

文章编号:1009-2722(2013)04-0020-07

东海西湖凹陷平湖斜坡带 断层特征及其封闭性

蔡 华, 张建培

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030)

摘 要:在对西湖凹陷平湖斜坡带断裂系统特征定性分析的基础上,结合断层封闭性的半定量研究,总结了平湖斜坡带断层的封闭性特征。依据主干断裂及伴生断裂的平面组合样式、剖面组合关系等特征,将平湖斜坡带断裂系统划分为 4 个断裂带,由北至南依次为“K”同向断裂带、“W”反向断裂带、“P”同向断裂带和“N”埕式断裂带。断层封闭性研究认为平湖斜坡带中部断层封闭性要好于南部和北部。“K”同向断裂带和“W”反向断裂带多数断层封闭性较好,但由于平湖主断裂的长时间活动,使得整体封闭性一般。“P”同向断裂带由于受中新世末龙井运动的弱挤压反转作用,断层的封闭性较好。“N”埕式断裂带由于平湖主断裂的长期活动和沉降期断裂的存在,断层封闭性较差。

关键词:西湖凹陷;平湖斜坡带;断层特征;断层封闭性

中图分类号:P542.3

文献标识码:A

西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,呈 NNE 向展布,南北长约 500 km,东西平均宽约 130 km,面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,是东海陆架盆地中规模最大的古近系和新近系富油气凹陷。西侧自北而南依次与虎皮礁隆起、长江坳陷、海礁隆起、钱塘凹陷及渔山东隆起 5 个构造单元相接,东邻钓鱼岛褶皱带,南北以低凸起与钊北凹陷、福江凹陷相邻。西湖凹陷总体上可划分出 3 个构造带,即西部斜坡带、中央洼陷—反转构造带、东缘陡坡断隆带。各构造带又可进一步划分为一系列次级构造带或构造单元。其中,西部斜坡带自北向南可划分为杭州斜坡带、海礁湾斜坡带、平湖斜坡带和天台斜坡带;中央洼陷—反转构造带由西向东包括西次凹、中央反转构造带和东次凹(图 1)。

西湖凹陷新生代沉积凹陷是在晚白垩世末期的构造背景上发育起来的,研究区新生界沉积地

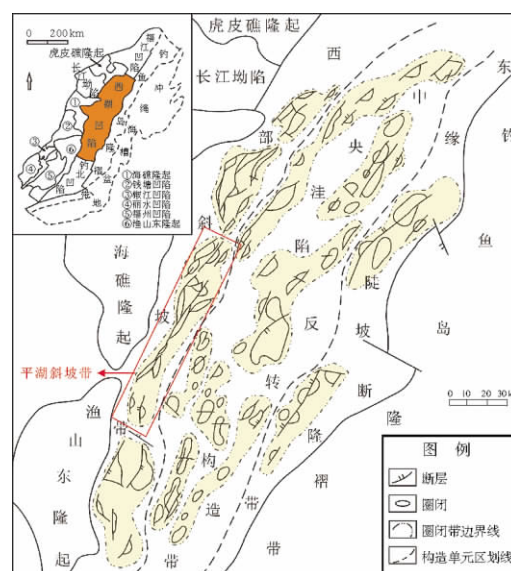


图 1 西湖凹陷构造区划示意图(据文献[1],略有修改)

Fig. 1 Schematic tectonic map of Xihu Sag
(modified from reference [1])

收稿日期:2012-12-28

作者简介:蔡 华(1966—),女,硕士,高级工程师,主要从事石油地质综合研究工作。E-mail:caihua@cnooc.com.cn

层自下而上主要为:始新统平湖组以下地层(古新统 E_1 ? 由于缺少钻井、测井、同位素、古生物等资料,地层属性尚难确定)、始新统平湖组(E_2p)、渐新统花港组(E_3h)、中新统龙井组(N_1^1l)、玉泉组(N_1^2y)和柳浪组(N_1^3l)、上新统三潭组(N_2s)及更新统东海群(Q_pdh)。

