

# 黄骅坳陷孔南地区膏泥岩层段岩性油藏成藏特点

许恩爱,王庆魁,张家良

(中国石油大港油田公司 第三采油厂,河北 沧州 061723)

**摘要:**从黄骅坳陷孔南地区孔一段膏泥岩层的地质特征出发,基于有机碳、原油物性、饱和烃色谱质谱、储层物性、偏光薄片等地化及储层实验测试结果,系统分析了膏泥岩对油气成藏的重要意义。研究表明,枣0油组膏盐岩的存在既可以促使泥岩早期生烃,提供新的油气来源,又能在盐间形成异常压力,改善砂岩储层物性,同时,膏泥岩作为区域性盖层,有利于油气在砂岩薄夹层的保存。枣0油组油气成藏特征主要表现为:多源供烃、断层侧向封堵、砂岩上倾尖灭,形成构造背景下的岩性油气藏。

**关键词:**黄骅坳陷;孔南地区;膏泥岩;盐间油气藏

中图分类号: TE122

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)04-0037-07

## Characteristics of Lithological Reservoirs in Gypsiferous Mudstone Formation in Kongnan Area, Huanghua Depression

XU Enai, WANG Qingkui, ZHANG Jialiang

(No. 3 Oil Production Plant, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Cangzhou, Hebei 061723, China)

**Abstract:** Based on the geological characteristics of gypsum mudstone of the first member of Kongnan formation in Kongnan area, and the geo-chemical and reservoir experimental results such as TOC, crude oil properties, GC-MS, reservoir physical property, and polarizing thin section, this paper made a systematic analysis of gypsum mudstone's great significance to hydrocarbon accumulation. The results show that, the presence of gypsum mudstone of Zao 0 oil formation can induce its generation of hydrocarbon in the early stage, providing new oil source and producing abnormal inter-salt pressure, which can improve the sandstone reservoir properties. At the same time, as the regional caprock, gypsum mudstone is beneficial to the preservation of hydrocarbon in dissection thin sand stone. The hydrocarbon reservoir forming of Zao 0 oil formation is characterized by multiple sources, fault side blocking, and updip pinchout of sand stone, and the lithologic reservoir is formed at the background of regional gentle structure.

**Key words:** Huanghua depression; Kongnan area; gypsum mudstone; inter-salt oil and gas reservoir

膏盐岩由于具有易溶、易变、易流动、致密性、可塑性等特点,通常被认为是优质盖层。近年来,国内外专家学者对膏盐岩开展了大量研究工作,如 Evans<sup>[1]</sup>、宫秀梅<sup>[2]</sup>、赵振宇<sup>[3]</sup>、刘景东<sup>[4]</sup>等认为膏盐岩具有扩大生烃窗范围及改善储集物性的特点,且膏盐层形成的异常压力易于油气充注和保存;王东旭等<sup>[5]</sup>从膏盐岩对含油气系统的影响角度,论述了膏盐岩层对烃类生成、储层改造、封盖能力及运聚成藏等因素的影响。H. B. 维索次基<sup>[6]</sup>认为世界上约 35% 的天然气储量与含石膏层有关,统计发现膏盐岩发育的盆地中,有 46% 的油气位于盐下,41% 的油气位于盐上,13% 的油气产于盐间。南大西洋两岸深水盆地的盐上和盐下油气藏,是近年来发现的全球最重要油气藏之一。我国渤海湾、江汉、塔里木等盆地均发现以膏泥岩为主的盐湖相沉积,

收稿日期: 2015-08-02

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技攻关项目(2004JB-3-10)

作者简介: 许恩爱(1982—),女,天津人,工程师,主要从事油田滚动勘探与石油地质综合研究工作。

E-mail: xuenai456@163.com

并陆续发现许多重大的油气藏,但仅在渤海湾盆地渤南洼陷和东营凹陷等部分地区盐间见到油气显示<sup>[7-10]</sup>。

黄骅拗陷孔南地区油气勘探主要集中在孔一段枣 I~枣 V 油组,枣 0 油组膏泥岩层一直作为区域性盖层。王欣等<sup>[11]</sup>从层序地层学角度分析了孔南地区膏泥岩的沉积环境、分布模式及其对油气保存的重要作用。近期,M15-18 井在孔一段枣 0 油组膏泥岩层中首次获得工业油气流,日产油 3.25 t,日产气 3 万多方,随后单井普查,补开邻井膏泥岩中砂岩夹层均获较好产能。枣 0 油组膏泥岩油气的发现为老区油气勘探开辟了新的领域。本文首次针对孔南地区膏岩层段岩性油气开展研究工作,系统论述膏泥岩对岩性油气藏的影响,总结膏岩层段岩性油气成藏的规律,为油田下一步增储上产提供理论依据,也为其他地区膏岩层段岩性油气勘探提供借鉴。

