

尼日尔三角洲 E 背斜顶部断裂演化机制及封闭性

谢昭涵^{1,2,3}, 孙永河^{1,2,3}, 闫玉民⁴, 胡光义⁵, 范廷恩⁵, 刘宗堡^{1,2,3}

(1. 东北石油大学 CNPC 断裂控藏研究室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 黑龙江省科技创新团队“断裂变形、封闭性及流体运移”, 黑龙江大庆, 163318; 3. 东北石油大学 非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆 163318; 4. 中国石油 华北油田公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062552; 5. 中海油研究总院, 北京 100028)

摘要:尼日尔三角洲深水区 E 油田背斜顶部发育大量密集断层, 多数断层倾向一致呈多米诺式排布, 活动机制和期次不清楚, 对油水的分隔作用不明确。基于构造解析思想, 通过构造平衡剖面 and 古构造图回剥技术研究 E 背斜的轴面迁移过程, 结合断裂成核理论明确断裂活动期次和机制, 进而划分断裂系统, 指导断裂的封闭性评价。提出深水背斜顶部正断层重力滑动的演化机制, 确定多米诺式正断层与背斜轴面迁移的多期次对应关系。E 构造共分为 4 个演化阶段, 发育 7 类断裂系统, 其中三个期次的重力滑动断阶(阶梯式)断层为本区独有的特殊构造, 在古背斜背景下受控于重力作用变形。逆冲断层和多期活动断层的封闭趋势强, 重力滑动断阶断层具有潜在封闭性, 而晚期伸展断层不具有封闭能力, 筛选出 16 条潜在封闭断层。确定本区断层弱封闭 SGR 临界值为 8%, 完全封闭临界值为 20%, 评价结果显示: 其中 8 条断层完全封闭, 能够将断层两盘分隔为不同油水单元, 4 条断层具有弱封闭能力, 不分隔油水, 仅影响注水受效, 从而指导油田的钻井和注采方案设计。

关键词:断裂演化; 断层封闭性; 油水分布; 深水背斜; 尼日尔三角洲

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

Structural evolution mechanism and sealing of faults on the crest of anticline E in Niger Delta

Xie Zhaohan^{1,2,3}, Sun Yonghe^{1,2,3}, Yan Yumin⁴, Hu Guangyi⁵, Fan Ting'en⁵, Liu Zongbao^{1,2,3}

(1. Laboratory of CNPC Fault-controlling Reservoirs, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Heilongjiang Science and Technology Innovation Team on "Fault Deformation, Sealing and Fluid Migration", Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. State Key Laboratory Base of Unconventional Oil and Gas Accumulation and Exploitation, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 4. Research and Development Institute, PetroChina Hubei Oilfield, Renqiu, Hebei 062552, China; 5. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: Numerous faults were developed on the crest of anticline E in deep water of Niger Delta. They were observed to dip mostly in the same direction and arrange in a domino style. Uncertainties remain in such domains as what their mechanism is, how many stages they had experienced, and what role they played in dividing oil from water. Based on structural analysis, we studied the axial plane migration of E anticline through structural balanced sections and back-stripping of paleotectonic maps. Guided by the theory of fracture nucleation, we identified the active stages and mechanisms of the faults and then categorized the faulting systems to further perform assessment of sealing capacity of the faults. Gravitational sliding was identified as the evolution mechanism of the normal faults at the crest of the anticline. A correspondence of multiple stages between the domino-style normal faults and the anticline axial plane migration was also established. We proposed that the E structure had experienced four evolution stages and developed 7 types of faulting systems, among which, 3 were gravitational sliding step-faults -quite unique in the area- and were controlled and deformed by gravity against a paleo-anticline setting. Thrust faults and faults with multi-stage movement are the best sealing faults, gravitational sliding step-faults have sealing potential, and later extensional faults have no sealing capacity. About 16 faults were selected as potential sealing faults. The results show a critical SGR value of 8% for weak sealing, and 20% for fully sealing. There

收稿日期: 2017-01-18; 修订日期: 2017-08-10。

第一作者简介: 谢昭涵(1988—), 男, 博士研究生, 构造地质。E-mail: 569430279@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572127, 41502136); 中国石油天然气股份有限公司重大科技项目(2016D-0702)。

were 8 fully-sealed faults that could form different oil/water units in its hanging and foot walls, respectively. There were 4 weakly-sealed faults that could not separate oil from water but only influence responses to water flooding. The study can be used to guide drilling and injection-production planning of oil fields in the area.

Key words: fault evolution, fault sealing capacity, oil and water distribution, deep water anticline, Niger Delta

尼日尔三角洲位于西非被动大陆边缘,处于海岸线从东西向延伸转向南北向延伸的转弯处,主要位于尼日利亚境内,是世界上第12大的原油生产地^[1],也是将来具有广阔勘探前景的盆地^[2-3]。盆地面积约为 $2.13 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。西侧与贝宁盆地相邻,东部边界为喀麦隆火山脊,北部与阿南布拉盆地相接^[4]。受沉积作用和构造作用的影响,三角洲分为西部和南部两个舌状体,中间被一与断裂作用有关的3 km高的大洋底部正向构造分开^[5]。尼日尔三角洲主要的地质自下而上根据岩性和地震相划分为阿卡特组(Akata Fm.)、阿哥巴达组(Agbada Fm.)和贝宁组(Benin Fm.),均为穿时的地层单元^[3]。下部阿卡特组为始新世至今沉积的海相页岩,代表前三角洲(底积层)远端沉积环境,大套页岩夹透镜状砂岩,暗色富含有机质,是理想的烃源岩;中部阿哥巴达组是三角洲斜坡相(前积层),为海相、滨海和海陆交互相,砂岩、粉砂岩、泥岩互层,局部地区也是主要的生油层;上部贝宁组是渐新世至今沉积的三角洲平原相(顶积层),主要为砂岩^[2],是主要的储集层。20世纪60—70年代,海上钻探进尺达到高峰期,此后数十年随着井资料和地震资料数量增多和品质提高,勘探开发取得很大进展,90年代开始,陆续认识到三角洲重力构造(泥底辟、泥火山等)的特征、构造分区及成因^[6-9]。在沉积方面,利用海底浅部

的地形勘测和高品质地震探明了深水水道的沉积和侵蚀作用,探明了海底谷线梯度、海底地形、水道容积等属性对水道的控制^[10-11]。1988年开始,国内学者也开始关注尼日尔三角洲^[12]。研究方向集中在区域石油勘探和局部的地震、层序和储层构型研究^[3-4,13-14],而对于三角洲构造演化方面研究薄弱^[15-16]。

