

·油气地质·

## 封盖油气的盖壳

张志松,宋新民,刘卓  
(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**油气的封盖有2种类型:一种是众所周知的盖层,另一种是笔者所论证的盖壳。盖壳是某一级次的地层层序界面。地层层序界面是沉积的间断。接受新的沉积之前,在出露或接近地表的沉积间断面上发生表生成岩作用,形成钙结壳和渗流充填物等,堵塞了表层的孔隙和喉道,降低了表层的渗透率。大港油区港225井馆陶组和明化镇组之间地层层序界面上的含钙粉砂岩的渗透率为0.63 mD,但其上、下储层的渗透率为数百、数千毫达西。中国港东、辽河油田的主力油藏以及加拿大Elmworth气田、巴基斯坦Naimat气田的主力气藏的顶界均为地层层序界面。在这些油藏、气藏顶界之上覆盖的并不是泥、页岩盖层,而是渗透性砂岩、水层。看似奇特的油水倒置、气水倒置,实际上是上部的水层与下部的油(气)层被不渗透的地层层序界面所分隔。将水层与油(气)层分隔开的地层层序界面即为封盖油气的盖壳,其厚度很薄,但对于封盖油气具有重大意义,中外多个大型油(气)藏均为盖壳封盖。

**关键词:**盖层 盖壳 气水倒置 油水倒置 表生成岩作用 地层层序界面

中图分类号:TE112.25

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)06-0001-06

## Cap shell sealing the oil and gas

Zhang Zhisong, Song Xinmin, Liu Zhuo

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

**Abstract:** There are two types of layers sealing the oil and gas. One is generally known as the caprock, and the other is the cap shell discussed in this paper. The cap shell is an interface of a certain level of stratigraphic sequence. It is known that the sequence boundary is a sedimentary discontinuity. Before new deposits, rock was lithified when the discontinuous sedimentary surface was exposed or near the surface. This resulted in calcium shells or the formation of seepage barriers, which blocked the pores and throat of the surface stratum and made the permeability reduced. For example, the permeability of the calcareous siltstone at the sequence interface between the Minghuazhen Formation and the Guantao Formation of Well Gang-225 in Dagang Oilfield is 0.63 mD, but the permeability of the reservoirs above and below the interface are hundreds or thousands millidarcy. The top boundaries of many reservoirs, such as the main oil-reservoirs of Gangdong and Liaohe Oilfields in China, and the main gas-reservoirs of Elmorth Gasfield in Canada and Naimat Gasfield in Pakistan, are all stratigraphic sequence interfaces. The rock covering on the top of the oil reservoir or gas reservoir is not a regular cap rock such as mudstone or shale, but a layer of permeable sandstone that is interpreted as an aquifer. Oil-water inversion or gas-water inversion seems like a strange phenomenon. In fact, the upper layer of water and the lower layer of oil (gas) are separated by the impermeable sequence interface, named as cap shell, sealing the oil and gas in reservoirs. Although the thickness of a cap shell is thin, it has great significance in sealing oil and gas. A number of domestic and foreign large oil (gas) reservoirs are sealed by the cap shell.

**Key words:** cap rock; cap shell; gas-water inversion; oil-water inversion; epidiagenesis; stratigraphic sequence interface

笔者在分析大港、辽河、大庆和塔里木等油区主要油藏顶界封堵条件的过程中,并未发现泥、页

岩和膏盐岩等通常意义上的盖层。究竟是什么在封盖油气? 请看以下试油测试、地层对比以及岩心

收稿日期:2017-07-11。

作者简介:张志松(1935—),男,浙江杭州人,教授级高级工程师,从事测井地质学等方面的研究。联系电话:(010)83593921, E-mail: zhangzhisong\_riped@126.com。

