

钻井地层划分方法在天津地区青白口系中的应用

江国胜, 王震凯, 高亮, 王聪, 崔超凡

天津地热勘查开发设计院, 天津 300250

摘 要: 地热钻井岩屑的细小且混杂, 给地层的准确判断和划分带来了很大的困难. 针对天津地区青白口系层型剖面的岩性组合特征及标志特征, 探讨了岩屑录井、钻时录井的相关技术方法. 通过研究岩性与钻时、岩性与电性的对应关系, 总结了青白口系的钻时曲线特征和测井曲线标志特征. 在区域地层特征的基础上, 利用岩屑录井和钻时录井资料, 结合物探测井曲线, 可以准确划分出青白口系各组分层界线.

关键词: 青白口系; 地层划分; 钻井; 录井; 测井曲线; 天津

APPLICATION OF GEOPHYSICAL LOGGING METHOD IN STRATIGRAPHIC DIVISION OF QINGBAIKOUAN SYSTEM IN TIANJIN REGION

JIANG Guo-sheng, WANG Zhen-kai, GAO Liang, WANG Cong, CUI Chao-fan
Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development-Designing, Tianjin 300250, China

Abstract: Accurate judgment and division of strata are difficult due to the tiny and mixed geothermal drilling cuttings. According to the lithologic assemblage and marking characteristics of Qingbaikouan stratotype profile in Tianjin region, the paper discusses the relevant technical methods of cutting logging and drilling-time logging. The characteristics of drilling time curves and logging curves of Qingbaikou System are summarized by studying the corresponding relationships between lithology and drilling time, as well as lithology and electrical property. The stratigraphic boundaries of each formation of Qingbaikou System can be accurately defined on the basis of regional stratigraphic characteristics, cutting logging and drilling-time logging data, combined with the geophysical logging curves.

Key words: Qingbaikou System; stratigraphic division; drilling; logging; well log; Tianjin City

0 引言

自上世纪 90 年代以来, 天津地区开始地热井深井施工. 为了提高钻进效率, 降低钻井成本, 地热井施工几乎全采用岩屑录井的方法钻探, 即无岩心钻进成井^[1]. 据统计, 截至 2017 年底, 天津已施工完成地热

井 680 多眼, 其中蓟县系雾迷山组地热井 250 多眼^①, 岩屑录井技术已普遍应用于地热钻井施工中, 成为指导钻井施工的重要手段. 天津南部平原区青白口系大都直接覆盖在蓟县系雾迷山组热储层之上, 意味着钻穿青白口系就进入蓟县系雾迷山组热储层. 因此, 青

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-09-16. 编辑: 张哲.

基金项目: 天津地热勘查开发设计院 2018 年院自主创新项目“潘庄凸起基岩地质图修编及三维模型建设”(地热院任[2018]03 号).

作者简介: 江国胜(1982—)男, 高级工程师, 从事地热地质、钻井地质工作, 通信地址 天津市河东区卫国道 189 号, E-mail// jgs_1982@163.com

① 天津地热勘查开发设计院. 2017 年天津地热资源开发利用动态监测年报. 2017.

白口系地层的准确判断和划分是确保雾迷山组热储成井的关键. 由于钻井上返的岩屑极其细小而且混杂, 仅依靠岩屑录井准确辨识岩性和划分地层非常困难. 为了弥补岩屑录井过程中存在的不足, 利用钻时录井曲线和物探测井曲线辅助识别岩性和地层界面显得尤为重要.

本文以天津区域地层特征为例, 探讨在岩屑录井、钻时录井的基础上辅以物探测井划分青白口系地层的方法.