西湖凹陷形成于太平洋板块俯冲产生的弧后伸展环境,是由弧后深部物质上涌和软流圈上升造成拉伸形成的裂谷盆地^[2-6]。西湖凹陷大体上经历了“裂陷→坳陷→区域沉降”的演化过程,可以划分为 3 个构造演化阶段:盆地开始形成(古新世?)—始新世裂陷期、渐新世—中新世坳陷期、上新世—更新世沉降期。

平湖斜坡带位于东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带中段,油气钻探成功率高,所钻探井均见油气显示,多数获工业性油气流,是西湖凹陷内最有利的油气富集区带之一。虽然勘探成果丰硕,但仍然存在许多地质问题亟待解决,如:平湖斜坡带断块发育,构造复杂,断裂系统特征及成因机制尚不清楚;油气藏以断块型为主,断裂对沉积及油气成藏的控制作用尚未明确,严重制约了西湖凹陷油气勘探进程。本文在对平湖斜坡带断层特征分析的基础上,采用定性和半定量的技术对典型断层的封闭性进行了研究,以期为进一步的油气勘探工作奠定一定的理论基础。

1 平湖斜坡带断层特征

平湖斜坡带断裂系统极其发育,共有大小断裂 500 余条,以张性正断层为主。断层走向基本与主体构造线方向相一致,研究区北部断裂主要表现为 NE—SW 向,南部断裂主要表现为近 S—N 向(图 2)。多数断裂发育于渐新世以前(裂陷期),盆地开始接受沉积到始新统平湖组沉积时期活动较强烈,始新世末的玉泉运动后断裂活动明显减弱^[5]。

1.1 断裂系统分类

本次研究分别依据发育规模和期次对断裂系统进行分类。

1.1.1 依据断裂发育规模分类

在发育规模方面,西湖凹陷内的断裂按级别

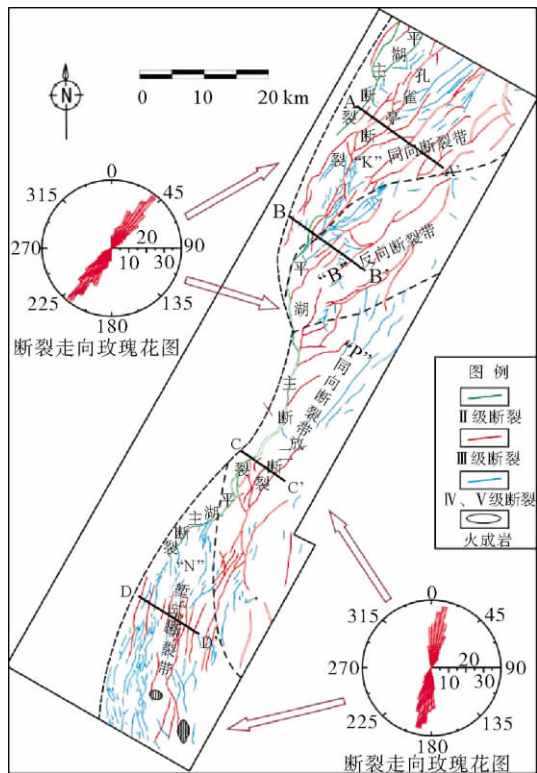


图 2 平湖斜坡带断裂系统展布特征

Fig. 2 Distribution patterns of the fault system on the Pinghu slope

和对各级构造单元的控制作用可划分为 5 级。

I 级断裂主要指控制凹陷和凸起的断裂,一般是沿基底断层活动的大断层,具有落差大、延伸长、形成时期早和活动时间长等特点,控制了古近系主要沉积层系的发育。西湖凹陷发育的 I 级断裂只有东部边界断裂,平湖斜坡带只发育 II 级及以下级次断裂。

II 级断裂主要指控制盆地内凹陷和凸起内部构造带的形成与发育的断裂,部分断层沿基底断层活动,落差较大,延伸较长,持续时间较长,在一定程度上控制了基底面以上各主要地层的沉积。平湖斜坡带典型的 II 级断裂为平湖主断裂。