分析3个方面的实际资料。

### 1 试油测试证实的油水倒置、气水倒置现象

港东油田过港1-24-1—港5-34—港1-23井的油层对比图(图1)列出3口井的试油测试结果以及现在的测井解释结论。港5-34井射孔段的水层,先前的测井解释结论为气层;两侧的港1-24-1和港1-23井的水层,先前的测井解释结论为油层。港5-34井1985年投产时只射开下部1524.4~1526.4 m、厚度为2.0 m的油层,获产油量为8.42 t/d,不产水;1997年补射上部1520.6~1524.4 m、厚度为3.8 m先前测井解释的气层,产水量为53.9 m<sup>3</sup>/d,产油量为2.7 t/d。这是一个证据确凿的油水倒置案例。港1-24-1井试油获产油量为20.45 t/d,产水量为159.69 m<sup>3</sup>/d;港1-23井试油获产油量为13.88~5.83 t/d,产水量为8.64~54.6 m<sup>3</sup>/d,2口井均为油水同出。此外,港205井在相同地层层序界面上的上层下水层,进一步说明这种油水倒置现象是原始地质状态而非开采所致的动态过程。

港1-24-1、港5-34和港1-23井测井曲线特征及含水饱和度计算结果(图1)显示,地层层序界面(图1中的红色虚线)之上的砂岩均表现为水层特征。但由于观念的限制,当时未解释为水层。其实

只要正视资料,尊重事实,不回避矛盾,油水倒置、气水倒置现象并不罕见。

巴基斯坦 Naimat 气田 MDT 测试结果也证实存在气水倒置现象(图2)。构造高部位 Naimat Basal-2 井射孔后获少量的气、大量的水,产气量为 8 495 m<sup>3</sup>/d,产水量为 174.9 m<sup>3</sup>/d。图2中的红色柱状标注是射孔井段,也是先前认为的气层。对 Naimat Basal-2 井 3 513.12 m 处进行 MDT 测试,227 min 获得 0.055 m<sup>3</sup>的纯水<sup>[1]</sup>。因此,该井射孔段中的低电阻率层段(3 512.21 ~ 3 516.48 m)应为水层(图2中蓝色柱状标注),其下(3 516.48 m 以下)为气层(图2中黄色柱状标注),具有明显的气水倒置特征。

塔里木盆地北部奥陶系灰岩油藏顶界之上的碎屑岩大部分为水层。有些区块对奥陶系采取裸眼完井,其中一些探井和生产井的套管未封住灰岩油藏顶界之上的水层,试油出水。塔里木油田北部哈拉哈塘区块哈802井套管封住了灰岩油藏顶界之上的水层,试油获产油量为50.71 m<sup>3</sup>/d,产气量为2360 m<sup>3</sup>/d,不产水。哈801井套管未封住灰岩油藏顶界之上的水层,试油获累积产液量为66 m<sup>3</sup>,净产油量为11.15 m<sup>3</sup>,试油结论为含水层。轮南区块轮古7-2井套管封住了灰岩油藏顶界之上的水层,试油获纯油;轮古7-3井套管未封住灰岩油藏顶界之上的水层,试油仅见油花(由于奥陶系为裸眼完井,因此灰岩与碎屑岩交界处的测井资料往往缺

