

莺歌海盆地底辟区断裂特征及形成机制

——以乐东8-1底辟为例

金峰¹, 胡高伟^{1,2,3}, 金秋月¹, 冯琦¹, 高梦天¹, 田方磊¹, 孟宏宇¹

[1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570311; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249]

摘要:莺歌海盆地乐东8-1底辟是走滑断裂控制下多期发育的塌陷型底辟,与油气成藏关系密切。乐东8-1底辟区最新采集的海底节点(ocean bottom node, OBN)地震资料,破解了以往底辟核部难以成像甚至无法成像等问题。基于OBN地震资料解释成果,系统分析了乐东8-1底辟区的断裂变形特征和活动性,并结合区域构造应力及底辟塌陷成因,探讨了断裂形成机制。研究发现,①乐东8-1底辟区发育7种断裂类型,具有“平面分类、纵向分层、多期发育”的特征。底辟区深层发育近直立脊状走滑断裂;浅层发育主干走滑断裂及其派生的R破裂、R'破裂、P破裂和T破裂以及塌陷作用下形成的环状断裂。②断裂强烈活动主要发生在中中新世晚期—晚中新世早期(早期断裂)、更新世中期—全新世早期(中期断裂)和全新世晚期(晚期断裂)等3个主要阶段。运动学标志显示,早期断裂为左旋走滑,中、晚期断裂为右旋走滑。③乐东8-1底辟区断裂受控于盆缘1号断裂活动产生的区域应力场,底辟区早期受1号断裂左旋走滑控制发育北北东向左旋走滑断裂,形成构造脊;中、晚期在1号断裂持续右旋走滑作用下,发育张性破裂,同时引发深层断裂活化。

关键词:塌陷型;形成机制;走滑断裂;乐东8-1底辟;莺歌海盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Fault characteristics and formation mechanism in the diapir zone of the Yinggehai Basin: A case study of the Ledong 8-1 diapir

JIN Feng¹, HU Gaowei^{1,2,3}, JIN Qiuyue¹, FENG Qi¹, GAO Mengtian¹, TIAN Fanglei¹, MENG Hongyu¹

[1. Hainan Branch, CNOOC (China) Limited, Haikou, Hainan 570311, China; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: The Ledong 8-1 diapir in the Yinggehai Basin is a multi-phase collapsed diapir controlled by strike-slip faulting, which is closely related to hydrocarbon accumulation. Newly acquired ocean bottom node (OBN) seismic data in the Ledong 8-1 diapir zone have resolved long-standing imaging challenges in the diapir core, where previous datasets often yielded poor or no resolution. Based on the interpretation results of the OBN seismic data, the fault deformation characteristics and activity in the Ledong 8-1 diapir zone were systematically analyzed, and the fault formation mechanism was discussed in combination with regional tectonic stress regimes and the causes of diapir collapse. As indicated by the research results, (1) seven types of faults are identified in the Ledong 8-1 diapir zone, exhibiting a distinctive pattern of “plan-view classification, vertical stratification, and multi-phase evolution.” Sub-vertical ridge-like strike-slip faults are developed in the deep section of the diapir zone, whereas master strike-slip faults and their derived R-shears, R'-shears, P-shears, and T-shears, as well as ring faults formed under collapse effects, are developed in the shallow section. (2) Intense fault activity primarily occurred during three major phases: the late Middle Miocene to early Late Miocene (early stage), the middle Pleistocene to early Holocene (middle stage), and the late Holocene (late stage). Kinematic indicators show that the early-stage faults are sinistral strike-slip, while the middle- and late-stage faults are dextral strike-slip. (3) Faults in the Ledong 8-1 diapir zone are controlled by the regional stress field generated by the activity of the No. 1 Fault at the basin margin. During the early phase, the diapir

收稿日期:2026-03-29;修回日期:2026-08-17。

第一作者简介:金峰(1996—),男,工程师,构造地质学。E-mail: jinfeng5@cnooc.com.cn。

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1402703)。

zone was controlled by the sinistral strike-slip of the No. 1 Fault, developing NNE-trending sinistral strike-slip faults and forming structural ridges, whereas at the middle and late stages, the continuous dextral strike-slip of the No. 1 Fault led to the development of extensional fracturing and deep-seated fault reactivation.

Key words: collapsed type, formation mechanism, strike-slip fault, Ledong 8-1 diapir, Yinggehai Basin

引用格式:金峰,胡高伟,金秋月等. 莺歌海盆地底辟区断裂特征及形成机制[J]. 石油与天然气地质, DOI: 10. 11743/oggXXXXXX01.

JIN Feng, HU Gaowei, JIN Qiuyue, et al. Fault characteristics and formation mechanism in the diapir zone of the Yinggehai Basin: A case study of the Ledong 8-1 diapir[J]. Oil & Gas Geology, DOI: 10. 11743/oggXXXXXX01.