III 级断裂主要是控制局部构造的断裂,对大的沉积环境影响较小,仅对断裂两盘的沉积起一定的控制作用,一般落差不大,规模较小。平湖斜坡带 III 级断裂比较发育。

IV 级和 V 级断裂主要是 I、II、III 级断裂的伴生断裂,起到重力、局部应力平衡调节作用,同时也对背斜、向斜等局部构造起控制作用。

1.1.2 依据断裂发育期次进行分类

在发育期次方面,结合凹陷构造演化阶段、断层形成时间、断开层位等特征,可将平湖斜坡带断裂系统划分为裂陷期断裂(盆地开始接受沉积—始新世)、坳陷期断裂(渐新世—中新世)和沉降期断裂(上新世—更新世)。其中,裂陷期断裂可进一步划分为第 1 裂陷期(盆地开始接受沉积—始新世平湖组沉积之前)断裂和第 2 裂陷期(始新统平湖组沉积时期)断裂。

1.2 断裂带划分

依据主干断裂及伴生断裂的平面组合样式、剖面组合关系等特征,可以将平湖斜坡带断裂系统划分为 4 个断裂带,由北至南依次为:“K”同向断裂带、“W”反向断裂带、“P”同向断裂带及“N”型断裂带。下面重点分析不同断裂带在剖面上的断裂组合特征,总结构造样式演化规律。

(1) “K”同向断裂带

大部分断裂走向与平湖主断裂北段平行,倾向 SE,和平湖主断裂呈同向阶梯状下掉,断面呈小曲率铲型。其中主要的数条Ⅲ级断裂上断至渐新统花港组下部,下断至盆地基底界面,为同生断裂,控制裂陷期地层沉积,尤其在第 1 裂陷期断裂的活动性最强。除了上述Ⅲ级断裂以外,“K”同向断裂带还发育许多Ⅳ、Ⅴ级断裂,与Ⅱ、Ⅲ级断裂的控凹、控沉积相比,这类断裂仅对小规模的局部构造起控制作用,大部分只是起到调节应力平衡的作用。“K”同向断裂带以发育伸展构造样式为主,其中多米诺式构造最为显著,靠近盆地一侧局部发育梳状构造(图 3)。

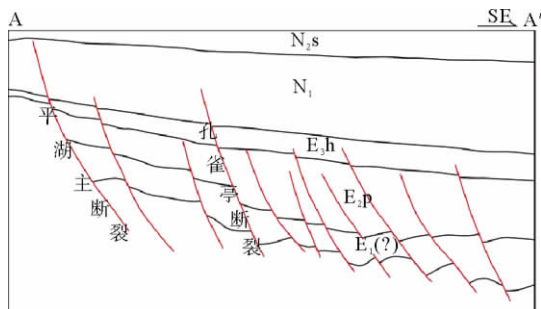


图 3 “K”同向断裂带构造样式

Fig. 3 Structural styles of “K” synthetic fault zone

(2) “W”反向断裂带

与“K”同向断裂带相比存在明显差异,大部分断裂都未延伸至渐新统花港组,主要为裂陷期断裂,该区的Ⅲ级断裂均是平湖主断裂的伴生断裂,倾向 NW,与平湖主断裂相反,断面旋转幅度大,对裂陷期构造层的沉积起控制作用,但并不显著。此外,Ⅳ级、Ⅴ级断裂均为晚期断裂,数量较少,对沉积不起控制作用。“W”反向断裂带以发育伸展构造样式为主,常见梳状和垒堑式构造(图 4)。

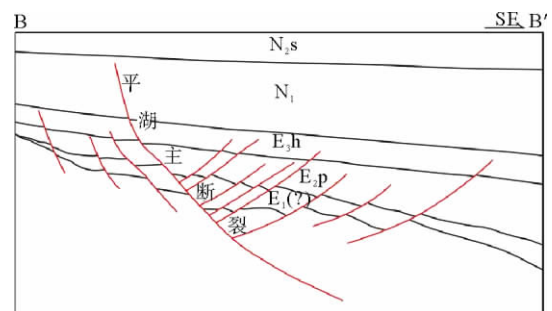


图 4 “W”反向断裂带构造样式

Fig. 4 Structural styles of “W” antithetic fault zone

(3) “P”同向断裂带

和“K”同向断裂带也存在显著区别,首先平湖主断裂与其北段相比倾角变大,断面形态过渡为高角度铲型、断坡式和断坡—断坪—断坡式,第 1 裂陷期断裂活动强烈程度和对沉积的控制作用明显增强;其次,“P”同向断裂带次级断裂大部分与平湖主断裂倾向相同,对平湖主断裂下降盘的沉积起到较大的控制作用,活动强度和生长性均较强。“P”同向断裂带除发育伸展构造样式外,还可见反转构造样式。前者主要为多米诺式和正牵引构造(图 5),组成多米诺式构造的断层倾角比北部“K”同向断裂带更大,断面较为平直。正牵引构造在“P”同向断裂带普遍发育,沿平湖主断裂最为显著。受中新世末龙井运动影响,“P”同向断裂带在先期伸展构造基础上产生微弱正反转构造,主要表现为地层收缩挤压变形,未见逆冲断层。

