

# 杭州城市平原区三维第四系结构 调查研究方法探讨

顾明光 汪庆华 卢成忠 秦祥熙 余国春

(浙江省地质调查院, 浙江 杭州 311203)

**摘要:** 服务于城市地质调查, 旨在构筑三维地质结构的第四纪调查研究具有很强的探索性。笔者以杭州市为例, 从第四系标准孔建设、海量钻孔数据的整理与筛选、浅层地震勘探与综合测井、第四纪地层划分与孔间对比等方面, 对城市平原区开展三维第四系结构调查的工作方法、技术要点进行了摸索与总结。

**关键词:** 三维第四系结构调查; 研究方法; 平原区; 杭州城市

**中图分类号:** P621      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2008)02-0232-07

杭州市位于长江三角洲南翼, 滨临东海, 属典型的亚热带季风气候区, 横跨低山丘陵和滨海平原两大地貌单元。平原区水网密布, 第四系面积达 2400 km<sup>2</sup>, 约占全区总面积的四分之三, 自中更新世至全新世地层均有发育。由于杭州市地处典型的海陆交互带, 受海平面升降变化、气候波动的控制影响, 第四系沉积物类型复杂多样, 岩相变化剧烈, 地层结构错综复杂。

作为全国首批试点的“杭州城市地质调查项目”, 其核心任务之一就是构建杭州城市三维地质结构模型(包括第四纪地质、工程地质、水文地质), 而它的基础则是“三维第四系结构模型”, 其精度直接影响到其他专业模型的质量<sup>[1]</sup>。为此, “杭州城市基岩与第四纪地质调查”子项目组在深入分析前人成果资料的基础上, 针对以往第四系调查方法存在的问题与不足, 初步拟定了适用于城市三维第四系结构建模的工作思路与技术方案。通过反复的探索、实践, 对杭州城市平原区三维第四系结构调查的主要方法技术进行了全面的探讨与总结。

## 1 第四系标准孔建设

第四系标准孔建设是开展三维第四系结构调查

与研究的基础。以往这类工作在本区少有涉及, 虽曾有过类似的工作实例, 但方法很不成熟。本次工作通过多方征求第四系专家的意见与建议, 结合具体工作实践, 初步摸索、总结出一套第四系标准孔的工作方法与技术流程, 包括背景研究、钻孔布位、材料选择、钻探取心、岩心保存与运输、岩心解剖与精细编录、合理取样、系统照相、资料综合整理等一系列技术环节(图 1)。

### 1.1 背景研究与钻孔布位

在收集、整理工作区已有各类钻孔资料的基础上, 编制基岩埋深等值线草图, 选择代表性钻孔进行填图单元初步划分与地层对比, 同时结合前人第四纪调查研究的成果资料进行综合分析, 对测区地貌、第四纪地层结构和古河道走向有一个总体的了解。在此基础上依据以下原则合理地布置第四系标准孔:

- (1) 综合以往可利用孔(特别是可利用的标准孔)的空间分布状况, 进行新标准孔部署, 以满足网度控制要求;
- (2) 依据地貌类型、第四系发育完整性(厚度大, 地层发育尽可能全)和区域代表性等, 进行标准孔布设;
- (3) 选择松散沉积物颗粒细、砂砾石层较薄的地段, 尽量避开古河道中心线;

收稿日期: 2007-09-06; 改回日期: 2007-09-28

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(200413000021)资助。

作者简介: 顾明光, 男, 1968 年生, 高级工程师, 从事区域地质及环境地质调查研究; E-mail: freebeing@163.com。

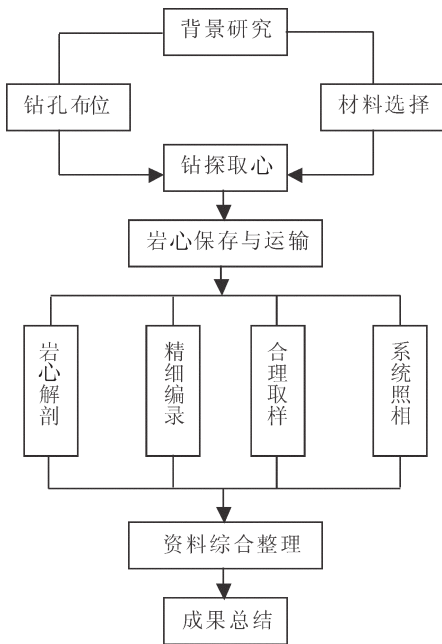


图 1 第四系标准孔工作流程图

Fig.1 Flow diagram of drilling a Quaternary standard hole

(4)在已有和新布设的浅层地震剖面上,适当、合理布置标准孔;

