

[引著格式] 蔡来星, 卢双舫, 赵开宇, 等. 徐家围子断陷南部沙河子组致密气成藏主控因素探讨及有利探区预测 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (1+2): 1~8.

# 徐家围子断陷南部沙河子组致密气成藏 主控因素探讨及有利探区预测

蔡来星 (中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

卢双舫 (中国石油大学 (华东) 非常规与新能源研究院, 山东 青岛 266580)

赵开宇 (中国石油大学 (华东) 石油工程学院, 山东 青岛 266580)

[摘要] 通过对徐家围子断陷南部沙河子组 (Ks) 砂、泥岩样品开展物性分析, 总有机碳质量分数、镜质体反射率等测试, 结合地震、测井、钻井、地球化学等相关资料, 归纳徐家围子断陷南部 Ks 致密气成藏条件, 深度剖析控制致密气成藏的地质要素, 总结该地区致密气成藏模式。研究表明, Ks 广覆式、高品质源岩展布范围控制天然气藏分布, 优质储层发育是天然气藏形成的基础, 区域性高品质盖层是致密气得以保存的有利保障, 源储沟通是构造-岩性气藏得以形成的必要条件, 而深大断裂的发育不利于 Ks 致密气成藏。在综合考虑上述地质条件的基础之上, 指出徐家围子断陷南部 Ks 有利探区位于三级层序 SQ3 段, 远离深大断裂的前缘砂体亚相。

[关键词] 成藏要素; 有利探区; 致密气; 沙河子组; 徐南地区

[中图分类号] TE121.1 [文献标志码] A [文章编号] 1000-9752 (2015) 01+02-0001-08

致密砂岩气在世界范围内的产量逐年上升, 而在我国, 致密气藏储量也占到了天然气藏储量的 60% 以上, 有效地弥补了常规天然气储量的递减<sup>[1,2]</sup>。致密气藏的勘探与开发已经成为国内外众多学者研究的热点和前沿问题, 但目前对“致密气藏”的定义还未统一。在美国, 该类气藏常被称为低渗透气藏<sup>[1]</sup>, 指储层渗透率小于 0.1mD 的气藏。在国内, 从 20 世纪 90 年代至今, 众多学者认为致密砂岩气是指孔隙度小于 10%, 原地渗透率小于 0.1mD, 孔喉半径小于 1 $\mu$ m 的砂岩中所储集的天然气的<sup>[3~6]</sup>。笔者认为, 徐家围子断陷南部沙河子组 (Ks) 气藏的砂岩储层致密, 孔隙度小于 10%, 渗透率一般小于 0.1mD, 只有经过压裂改造才能获得经济产量, 属于典型的致密气藏。

徐家围子断陷南部属西断东超、西陡东缓的箕状断陷, 由于埋藏深、构造强、钻井少等原因, 研究程度相对落后。Ks 沉积时期, 湖盆处于断陷伸展区, 经历了多期构造运动且发育有多套早、中、晚期断层<sup>[7]</sup>。Ks 由下至上划分为 SQ1~SQ4 共 4 个三级层序, 其中, SQ1 和 SQ4 为湖盆水退时期; SQ2 和 SQ3 处于湖盆水进时期, 所发育的泥岩具有分布面积广、沉积厚度大、生烃能力高的特点。资源评价结果表明, 徐家围子深层天然气资源量达到 6689 $\times 10^8$ m<sup>3</sup><sup>[8]</sup>, 且主要源于 Ks 泥岩生烃; 在晚泉头组-青山口组沉积时期, Ks 泥岩大量生、排烃, 使得营城组火山岩气藏、登娄库-泉头组碎屑岩气藏得以形成, 如已发现的汪家屯、升平、徐深、昌德等气田<sup>[9,10]</sup>, 其累计地质储量已超过 2800 $\times 10^8$ m<sup>3</sup>。但目前 Ks 内部仅见 3 口气显示井, 且产气量较低, 抛开工区深层探井少的原因 (仅 14 口探井), 其天然气成藏地质条件不清, 主控因素不明等问题严重制约了实际生产。笔者运用井-震结合的研究思路, 对产气井进行解剖、对比, 阐明 Ks 致密气成藏形成的地质条件和主控因素, 总结该时期的成藏模式, 预测天然气成藏的有利区块, 对下一步勘探具有重要意义。

[收稿日期] 2014-10-02

[基金项目] 国家油气重大专项 (2011ZX05007-001)。

[作者简介] 蔡来星 (1985-), 男, 博士生, 现主要从事地质资源与地质工程方面的学习与研究; 通信作者: 卢双舫, lushuangfang@qq.com。

## 1 研究区地质概况

徐家围子断陷位于松辽盆地北部,西与中央隆起带以徐西断裂相隔,东与尚家-朝阳沟隆起带呈斜坡过渡,整体呈西断东超、西陡东缓的结构。研究区位于徐家围子断陷南部,面积约1368.9km<sup>2</sup>,可以划分为西部陡坡带、东部缓坡带、万隆古隆起、徐西坳陷南部、徐南坳陷共5个次级构造单元。沉积中心接收来自西部中央隆起带和东部徐东斜坡带的陆源碎屑物质,发育陡坡带扇三角洲沉积和缓坡带辫状河三角洲沉积,砂体连续分布,而湖相环境下沉积的厚层泥岩具有巨大的生烃潜力(图1)。Ks整体为一个二级层序,由下至上可以划分为4个三级层序<sup>[1]</sup>,分别为SQ1~SQ4,其中,底部的SQ1和顶部的SQ4发育时期,盆小水浅;中部的SQ2、SQ3发育时期,湖盆水进,盆阔水深,烃源岩和储集层相互叠置,有利于致密砂岩气的形成。

