

古龙油田葡萄花油层断层封闭性分析

张 驰¹, 李 涛¹, 胡 佳², 田 淼³

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100;

2. 吉林油田地球物理勘探研究院, 吉林 松原 138000;

3. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249)

摘 要: 古龙油田断层极为发育, 断层的封闭性对研究区油气的运聚起着重要的控制作用, 研究断层封闭性有利于预测油气成藏的有利部位。从断层类型、几何特征和埋深对研究区断层封闭性开展地质定性分析, 重点从断层两盘岩性对置、泥岩涂抹和应力对断层封闭性进行了定量分析, 研究典型断层的封闭演化史。结果表明, 古龙油田葡萄花油层一级断层和三级断层封闭性较好, 二级断层封闭性一般; 平面上鼻状构造断层封闭性好于向斜断层封闭性, 其中龙南鼻状构造断层封闭性最好。

关键词: 断层封闭性; 岩性对置; 泥岩涂抹; 古龙油田

中图分类号: P618.13; P542

文献标识码: A

THE FAULT SEALING ANALYSIS OF THE PUTAOHUA OIL LAYER IN THE GULONG OILFIELD

ZHANG Chi¹, LI Tao¹, HU Jia², TIAN Miao³

(1. College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China;

2. Jilin Oilfield Geophysical Exploration Research Institute, Songyuan 138000, Jilin, China;

3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Faults in the Gulong oilfield are extremely developed. The fault sealing ability plays an important role in controlling the oil and gas migration and accumulation in the study area, so the study of fault sealing is in favor of the prediction of favorable locations for oil and gas accumulation. Qualitative analysis were carried out on the fault sealing ability in the study area from the aspects of fault type, geometric characteristics and buried depth, focusing on the two sides lithology configuration, clay smearing and stress. The sealing evolution history of typical faults was also studied. The results show that the primary and tertiary faults have good sealing ability, while the sealing ability of the secondary faults is ordinary. The fault sealing ability of the nose structure is superior to that of the syncline fault, in which the fault sealing ability of Longnan nose structure is the best.

Key words: fault sealing ability; lithology configuration; clay smearing; the Gulong oilfield

断层对油气的运移和聚集起着重要的控制作用, 断块油气藏的形成与断层的封闭性密切相关^[1-2], 研究断层封闭性对油气勘探、圈闭规模、

储量估算甚至开发方案都有非常重要的意义。随着油气勘探的发展, 与断层相关的油气圈闭日益受到重视, 对断层封闭能力进行评价显得尤为

重要。

1 区域地质概况

古龙油田构造主体位于松辽盆地中央坳陷区齐家—古龙凹陷中部，东与大庆长垣高台子油田相连，西至他拉哈油田，南接葡西油田，北邻龙虎泡油田，勘探面积 4565.9 km^2 ^[3]（见图 1）。古龙油田主力油层葡萄花油层受西部和北部沉积体系控制，以三角洲前缘亚相沉积为主，储层物性较好，但构造条件较差。研究区主要由敖古拉—哈拉哈鼻状构造、他拉哈向斜、龙南鼻状构造、常家围子向斜和高西鼻状构造五个构造单元组成，整体显示出“两凹三隆”的构造形态（见图 2）。断层活动是古龙油田形成演化的主导因素，控制着凹陷的沉积作用、构造发育及构造展布格局，并进而控制了油气的生成、运移、聚集和分布^[4]。