研究区位于西非尼日尔三角洲东部1 000~1 500 m水深海域,位于Harcourt港以南大约200 km(图1),包含五个主要的正向构造,分别为P、A、E、ES和EE构造。从平面上看,北部发育一条大规模逆冲断层,中部主要形成褶皱,不发育大规模断层,南部发育数条规模不等的逆冲断层,其中EE和ES构造的两条主控逆冲断层规模与北部P构造的逆冲断层相当,将这些控制了正向构造单元分布的大规模逆冲断层分别命名为F1—F7(图1)。本文的重点研究目标E背斜,是在F3和F5逆冲断层之间的转换带发育的短轴背斜(长轴、短轴比约为2:1),E背斜油气富集,主要产油层位于上中新统(R80)的深水水道和朵叶砂体,地震剖面上可识别出6个主要地震反射界面,自下而上分别为H6—H1(图2),其中E背斜的主力油层R80位于H5和H4反射层之间。E背斜发育了复杂的断裂系统,主要表现在:①既有正断层,又有逆断层和走滑断层,断层性质多变;②断层数量多,在220 km²范

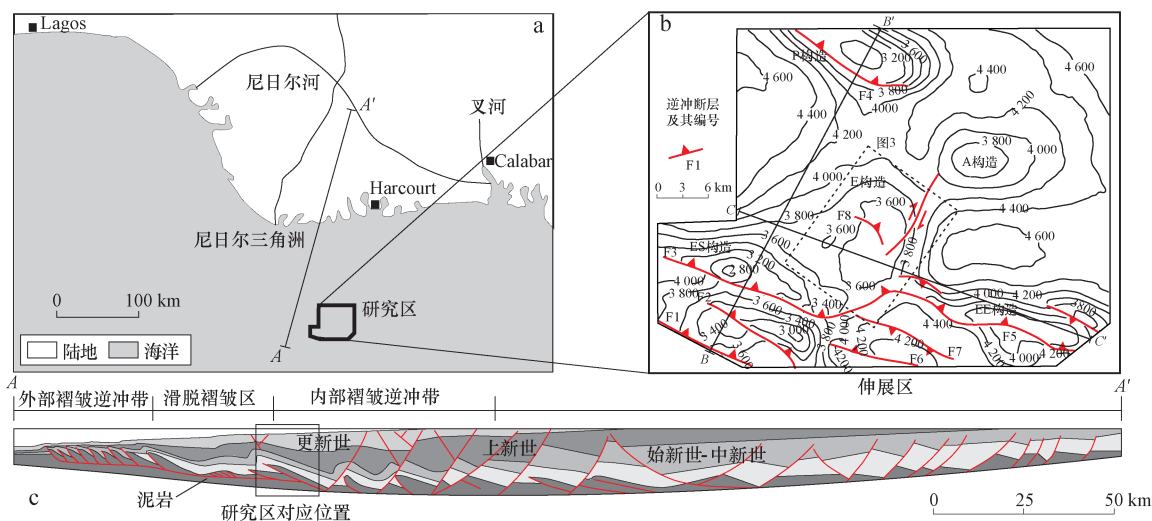


图1 尼日尔三角洲E背斜位置及主要构造

Fig. 1 Location of anticline E and the major structures in Niger Delta

a. 尼日尔三角洲位置; b. 基于H5反射层的E构造位置; c. 研究区附近的区域大剖面

系	统	阶	地层年代 (Ma)	地震 反射层
第四系		伊奥尼亚阶	0.95	H1
		卡拉布里雅阶	1.77	
		杰拉阶	2.60	
		皮亚琴察阶	3.58	H2
新近系	上新统	赞克勒阶	5.32	
		墨西哥阶	7.12	H3
	上	托尔托纳阶	11.20	H4
				H5
	中	塞拉瓦莱阶	14.80	H6
		兰盖阶	16.40	
		波尔多阶	20.52	
	下	阿基坦阶	23.80	

图 2 尼日尔三角洲 E 背斜地震反射界面和地层划分序列

Fig. 2 Seismic reflectors and stratigraphic divisions of anticline E, Niger Delta

围内共发育 200 多条断层;③断层产状多变,NE 向、NW 向和近 S-N 向都有发育。大量的断裂切割储层形成破碎的断块,有些断裂对油水起到分隔作用,有些断裂两侧油水界面统一,断层封闭性成为制约油田高效率钻井和注水开发的主要因素之一。因此深入研究深水背斜断裂发育特征、封闭性及其对油水的分隔作用,对于 E 油田的高效开发具有重要意义。

1 断裂几何学特征及活动时期

1.1 断裂几何学特征

E 构造是一个被大量断裂切割复杂化的背斜,断裂断距较小(在 R80 油层顶面统计所得的断距最大 145 m,平均约 40 m),长度较大(沿走向延伸长度最大 15.4 km,平均约为 4 km),断裂之间的水平间距小(约为 90~750 m)(图 3)。

E 构造的断裂从产状上主要分为 5 类:①北西向的逆冲断层 2 条:在 E 构造中部发育一条小规模逆冲断层 F8(图 1),下部断距超过 100 m,断距向上逐渐减小为 0,在 E 构造南部发育另一条逆冲断层带,相当于图 1 中 F5,实际上包含数条逆冲断层,是 EE 构造主

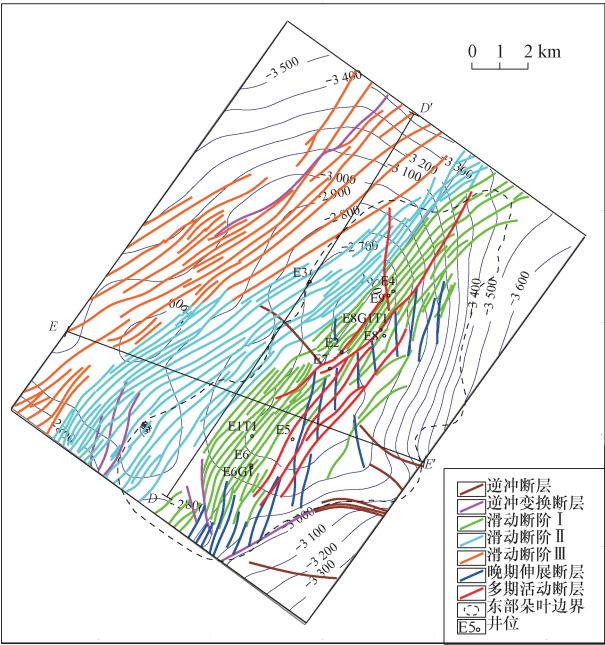


图 3 尼日尔三角洲 E 背斜 R80 油组顶面构造及断裂系统划分(位置见图 1b)

Fig. 3 Top structural map and fault systems of R80 oil unit in anticline E, Niger Delta (referring to Fig. 1b for the location)

控逆冲断层的末端,逆冲断层呈铲式,下部倾角缓(接近水平),上部倾角陡(约为 60°);②NEE 向的压扭断层 1 条,E 构造南部发育一条高角度(约 60°)逆冲断层(F3—F5 之间的转换断层),也具有走滑分量;③NE 向的西倾正断层 143 条,在 E 构造内全区发育,是本区的主要断层,呈多米诺式排布,延伸长度最大可达 15.4 km,断距多数在 70 m 以下,最大可达 145 m,倾角约为 60°;④NE 向的东倾正断层 5 条,最大延伸长度 8.6 km,最大断距约 50 m,仅发育在 E 构造的东部,与北东走向的西倾正断层在局部形成“X”形,倾角约为 60°;⑤S-N 向的正断层 26 条,最大延伸长度 4.9 km,最大断距约 31 m,在 E 构造内零散分布,此类正断层在浅部倾角约为 60°,深部倾角变陡近直立,显示其活动早期具有走滑或转换断层的特征(图 3,图 4)。