1 区域地质背景

1.1 地质构造

天津地区地处 I 级构造单元华北地台北缘, 以宁河-宝坻断裂为界分为北区和南区. 北区属 II 级构造单元燕山台褶带的次一级 (III 级) 构造单元蓟宝隆褶区, 南区属 II 级构造单元华北断拗区. 北区和南区地质构造特征具有明显的差异. 北区古生界及前古生界地层发育; 南区是中、新生代断陷、拗陷盆地. 区内 III 级构造单元包括一隆两拗, 即沧县隆起、冀中拗陷和黄骅拗陷. 隆起和拗陷及 IV 级构造单元凸起、凹陷的延伸方向和较大断裂的走向均呈北北东向, 形成雁行式相间排列的构造格局 (见图 1). 太古宙地台基底只在蓟县东北部有少量出露, 主要由斜长角闪岩、斜长透辉石岩组成. 从中元古界至中三叠统地层组成了地台盖层, 它的底部、顶部面积小且为陆相, 中部面积大且为海相, 其中夹两套火山岩.

1.2 区域地层

天津地区绝大部分被第四系覆盖, 地层除缺失上奥陶统至下石炭统及新近系中新统以外, 从太古宇至新生界均有分布 (见表 1). 北区除有部分第四系覆盖外, 基本缺失中、新生界, 前中生界在蓟县北部山区出露, 面积约 640 km², 其中以中、新元古界长城系、蓟县系和青白口系为主, 太古宇八道河群王厂组及下古生界仅零星分布; 南区前中生界地层埋藏较深, 其上堆积了巨厚的中、新生界.

2 青白口系层型剖面及标志特征

2.1 地层划分

以往按照《天津市区域地质志》^[2]和《天津市岩石地层》^[3]的地层划分, 都将青白口系划分为下马岭组、

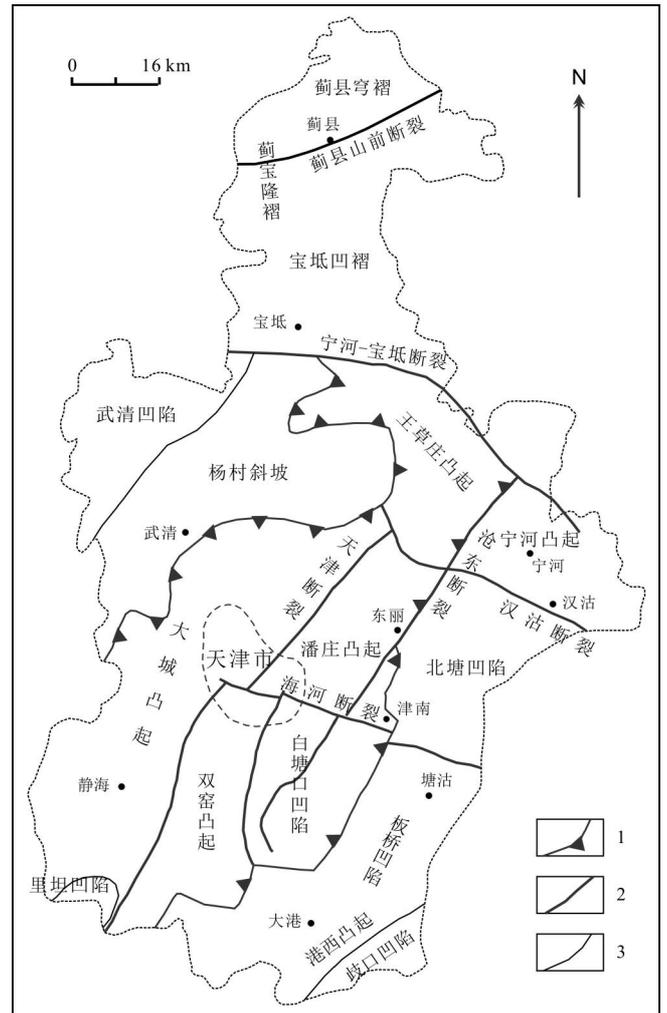


图 1 天津市地质构造图

Fig. 1 Geotectonic map of Tianjin City

1—古近系缺失线 (Paleogene omission line); 2—断裂 (fault); 3—构造分区界线 (tectonic division boundary)

龙山组和景儿峪组. 但是, 根据最新研究成果, 将下马岭组重新厘定, 划分为中元古界待建系^[4], 新元古界青白口系划分为龙山组和景儿峪组, 具体沿革见表 2. 龙山组与下伏下马岭组有明显的沉积间断, 景儿峪组与上覆寒武系昌平组呈不整合接触, 缺失震旦系地层.