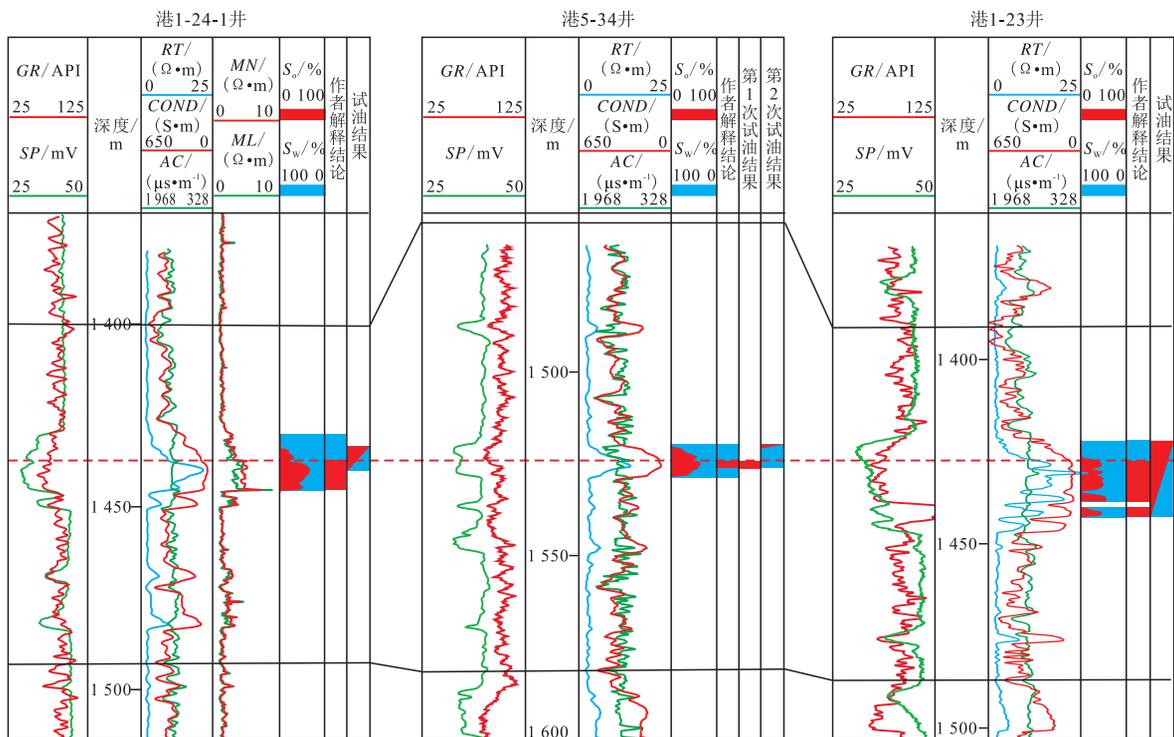


图1 港东油田试油结果证实的油水倒置现象

Fig.1 Oil-water inversion proved by well testing in Gangdong Oilfield

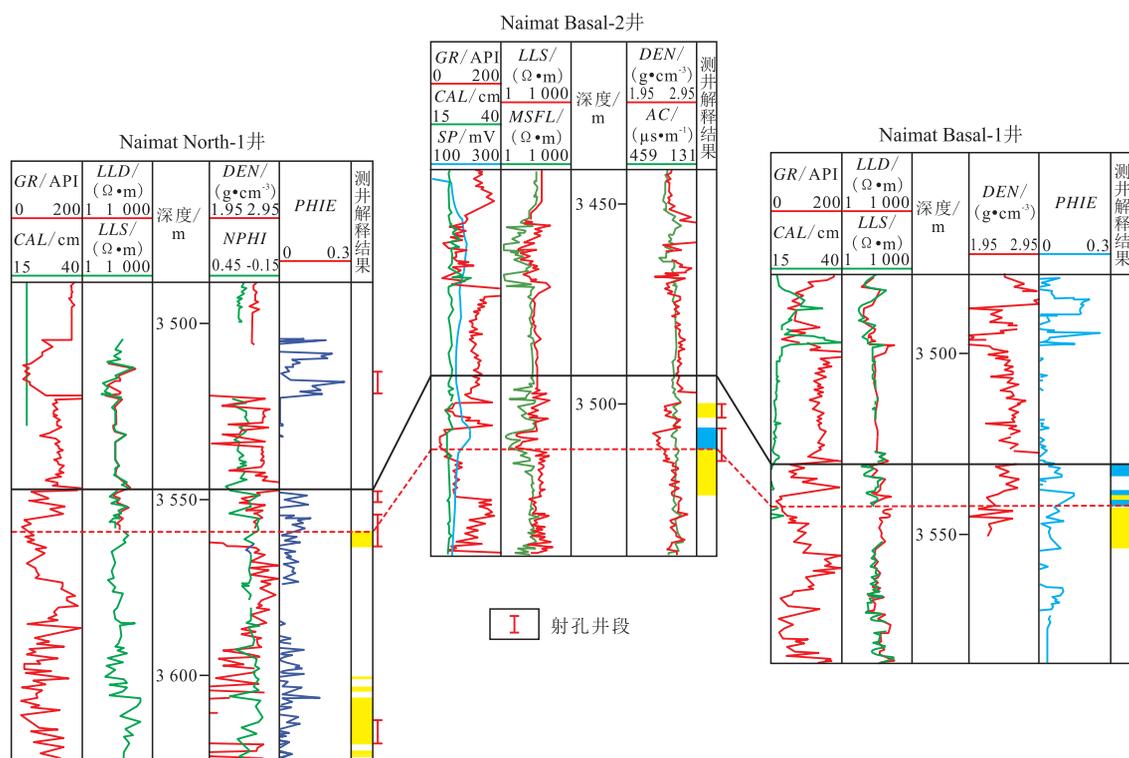


图2 巴基斯坦Naimat气田MDT测试结果证实的气水倒置现象

Fig.2 Gas-water inversion proved by MDT testing results in Naimat Gasfield, Pakistan