(4) “N”型断裂带

平湖主断裂在“N”型断裂带走向转变为 NE,断面为铲型,断裂活动强度向南逐渐减弱。

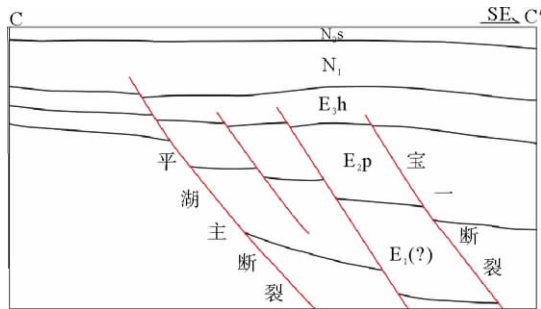


图 5 “P”同向断裂带地震剖面

Fig. 5 Structural styles of “P” synthetic fault zone

该区以发育倾向 NW 的正断层为主,在东部发育少量倾向 SE 的正断层。“N”型断裂带断裂发育比较复杂,不像其他断裂带规律性那么明显,断裂的活动强度和对沉积的控制作用相对较弱,而且发育许多层间次级断裂和晚期断裂。在构造样式方面,“N”型断裂带以发育伸展构造样式为主,其中垒式构造最为显著,局部伴生梳状构造(图 6)。

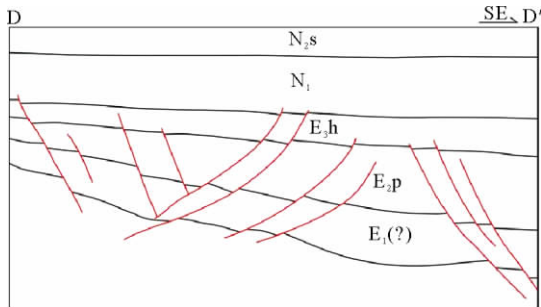


图 6 “N”型断裂带地震剖面

Fig. 6 Structural styles of “N” graben-type fault zone

2 断层封闭性研究方法

断层封闭性是指断层的上下盘岩石或断裂带与断层上下盘岩石由于排替压力的差异,而阻止流体继续流动的性质^[7-11]。断层的封闭性在空间上表现为 2 个方面:①断层的侧向封闭性,即断层面在侧向上阻止流体穿越断层运移的能力;②断层的垂向封闭性,即断裂带物质阻止流体沿断裂带纵向运移的能力^[12]。

断层封闭性的研究方法很多,本文主要用到的是定性和半定量的地质分析法。

(1) 定性的断层封闭性研究

主要是对影响断层封闭性的因素进行分析。在断层侧向封闭性的研究中,主要从断裂带充填物的性质、断层两盘对置岩性、断层同生性等因素进行分析;在断层垂向封闭性的研究中,主要从力学性质、断面几何形态、断层延伸与区域挤压应力场的关系、断层断穿上覆盖层的程度、断层活动性、埋深、断裂带充填物性质等因素进行分析。

(2) 半定量的断层封闭性研究^[13-16]

目前主要是通过编制 ALLAN 剖面图(断层面剖面图),建立断层两侧地层并置对接模型,计算断层面压力、泥岩涂抹潜力(CSP)、泥岩涂抹因子(SSF)及断层泥比率(SGR),建立泥岩涂抹因子(SSF)、断层泥比率(SGR)与断层两侧地层压力差的关系图、断距与储层厚度关系图,以及其他各种统计学方法的应用来判断断层的封闭性能。该方法研究结果较为可靠,且可操作性强。