## 1 区域地质概况

黄骅拗陷位于渤海湾盆地中部,为中生代盆地基础上发展起来的新生代断陷盆地,孔南地区为黄骅拗陷的第二大富油凹陷,勘探面积 4 700 km<sup>2</sup>。该区在区域构造上位于黄骅拗陷南部,其北以羊三木断层为界,南到东光潜山构造带,西部以沧东大断层为界,东部以徐黑断裂为界<sup>[12]</sup>。主要构造单元包括沧东、南皮两大凹陷和孔店、东光、灯明寺等 5 个二级构造带(图 1)。孔南地区发育古近系孔店组、沙河街组、东营组和新近系馆陶组、明化镇组,孔店组自下而上划分为孔三段、孔二段与孔一段,其中孔一段划分为 6 个油组,枣 0 油组位于最上部。

## 2 膏泥岩发育特征

### 2.1 膏泥岩分布特征

黄骅拗陷孔南地区膏泥岩形成于盐湖环境<sup>[13-14]</sup>,沧东凹陷和南皮凹陷发育孔一段枣 0 油组。枣 0 油组埋深约 2 700~3 100 m,最大厚度大于 150 m(图 2)。孔一段沉积时期,本区构造活动强烈,同沉积断裂发育,膏盐湖沉积中心及物源供给快速变化,导致膏岩、泥岩、砂岩频繁互层沉积。从平面分布来看,该区东部枣 0 油组岩性以灰色、灰白色膏盐岩为主,向西灰色、深灰色泥岩、薄层泥质粉砂岩、细砂岩逐渐增多。纵向上膏泥岩上部出现紫红色沉积层,表明盐湖水体变浅、水域不断缩小。

### 2.2 地震及测井特征

研究区膏泥岩段地震响应特征明显,利用本区已有探井声波曲线合成记录,插入岩性柱、地质分层等进行控制,并对子波进行反复精心选取,通过交互合成地震记录制作、自动扫描和交互微调对比,获取最佳子波进行最佳标定,从而获得膏岩段的顶、底界线。研究区枣 0 油组膏盐岩与上部沙三段泥岩形成