失)。有些区块对奥陶系采取套管完井,封住了灰岩油藏顶界之上的水层,大多试油未出水。但轮南1井奥陶系下套管完井,射孔顶界为5 038 m,而奥陶系顶界为5 039 m,射孔井段包括上覆三叠系底部的碎屑岩;该井于1990年2月17日投产,油水同出,仅生产18 d,于1990年3月7日停产,推迟了塔里木盆地北部奥陶系大型油田的发现达十年之久。

与塔里木盆地北部奥陶系油藏类似,辽河油区欢喜岭油田的东营组水层直接覆盖在于楼组油层之上。例如欢喜岭油田锦90井测井曲线特征显示东营组(Ed)水层与于楼组(Ey)油层具有明显区别(图3),但先前这段水层一直未测井解释。该段测

井解释的空缺,连同其上覆的厚层泥岩容易造成盖层的假象。

## 2 气水倒置、油水倒置及含水饱和度突变均发生于地层层序界面上下

2003年笔者针对深盆地地质理论提出了疑问:“在气水倒置现象中有没有考虑地层层序的作用?”<sup>[2]</sup>通过测井资料的分析 and 地层划分解决了该疑问:加拿大Elmworth气田(深盆地地质理论的发源地)气水倒置的分界是Cadomin阶与Nikanassin阶的地层层序界面<sup>[3]</sup>,这是一个重要的地层分界(图4)。此外,巴基斯坦Naimat气田气水倒置的分界也是地层层序界面(图2中的红色虚线)。

港东油田港205井油基泥浆取心样品的含水饱和度资料反映出饱和油(气)水的特性(图5)。其主力油藏的含水饱和度具有上低下高的分布趋势,在主力油藏顶界含水饱和度发生突变,油藏底界为其下部另一个油藏的顶界,其含水饱和度亦发生突变。港205井及其邻井的测井对比结果(图6)表明,其主力油藏顶界为沉积的间断——地层层序界面,而不是地层断缺,该界面也是港1-24-1、港5-34和港1-23井主力油藏的顶界(图1中的红色虚线)。港205井主力油藏含水饱和度的突变及其相应的油水

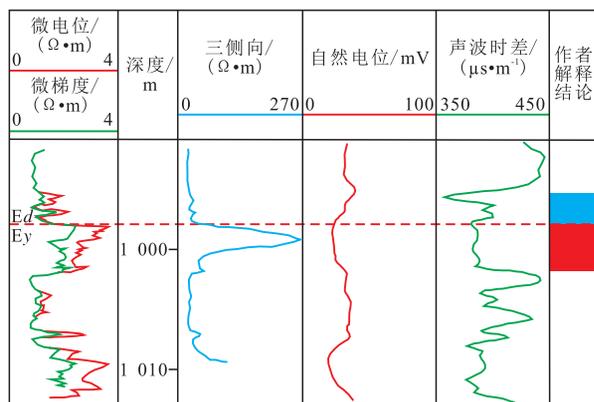


图3 辽河油区欢喜岭油田锦90井综合测井图

Fig.3 Synthetical log histogram of Well Jin90 in Huanxing Oilfield of Liaohe Oil Block