1.2 断裂活动时期

NE 向的西倾正断层是本区发育数量最多的断层,在剖面上呈“多米诺式”密集发育。断裂的断穿层位能够一定程度的指示断裂活动时期,NE 向的西倾正断层在 E 构造的东部断至 H4(少数几条晚期发生再活动断至 H1),中部断至 H3,而西部断至 H2 甚至 H2 以上,由东向西断穿层位逐渐变浅,证明这 3 组西倾正断层的活动时间自西向东逐渐变晚。每一组西倾正断层

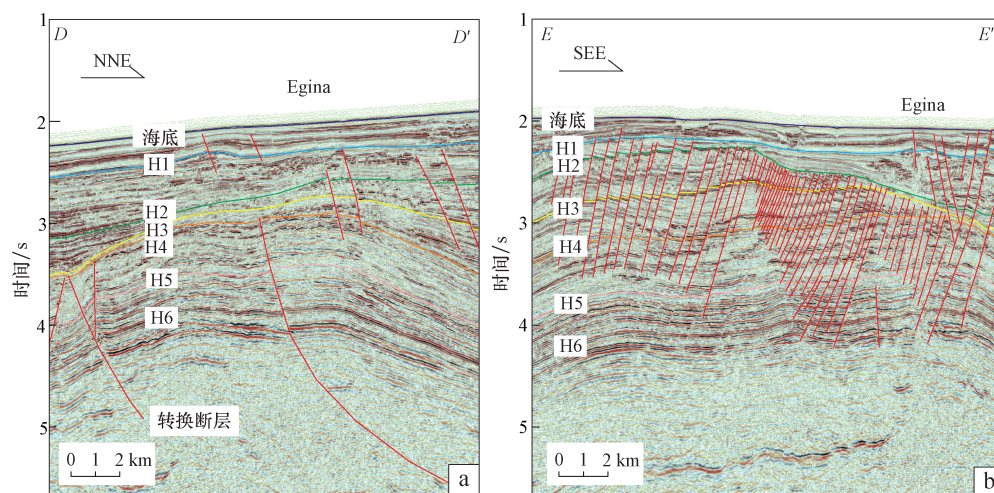


图4 泥日尔三角洲 E 背斜地震剖面解释图(剖面位置见图3)

Fig. 4 Interpretation of seismic sections of anticline E in Niger Delta (referring to Fig 3 for the section locations)

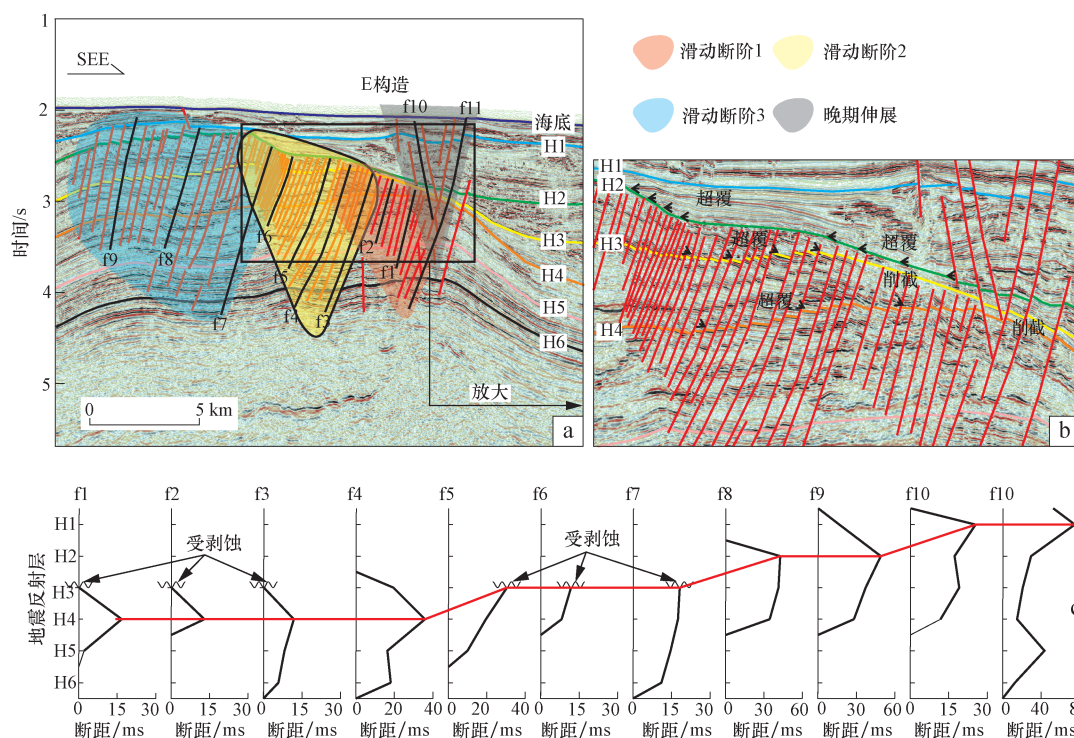


图5 泥日尔三角洲 E 背斜的典型地震剖面和断层活动期次

Fig. 5 Analyses of typical seismic sections and fault active stages of anticline E, Niger Delta

内部,底部断层端点自东向西逐渐变浅,分别形成3组断层“三角带”(图5)。

断距-埋深曲线能够指示断层活动时期的相对差异,断距-埋深曲线上断距最大的点是断层成核点,代表断层初始形成时的位置,其差异代表断层形成时间的相对早晚,断层纵向上具有多个断层成核点标志着断层具有分段生长特征。选择典型的 NWW 向剖面上断距相对较大并具有一定间距的 11 条断层,在 Landmark 地震解释软件中放大地震剖面,

并读取各地震解释层位与断层的交点,计算断层在各个层位的断距(时间域,单位 ms),分别绘制其纵向的断距-埋深曲线。如图5所示,1—9号断层的断层成核点所在层位从 H4 逐渐变为 H3 和 H2,有由东向西逐渐变浅的趋势,而 10 号断层的成核点在 H1,11 号断层具有两个断距峰值(H5 和 H1)。这说明 11 号与 1—9 号断层自东向西活动时间逐渐变晚,而 10 号断层形成和 11 号断层再活动的时间最晚,在 H1 之后(图5)。