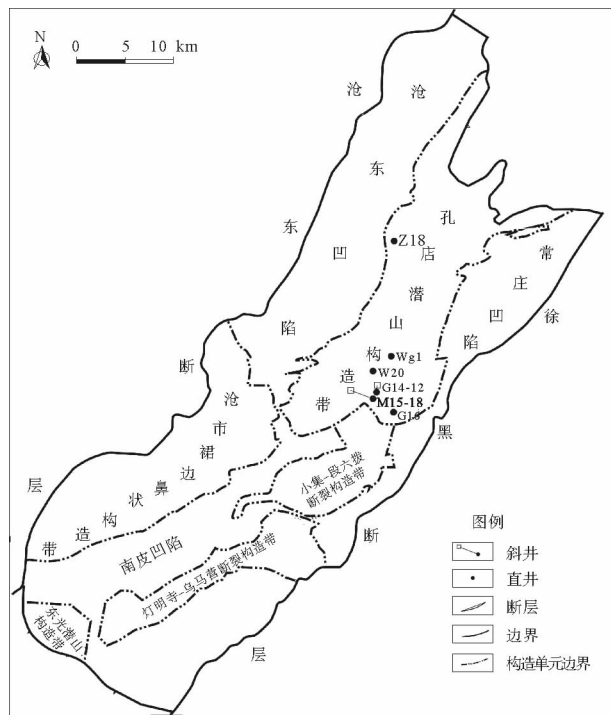


图 1 研究区位置及构造区划图

Fig. 1 Location and tectonics of the study area

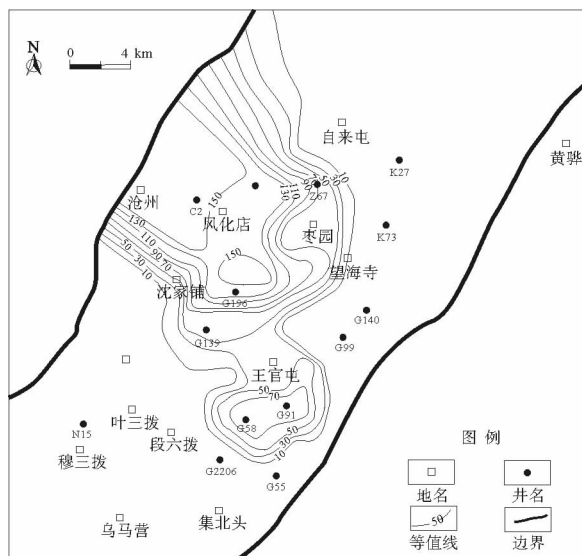


图 2 孔南地区枣 0 油组膏泥岩厚度等值线图

Fig. 2 The thickness isoline map of gypsum mudstone of Zao 0 oil formation, Kongnan area

强反射特征,地震反射主要表现为强振幅、中-强连续性、中强频反射(图 3)。

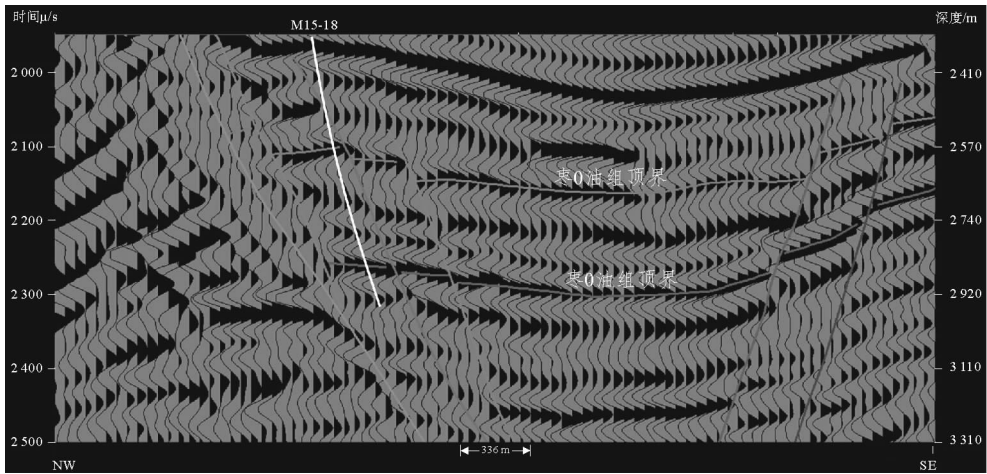
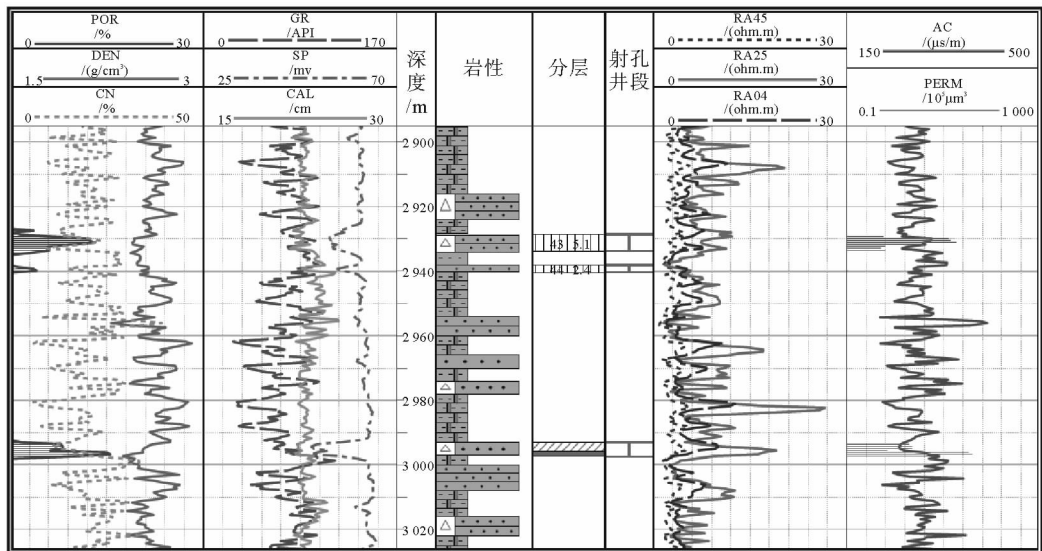