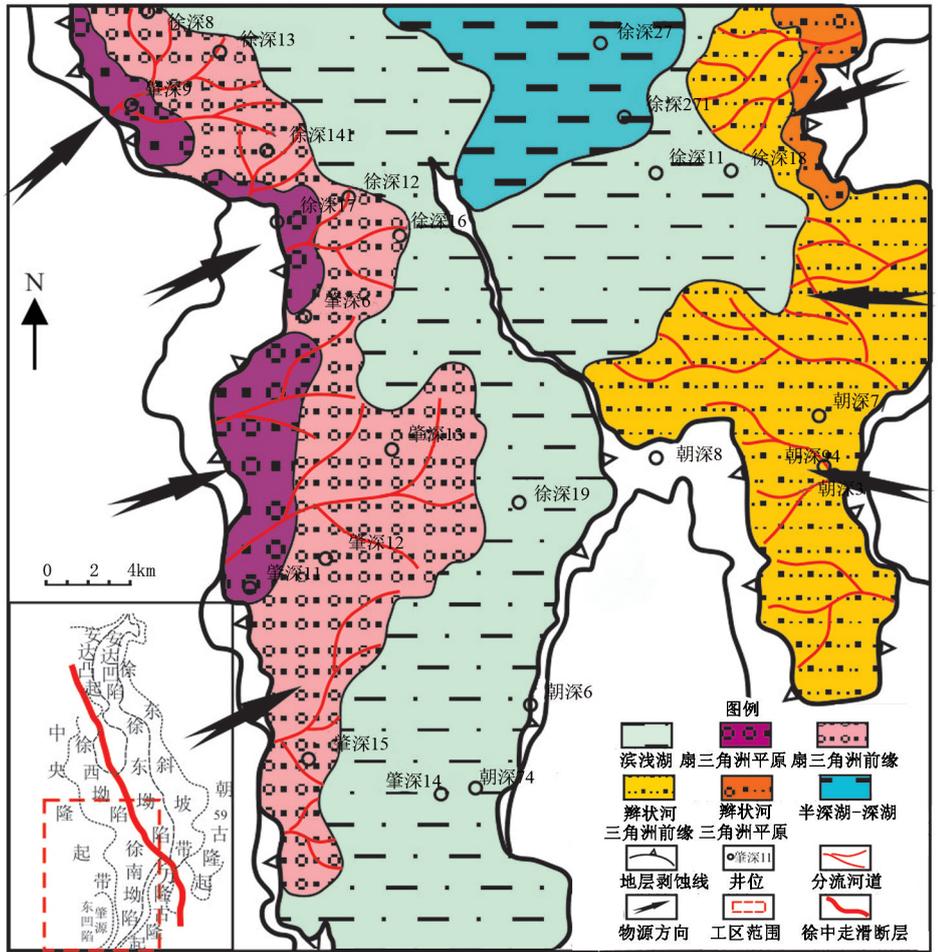


图1 徐家围子断陷南部构造分区及Ks的SQ3沉积相分布图

## 2 致密气藏的地质条件

### 2.1 烃源岩特征

Ks沉积时期的徐南地区,气候温暖湿润,尤其是在SQ2、SQ3发育时期,湖盆整体水进,广泛接受陆源细粒沉积物,在滨浅湖-半深湖环境下发育了大套、厚层暗色泥岩,累计泥岩厚度可达180余米,单层泥岩厚度最厚达20m。泥岩形成于弱还原条件,其碳优势指数 $>1.0$ ,指示区内有机质源于高等陆生植物,以腐殖型为主;干酪根类型为Ⅲ型,吸光度比为0.02,同样显示有机质类型为Ⅲ型,以生气为主;总有机碳质量分数( $w(\text{TOC})$ )实测数据表明,Ks泥岩整体丰度较高,85.9%的样品处于中等以上级别,57.69%的样品达到好的级别(图2(a));烃源岩镜质体反射率( $R_o$ )分析数据表明,有机质整体处于高成熟-过成熟阶段(图2(b))。

Ks沉积时期,区内徐西坳陷南部和徐南坳陷烃源岩的生气强度集中分布在 $(30\sim 100)\times 10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ ,而SQ2与SQ3的生气强度之和占到了总生气强度的80%,高于我国大气田通常的生气强度 $(20\times 10^8\text{m}^3/\text{km}^2)$ <sup>[12]</sup>,且大面积广泛分布,为Ks气藏的形成提供了优质的源岩基础。

在距今约 112Ma 时，烃源岩进入生烃门限，生气高峰主要集中在距今 105~90Ma，对应于晚泉头组-青山口组沉积时期<sup>[8]</sup>，具有持续、快速、大量生、排烃的特征。总体看来，K<sub>s</sub> 烃源岩广覆式生烃，持续快速供气的特征为致密气藏的形成奠定了坚实的物质基础。

