

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

杨建梅^{1,2} 罗以达² 顾明光² 覃兆松²

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 浙江省地质调查院, 浙江 杭州 311200)

摘要:构建地质结构模型是正在开展的杭州城市地质调查工作的主要内容之一,精确模型的建立基于孔间地层的精确对比。因此,确定适合该地区的孔间地层对比方法成为一个非常重要的课题。笔者对传统对比方法及 1:25 万杭州市幅第四纪地层高精度对比方法进行了分析,根据高分辨率层序地层学理论和对比准则,结合杭嘉湖平原位处河口地区的沉积特点,拟定了适合杭州第四系钻孔间(岩)层对比的新方法。

关键词:第四系;高分辨率层序地层;孔间地层对比;三维地质结构模型;杭州

中图分类号:P534.63 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)01-0104-05

现代城市的发展,都将地下空间开发纳入其发展规划之中,杭州市在其发展规划中提出了“打造杭州地下都市”,“构筑两个中心、两条轴线、12 个重点开发利用地区的地下网络空间,25 条地下隧道及地下空间垂向三层”的地下空间开发模式,因此,对地下地质体的空间展布、岩性、结构的厘定以及岩土工程地质条件、水文地质条件的研究,必须运用先进理论和切合实际的工作方法,才能达到要求。

城市地质调查建模成果包括地质、水文、工程和经济模型等,基础则是第四系三维地质结构模型,其精度直接影响到其他模型的质量。因此,如何提高基础地质模型的精度,便成为城市地质工作中必须尽快解决的一个重要问题。

以往水文、工程地质调查及科研项目中积累了大量的钻孔资料,据粗略统计,杭州市仅工程地质勘查资料约 4 万份,钻孔达 10 万个以上,它们是开展城市地质调查的重要基础,若为建模所用,应首先解决钻孔的孔间对比问题,在此,笔者将依据杭嘉湖平原第四纪沉积特点,参考 1:25 万杭州市幅区域地质调查资料,运用层序地层学理论,对孔间对比问题进行讨论。鉴于目前开展城市地质工作的北京、上海均处于海岸或河口平原地区,建模前也必须首先解决钻孔间的对比方法问题,因此,对这一问题的探讨具有一定的普遍意义。

1 杭嘉湖平原第四系沉积特点

杭嘉湖平原滨临东海,北接太湖,地处长江三角洲南翼。

平原区水网密布,西、南部丘陵环绕,具典型的江南水乡地貌景观。独特的地理位置决定了杭州湾及其周边地区既有河流带来的大量泥沙淤积,又有潮汐及风暴作用将海水中的碎屑物带至本区。北部余杭镇至亭址镇一带的平原区,由于受太湖影响,以湖相沉积的细碎屑为主。

杭州湾为一潮控河口区,最大潮差近 9 m,流速可达 4 m/s,属强潮区。虽然河口地区的沉积速率很高,但在钱塘江观测到在一个潮周期内,侵蚀深度达到 15 m,尔后侵蚀槽又被迅速淤积填平^[1]。气候周期性变化导致的海(湖)平面频繁地升降,造成的相带迁移除产生巨大的沉积作用外,同时又对原有的沉积物产生强烈的剥蚀改造作用,致使第四纪沉积物结构复杂,相变剧烈,水下剥蚀面及地表暴露面(古土壤层)非常发育。这种沉积与剥蚀的交替作用贯穿着整个第四纪沉积,持续至今。

层序地层学认为,沉积作用受控于海(湖)平面的升降。当海平面上升时,岸线向陆推移,沉积物呈上超关系随之向陆发生区位相移。下降时,随着岸线向盆地方向移动,除相位相应发生位移外,还会因海水退却,暴露地表形成古土壤层,以及河流向海延伸而出现河流堆积。据郎鸿儒^[2]研究,浙江海滨平原从山麓至海岸其全新世沉积体在剖面上为一平顶、凸底、前缘微微外倾的不规则扁平透镜体。愈向盆地,侧向加积愈明显,原始倾角愈大,透镜体在水深 60 m 处接近尖灭(图 1)。

收稿日期:2005-01-31;改回日期:2005-07-18

基金项目:中国地质调查局与杭州市政府合作杭州城市地质调查项目(200413000021)资助。

作者简介:杨建梅,女,1969 年生,硕士生,高级工程师,主要从事技术质量管理工作;E-mail:yangmei-416@163.com。

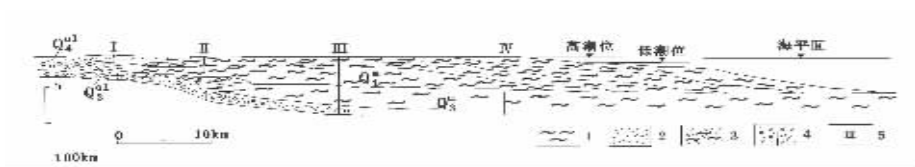


图 1 海滨平原横剖面示意图^[2]