图 3 孔一段枣 0 油组膏泥岩层段地震反射特征

Fig. 3 The seismic response characteristics of gypsum mudstone of Zao 0 oil formation in the first member of Kongdian formation

枣 0 油组膏盐岩层段与砂泥岩段地层测井响应特征差异较大,容易识别。膏盐岩表现为高电阻、高电位和低伽玛值,其中,电阻率 RA25 一般在  $8.07 \Omega \cdot m$ ,最大值  $27.9 \Omega \cdot m$ ,且曲线呈刺刀状;自然电位和自然伽玛变化幅度较低,自然电位值一般  $62 mV$ ,伽玛值  $72 API$ ;密度测井值极低且较稳定,一般  $2.6 g/cm^3$ 。膏泥岩中砂岩夹层电阻 RA25 为  $7.5 \Omega \cdot m$ ;自然电位可出现负异常,一般为  $52 mV$ ;伽玛值  $55 \sim 93 API$ ;密度曲线变化并不明显,密度值一般在  $2.4 \sim 2.5 g/cm^3$ (图 4)。



图例



图 4 M15-18 井测井解释结果

Fig. 4 The logging interpretation results of M15-18 well

### 3 膏泥岩对盐间油气成藏条件的影响

#### 3.1 膏泥岩对生烃的影响

孔二段泥岩和石炭一二叠纪煤系地层是孔南地区主要烃源岩层系。从枣 0 油组的钻探、试采及实验结果来看,该层系油气同出,油源条件较为复杂。通过天然气碳同位素分析发现,M15-18 井天然气具有明显煤型气特征,该井原油密度  $0.7552 \text{ g/cm}^3$ ,  $50^\circ\text{C}$  时黏度为  $0.63 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,凝固点小于  $-30^\circ\text{C}$ ,含蜡量  $2.98\%$ ,表现为低密度、低黏度、低凝固点和低含蜡量,为典型的凝析油。其饱和烃全烃谱图主峰碳呈前峰型,主峰碳为  $n\text{C}9$ ,  $P_r/P_h=1.37$ ,Wg1 井石炭纪泥岩饱和主峰碳为  $n\text{C}17$ ,  $P_r/P_h=1.19$ ,与 Wg1 井石炭纪泥岩饱和烃全烃谱图具有相似特征。综合研究表明,M15-18 井枣 0 油组油气来源于上古生界煤系烃源岩。G14-12 井原油物性参数为:密度  $0.8848 \text{ g/cm}^3$ ,  $50^\circ\text{C}$  时黏度为  $41.95 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,凝固点为  $35^\circ\text{C}$ ,含蜡量  $25.95\%$ ,密度、黏度、凝固点和含蜡量均相对较高,主峰碳为  $n\text{C}23$ ,  $P_r/P_h=0.92$ ,饱和烃全烃谱图主峰碳高,呈单峰型正态分布。W20 井孔二段源岩全烃谱图主峰碳为  $n\text{C}23$ ,  $P_r/P_h=0.88$ ,两者具有相似的生物标志物特征(图 5)。