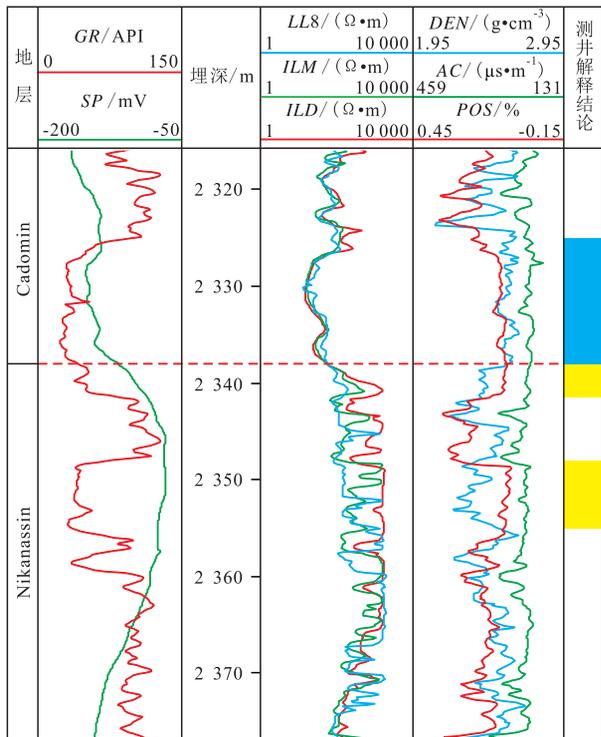


图4 加拿大 Elsworth 气田 11-15-70-11 井综合测井图  
Fig.4 Synthetical log histogram of Well 11-15-70-11 in Canada Elsworth Gasfield

倒置(图6),以及港1-24-1、港5-34和港1-23井油水倒置的分界(图1)均发生于地层层序界面的上下。

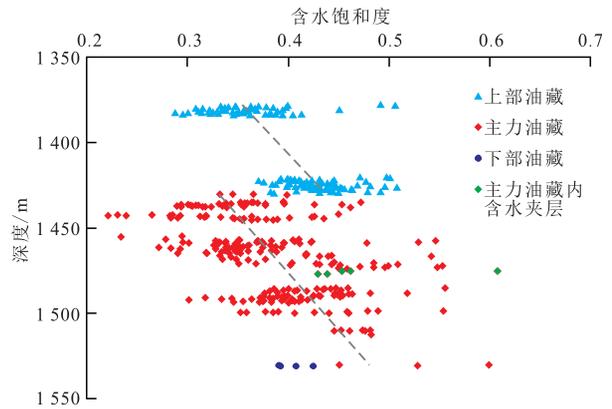


图5 港东油田主力油藏含水饱和度特征  
Fig.5 Characteristics of water saturation in the main pays of Gangdong Oilfield

苏里格气田苏16井盒8段常规气藏和山1段非常规气藏的含水饱和度突变也发生于地层层序界面上下(表1)。

任丘油田前震旦系及其上覆奥陶系均发育灰岩油层,一直以来都认为二者均为同一油藏,油水界面统一为3510 m。1978年11月,笔者根据油层压力梯度判定并证实二者并非同一油藏,将奥陶系灰岩油藏的油水界面下移至3900 m处,含油面积扩大了约为9 km<sup>2</sup>[4]。这是促使笔者认识到地层层序界面具有分隔性的第1个案例[5]。