2.2 层型剖面及标志特征

根据《天津市区域地质志》^[2]中青白口系的层序和相序特征, 天津地区青白口系下部以石英砂岩、砂砾岩为主, 上部以泥灰岩为主, 岩性特征比较明显. 各组岩性特征如下.

龙山组: 依岩石组合可分为上、下两个段. 一段底部为石英砂砾岩和含砾砂岩, 下部为灰绿色长石砂岩和黄色含长石砂岩, 中、上部主要为黄绿色板层至厚层

表 1 天津地区综合地层简表
Table 1 Comprehensive stratigraphy of Tianjin region

界	系	地层符号	岩性特征
新生界	第四系	Q	灰黄、灰褐及黄褐色粉砂质黏土和少量黑灰色黏土
	新近系	N	上部砂岩、棕红色泥岩夹少量黄褐色、灰色粉、细砂岩;下部灰白色含砾砂岩,夹灰绿、棕红色粉砂质泥岩及杂色砂岩
	古近系	E	灰绿色、灰褐色砂岩,夹灰、浅灰及灰褐色泥岩及紫红、棕红色砂质泥岩、含砾泥岩夹杂色砂岩
中生界	白垩系	K	上部为棕红色泥岩、含砾泥岩及泥砾岩;中部以暗色泥岩为主,富含化石;下部火山岩发育
	侏罗系	J	黑色碳质泥岩,灰绿、灰褐色泥岩夹灰白色含砾砂岩,有煤层
	三叠系	T	自上而下暗紫红、紫红、棕红、黄绿色砂岩、粉砂岩、泥岩呈不等厚互层
上古生界	二叠系	P	上部暗紫红色泥岩与灰色粉、细砂岩互层;下部有不稳定煤线,鲕状泥岩、火山岩
	石炭系	C	含煤层系,砂、泥岩,细砂岩,粉砂岩及紫灰、浅灰色鲕状、豆状铝土质泥岩
下古生界	奥陶系	O	厚层块状灰岩,夹泥灰岩,白云质灰岩及泥质条带灰岩;白云岩及少量灰、灰褐色云斑灰岩和云斑泥灰岩
	寒武系	Є	鲕状、泥质条带及白云质灰岩,暗紫红色、绿灰、灰紫色泥岩,含粒屑灰质白云岩及角砾岩
新元古界	青白口系	Qn	暗棕红、灰绿色泥灰岩,灰绿色海绿石粉砂岩,含海绿石粉砂质页岩,灰白色硅质石英砂岩
	待建系	?	灰色、灰绿色、灰黑色页岩和粉砂岩
中元古界	蓟县系	Jx	灰色含藻白云质灰岩,灰、褐灰色含燧石条带及团块的白云岩,灰绿、黑色粉砂岩,粉砂质页岩
	长城系	Ch	含硅质条带、叠层石白云岩,含锰页岩及白云岩,夹火山喷发岩
太古宇		Ar	石榴石角闪片麻岩及浅色变粒岩

表 2 青白口系划分沿革表
Table 2 Evolution of stratigraphic division of Qingbaikou System

以往地层划分方案			最新地层划分方案		
界	系	组	界	系	组
新元古界	青白口系	景儿峪组	新元古界	青白口系	景儿峪组
		龙山组			龙山组
		下马岭组	中元古界	待建系	下马岭组