2 断裂形成演化过程和断裂系统划分

2.1 断裂形成演化机制

研究区发育多条大规模的 NWW 向逆冲断层,逆冲断层和背斜形成了 ES,EE 和 P 构造(图 1b),显示区域性的挤压为 SSW 方向,而 E 构造(图 1b)的长轴走向与区域挤压方向平行。E 构造发育于两条大规模逆冲断层 F3 和 F5 之间的转换断层上盘(图 1b),因此造成 E 构造的长轴方向近平行于逆冲转换断层。在托尔托纳晚期的强烈挤压逆冲之后,挤压作用逐渐减弱,逆冲断层不再活动(图 6)。在 E 构造已经形成的形态背景之下,E 构造东部的向斜接受新沉积地层厚度明显大于背斜的厚度(图 7),在重力均衡作用之下,超压塑性泥岩发生由向斜向背斜的流动,并造成 E 构造进一步抬升变形,并且整个背斜逐期向西迁移,在剖面上表现为背斜轴面的向西迁移。

E 构造的典型构造演化剖面显示(图 7),现今的 E

背斜是多期次变形叠加的结果,从托尔托纳晚期到墨西哥期再到上新世,E 背斜的背斜轴面在持续向 NW 迁移,同时 3 个断层“三角带”分别对应 3 个期次的背斜轴面,由东向西依次发育。由此可见,E 背斜的持续侧向迁移与断层“三角带”有直接的联系。E 背斜从托尔托纳晚期开始活动直到现今,背斜长轴都保持 NE 走向。在托尔托纳晚期,背斜初始形成时,背斜两翼都具有相近的倾角,因此发育两组分别向背斜翼部倾斜的多米诺式正断层,但随着 E 背斜在墨西哥期和上新世受进一步的挤压,背斜逐渐向西迁移,背斜的西翼倾角不断增加,而东翼倾角基本不再变化,因此背斜西翼的多米诺式正断层继续发育、扩展,而东翼的断层不再活动,由此可见,“多米诺”式断层的活动区域由深水背斜的形态决定,经统计,只有背斜表面的倾角达到一定程度($3^{\circ} \sim 13^{\circ}$),断层才能在重力作用下,由核部向翼部滑动。

根据正断层“三角带”形态,以及各时期活动背斜轴面的位置,能够确定 E 构造的 NE 走向的西倾正断层是分 3 个期次逐渐形成的,3 个三角带由东向西分

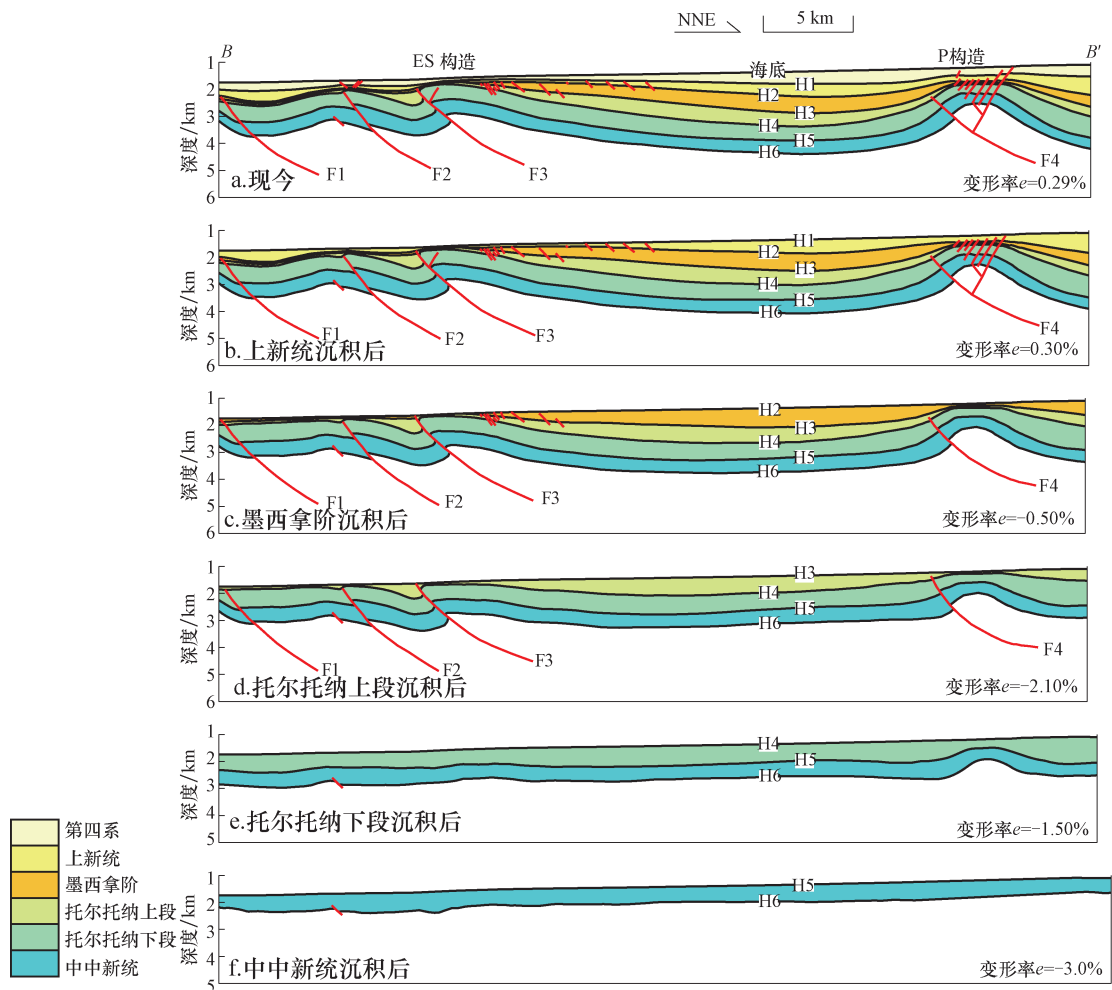


图6 尼日尔三角洲 ES 构造 - P 构造演化剖面(剖面位置见图 1b)

Fig. 6 Balance evolution sections of E ES-P structure(referring to Fig. 1b for the section location)

