,对城市运行通常不会有影响。但是,如果大规模的开挖接近了拆离带,会引起变形带上下地应力失去平衡,造成上方的城市建筑大面积基础失稳。拆离带的规模大,会产生多种地球物理场的异常带和梯度带,应用地球物理方法可以查明。

地球物理方法在地下工程探测上已经取得了

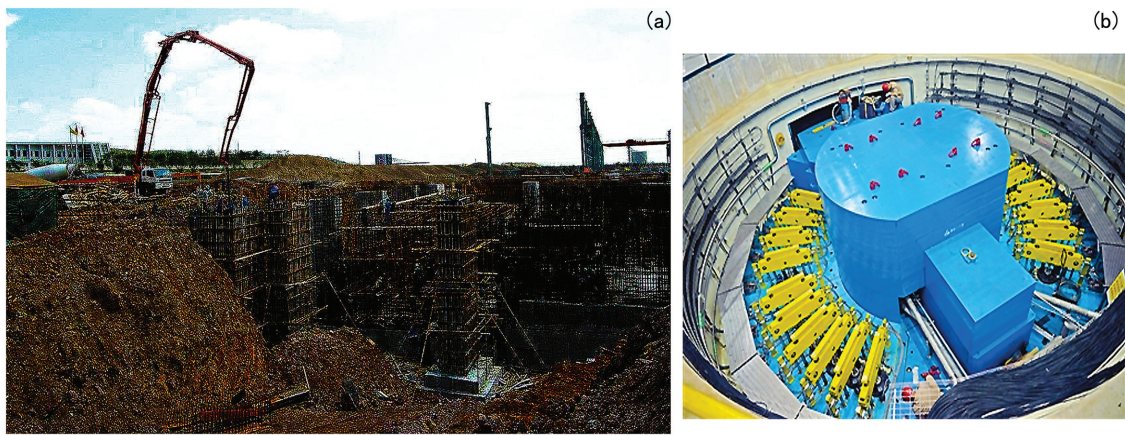


图3 地上地下混合开挖型示意图
Fig.3 The mixed digging performance (a) and the underground laboratory (b)