状的含海绿石石英砂岩,含长石和页岩岩屑;二段为绿、红、黑灰、紫红、淡绿等杂色页岩,水平层理发育。标志特征为海绿石砂岩和石英砂岩。龙山组厚度为 50~120 m,与下伏待建系下马岭组呈假整合接触,与上覆景儿峪组为连续沉积。

景儿峪组:岩性较为单一,岩石组合主要是一套红色、灰绿色、蛋青色、灰褐色薄层含泥质的白云质灰岩。标志特征为蛋青色、粉红色泥灰岩。景儿峪组厚度为 100~150 m,与下伏龙山组为连续沉积,与上覆寒武系昌平组呈假整合接触。

3 青白口系钻井地层划分

3.1 地质录井及相关要求

地热钻井是一种隐蔽工程。为了开发和研究地热储层,在钻井过程中要进行地质录井工作。地质录井主要进行岩屑录井、钻时录井和钻井液录井,其中岩屑录井和钻时录井对钻井地层岩性识别起着至关重要的作用。岩屑录井的主要目的是通过钻井岩屑及时掌握岩性变化,准确判断钻遇地层和正钻地层并准确识别地层界面。通过岩屑录井可以直观描述钻遇岩性特征,为划分钻遇地层和研究沉积环境、地质构造、储层特征提供宝贵的第一手资料。通过钻时录井可以根据岩石的可钻性辅助判断岩性,尤其是在岩屑混杂、代表性不好的井段,钻时的变化往往可以提醒我们在岩屑中寻找新的成分,避免薄层岩屑被漏捕,也帮助及时卡准层位。依据地热资源勘查规范^[5],一般要求岩屑录井间距达到 2 m 的取样精度,遇地层变化频繁或接近目的层顶板时要加密取样,钻时录井与岩屑录井同步进行。钻井过程中,受裸眼井段长、井眼大小不规则、泥浆性能等因素的影响,真假岩屑往往相互混杂,严重影响岩性描述的准确性。因此,剔除假岩屑,挑出真岩

屑,是获取有代表性岩屑的关键。

按照设计要求,每眼井在录井过程中要做好岩屑地质编录,岩屑描述的内容主要包括岩性、颜色、成分、结构、胶结情况、化石及储层物性特征等。对砂岩储层的描述通常观察岩屑的磨圆度、分选性和水侵特征等,而对碳酸盐岩储层的描述主要观察岩屑的孔洞发育和钻井液漏失情况等。钻探施工过程中要随钻粘帖岩屑实物剖面(比例尺 1:500),并与物探测井曲线对比辨识岩性、校正井深和划分地层^[6]。

3.2 岩屑录井特征

天津空港经济区 SR37D 地热井钻井实践表明,青白口系龙山组地层岩性变化比较明显,中下部为砂岩,上部为页岩,界线分明;青白口系景儿峪组岩性相对单一,中下部为泥灰岩,上部为泥岩。根据岩屑录井实物剖面^①(见图 2),结合区域地层特征,各地层特征如下。

龙山组:岩屑颜色下部为白色、黄白色和无色,中部以绿色为主,偶见紫色(如东丽湖地区)和黑色(如团泊西区),上部为红、绿、黑等杂色;岩性下部为石英砂岩,中部为海绿石砂岩,上部为杂色页岩。在构造发育部位或基岩高凸起部位,龙山组下部石英砂岩钻井时容易发生钻井液漏失,漏速一般为 20~30 m³/h。

景儿峪组:岩屑颜色较为丰富,中下部为粉红色、蛋青色(俗称“鸭蛋青”)、灰绿色,上部为紫红色(俗称“玫瑰紫”),岩屑颗粒相对较大且坚硬;岩性自下而上灰质含量总体呈逐渐降低趋势,泥质含量总体呈逐渐升高趋势,即中下部为泥灰岩,上部为泥岩。景儿峪组底部纯灰岩钻井时偶尔会发生钻井液漏失现象,漏速一般小于 10 m³/h。