## 2.2 储集层特征

徐家围子断陷南部 K<sub>s</sub> 储层主要为西部扇三角洲砂体和东部辫状河三角洲砂体，岩石类型以岩屑质长石砂岩、长石质岩屑砂岩为主（图 3 (a)、(b)），成分成熟度和结构成熟度均较低；由于储层受到“深埋藏、强压实、强胶结、弱溶解、微裂缝等”沉积、成岩、构造作用的共同影响，实测样品中孔隙度小于 5% 的占 83.3%，渗透率小于 0.05mD 的占 91.7%，整体表现为超致密储层的特征(图 3 (c)、(d))；其储集空间类型，少见原生粒间孔，多见次生粒内孔，可见成岩-构造缝，偶见黏土晶间孔（图 3 (e)、(f)、(g)），微孔微喉型孔喉结构在很大程度上也抑制了有效储层的发育；实测  $R_o$  多大于 2.0，显示 K<sub>s</sub> 储层主要处于中成岩 B 期和晚成岩阶段，而晚期黄铁矿的出现也有力地论证了该观点（图 3 (h)）。

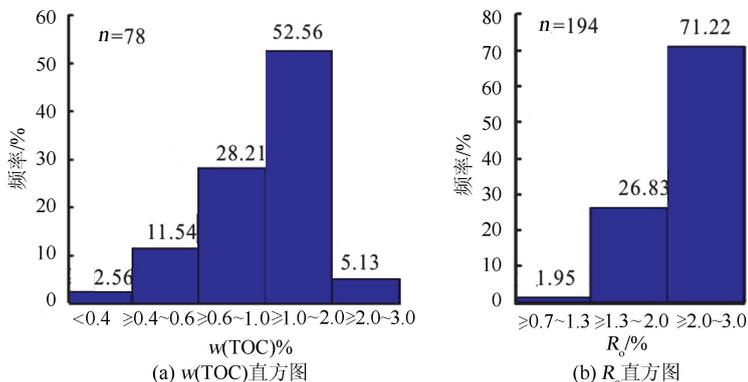


图 2 徐家围子断陷南部 K<sub>s</sub> 烃源岩特征图

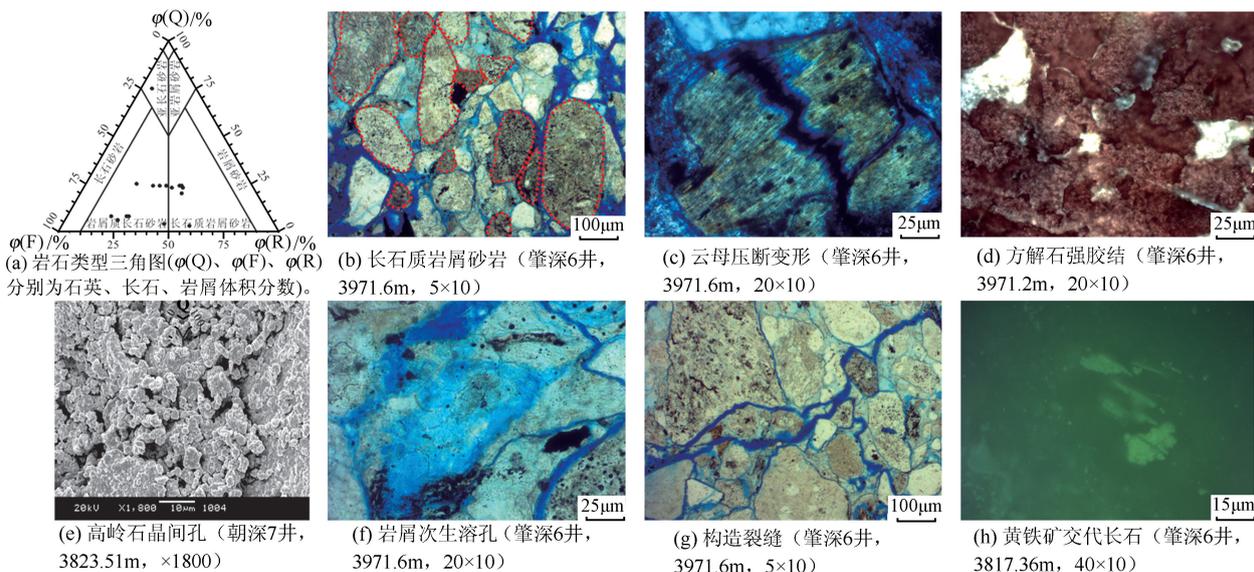


图 3 徐家围子断陷南部 K<sub>s</sub> 储层特征图

统计区内 K<sub>s</sub> 物性数据，对比试气层和干层的孔、渗特征<sup>[13]</sup>，将 K<sub>s</sub> 含气储层物性下限厘定为孔隙度大于 3.5%，渗透率大于 0.053mD。针对有效储层的空间展布特征（图 4）进行分析认为：在平面上，扇体前缘亚相物性优于平原亚相物性，西部扇三角洲物性优于东部辫状河三角洲物性，造成上述结果的原因在于，西部扇三角洲前缘砂体近源岩、接断层，在烃源岩大量生、排烃高峰期，能够及时与有机酸接触，受到的次生溶解作用强于东部辫状河三角洲；在垂向上，优质储层主要发育在盆阔水深的 SQ3 和 SQ2 时期，且 SQ3 物性优于 SQ2 物性，而底部 SQ1 和顶部 SQ4 时期，发育平原亚相的厚层砂砾岩体，缺少优质储层。

