

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2018.02.021

测井资料在第四纪地层结构研究中的应用 ——以天津市宝坻南部为例

樊航宇, 李继军, 黄猛, 李明辰, 张晓飞

(天津市地质调查研究院, 天津 300191)

摘要: 自然电位、电阻率、自然伽马等测井曲线的形态和特征与沉积相带及砂体展布关系密切, 它们对不同岩性地层特征响应十分敏感。通过对天津市宝坻南部两个第四系取芯孔岩芯编录、沉积相分析和测井曲线特征分析, 总结了不同地质历史时期沉积亚相及微相的测井响应特征, 建立了该区域测井沉积相模式。结合研究区大量水文钻探电测资料, 简要讨论了电测资料在该区域第四系地质结构研究应用中取得的良好效果, 为平原区进一步开展第四系地层结构研究工作提供了新的方法。

关键词: 测井曲线; 测井沉积相模式; 第四纪地层结构; 宝坻地区; 天津市

中图分类号: P631.81, P539.2 **文献标识码:** A

0 引言

随着我国平原区城市规模的迅速扩大和经济的快速发展, 地下水开发与保护、地下空间利用、地质灾害防治等工作越来越重要, 这些工作与第四纪地质结构密切相关; 平原区第四纪地层厚度大, 揭露其地质结构主要靠钻探, 但钻井取芯费用高, 取芯率低。而沉积相分析是解析地层结构的基础工作。

由于第四系取芯井资料有限, 且大多缺乏沉积构造、沉积韵律等沉积相分析所需信息, 无法满足相分析需求, 给地质结构研究带来诸多不便。而测井沉积相分析技术目前已广泛应用于石油勘探开发领域, 测井沉积相研究已成为现代沉积学研究中的重要课题^[1-9]。虽然测井沉积相分析技术目前在第四系地质结构分析等基础地质研究方面鲜有涉及, 但在平原区城市建设和发展过程中积累有大量的测井资料, 若能将这些电测资料与基础地质研究有机结合, 可极大地拓宽电测资料的应用空间, 为平原区基础地质工作提供新的思路和方法。

本文以天津市宝坻南部为研究对象, 尝试将测井沉积相分析技术应用于第四纪地层结构研究工作。首先通过取芯井岩芯描述、样品测试、常规测井等资料对比分析建立取芯井岩电关系和测井沉积相模式; 然后应用该模式在未取芯井中进行沉积相分析; 最后通过联合剖面对比解析该地区第四纪地层结构。

1 地质概况

天津宝坻南部地区位于渤海湾西岸, 区内有潮白河、蓟运河、青龙湾河及还乡河等多条河流通过, 是华北平原北部渤海湾盆地的重要组成部分(图1)。区内进入新近纪和第四纪以来, 渤海湾盆地由古近纪的断陷阶段进入拗陷阶段, 盆地开始整体下沉^[10-11], 第四系沉积即发育在这样的构造沉降背景下, 物源供给受海河水系及滦河水系影响, 方向呈多样性^[12]。第四纪沉积区受构造运动和海侵影响进一步分为冲积扇、冲积平原、冲海积平原等。自第四纪以来, 发育了厚度较大的陆相及海陆交互相地层,

收稿日期: 2017-03-16; **责任编辑:** 赵庆

基金项目: 天津市国土资源和房屋管理局项目“天津黑狼口乡等四幅1:5万区域地质调查”(编号:国土房任[2014]19号)资助。

作者简介: 樊航宇(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质调查工作。通信地址: 天津市南开区迎水道20号, 天津市地质调查研究院; 邮政编码: 300191; E-mail: hangyu_fan@163.com

且坳陷区和隆起区厚度不等,第四系底界埋深差异较大^[13]。

宝坻南部地区受古滦河、古潮白河及海水等水系影响,第四纪沉积物广泛分布,厚度变化大。垂向上经历了低湾砂质河体系,高湾砂质河与河间越岸沉积体系,低湾砂质河体系,高湾砂质河、河间越岸、三角洲平原体系等多个沉积体系发育阶段,沉积相类型多样,且同一体系在横向上有很大的相变^[14],如不同物源方向冲积扇相互交错叠压、同一冲积扇体迁移叠置、河流频繁摆动及海进海退等现象普遍存在,导致该区地质结构复杂。

