

文章编号: 1009-3850(2013)03-0069-07

## 多种方法评价断层封闭性 ——以金湖凹陷石港断裂带为例

王新新, 戴俊生, 李旭航, 马洪坤

(中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 运用断层活动强度、现今应力作用方向与断层封闭效应及模糊综合评判方法, 对金湖凹陷石港断裂带地区的断层封闭性进行了评价。研究表明, 石港主控断层在不同位置的封闭性存在很大的差异, 具有“南开北闭”特征, 表现为断层在南部开启, 在北部闭合, 从而有效地封闭了油气。北部的次级派生断层封闭性较好, 在局部形成断层遮挡油气藏。通过模糊综合评判法评价断层封闭性, 认识到不同时期各断层封闭成藏情况不同: 阜宁组断层封闭性好于戴南组; 阜四段主要为泥岩, 封闭性最好; 阜二段和戴一段封闭性较好。分析结果与实际勘探状况相吻合。

**关键词:** 石港断裂带; 断层封闭性; 断层活动强度; 现今应力方向; 模糊综合评判

中图分类号: TE122.3<sup>+</sup>2

文献标识码: A

### 1 区域地质概况

金湖凹陷位于苏北盆地西南部, 是晚白垩世-新生代形成的南断北超的箕状断陷盆地(图1)。金湖凹陷内部断裂系统复杂, 南部的杨村断层作为凹陷主边界断层控制了箕状凹陷的形态, 石港断层与铜城断层作为凹陷内二级断层控制了凹陷内次凹的分布<sup>[1]</sup>。凹陷内主要发育新生界, 自下而上划分为古近系阜宁组、戴南组和三垛组, 新近系盐城组和东台组, 最大厚度达6000 m。金湖凹陷的主要烃源岩为三河次凹和龙岗次凹的阜二段、阜四段湖相深色泥岩, 于三垛末期—盐城早期大量排烃, 通过渗透性砂层及断层油气运移聚集。主要含油层系为阜宁组和戴南组, 阜宁组自下而上进一步划分为一段、二段、二段和四段, 戴南组自下而上划分为戴一段、戴二段。其中阜宁组二段中上部暗色泥岩段为有效烃源岩层, 二段下部和二段碎屑岩层为主要储集层, 四段的大套暗色泥岩段为区域盖层。在金湖凹

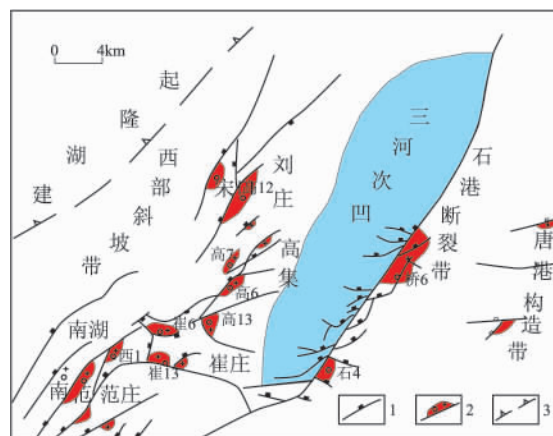


图1 金湖凹陷石港断裂带构造位置图

1. 断裂; 2. 局部构造; 3. 地层尖灭线

Fig. 1 Tectonic setting of the Shigang fault zone in the Jinhu depression

1 = fault; 2 = local structure; 3 = pitch out

收稿日期: 2013-05-09; 改回日期: 2013-05-20

作者简介: 王新新(1988-), 女, 在读研究生, 构造地质专业。E-mail: wangxin1103@163.com

资助项目: 国家科技重大专项“深煤层地应力预测及高渗富集规律研究”(2011ZX05042-001-001)及“精细油藏描述技术及剩余油赋存方式研究”(2011ZX05011-001)资助