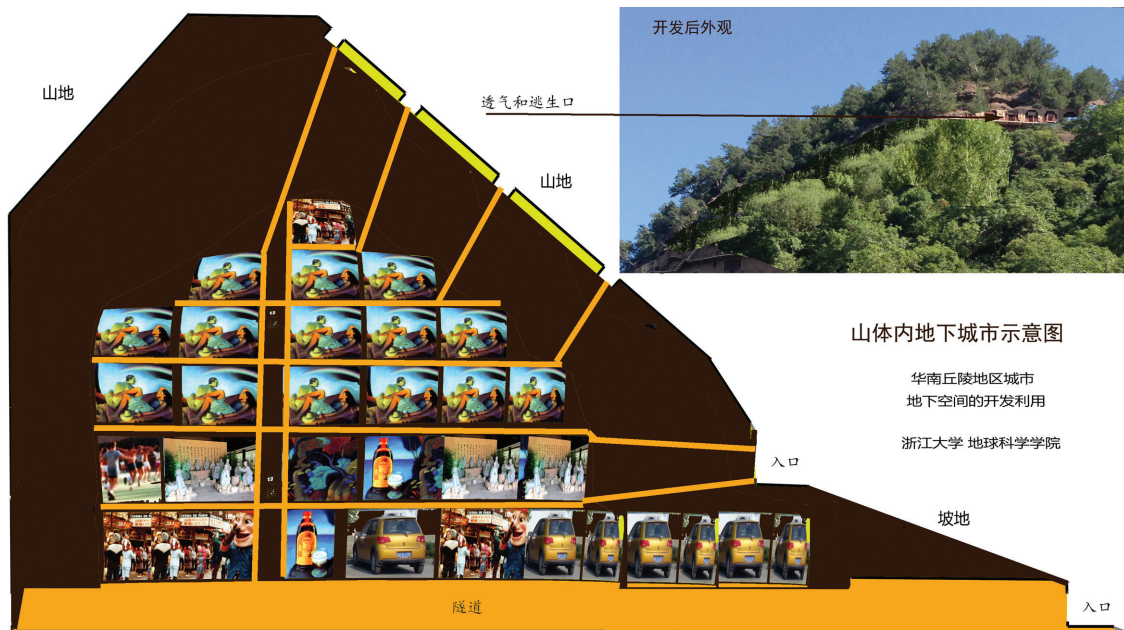


图4 山体地下宾馆和文体设施工程示意图
Fig.4 Illustration of serving spaces within a hell of Hangzhou City

非常好的效果 (Yang, 1988,1990,1997, 2014; Du and Yang, 1991; Yang et al., 1993, 1994, 2015; Xia et al., 1999, 2003, 2006, 2004, 2014, 2015; Gang et al., 2003, 2006, 2008; Qu et al., 2010; Cheng et al., 2016), 对于在山地地下空间调查的内容和方法参见表2。其中地球物理方法在杭州市地下空间调查的应用研究可详见文献(田钢等,2019)。

在地下空间开发利用的城市规划时,应用地球物理方法的地下空间调查要立足长远,分阶段进

行。第一阶段属于侦查调查,要对全市可用地下空间初步摸底;第二阶段属于普查,要对全市的可用地下空间全面摸底,并选择出优先开发的区段;第三阶段属于详查,要对优先开发的区段可用地下空间详细调查,为城市规划和进一步工程的设计提供基础资料。

杭州市的调查方法适用性研究表明(田钢等, 2019),浅层的岩土强度调查最好采用多节点高频面波的噪声方法。在山地有基岩出露地区,若进行

表2 山体(坡体)地下空间利用调查的内容和方法
Table 2 Contents and methods of the investigations

序号	内容	方法	目标	应用
1	总体强度	地震为主	计算平均强度	工程地质性质分级
2	总体含水度	电法、电磁方法为主	计算总体含水度	水文地质性质分级
3	岩性变化	地震、地质雷达	地层岩石/土壤成分	工程地质性质分级
4	变形构造	综合	节理断层裂隙破碎带	工程地质性质分级
5	地下水流模式	电法、电磁方法为主	地下水系情况,岩溶	水文地质性质分级
6	总体结构类型	综合	工程地质属性	工程地质性质分级

大范围和大深度的地质调查可开展噪声高频面波、音频大地电磁测深等方法观测,小范围和高分辨率的地质调查可开展地质雷达和声波探测。在第四系软土覆盖区域可开展地震体波和面波成像、电阻率层析成像以及跨孔地球物理成像方法的调查。应注意对已有钻井和测井资料的收集,应用于对反演计算加以约束。

4.3 地球物理初步调查实例

现介绍应用音频大地电磁法方法调查西湖区丘陵山体的结构的实例。对山体1 km以浅的区域进行电阻率成像,探索在城市环境下,针对山体进行天然场源的电磁成像技术。在城市开展天然源的大地电磁勘探,必然面临记录信号受环境电磁干扰的问题,此次观测在两天不同的时间段都记录到了强干扰信号,可能为通信雷达信号。该信号幅值强、频带宽,难以通过滤波等手段消除,只能在后续的数据处理中将该信号的时间段删除。

数据采集的有关技术参数见表3,其测点位置如图5a所示。经过常规反演后获得了西湖区主要山体的单点电性柱状图,见图5b。由此图可见,杭州市地下250~450 m深度有低电阻率层,可能反映地层中的拆离带或者滑脱带,对上方的建筑稳定性有影响。此低电阻率层厚度在40~150 m,在桃源岭和玉皇山的埋藏比较浅,深度在250 m左右,其他地方埋藏比较深。为保护有低电阻率拆离层的自然稳定性,可建议杭州市地下空间开发的最大深度为150 m。