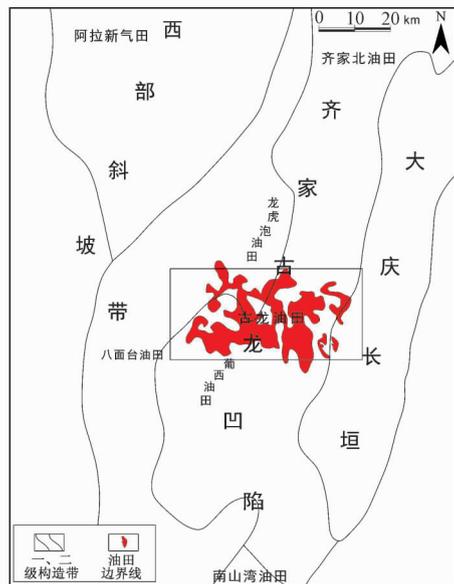


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Map of the study area

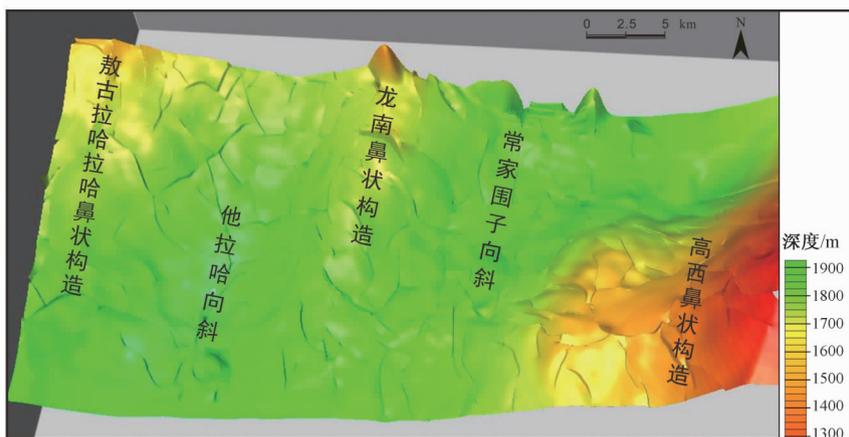


图 2 古龙油田葡萄花油层顶面立体图

Fig. 2 The top space diagram of the Putaohua Oil Layer in the Gulong Oilfield

2 断层封闭性定性分析

研究区不同级别断层控制不同级别构造单元，同时对油气起着封闭和疏导的作用。断层级别划分原则如下：一级断层走向与构造主体走向基本平行，为控制研究区一级构造单元断层；二级断层走向与主体构造走向呈高角度相交，为控制研究区构造主体的断层，三级断层为一、二级断层的伴生断层。

对研究区的 47 条断层进行了断层封闭性定性分析（见图 3），文章从五个构造单元依次选取一

级断层 1、10、16、25、40 号断层、二级断层 4、8、18、26、41 号断层和三级断层 2、9、23、27、37 号断层作为典型断层，从断层性质、倾角、断距、埋深、活动期进行封闭性定性分析。定性分析的原则概述为：断层为正断层，倾角、断距越大，埋深越浅，活动性越强，断层封闭性越差；反之，断层为逆断层，倾角、断距越小，埋深越深，活动性越弱，断层封闭性越好。

研究区断层以同向同沉积正断层为主，倾角较大，在 $37^\circ \sim 46^\circ$ 之间，其断层性质和较大的倾角不利于断层封闭^[5-7]，但断层断距较小，最大断距一般小于 30 m，有利于泥岩涂抹的厚度和空间

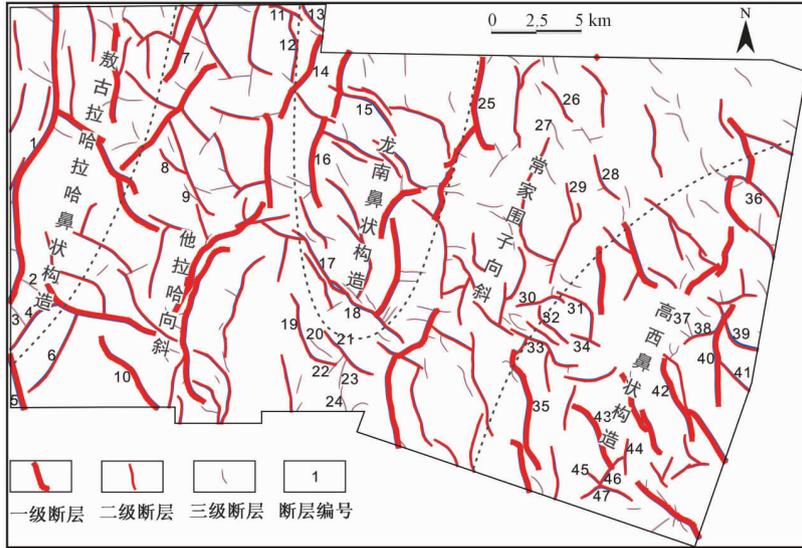


图 3 古龙油田葡萄花油层断层分布图

Fig. 3 Faults distribution diagram of the Putaohua Oil Layer in the Gulong Oilfield

连续性^[8]。断层埋深较深, 主要在 1300 ~ 1850 m 之间, 断面受到的应力较大, 压实作用和胶结作用较强, 有利于断层的封闭^[9]。研究区大部分断层在泉头组至嫩江组嫩二段沉积期活动性较强, 嫩三段至嫩五段沉积期活动性逐渐减弱, 有利于断层封闭。

选取的 15 条典型断层中, 一级断层平均倾角 39.4°, 平均断距 18 m, 平均埋深 1560 ~ 1653 m; 二级断层平均倾角 41°, 平均断距 21.8 m, 平均埋深 1616 ~ 1663 m; 三级断层平均倾角 40.4°, 平均断距 9.8 m, 平均埋深 1675.4 ~ 1717 m (见表 1)。

表 1 古龙油田 15 条典型断层封闭性定性评价表

Table 1 Qualitative evaluation table of fault sealing ability in the Gulong Oilfield