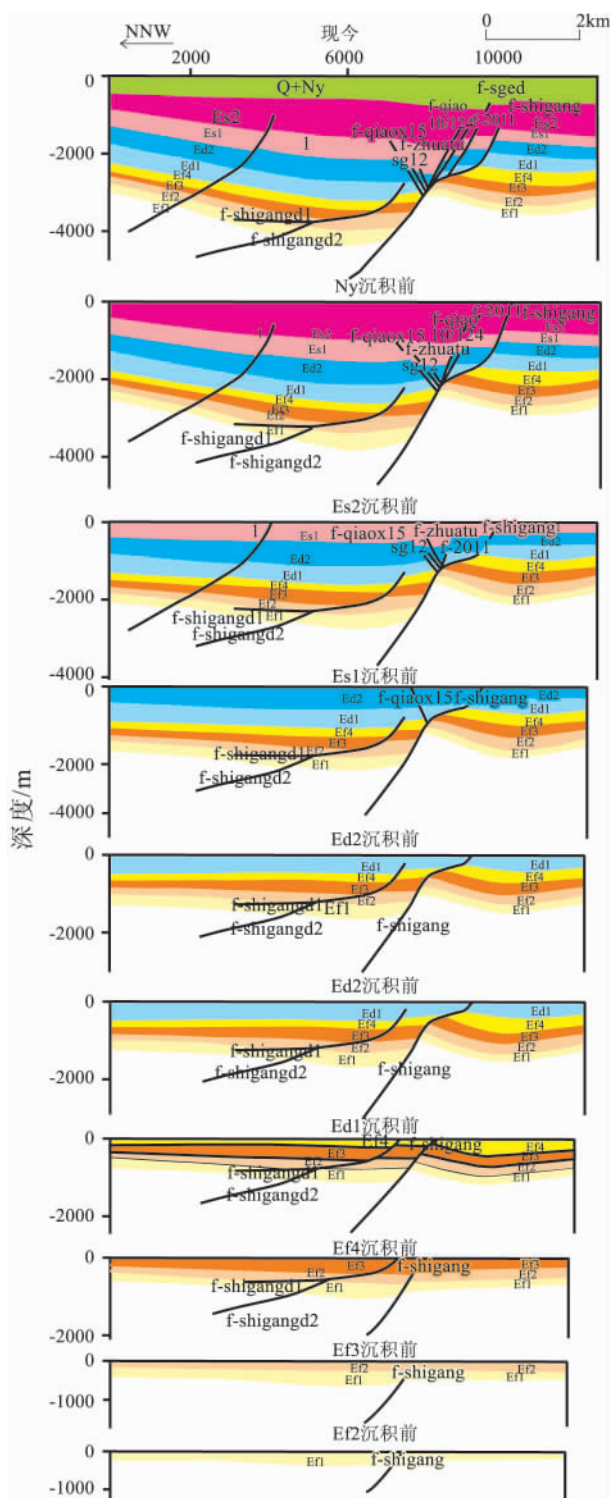


图2 金湖凹陷石港断裂带构造演化

Fig. 2 Diagrams showing the tectonic evolution of the Shigang fault zone in the Jinhu depression

陷,因发育阜二段优质烃源岩,加之阜宁组储集相带有利,发育阜二段上/阜二段下+阜一段及阜四段/阜三段有利生储盖组合;在该凹陷的三河、龙岗等深凹部位,阜四段烃源岩进入成熟门限,发育戴一段上/戴一段下储盖组合的小型油藏<sup>[24]</sup>。

石港断裂带位于金湖凹陷中部,三河次凹轴线以东,西南起于泥沛,东北经淮胜至宝应北,总体呈北东走向延伸,全长约 70km,其中主干断层的形态沿走向发生变化,并发育一系列分支断层,使断裂带结构复杂化。石港主断层为一长期活动的大断层,产生于燕山运动末期,终止于三垛期,以吴堡期最为活跃。由于该构造带临近生油深凹,其北部桥河口一带应是找油的有利地带<sup>[7]</sup>。

## 2 石港断裂带构造演化

平衡剖面法可以对断裂构造进行量化研究,对深刻认识构造演化史有重要意义<sup>[8]</sup>。笔者采用平衡剖面法在石港断裂带地区选取了可反映主要构造特征的三维地震剖面,编制了构造演化剖面(图2)。根据区域构造演化背景、构造演化剖面图,结合断层活动性,可将金湖凹陷石港断裂带地区构造演化划分为3个阶段:阜宁期走滑伸展主断层活动阶段、戴南三垛期强伸展走滑负花状构造发育阶段、新近纪第四纪稳定沉降阶段。