2 测井响应特征

本次工作从岩电关系、韵律及其组合、间歇面及冲刷面识别、曲线形态等多个方面分析测井响应特征。

在分析对比 QHJ01、QEJ01 取芯井的岩性和测井数据的基础上,建立了研究区沉积物岩性与电性之间的半定量对应关系。分析表明,不同岩石类型的测井响应特征存在差异,各类沉积物自然电位均

为负值,介于 $-5\text{ mV}\sim-30\text{ mV}$ 之间;电阻率均为正值,介于 $30\ \Omega\cdot\text{M}\sim100\ \Omega\cdot\text{M}$ 之间(表1)。电测数据与岩性对应关系具明显的规律性。电阻率按含砾粗砂 $\rightarrow$ 中粗砂及中细砂 $\rightarrow$ 细砂 $\rightarrow$ 粉砂 $\rightarrow$ 黏土的顺序递减,曲线幅值越小,则沉积物粒度越细。自然电位规律与电阻率正好相反(图2)。

测井曲线组合形态可以反映沉积层序的能量变化,即韵律特征^[15]。通过对 QHJ01、QEJ01 标准孔测井曲线旋回韵律识别,得出了正韵律、叠加正韵律及由正韵律和反韵律构成的叠加复合韵律等特征(图3)。

对间歇面及冲刷面等特殊的沉积层所反映的测井曲线特征进行了研究。这里的沉积间歇面指垂向沉积层序中一段连续稳定沉积结束到下一段连续稳定沉积开始之间形成的有别于上下邻层的特征岩性,如砂中的黏土夹层。冲刷面测井曲线形态表现为底部突变型,底部加速渐变为上凸型,上部多为锯齿钟形(图4)。

不同的曲线形态反映不同的岩性及岩性变化特征,进而反映沉积环境条件^[15]。测井曲线要素包括幅度、形态、接触关系、光滑程度及其组合等。通过系统分析本区两口取芯井的测井曲线的四个要素,以自然电位曲线为例,其主要类型及特征为:①箱形:顶底界均为突变接触,中幅,微齿一齿化;反映沉

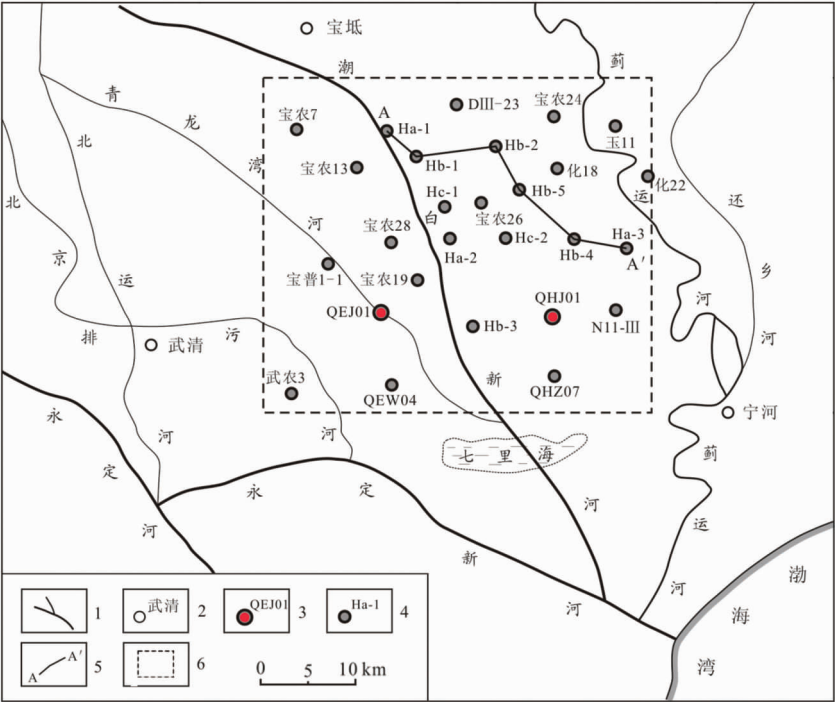


图 1 研究区地理位置及钻孔分布图

Fig. 1 Geographic location and borehole profile

1. 主要河流;2. 地名;3. 标准孔及编号;4. 水文钻孔及编号;5. 剖面位置;6. 研究区

表 1 研究区沉积物岩性与电性特征

Table 1 Lithology and electrical correspondence of sediment

电性特征	含砾粗砂及粗砂	中细砂及中粗砂	细砂	粉砂	黏土
自然电位(SP/mV)	-25~-23	-28~-15	-18~-12	-21~-18	-24~-10.6
电阻(RT/ $\Omega \cdot M$)	68~75	68~98	65~70	55~65	38~55