级别	断层号	断层性质	倾角	断距/m	目的层埋深/m	主要活动期	综合评价封闭性
一级断层	1	正	41°	19	1400 ~ 1700	泉头组—姚家组姚一段	一般
	10	正	37°	24	1915 ~ 1955	泉头组—姚家组姚一段	一般
	16	正	39°	16	1630 ~ 1660	泉头组—姚家组	很好
	25	正	43°	14	1750 ~ 1815	泉头组—青山口组	一般
	40	正	37°	17	1105 ~ 1135	泉头组—青山口组	较好
二级断层	4	正	38°	24	1750 ~ 1820	泉头组—嫩江组嫩一段	较好
	8	正	43°	13	1750 ~ 1805	泉头组—姚家组姚一段	较差
	18	正	46°	28	1740 ~ 1765	青山口组—嫩江组嫩二段	较差
	26	正	38°	19	1805 ~ 1820	泉头组—姚家组	一般
	41	正	40°	25	1035 ~ 1105	泉头组—嫩江组嫩二段	一般
三级断层	2	正	39°	8	1700 ~ 1770	泉头组—姚家组姚一段	很好
	9	正	42°	8	1827 ~ 1865	泉头组—姚家组	一般
	23	正	40°	4	1765 ~ 1785	泉头组—青山口组	很好
	27	正	40°	16	1785 ~ 1810	泉头组—姚家组姚一段	一般
	37	正	41°	13	1300 ~ 1355	青山口组—嫩江组嫩二段	较好

通过对研究区 47 条断层定性分析发现, 二级断层的平均倾角、断距大于一级和三级断层的平均倾角、断距, 一级、二级和三级断层整体埋深较深, 所以认为一级和三级断层封闭性稍好于二级断层封闭性; 各构造单元断层封闭性规律不明显。但仅从定性分析, 还不足以说明断层的封闭程度^[10], 断层封闭情况需要依据定量分析来具体确定。

3 断层封闭性定量分析

断层封闭主要有两种情形: 一种是由于断层上下盘砂泥岩并置引起封闭; 另一种是由于当断层发生位移错动时, 泥岩涂抹在断层面上导致断层具有较高的排替压力, 从而造成断层封闭^[11-12]。

无论哪种情况，断层封闭与否或封闭能力如何，其本质因素在于差异排替压力^[13]。对研究区的47条断层进行了断层封闭性定量分析，以上述15条典型断层从岩性对置、泥岩涂抹、应力以及综合评价进行了断层封闭性定量分析，在此仅以1号断层为例进行具体阐述。

3.1 岩性对置

断层两侧的岩性对置关系是衡量断层侧向封闭的重要因素，研究断层两盘岩性对置关系最直接最有效的方法是制作Allan断面图^[14]。当目的盘储层与断层封闭盘泥岩层对置时，目的盘储层排替压力小于封闭盘地层的排替压力，断层侧向封闭，否则，断层开启^[15]。砂岩层的封闭情况受该砂岩层最高点的控制，若最高点与砂岩层对接，泥岩涂抹又不足以封闭，则断层对该砂岩层的封闭为无效封闭^[16]。

1号断层是敖古拉—哈拉哈鼻状构造的一条典型一级断层。分析1号断层岩性配置关系图认为目的盘整体砂质含量很高，发育多套厚层质纯的砂岩层，封闭盘顶部发育一套较纯的砂岩层，中部发育多层很薄的砂岩层，其余部分均发育较纯的泥岩层（见图4）。从1号断层岩性对接封闭评价图上可以看出，断层顶部和底部局部封闭性稍差，其余部分封闭性较好，断层中部封闭性极好（见图5）。根据1号断层岩性对置情况认为敖古拉—哈拉哈鼻状构造发育的一级断层整体封闭性较好。

15条典型断层中，鼻状构造断层岩性对置情况整体较好，其中龙南鼻状构造岩性对置情况最好，敖古拉—哈拉哈鼻状构造岩性对置情况较好，

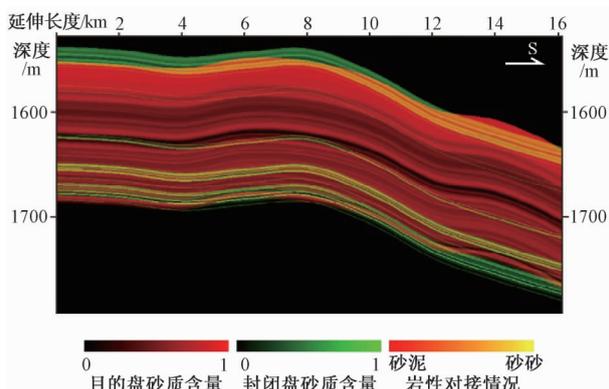


图4 1号断层岩性配置关系图（平行于断面）

Fig. 4 Two sides lithology configuration diagram of the fault 1 (Parallel to the section)