(5)在第四系标准孔周边(间隔 3 m 左右)布置工程地质标准孔进行对照分析。

## 1.2 第四系全孔取心钻探、岩心保存技术要点

(1)采用中深钻(>50 m),机型为 100 型或 150 型,孔径不小于 108 mm。必须穿透第四系,到达中等风化基岩 1~2 m。

(2)回次进尺一般小于 2 m。钻进时应保持稳定的钻具压力,避免泥浆等杂物渗入造成岩心污染。钻进深度的测量误差不超过 $\pm 5$  cm;每钻进 50 m 和终孔后,均校正孔深,孔深误差 $\leq 0.2\%$ ,钻孔垂直度允许偏差为 $\pm 2^\circ$ 。

(3)地下水位以上进行干钻,以鉴别地层的天然湿度,必要时可采用双层岩心管钻进。钻进过程中采用白泥泥浆护壁,以保证孔壁的完整性,防止塌孔、缩径等现象;适当控制钻压和给水量,选择好转速,防止孔斜等质量问题。

(4)所有钻孔均进行全孔连续取心,其中粘性土层取心率不低于 90%,砂性土、粉土层取心率不低于 70%,碎石土层不低于 50%。现场填写第四系钻探工程野外记录报表。

(5)岩心排放顺序不得颠倒,全部用 PVC 管密封

保存与系统标号,以达到保湿、防震等效果。PVC 管上标号内容包括孔号、回尺深度区间、岩心上下位置。

(6)各勘探孔均进行坐标定位(包括地面高程、地理坐标、地下水位等勘测数据)。终孔后完成井位标桩和封孔等。

## 1.3 岩心详细编录、取样与照相

(1)剖岩心采用特制的钢筋架,正确掌握操作要领,使岩心切面尽量保持平直。

(2)对厚度大于或等于 50 cm 的岩性层以及特殊的标志层(如硬土层、泥炭层、贝壳层等)均进行详细的分层描述,包括沉积物的岩性、颜色、物性、结构构造、包含物(矿物结核和动、植物化石等)、次生变化、成因类型、接触界面形态以及分层层序、厚度、深度等。样品类型、编号及取样深度在第四系样品登记表上单独记录。

(3)所有的样品都要求新鲜无杂质,尤其要剔除表面的泥皮以及裂隙面的铁质等污染物。取样间距一般控制在 1~2 m,并遵守“薄层多取,厚层少取”的原则。逐层系统采集孢粉、微古、古地磁、地球化学、粒度分析等样品;对泥炭层、贝壳层、淤泥质粘土层、炭化木等适当采集  $^{14}\text{C}$  测年样;粉细砂、粉土等可考虑采集热释光或光释光年龄样。

(4)岩心剖开后,按岩心编号分组排序,用标签作好深度范围、分层界线等标记,然后系统拍摄数码照片。对典型的地质现象,如保存完好的沉积构造、地层接触关系、动、植物化石、矿物结核等单独摄制近照。

## 1.4 资料综合整理

编制第四系标准孔综合地层柱状图,进行岩石地层、生物地层、磁性地层、年代地层等多重划分对比,其成图比例尺(垂向)一般为 1:100~1:500,标志性地层厚度较薄时,可适当放大表示。将标有深度的岩心照片有机地组合成完整的岩心柱,对钻孔地层结构与沉积相组合特征进行直观表达(图 2)。

## 2 海量钻孔数据的筛选方法与原则

开展城市三维第四系结构调查,必须收集、利用数以万计的钻孔资料,对海量钻孔数据的筛选与整理是一项工作量庞大的基础性工作,因此,须根据专业要求和其他综合因素,按部就班、有条不紊地进行,以尽量避免走弯路,提高工作质量与效益。钻孔数据的筛选大致可分为以下几个步骤:

(1)初步清理:钻孔属性包括几大要素,如钻孔

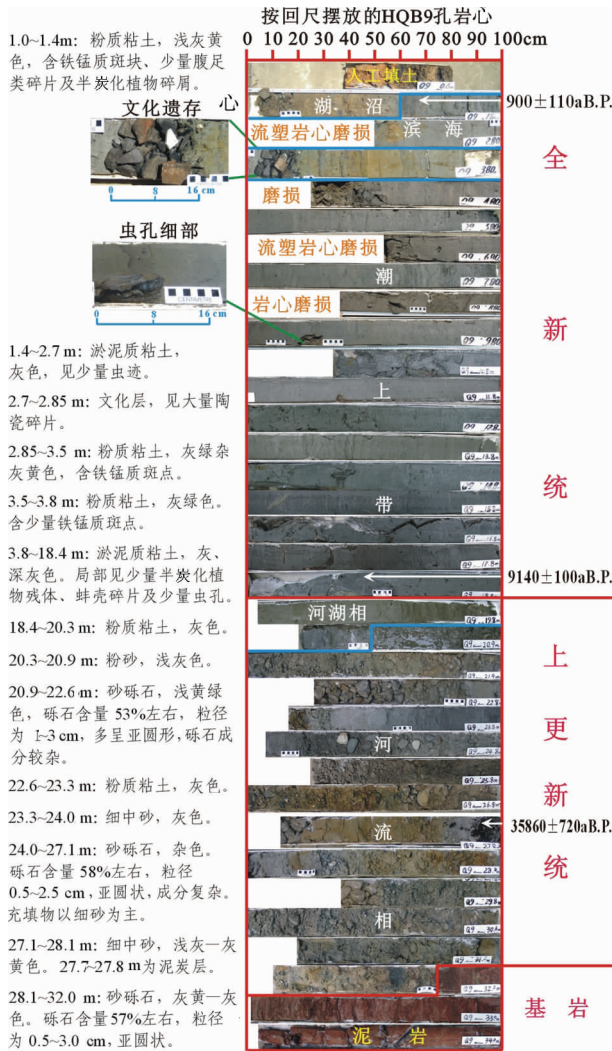


图2 余杭沈家村 HQB9 号孔第四纪地层结构的直观表达  
Fig.2 Direct expression of the structure of Quaternary strata in hole HQB9 at Shenjiacun, Yuhang

号、地理坐标、孔口标高、孔深、见基岩深度、分层描述、土工测试数据、工程名称等等。所谓有效钻孔是指有地理坐标、分层描述等基本数据的钻孔,对不满足基本要求的孔作为无效孔清除。

(2)根据不同专业要求与一孔多用的原则把有效钻孔进行分类分组。一般可分为第四系建模钻孔(用于三维第四系结构建模)、基岩钻孔(用于覆盖区基岩地质研究与编图)、浅表层第四系研究孔(进行浅表层第四系岩性组合与成因类型分析,用于地貌与第四纪地质图编制)等几类,其中前二者原则上均要求揭穿第四系,但第四系建模钻孔还要求分层描述较详细,并优先选择有土工测试数据或进行过多重

地层研究的代表性钻孔。

(3)把以上各类钻孔的坐标进行统一换算,自动投影到地理底图上,得到每类初筛孔平面分布图。然后综合考虑空间网度、第四系厚度、钻孔资料可利用程度等因素,对初筛孔进行合理的取舍,最后得到各类精选孔的平面分布图。其中精选出来的第四系建模孔根据其研究程度可进一步分为两组,其中一组用作第四系标准孔,与新布置的标准孔构成调查区第四系标准孔网;另一组为骨干孔,参与孔间地层对比与建模。

### 3 浅层地震勘探与测井

浅层地震勘探与测井是揭露第四系松散层垂向分带结构及其空间延展特征的主要物探方法,是第四系结构调查的辅助手段。

#### 3.1 浅层地震勘探技术要点

##### 3.1.1 方法试验与选择

根据工作区第四纪地质条件,通过方法试验,选择合理的勘查方法。

杭州市第四系底部普遍发育有厚度不等的砂砾石层,局部厚度达数十米。采用纵波反射法进行方法试验时,由于其漫散射严重,尽管从技术上采用了不同类型的激震方式、不同频率的检波器,都没有取得好的效果。当采用 SH 波反射法试验时,获得了基岩埋深 100 m 以上的 4 个层位的反射波。这一事实表明,厚砂砾石层对于纵波反射勘查是禁区,而采用 SH 波反射勘查时已不复存在。因此杭州城市地质调查选择了以浅层 SH 波反射为主的勘查方法。