### 2.1 阜宁期走滑伸展主断层活动阶段

阜宁期属于古新世,区域上处于早期断一拗陷阶段,地表区域性快速拗陷下沉。该地区在阜宁组沉积初期断层发育相对较少,地层较平缓,主要表现为石港断层开始发育,成为金湖凹陷内部的次级正断层;后期受吴堡运动的影响,石港断层进一步活动,控制着区域上三、四级断层的发育和展布。

### 2.2 戴南三垛期强伸展走滑负花状构造发育阶段

戴南期—三垛期区域上处于中期断陷阶段,吴堡运动使原有的生长断层进一步活动。戴南期石港断层表现为强烈正断层活动,并演化成为控制半地堑式三河次凹的主边界断层;三垛组沉积时期,具有明显的右旋走滑正断层位移特征,并在南端尾部的上盘发育一系列近 EW 向正断层,与主干断层一起构成帚状断层系。

### 2.3 新近纪—第四纪稳定沉降阶段

从区域上看,新近纪和第四纪是苏北盆地裂陷期后的拗陷阶段,三垛事件使垛二段顶部受到剥蚀,顶面起伏不平,进入新近系盐城组沉积初期,沉积充填于地形低凹之处,此时断裂活动基本停止,地表进一步被夷平,接受新近系盐城组和第四系东台组的水平厚层稳定沉积。石港断裂带地区在这一构造背景下,构造运动缓和,基本无新生断层形成。

## 3 断层封闭性综合评价

3.1 断层活动强度与断层封闭性

早期活动的断层后期再活动时,对早期形成的断层岩有改造和破坏的作用,主要表现为两方面:一是早期形成的泥岩涂抹,使后期活动断距增大,从而将泥岩涂抹拉断<sup>[9]</sup>;二是早期形成的断层岩在晚期活动时产生裂缝,成为油气的运移通道。因此,早期形成的断层岩在晚期活动时容易被破坏,断层封闭性变差<sup>[10]</sup>。

从断层落差来看,研究区断层在戴南组的平均落差为 80m。戴一期,断层活动较强,表现为南强北弱;戴二期,发育一系列分支断层与主干断层斜交,断层活动性进一步增强。石港断层的活动性整体上表现为自南向北逐渐减小。断层活动性越强,断距越大,断裂带形成裂缝的可能性就越大。伴随着断裂带宽度的扩,增大了断层开启的可能性。如果断距超过了区域盖层的厚度,就有可能造成断层的垂向开启。在某种程度上,由断层活动强度可以定性判断断层的封闭性。石港断裂带地区北部断层活动弱,断层封闭性好。

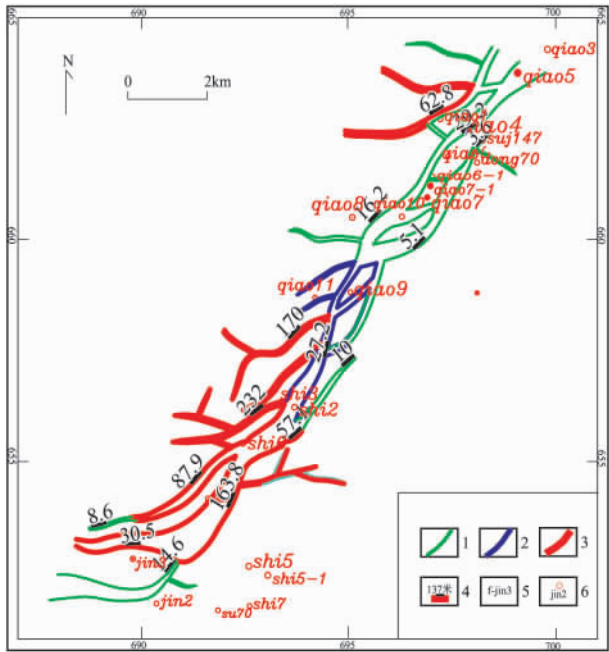


图3 石港断裂带戴一期断层落差平面图

1. 断层落差 < 30m; 2. 断层落差 30 ~ 50m; 3. 断层落差 > 50m; 4. 断层落差; 5. 断层名称; 6. 井号

Fig.3 Plan of fault throws in the Shigang fault zone during the deposition of the first member of the Dainan Formation