1—泥质海相沉积层;2—细粒冲积层;3—混入海相泥质沉积物的粗粒冲积层;4—粗粒和含粘性土粗粒冲积层;5—剖面编号
 Q_3^m —晚更新世冲积层; Q_3^m —晚更新世海积层; Q_4^{al} —全新世冲积层; Q_4^m —全新世海积层;

Fig.1 Diagrammatic cross section of the coastal plain^[2]

1—Argillaceous marine sediments;2—Fine-grained alluvium;3—Coarse-grained alluvium mixed with argillaceous marine sediments;
 4—Coarse-grained alluvium with clayey soil;5—Number of cross section

Q_3^m —Late Pleistocene alluvium; Q_3^m —Late Pleistocene marine bed; Q_4^{al} —Holocene alluvium; Q_4^m —Holocene marine bed

据 1:25 万杭州市幅区域地质调查资料^①, 杭嘉湖平原第四纪沉积物的特点是:沉积环境包括了山麓洪积相、冲积相、淡水湖泊沼泽相、泻湖相、潮坪相及浅海相等;沉积作用类型可分为侧向加积和垂向加积;就沉积物而言,岩性在短距离内迅速发生变化,相变剧烈,厚度变化大,剥蚀面发育。因此,在研究本区第四纪地层高精度对比时,必须采取针对性措施。

2 传统地层对比方法的缺陷

建立第四系三维地质结构模型的主要手段是钻探及物探,其资料来源除新增的钻探与物探资料外,以前人钻孔资料为建模的主体。为使模型真正能起到指导地下空间开发利用的作用,运用一切可以应用的手段以提高对比精度成为建模的关键。

依据史坦诺的“原始水平律”形成的传统对比方法,认为在第四纪地层对比中,当深度大致相当,岩性相同或相似的层就可以进行对比(图 2)。层序地层学研究认为,沉积物的原始产状有水平的,但更多的是倾斜的,前者只有在滞水环境中才会产生,如深湖、深海等,但在滨浅湖、滨浅海、海岸带以及河口等水动力强的地区,水中的碎屑物在重力分选作用

下,按不同粒度分别堆积下来,如果在海平面上升期,沉积物呈上超关系层层叠覆,海平面下降时,沉积物则呈下超关系向盆地推进,因此,这些地区沉积物原始产状是倾斜的。

地处长江三角洲南缘的杭嘉湖平原,属长江三角洲的一部分,三角洲一般具有明显的顶积层、陡倾斜的前积层和近于水平的底积层^[3],但本区处于海岸地带,除河流水体与海洋水体具有密度差影响沉积物外,同时还受到波浪、潮汐、朵体迁移,以及它们的叠加作用,除发生沉积作用外,还有强烈的改造作用。因此,地(岩)层的结构还应复杂的多,如果依照“侧向加积”的理论,传统对比的剖面结构(图 2)至少还可以有 3 种对比方案(图 3)。

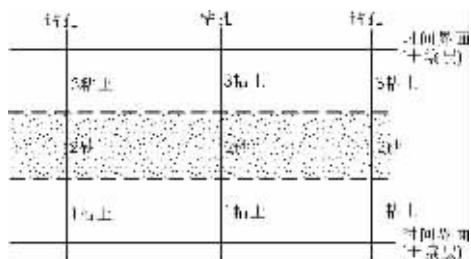


图 2 传统对比的剖面结构

Fig.2 Configuration of the section in the traditional correlation method

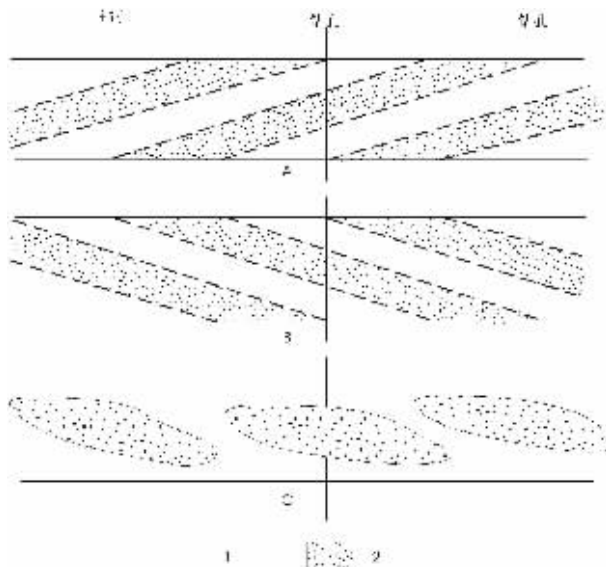


图 3 侧向加积作用下岩层的剖面对比

1—粘土;2—砂

Fig.3 Section correlation of lateral aggradational strata

1—Clay;2—Sand

① 浙江省地质调查院. 杭嘉湖平原第四纪地质研究报告,2004.