5 华南丘陵地区城市地下空间开发利用的建议

中国华南是在地貌上属于丘陵地区,也是人口比较密集、优质农田比较稀少的地区。华南的城市

大都位于河口三角洲或者山间盆地,城市化的结果使土地资源日益贫乏,要保持优质农田面积不减少十分困难。因此开发利用华南丘陵地区广泛分布的山体地下空间成为摆脱土地资源困境、平衡优化生态环境和资源开发的一条重要途径。

华南丘陵地区地壳稳定性好,土壤层和风化层不厚,城市山体地下空间开发利用的潜力很大。但是,以前对地下空间的开发利用还没有专门的法规,也没有专门的部门来管理。因此,建议由政府规划部门牵头,一步步开展地下空间的开发利用,不要一哄而起。具体建议如下:

(1)把地下空间开发利用作为地面、地下智慧城市建设的内容之一,相关大城市政府成立专门办公室,组织开展地下空间开发利用的调查,为数据库建设提供基础资料。同时沟通地方人大常委会,为地下空间开发利用的产权立法提交方案。

(2)目前土地资源的价值是用地面面积来计算的,而城市地下空间资源应该用体积来计算。为了开展丘陵地区城市地下空间的开发利用,必须明确城市地下空间的价值估算规则,建立城市地下空间的价值评价体系。

(3)城市地下空间开发利用要同时遵从以下原则:生态保护原则、资源保护原则、交通优先原则、开发成本原则、长远规划原则。其中生态保护原则指保持岩土的稳定性和生物的多样性;资源保护原则指水质、土壤、生物资源以及人工产业的保护;交通优先原则指保证交通和物流系统的优化;开发成本原则指节约开发成本,兼顾地面开挖和地下开挖;长远规划原则指用发展的眼光对地上、地下统筹考虑,留有余地,作长远考虑。