3.3 钻时录井特征

钻时的大小一方面取决于地下岩石的可钻性,另一方面取决于钻井参数(如钻压、转速、排量)的配合、泥浆性能、钻头类型及其磨损情况等^[7-8]。因此根据钻时的大小可以初步判断地层的岩性变化和储层的发育情况。青白口系作为非开采层,通常在同一井径下钻进。因此,各项钻进参数几乎保持不变,此时钻时的大小基本能够反映岩性的变化。通过钻时录井资料(见图 3),各地层钻时特征如下。

龙山组:钻时曲线总体呈上下高、中间低的变化特征,幅值变化较大。上部钻时较高,约 60 min/m;中部

地层	深度/m	岩屑样	岩性描述
寒武系 昌平组	1498		灰白色白云质灰岩
	1540		紫红色含钙质泥岩
青白口系 景儿峪组	1590		紫红色夹少量灰绿色泥灰岩
	1618		灰绿色夹少量蛋青色泥灰岩
	1632		灰色灰岩
	1654		紫红色夹少量灰绿色含泥白云质灰岩
	1660		杂色页岩
	1670		海绿石砂岩
青白口系 龙山组	1700		灰白色石英砂岩
蓟县系 雾迷山组	1750 (未穿)		灰白色、浅灰褐色白云岩

图 2 天津空港经济区 SR37D 地热井青白口系岩屑实物剖面合成图

Fig. 2 Cutting log profile of Qingbaikou System in No. SR37D geothermal well

①贾志,等.天津市天保热电有限公司 SR37D 地热井完井报告.天津地热勘查开发设计院,2008.

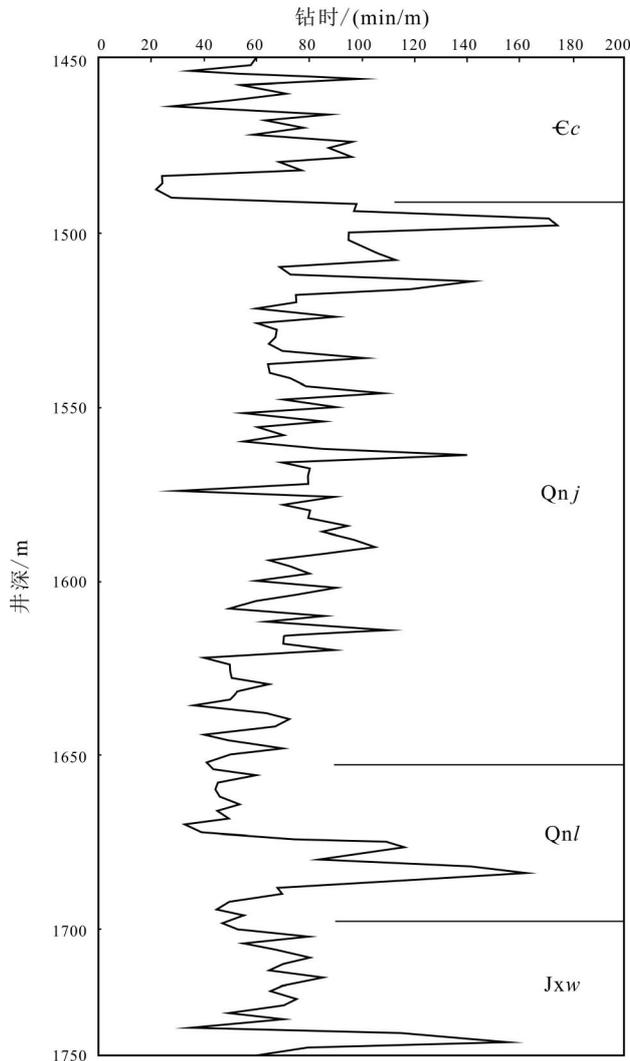


图3 天津空港经济区 SR37D 地热井青白口系钻时曲线图

Fig. 3 Drilling-time curves of Qingbaikou System of No. SR37D geothermal well

εc—寒武系昌平组 (Cambrian Changping fm.); Qnj—青白口系景儿峪组 (Qingbaikouan Jingeryu fm.); Qnl—青白口系龙山组 (Qingbaikouan Longshan fm.); Jxw—蓟县系雾迷山组 (Jixianian Wumishan fm.)