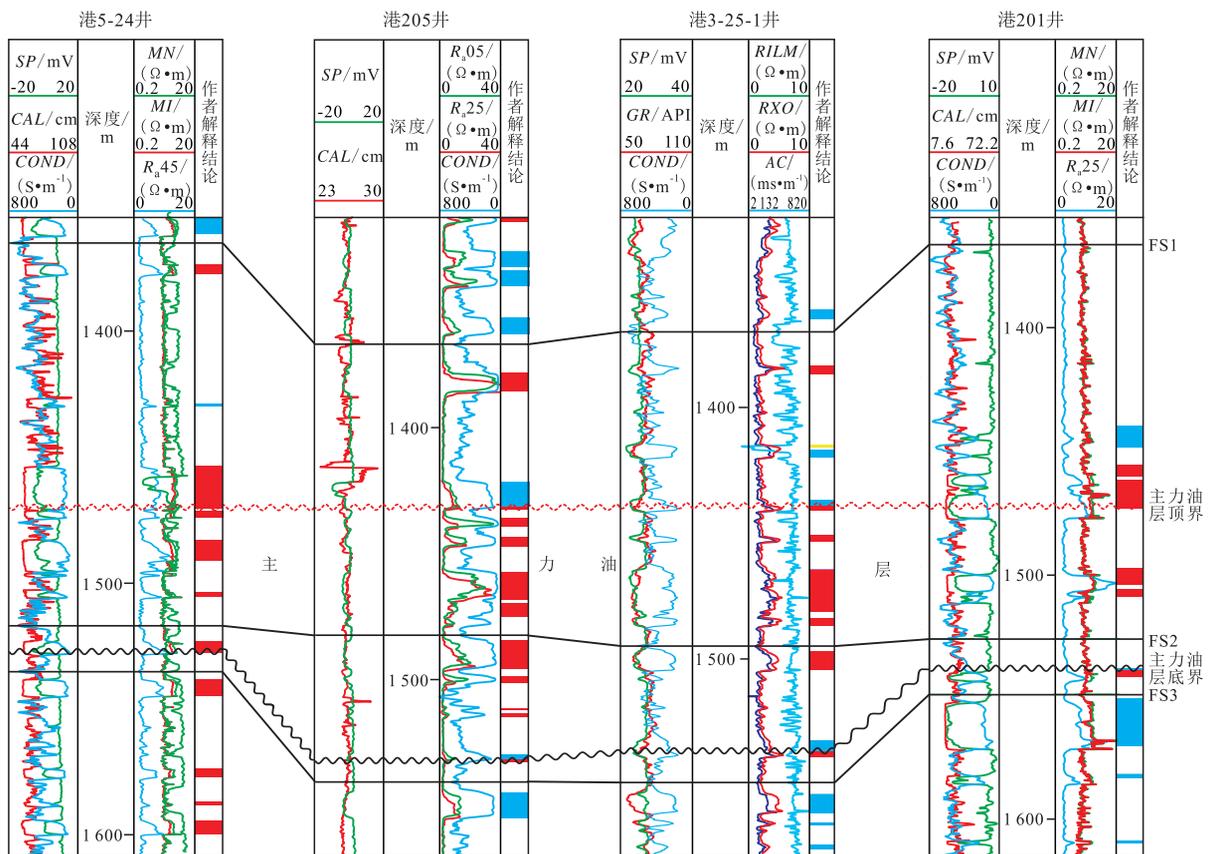


图6 港东油田港205井及其邻井的测井对比结果

Fig.6 Comparison of well logging results of Well Gang205 and wells nearby in Gangdong Oilfield

表1 苏里格气田苏16井地层层序界面上下的岩心物性参数中值分析结果

Table1 Analysis results about the core physical parameters of layers above and below the stratigraphic sequence interface of Well Su16 in Sulige Gasfield

层位	埋深 /m	岩心样品数/个	岩心样品数/个	孔隙度中值/%	渗透率中值/mD	含水饱和度中值/%
盒8段	3 341.0~3 349.4	1—42	42	11.4	0.39	64.3
山1段	3 349.6~3 359.4	43—71	29	9.0	0.36	46.0

注:长庆油区研究成果证实,低渗透砂岩的普通泥浆大直径岩心含水饱和度和接近于原始含水饱和度。

地层层序界面将水层与气层、水层与油层,以及不同含油(气)程度的油(气)层分隔于不同的层序地层之中,在层序地层框架内并不存在所谓的油水倒置、气水倒置。

与油水倒置、气水倒置现象对应的,被地层层序界面分隔的上油下水是假油水界面,真正的油水界面必须在同一层序地层之内。2006年,大港油区采油一厂根据此观点确定港225井区馆陶组与明化镇组地层层序界面上下的真、假油水界面,半年内原油产量增加13 979 t<sup>[6]</sup>。克拉玛依油田八区85095井区目前的油水界面正好是乌尔禾油层底部的地层层序界面(自然伽马能谱测井的高铀低钾突变处),真正的油水界面有望下移。

### 3 地层层序界面上的岩心资料

岩心资料分析发现,港东油田明化镇组主力油层顶部地层层序界面上发育厚度为0.3 m的钙质砂岩和泥砾岩(港205井1 431.4~1 431.7 m井段)(图6)。三塘湖油田马208井三叠系与侏罗系之间地层层序界面上发育厚度为3.0 m的钙质砂岩,其方解石含量达37%<sup>[7]</sup>。港东油田港225井馆陶组与明化镇组地层层序界面上发育厚度为0.1 m的含钙粉砂岩,碳酸盐含量为11%,渗透率为0.63 mD,但其上、下储层的渗透率均为数百至数千毫达西(图7)<sup>[8]</sup>。苏里格气田苏16井山1段与盒8段地层层序界面上发育厚度为0.46 m的致密砂岩,渗透率为0.053 mD,其上、下砂岩的平均渗透率分别为0.62和0.70 mD<sup>[2]</sup>。法国测井地质学家Serra发现砂岩结构的2个地层层序界面在中子和密度测井曲线上均表现为显著的低孔、致密特征<sup>[9]</sup>。这些地层层序界面是厚度很薄(0.1~3.0 m)的以钙质胶结为主的致密层,其渗透率极低,甚至不具有相对渗透性。这些厚度为0.1 m(可能还有更薄)的致密层已超出每米