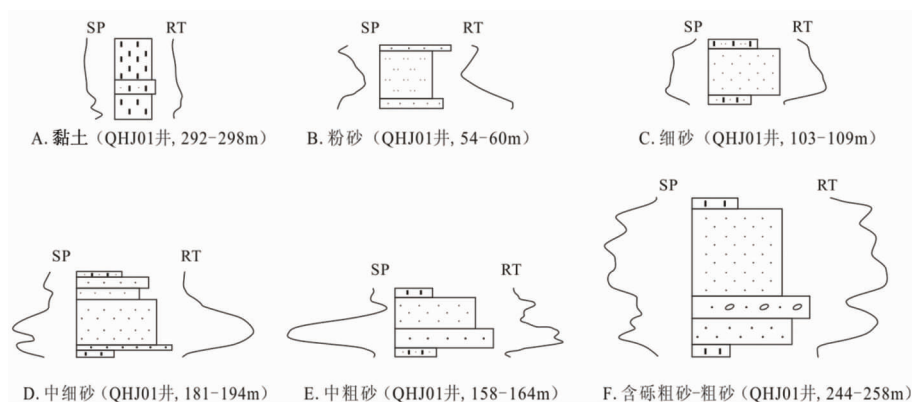


图 2 QHJ01 井岩电特征图

Fig. 2 Litho-electric feature map of QHJ01

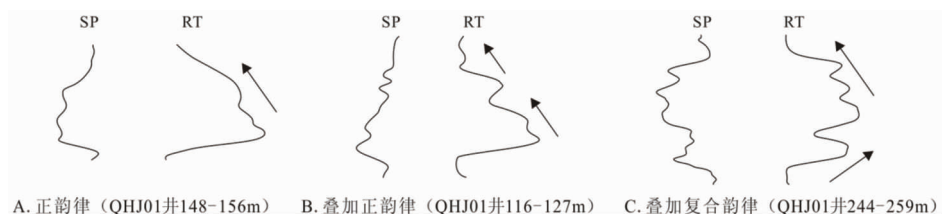


图 3 QHJ01 井沉积韵律特征

Fig. 3 Sedimentary rhythm characteristics of QHJ01

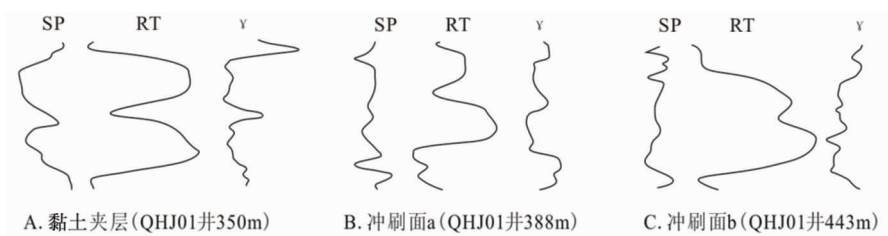


图 4 QHJ01 井间歇面及冲刷面特征

Fig. 4 Characteristics of intermittent and scouring surface of QHJ01

积过程水动力稳定或物源供给丰富,沉积物快速堆积,为河道沉积。②钟形:整体粒度相对较粗,岩性由下往上逐渐变细,底部与下伏地层突变接触,中幅,微齿;反映沉积过程水动力由下向上逐渐变弱的正粒序结构,对应曲流河河床及沙坝沉积。③漏斗形:岩性由下往上逐渐变粗,中低幅,

微齿,反映水动力逐渐变强或物源供给变得丰富,反粒序结构,为三角洲前缘沉积。④指形及齿形:岩性为互层或夹层,中低幅,反映沉积过程中能量变化频繁,为分流间湾或河漫滩沉积。⑤顺直形,低幅,曲线平直,偶尔出现代表细砂或粉砂夹层的小峰,为湖泊沉积。

3 测井沉积相模式建立

在研究岩电关系、沉积旋回韵律、间歇面及冲刷面识别等的基础上,分析了测井曲线形态、幅度、接触关系、光滑程度及其组合形态等要素,反复对比分析两口取芯井的沉积相,建立了研究区的测井沉积相模式,划分了冲积扇相、曲流河相、湖泊相、湖泊三角洲相及潮坪相等几种沉积相类型。