本次研究主要是通过编制 ALLAN 剖面图和计算泥岩涂抹因子(SSF)来分析平湖斜坡带断层的封闭性特征。ALLAN 剖面图又称断层面剖面图,可以反映断层两盘岩性对置关系^[17],该图可以分析断层侧向的封闭性。泥岩涂抹因子(SSF)是断距与泥岩层厚度的比值,反映了断层带内部泥岩的涂抹程度,可以半定量地判定断层的相对封闭性程度。涂抹因子越小,泥岩涂抹程度越高,断层封闭性越好;涂抹因子越大,泥岩涂抹程度越低,断层封闭性越差^[13]。

3 平湖斜坡带典型断层封闭性

受研究区资料限制,本文从断面几何形态、力学性质、断层活动性、埋深、目的层泥岩含量等方面对各断裂带的封闭性做了定性分析;并在此基础上利用断层两盘的岩性对置和泥岩涂抹对各断裂带典型断层的封闭性做了半定量分析。平湖斜坡带各断裂带及典型断层的封闭性特征如下。

(1) “K”同向断裂带

断面上陡下缓,但整体倾角不大。目的层始新统平湖组地层埋藏较深,上覆地层静岩压力较大,断裂带愈合程度较好,使得断层垂向封闭性较好;平湖组泥岩含量达 64.8%,泥岩涂抹效果较好,侧向封闭性也较好。“K”同向断裂带大部分

断层仅在裂陷期(盆地开始接受沉积—始新世)活动,所以大部分断层垂向和侧向封闭性均较好,但该断裂带内平湖主断裂活动时间较长,中新世末才停止活动,使得“K”同向断裂带的整体断层封闭性一般。

孔雀亭断裂是“K”同向断裂带内的典型断层(图 2),通过对孔雀亭断裂两盘始新统平湖组岩性对置关系分析可以看出,砂泥对接概率很小,砂泥对接侧向封堵效果不好,尤其是平湖组上部和下部(图 7),而平湖组中部封闭性一般。在泥岩涂抹方面,由于平湖组泥质含量高,孔雀亭断裂泥岩涂抹效果较好(图 8)。综合岩性对置和泥岩涂抹 2 种评价结果可知:孔雀亭断裂在平湖组中部封闭性一般,而在平湖组上部和下部较差。

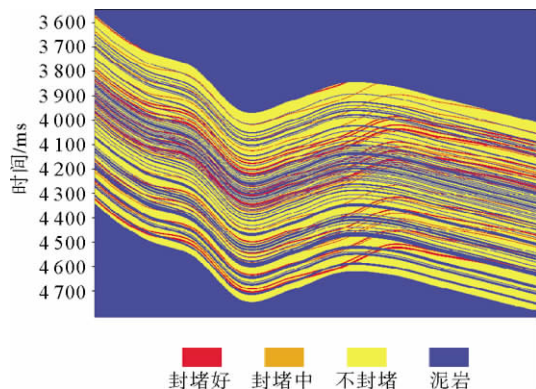


图 7 孔雀亭断裂平湖组两盘岩性对置评价

Fig. 7 The lithology contraposition evaluation map of Pinghu Formation on both sides of Kongqueting fault

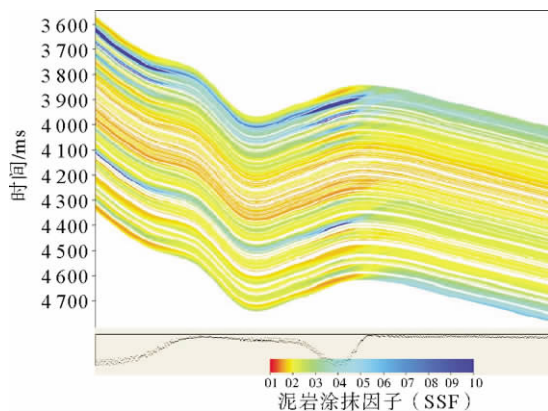


图 8 孔雀亭断裂平湖组 SSF 封堵指数评价

Fig. 8 The SSF sealing index evaluation map of Pinghu Formation on both sides of Kongqueting fault