1. Drop height < 30 m; 2. Drop height in 30 - 50 m; 3. Drop height > 50 m; 4. Drop height; 5. Fault name; 6. Borehole

3.2 现今应力作用方向与断层封闭效应

现今最大水平主压应力方向与断层走向之间

夹角越大,越利于断层封堵油气,断层封闭性越好;其与断层走向的夹角越小,越不利于断层封堵油气,断层封闭性变差;二者之间交角近于 0°(两者近平行)时,断层对油气不具封闭性,可作为渗流通道<sup>[11-12]</sup>。但常因同一断层在不同部位走向不一,应力作用方向也有所不同,该夹角在断层不同部位和不同层段出现多变性。因此,必须分部位和分层段对断层封闭性进行研究评价<sup>[13]</sup>。

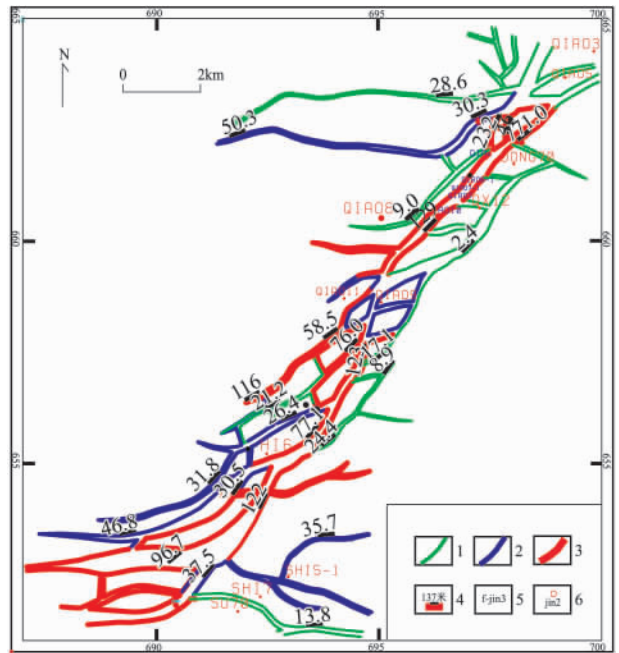


图4 石港断裂带戴二期断层落差平面图(图例同图3)

Fig.4 Plan of fault throws in the Shigang fault zone during the deposition of the second member of the Dainan Formation (symbols as in Fig.3)

石港断裂带的断裂系统以北东向的断层为主,以近东西向断层为辅。断层走向分布具有区域性,近东西向的分支断层与石港断层斜交,交角指向北东向。石港断层为该区的主干断层,主干断层的形态沿走向发生变化。石港断层南部,一系列分支断层向西南方向撒开形成帚状构造。

通过对断层及裂缝的产状、性质及组合关系研究认为:古最小主应力方向为近南北向,大小为 6MPa。由声速法及声发射法试验结果确定现今最小主应力方向为 NNW340°,大小为 32MPa;最大水平主压应力方向与最小主应力方向垂直,大小为 37MPa。由 ANSYS 软件模拟石港地区现今应力场结果显示:石港地区现今应力场最大水平主应力全部为挤压应力,最大水平主压应力值大小变化较大,最大值为 44.4MPa,最小值为 34MPa(图 5a)。



石 6 断块西部,石 4、石 11 断块为应力低值区。石港断裂随埋深增加自东向西应力值大小出现明显的条带状增大。石港断块内现今水平最大主应力方向(图 5b)变化较小,近于 NEE57.5°。

研究区主干断层的走向在北部是 NE 向,在南

部近 EW 向。最大水平主压应力方向与南部断层走向夹角近 0°,所以南部断层封闭性差;而最大主应力方向与北部断层走向夹角约 45°,北部断层在右旋走滑作用影响下,断层封闭性优于南部。