## 2.3 盖层特征

徐家围子断陷南部 K<sub>s</sub> 泥岩盖层最厚可达 350 余米，而且分布广泛，具有强的毛细管、超压封闭和

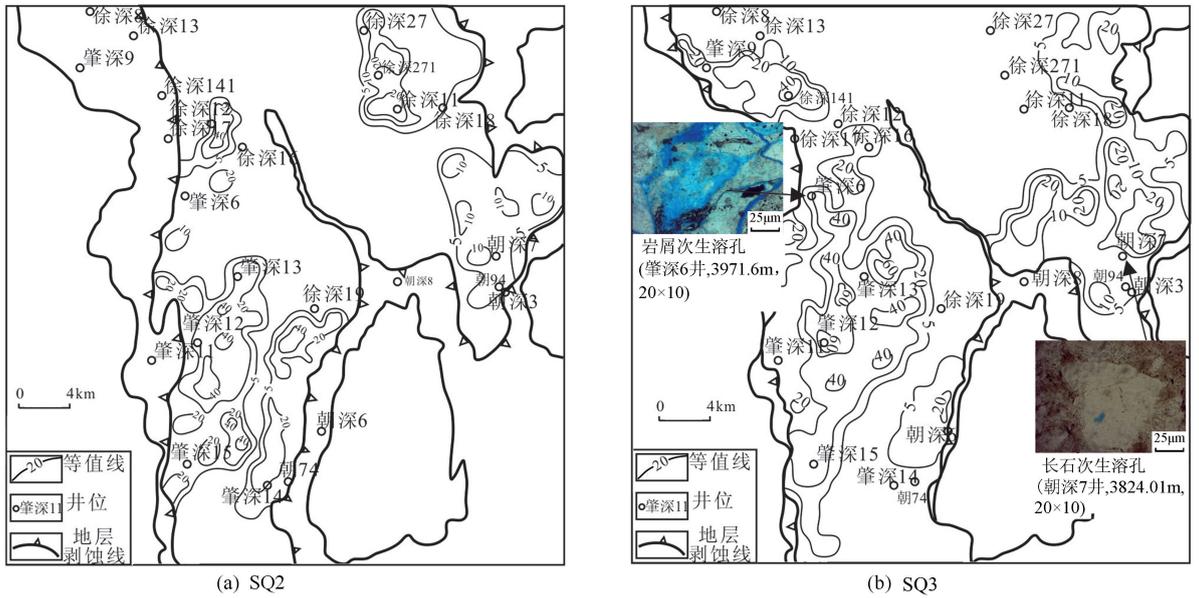


图4 徐家围子断陷南部 Ks 优质储层等厚图及次生溶解作用特征图

烃浓度封闭能力。其中，排替压力发育范围为 6.7~7.4MPa；超压发育范围为 7~16MPa，平均约 12MPa。综合评价认为：全区泥岩封盖能力达到“较好-好”的级别；徐西凹陷南部和徐南凹陷为好的封盖能力区；由盆地中心向盆地边缘，封盖能力逐渐变好。在距今 95Ma 时，Ks 泥岩盖层便已形成封闭能力，对应登娄库组沉积时期，早于生气高峰的晚泉头组-青山口组沉积时期，有助于天然气大规模保存成藏<sup>[14]</sup>。

### 2.4 运移条件

Ks 沉积时期，研究区处于断陷伸展期，受北北东-南南西向拉张应力场控制，发育多期断裂，其中，徐中走滑断裂及徐西断裂南段构成研究区内主体断裂，次级小断裂非常发育，走向主要呈近北向、北北西向和北北东向，多为上倾方向的平直正断层，为天然气运移提供了优越条件<sup>[7]</sup>（表 1）。早、中期小断层及长期大断层与不整合面、砂体相互沟通，形成了以源外“不整合-断层-砂体”运移体系和源内“断层-砂体”运移体系为主体的有利输导系统。

表 1 徐家围子断陷南部断层分期统计表

断层分期	断层数量/条	断层频率/%	断层走向	活动时期 /Ma
早期	31	14.03	南北向、北北东向	距今 155~125
中期	36	16.29	北北东向	距今 115~110
晚期	57	25.79	北北西向	距今 100~90
长期	97	43.89	南北向、北北西向	距今 155~90

