

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.02.001

引用格式: 杨文采, 田钢, 夏江海, 等. 杭州地区地下空间调查地球物理方法技术研究[J]. 华东地质, 2021, 42(2): 125-136.

# 杭州地区地下空间调查地球物理方法技术研究

杨文采<sup>1</sup>, 田 钢<sup>1</sup>, 夏江海<sup>1</sup>, 鲍学伟<sup>1</sup>, 王帮兵<sup>1</sup>, 石战结<sup>1</sup>, 杨 波<sup>1</sup>,  
赵文轲<sup>1</sup>, 宓彬彬<sup>1</sup>, 陈焕元<sup>2</sup>, 郭 霞<sup>3</sup>

(1. 浙江大学地球科学学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省核工业二六二大队, 浙江 湖州 313000;  
3. 核工业湖州工程勘察院有限公司, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 随着中国经济的快速发展和城市化进程的加快, 有限的土地资源和城市发展之间的矛盾越来越突出, 城市地下空间的安全、合理利用和地质环境保护具有重要的战略意义。为了解决 G20、亚运会以及数字经济为杭州市快速发展带来的人口快速增长与土地资源有限的瓶颈问题, 针对以杭州为代表的南方丘陵地区地下空间精细探测需求, 开展了弹性波法、电法与电磁法等多种地球物理方法的可行性研究。结果表明: 不同勘探方法在探测深度、分辨率以及勘探效率上具有明显的差异性, 需要根据地下地质状况以及地表条件选择合适的勘探方法进行探测, 这对类似丘陵地区城市地下空间开发及利用具有指导意义和参考价值。

**关键词:** 地下空间调查; 地球物理技术; 多源面波; 地震体波; 电(磁)法

**中图分类号:** P631.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2021)02-125-12

在合理保护生态环境的前提下, 对城镇地下空间适度开发和有效利用是中国高速发展城镇化进程中面临的重大课题。雄安新区在地上、地下打造“两个雄安”的先进规划建设思想, 对城市地质工作适应自然资源改革需求提出了新要求。习近平总书记在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告中对城市地质工作提出了“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”的新要求。李克强总理在 2017 年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。

在此背景下, 笔者等通过浙江省院士行业科技战略咨询项目“华南丘陵地区城市地下空间的开发利用前景分析研究——以杭州市为例”、杭州多要

素城市地质调查项目工作任务“杭州地区 2019 年地震多源面波与微动及地震反射测量”以及浙江省科技厅委托的“CEPC-SPPC 项目湖州地质条件预可行性勘察”等项目, 开展了华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景和地球物理调查方法研究, 取得了一些有价值的成果和认识。关于城市地下空间开发利用前景方面的成果及方法技术研究见文献<sup>[1]</sup>及相关报道<sup>[2-3]</sup>, 本文介绍适合杭州市及附近地区的地球物理方法筛选和论证, 这对类似丘陵地区城市地下空间开发及利用具有指导意义和参考价值。

## 1 杭州市地下空间地质资料分析

### 1.1 杭州市地貌与第四纪地质概况

由杭州市地貌与第四纪地质略图(图 1)可知, 杭州市主要地貌分区有 3 类, 分别为中低山丘陵区、

\* 收稿日期: 2021-03-15 修订日期: 2021-04-20 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 浙江省院士行业科技战略咨询项目“华南丘陵地区城市地下空间的开发利用前景分析研究——以杭州市为例(编号: 107401+W01701)”项目资助。