钻时较低,为 30~40 min/m;下部钻时较高,为 40~100 min/m. 反映地层上部为可钻性较差的页岩,中部为可钻性较好的海绿石砂岩,下部为可钻性较差的石英砂岩的岩石组合特征.

景儿峪组: 钻时曲线自上而下总体呈逐渐降低的特征. 上部钻时高,为 60~120 min/m,可钻性较差,是以泥岩为主的反映,向下渐变为泥灰岩;下部钻时低,为 30~80 min/m,可钻性较好,是泥灰岩、灰岩的反映,向下渐变至纯灰岩.

4 物探测井曲线特征

天津地区青白口系是由陆源碎屑岩至碳酸盐岩构成的一个沉积旋回,即从龙山组的砂砾岩开始至景儿峪组泥灰岩结束. 龙山早期的河流相、复三角洲相沉积石英砂岩、砂砾岩;龙山中期广泛发生海侵,海绿石砂岩发育;龙山晚期逐渐海退,为杂色页岩相沉积. 景儿峪期岩石为蛋青、灰、灰绿、粉红色,以微晶结构为主,泥质与微晶碳酸盐同时沉积,受持续海退的影响,泥质含量逐渐升高.

物探测井是定性划分地层、确定岩性及识别断层、裂缝、溶洞的技术手段,也是定量评价储层参数的重要依据. 依据施工组织设计,天津地热井钻探施工后都要进行物探测井,常规的测井项目主要有标准测井和综合测井以及井斜测井、连续测温、井径测井等,其中标准测井包括 2.5 m 底部梯度视电阻率、0.4 m 电位电阻率和自然电位,综合测井包括补偿声波、自然伽马和双感应八侧向或双侧向. 钻井实践中,在岩屑录井、钻时录井等工作的基础上,利用视电阻率曲线和自然伽马曲线可以很好地识别岩性. 通过岩性组合特征,可以准确划分出青白口系各组地层. 天津平原区钻井地层主要为沉积岩,自然伽马曲线通常能更好地反映地层岩性特征,而视电阻率曲线容易受含水层的影响^[9],有时不能很好地反映岩性特征,导致划分地层比较困难. 因此,将视电阻率曲线与自然伽马曲线结合,进行综合分析判断,可以更准确地识别岩性、划分地层. 总体来说,天津地区青白口系测井曲线特征明显,尤其是“爬坡”状视电阻率曲线和“下坡”状自然伽马曲线可以作为景儿峪组的标志特征 (见图 4). 青白口系各组电性特征如下.

4.1 龙山组

龙山组处于沉积旋回下部,岩性以碎屑岩为主. 电阻率曲线总体呈上部低值、中部和下部为中高值的特征,曲线变化幅度较大,上部阻值较低,为 20~40 Ωm,中、下部阻值较高,约 300~450 Ωm,反映上部为低阻页岩,中部为中高阻海绿石砂岩,下部为中高阻石英砂岩的特征;自然伽马曲线总体呈上部为高值、中部为中高值和下部为中值的特征,曲线幅值变化较大,上部放射性高,约 150 API,中部放射性较高,为 90~120 API,下部放射性中等,为 70~80 API,反映地层上部为高放射性页岩,中部为中高放射性海绿石砂岩,下部为