3.1 冲积扇相

研究区冲积扇相自早更新世以来就有发育,主要见于研究区东北和西北部;到早更新世晚期,东北部冲积扇(即古滦河冲积扇)延伸最远,在东棘坨 QHJ01 孔见发育,具典型特征,将其沉积相与测井相分析结果相结合,建立了研究区冲积扇相测井沉积相模式,并进一步划分为扇根、扇中、扇缘 3 个微相(图 5)。扇根底部为砂砾石沉积,上部为粗砂及中细砂,局部发育板状交错层理,测井曲线幅度大,形态为钟形,底部有突变界面,上部呈前积式幅度组合;扇中沉积物复杂,有中细砂、细砂、粉砂、黏土质粉砂及黏土,含动植物化石碎片,交错层理及平行层理发育,粒度向上逐渐变细,测井曲线为中幅,厚层状,形态为漏斗形或钟形,向上渐变,常由几个齿叠加而成;扇缘沉积物粒度明显变细,主要为粉砂及黏土沉积,粉砂多呈透镜状,测井曲线顺直,幅度小,夹小齿峰曲线。整体为一套正韵律沉积。

3.2 曲流河相

自第四纪以来,研究区曲流河相广泛发育,是主

要的沉积相类型。根据区内钻孔岩芯所反映的环境和沉积物特征,微相类型主要包括河床相及河漫滩相(图 6)。河床底部多发育冲刷面,上部为厚层中细砂沉积,交错层理发育,粒度向上变细,测井曲线呈中幅钟形,底部突变;河漫滩相由较细粒沉积物组成,常见粉砂或黏土质粉砂与黏土互层的韵律特征,波状层理、脉状层理及透镜状层理广泛发育,测井曲线幅值小,多呈指状或锯齿状,与下部河床相曲线构成圣诞树形态。整体为向上变细的正韵律。

3.3 湖泊相

早更新世早期及中期,研究区南部靠近华北平原北部湖盆边缘,发育大面积湖泊相沉积。后期的冲积平原也点缀发育大量的河漫湖泊,其沉积特征典型,测井曲线类型单一(图 7)。湖泊相主要由厚层黏土组成,夹薄层粉砂、细砂沉积,钙质结核大量发育,测井曲线为低幅、平直型,局部夹小的齿峰。

3.4 湖泊三角洲相

湖泊三角洲相主要发育于早更新世湖盆边缘,可划分出三角洲平原相、三角洲前缘相及前三角洲相 3 个微相(图 8)。前三角洲相与湖泊相类似,主要由黏土构成,但颜色偏深,多为灰黑色、深灰色,测井曲线幅值低,近于平直;三角洲前缘相沉积物粒度较粗,包括中粗砂、含砾粗砂及中细砂等,局部发育大型板状交错层理,粒序表现为先向上变粗再变细的特征,测井曲线特征为下部和顶部幅值中等,中部幅值最大,形态呈纺锤形。整体表现为先反粒序后正粒序的韵律特征,反映三角洲早期建设性、晚期破坏性的演化规律。

3.5 潮坪相

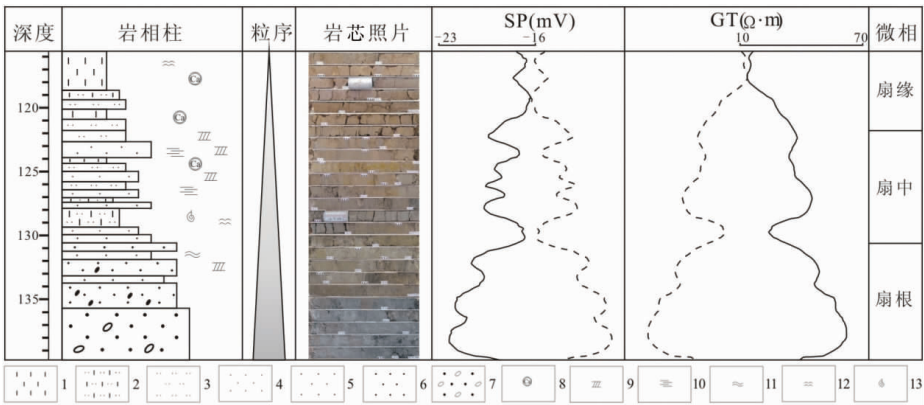


图 5 冲积扇测井沉积相模式

Fig. 5 Logging facies model of alluvial fan

1. 黏土;2. 黏土质粉砂;3. 粉砂;4. 细砂;5. 中砂;6. 粗砂;7. 含砾粗砂;
8. 钙质结核;9. 交错层理;10. 平行层理;11. 波状层理;12. 贝壳碎片;13. 淡水螺