## 3 致密气藏主控因素

### 3.1 高品质源岩展布范围控制天然气藏分布

目前，诸多已形成的致密油气藏集中分布在烃源岩附近，具有明显的环带状分布特征，表明高品质源岩（生气强度  $> 20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ）是天然气藏形成的物质基础<sup>[12,15]</sup>。徐南断陷 Ks 气源岩高效生气范围主要分布在徐南凹陷和徐西凹陷的沉积中心，生气强度最高可达  $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，说明区内 Ks 气源岩生成量丰富。目前，已发现的 3 口试气井均位于有效生气范围周缘，说明气藏的分布范围明显受断陷期有效烃源岩分布的控制。通过剖析 SQ3 时期具有工业开采价值的肇深 12 井和低产朝深 6 井可以发现：肇深 12 井自身源岩  $\omega(\text{TOC})$  品质较高，且距下部 SQ2 湖盆中心的气源更近，天然气容易上移至有效储层，聚集成藏；而朝深 6 井距离湖相源岩较远，仅仅接收到少量天然气供给，日产气仅  $341 \text{ m}^3$ （图 5）。

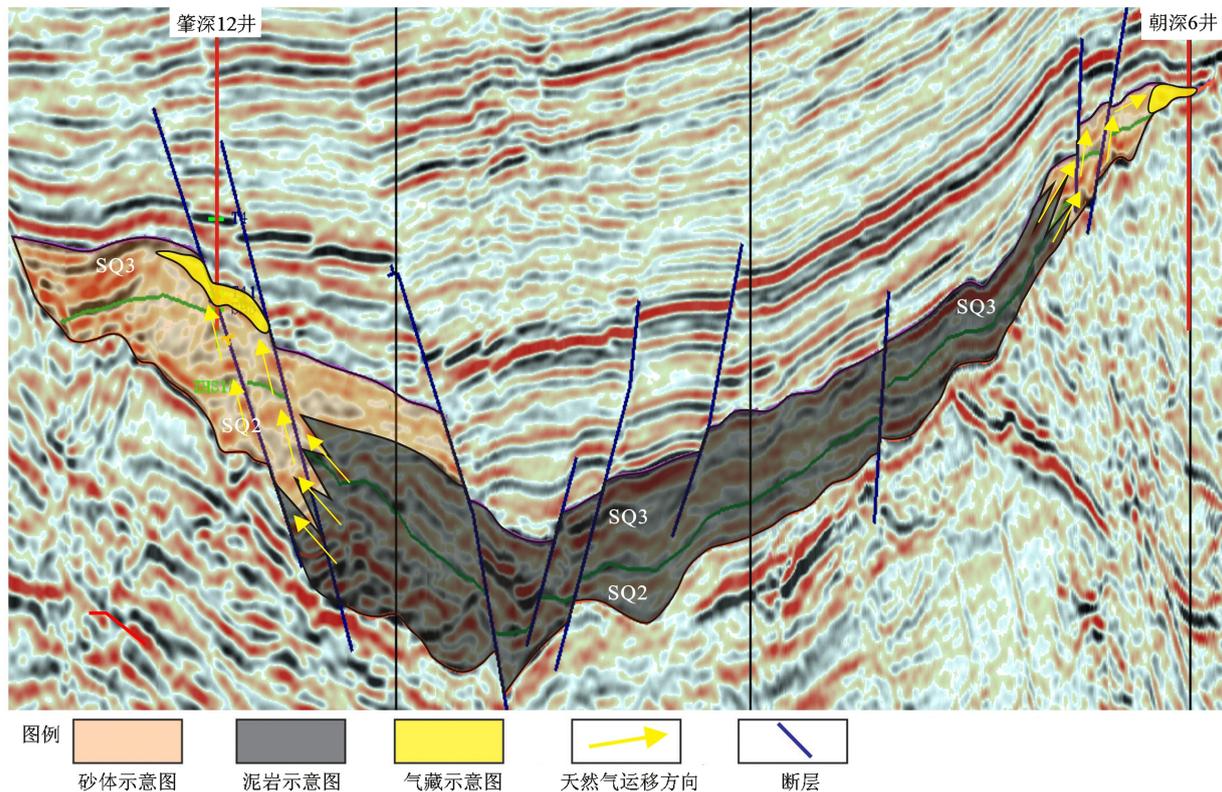


图 5 徐家围子断陷南部肇深 12 井-朝深 6 井气藏要素连井剖面图

### 3.2 优质储层发育是天然气藏形成的基础

优质储层既可作为天然气的有利储集空间，又可成为天然气运移的良好输导层。基于天然气小分子“无孔不入”的特性，天然气在向高部位运移的过程中，势必会优先聚集在孔喉结构优、相对高渗的砂体当中，而低渗砂体聚集天然气的的能力则相对较差<sup>[2]</sup>。通过剖析肇深 12 井和肇深 14 井，发现肇深 14 井自身源岩  $w$  (TOC) 大于 1.0%，且距离湖相源岩较近，高强度的生、排烃可以为气藏的形成提供充足的气源，但肇深 14 井砂体物性极差，仅发育少量物性稍好的薄层砂体，且厚度多不足 1m，使得天然气难以进入砂体聚集成藏，故未见气显示（图 6）。

### 3.3 源储沟通是天然气藏形成的必要条件

低渗透砂岩中的疏导体以裂缝、断层、不整合面和相对高渗的砂体为主，运移距离比较短，侧向运移不强，但在裂缝作用下可发生垂向运移<sup>[16,17]</sup>。区内“不整合-断层-砂体”和“断层-砂体”输导体系为天然气的垂向、侧向运移提供有利条件，使得 SQ2、SQ3 生成的天然气向上聚集在砂层中。而缺少有效的源储沟通条件，天然气便难以远距离运移至储层，形成大规模气藏，如朝深 6 井（图 5）、肇深 9 井等。