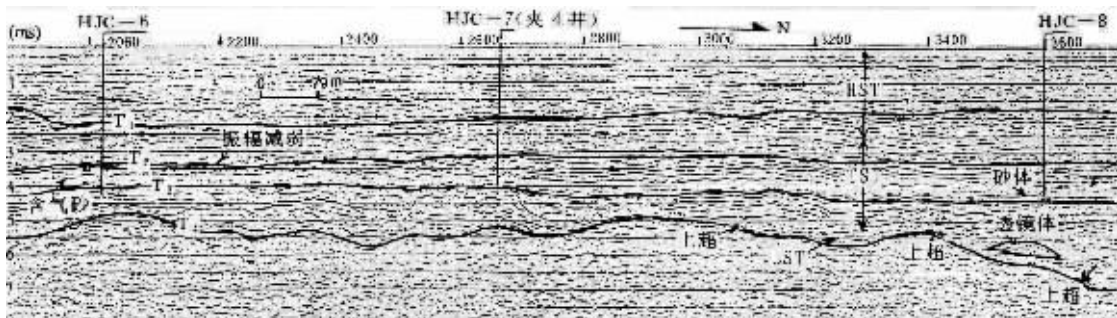


图4 夹灶浅气田横波地震剖面层序体系域解释

LST—低水位体系域;HST—高水位体系域;TST—海进体系域

Fig.4 Interpretation of sequence systems tracts at the transverse seismic wave section of the Jiaozao shallow gas field

LST—Lowstand systems tract;HST—Highstand system tract;TST—Transgressive systems Tract

不同的对比方案就会形成不同的第四系三维地质结构模型,更为重要的是不同的模型,其工程地质条件及水文地质条件有很大的区别,假如图2中各钻孔中部的砂层是具有一定厚度的流砂层,当出现图2与图3-C的情况,开挖地下坑道时是可以避开流砂层的,但当其是图3-A、图3-B两种情况时,则无法避开流砂层,只有在设计中绕开或开挖时采用特殊工艺。所以,采用传统的对比方法对第四纪地层进行对比,至少在本区是不全面的,极有可能造成与实际相差甚远的结果。

3 高精度地层对比方法及适用性分析

高分辨率层序地层学理论认为,基准面是一个分隔沉积作用与侵蚀作用的理论势能均衡面,在这个面上既无沉积作用,又无剥蚀作用。基准面总是不停地上下运动,构成基准面旋回,在这个时间域中保存的岩石组成一个成因层序(时间地层单位)。这种旋回性必然导致沉积物中出现旋回,其完整的旋回必然是水体由浅变深又变浅的沉积过程。只要通过沉积学的研究,特别是沉积微相的研究,就可以加以识别。

根据高分辨率层序地层学“沉积物体积分配原理”,岩石与地层不连续面的两者结合才记录了完整而连续的时间,其正确的年代地层对比实际存在3种情况,即岩石与岩石、岩石与界面、界面与界面的对比,而不是深度和岩性的简单对比。由于冷期造成的地表剥蚀强度各地并不相同,部分钻孔中有可能丢失长周期气候旋回顶部的基准面沉积物。同时暖期的海侵是由盆地向外陆漫漫的,一般情况下靠海地区先接受沉积,必然导致近陆区可能缺失长周期气候旋回的下半部基准面旋回,因此,钻孔间的基准面旋回就不能一一对比,换言之,同一气候旋回中的两孔均有3个基本旋回,它们可能可以相互对比,也可能不是这种简单的相互关系,一孔的第一个基准面旋回相当于另一孔的第二个甚至第三个基准面旋

回。解决这一问题方法有:标志层法,包括海相沉积层中的陆相夹层或陆相沉积层中的海相夹层和特殊岩性、结构、成分的岩层;次级气候波动形成的次级土壤层,运用测年探求相互间的对比关系;依据地震剖面资料寻求相互之间的关系。