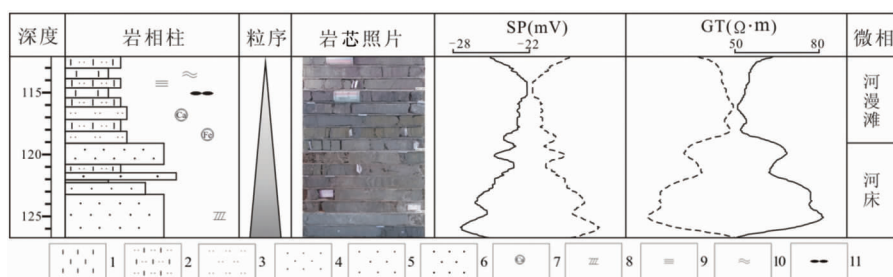


图 6 曲流河测井沉积相模式

Fig. 6 Logging facies model of meandering river

1. 黏土; 2. 黏土质粉砂; 3. 粉砂; 4. 细砂; 5. 中砂; 6. 粗砂; 7. 钙质结核;
8. 交错层理; 9. 平行层理; 10. 波状层理; 11. 脉状层理

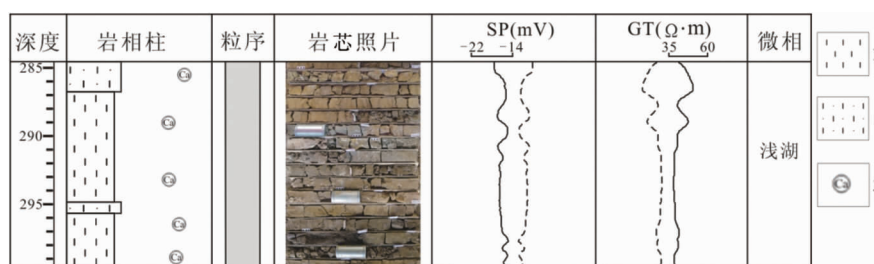


图 7 湖泊测井沉积相模式

Fig. 7 Logging facies model of lake

1. 黏土; 2. 粉砂质黏土; 3. 钙质结核

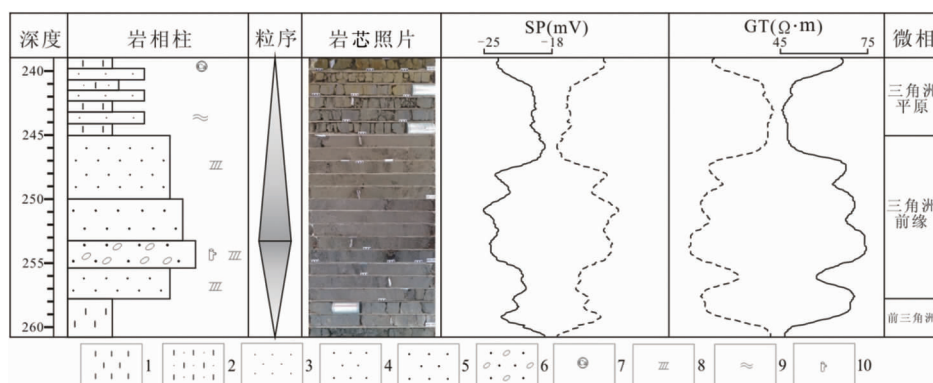


图 8 湖泊三角洲测井沉积相模式

Fig. 8 Logging facies model of lake delta

1. 黏土; 2. 黏土质粉砂; 3. 细砂; 4. 中砂; 5. 粗砂; 6. 含砾粗砂;
7. 钙质结核; 8. 交错层理; 9. 波状层理; 10. 树干

潮坪相主要发育于晚更新世以来, 沉积特征及曲线形态与河漫滩相相似又略有不同(图 9)。潮坪相沉积物粒度较细, 岩性主要由粉砂、黏土质粉砂、黏土组成, 多呈互层状产出, 颜色大部分较深, 波状层理、脉状层理及透镜状层理广泛发育, 含贝壳化石碎片及碳质斑点或条带, 局部见水平层理。测井曲线幅值低, 表现为较平缓的小齿状或多指状。