### 3.4 深大断裂不利于天然气成藏

断裂作为天然气垂向运移的主要通道，其活动期次对天然气的聚散起到至关重要的作用。由表 1 可以看出，在距今 155~110Ma，Ks 早、中期断层开始活动，在距今 112Ma 年时，烃源岩进入生烃门限，早、中期断层为天然气提供了有效的运移路径，使得天然气在有效的保存和封盖条件下成藏。在距今 105~90Ma 时，Ks 泥岩处于大量排烃期，由于晚期及长期断层活动强烈，湖相源岩生成的天然气运移至有效砂体后，极易通过深大断裂向上逸散，从而难以成藏。Ks 上覆的营城组、泉头组富含天然气也有效地论证了该观点<sup>[7]</sup>。

肇深 15 井和肇深 13 井均发育优质储层和高丰度的烃源岩，且源储匹配关系良好，但两者均未产气，原因即在于其位于深大断裂带，天然气逸散，从而难以成藏（图 7）。

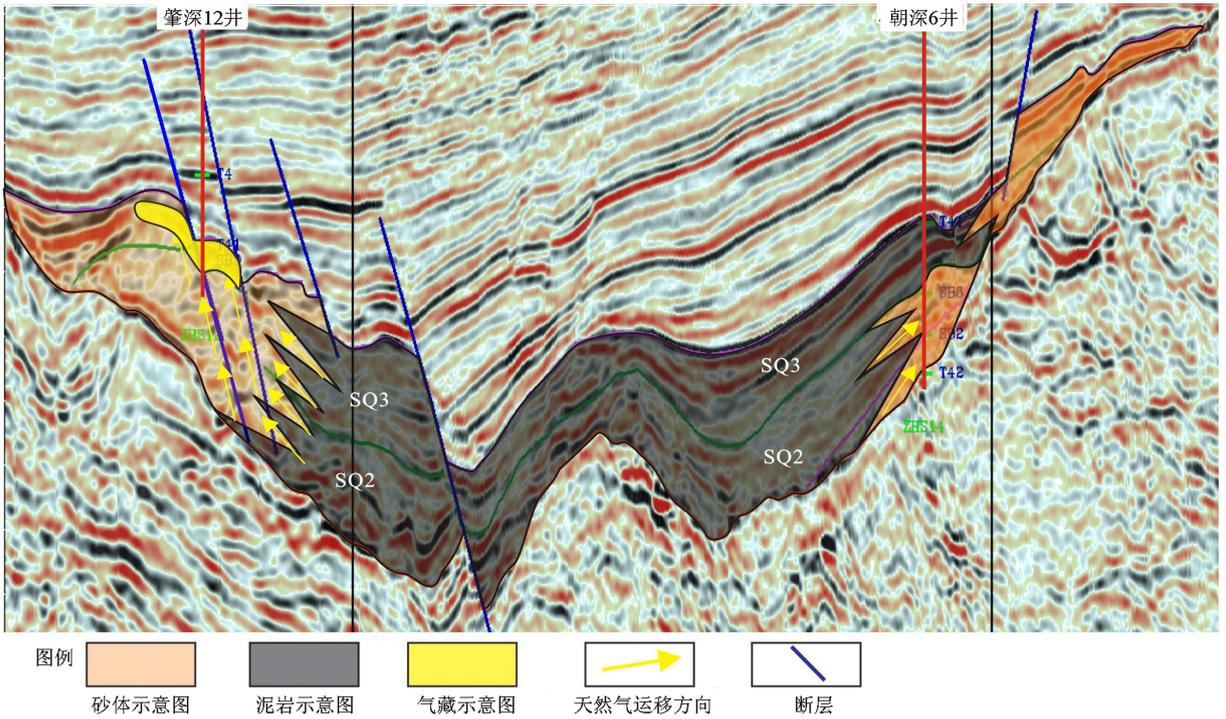