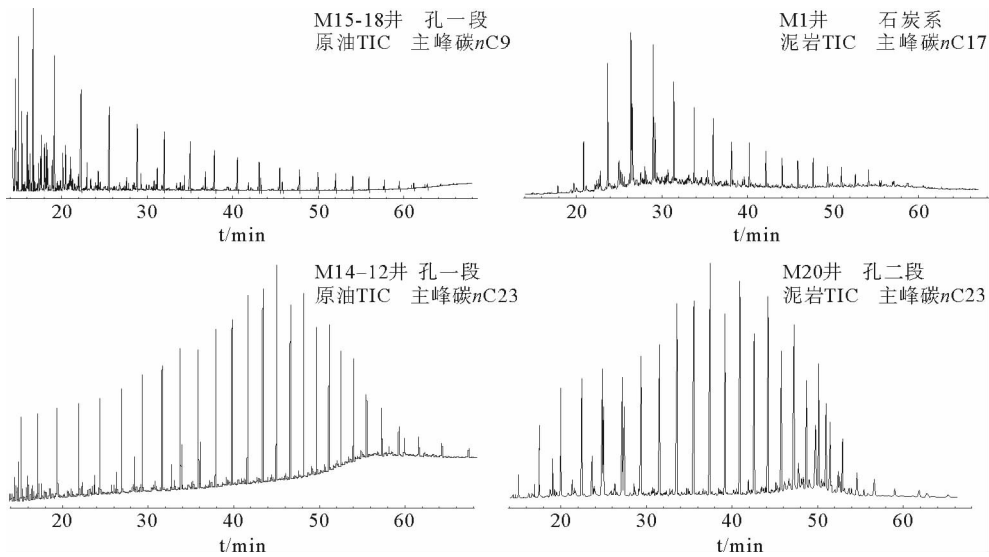


图 5 枣 0 油组原油与石炭系、孔二段泥岩全烃谱图对比

Fig. 5 The comparison of total hydrocarbon chromatography between oil of Zao 0 oil formation and mudstone of Carboniferous & the second member of Kongdian formation

此外,通过选取 Wg1 井、G16 井枣 0 油组中下部深灰色泥岩样品进行地球化学分析,枣 0 油组泥岩有机碳含量为  $0.1\% \sim 1.84\%$ ,平均有机碳含量为  $1.47\%$ ,表明枣 0 层间泥岩具有一定的生烃潜力。虽然枣 0 油组泥岩镜质体反射率为  $0.6\%$ ,处于低成熟阶段,但盐类矿物的存在可以使有机物质的热敏性增强而较早进入“生油门限”,特别是在浅埋深条件下,盐湖相烃源岩大量热解生成天然气<sup>[3,5]</sup>。因此,枣 0 油组内膏盐岩的存在可使泥岩早期生烃,这对膏泥岩层间油气成藏具有积极意义,进一步表明枣 0 油组具有混源油气的特征。

#### 3.2 膏泥岩对油气储集物性的影响

孔南地区膏泥岩储层类型有两种:膏泥岩夹层中的砂岩储层和膏岩层自身作为储层,其中,砂岩夹层为本区主要储层类型。如研究区 M15-18 井膏泥岩层夹的浅灰色细砂岩中射孔试油获得高产工业油气流,显示膏岩夹层中砂岩储层具有较好储集性。G14-12 井膏岩层见到明显的油气显示,表明膏岩层具有作为储层储集油气的潜力。

膏泥岩对夹层中砂岩储层的影响主要表现在:膏岩向硬石膏转化时脱水,形成异常压力,对压实作用具有一定抑制作用,使得夹层中砂岩储层压实作用减弱,能够较好地保存原生孔隙<sup>[15]</sup>。其次,膏岩热导率较

高,使得下部地层承受地层压力较小,压实程度较小,原生孔隙得到较好保存。同时,膏盐转化形成的水富含有机酸,具有溶解作用,可溶解储层中原生孔隙或被交代的孔隙空间,若被后期孔隙水溶解,会形成板状及条状溶模孔隙,有助于储集层储集性能的改善。孔南地区膏泥岩层间砂岩储层单层厚度薄,但广泛发育,且平面上连续性较好。测井方法计算砂岩平均孔隙度为 11.6%,平均渗透率为  $12.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

膏岩层在一定条件下可作为油气储层,膏泥岩易形成层间缝,石膏脱水转化为硬石膏时可形成晶间孔,若无其他矿物胶结沉淀,这类晶间孔可作为油气储集空间。研究区膏泥岩处于早成岩 A 期,为粒状结构,膏岩发育收缩缝、粒间溶孔、晶间孔(图 6),面孔率 6%~18%。录井过程中在膏岩段见到油迹或油斑等显示,均表明膏岩具有一定的储集能力。

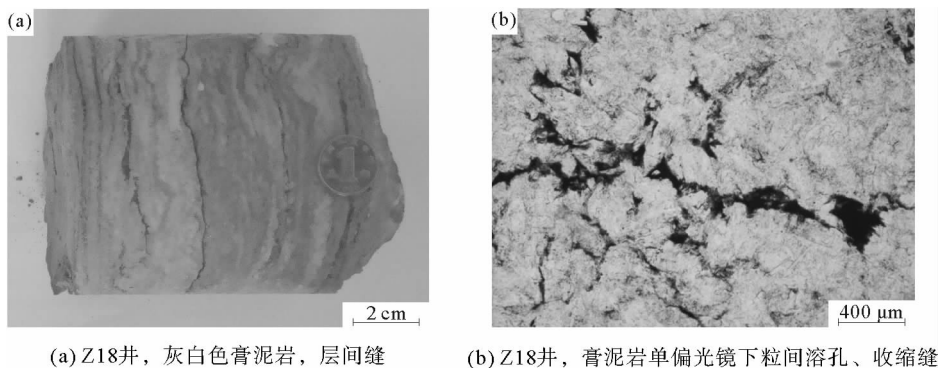


图 6 Z18 井枣 0 油组膏泥岩岩心及镜下照片

Fig. 6 The core and microscope photos of gypsum mudstone of Zao 0 oil formation, Z18 well