##### 3.1.2 测线的布置原则

在进行正式数据采集前对设计测线进行全程踏勘,选择可进行实际施工的线路,标注在大比例尺(如 1:20 000)地形图上,并与实际测线进行对比。鉴于杭州的城市建设日新月异,留给进行浅层地震勘查的空间愈来愈小,且地表水网密布,因此按照以下原则对施工线路进行详细踏勘和布设:实测测线应与设计测线平行并尽量靠近;全程覆盖设计测线;测线平移时,要有重复段。

##### 3.1.3 观察系统的选择

由于 SH 波浅层反射的主要干扰是视速度较低的勒夫波,尤其是当表层松软时,小于 400 ms 的浅层反射波受勒夫波的干扰十分严重,其有效的接收窗口仅限于近震源的很少地震道。因此,若想接收到从浅层至深层的 SH 波反射记录,近震源处最为有

利。在本次 4 条测线的 SH 波浅层反射勘查数据采集集中,均选择了中间放炮观察系统,道距 3 m,最小偏移 1.5 m,最大偏移距 34.5 m 左右。

### 3.1.4 震源试验和选择

在数据采集前需进行震源试验。以杭州市为例,试验采用了 3 种震源,即水平敲击路沿、敲击长木板、敲击短木板和横波震源弹。试验结果表明,采用短木板震源和测线位于边侧的采集方式与采用传统的采集方式有同样的效果。这一小小的改进,使激发横波对场地的要求变得不那么苛刻,施工更加方便。

通过反复的对比试验,确定施工中震源的选择如下:(1)在具备敲击路沿(或街沿)的测线,选择敲击路沿(或街沿)激发横波。(2)在不具备敲击路沿(或街沿)的测线,选择敲击短木板激发横波。

### 3.1.5 覆盖次数的选择

在正式数据采集前进行了覆盖次数选择试验,试验结果对比可见,3 次覆盖和 6 次覆盖的地震反射时间剖面的基本面貌并无大的区别,都能真实、客观地反映地下地层结构和构造特征,二者的差别仅仅是 6 次覆盖的有效反射波组在局部区段较 3 次覆盖表现为能量较强和连续性较好而已。据此选择 4 次覆盖观测系统。

## 3.2 测井方法与解释原则

为了避免测井曲线所代表地质意义的多解性,选择合理的测井组合序列十分重要。经验表明,自然电位测井、自然伽马测井、电阻率测井组合序列能比较清楚地反映地层的岩相组成和旋回性特征<sup>①</sup>,因此在同一第四系钻井中同时选用这三种测井方法效果更好。

采集的测井数据需要经过数值计算、深度校正,才能得到电阻率、自然电位和自然伽马等物性参数随深度的变化曲线,即测井曲线。测井曲线的高分辨率特征为不同级次地层界面的识别与划分提供了良好的资料基础,一般是利用曲线急剧变化的拐点作为划分地层界面的主要依据。但是,对测井曲线的地质解释必须建立在对取心井段综合分析的基础上,与岩性地层柱紧密地结合起来,才能达到预期的效果。

## 4 第四纪地层划分与对比

第四系结构研究,必须建立在第四纪地层划分、孔间对比以及第四纪控制性剖面研究等基础上。

### 4.1 地层划分原则与区域对比标志

在第四系标准孔综合研究的基础上,对代表性第四系钻孔进行详细划分与对比,编制代表性钻孔第四纪地层柱状对比图,建立工作区第四纪地层层序及填图单元划分方案(表 1)。鉴于杭州市位处钱塘江河口地区,沉积作用类型有垂向加积,也有侧向加积;第四系沉积结构复杂,同期异相和异期同相极为普遍,用某种单一方法难以正确地划分地层和进行区域对比<sup>①</sup>。因此,须遵循岩石地层学、生物地层学、气候地层学、磁性地层学和年代地层学等多重地层划分原则和方法,同时结合浅层地震、综合测井以及土工参数等资料进行综合分析。具体划分以下几方面为主要依据:

- (1)沉积物的岩性(如颜色、结构、构造等)、岩相变化特征,沉积物的沉积旋回和沉积间断及其他标志;
- (2)沉积物出露部位,分布特征和微地貌形态特征相结合;
- (3)海侵海退、古气候冷暖变化的周期性和古地理环境的变化;
- (4)古地磁极性变化和  $^{14}\text{C}$  同位素年龄测定;
- (5)能进行区域地质与年代对比,便于更好地进行野外直接分层和掌握。

以标准孔多重地层研究为基础,建立了以下区域对比标志:

- (1)海侵标志:利用微体古生物学来分析确定海侵层是最有效、最可靠的划分方法之一。根据有孔虫、介形虫的分布及其组合特征进行划分对比,并结合岩性岩相综合分析,确定海侵时代及标志层。
- (2)古气候标志:沉积物中孢粉面貌及其组合特征是确定气候冷暖,进行古气候分期的主要标志。温暖期孢粉比较丰富,孢粉组合以阔叶树花粉为主。寒冷期孢粉较少,以喜冷的针叶树为主,或以草本花粉为主。
- (3)岩性标志:由于古气候周期性冷暖更替,致使沉积环境相应的演变。第四纪沉积物往往形成粗细相间的沉积旋回、亚旋回。
- (4)沉积间断及标志层:第四系在垂向上有几个硬土层(局部为古土壤层)。硬土层的共同特征有:宏观上与上覆岩性层呈突变接触,而与下伏层具渐变关系<sup>②</sup>;因失水固结,含水量小,均呈可塑—硬塑或坚塑状,明显区别于上下层;由于暴露氧化作用,色调

①浙江省地质矿产局. 1:5 万杭州市幅、临浦镇幅城市地质综合调查报告(内部资料). 1987.

表 1 杭州城市平原区第四系结构填图单位划分方案  
Table 1 Plan of mapping units of Quaternary stratigraphic structure in the plain region of Hangzhou City

系	岩石地层		古气候分期 (张上麟, 2006)	沉积相	海侵 分期	综合年 代 (ka)	填图单 位代号	岩 性 简 述	
	统	组							
第 四 系	全新统	镇海组	亚大西洋期	湖沼相、河口相		3	Qhz <sup>h3</sup>	褐黄、灰黄色粉质粘土、粘土或粉土	
				河口相、海相					
			冰后期	河口相	富阳海侵	8	Qhz <sup>h2</sup>	黄灰、灰色粉土、粉砂或灰色淤泥质土	
		北方期	海相						
		上段	前北方期	第八寒冷期	河湖相		50	Qpr <sup>2-3</sup>	褐黄、灰绿色粘性土 (第二硬土层); 局部灰黄色粉细砂
					海相			Qpr <sup>2-2</sup>	灰色粘性土, 局部灰绿色粉土
海相	Qpr <sup>2-1</sup>				灰色粉土、粉细砂				
下段	第七温暖期	亚冷期	河湖相	杭州海侵	100	Qpr <sup>1-3</sup>	褐黄、灰绿色粘性土 (第三硬土层)		
			海相			Qpr <sup>1-2</sup>	灰色粘性土		
			海相			Qpr <sup>1-1</sup>	灰、灰黄、灰绿色粉土、粉砂、砂		
上段	东浦组	第七寒冷期	河湖相		180	Qpd <sup>2</sup>	褐黄、灰绿色粘性土 (第四硬土层)		
			河流相、洪积相			Qpd <sup>1</sup>	灰、灰黄色, 卵 (砾石), 砾砂, 砂		
		第六温暖期	河湖相	300	Qpq <sup>2</sup>	杂色粘性土			
		第六寒冷期	河流相或洪积相		Qpq <sup>1</sup>	卵 (砾石), 砾砂, 砂			
下段	前港组	第五温暖期							

常呈黄褐、棕黄、灰绿色或杂色,普遍有铁、锰质浸染或含铁锰质斑块、结核;一般不含海相化石,常见植物碎片。硬土层特征明显,是划分地层的重要标志层。

#### 4.2 孔间地层对比与第四纪剖面研究

以第四系标准孔为基准柱,填图单元综合划分方案和区域对比标志为参照依据,编制第四系钻孔地层柱状图,并充分利用第四系松散土层的工程力学特性,进行孔间地层对比及单孔地层归属。

结合浅层地震勘探资料,编制控制全区的纵横向第四纪地质剖面图,综合分析第四系沉积结构特征,构建平原区第四系宏观地层格架。

### 5 结 语

(1)第四系标准孔有一套完整的工作流程,从钻孔的合理布位、全孔取心钻探、岩心的保存与精细编录、系统取样与照相到资料的综合整理,每一个技术环节都有特定的要求,尤其是将全部岩心用 PVC 塑管进行密封保存与系统编号,达到了保湿、防震等预期效果,为室内精细研究创造了有利条件,从而大大提高了岩心编录的精度,实现了对钻井垂向地层结构的直观表达。初步的实践证明,该方法技术是行之有效的,在河口—海湾地区具有一定的推广意义。