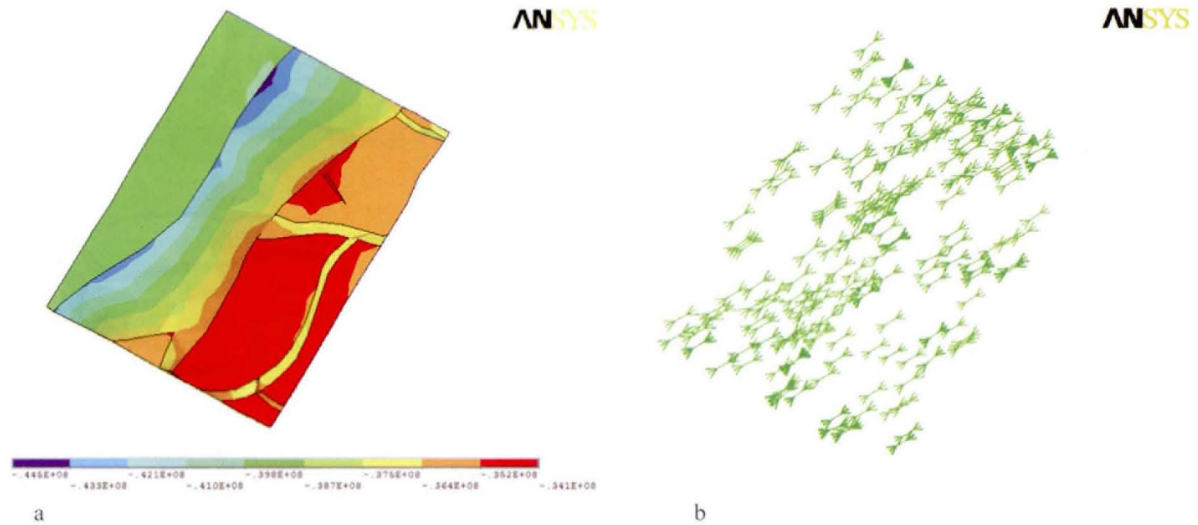


图 5 石港地区现今最大水平主压应力模拟结果

a. 石港地区现今最大水平主压应力大小; b. 石港地区现今最大水平主压应力方向

Fig. 5 Simulation diagrammation of the present-day maximum horizontal principal stresses in the Shigang fault zone

a. The extent of the present-day maximum horizontal principal stresss in the Shigang fault zone; b. The orientation of the present-day maximum horizontal principal stresss in the Shigang fault zone

石港断层在早期(吴堡期之前)是一条伸展断裂,晚期(戴南期-三垛期)受应力场方向的逐渐改变,断层性质由正断层转变为走滑正断层,尤其到了三垛组晚期,主应力场方向为近南北向。在早期伸展作用下,石港断裂南部走向与北部稍有差异,为 NEE 向,在晚期 NNE 或者近南北向应力作用下,南部表现为强拉张作用,形成了一系列近东西走向的断层。这些断层与北部走滑断裂相比封闭性差。

### 3.3 模糊综合评判法评价断层封闭性

利用断层活动强度、现今应力作用方向评价断层封闭效应是定性评价断层封闭性的方法,而模糊综合评判法是定量评价断层封闭性的一种方法<sup>[14-17]</sup>。

#### 1. 基本原理

模糊综合评判法评价断层封闭性是由邓俊国和蔡忠(1998)提出的,是应用模糊变换和最大隶属度原则,考虑影响断层封闭性的各种因素对其进行综合研究。在整个评判过程中,关键在于正确赋予各要素的权重系数,并建立单因素评价标准矩阵<sup>[18]</sup>。数学模型综合评判结果展开为矩阵形式:

$$B = WR \quad (1)$$

$$[b_1, b_2, \dots, b_n] = [w_1, w_2, \dots, w_n] \cdot [r_{ij}]_{m \times n} \quad (2)$$

式中:  $W_n$  为影响因素权重系数;  $r_{ij}$  为各因素隶属度;  $b_n$  为各因素综合评价结果。

在石港断裂带地区断层封闭性模糊综合评价中,主要考虑了断层、地层倾角组合关系,断层的活动时间,砂泥岩对接关系,砂岩含量,断裂的力学性质,泥岩涂抹系数,断层面承受的正压力和断层面的紧闭指数等 8 种因素,这些因素在研究区具有代表性<sup>[19-20]</sup>。

本文采用离散隶属函数确定单因素评判隶属度。根据各断层每一种因素的隶属度值建立单因素评价矩阵。依据改进的表度定义表<sup>[21]</sup>,对影响断层封闭性的各因素隶属度的确定如表 1。