### 3.3 膏泥岩对油气保存的作用

国内外勘探实践表明,世界上许多油气藏的形成都与膏盐岩有关,膏盐岩具有极强的封闭性,为许多大中型油气田的优质盖层。膏盐岩内的矿物组成和排列决定了其具有极低的孔隙度和渗透率,导致膏盐岩排驱压力大,毛细管封闭能力强。不仅在黄骅拗陷,向南至东濮凹陷、济阳拗陷,向西至库车拗陷和柴达木盆地西部,膏盐岩盖层均有广泛分布<sup>[16-18]</sup>。

王官屯油田枣 0 油组发育大段深灰色膏泥岩,夹小段深灰色泥岩及粉砂岩,膏泥岩累计厚度约 200 m,是本区主要区域性盖层。同时膏泥岩层段内膏岩、泥岩和薄层砂岩频繁互层,极易形成膏泥岩隐蔽岩性油藏或砂岩上倾尖灭油藏,油气保存条件优越。

## 4 盐间油气成藏特征

通过 M15-18 井、G14-12 井原油物性以及石炭系、孔二段泥岩饱和烃全烃谱图生标特征对比分析,认为枣 0 油组膏泥岩段油源较复杂,具有明显的多源供烃特点。部分油气藏为单一油源,如 G14-12 井区,油气来自于孔二段暗色泥岩;部分油藏又表现为混合油源,如 M15-18 井区,上古生界煤系烃源岩与孔二段泥岩共同作用,导致油气共存。此外,枣 0 油组深灰色泥岩也具有供烃能力,但从烃源岩有机质丰度及成熟度等指标来看,上古生界和孔二段为枣 0 油组主力烃源岩。

尽管枣 0 油组油源不同,但孔二段及石炭—二叠纪油气成藏方式类似,油气均沿断层垂向运移进入储层砂体或高孔渗性膏岩中,形成古生新储型油气藏。研究区多条基底断裂至渐新世仍活动强烈,断裂切穿孔二段和上古生界烃源岩,为油气运移至枣 0 油组提供了重要通道。同时,断层作用下枣 0 油组与上盘孔二段泥岩对接,形成侧向封堵,有利于油气保存(图 7)。

孔一段沉积晚期,气候相对潮湿,枣 0 油组发育的膏盐湖-扇三角洲体系。在湖盆边缘多个物源向盆内延伸,形成以冲积扇、扇三角洲为主的砂泥岩沉积,砂体沿断层发育。在湖盆内部,膏盐湖环境下膏岩、膏泥岩、深灰色泥岩互层,特别是在滨浅湖区膏泥岩、砂岩频繁互层,厚层膏泥岩夹扇三角洲前缘薄层砂体,油气

保存条件良好。孔店二级构造带的隆升导致扇三角洲前缘砂体发生反转,在斜坡带形成典型的砂体上倾尖灭圈闭,表现为构造背景下的岩性油藏(图 8)。

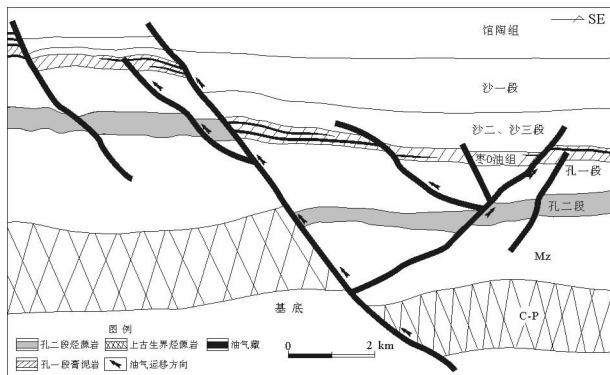


图 7 枣 0 油组油气运聚成藏示意图

Fig. 7 The schematic diagram of hydrocarbon migration and accumulation, Zao 0 oil formation