(4)遵从上述原则,首先要开展城市地下空间调查,对城市地下空间和城市地质环境以及地下自

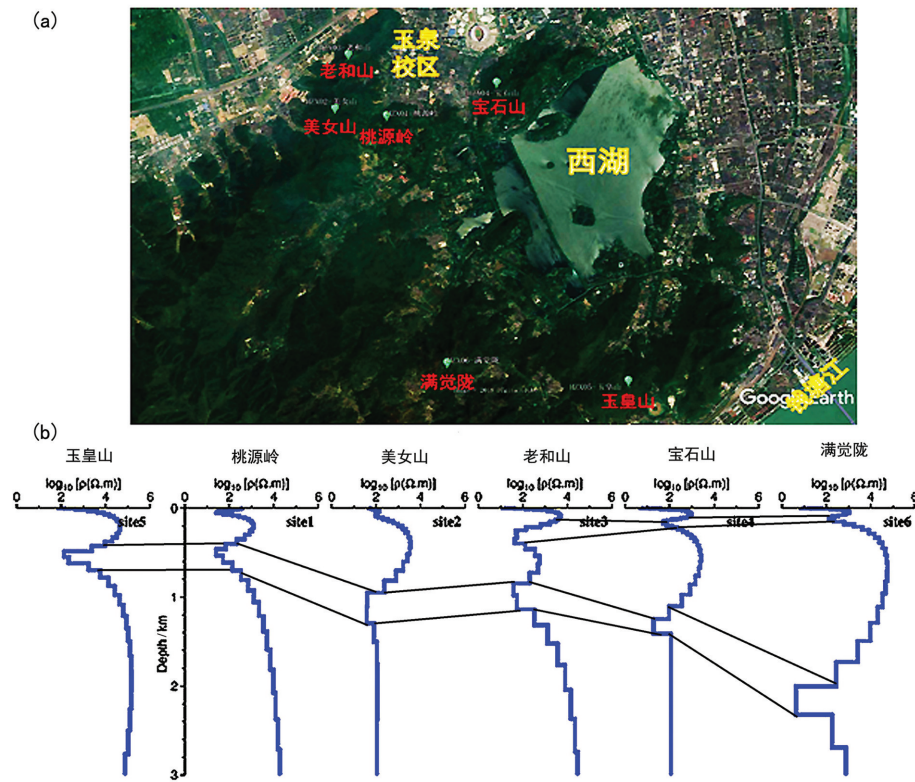


图5 杭州西湖区音频大地电磁测量测点分布图(a)和联合电阻率柱状图(b)
柱状图之间的连线表示低电阻率的层位,反映拆离带或者滑脱带

Fig.5 The magnetotelluric survey area in Hangzhou City (a) and electrical resistivity columns of six stations (b)
Lines indicate possible detachment deformation

表3 音频大地电磁法数据采集参数简表
Table 3 MT parameters in the investigation

采集时间	2018年6月21日和2018年6月23日
仪器	德国产GMS07e宽频带大地电磁仪2台
点位	桃源岭、美女山、老和山、宝石山、玉皇山、满觉陇共6个测点
采集参数	每测点2个电道3个磁道,电极距40~50 m,以52 kHz采样率采集15 s,以8 kHz采样率采集30 min
有效频段	100~10000 Hz

然资源进行摸底探测,查明地下地层的结构类型和工程地质属性。然后确定开发区块的建设模式和用途。应用低成本的地球物理方法技术可以调查地下岩层的岩性、强度、含水度和变形带分布,取得城市和周边的基岩性质、地质构造、地貌、土层厚度等基础数据,最后圈定规划区域可开发地下空间重点地段的范围,位置和类型。

(5)地下岩层中有多种类型的变形带,其中对地下工程影响最大的是产状比较平缓的拆离带和滑脱带。因此,查明城市下方拆离带和滑脱带分布和深度,确定地下空间开发的最大深度,在规划地下空间开发利用时很重要。

(6)如果调查和设计得当,地下空间开发利用不仅不会破坏南方优美的生态环境,还可能改善和修复不好的生态环境。对一些老旧城市和矿山,生态环境的修复和地下空间开发利用完全可以结合起来,可获得一举两得的改造效果。

致谢:感谢浙江省院士专家工作站对本项目研究的资助,以及浙江大学地球科学学院全体教职员工的工的支持。

References

Cheng F, Xia J, Luo Y. 2016. Multi-channel analysis of passive surface waves based on cross-correlations[J]. Geophysics, 81(5):