通过分析表明,所选择的各单因素对断层封闭性的影响程度都较大,各因素所占的权重相当,因此选择德尔菲法,确定加权平均型作为计算模型。加权平均型公式为:

$$b_j = \sum w_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

表 1 断层封闭性指标隶属度取值及权重系数

Table 1 Membership values and weight coefficients of the fault sealing ability index

| 影响因素            | 评价标志      | 隶属度  | 权重   |
|-----------------|-----------|------|------|
| 断层、地层<br>倾角组合关系 | 同向式断层     | 0    | 0.05 |
|                 | 反向式断层     | 1    |      |
|                 | 地堑        | 0.6  |      |
|                 | 地垒        | 0.4  |      |
|                 | Y 字形断层    | 0.5  |      |
| 岩性对接关系          | 跟泥岩对接     | 1    | 0.05 |
|                 | 跟砂泥岩互层对接  | 0.5  |      |
|                 | 跟砂岩对接     | 0    |      |
| 砂 岩 含 量         | <18%      | 1    | 0.15 |
|                 | 18%~27%   | 0.5  |      |
|                 | >27%      | 0    |      |
| 断裂的<br>力学性质     | 压 扭 性 断 裂 | 1    | 0.15 |
|                 | 压性断裂      | 0.8  |      |
|                 | 扭性断裂      | 0.5  |      |
|                 | 张扭性断裂     | 0.25 |      |
|                 | 张性断裂      | 0    |      |
| 断层活动时间          | 断层在成藏之后活动 | 1    | 0.15 |
|                 | 断层在成藏之前活动 | 0    |      |
| 泥岩涂抹系数<br>SSF   | <1.68     | 1    | 0.05 |
|                 | 1.68~2.0  | 0.5  |      |
|                 | >2.0      | 0    |      |
| 断层面承受的正压力       | >30       | 1    | 0.2  |
|                 | 16~30     | 0.6  |      |
|                 | 12~16     | 0.3  |      |
|                 | <12       | 0    |      |
|                 | >1        | 1    | 0.2  |
| 紧闭指数            | 0.71~1    | 0.5  |      |
|                 | <0.7      | 0    |      |

2. 评价结果

本文对石港断裂带地区部分断层进行了评价 ( 表 2 ) 。不同性质的断层,同一断层不同走向的各段由于受力不同,封闭性也存在差异。石港断层可分为三段,北部断层封闭性较好,中部断层封闭性中等,南部断层封闭性较差。

表 2 断层封闭性评价结果

Table 2 Assessment of the fault sealing ability in the Shigang fault zone

| 时期  | 石港断层南部 | 石港断层中部 | 石港断层北部 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|-----|--------|--------|--------|----|----|----|----|----|
| 戴二期 | 差      | 差      | 较好     | 中等 | 差  | 中等 | 中等 | 差  |
| 戴一期 | 差      | 中等     | 较好     | 较好 | 较好 | 较差 | 中等 | 中等 |
| 阜四期 | 较好     | 较好     | 好      | 好  | 好  | 好  | 好  | 较好 |
| 阜三期 | 较好     | 较好     | 好      | 好  | 好  |    |    | 中等 |
| 阜二期 | 中等     | 中等     | 好      | 较好 | 较好 |    |    | 中等 |
| 阜一期 | 较好     | 较好     | 好      |    | 较好 |    |    | 较好 |

通过模糊综合评判方法对石港断裂带地区的断层封闭性进行评价,得出以下规律: ( 1 ) 桥河口地区断层封闭性优于石港地区,石港地区断层封闭性优于金南地区; ( 2 ) 弧形走滑雁列断层的受挤压一侧较另一侧具有更好的封闭性。石港断裂带成藏块主控断层都为雁列走滑断层,具有较好的封闭性,如苏 147、石 2 块等。本区雁列走滑断层一般整体为 NE-SW 走向,西部和东部走向有一定的差异,东部比西部更加接近于成藏期的主应力方向,在晚期近南北主应力作用下,东西两段运动特征也有差异,东侧走滑作用将比西侧更加强烈,断层封闭性更好。 ( 3 ) 不同时期各断层封闭成藏情况: 阜宁组断层封闭性好于戴南组,阜四段整体为泥岩封闭性最好,阜二段和戴一段封闭性较好。