4 第四纪地层结构

在建立测井沉积相模式的基础上, 对研究区大量电测资料进行了系统分析。首先对每口井的沉积相及微相进行划分, 然后通过联合剖面在垂向及横向

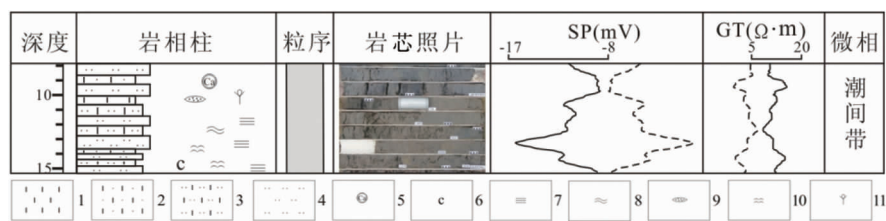


图 9 潮坪测井沉积相模式

Fig. 9 Logging facies model of tidal flat

1. 黏土;2. 粉砂质黏土;3. 黏土质粉砂;4. 粉砂;5. 钙质结核;6. 碳质斑点;
7. 水平层理;8. 波状层理;9. 透镜层理;10. 贝壳碎片;11. 芦苇茎叶

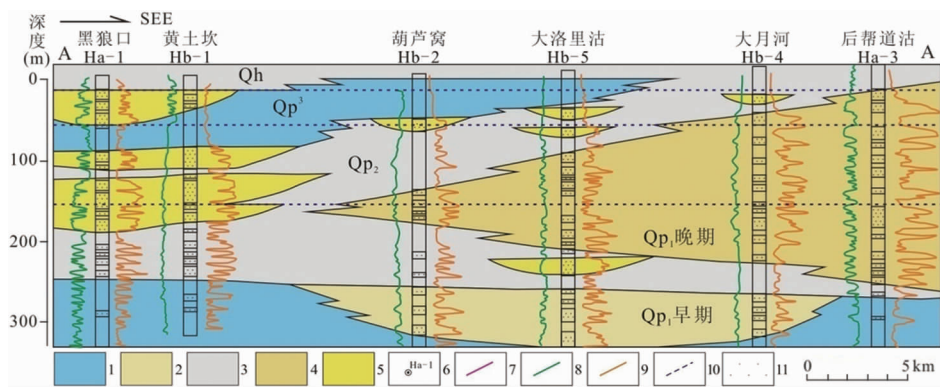


图 10 测井沉积相对比 A-A'剖面

Fig. 10 Logging sedimentation contrast section A-A'

1. 湖泊相;2. 湖泊三角洲相;3. 河漫滩相;4. 冲积扇相;5. 河床相;6. 钻孔及编号;
7. 剖面线;8. 自然电位曲线;9. 电阻率曲线;10. 地层界线;11. 砂层

上对比分析了湖泊相、湖泊三角洲相、河床及河漫滩相、冲积扇相等多种沉积相展布规律(图 10),最后结合区域地质资料完成了各地质历史时期沉积相展布图的编绘,达到解析区域地层结构的目的(图 11)。

分析表明,自早更新世晚期开始,古滦河冲积扇扇缘已经延伸到研究区东部,随后逐渐向北、向西进积,早更新世末期规模最大,到达葫芦窝一带;在晚更新世末期自西向东退出本区。古潮白河河道带在早更新世晚期开始进入本区西北部,且一直发育到现在,期间发生数次河道迁移。

山前冲海积平原由冲积扇群、湖泊沼泽、不断摆动迁移的河流以及海侵层等构成,沉积环境多样、相变频繁,导致沉积地层结构更为复杂,单靠有限的取芯井难以揭示精细的地层结构,综合运用各种资料和方法显得更为重要。