运用上述对比原理,对各钻孔剖面进行基准面旋回的划分,并以气候旋回为单元制作大比例尺基准面旋回对比图,进行每一气候旋回中的岩层精确对比。孔间地层对比要在制作对比图的基础上完成,首先对每个可利用钻孔进行古土壤层划分,然后利用测年、磁性地层学、气候地层学、沉积学等多种理论和方法寻求它们的等时对应关系,在此基础上作出钻孔剖面对比图及剖面图。

高分辨率层序地层学理论,将地理学的“基准面旋回”理论引入层序的研究中,解决了陆相层序与海相层序的对比,通过对前人勘查资料的分析 and 杭州市幅(1:25万)区调工作的实践探索,认为这一理论也同样适用于海岸带或河口地区内沉积地层的对比。

夹灶浅气田横波地震剖面(图4),位于萧山东至余杭东,剖面线垂直于地层走向,近南北向。剖面中有4个明显的地震反射面,分别命名为 T_1 、 T_2 、 T_3 及 T_4 。这4个反射面纵贯南北,整条剖面上均可清晰见到,其中 T_4 为全新世与更新世界面,界面由硬粘土层组成^[9],为末次冰期海平面下降、暴露地表的结果,该面波状起伏、切割明显,总体由南向北倾斜,说明除地表暴露外,还具有较强的侵蚀作用。沉积间断面上的沉积物因海侵由盆向陆逐渐漫漫,造成海进沉积物有一定的时间差,但间断面本身是同一地史期的产物,代表了冷期沉积物的顶面,具有年代学意义,除可作为等时对比的依据外,还是划分新老地层的一个重要界面。

其余3个界面(T_1 — T_3)特征与 T_4 有许多相似之处,如全区发育、波状起伏、界面上下岩性突变等,不同之处是其规模较 T_4 小,说明它们亦为冷期海平面下降暴露地表的产物,只

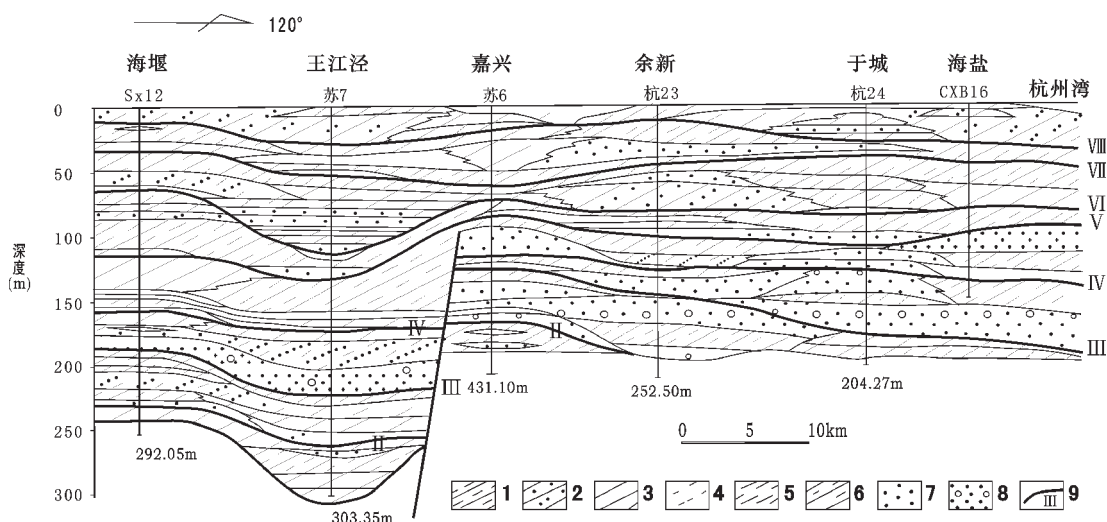


图 5 江苏吴江海堰镇—浙江海盐武原镇第四纪地质剖面

1—亚粘土;2—淤泥质亚粘土;3—粘土;4—亚砂土;5—粉土;6—粘土粉砂互层;7—粉细砂;8—含砾砂、砂砾石;9—古土壤层及气候旋回编号;

Fig.5 Quaternary geological section from Meiyuan Township, Wuyuan, Jianguo to Wuyuan Township, Haiyan, Zhejiang

1—Loam;2—Sludgy loam;3—Clay;4—Sandy loam;5—Silty soil;6—Alternating beds of clay and silt;7—Silt and fine-grained sand;

8—Sand containing gravel and sandy gravel;9—Numbers of paleosol layer and climatic cycle

是暴露时间短,可能为末次冰期后气候次级波动的产物。

1:25 万杭州市幅区域地质调查以古土壤层为冷期标志或气候旋回等时标志,建立杭嘉湖平原第四纪等时对比地层格架(图 5),其总体对比方法切实可行,但由于古土壤层的形成需地层的暴露并有足够的时间,这种对比只能反映长周期的气候旋回。