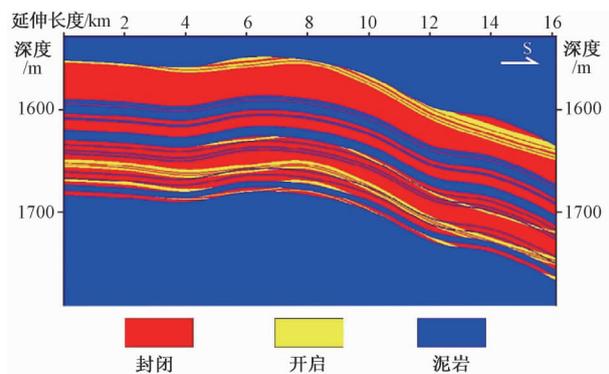


图5 1号断层岩性对接封闭评价图（平行于断面）

Fig. 5 Fault sealing evaluation diagram of the fault 1 according to two sides lithology configuration (Parallel to the section)

其次是高西鼻状构造；鼻状构造一级断层岩性对置情况较好，二级断层岩性对置情况一般，三级断层岩性对置情况很好，位于向斜区的一级、二级和三级断层岩性对置较差（见表2）。

表2 古龙油田15条典型断层封闭性定量评价表

Table 2 Quantitative evaluation table of fault sealing ability in the Gulong Oilfield

级别	断层号	所属构造单元	岩性对置情况	泥岩涂抹因子 SSF	应力/MPa	综合评价封闭性
一级断层	1	敖古拉—哈拉哈鼻状构造	较好	1.20	15.50 ~ 21.18	较好
	10	他拉哈向斜	较差	2.03	16.28 ~ 22.45	一般
	16	龙南鼻状构造	很好	1.12	14.80 ~ 20.91	很好
	25	常家围子向斜	较差	2.15	16.44 ~ 22.82	较差
	40	高西鼻状构造	较好	1.23	14.32 ~ 19.73	较好
二级断层	4	敖古拉—哈拉哈鼻状构造	一般	1.48	15.74 ~ 20.36	一般
	8	他拉哈向斜	较差	2.10	16.48 ~ 22.83	较差
	18	龙南鼻状构造	较好	1.07	14.16 ~ 19.87	较好
	26	常家围子向斜	较差	4.11	16.24 ~ 21.91	较差
	41	高西鼻状构造	一般	1.26	14.42 ~ 19.16	较好
三级断层	2	敖古拉—哈拉哈鼻状构造	很好	1.09	15.65 ~ 20.14	很好
	9	他拉哈向斜	较差	2.56	16.28 ~ 21.94	较差
	23	龙南鼻状构造	很好	1.14	14.76 ~ 20.33	很好
	27	常家围子向斜	较差	1.93	16.19 ~ 21.82	一般
	37	高西鼻状构造	很好	1.17	13.60 ~ 20.25	很好

根据对研究区断层岩性对置情况分析, 发现断层封闭性表现出了较明显的规律: 研究区断层总体表现为封闭性好于疏导性; 鼻状构造断层封闭性较好, 其中龙南鼻状构造断层封闭性最好, 敖古拉—哈拉哈鼻状构造断层封闭性较好, 其次是高西鼻状构造, 向斜区断层封闭性较差; 三级断层封闭性最好, 其次是一级断层, 二级断层封闭性一般。

3.2 泥岩涂抹

泥岩涂抹发育程度直接影响断层对油气藏的封闭能力, 这是因为泥岩涂抹产生沿断层面分布的一个连续低渗透黏土物质带, 赋予断层本身很高的排替压力, 对油气产生封闭作用^[17-18]。由于单一泥岩错断过程中, 泥岩的涂抹厚度随断距的加大而变薄, 这种泥岩涂抹的空间连续性与泥岩层厚度比例和断层位移密切相关, 基于此可对泥岩涂抹进行定量评价^[19]。泥岩涂抹因子 SSF 是定量研究泥岩涂抹能力的常用参数之一^[20]。

1 号断层是敖古拉—哈拉哈鼻状构造的一条典型一级断层。从 1 号断层 SSF 封闭指数图分析泥岩涂抹情况认为仅断层下部局部封闭性一般, 其余部位封闭性都很好 (见图 6)。根据 1 号断层泥岩涂抹情况认为敖古拉—哈拉哈鼻状构造发育的一级断层封闭性较好。

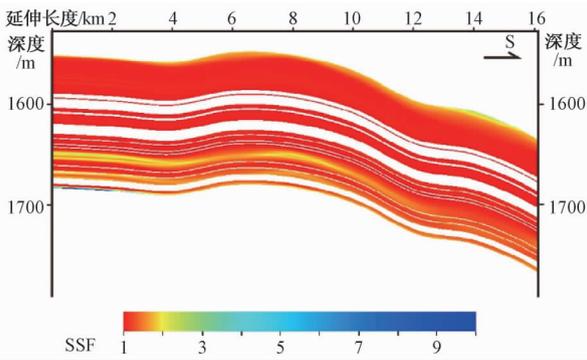


图 6 1 号断层 SSF 封闭指数图 (平行于断面)