- 57–66.
- Du Jianyuan, Yang Wencai. 1991. Cascade approach for cross-hole seismic tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 34(4): 679–690.
- Qu Chen, Yang Wencai, Yu Changqing. 2010. Application of high resolution P and S wave cross-hole tomography to understanding the reservoir features[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(12): 2944–2954 (in Chinese with English abstract).
- Shahad Ali Shaikh, Tian Gang, Shi Zhanjie, Zhao Wenke, Junejo S A, 2018. Frequency band adjustment match filtering based on variable frequency GPR antennas pairing scheme for shallow subsurface investigations[J]. Journal of Applied Geophysics, 149: 42–51.
- Tian Gang, Cheng Suo, Shi Zhanjie, Wang Kai. 2008. Attenuation estimation in thin transitional layers with gradational velocity change[J]. Near Surface Geophysics, 6(3): 149–156.
- Tian Gang, Steeples Don, Xia Jianghai. 2003. Multichannel analysis of surface wave method with autojuggie[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23(3):243–247.
- Tian Gang, Shi Zhanjie, Dong Shixue, Wang Zhejiang. 2006. Geophone coupling match and attenuation compensation in near-surface seismic exploration[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 11(2):111–122.
- Tian Gang, Steeples D, Xia Jianghai, Spikes K T. 2003. A useful resorting in surface wave method with theautojuggie[J]. Geophysics, 68(6):1906–1908.
- Tian Gang, Xia Jianghai, Yang Wencai, Bao Xuewei. 2019. Prospecting methods and techniques of urban underground space in Hilly area of Hangzhou City [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), in press (in Chinese with English abstract).
- Xia J. 2014. Estimation of near-surface shear-wave velocities and quality factors using multichannel analysis of surface-wave methods[J]. Journal of Applied Geophysics, 103:140–151.
- Xia J, Chen C, Li P H, Lewis M J. 2004. Delineation of a collapse feature in a noisy environment using a multichannel surface wave technique[J]. Geotechnique, 54(1): 17–27.
- Xia Jiang, Gao Lingli, Pan Yudi, Shen Chao, Yin Xiaofe. 2015. New findings in high-frequency surface wave method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(8): 2591–6025 (in Chinese with English abstract).
- Xia J, Miller R D, Chen C, 2006. Estimation of elastic moduli in a compressible Gibson half-space by inverting Rayleigh wave phase velocity[J]. Surveys in Geophysics, 27(1):1–17.
- Xia J, Miller R D, Park C B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave[J]. Geophysics, 64: 691–700.
- Xia J, Miller R D, Park C B, Tian G. 2003. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes[J]. Journal of Applied Geophysics, 52(1): 45–57.
- Yang Wencai. 1988. Towards high resolution velocity imaging: A perspective on seismic tomographic techniques[J]. Earthquake Research in China, 1: 529–544.
- Yang Wencai. 1990. Seismic velocity imaging of inhomogeneous layered medium[J]. Chinese J. Geophysics, 33(2):265–282.
- Yang Wencai, Du Jianyuan. 1993. Approaches to solve nonlinear problems of seismic tomography[J]. Acoustic Imaging, 20:591–604.
- Yang Wencai, Du Jianyuan. 1994. A new algorithm of seismic tomography with application to engineering detection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 37(2): 331–338 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai. 1997. Theory and Methods in Geophysical Inversion [M]. Beijing: Geological Publishing House:1–273 (in Chinese).
- Yang Wencai. 2014. Reflection seismology, theory, data processing and interpretation[M]. Waltham Elsevier.
- Yang Wencai, Xu Yixian, Zhang Luolei, Yu Changqing, Yu Peng, Zhang Binzheng, Yang Bo. 2015. Magnetotelluric investigation and 3D lithospheric structures in the Tarim terrane[J]. Acta Geologica Sinica, 88(7): 1151–1161 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Zhang Luolei, Xu Yixian, Yu Changqing, Yu Peng, Zhang Binzheng, Yang Bo. 2015. Three dimensional electrical resistivity structures of the deep Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 1235–1245 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 瞿辰, 杨文采, 于常青. 2010. 井间高分辨率纵横波层析成像研究井间油藏[J]. 地球物理学报, 53(12): 2944–2954.
- 田钢, 夏江海, 杨文采, 鲍学伟. 2019. 杭州市地下空间调查的方法技术研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 待发表.
- 夏江海, 高玲利, 潘雨迪, 沈超, 尹晓菲. 2015. 高频面波方法的若干新进展: 地球物理学报, 58(8): 2591–2605.
- 杨文采. 1997. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社: 1–273.
- 杨文采, 杜剑渊. 1994. 层析成像新算法在工程中的应用[J]. 地球物理学报, 7: 239–245.
- 杨文采, 徐义贤, 张罗磊, 于常青, 于鹏, 张秉政, 杨波. 2015. 塔里木地体大地电磁调查和岩石圈三维结构[J]. 地质学报, 88(7): 1151–1161.
- 杨文采, 张罗磊, 徐义贤, 于常青, 于鹏, 张秉政, 杨波. 2015. 塔里木盆地电阻率三维结构[J]. 地质学报, 88(12): 1235–1246.