第一作者简介: 杨文采, 1942 年生, 男, 中国科学院院士, 主要从事大陆动力学、地球物理数据的正反演、城市地下空间开发与利用等研究。

通信作者简介: 田钢, 1959 年生, 男, 英国杜伦大学博士, 教授, 主要从事应用地球物理学研究。Email: tiangang@zju.edu.cn。

山麓沟谷区和滨海平原区,地貌具有以下特征。

(1)构造地貌,包括区域性大断层及地貌上有明显反映的断层、背斜山脊与山谷、向斜山脊与山谷等。

(2)山地地貌,包括丘状夷平面、花岗岩石蛋、陆屿和孤山等。

(3)流水地貌,包括河漫滩、冲积扇、坡积带和冲洪积平原等。

(4)岩溶地貌,包括溶沟、岩溶漏斗、溶洞和岩溶塌陷等。

(5)人为地貌,包括新石器时代文化遗址、运河、大型人工堤坝和人工采石场。

(6)火山地貌,包括熔岩洞、火山通道等。

杭州市地下空间开发利用应在具有山地地貌和流水地貌特征的区域选取。

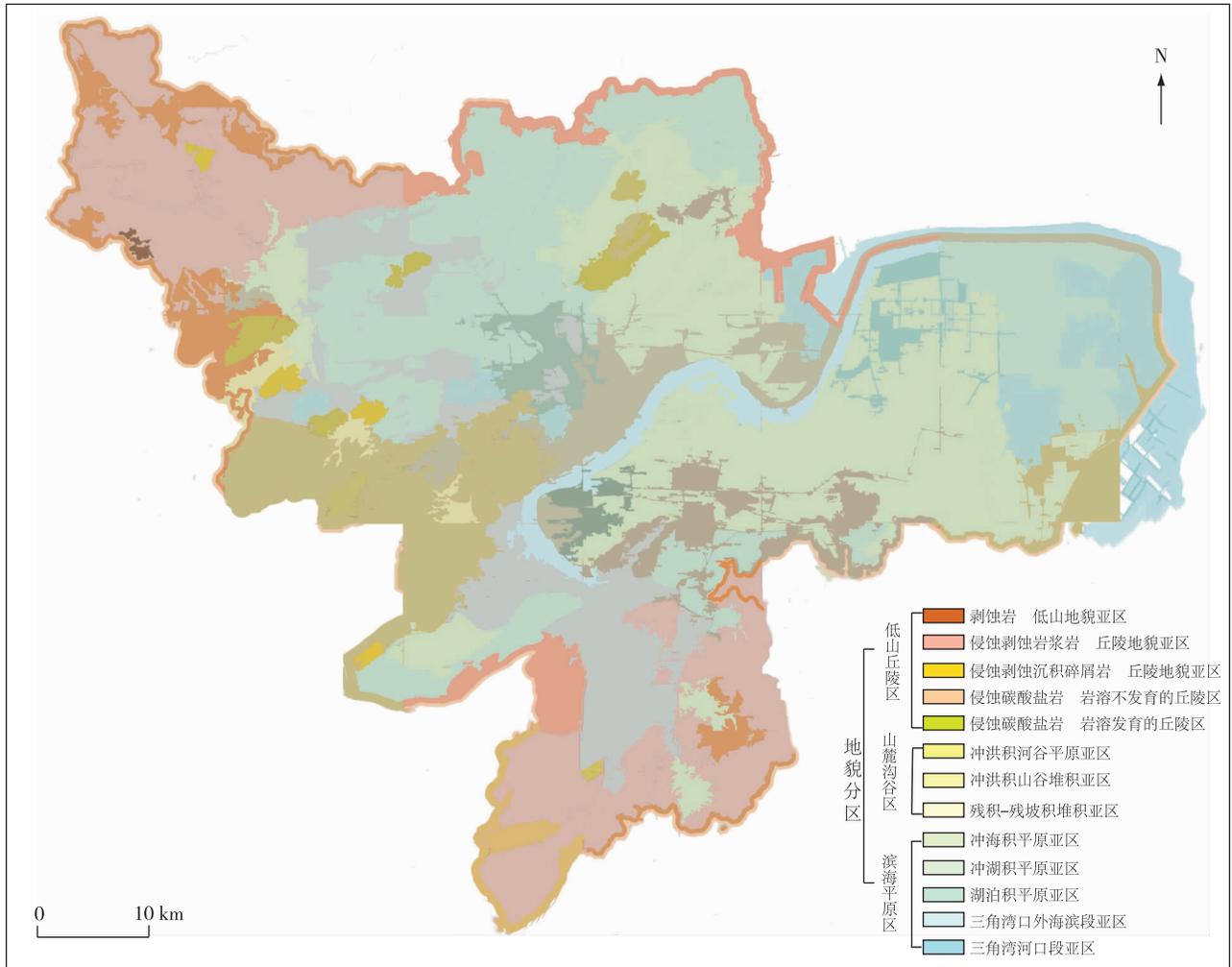


图1 杭州市地貌与第四纪地质略图(据浙江省地质调查院资料修改)

Fig. 1 Geological sketch map of geomorphology and Quaternary geology in Hangzhou City

### 1.2 杭州市基岩地质概况

由杭州市基岩地质略图(图2)可知,中生代白垩纪沉积地层(以砂岩和灰岩为主)及古生代志留纪地层(以砂岩与粉砂岩为主)是该区主要的沉积地层,厚度可达几百米到数千米,预测白垩纪沉积层、岩浆岩区及志留纪地层是杭州市地下空间开发利用的主力层位。

### 1.3 杭州市综合水文地质概况

杭州市综合水文地质略图(图3)为今后开展以生态保护为主的地下空间开发利用规划提供了依据。杭州市地下水丰富,地下水类型包括潜水、承压水、碳酸盐岩类溶洞裂隙水和基岩裂隙水,其中潜水单井涌水量每天>1 000 m<sup>3</sup>的区域主要分布在北部、中部和东部地区;承压水分布较分散,单井

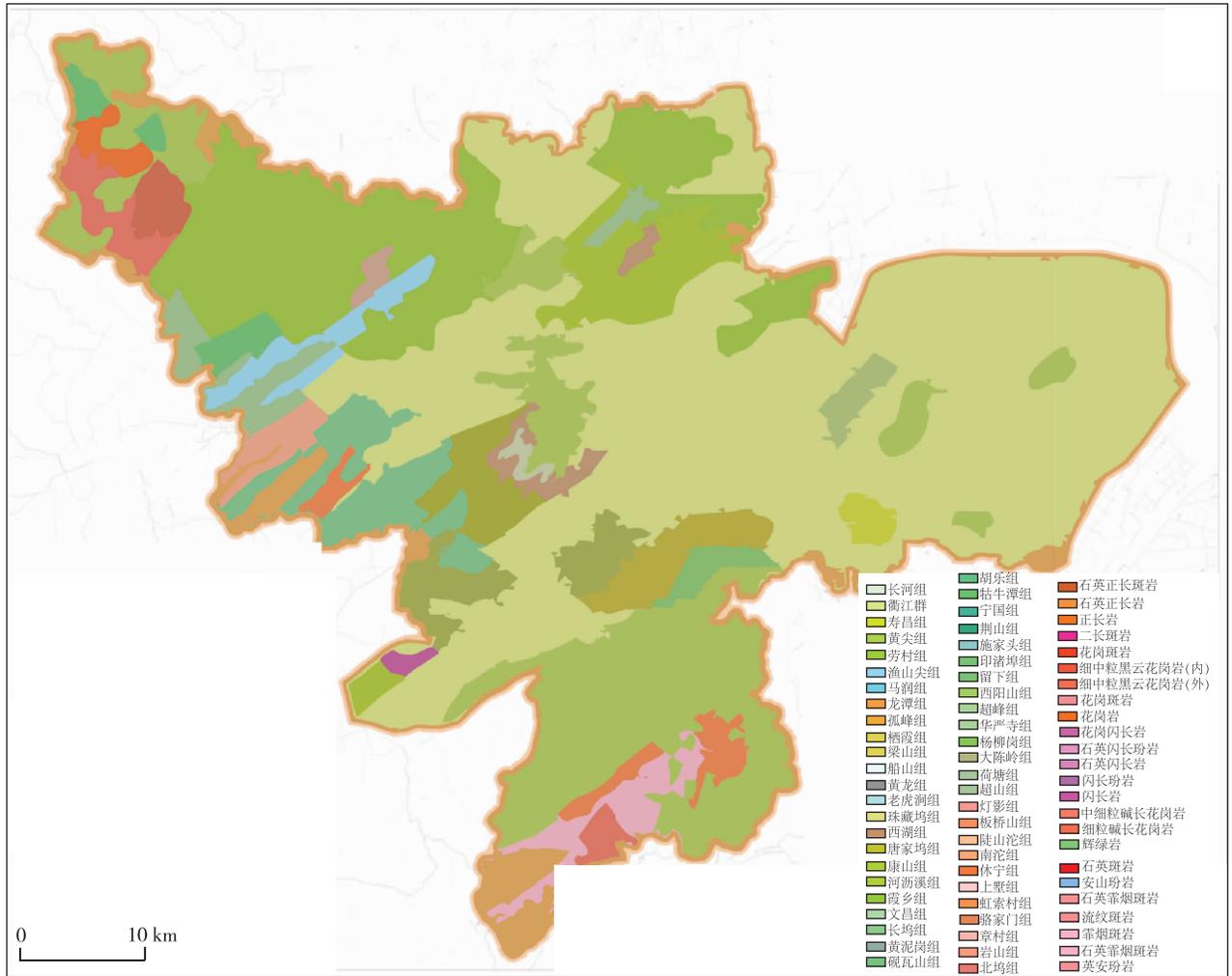


图 2 杭州市基岩地质略图(据浙江省地质调查院资料修改)  
 Fig. 2 Geological sketch map of bedrocks in Hangzhou City

涌水量每天 > 3 000 m<sup>3</sup> 的区域与潜水单井涌水量每天 > 1 000 m<sup>3</sup> 的区域相连,且控制性水点大多分布在这两个区域,井口参数包括涌水量、顶板埋深、厚度及地下水位埋深等。

为了在地下空间开发利用的同时不破坏或不改变地下水的生态环境,地下空间开发利用区域最好避开承压水区域,因为承压水区域的地下水一旦发生污染将很难治理。相反,由于受地表水和气候影响较大,在潜水区域和基岩裂隙水区域进行地下空间开发与利用,对地下水环境的影响会小一些。目前,从杭州市相关地下地质调查情况看,该区还存在着以 30 m 以浅为主,因已开发利用的地下空间资源量调查不足导致城市地下空间调查深度浅、已开展的地质调查比例尺(1:100 000)过小、地下存在大范围砂砾石层、滨海相沉积平原存在软土层、