Fig. 6 SSF sealing index diagram of the fault 1
(Parallel to the section)

15 条典型断层中, 敖古拉—哈拉哈鼻状构造断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 1.257, 他拉哈向斜断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 2.230, 龙南鼻状构造断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 1.110, 常家围子向斜断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 2.730, 高西鼻状构造断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 1.220, 鼻状构造断层的泥岩涂抹因子平均值为 1.196, 明显小于向斜区断层泥岩涂

抹因子平均值 2.480; 一级断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 1.546, 二级断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 2.004, 三级断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 为 1.578, 二级断层平均泥岩涂抹因子 (SSF) 最大, 一级和三级断层泥岩涂抹程度要好于二级断层 (见表 2)。

根据研究区断层泥岩涂抹情况认为鼻状构造断层封闭性整体较好, 其中龙南鼻状构造断层封闭性最好, 向斜区断层封闭性较差; 一级断层和三级断层封闭性好于二级断层封闭性。

3.3 应力分析

断层承受的应力方式和应力强度是决定断层是否具有封闭性及其封闭程度的主导因素。断面地应力包括两个方面, 一是地壳重力作用和均衡作用产生的静地应力, 二是地壳水平运动产生的构造应力, 两者叠加构成了地应力场。当泥岩所受压力达到其弹性极限后, 便会发生塑性变形流动, 堵塞断层面紧闭后所遗留的渗漏空间形成封闭, 所以断层活动停止后断层正压力越大, 则断层之间愈合越好, 紧闭程度越高, 封闭性越好。

1 号断层上部埋深较浅, 断面受到的压应力相对较小, 主要在 16.63 MPa 左右, 随着埋深的增加, 中部和下部断面受到的压应力相对较大, 主要在 18.74 MPa 左右。1 号断层受到的应力在 15.50 ~ 21.18 MPa, 应力较大, 有利于泥岩涂抹, 断层整体表现为封闭, 只是断层下部封闭性不如中部和上部封闭性好。

研究区断层埋深较深, 受到的应力较大, 主要在 13.74 ~ 23.15 MPa 之间, 足以导致泥岩发生塑性流动 (泥岩塑性变形所需要的最小压力 5 MPa), 有利于研究区断层封闭性。

3.4 封闭性综合评价

断层封闭性是由岩性对置、泥岩涂抹等多因素共同作用导致的, 综合岩性对置、泥岩涂抹和应力对断层封闭性评价比单一因素的评价更加准确、真实、可靠。

1 号断层是敖古拉—哈拉哈鼻状构造的一条典型一级断层。分析 1 号断层岩性与泥岩涂抹封闭评价图认为断层上部断层封闭性很好, 中下部因两套砂岩层因对接砂岩层, 泥岩涂抹一般, 高点开启, 油气运移, 导致封闭性相对较差 (见图 7)。综合 1 号断层岩性对置和泥岩涂抹情况认为敖古拉—哈拉哈鼻状构造发育的一级断层封闭性较好。

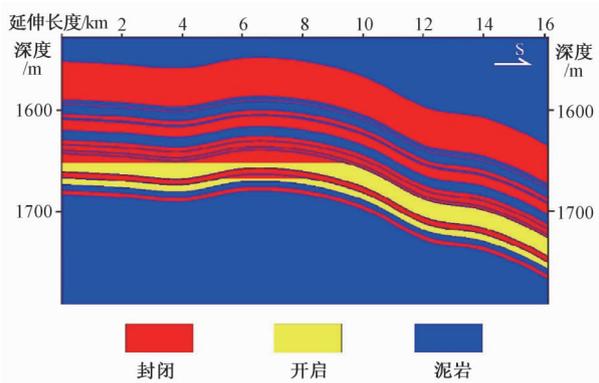


图7 1号断层岩性与泥岩涂抹封闭评价图(平行于断面)

Fig. 7 Fault sealing evaluation diagram of the fault 1 according to fault lithology and clay smearing (Parallel to the section)

15条典型断层中,鼻状构造断层岩性对置、泥岩涂抹和应力情况整体较好,其中龙南鼻状构造岩性对置、泥岩涂抹和应力情况最好,敖古拉—哈拉哈鼻状构造岩性对置、泥岩涂抹和应力情况较好,其次是高西鼻状构造;鼻状构造一级断层和三级断层岩性对置、泥岩涂抹和应力情况较好,三级断层岩性对置、泥岩涂抹和应力情况稍优于一级断层,二级断层岩性对置、泥岩涂抹和应力情况一般,位于向斜区的一级、二级和三级断层岩性对置、泥岩涂抹和应力情况较差(见表2)。