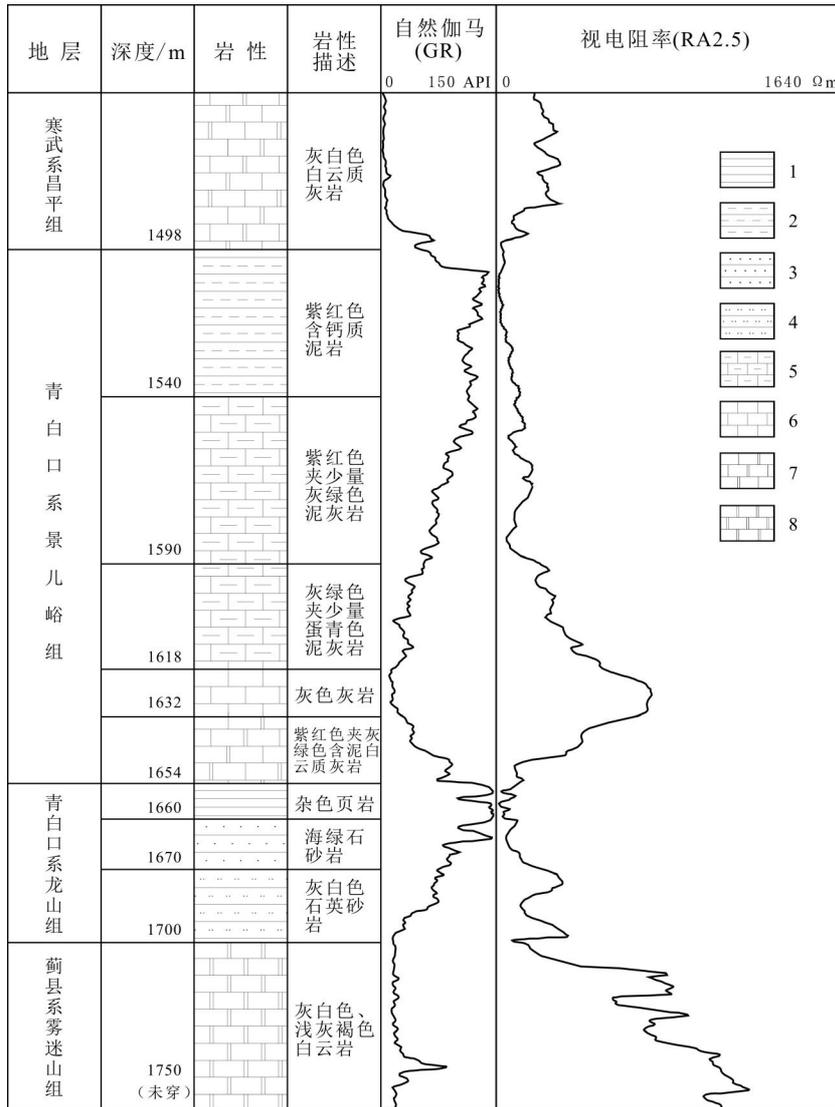


图 4 天津空港经济区 SR37D 地热井青白口系测井综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive logging column of Qingbaikou System of No. SR37D geothermal well

1—页岩(shale); 2—泥岩(mudstone); 3—砂岩(sandstone); 4—石英砂岩(quartz sandstone); 5—泥灰岩(marlite); 6—灰岩(limestone); 7—白云质灰岩(dolomite limestone); 8—白云岩(dolomite)

中等放射性长石石英砂岩的岩石组合特征. 由于龙山组上部伊利石页岩发育, 岩石中钾含量高, 所以其放射性一般高于景儿峪组顶部的泥岩.