地下存在大量岩溶塌陷危险区以及易造成下伏土层失稳的地下沼气分布等问题,这些问题应在地下空间开发利用时予以重视并加以解决。

## 2 地球物理方法选择依据

用于近地表探测的地球物理方法较多,需要根据地下空间探测目标深度、围岩(围土)与探测目标的物性差异、人文活动及抗干扰能力等选择合适的地球物理方法。杭州地区降水丰沛,地表风化明显、潜水面埋藏浅、河湖相沉积发育,存在电阻率较低、高频电磁波快速衰减、地表风化层较厚等不利条件。同时,城市地表环境存在不利于开展地球物理工作的因素,如高楼林立、河网密布、地表大面积被混凝土或沥青覆盖、人文活动和

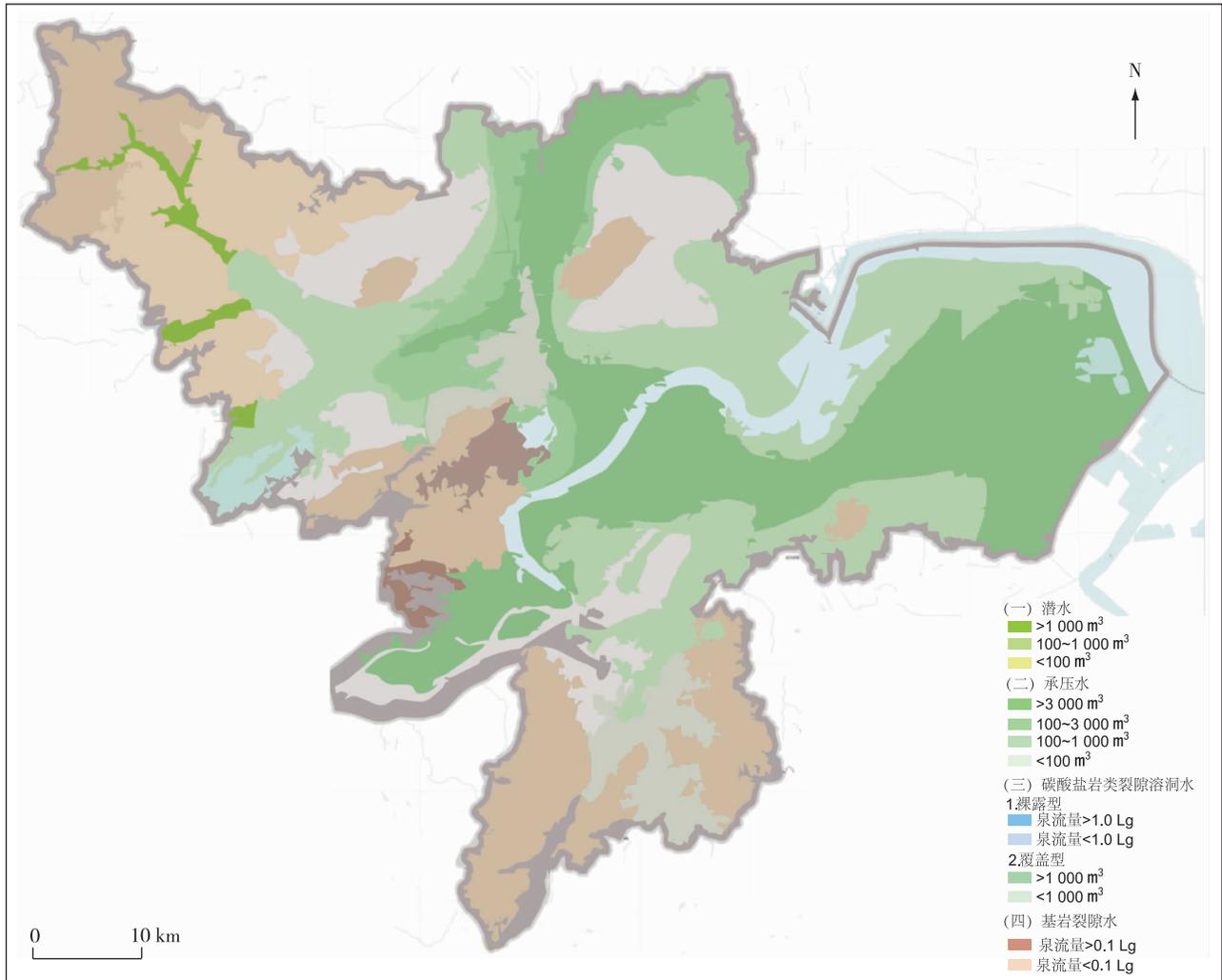


图3 杭州市综合水文地质略图(据浙江省地质调查院资料修改)

Fig. 3 Comprehensive hydrological sketch map of Hangzhou City

电磁干扰等,为城市地下空间地球物理探测带来很多困难。

根据杭州地区实际地质环境和实验研究结果,发现若探测目标埋深为3~5 m,探地雷达既具有极高的探测精度和探测分辨率,又具有极高的探测效率,是首选的探测方法;若探测目标埋深在数十米内,高密度电法是可考虑的勘探方法,且电法测量结果的电阻率和岩石物性对比较直观;地震勘探不仅分层精度高,且勘探深度大,是地下空间探测较受欢迎的地球物理方法;电磁法是大深度勘探常用的勘探方法,尤其用在岩浆岩和变质岩发育地区。另外,地下空间调查中常采用多种地球物理方法综合勘探,一方面,多种地球物理方法从不同角度反映地下目标的物性特征,可相互验证,便于把握和

识别地下目标的属性;另一方面,多种地球物理方法也便于排除和区分假异常。

### 3 地下空间调查弹性波方法

弹性波方法是沉积区地球物理勘查的主要方法,为了研究相关技术的适用性,需了解杭州市浅层的弹性波速度范围,同时为了将来在岩土工程领域得到应用,研究弹性波速度与岩石强度的关系也十分必要。由于城市环境噪声强、声波干扰大,噪声面波和多源面波方法是首选。为充分利用城市井资料,开展测井数据和井资料约束的地震反射与折射方法研究是未来的趋势。由于城市道路交通繁忙,节点式地震仪的广泛使用可避免多道电缆的布线及安全问题。

### 3.1 浅层 P 波与 S 波速度调查及其与岩石强度的关系

由杭州万松岭隧道、吉庆山隧道、五老峰隧道、紫之隧道、南屏山隧道、黄龙体育中心、钱江新区等浅层区域 P 波和 S 波速度调查资料可知,杭州城区浅层土质层 P 波速度为 1 000~1 500 m/s, S 波速度为 125~290 m/s;圆砾石、卵石 P 波速度为 1 500~2 500 m/s, S 波速度为 350~430 m/s;灰岩基岩层 P 波和 S 波速度(分别为 3 200~4 700 m/s 和 2 200~3 000 m/s)最大,砂岩基岩层 P 波和 S 波速度(分别为 2 500~3 800 m/s 和 1 000~2 000 m/s)次之,砂泥岩基岩层 P 波速度(2 100~3 000 m/s)最小,表明杭州市浅层具备开展地震面波、地震体波反射与折射方法应用的地质-地球物理条件。