综合分析断层岩性对置、泥岩涂抹和应力情况,认为研究区断层封闭性的规律:一级断层和三级断层总体封闭性较好,其中三级断层封闭性好于一级断层封闭性,仅向斜区断层封闭性相对较差;二级断层总体封闭一般,与一级和三级断层具有相似特征,即鼻状构造断层封闭性较好,向斜区断层封闭性较差,其中龙南鼻状构造断层封闭性最好,敖古拉—哈拉哈鼻状构造断层封闭性较好,其次是高西鼻状构造,常家围子向斜和他拉哈向斜断层封闭性最差。

4 断层封闭演化史

断层对油气能否起到封闭作用,并非取决于其现今的封闭性,更重要的是地质历史时期的封闭性,尤其是油气运聚成藏时期的封闭性,所以研究断层封闭演化史至关重要。以1号断层为例分析断层封闭演化史。

1号断层是同沉积正断层,在泉头组沉积期开始发育(见图8a),两侧地层呈平行的状态,断层上部封闭性很好,下部因目的盘储层与砂岩层对接和泥岩涂抹一般,导致一套较厚的砂岩层仅顶部封闭和三层较薄的砂岩层完全开启;青山口组(见图8b)和姚家组(见图8c)沉积期是1号断层主要活动期,封闭盘(上盘)沉降速率明显大于目的盘(下盘),断距增加,较厚的砂岩层的封闭面积随沉积期逐渐扩大,第一、三层较薄的砂岩层也从开启—高点局部封闭—完全封闭的状态,第二套较薄的砂岩层在姚家组沉积期顶部开始封闭;嫩江组沉积期断层活动性逐渐减弱(见图8d),厚层砂岩层封闭面积进一步增大。

断层封闭演化规律表明,研究区大部分断层主要活动期在泉头组至嫩江组嫩二段沉积期之间,根据断层活动性与封闭演化史分析,认为在嫩江组嫩二段沉积期之前断层以开启为主,之后以封闭为主,即断层由早到晚、由下向上封闭性逐渐变好。

5 有利圈闭优选

研究区控制构造单元一级断层作为封闭断层,控制油气聚集带分布,而控制局部构造二级断层作为疏导断层,控制油气运移,控制微构造的三级断层调整油藏,控制富集甜点。依据断层封闭性评价研究,以凹陷中心为油源,二级断层为油气运移路径,一级断层为油气聚集区带的判识依据,判断油气运聚的关系,预测有利圈闭主要分布区带(见图9)。且结果显示研究区主要发育断鼻、断隆、断块、断阶等构造圈闭,也有少量构造圈闭发育在垒堑式等构造样式中。

6 结论

(1) 研究区断层以同沉积正断层为主,虽然活动性有差异,但总体表现为封闭性好于疏导性。

(2) 各构造单元断层封闭规律:鼻状构造断层封闭性优于向斜断层封闭性,其中龙南鼻状构造断层封闭性最好,敖古拉—哈拉哈构造断层封闭性较好,其次是高西鼻状构造,常家围子向斜和他拉哈向斜断层封闭性最差。