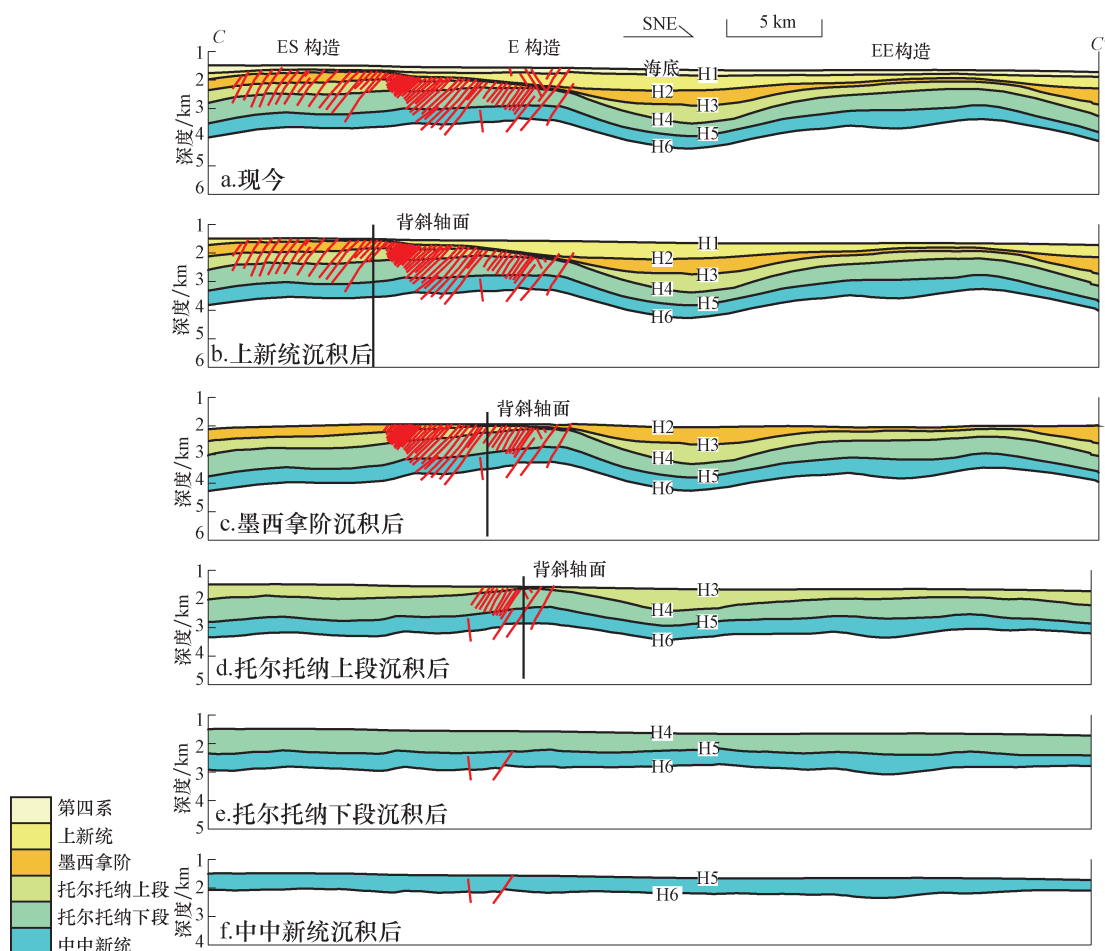


图7 尼日尔三角洲 ES 构造-E 构造-EE 构造平衡演化剖面(剖面位置见图 1b)

Fig. 7 Balance evolution sections of ES-E-EE structure(referring to Fig. 1b for the section location)

别形成于托尔托纳晚期—墨西哥期—上新世(图7)。从NW向的构造演化剖面可见,3组NE走向的西倾、多米诺式正断层与3个期次的背斜在空间上一一对应,在时间上也有很好的相关性。据此能够判定,E构造中NE走向的西倾、“多米诺”式正断层受控于重力作用,类似“滑塌”性质,正断层滑动方向与斜坡倾向一致,背斜形成则断层随之产生或活动,背斜被埋藏或剥蚀则断层活动停止。

在深水背斜顶部受重力作用控制形成的正断层具有以下特征:①E构造发育“多米诺式”正断层,规模小而断层密度大,断层面平直,垂向延伸范围基本在1 km以内,断层向下延伸倾角未见变缓,断层顶部都切穿至海底附近,但并未切穿海底造成海底高差,因此断层不具有生长性。此外,E背斜仅在背斜顶部发育正断层,翼部以及两侧的向斜都不发育断层(图5)。②多条同向正断层的组合通常形成“三角带”(图5),靠近背斜核部的断层纵向上延伸更长,而断层越远离核部,在纵向上延伸长度越短,此外,重力成因正断层的向下延伸程度受限于岩石成岩程度,即断层无法向

下延伸至成岩程度较高的深部地层中,这一特征与区域性伸展造成的正断层差异较大;③水下背斜顶部的断层“三角带”既有向前翼(较陡—翼)倾斜的,也有向后翼(较缓—翼)倾斜的,但每个背斜只要发育断层“三角带”,就必定形成向前翼倾斜的“三角带”,而向后翼倾斜的断层“三角带”可能不发育^[17]。利用上述特征能够明确将重力控制的海底背斜顶部正断层与其他成因的正断层区别开来。

由过EE背斜(图1b)的构造演化剖面(图7)可见,逆冲断层的活动时期主要为托尔托纳晚期,因此其他伴生的次级逆冲变换断层活动时期也为托尔托纳晚期。E背斜东侧有部分小规模正断层断穿H1反射层,甚至断至海底,证明其在第四纪发生活动,断穿H1层的西倾正断层在纵向上的两个成核点(图5),标志着托尔托纳晚期的活动断层与第四纪活动断层的分段生长连接,东倾正断层虽然断穿层位规律相似,但只有一个成核点,证明其为单期次活动的孤立断层。E背斜还发育S-N向断裂,深部的高倾角标志其走滑性质和变换特征,其断距微弱并且高倾角段未断至H3反

射层之上,证明此类断裂是调节性质的次级断裂,其中部分调节断裂于第四纪再次发生弱伸展,在浅部形成低角度正断层(图 5,图 6)。

2.2 断裂系统划分

结合上文分析,统计 E 构造的断裂断穿层位和活动时期,并结合断裂活动特征和成因机制,共划分出 7 类断裂系统(图 8),分别为逆冲断裂系统,逆冲变换断裂系统,重力滑动断阶(阶梯式)断裂系统(细分为 I, II, III 期滑动断阶),晚期伸展断裂系统和长期活动断裂系统。①逆冲断裂系统: E 构造可见两条逆冲断层,其中一条在工区南部,是 OML130 区块的大规模 F5 断层,另一条在背斜内部,逆冲断层都为 NWW 走向,活动时期从托尔托纳晚期到墨西哥期,主要活动时期为托尔托纳晚期。②逆冲变换断裂系统:工区内分布两组逆冲变换断层,北部的变换断层发育在 E 构造内部逆冲断层侧面,南部的变换断层发育在 OML130 工区 F3 和 F5 附近,变换断层整体垂直于逆冲断层,倾角较

高($60^{\circ} \sim 90^{\circ}$),具有走滑分量,活动时期与逆冲断层主活动时期相同,为托尔托纳晚期。③重力滑动断阶(阶梯式)断裂系统:分为 I, II, III 期滑动断阶断裂系统,活动时期分别为托尔托纳晚期、墨西哥期、上新世,受控于三期逐渐向西迁移的褶皱,仅 I 期形成背倾的两组正断层,II, III 期仅形成向西倾的正断层。④重力塌陷晚期伸展断裂系统:底辟和挤压作用在第四纪停止并应力松弛,在 E 构造东南部新生多条近 S-N 向正断层。⑤长期活动断裂系统:底辟和挤压作用在第四纪停止并应力松弛,造成少数早期的逆冲变换断层和 I 期滑动断阶断层发生再活动,向上断穿 H350 反射层。因此多期活动断裂系统在早期变形时,与逆冲变换和 I 期滑动断阶活动性一致,晚期在第四纪发生再活动。