利用梯度下降算法拟合出的杭州地区浅层基岩  $V_p$ -UCS( $V_p$  为纵波速度, km/s; UCS 为单轴抗压强度, MPa)关系式为  $UCS=0.459 1 \times V_p^{2.865 7}$ 。基于梯度下降算法的岩石强度预测误差比基于常规最小二乘分析方法小,通过梯度下降算法得出的杭州地区  $V_p$ -UCS 关系预测曲线(图 4)更准确,更适合在杭州地区进行岩石强度预测,岩石强度较大的城市地下区域适合开展地下空间开发与利用规划、施工与安全运维等工作。

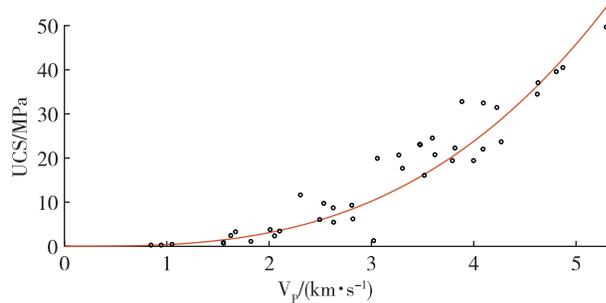


图 4 杭州地区浅层基岩  $V_p$  与 UCS 关系曲线图

Fig. 4 Relationship curve between  $V_p$  and UCS of shallow bedrock in Hangzhou area

### 3.2 高频主动源与被动源面波探测技术

地下岩土力学的刚度、剪切参数与横波速度密切相关,横波速度与地震面波具有直接关系。城市具有车水马龙环境,研究利用城市噪声开展面波探测意义重大。目前,一些学者开展了浅层多源面波方法技术研究<sup>[4]</sup>,在杭州钱江新区完成了测线总长 6.31 km 的主动源(记录频带 7~50 Hz,成像深度 0~30 m)和被动源(记录频带 2~15 Hz,成像深度 0~150 m)面波二维

剖面测量,完成了约 7 m<sup>2</sup> 的三维主动源、被动源面波测量探测实验。由钱塘新区二期区域风起线多源面波数据融合处理后的二维横波速度剖面(图 5)可看出基岩面的起伏、风化程度及第四系主要分层情况。

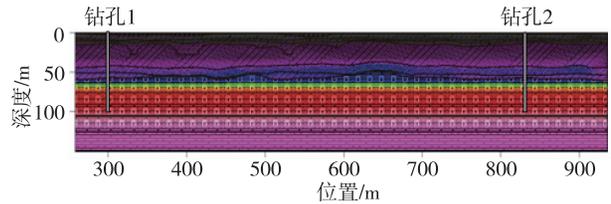


图 5 风起线多源面波数据融合处理后的二维横波速度剖面示意图<sup>[5-6]</sup>

Fig. 5 2-D S wave velocity profile after multi-source surface wave data fusion of Fengqi line<sup>[5-6]</sup>

根据钻孔资料,第 1 层为杂填土(0~3 m),断续出现在表面介质中,横波平均速度约 180 m/s;第 2 层为粉土(3~7 m),横波平均速度约 190 m/s;第 3 层为砂质粉土(7~9 m),横波平均速度约 200 m/s;第 4 层为粉土(9~13 m),下速度界面起伏较大,横波平均速度约 210 m/s;第 5 层为粉质黏土(12~42 m),上速度界面起伏较大,横波平均速度约 310 m/s;第 6 层是高速夹层(42~53 m),推断为圆砾层,横波平均速度约 400 m/s;第 7 层为粉质黏土(50~56 m),上、下横波速度界面均具有一定的起伏,横波平均速度约 360 m/s;第 8 层为强风化泥质粉砂岩(50~65 m),横波平均速度约 480 m/s;第 9 层为中风化泥质粉砂岩(63~106 m),横波平均速度约 900 m/s;100~150 m 的速度结构无钻孔资料对照,但是根据相邻钻孔资料,将其划分为第 10 层和第 11 层,分别为弱风化泥质粉砂岩和泥质粉砂岩,弱风化泥质粉砂岩层(106~125 m),横波平均速度约 1 200 m/s;泥质粉砂岩层(125 m 以深),横波平均速度约 1 300 m/s。

通过高频多源面波方法探测技术研究<sup>[7-8]</sup>,认为该技术充分利用了城市环境噪声(被动源观测时间可缩短至 24 h),可以查明工作区地下 200 m 以浅的基岩面起伏与基岩风化程度、隐伏断裂及砾石层的空间变化,面积观测系统的合理设置为揭示地下三维结构提供了可能性(图 6),为梳理城市环境噪声干扰条件下的多源面波勘探技术标准奠定了基础<sup>[2]</sup>。在西湖周边布置了 28 个宽频带地震仪,进行 17 天噪声数据采集,通过噪声成像方法<sup>[9]</sup>得到研究区 0.5~1.0 s 的瑞利波群速度图像。

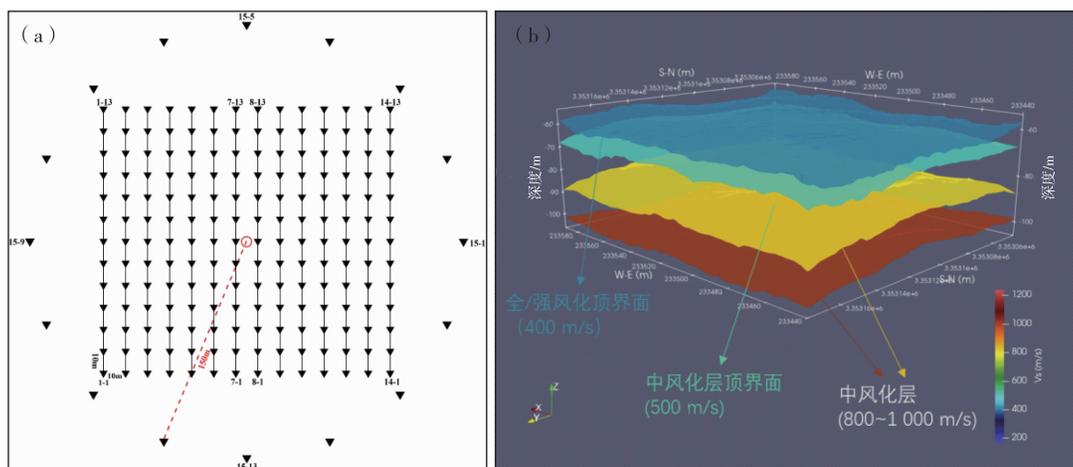


图6 风起线旁的多源面波面积观测系统(a)与地下三维结构图(b)

Fig. 6 Surface wave observation system (a) and underground 3-D structure map (b) beside Fengqi line

### 3.3 用于精细分层的高分辨反射与折射波地震探测方法

利用节点地震仪和机械式夯源开展了 CDP 叠加

长度为 1.25 km 的高分辨反射地震实验(图 7,图 8),将工程 PS 测井(微测井)资料转换拟声波测井曲线,发挥了合成地震记录用于反射层位精细标定的作用<sup>[10]</sup>。