4.2 景儿峪组

景儿峪组处于沉积旋回上部, 岩性以碳酸盐岩为主. 电阻率曲线总体呈上部低值、下部高值的特征, 自上而下呈缓慢“爬坡”状, 曲线变化幅度较大, 上部阻值较低, 约 20 Ωm, 下部阻值较高, 达 800 Ωm, 反映上部为低阻泥岩, 中下部为中高阻泥灰岩, 底部高阻灰岩的岩性组合特征. 自然伽马曲线总体呈上部高值、下部

低值的特征, 自上而下呈缓慢“下坡”状, 曲线幅值变化较大, 上部放射性较高, 为 100~120 API, 下部放射性较低, 为 10~20 API, 反映上部为高放射性泥岩, 中下部为中低放射性泥灰岩, 底部为低放射性灰岩的岩性组合特征.

5 讨论

岩屑录井可直接观察岩性特征, 钻时录井和物探测井可定性判断岩性. 因此, 研究岩性与钻时、岩性与物探测井(电性)的对应关系, 可以更加准确地识别岩

性、划分地层。

当钻进参数不变时, 钻时的变化反映了岩性的差别。钻井实践表明, 天津地区疏松含水砂岩的钻时最快, 普通砂岩较快, 灰岩、白云岩较慢, 泥岩类最慢。应该指出的是, 上述特征在牙轮钻头的使用中表现突出, 而对 PDC 钻头反映并不明显。另外, 同一类岩石, 随其埋藏深度和胶结程度等不同, 其钻时特征也各不相同。

通过长期生产实践积累, 利用测井曲线特征可以定性划分岩性。对于砂泥岩地层剖面, 通常采用普通视电阻率和自然电位曲线识别岩性。钻井实践表明, 天津地区砂岩具有电阻率值中等、自然电位明显异常的特征, 泥岩具有电阻率值低、自然电位平直的特征。对于碳酸盐岩地层剖面, 一般采用普通视电阻率和自然伽马曲线解释岩性。钻井实践表明, 天津地区灰岩、白云岩具有电阻值高、自然伽马值低的特征, 泥岩具有电阻值低、自然伽马值高的特征。需要指出的是, 不同的岩石具有不同的测井特征, 相同的测井特征也不一定是同一类岩石。

在岩屑录井的条件下, 要准确地判断、划分地层, 首先要搞清楚区域地层标志特征、岩性组合特征和构造条件等, 对已钻地层作对比分析和未钻地层作地质预告; 然后在岩屑录井的基础上, 结合钻时曲线和物探测井曲线, 准确识别岩性、校正井深和划分地层界线, 尽可能地还原真实地层剖面。

6 结语

钻井岩屑的细小且混杂, 给地层的准确判断和划

分带来了非常大的困难。钻井地层划分方法主要是通过研究岩屑录井特征、钻时录井特征、物探测井曲线特征的对应关系, 更加准确地识别岩性, 进而准确地划分地层。本文在分析区域地层特征的基础上, 利用岩屑录井、钻时录井和物探测井资料综合对比识别岩性, 可以准确划分青白口系各组分层界线, 并总结了天津多眼地热井青白口系的地层划分。其岩石组合、钻时曲线以及物探测井曲线特征明显, 具有较强的区域对比性。钻井地层划分方法适用于分层界线和标志层特征比较明显的地层, 具有经济、高效等优势, 对天津及周边类似地区的钻井地层划分具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 刘广志, 汤凤林. 特种钻探工艺学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 48-53.
- [2] 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: 38-46.
- [3] 天津市地质矿产局. 天津市岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 39-44.
- [4] 牛绍武, 辛后田. 青白口系的区域对比与金州系的建立[J]. 地质调查与研究, 2013, 36(1): 1-9.
- [5] GB/T 11615-2010, 地热资源勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 8-9.
- [6] 柯柏林. 水井钻探岩屑地质编录方法探讨[J]. 城市地质, 2007, 2(4): 33-36.
- [7] 崔树清, 王福生, 董双波. 钻井地质[M]. 天津: 天津大学出版社, 2008: 21-28.
- [8] 纪友亮. 油气田地下地质学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007: 23-24.
- [9] 王惠廉. 综合地球物理测井[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 92-107.