(3) 断层分级封闭规律:一级断层和三级断

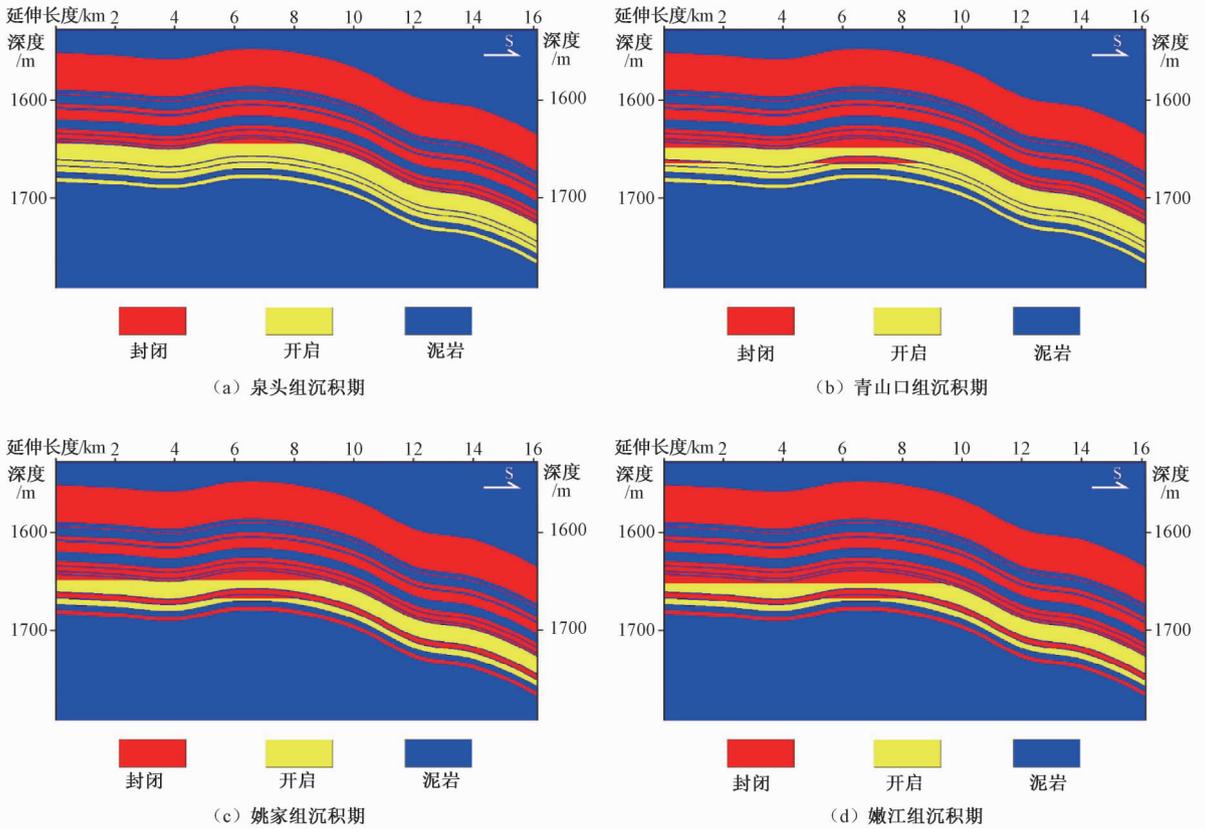


图8 1号断层封闭演化史(平行于断面)

Fig. 8 Fault sealing evolution of the fault 1 (Parallel to the section)

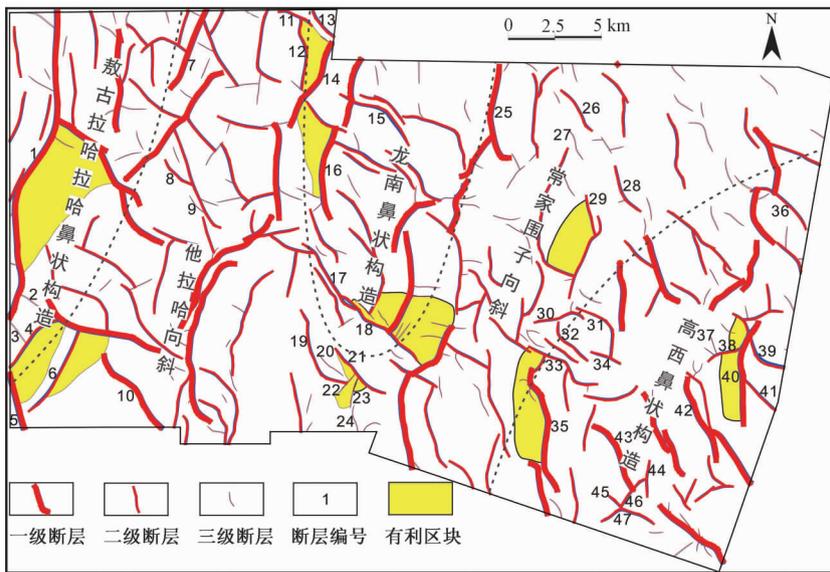


图9 古龙油田葡萄花油层有利区块预测图

Fig. 9 Diagram of the predicted favorable blocks of the Putaohua Oil Layer in the Gulong Oilfield