(2)浅层地震勘探与测井有助于揭示第四系垂向分带结构及其空间延展特征,是第四系结构调查的重要辅助手段,但必须根据工作区的实际情况,选择恰当的勘查方法,并掌握一定的技术原则。针对杭州市特殊的第四纪地质及城市环境条件,通过方法与震源试验,选择以浅层 SH 波反射为主的勘查方法;在不具备敲击路沿(或街沿)的测线选择敲击短木板激发横波,这一小小的改进,使激发横波对场地的要求变得不那么苛刻,使施工更加方便;选择自然电位测井、自然伽马测井、电阻率测井组合序列,并且把测井曲线与钻井岩性地层柱紧密结合起来进行综合分析,可以避免测井曲线所代表地质意义的多解性。

(3)杭州市位处钱塘江河口地区,第四系沉积结构复杂,多相共存,相变剧烈,水下剥蚀面及暴露面发育,钻孔之间的地层对比不能采用深度加岩性的简单

对比法,须运用岩石地层、生物地层、气候地层、磁性地层和年代地层等多重地层划分方法,同时结合浅层地震、测井以及土工参数等资料进行综合分析。以第四系标准孔多学科研究为基础,建立第四纪地层层序及区域对比标志,然后将标准孔的研究结果延展到参加建模的各骨干孔,实现孔间地层对比。在此基础上,建立杭州市平原区第四系建模钻孔数据库,构建三维第四纪地质结构模型,显示各正式和非正式填图单位的范围和空间分布、地质体之间的相互关系。

(4)本文只是杭州城市三维第四系结构调查与研究方法的阶段性总结,目前还处于进一步探索、改进与完善之中,提出工作思路与技术方法的探讨及交流,旨在抛砖引玉,期盼有更多的专家和同仁提供帮助与指教,以达到不断完善工作方案、推动项目工作进展、提升最终成果质量的效果。

**致谢:**本文承蒙天津地调中心王强研究员、浙江省工程勘察院张上麟教授级高级工程师以及同济大学海洋学院李从先教授的指导与帮助,浙江省地质调查院朱碧波、黄卫平等参与了部分野外工作,在此一并表示衷心的感谢!

#### 参考文献 (References):

- [1] 杨建梅, 罗以达, 顾明光, 等. 杭州城市第四系三维地质结构模型建立中的孔间地层对比方法分析[J]. 中国地质, 2006, 33(1):104-108.  
Yang Jianmei, Luo Yida, Gu Mingguang, et al. Analysis of the correlation method of inter-borehole strata for the construction of a Quaternary 3D geological configuration model of Hangzhou City[J]. Geology in China, 2006, 33 (1):104-108 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邓红文, 王红亮, 祝永军, 等. 高分辨率层序地层学——原理及应用[M]. 北京:地质出版社, 2003:18-20.  
Deng Hongwen, Wang Hongliang, Zhu Yongjun, et al. High-resolution Sequence Stratigraphy Its Theory and Applications [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2003:18-20(in Chinese).
- [3] 陈忠大, 覃兆松, 梁河, 等. 杭嘉湖平原第四纪地层高精度对比方法研究[J]. 中国地质, 2003, 30(3): 275-280.  
Chen Zhongda, Qin Zhaosong, Liang He, et al. High-resolution stratigraphic correlation method of the Quaternary in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou plain [J]. Geology in China, 2003, 30 (3):275-280(in Chinese with English abstract).

## Method for the investigation of 3D Quaternary structure in the plain region of Hangzhou City

GU Ming-guang, WANG Qing-hua, LU Cheng-zhong, QIN Xiang-xi, YU Guo-chun

*(Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, Zhejiang, China)*

**Abstract:** Quaternary investigation, which serves the urban geological investigation and aims at constructing 3D geological structure, has great exploratory potential. Take Hangzhou City for example, the paper explores and summarizes the methods and technical specifications for the 3D Quaternary structure investigation in the plain region of the city with respect to Quaternary standard hole construction, collection, compilation, analysis and selection of a mass of borehole data, shallow seismic exploration and composite well logging, stratigraphic division of the Quaternary and hole profile correlation.

**Key words:** 3D Quaternary structure investigation; research method; plain region; Hangzhou City

---

**About the first author:** GU Ming-guang, male, born in 1968, senior engineer, engages in the studies of regional geology and environmental geology; E-mail: freebeing@163.com.