4 高精度地层对比方法的进一步完善

“1:25 万杭州市幅第四纪地层高精度对比方法”(以下简称“方法”)是在高分辨率层序地层学理论指导下,运用古气候旋回及基准面旋回等时的理论,以钻孔资料为主,结合海塘、海堤及考古资料,并以标准孔为基础逐孔外延,对区内钻孔进行对比,以建立区内第四纪地层等时对比格架为目的的一种对比方法^[4]。虽然“方法”引进了先进的理论,提高了本区第四纪地层对比精度,但受当时的资料来源、工作手段等限制,尚存在①气候旋回中的地层是运用基准面升降旋回作进一步对比,钻孔间的基准面旋回对比关系带有较大的推测性;②对于气候旋回和基准面旋回界面,仍然采用深度相似、岩性相当的层位进行对比的问题。针对这些问题,拟定下列方案以进一步完善该方法:

(1)加强未暴露地表地区气候变冷的沉积物特征研究,包括孢粉的研究,提高气候旋回划分和对比的可靠性。同时,对施工钻孔中的气候旋回采集一定的同位素年龄样,确定它们的等时性。

(2)标志层是解决区域对比的常用方法,但这种高精度

对比的标志层应有足够证据说明其等时性,这包括用同位素测年、沉积环境分析、生物研究等等。

(3)物探方法是建立三维地质及地质构造格架的一种行之有效的方法,应布置几条穿越城市的物探剖面,为地层对比提供更多的资料。

5 结 论

杭嘉湖平原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。可应用高分辨率层序地层学理论,在“杭嘉湖平原第四纪地层高精度对比方法”的研究基础上,厘定古土壤层等气候旋回等时性标志,建立第四系长周期地层对比格架,运用高分辨率层序地层学基准面旋回等时原理,进行孔间气候旋回地层的高精度对比。

参考文献(References):

[1] 戴泽衡,李光炳. 钱塘江河口河槽冲淤变化及悬移质泥砂的运行[J]. 泥沙研究,1958,3(4):54~69.
Dai Zeheng, Li Guangbing. Ablation and accretion of the river channel in Qiantangjiang river mouth region and move of suspended silt[J]. Study of Silt, 1958, 3(4): 54~69 (in Chinese).
[2] 郎鸿儒. 浙江第四纪泥质海相沉积层的形成和鉴别标志[J]. 浙江地质, 1985;1(1) 5~14.
Lang Hongru. Formation and distinguishing signs of Quaternary argillaceous marine deposit in Zhejiang Province[J]. Geology of Zhe-

- jiang, 1985, 1(1):5~14 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘宝珺, 曾允孚, 等. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京:地质出版社, 1985.
- Liu Baojun, Zeng Yunfu, et al. Base of Lithofacies Palaeogeography and Methods of Working [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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).
- [5] 林春明. 杭州湾地区 15000a B.P.以来层序地层学初步研究[J]. 地质论评, 1997, 43(3):274~280.
- Lin Chunming. Sequence stratigraphic study on the Hangzhou Bay since 15000 a B.P.[J]. Geological Review, 1997, 43(3):274~280 (in Chinese with English abstract).

Analysis of the correlation method of inter-borehole strata for the construction of a Quaternary 3D geological configuration model of Hangzhou City

YANG Jian-mei^{1,2}, LUO Yi-da², GU Ming-guang², QIN Zhao-song²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. Zhejiang Institute of Geological Survey, Xiaoshan 311203, Zhejiang, China)

Abstract: The construction of a 3D geological configuration model is one of the main contents of urban geological investigations that are being carried out in Hangzhou City. The construction of an accurate model mainly depends on the accurate inter-borehole stratigraphic correlation; so it is a very important subject to determine an appropriate stratigraphic correlation method suitable to local areas. In this paper, an analysis is made on the traditional correlation method and the method of high-resolution stratigraphic correlation of the Quaternary used in the 1:250000 regional geological mapping of the Hangzhou City Sheet. According to the theory of high-resolution sequence stratigraphy and criteria of correlation, combined with the sedimentary characteristics of the estuary area where the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou plain is located, a new inter-borehole Quaternary stratigraphic (rock) correlation method suitable to this area is put forward.

Key words: Quaternary; high-resolution sequence stratigraphy; inter-borehole stratigraphic correlation; 3D geological configuration model; Hangzhou

About the first author: YANG Jian-mei, female, born in 1969, master candidate and senior engineer, mainly engages in the technique quality control; E-mail: yangmei-416@163.com.