(2)“W”反向断裂带

大部分断层断面较缓,上覆地层对断面会产生较大的静岩压力,因而垂向封闭性较好。平湖组泥岩含量达到了 74.2%,所以泥岩涂抹效果比较好,侧向封闭性也比较好。此外,“W”反向断裂带大多数断层在始新世末就停止活动,断层封闭性较好,但由于平湖主断裂的长期活动,该断裂带整体断层封闭性一般。

(3)“P”同向断裂带

断面平直、倾角较陡、断距较大,虽然泥岩含量为 63.3%,但泥岩涂抹效果一般,断层封闭性一般,然而在中新世末龙井运动的弱挤压反转作用下,该带断层的封闭性有所加强^[18]。

放二断层作为“P”同向断裂带内的典型断层(图 2),断层两盘始新统平湖组泥质含量较高,有利于砂泥对接和泥岩涂抹。从放二断层始新统平湖组岩性对置关系图上可以看出断层两盘砂泥对接概率比较大,整体侧向封闭性较好,尤其是平湖组中部(图 9)。此外,从放二断层泥岩涂抹因子 SSF 来看(图 10),也能说明放二断层具备较好的断层封闭性。综合上述 2 种评价方法可知,放二断层在平湖组整体上封闭性较好,尤其是平湖组中部。

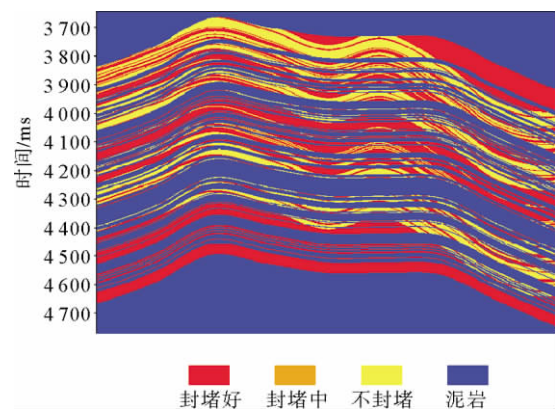


图 9 放二断层平湖组两盘岩性对置评价

Fig. 9 The lithology contraposition evaluation map of Pinghu Formation on both sides of Fang'er fault

(4)“N”正式断裂带

主要由平湖主断裂南段及与其伴生的次级断裂(Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ级)组成。平湖主断裂南段和Ⅲ级断裂活动时间较长,主要在裂陷期发育,中新世末

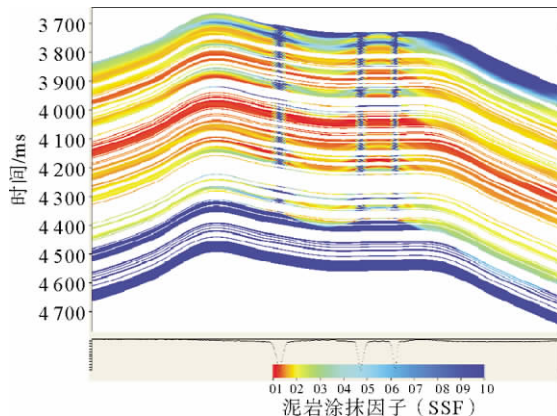


图 10 放二断层平湖组 SSF 封堵指数评价

Fig. 10 The SSF sealing index evaluation map of Pinghu Formation on both sides of Fang'er fault

才停止活动;Ⅳ和Ⅴ级断裂多为沉降期断裂(上新世—更新世),晚期活动;断裂的长期活动导致“N”型断裂带整体的断层封闭性较差。

综上所述,“K”同向断裂带和“W”反向断裂带多数断层封闭性较好,但由于平湖主断裂的长期活动,这 2 个断裂带的整体断层封闭性一般。“P”同向断裂带由于受中新世末期龙井运动的弱挤压反转作用,断层的封闭性较好;“N”型断裂带由于平湖主断裂的长期活动以及沉降期断裂的存在,断层封闭性较差。

4 结论与认识

(1)平湖斜坡带断裂系统可划分为 4 个断裂带,由北至南依次为“K”同向断裂带、“W”反向断裂带、“P”同向断裂带和“N”型断裂带。“K”同向断裂带以发育多米诺式构造为主,局部发育梳状构造;“W”反向断裂带发育梳状和垒型构造;“P”同向断裂带主要为多米诺式和正牵引构造,局部见微弱反转构造;“N”型断裂带以垒型构造为主,局部伴生梳状构造。