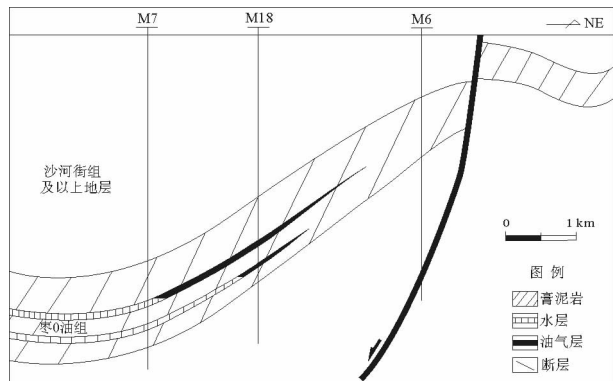


图 8 孔南地区枣 0 油组油藏剖面图

Fig. 8 The map of oil reservoir profile of Zao 0 oil formation, Kongnan area

此外,三角洲前缘的孤立砂体及滑塌浊积扇体,自沉积以来就被膏泥岩在三维空间上分隔包围,形成砂岩透镜体。砂体周围的泥质烃源岩成熟后,油气可在毛细管力作用下直接运移至砂体中,形成岩性油气藏。膏泥岩所围限的独立砂体,无断层连通外部烃源岩地层,受供烃能力的限制,其油气富集的程度相对较差。

## 5 结论

1) 膏泥岩一般形成于盐湖环境,地球物理响应特征明显。其与周边地层形成地震强反射特征,主要表现为强振幅、中-强连续性、中强频率,测井曲线表现为高电阻、高电位和低伽玛值。

2) 膏泥岩对于枣 0 油组油气成藏具有积极意义。膏盐岩的存在可使泥岩早期生烃,并促进有机质向烃类转化;膏泥岩层段形成的异常压力及较高的热导率,有利于盐间砂体原生孔隙的保存,膏岩转化过程中形成的收缩缝、粒间溶孔和晶间孔,为油气提供了新的储集空间;膏泥岩层段夹薄层砂岩,有利于油气的保存。

3) 孔南地区枣 0 油组油气来自于上古生界、孔二段及枣 0 油组自身等多套烃源岩,油气均沿断层垂向运移进入储层,并形成侧向封堵,扇三角洲前缘砂体在斜坡带形成砂体上倾尖灭。油气藏特征为:多源供烃、断层侧向封堵、砂岩上倾尖灭,形成构造背景下的岩性油气藏。

通过王官屯地区几套主力烃源岩及其原油地球化学特征分析,在进行油源对比基础上,结合油气运移输导体系研究成果,并综合考虑油气成藏所必备的生、储、盖、圈等诸多地质要素的时空匹配和构造组合特征。认为膏泥岩控制下,孔南地区枣 0 油组油气藏主要表现为:多源供烃、断层侧向封堵、砂岩上倾尖灭,为构造-岩性油气藏。

## 参考文献:

[1]EVANS D G, NUNN J A. Groundwater flow, heat, and salt transport near salt diapirs[J]. Eos. Transaction American Geophysical Union, 1989, 24(3): 1097-1098.

[2]宫秀梅, 曾溅辉. 渤海洼陷古近系膏盐层对深层油气成藏的影响[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 24-27.  
GONG Xiumei, ZENG Jianhui. Impact of paleogene evaporates on hydrocarbon accumulation in deep Bonan sub-sag, Jiyang depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 24-27.

[3]赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 等. 含油气盆地中膏盐岩层对油气成藏的重要影响[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 299-308.  
ZHAO Zhenyu, ZHOU Yaoqi, MA Xiaoming, et al. The impact of saline deposit upon the hydrocarbon accumulation in petroliferous basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2): 299-308.

[4]刘景东, 蒋有录, 谈玉明, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷膏盐岩与油气的关系[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 126-137.