图6 徐家围子断陷南部肇深12井-肇深14井气藏要素连井剖面图

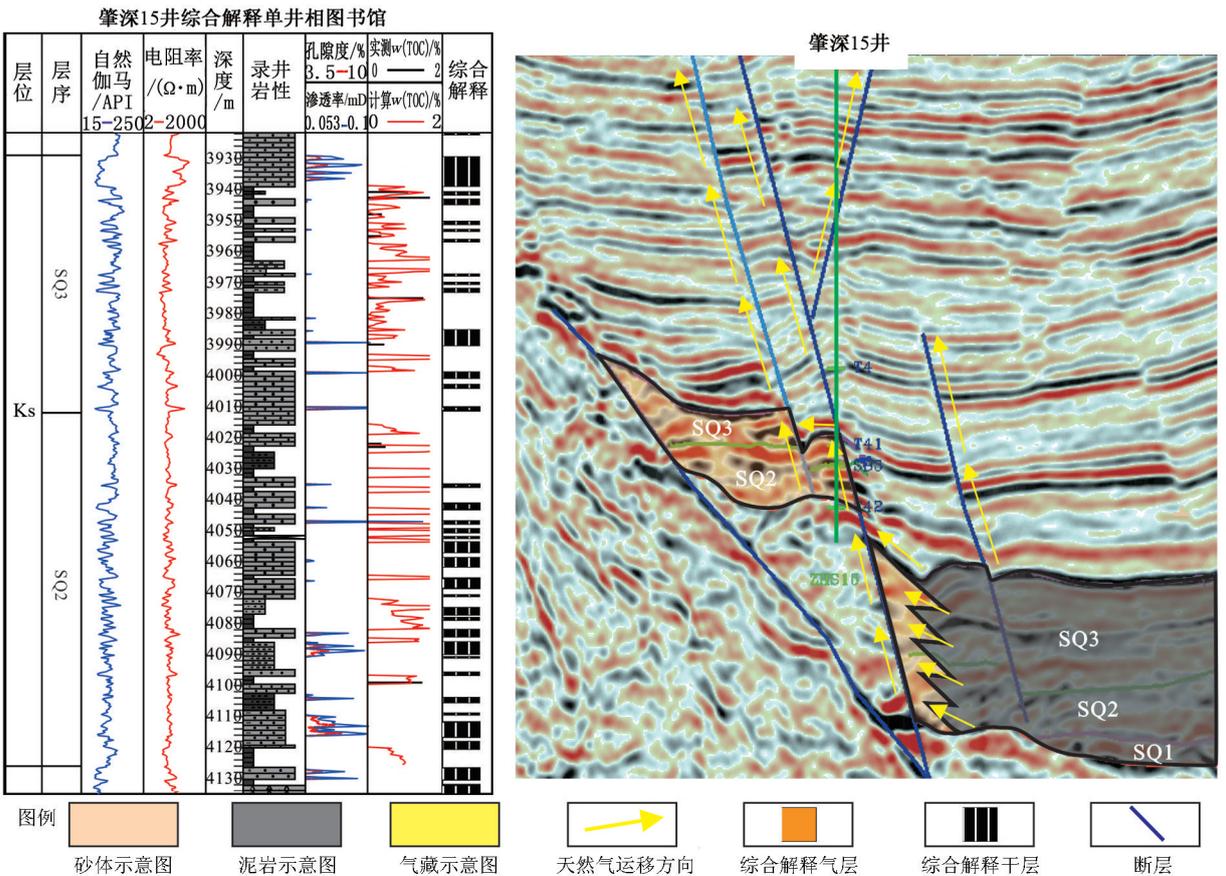


图7 徐家围子断陷南部肇深15井气藏要素剖面图

## 4 有利探区预测及致密气成藏模式

### 4.1 有利探区预测

在总结致密气成藏主控要素的基础上,综合考虑生、储、运等地质条件,认为寻找有利勘探方向应该综合考虑以下几个方面:①平面上,在靠近源岩附近的前缘亚相部署有利井位,尤以西部扇三角洲前缘亚相为主;②垂向上,在 SQ3、SQ2 寻找测井解释物性高于气层下限的优质储层部署有利井位;③构造上,远离长期发育的深大断裂,在早、中期小断层或深大断裂的上倾方向部署有利井位(图 8);④实际生产方面,靠近源岩、物性较好的前缘亚相区块,是天然气勘探的有利区域,主要分布在东、西部斜坡之上。