图7 风起线反射与折射地震夯源(a)和节点式地震记录仪采集排列(b)

Fig. 7 Seismic rammer source (a) and node seismic recorder (b) for reflection and refraction of Fengqi line

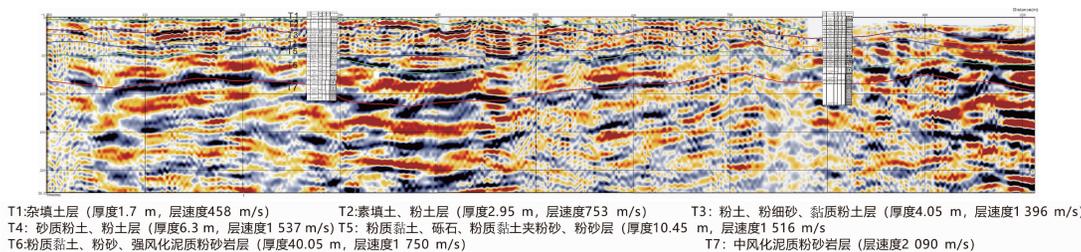


图8 风起线反射地震剖面与深时转换后的岩心资料对比解释图

Fig. 8 Interpretation diagram of comparison between reflection seismic profile and core data after depth-time conversion of Fengqi line

反射地震剖面与深时转换后的岩心资料对比如图 8 所示,第四纪土壤层的多层反射层位(硬土和软土层界面)和砾石层反射吸收衰减造成的低频分量反映丰富,该特征与浅层地下沼气探测结果相似。合成地震与井旁地震叠加道对比如图 9 所示,合成记录中的主要层位反射在井旁地震反射道中均有对应。利用微测井信息开展反 Q 滤波可进一步提高分辨率(图 10),表明在该区 30 m 内,高分辨反射地震技术可达 1~2 m 精度。

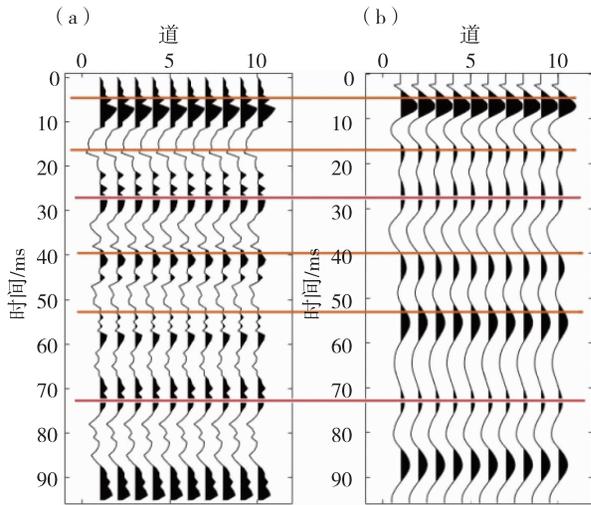


图 9 合成地震(a)与井旁地震叠加道(b)对比图  
Fig. 9 Synthetic trace (a) and stacking trace (b) near the well

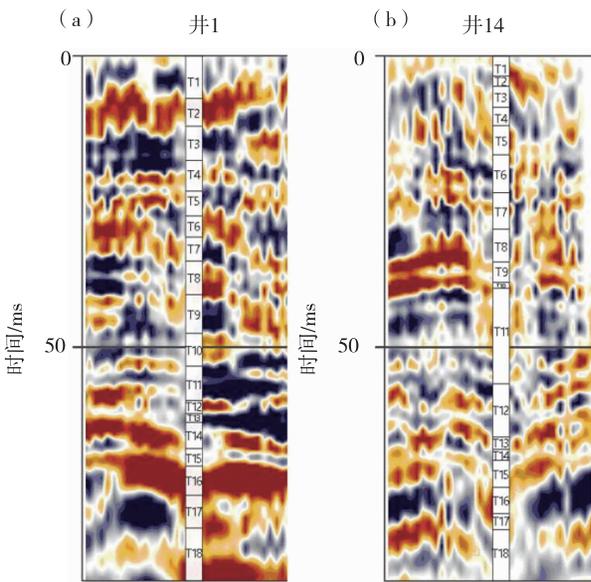


图 10 补偿后的反射地震(a)与井资料(b)对比<sup>[11]</sup>  
Fig. 10 Comparison between compensated record (a) and the well data (b)<sup>[11]</sup>

分析表明,高分辨反射地震方法结合微测井拟声波测井合成记录标定将对第四纪软土,特别是钱江新区大江东区第四纪厚覆盖区的精细结构分层提供较好的手段。折射波走时层析约束反演结果与岩心资料对比如图 11 所示,采用结构约束和物性约束方法增加反演的稳定性,可提高反演结果的精度<sup>[2]</sup>。

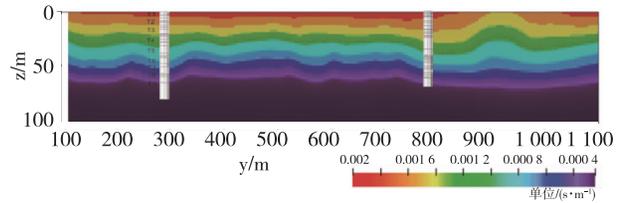


图 11 风起线折射波走时层析约束反演结果与岩心资料对比结果

Fig. 11 Comparison between refraction travel-time tomography constrained inversion of Fengqi line and core data

井中岩心资料表明, T<sub>1</sub> 层为杂填土层,厚约 1.7 m,层速度为 458 m/s; T<sub>2</sub> 层为素填土、粉土层,厚约 2.95 m,层速度为 753 m/s; T<sub>3</sub> 层为粉土、粉细砂、黏质粉土层,厚约 4.05 m,层速度达 1 396 m/s; T<sub>4</sub> 层为砂质粉土、粉土层,厚 6.3 m,层速度为 1 537 m/s; T<sub>5</sub> 层为粉质黏土、砾石、粉质黏土夹粉砂、粉砂层,厚 10.45 m,层速度约 1 516 m/s; T<sub>6</sub> 层为粉质黏土、粉砂、强风化泥质粉砂岩层,厚 40.05 m,层速度为 1 750 m/s; T<sub>7</sub> 层是中风化泥质粉砂岩层,层速度为 2 090 m/s。

### 3.4 用于探测岩溶分布的跨孔地震探测方法

为了综合评估杭州黏土区浅地表地震波速度,收集了 12 组跨孔地震反演成像数据,包括临安区杭州—临安城际铁路沿线附近 6 组跨孔地震反演成像数据(图 12)及余杭区 102 省道旁中泰工业区附近 6 组跨孔地震反演成像数据(图 13)。由反演结果可知,浅地表黏土覆盖区地震 P 波速普遍为 1 400 m/s 以上,跨孔地震 CT 和跨孔高密度电法以及井中物探测量技术可较好地解决杭州市地下浅层岩溶(约 20 m 或以下)的分布问题<sup>[12-13]</sup>。