(2)断层封闭性研究认为平湖斜坡带中部断层封闭性要好于南部和北部。其中,“K”同向断裂带和“W”反向断裂带多数断层封闭性较好,但由于平湖主断裂的长时间活动,使得整体封闭性

一般;“P”同向断裂带由于受中新世末龙井运动的弱挤压反转作用,断层的封闭性较好;“N”型断裂带由于平湖主断裂的长期活动和沉降期断裂的存在,断层封闭性较差。

参考文献:

- [1] 张建培,张 涛,刘景彦,等. 西湖凹陷反转构造分布与样式[J]. 海洋石油,2008,28(4):14-20.
- [2] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(上)[J]. 海洋石油,2004,24(4):6-14.
- [3] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(下)[J]. 海洋石油,2005,25(1):1-9.
- [4] 张建培,唐贤君,张 田,等. 平衡剖面技术在东海西湖凹陷构造演化研究中的应用[J]. 海洋地质前沿,2012,28(8):41-47.
- [5] 张建培. 东海西湖凹陷平湖斜坡带断裂系统特征及成因机制探讨[J]. 地质科学,2013,48(1):291-303.
- [6] 钟志洪,张建培,孙 珍,等. 西湖凹陷黄岩区地质演化及断层对油气运聚的影响[J]. 海洋石油,2003,23(5):30-35.
- [7] Smith D A. Theoretical consideration of sealing and non-sealing faults[J]. AAPG, 1966, 50:363-371.
- [8] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures[J]. AAPG, 1989, 73:803-811.
- [9] 吕延防,付 广,张云峰,等. 断层封闭性研究[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
- [10] 郑秀娟,于兴河,王彦卿. 断层封闭性研究的现状与问题[J]. 大庆石油地质与开发,2004,23(6):19-21.
- [11] 宋来明,贾达吉,徐 强,等. 断层封闭性研究进展[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(5):13-16.
- [12] 宋明春,付 广,郭忠文,等. 断层垂向封闭性研究及应用实例[J]. 中国石油勘探,2003,8(2):55-59.
- [13] 吕延防,李国会,王跃文,等. 断层封闭性的定量研究方法[J]. 石油学报,1996,17(3):39-44.
- [14] 赵密福,李 阳,李东旭. 泥岩涂抹定量研究[J]. 石油学报,2005,26(1):60-64.
- [15] 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研究[J]. 石油勘探与开发,2001,28(1):30-32.
- [16] 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.
- [17] 曹代勇,吴李泉,占文锋,等. 断层应力封闭性的 FLAC 模拟研究[J]. 煤田地质与勘探,2005,33(1):1-3.
- [18] 张明利,王 展. 东海西湖凹陷构造应力场与油气运聚探讨[J]. 中国海上油气(地质),2003,17(1):51-55.

CHARACTERISTICS OF FAULTS ON THE PINGHU SLOPE OF XIHU SAG, THE EAST CHINA SEA SHELF BASIN AND THEIR SEALING CAPACITY

CAI Hua, ZHANG Jianpei

(Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the qualitative analysis of the faults on the Pinghu slope of Xihu Sag, we conducted the semi-quantitative study of their sealing capacity in this paper. According to the lateral and vertical framework of the faults, the fault system in the Pinghu slope can be divided into four fault zones, i. e. the “K” synthetic fault zone, “W” antithetic fault zone, “P” synthetic fault zone and “N” graben-type fault zone from north to south. Results showed that the fault sealing capacity was higher in the middle part of the slope rather than in the south and north parts. The sealing capacity of most “K” synthetic fault zone and “W” antithetic fault zone was high. However, due to the long-term activity of the main Pinghu fault, the fault sealing capacity became ordinary as a whole. As the result of the weak compressive inversion of the Longjing movement by the end of Miocene, the sealing capacity of the “P” synthetic fault zone was fine. But the fault sealing capacity of the “N” graben-type fault zone was low, due to the long-term activity of the main Pinghu fault and the occurrence of the faults in subsidence period.

Key words: Xihu Sag; Pinghu slope; fault characteristics; fault sealing capacity

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部

2013. 1