- LIU Jingdong, JIANG Youlu, TAN Yuming, et al. Relationship between gypsum-salt rock and oil-gas in Dongpu depression of Bohai gulf basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 126-137.
- [5] 王东旭, 曾贱辉, 官秀梅. 膏盐岩层对油气成藏的影响[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(3): 329-333.  
WANG Dongxu, ZENG Jianhui, GONG Xiumei. Impact of gypsolith on the formation of oil & gas reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(3): 329-333.
- [6] И. В. 维索次基. 天然气地质学[M]. 戴金星, 吴少华(译). 北京: 地质出版社, 1975: 38-42.
- [7] GE H X, JACKSON M P A. The salt structures, petroleum traps and their synthetic utilization[J]. *Journal of Nanjing University: Geoscience Edition*, 1996, 32(4): 640-649.
- [8] JOWETT E C, CATHLES L M, DAVIS B W. Predicting depths of gypsum dehydration in evaporitic sedimentary basins[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1993, 77(3): 402-413.
- [9] FOX J. Salt structures in the deep water Gulf of Mexico[J]. *Offshore*, 1998, 58(6): 131-133.
- [10] 徐磊, 操应长, 王艳忠, 等. 东营凹陷古近系膏盐岩成因模式及其与油气藏的关系[J]. *中国石油大学学报: (自然科学版)*, 2008, 32(3): 30-35.  
XU Lei, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Genetic model of salt gypsum rock of Paleogene in Dongying depression and its relationship with hydrocarbon reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum: (Edition of Natural Sciences)*, 2008, 32(3): 30-35.
- [11] 王欣, 周立宏, 薛林福, 等. 黄骅坳陷孔南地区孔一段膏泥岩段的形成模式及层序地层学意义[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(2): 34-40.  
WANG Xin, ZHOU Lihong, XUE Linfu, et al. Formation model and significance of sequence stratigraphy of gypsum mudstone section on member 1 of Kongdian formation in Kongnan area, Huanghua depression[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(2): 34-40.
- [12] 薛林福, 孙晶, 陈长伟, 等. 黄骅坳陷孔南地区孔一、孔二段构造沉积演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 2008, 28(2): 62-68.  
XUE Linfu, SUN Jing, CHEN Changwei, et al. Tectonic sedimentary evolution of the first and second members of the Kongdian formation in southern Kongdian, Huanghua depression[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2008, 28(2): 62-68.
- [13] 张世杰, 蒲秀刚, 李勇, 等. 黄骅坳陷孔店南部枣Ⅲ油组物源分析[J]. *现代地质*, 2013, 27(1): 186-190.  
ZHANG Shijie, PU Xiugang, LI Yong, et al. Provenance analysis of Zao Ⅲ reservoir group in southern Kongdian of Huanghua depression[J]. *Geoscience*, 2013, 27(1): 186-190.
- [14] 渠芳, 陈清华, 连承波, 等. 黄骅坳陷南区油气分布规律及其成藏机制[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 294-300.  
QU Fang, CHEN Qinghua, LIAN Chengbo, et al. Distribution and accumulation of the oil and gas in southern Huanghua depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 294-300.
- [15] 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响[J]. *沉积学报*, 1997, 15(3): 103-109.  
CAI Chunfang, MEI Bowen, MA Ting, et al. The source, distribution of organic acids in oilfield waters and their effects on mineral diagenesis in Tarim basin[J]. *Acta Sedimentologica sinica*, 1997, 15(3): 103-109.
- [16] 付广, 王超. 断裂密集带在上生下储油运聚成藏中的作用—以松辽盆地三肇凹陷扶杨油层为例[J]. *山东科技大学学报: (自然科学版)*, 2011, 30(1): 21-26.  
FU Guang, WANG Chao. Effect of fault condensed belts on oil migration and accumulation in combination of upper source rocks and lower reservoirs[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: (Natural Science)*, 2011, 30(1): 21-26.
- [17] 能源, 漆家福, 李庭辉, 等. 黄骅坳陷孔南地区新生代断裂特征及其与油气关系[J]. *现代地质*, 2009, 23(6): 1077-1084.  
NENG Yuan, QI Jiafu, LI Tinghui, et al. Characteristics of Cenozoic fault system and its significance in petroleum geology in Kongnan area, Huanghua depression[J]. *Geoscience*, 2009, 23(6): 1077-1084.
- [18] 林玉祥, 郭凤霞, 孙宁富, 等. 油气输导体系研究技术思路与展望[J]. *山东科技大学学报: (自然科学版)*, 2014, 33(2): 11-19.  
LIN Yuxiang, GUO Fengxia, SUN Ningfu, et al. Technical ideas and prospect of petroleum transportation system[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: (Natural Science)*, 2014, 33(2): 11-19.