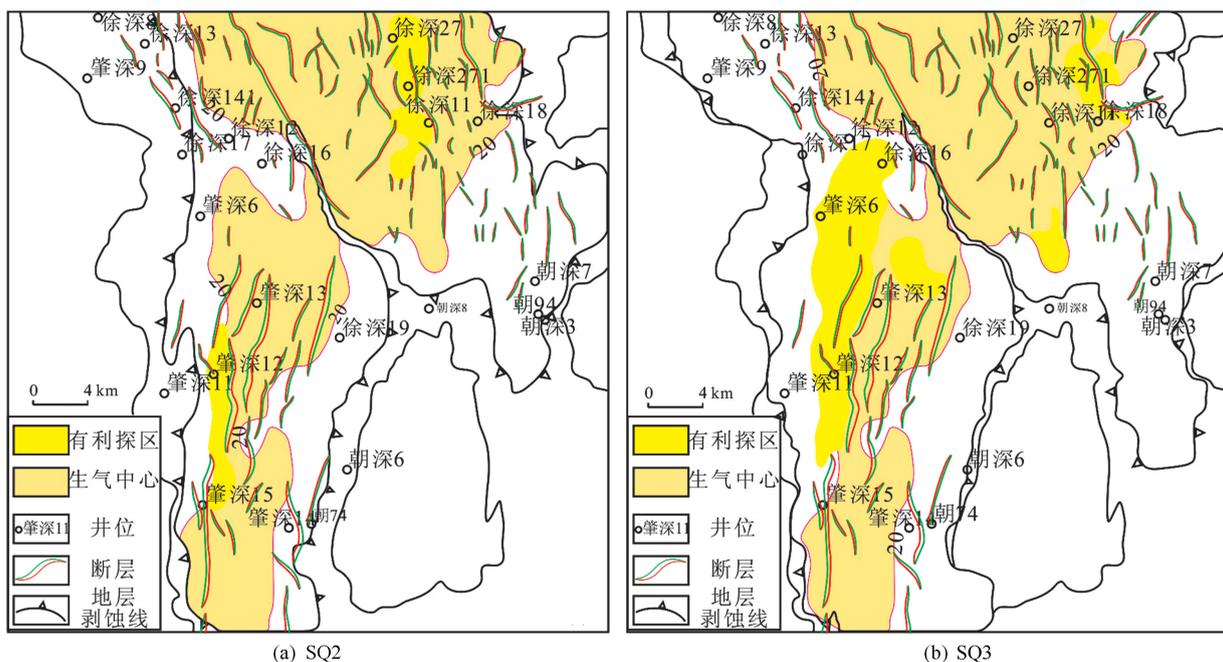


图 8 徐家围子断陷南部 Ks 有利探区分布图

### 4.2 成藏模式

针对研究区 Ks 成藏条件及富集规律的探讨,结合已发现气藏的成藏特征认为:研究区气藏以构造-岩性气藏为主<sup>[18]</sup>,受断层和岩性双重因素控制,主要分布在斜坡之上(储层物性较好的扇三角洲前缘和辫状河三角洲前缘),可分为“自生自储式”和“下生上储式”2种成藏类型;SQ2 和 SQ3 作为高品质气源层,所产生的天然气在毛细管力和超压的控制下,通过“不整合-断层-砂体”输导体系向上运移至 SQ2 和 SQ3 储层,加之有效盖层的保障作用,使得天然气藏得以形成。

## 5 结论

- 1) 徐家围子断陷南部沙河子组气源岩、储层、盖层及运移条件的时空匹配关系良好,天然气成藏潜力大。
- 2) 研究区天然气成藏主要受控于源岩的展布范围、优质储层的分布区域及源储沟通条件,在部署有利井位时,应靠近早、中期小断层,而远离深大断裂。
- 3) 有利探区主要分布在斜坡之上的扇三角洲前缘亚相、辫状河三角洲前缘亚相,有利层段为 SQ3, SQ2 次之。

4) 研究区天然气藏以构造-岩性气藏为主, 可分为“自生自储式”和“下生上储式”2种成藏类型。

### [参考文献]

- [1] 杨正明, 姜汉桥, 李树铁, 等. 低渗透气藏微观孔隙结构特征参数研究——以苏里格和迪那低渗气藏为例 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2007, 29 (6): 108~110.
- [2] 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学, 等. 致密砂岩气藏成藏过程的物理模拟实验 [J]. 地质论评, 2007, 53 (6): 844~848.
- [3] Spencer C W. Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in Western United States [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73: 613~629.
- [4] 袁政文, 朱家蔚, 王生朗, 等. 东濮凹陷沙河街组天然气储层特征及分类 [J]. 天然气工业, 1990, 10 (3): 6~11.
- [5] 赵靖舟. 非常规油气有关概念、分类及资源潜力 [J]. 天然气地球科学, 2012, 23 (3): 393~405.
- [6] 邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24 (2): 238~246.
- [7] 胡明, 付广, 吕延防, 等. 松辽盆地徐家围子断陷断裂活动时期及其与深层气成藏关系分析 [J]. 地质论评, 2010, 56 (5): 710~718.
- [8] 郭秋麟, 谢红兵, 米石云, 等. 油气资源分布的分形特征及应用 [J]. 石油学报, 2009, 30 (3): 379~385.
- [9] 付广, 孟庆芬. 徐家围子地区深层运移输导系统及对天然气成藏与分布的控制 [J]. 油气地质与采收率, 2004, 11 (2): 37~52.
- [10] 陈义才, 王波, 张胜, 等. 苏里格地区盒8段天然气充注成藏机理与成藏模式探讨 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2010, 32 (4): 7~11.
- [11] 李树青, 李和, 徐伟, 等. 松辽盆地南部下白垩统层序构型及沉积特征 [J]. 天然气工业, 2007, 27 (4): 36~39.
- [12] 戴金星, 宋岩, 张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素 [J]. 中国科学 (地球科学), 1996, 26 (6): 481~487.
- [13] 王艳忠, 操应长. 车镇凹陷古近系深层碎屑岩有效储层物性下限及控制因素 [J]. 沉积学报, 2010, 28 (4): 752~761.
- [14] 霍邱立. 松辽盆地徐家围子断陷深层天然气来源与成藏研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.
- [15] 韩思杰, 桑树勋, 刘伟. 济阳坳陷石炭-二叠系致密砂岩气形成条件与成藏模式 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2014, 36 (10): 50~54.
- [16] 曾濞辉, 孔旭, 程世伟, 等. 低渗透砂岩油气成藏特征及其勘探启示 [J]. 现代地质, 2009, 23 (4): 755~760.
- [17] 郑东孙, 刘豪, 黄忠明, 等. 青东凹陷古近系断层特征及其对油气成藏的控制作用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2014, 36 (11): 28~35.
- [18] 肖永军, 徐佑德, 段肖艳, 等. 长岭断陷东岭地区火石岭组油气成藏特征分析 [J]. 天然气地球科学, 2012, 23 (4): 720~726.

[编辑] 邓磊