## 4 地下空间调查电法与电磁波法

### 4.1 高密度电法的局限与发展

CEPC-SPPC 高能粒子对撞机项目是我国正在

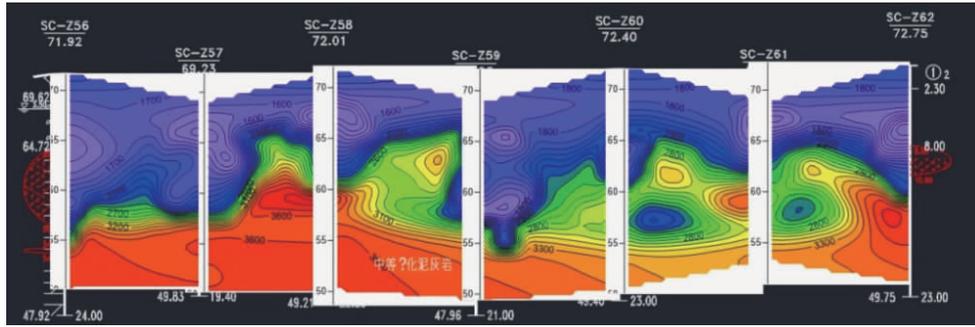


图 12 临安某地跨孔地震反演成像数据图(中国矿业大学)  
Fig. 12 Cross-hole seismic imaging in Lin'an District

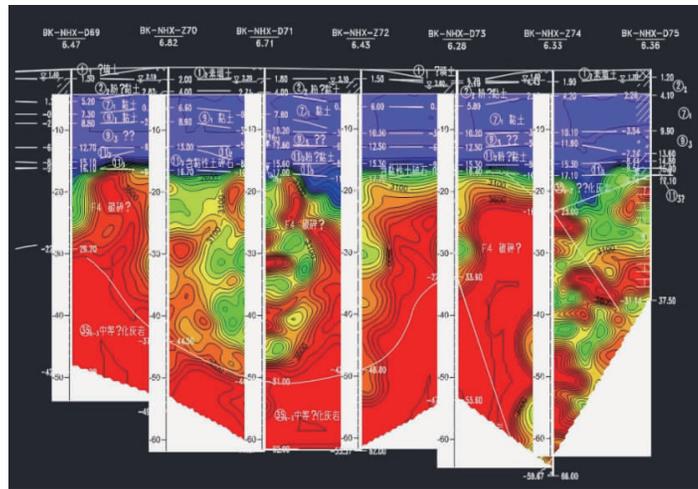


图 13 余杭某地跨孔地震反演成像数据图(中国矿业大学)  
Fig. 13 Cross-hole seismic imaging in Yuhang District

建设的环形正负电子对撞机(CEPC)和超级质子对撞机(SPPC)项目的合称,是研究粒子基本结构的重大科学试验装置。该项目可能以浙江省莫干山为中心,规划在地下 100 m 建设长 100 km、直径 6.5 m

的环型隧道(图 14),浙江省核工业二六二大队与浙江大学等多家单位合作,对该科学工程目标区地下空间地质条件开展了预可行性研究<sup>[3]</sup>,本文主要介绍针对德清县城随机分布式高密度电法研究成果。



图 14 沿隧道环线示意图(a)及工区位置图(b)

Fig. 14 General schematic diagram (a) and work area location map (b) along the tunnel loop line

常规高密度电法只能沿城市街道布置(图 14(b)黄色 L3 测线)。由图 15 可知,L3 测线跨过了砂岩、碳质页岩和泥岩地层,且地表有厚度不等的第四系覆盖层。高密度电法二维电阻率剖面较好地刻画了隧道通过区的地质结构和岩性区分,其中碳质页岩为明显的低阻区。地下空间结构一般具有

明显的方向性(隧道)或呈规则、孤立的三维立体结构,仅使用二维测量往往难以把握地下空间结构的特征,需要采用三维勘探技术精确刻画。然而,城市复杂地表环境往往限制了三维勘探工作的实施,因此,随机分布式不规则三维勘探技术是城市地下空间调查发展的前沿方向<sup>[14]</sup>。

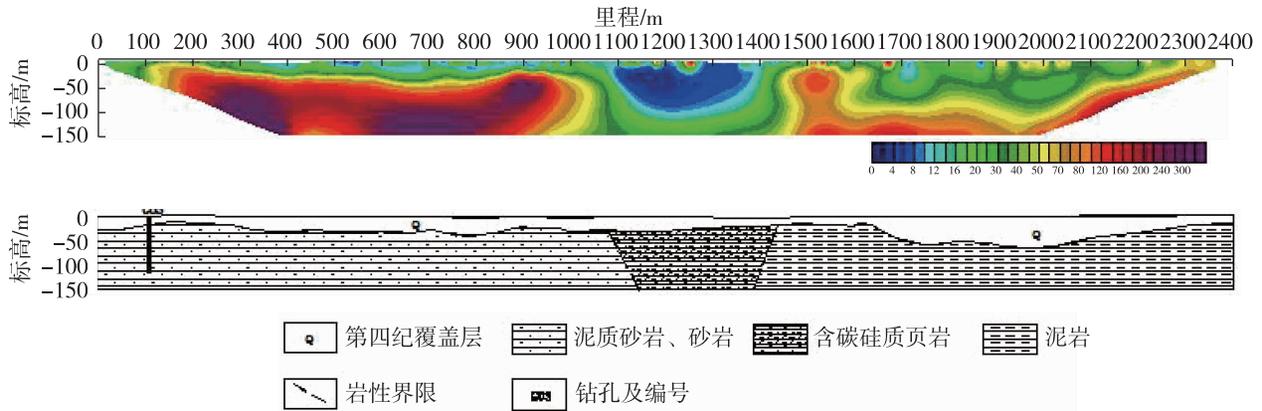


图 15 杭州北部德清区 L3 测线高密度电法工作成果图

Fig. 15 Results of electrical resistivity tomography method on L3 line in Deqing area, northern Hangzhou

图 14(b)中的紫色框为本次随机分布的高密度电法试验研究区,根据区域中的建筑小区、湖泊与河流以及国际展览中心等位置,只能在可能的地区布设电极(图 16(a))。

图 16(b)为随机分布电极的三维电阻率成像水平与垂直切片图,其中垂直切片为与 L3 测线高密度电法工作成果图(图 15)对应的二维高密度电法剖面,可以看出二者具有较好的对应性。