以上几类断裂系统的应力状态和成因机制并不一致:逆冲断裂和逆冲变换断裂系统受控于区域挤压应力,在整个尼日尔三角洲均存在由岸向海方向的挤压应力;重力滑动断阶仅发育在背斜顶部,变形受控于重力的差异性,由背斜的古地势决定;晚期伸展断裂发育

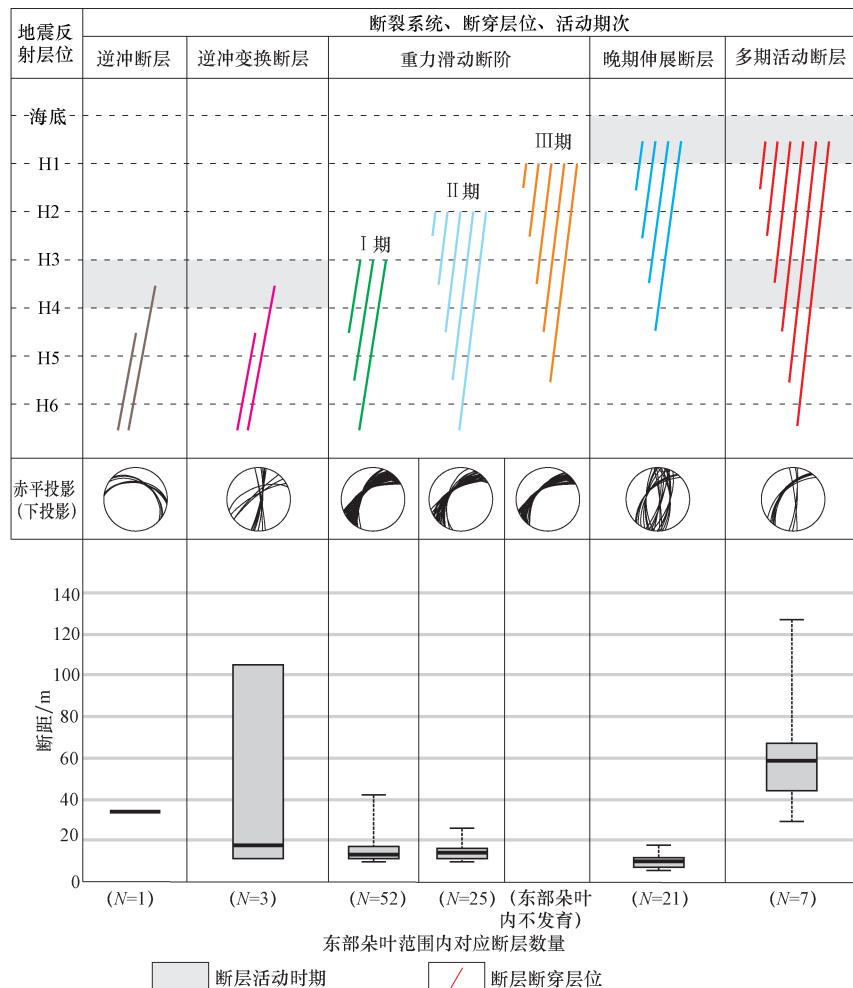


图 8 尼日尔三角洲 E 背斜断裂断穿层位、断距分布和断裂系统

Fig. 8 Faulted horizons, fault throw distribution and fault systems of anticline E, Niger Delta

在背斜活动的末期,由背斜顶部挤压应力的松弛引起。因此,区域挤压应力造成局部背斜隆起,进而控制局部的重力滑动断阶和重力塌陷地堑,二者具有明显的先后顺序和因果关系。

3 断层封闭性及其对油水分隔作用

E 构造的主力产油层位为 R80 层(H5 和 H4 反射层之间),5 套断裂系统都断至 R80 层,油层内断裂密度极高,断裂的封闭性决定油水分布。R80 储层分为东部朵叶、东部水道、西部朵叶和西部水道,共 4 套深水浊流沉积复合体。东部朵叶位于 E 构造核部及东翼,朵叶范围内共发育 109 条断层,油区范围内共 54 条断层。

断层侧向封闭机理为毛细管封闭^[18-19],砂泥互层地层中的断层侧向封闭能力取决于断裂带中泥质含量^[20]。通过 E2 井封闭性三角图可见(图 9),E 构造 R80 储层断层侧向封闭类型主要为岩性对接封闭和断层岩封闭,存在 3 种岩性对接关系:同层砂岩对接、非同层砂岩对接和砂泥对接,当断层未能完全错断储层(断距 < 储层厚度)时,两盘发生同层砂岩对接,此时断层不具有封闭性。只有断层完全错断储层(断距 > 储层厚度)时,储层砂岩与对盘的泥岩或非同层砂岩对接,才可能具有封闭性。

储层厚度最小值约为 20 m。统计断层断距可见(图 8),逆冲断层和长期活动断层断距最大,逆冲断层约 37 m 断距,多期活动断层断距平均值为 58 m,储层砂岩与对盘的泥岩或非同层砂岩对接;逆冲变换断层在研究区油藏范围内仅发育 1 条,断距小于 20 m,晚

期伸展断层断距全部小于 20 m,同层砂岩对接,断层不封闭;滑动断阶断层的断距平均值较小,但有少数断层断距大于 20 m,造成储层砂岩与对盘的泥岩或非同层砂岩对接。依据断距和储层厚度关系确定潜在封闭断层(图 10a),当砂岩储层与对盘泥岩对接时断层是封闭的,而当砂岩储层与对盘非同层砂岩对接时,依靠断层岩封闭,断层岩封闭能力与断裂带泥质含量正相关,通常使用 SGR 参数表征断裂带泥质含量^[20],进而评价封闭性。在这些断层中依据两盘油水关系,确定封闭的断层只有 f227 和 f227a,结合相邻区块 A 油田类似性质储层的封闭断层,统计封闭和不封闭断层

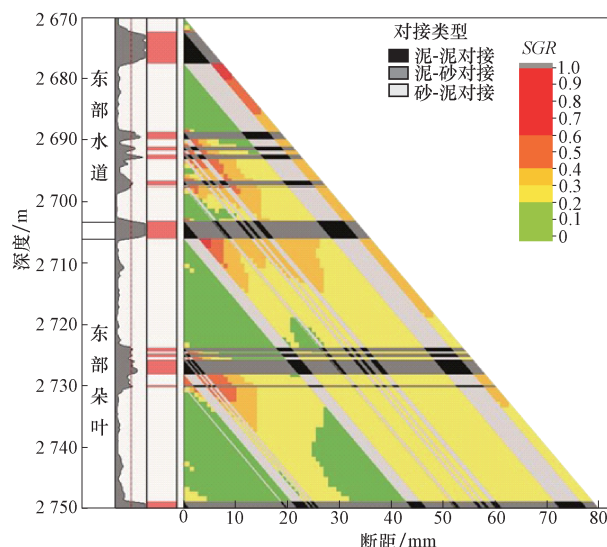


图9 尼日尔三角洲 E2 井封闭性三角图
Fig. 9 Triangular diagram showing the sealing capacity of faults in well E2, Niger Delta