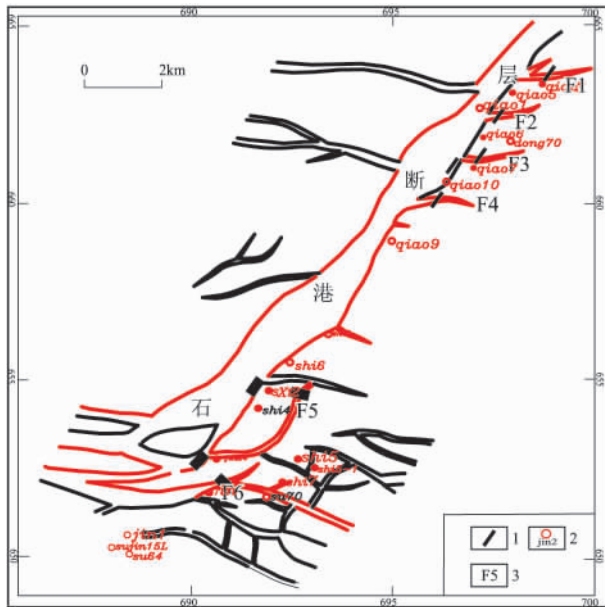


图6 断层位置图

1. 断层封闭性位置; 2. 井号; 3. 断层名称

Fig. 6 Location of the studied faults

1 = position of fault sealing; 2 = well number; 3 = fault name

### 3. 钻探结果与分析结果吻合

由于石港断裂带北部储盖组合条件较南部更有利,故石港断裂带成藏井及见显示井多集中分布在桥河口地区。桥河口地区共钻井 16 口,成功井为 7 口,钻探成功率达 44%;石庄地区共钻井 9 口,成功井 1 口(石 2 井),钻探成功率为 11%;金南地区共钻井 13 口,没有成功井,钻探成功率为 0,从钻探成功率也可以证实桥河口地区成藏条件优于石庄地区,更优于金南地区。

## 4 结论

(1) 石港断裂带古近纪经历了由简单到复杂的演化过程,阜宁期在主断层活动过程中其两侧断层发育,戴南三垛期负花状构造形成断层落差急剧扩大,早期伸展活动明显,晚期走滑活动强烈。

(2) 运用断层活动强度、现今应力作用方向与断层封闭效应及模糊综合评判方法对石港断裂带地区的断层封闭性进行评价,认为:桥河口地区断层封闭性优于石港地区,石港地区断层封闭性优于金南地区;

(3) 不同时期各断层封闭成藏情况不同:阜宁组断层封闭性好于戴南组;阜四段整体为泥岩,封闭性最好;阜二段和戴一段封闭性较好。

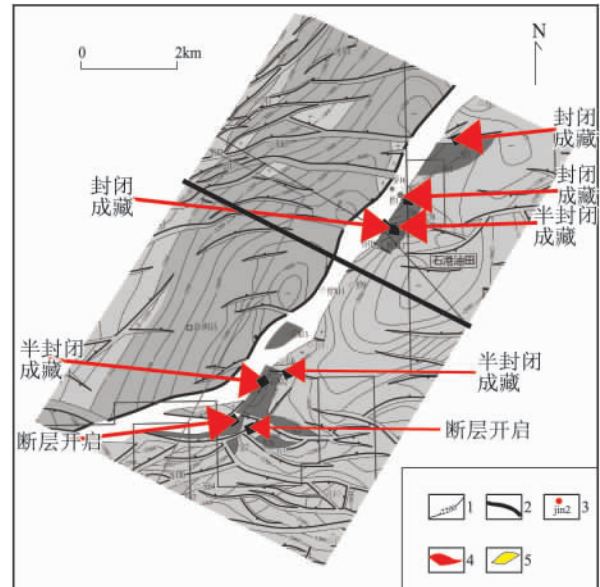


图7 断层封闭性成藏示意图

1. 地层厚度等值线; 2. 断层; 3. 井号; 4. 已勘探油藏; 5. 待勘探油藏

Fig. 7 Sketch to show the fault sealing reservoirs

1 = thickness isoline; 2 = fault; 3 = well number; 4 = explored oil reservoirs; 5 = unexplored oil reservoirs