5 结论

(1)以天津市宝坻南部地区为例,通过对比分析

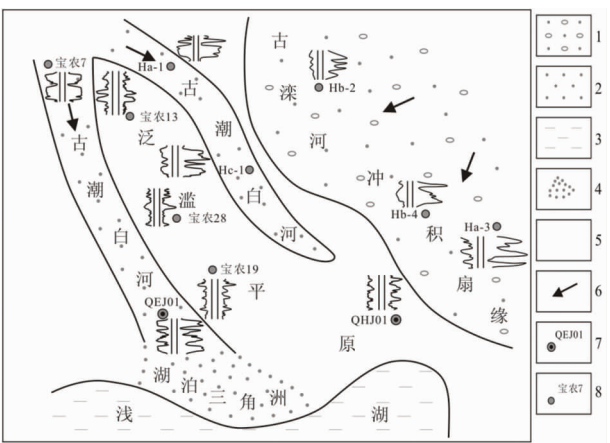


图 11 研究区早更新世晚期沉积相展布

Fig. 11 Extension of sedimentary facies in late early Pleistocene

1. 冲积扇;2. 河道带;3. 浅湖;4. 湖泊三角洲;5. 泛滥平原;
6. 古水流方向;7. 标准孔及编号;8. 水文钻孔及编号

两口标准取芯井的沉积相和测井相,建立了研究区冲积扇相、曲流河相、湖泊相、湖泊三角洲相及潮坪相等几种测井沉积相模式;

(2)以建立的测井沉积相为基础,通过系统分析区内每口井沉积相和联合剖面对比,结合区域资料分析了垂向上和平面上沉积相带展布规律,精细解析了研究区第四纪地层结构,效果良好;

(3)第四纪地层结构研究是一项综合性很强的工作,测井资料应用于该项工作具有一定的多解性,实际工作中应反复对比分析。而测井资料具有资料丰富、信息量大、数据连续、垂向分辨率高及成本低等优势,将其应用于深覆盖区第四纪地层结构的研究具有很好的前景。

致谢:承蒙天津市地质调查研究院王家兵总工程师对本文的写作予以指导,并提出宝贵的意见,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 王仁铎. 利用测井曲线形态特征定量判别沉积相[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 1991, 16(3): 303-309.
- [2] 李元元, 方少仙, 陈景山. 自然伽玛数字判别法研究沉积微相:以东濮盆地文留地区沙四段为例[J]. 沉积学报, 1991, 9(4): 59-68.
- [3] 朱富萍, 薛叔浩. 多参数测井相分析应用于沉积特征研究[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(4): 42-46.
- [4] 王向公, 陈一鸣, 冯桂, 等. 利用主成分曲线进行测井相分析[J]. 江汉石油学院学报, 1994, 16(2): 59-63.
- [5] 雍世和, 文政. 用 Bayes 判别法定量识别沉积微相[J]. 测井技术, 1995(1): 22-27.
- [6] 陈钢花, 申辉林, 雍世和. 应用数理统计方法自动解释地层岩性及沉积微相[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1996, 20(4): 26-29.
- [7] 尹寿鹏, 王贵文. 测井沉积学研究综述[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 440-445.
- [8] 陈烨菲, 彭仕宓. 沉积微相定量研究方法[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 51-53.
- [9] 余继峰, 付文钊, 袁学旭, 等. 测井沉积学研究进展[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2010, 29(6): 1-8.
- [10] Allen M, Macdonald D, Xun Z, et al. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(7/8): 951-972.
- [11] Hu S B, O'Sullivan P B, Raza A, et al. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, northern China: a Cenozoic rifted and local pull-apart basin[J]. Physics of The Earth and Planetary Interiors, 2001, 126(3): 221-235.
- [12] 王强, 李从先. 中国东部沿海平原第四系层序类型[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 39-51.
- [13] 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸晚更新世沉积的差异性特征[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 321-326.
- [14] 天津市地质矿产局. 天津市区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- [15] 马正. 应用自然电位测井曲线解释沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(1): 25-40.

Application of logging data to the study of Quaternary stratigraphic texture-illustrated by the case of southern Baodi, Tianjin

FAN Hangyu, LI JiJun, HUANG Meng, LI Mingchen, ZHANG Xiaofei

(Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin, 300191)

Abstract: Morphological and characteristics of spontaneous potential, resistivity, gamma ray logs is closely related to the distribution of sedimentary facies and sand body, they are sensitive to different lithology formation characteristics. By documentation, sedimentary facies analysis and well log analysis of two coring holes in southern Baodi, summarize the different geological history subfacies micro phase of logging response characteristics established in the region logging sedimentary facies model. Hydrological drilling a large number of binding study area measuring data, a brief discussion of the good results achieved in the electrical measurement data Quaternary geological structure Application of this region, to carry out further research work for Quaternary stratigraphy structure plain area provides a new method.

Key Words: well log; logging sedimentary facies model; Quaternary strata structure; Baodi; Tianjin