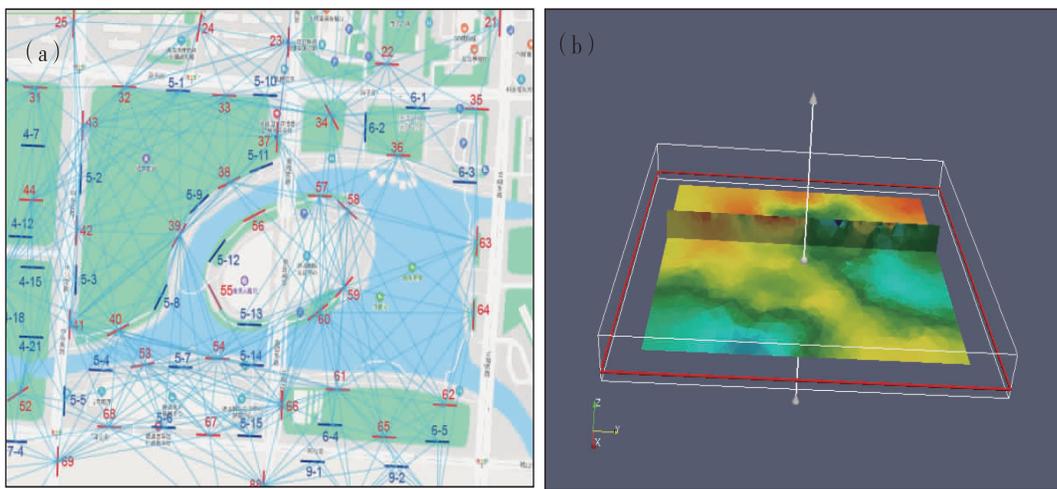


图 16 随机分布的野外电极布置示意图(a)和三维电阻率水平与垂直切片图(b)

Fig. 16 Schematic diagram of randomly distributed field electrodes (a) and three-dimensional resistivity results in horizontal and vertical slices obtained by processing (b)

#### 4.2 利用音频大地电磁法研究深部结构

主要探索严重环境噪声条件下的大地电磁数

据采集、处理及反演技术,针对研究区复杂的山地地形及电性干扰源分布情况,采用精细化野外作业

管理提高复杂地电条件下的大地电磁数据采集质量。通过对音频大地电磁测深数据开展多手段精细处理<sup>[15]</sup>,研究复杂干扰条件下大地电磁测深数据消除畸变方法,提高数据质量。

结合研究区地质及地球物理资料,对单测点音频大地电磁数据进行一维反演与解释(图 17)。结

果表明,杭州市区桃源岭、老和山、玉皇山测点总体电阻率比美女山、宝石山、满觉陇测点高,各测点均存在 2 个相对低阻层:第 1 个低阻层深约几十米;第 2 个低阻层深几百米至 1~2 km,推断第 1 个低阻层可能与地下水分布有关,第 2 个低阻层可能与古风化壳、未风化基岩面或深部滑脱面相关。

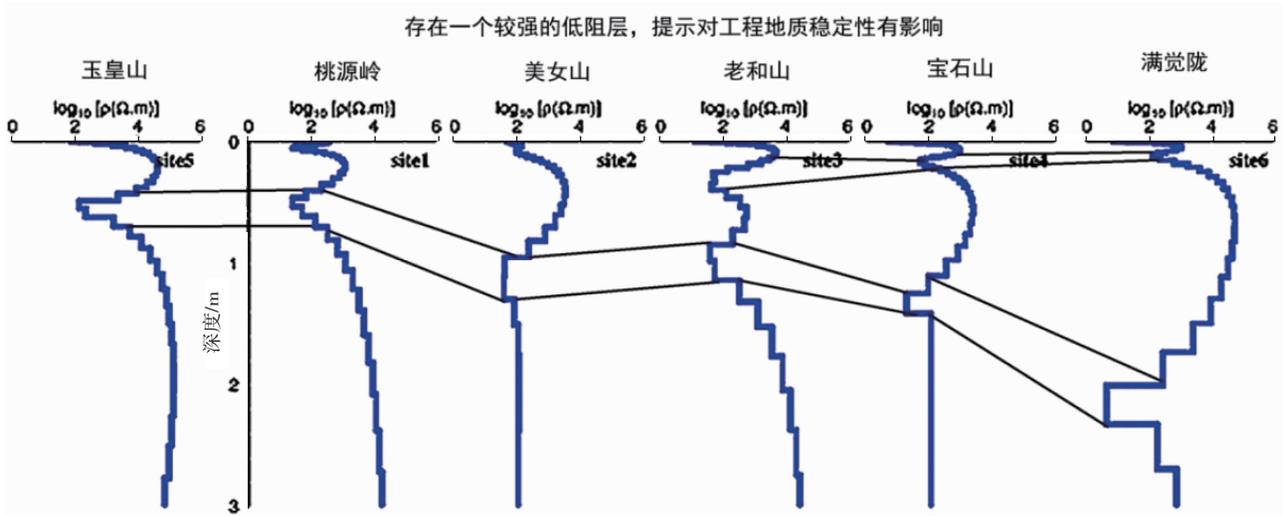


图 17 音频大地电磁测量结果剖面图<sup>[1]</sup>

Fig. 17 Cross-sectional drawing of audio magnetotelluric measurement results<sup>[1]</sup>

总体看,美女山、宝石山和满觉陇测点在几十米至 1 km 以浅区域的电阻率较高,暗示该区岩石强度较大,致密度高,工程地质稳定性好,利于建设地下工程。桃源岭、老和山和玉皇山测点在 100~300 m 存在 1 个较强的低阻层,暗示该区工程地质稳定性差,需进一步勘探。综上,杭州市地下空间开发与利用在深度上应尽可能避开低阻松软岩层区。

### 4.3 地质雷达解决超浅地表问题

研究<sup>[16]</sup>表明,杭州城市地下空间 0~50 m 探测时,对于不同地下空间类型,应使用不同的地球物理探测方法和技术。对于基岩山体,其探测的深度较大,一般可清晰看到砂岩内部的反射层位,如岩石形变、节理、破碎带等。实验表明,100 MHz 天线最大有效探测深度为 30 m,50 MHz 天线最大有效探测深度为 70 m 左右,对于第四纪土壤层,地质雷达的探测深度最大不超过 5 m<sup>[17]</sup>。若结合跨孔地质雷达技术,其探测深度会有所提高,探测结果如图 18 所示。

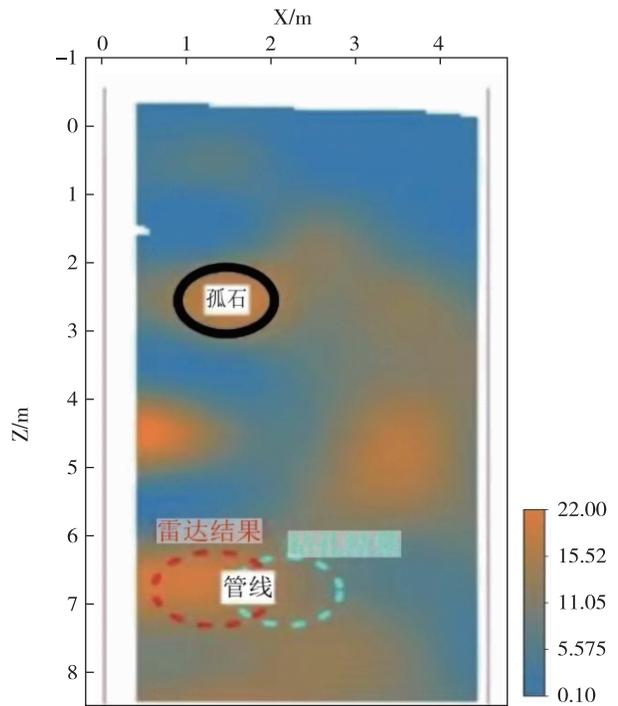


图 18 富含水黏土区跨孔雷达对管线和孤石的成像图

Fig. 18 Cross-hole radar used to image pipelines and boulders in clay areas rich in water