## 参考文献:

- [1] 能源,漆家福,张春峰,等. 金湖凹陷石港断层构造演化及油气聚集特征 [J]. 石油学报,2009,30(5): 137-144.
- [2] 祝厚勤,刘平兰,庞雄奇. 勘探效益法在苏北盆地金湖凹陷油气资源评价中的应用 [J]. 天然气地球科学,2008,19(3): 362-365.
- [3] 江夏,周荔青. 苏北盆地富油气凹陷形成与分布特征 [J]. 石油实验地质,2010,32(4): 319-325.
- [4] 刘军,刘喜玲,田骏. 苏北盆地金湖四陷油气运移与聚集规律 [J]. 石油天然气学报,2005,27(6): 693-695.
- [5] 宋宁. 苏北盆地油气藏分布规律和主要控制因素 [J]. 上海地质,2010,31(增刊): 240-243.
- [6] 刘玉瑞,刘启东,杨小兰. 苏北盆地走滑断层特征与油气聚集关系 [J]. 石油与天然气地质,2004,25(3): 279-283.
- [7] 陈莉琼. 苏北盆地形成演化与油气成藏关系研究 [J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(4): 180-181.
- [8] 王运所,刘亚洲,张孝义等. 平衡剖面的制作流程及其地质意义 [J]. 长安大学学报,地球科学版,2003,25(1): 28-32.
- [9] 吕延防,张发强,吴春霞,等. 断层涂抹层分布规律的物理模拟实验侧 [J]. 石油勘探与开发,2001,28(1): 30-32.
- [10] 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): 35-40.
- [11] 邓俊国,刘泽容. 断块油藏中断层封闭性模糊综合评判 [J]. 地质论评,1993,39(增刊): 47-54.
- [12] 孙宝珊,周新桂,邵兆刚. 油田断层封闭性研究 [J]. 地质力学学报,1995,1(2): 21-27.
- [13] 周新桂,孙宝珊,谭成轩,孙宏斌,郑荣植,马常星. 现今地应

- 力与断层封闭效应 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 127-131.
- [4] 霍振钧, 赵建平, 贺向阳. 断层定量封堵分析 [J]. 小型油气藏, 2005, 10(1): 5-10.
- [5] 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.
- [6] 邢卫新, 汤达祯, 杨铭, 等. 断层封堵性定量研究在复杂断块油藏中的应用 [J]. 石油物探, 2006, 45(3): 250-255.
- [7] 刘启东, 李储华, 卢黎霞. 高邮凹陷断层封闭性研究 [J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 58-61.
- [8] 杨勇, 邱贻博, 查明. 用模糊综合评判方法研究断层封闭性 [J]. 新疆石油地质, 2005, 26(1): 102-104.
- [9] 刘玉瑞. 苏北盆地断层封堵类型及定量评价 [J]. 石油实验地质, 2009, 31(5): 531-536.
- [20] 宋守德. 断层垂向封闭性的影响因素及其对油气成藏的控制作用 [J]. 内蒙古石油化工, 2009, 24: 204-206.
- [21] 邓俊国, 王贤, 王伟锋. 模糊综合评判技术在柳堡断块圈闭评价中的应用 [J]. 断块油气田, 1999, 6(6): 5-9.

## Assessment of fault sealing ability: An example from the Shigang fault zone in the Jinhu depression, northern Jiangsu

WANG Xin-xin, DAI Jun-sheng, LI Xu-hang, MA Hong-kun

(School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong, China)

**Abstract:** The assessment of fault sealing ability of the Shigang fault zone in the Jinhu depression, northern Jiangsu is based on the faulting intensity, the orientation of the present-day crustal stress, fault sealing effects and fuzzy comprehensive judgment technique. There are greater differences in the fault sealing ability in different parts of the Shigang fault zone: generally open in the southern part and close in the northern part, which may be valid for the sealing of oil and gas. In the northern part, the secondary induced faults have better sealing ability, and may be considered as the barriers of oil and gas. Moreover, there are also differences in the fault sealing ability in different periods. The fault sealing ability in the Funing Formation is generally better than that in the Dainan Formation, especially best in the fourth member composed of mudstones of the Funing Formation, and better in the second member of the Funing Formation and the first member of the Dainan Formation.

**Key words:** Shigang fault zone; fault sealing ability; faulting intensity; orientation of the present-day stress; fuzzy comprehensive judgement