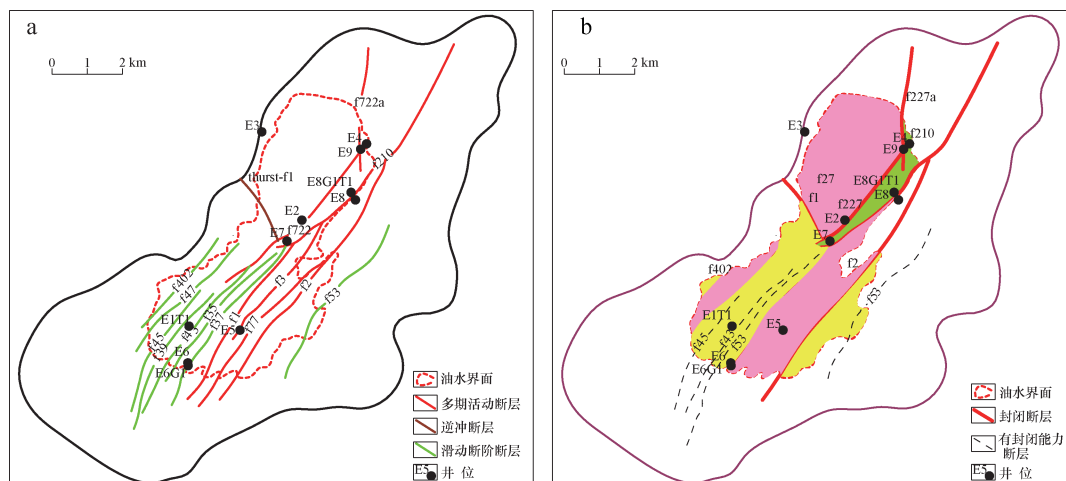


图10 尼日尔三角洲 E 背斜东部朵叶封闭断层及对油水分隔作用(东部朵叶范围见图 3)
Fig. 10 Sealing faults and their role in separating oil from water in the lobes at the east of anticline E, Niger Delta
(referring to Fig. 3 for the range of the east lobe)
a. 潜在封闭断层; b. 封闭断层及对油水分隔作用

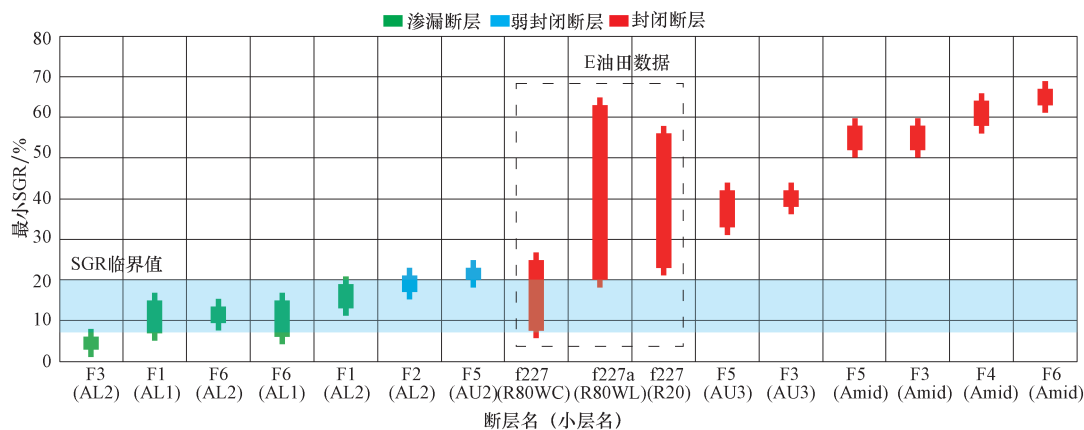


图 11 尼日尔三角洲断层面 SGR 和断层封闭能力的关系

Fig. 11 Relationship between SGR and sealing capacity of faults in Niger Delta
(WC = 西部水道, WL = 西部朵叶, 除标出的 E 油田数据外, 其他数据来源于相邻区块 A 油田)

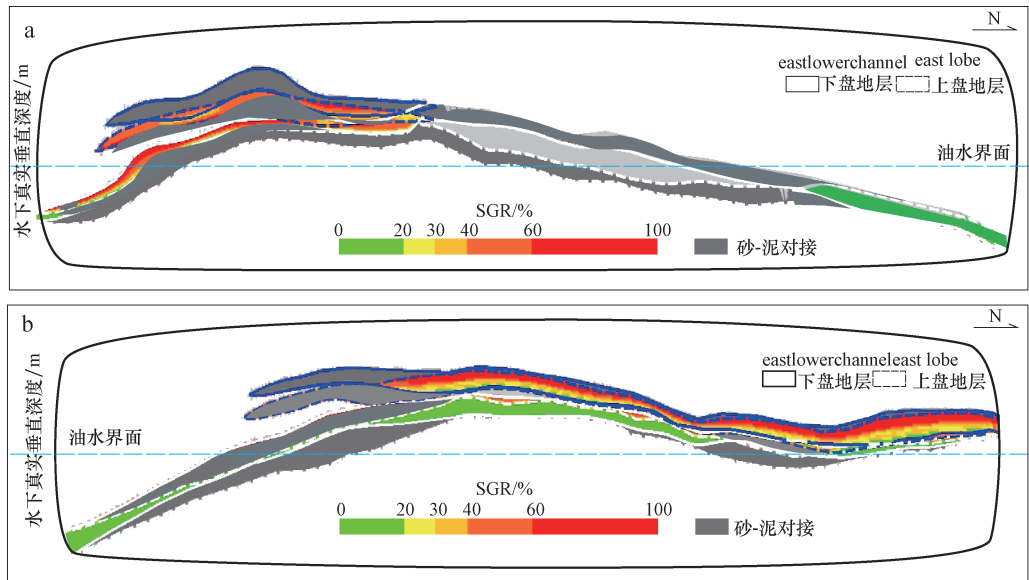


图 12 尼日尔三角洲 E 油田断层 Allan 图及 SGR 分布

Fig. 12 Allan diagram and SGR distribution of faults in anticline E, Niger Delta
a. E 油田 f2 断层; b. E 油田 f3 断层

SGR(图 11), 断层具有封闭能力的最低 SGR 约为 8%, 而具有强封闭能力的 SGR 临界值约为 20%。对 16 条潜在封闭断层 SGR 进行计算, f2 断层在油水界面 (OWC) 以上的断层面 SGR 全部高于 20%(图 12a), 判定为封闭断层, 而 f3 断层在东部水道储层全部封闭, 在东部朵叶内的 SGR 介于 8%~20%(图 12b), 判定为弱封闭断层。根据断层封闭性评价的结果, 东部朵叶范围内存在 8 条完全封闭断层和 4 条弱封闭能力断层(图 10b)。根据井间压力干扰测试和油水界面差异确认, 评价结果与钻井前已知的封闭断层 f227 和 f227a 断层一致, 并且在进行封闭性评价之后, 新钻井获取的资料又证实 f1, f2, f37 和 f210 是封闭的。断层封闭性评价在开发布井和注采中具有重要的实用价