层总体封闭性较好, 其中三级断层封闭性好于一
级断层封闭性, 仅向斜区域断层封闭性相对较差;
二级断层总体封闭性一般, 与一级断层具有相似

特征, 即鼻状构造断层封闭性较好, 向斜区断层
封闭性较差。

(4) 断层封闭演化规律: 根据断层活动性与

封闭演化史分析,认为在嫩江组嫩二段沉积期之前断层以开启为主,之后以封闭为主,即断层由早到晚、由下向上封闭性逐渐变好。

(5) 研究区一级断层作为封闭断层,控制油气聚集带分布,二级断层作为疏导断层,控制油气运移,三级断层调整油藏,控制富集甜点,主要发育断鼻、断隆、断块等构造圈闭。

参考文献/References

- [1] 樊光明,朱志澄. 断裂构造研究的进展和趋势 [J]. 地球科学进展, 1996, 7 (6): 25~30.
FAN Guangming, ZHU Zhicheng. The progress and tendency of fault research [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1996, 7 (6): 25~30. (in Chinese)
- [2] 查明,吴孔友,曲江秀,等. 断陷盆地油气输导体系与成藏作用 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009, 160~190.
ZHA Ming, WU Kongyou, QU Jiangxiu, et al. Migration pathway and entrapment of hydrocarbons in faulted basins [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009, 160~190. (in Chinese)
- [3] 许欣欣. 古龙油田葡萄花油层沉积微相研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
XU Xinxin. Putaohua oil layer sedimentary microfacies study on gulong oil field [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王喜鑫. 古龙油田葡萄花油层地震解释与断裂特征研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
WANG Xixin. Seismic interpretation and study on the characteristics of fault in putaohua oil layer in gulong oil field [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王赛,王平平,李超,等. 摆宴井油区断层封闭性评价 [J]. 石油地质与工程, 2015, 29 (2): 42~45.
WANG Sai, WANG Pingping, LI Chao, et al. Fault sealing evaluation of Baiyan oil zone [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2015, 29 (2): 42~45. (in Chinese)
- [6] 陈永娇,周新桂,于兴河,等. 断层封闭性要素与封闭效应 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (6): 38~40.
CHEN Yongqiao, ZHOU Xingui, YU Xinghe, et al. Sealing factors of faults and their sealing effects [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30 (6): 38~40. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吕延防,付广,付晓飞,等. 断层对油气的输导与封堵作用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2013, 97~126.
LV Yanfang, FU Guang, FU Xiaofei, et al. Faults on oil and gas dredging and sealing [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013, 97~126. (in Chinese)
- [8] 吕延防,马福建. 断层封闭性影响因素及类型划分 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2003, 33 (2): 163~166.
LV Yanfang, MA Fujian. Controlling factors and classification of fault seal [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33 (2): 163~166. (in Chinese with English abstract)
- [9] 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19 (3): 215~220.
TONG Hengmao. Quantitative analysis of fault opening and sealing [J]. *Oil & Gas Geology*, 1998, 19 (3): 215~220. (in Chinese)
- [10] 张文彪,陈志海,许华明,等. 断层封闭性定量评价——以安哥拉 Sangos 油田为例 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22 (6): 21~26.
ZHANG Wenbiao, CHEN Zhihai, XU Huaming, et al. Quantitative evaluation of fault seal: a case study of Sangos oilfield in Angola [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22 (6): 21~26. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孟祥宏,王多云,李树同,等. 断层封闭性研究 [J]. 复杂油气藏, 2011, 4 (1): 1~4, 13.
MENG Xianghong, WANG Duoyun, LI Shutong, et al. An overview of research on fault seal property [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2011, 4 (1): 1~4, 13. (in Chinese with English abstract)
- [12] 程军林,宁吉泽. 定量评价断层封堵性 [J]. 断块油气田, 1999, 6 (4): 14~17.
CHENG Junlin, NING Jize. Quantitative evaluation on fault seal [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 1999, 6 (4): 14~17. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吕延防,王帅. 断层封闭性定量评价 [J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34 (5): 35~41.
LV Yanfang, WANG Shuai. Quantitative evaluation of fault seal [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34 (5): 35~41. (in Chinese with English abstract)
- [14] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. *AAPG*, 1989, 73 (7): 803~811.
- [15] 吕延防,王伟,胡欣蕾,等. 断层侧向封闭性定量评价方法 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43 (2): 310~316.
LV Yanfang, WANG Wei, HU Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43 (2): 310~316. (in Chinese with English abstract)
- [16] 邹华耀,金燕,黄光辉. 断层封闭与油气运移和聚集 [J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21 (1): 9~12, 17.
ZOU Huayao, JIN Yan, HUANG Guanghui. Fault sealing and its influence on petroleum migration and accumulation [J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1999, 21 (1): 9~12, 17. (in Chinese with English abstract)
- [17] 付广,史集建,吕延防. 断层侧向封闭性定量研究方法的改进 [J]. 石油学报, 2012, 33 (3): 414~418.
FU Guang, SHI Jijian, LV Yanfang. An improvement in quantitatively studying lateral seal of faults [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33 (3): 414~418. (in Chinese with English abstract)
- [18] 付晓飞,方德庆,吕延防,等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2005, 30 (3): 329~336.
FU Xiaofei, FANG Deqing, LV Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in Terms of the internal structure of fault zones [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30 (3): 329~336. (in Chinese with English abstract)
- [19] 任森林,刘琳,徐雷. 断层封闭性研究方法 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23 (5): 101~105, 126.
REN Senlin, LIU Lin, XU Lei. Research methods of fault sealing [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23 (5): 101~105, 126. (in Chinese with English abstract)
- [20] Lindsay N C, Murphy F C, Walsh J J, et al. Outcrop studies of shale smear on fault surface [J]. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, 1993, 15: 113~123.