8个点的测井分辨率,根据测井资料难以对其进行识别,只能根据岩心资料随机发现,这也是针对盖壳的研究进展缓慢的原因。

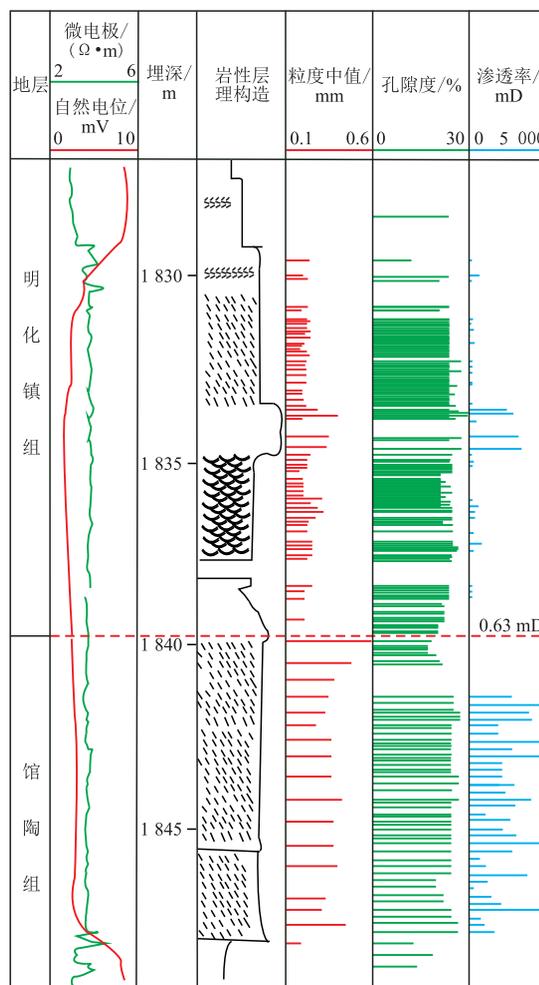


图7 港东油田港225井馆陶组与明化镇组地层层序界面的特低渗透特征

Fig.7 Features of the extremely low-permeability stratigraphic sequence interface between the Nm Formation and Ng Formation of Well Gang225 in Gangdong Oilfield

### 4 地层学的地层表皮与石油地质学的盖壳

地层层序界面是沉积的间断。沉积间断面之下的沉积物先后经历风化溶蚀作用和致密固结作用2种类型的表生成岩作用。地层层序界面的低渗透性是由于致密固结作用造成的,包括碳酸盐化、褐铁矿化、硬石膏的石膏化以及渗流充填物的充填,导致表层孔隙和喉道的堵塞,渗透率降低<sup>[10]</sup>。

不同级次的地层层序界面具有不同程度的表生成岩作用。某一级次的地层层序界面最后形成非渗透性的薄壳状的地层表面,这种薄壳状的地层

表面在地层学上可以称之为地层的表皮,在石油地质学上可以称之为盖壳。盖壳对下封盖,对上隔挡,全程保护油气的运移、聚集直至成藏。

正确划分地层层序界面是识别盖壳的关键。在图1—图7中,图4的地层层序界面(图中的红色虚线)是Elmworth气田原来划定的,图1,2,3,6和7中的地层层序界面(图中的红色虚线)均经过作者的修正。层序地层学从全球海平面的变化中发现了比传统地层学多得多的不整合面——地层层序界面<sup>[11]</sup>。港东油田的主力油藏是通过明化镇组新确定的2个地层层序界面之后才明确其整体规模(图6)。在对中国渤海湾盆地馆陶组与明化镇组地层界线的划分过程中,将传统的岩性界面(砂岩顶界)下移至低位沉积旋回的转折处,从而发现了隐蔽的厚度为0.1 m的盖壳(图7)。巴基斯坦Naimat气田的地层层序界面由图2中黑色线条处修正为红色虚线处,将气藏封盖的观念由盖层转变为盖壳,解决了长久困惑的疑问。