## 5 结论及建议

(1)利用梯度下降算法拟合的杭州地区浅层基岩纵波速度( $V_p$ )与单轴抗压强度(UCS)之间的关系式为  $UCS=0.459\ 1\times V_p^{2.865\ 7}$ ,该关系式适合用于在杭州地区进行岩石强度预测。

(2)多源高频面波技术可以较好地利用城市环境噪声,在第四纪软土覆盖区可准确识别砾石层、基岩中的低速风化带及基岩分界面,横波速度可直接用于估算岩土刚性参数。杭州市背景噪声强度大,可进行噪声面波观测调查,了解大面积水域或建筑区的地下地质结构。

(3)同时开展浅层反射地震和折射地震工作,充分利用微测井(或 PS 测井)数据进行反射层位标定(拟声波测井技术)和浅地表吸收衰减反 Q 补偿,对井中岩心资料进行折射走时结构约束和物性约束层析反演,提高反射的分辨率及折射成像精度,而跨孔地震方法为精确确定岩溶位置提供了有效手段。

(4)在南方丘陵地区,高密度电法具有较大探测深度,其缺点是城市道路和建筑物以及水系丰富交叉对野外观测影响较大,随机分布电极的电阻率成像技术克服上述缺点,是具有发展前景的新方法。

(5)杭州市地下空间开发与利用在深度上应尽可能避开地下低阻松软岩层区,无论是与断裂、古风化壳或深度滑脱面相关,还是与地下岩溶发育相关,均暗示工程地质稳定性不好,不同地点的低阻层深度会有所不同。

(6)利用地质雷达开展杭州城市地下空间 0~30 m 探测时,对不同的地下空间类型,应有不同的方法和技术。对于基岩山体,可应用浅地表分辨率相对较高的地面观测探地雷达;对于粉砂质黏土沉积区及南方潮湿地区,建议采用井中地质雷达和跨孔雷达加大探测深度。

**致谢:**感谢浙江省院士行业科技战略咨询资助项目、中国地质调查局南京地质调查中心委托项目以及浙江省核工业二六二大队相关项目提供经费支持;感谢浙江省院士专家工作站服务中心和浙江大学对项目研究的支持。感谢浙江大学建筑工程学院尚岳全教授、中国矿业大学潘冬明教授、浙江省地球物理地球化学勘查院何良军专家、浙江省地

质调查院胡宁专家对项目研究的支持及提供的相关数据。

## 参考文献

- [1] 杨文采,田钢,夏江海,等,华南丘陵地区城市地下空间开发利用的前景研究[J].中国地质,2019,46(3):447-454.
- [2] 浙江大学地球科学学院.杭州地区地下空间混合源面波、智能微动等综合物探调查成果报告[R].杭州:浙江大学,2019.
- [3] 浙江省核工业二六二大队.CEPC-SPPC 项目湖州地质条件预可行性勘察研究报告[M].湖州:浙江省核工业二六二大队,2019.
- [4] CHENG F, XIA J, LUO Y, et al. Multi-channel analysis of passive surface waves based on cross-correlations [J]. Geophysics, 2016, 81(5): 57-66.
- [5] CONSTABLE S C, PARKER R L, CONTABLE C G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data [J]. Geophysics, 1987, 52(3): 289-300.
- [6] XIA J H, MILLER R D, PARK C B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 691-700.
- [7] XIA J H, MILLER R D, PARK C B, et al. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes [J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 52(1): 45-57.
- [8] 夏江海,高玲利,潘雨迪,等.高频面波方法的若干新进展[J].地球物理学报,2015,58(8):2591-2605.
- [9] BAO X, SONG X, LI J. High-resolution lithospheric structure beneath Mainland China from ambient noise and earthquake surface-wave tomography [J]. Earth Planet Science Letter, 2015, 417: 132-141.
- [10] TIAN G, ZHONG Y, LIU X Y, et al. New applications of up-hole seismic data in near-surface[C]//Fifth International Conference on Engineering Geophysics (ICEG), 2019:21-24.
- [11] TIAN G, SHI Z J, DONG S X, et al. Geophone coupling match and attenuation compensation in near-surface seismic exploration [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2006, 11(2): 111-122.
- [12] 杨文采.层析成像[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [13] 瞿辰,杨文采,于常青.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,2010,53(12):2944-2954.

- [14] 王帮兵,王佳馨,田钢,等.一种电极随机分布式高密度电阻率测量方法及勘探系统:中国,20181 0348248.5[P].2020-03-24.
- [15] YANG B, ZHANG A Q, ZHANG S, et al. Three-dimensional audio-frequency magnetotelluric imaging of Akebasitao granitic intrusions in Western Junggar, NW China [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 135: 288-296.
- [16] FORTE E, ZHAO W, TIAN G, et al. Advances in GPR data acquisition and analysis for archaeology [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 202(1):62-71.
- [17] QU X X, LIU S X, WANG F. A new ray tracing technique for crosshole radar traveltime tomography based on multistencils fast marching method and the steepest descend method[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2014, 19(4):229-237.

## Study on geophysical methods and technologies of underground space survey in Hangzhou area

YANG Wencai<sup>1</sup>, TIAN Gang<sup>1</sup>, XIA Jianghai<sup>1</sup>, BAO Xuewei<sup>1</sup>, WANG Bangbing<sup>1</sup>, SHI Zhanjie<sup>1</sup>,  
YANG Bo<sup>1</sup>, ZHAO Wenke<sup>1</sup>, MI Binbin<sup>1</sup>, CHEN Huanyuan<sup>2</sup>, GUO Xia<sup>3</sup>

(1. *School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China*;

2. *262 Brigade of Zhejiang Nuclear Industry, Huzhou 313000, Zhejiang, China*;

3. *Nuclear Industry Huzhou Engineering Survey Institute Co., Ltd., Huzhou 313000, Zhejiang, China*)

**Abstract:** With the swift growth of China's economy and the acceleration of urbanization, the contradiction between limited land resources and urban development is becoming more and more salient. Hence, the safe and rational use of urban underground space and geological environmental protection are of great strategic significance. The G20, Asian Games and digital economy bring great opportunities for the rapid development of Hangzhou, but also cause a thorny bottleneck between rapid population growth and limited land resources. In order to solve this problem, School of Earth Sciences of Zhejiang University has carried out a feasibility study of a variety of geophysical methods, including elastic wave methods, electrical and electromagnetic methods, in view of the need for detailed detection of underground space under this special geomorphological geology in the hilly area of south china. The results show that different exploration methods have obvious differences in exploration depth, resolution and exploration efficiency, so it is necessary to select suitable exploration methods according to underground geological conditions and surface conditions. These conclusions will have exemplary guiding significance and reference value for the development and utilization of urban underground space in the southern hilly area.

**Key words:** underground space survey; geophysical technology; multi-source surface waves; seismic body waves; electric and electromagnetic methods