值, 对于渗漏断层, 可将断层两盘作为同一油水单元来进行布井和注采, 而对于封闭断层, 则必须分别对断层两盘进行注采方案设计, 因此, 明确断层封闭性, 对于提高采收率和经济效率有重要意义。

4 结论

1) 深水背斜顶部受控于重力作用形成正断层, 其特点为由背斜核部向翼部倾斜, 呈多米诺式排布, 背斜核部的正断层向下延伸长, 翼部的正断层向下延伸短, 形成断层“三角带”。E 背斜在演化过程中核部逐渐向西迁移, 因此对应发育了 3 组向西逐渐变新的重力滑动正断层。

2) 基于构造解析思想,明确 E 构造从托尔托纳晚期至第四纪共经历四期构造运动,根据断裂活动的期次和性质不同,将 E 构造断裂划分为 7 类断裂系统,分别为逆冲断层,逆冲变换断层,重力滑动断阶 I,重力滑动断阶 II,重力滑动断阶 III,晚期伸展断层和多期活动断层。

3) E 构造东部朵叶范围内,逆冲断层和多期活动断层封闭趋势较强,重力滑动断阶的封闭趋势较弱,而晚期伸展断层不具有封闭能力。利用断裂系统筛选潜在封闭断层,将评价目标从 109 条断层缩小为 16 条,提高了评价效率。

4) 确定了 E 油田的断层封闭性临界值,当断层 SGR 大于 8% 时,断层开始具有封闭能力,当断层 SGR 大于 20% 时,断层完全封闭。定量评价结果得出 8 条封闭断层,将断层两盘分隔为不同的油水单元,以及 4 条弱封闭断层,对注水受效有一定影响。

参 考 文 献

- [1] Haack R C, Sundararaman P, Diedjomahor J O, et al. Niger Delta Petroleum Systems, Nigeria [M]. AAPG Memoir: Petroleum Systems of South Atlantic Margins, 2000.
- [2] 陈书平,王春修,肖华,等. 尼日尔三角洲新生代褶皱作用及相关的油气圈闭[J]. 高校地质学报, 2013(02): 355–363.
Chen Shuping, Wang Chuxiu, Xiao Hua, et al. Folding of the Niger Delta in the Cenozoic and Its Related Traps [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(2): 355–363.
- [3] 刘喜玲,于水,陶维祥,等. 尼日尔三角洲盆地海陆过渡区油气成藏规律[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2012(05): 27–31.
Liu Xiling, Yu Shui, Tao Weixiang, et al. Study on hydrocarbon accumulation of the sea-onshore transitional zone in Niger Delta Basin [J]. Journal of Xian Shiyou University, 2012.
- [4] 邓荣敬,邓运华,于水,等. 尼日尔三角洲盆地油气地质与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2008(06): 755–762.
Deng Rongjing, Deng Yunhua, Yu Shui, et al. Hydrocarbon geology and reservoir formation characteristics of Niger Delta Basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2008, 35(6): 755–762.
- [5] Wu S, Bally A W. Slope tectonics-comparisons and contrasts of structural styles of salt and shale tectonics of the northern Gulf of Mexico with shale tectonics of offshore Nigeria in Gulf of Guinea [J]. Geophysical Monograph Series, 2000, 115: 151–172.
- [6] Rouby D, Xiao H, Suppe J. 3–D Restoration of Complexly Folded and Faulted Surfaces Using Multiple Unfolding Mechanisms [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(6): 805.
- [7] Rouby D, Nalpas T, Jermannaud P, et al. Gravity driven deformation controlled by the migration of the delta front: The Plio-Pleistocene of the Eastern Niger Delta [J]. Tectonophysics, 2011, 513(1): 54–67.
- [8] Mourgues R, Cobbold P R. Sandbox experiments on gravitational spreading and gliding in the presence of fluid overpressures [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(5): 887–901.
- [9] Nigro F, Renda P. Growth pattern of underlithified strata during thrust-related folding [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(10): 1913–1930.
- [10] Deptuck M E, Sylvester Z, Pirmez C, et al. Migration-aggradation history and 3–D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(6): 406–433.
- [11] Owoyemi A O, Willis B J. Depositional patterns across syndepositional normal faults, Niger Delta, Nigeria [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(2): 346–363.
- [12] Odigi Minapuye I, 项光. 尼日尔三角洲第三纪沉积物的矿物学和地球化学研究及其与石油生成的关系 [J]. 地质地球化学, 1988(01): 4–9.
Odigi Minapuye I, Xiang Guang. Mineralogical and geochemical studies of tertiary sediments from the eastern niger delta and their relationship to petroleum occurrence [J]. Geology-Geochemistry, 2010, 10(1): 101–113.
- [13] 曹海红,练铭祥,刘新福,等. 尼日尔三角洲石油地质特征 [J]. 石油天然气学报, 2011(05): 42–46.
Cao Haihong, Lian Mingxiang, Liu Xinfu, et al. petroleum geologic characteristics of Niger Delta [J]. Journal of oil and gas technology, 2011(05): 42–46.
- [14] 于水,程涛,陈莹. 尼日尔三角洲盆地深水沉积体系特征 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012(04): 763–770.
Yu Shui, Cheng Tao, Chen Ying. Depositional characteristics of deep-water systems in the Niger Delta Basin [J]. Earth Science/Diqiu Kexue, 2012, 37(4).
- [15] 韩文明,邓运华,于水,等. 尼日尔三角洲深水勘探研究面临的挑战及其对策 [J]. 地质学报, 2012(04): 671–678.
Han Wenming, Deng Yunhua, Yu Shui, et al. Challenges Faced with Deep Water Exploration and Research in Niger Delta and Its Strategies [J]. Acta Geologica Sinica, 2012.
- [16] 高印军,杨磊,韩文明,等. 尼日尔三角洲泥底辟和泥火山的形成机理 [J]. 新疆石油地质, 2010(03): 332–334.
Gao Yinjun, Yang Lei, Han Wenming, et al. Formation Mechanism of Mud Diaper and Mud Volcano in Niger Delta [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(3): 332–334.
- [17] Morley C K. Development of crestal normal faults associated with deepwater fold growth [J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29(7): 1148–1163.
- [18] 付晓飞,潘国强,贺向阳,等. 大庆长垣南部黑帝庙浅层生物气的断层侧向封闭性 [J]. 石油学报, 2009, 30(5): 678–684.
Fu Xiaofei, Pan Guoqiang, He Xiangyang, et al. Lateral sealing of faults for shallow biogas in Heidimiao Formation of the southern Daqing placanticline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 678–684.
- [19] Watts N L. Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single- and two-phase hydrocarbon columns [J]. Marine and Petroleum Geology, 1987, 4(4): 274–307.
- [20] Yielding G. Shale gouge ratio—Calibration by geohistory [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 2002, 11: 1–15.

(编辑 董立)