盖壳与盖层在层序地层中的位置如图8所示。盖层位于高位沉积旋回的中心,盖壳位于低位沉积旋回的转换面。依据图8的模式分析大庆长垣主力油藏,其葡I组的封盖类型应由盖层修正为盖壳,油水界面下移117.6 m;例如大庆长垣杏树岗油田面积之外的杏72井,其葡I组5.3 m的水层应修正为油层,建议应重新评价大庆长垣。

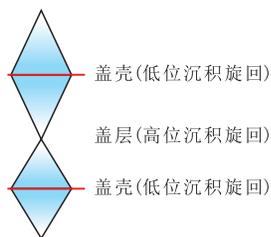


图8 油气封盖的2种类型

Fig.8 Two types of layer sealing the oil and gas

## 5 结论

中外多个油(气)田存在油水倒置、气水倒置现象。其实际为上部的含水层与下部的油(气)层被非渗透的地层层序界面所分隔,在层序地层的框架内并不存在所谓的油水倒置、气水倒置。盖壳为非渗透的薄壳状的地层表面。盖壳对下封盖,对上隔挡,全程保护油气运移聚集直至成藏。盖壳的厚度很薄,但其对封盖油气的作用大于盖层,中外多个油(气)田的主要油(气)藏都是由盖壳封盖的。盖

壳的发现有助于对油(气)藏上有顶、下有底的完整性认识,对于增油挖潜具有现实意义。

### 参考文献:

- [1] Final well report Naimat Basal-2[R].B P Pakistan Exploration & Production,2010.
- [2] 张志松.怎样认识苏里格大气田[J].石油科技论坛,2003,22(104):37-44.  
Zhang Zhisong.How to understand the Sulige giant gas field[J].Oil Forum,2003,22(104):37-44.
- [3] John A Masters.Elmworth-Case study of a deep basin gas field[R].AAPG Memoir38,1984.
- [4] 华北石油会战指挥所.冀中地区油气资源预测及勘探方向[R].华北石油会战指挥所,1979.  
North China Petroleum Battle Command Post.Oil and gas resources prediction and exploration direction in Central Hebei [R].North China Petroleum Battle Command Post,1979.
- [5] 张志松.早期识别油(气)藏规模的若干技术[J].石油勘探与开发,1990,17(5):43-51,63.  
Zhang Zhisong.Some technique used in early identification of oil (gas) reservoirs [J].Petroleum Exploration and Development,1990,17(5):43-51,63.
- [6] 刘文岭.复杂断块油藏井间储层及剩余油富集规律研究[R].北京:中国石油勘探开发研究院,2007.  
Liu Wenling.Study on interwell reservoir and remaining oil enrichment rule in complex fault block oil reservoir [R].Beijing: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development,2007.
- [7] 刘卓.三塘湖油田西峡沟区块西山窑组油藏精细描述研究[R].北京:中国石油勘探开发研究院,2008.  
Liu Zhuo.Fine reservoir description of Xishanyao Formation, Xixiagou block, Santanghu Oilfield [R].Beijing: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development,2008.
- [8] 裘亦楠,许仕策.我国河道砂体储层沉积特征和非均质模式[R].北京:中国石油勘探开发研究院,1984.  
Qiu Yinan, Xu Shice.Sedimentary characteristics and heterogeneity model of channel sandbody reservoir in China [R].Beijing: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development,1984.
- [9] Oberto Serra, Lorenzo Serra.Well logging and geology [M].Dallas: Editions Technip,2004.
- [10] 应凤祥.中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M].北京:石油工业出版社,2004.  
Ying Fengxiang.Clastic reservoir diagenesis and diagenetic numerical simulation in Chinese oil and gas basin [M].Beijing: Petroleum Industry Press,2004.
- [11] 张志松.我国陆相找油的两个难点[J].石油科技论坛,2001,20(94):35-40.  
Zhang Zhisong.Two difficulties of continental oil exploration in China [J].Oil Forum,2001,20(94):35-40.

编辑 邹澍滢