底辟是沉积盆地中较为常见的一类构造变形,指地下深处低密度、高塑性物质在上覆地层差异重力和构造应力作用下发生垂向塑性流动,并挤入上覆围岩所形成的穹隆状或蘑菇状变形构造。根据挤入的塑性物质成分,可分为盐底辟、泥底辟以及岩浆底辟等3种常见类型^[1-5]。底辟发育的过程中常导致其周缘形成背斜、断裂和“气烟囱”等构造,为油气的运移、储存和成藏提供了优越的条件。底辟作为一种重要的含油气构造类型,在全球范围内大规模发育,如墨西哥湾、北海、波斯湾和中国西部塔里木等盆地的盐底辟,以及尼日尔三角洲与中国南海西北部莺歌海等盆地的泥底辟,相关构造已发现多个世界级油气田^[6]。近年来,随着全球油气勘探向深水、深层领域不断拓展,底辟构造的形成演化机制及其对油气成藏的控制作用愈发受到重视。

与全球典型底辟区相比,莺歌海盆地底辟具有独特的构造背景,位于全球少数走滑断裂系统与底辟构造共生的大型走滑-伸展叠合盆地,形成演化受走滑作用和伸展作用的共同控制^[7-8]。莺歌海盆地是中国南海西北部重要的油气富集区,已发现的东方和乐东等大中型气田均分布在底辟及其周缘。位于盆缘的1号断裂是莺歌海盆地最大的走滑断裂带,也是哀牢山-红河断裂带的向海延伸部分,其走滑活动产生的区域张应力,控制了盆内沉降中心迁移、海相巨厚泥岩快速堆积和欠压实作用,为底辟形成创造了物质和温、压条件^[8-10]。随着勘探开发的深入,莺歌海盆地油气资源接替领域正逐步转向高温、高压的底辟深层和底辟核等以往被视为勘探禁区的领域^[11-13]。

自20世纪90年代以来,众多学者对莺歌海盆地底辟发育特征与成因开展了大量研究工作。以往研究中,由于受常规采集的拖缆(tower streamer, TS)地震资料在底辟核部及深部地层不成像的制约,无法有效窥探底辟全貌,导致研究人员对底辟类型的认识长期依赖区域构造背景的分析,认为莺歌海盆地海相欠压实泥岩在高温、高压作用下发生塑性流动,刺穿上覆地层,形成泥底辟和泥火山等底辟构造,并在地震剖面上表现出典型的“蘑菇

状”或“柱状”反射模糊区^[14-15]。如单家增、徐嫣等认为莺歌海盆地发育泥底辟,其实质是沉积在盆地中、底部的巨厚泥岩层在热动力作用下,转变为泥岩高塑性粘流体,向上刺穿上覆地层及围岩,形成泥底辟及伴生构造^[16-17];郝芳、张敏强和何家雄等认为,莺歌海盆地泥流体底辟是盆地快速沉降和细粒沉积物快速充填引起的强超压和右旋走滑区域应力场共同作用的结果^[14,18-19]。然而近些年,随着OBN地震资料在莺歌海盆地的尝试应用^[5,20-22],底辟核部及深层地震成像效果显著提升,对于底辟类型与成因取得了阶段性认识。关于莺歌海盆地底辟类型,已由泥底辟和泥流体底辟逐渐转变为受断裂控制的热流体底辟,如杨金海等通过对DF1-1底辟的重点解剖,认为莺歌海底辟是深层高温、高压流体(气、液)沿泄压带(断裂破碎带或构造薄弱带)向上涌流,导致上覆岩层原始形态发生改变,所形成的背斜(或后期塌陷)的变形构造^[5],该成因模式突破了传统底辟构造理论。在新的底辟构造理论下,沟通深层、超压系统的构造薄弱带,如断裂等,成为莺歌海盆地热流体底辟发育的重要控制因素。目前,关于莺歌海盆地底辟区断裂的系统研究相对较少,对于底辟区断裂的几何学与运动学特征、断裂成因机制和断裂与底辟时-空演化关系等关键问题认识不清,限制了对莺歌海底辟构造的全面认识和底辟区深层油气勘探进程。

本文在前人研究的基础之上,结合最新的OBN地震资料解释成果,对莺歌海盆地乐东8-1底辟区断裂变形特征及活动性开展研究,并结合区域构造应力场,分析底辟塌陷及断裂成因机制,进一步深化对莺歌海盆地底辟区构造特征的认识,并为下一步底辟区油气勘探部署工作提供科学依据。

1 地质背景与研究基础

1.1 区域地质背景

莺歌海盆地是中国南海西北部重要的走滑拉分盆地,位于华南地块与印支地块交汇处。在多期构造运

动控制下,哀牢山-红河断裂带自西北向东南贯穿莺歌海盆地,形成盆地内部隆坳构造格局^[23-25]。莺歌海盆地发育莺东斜坡、莺西斜坡、中央坳陷和中建隆起等4个一级构造单元,底辟主要分布在盆内的中央坳陷,自北向南依次发育东方1-1、东方29-1、东方30-1、昌南6-1、乐东8-1、乐东15-1、乐东20-1和乐东22-1等底辟构造(图1a)。区域构造研究表明,莺歌海盆地历经裂陷阶段、走滑伸展阶段、走滑转换阶段和裂后加速沉降阶段等4个演化阶段^[7,10,26-28](图1b):①始新世—早渐新世,受古太平洋俯冲后撤和印度-欧亚板块碰撞初期远程效应影响,南海地区发生大规模的裂陷作用。莺歌海盆地作为南海西北部陆缘裂谷盆地的一部分,在北西-南东向拉张应力场下,处在初始断陷到快速断陷阶段,发育大量小型地堑或半地堑,控制着早期盆地基底形态。②晚渐新世—早中新世,印度板块持续向北挤压欧亚板块,形成隆升的青藏高原,导致印支地块向东顺时针旋转挤出,整个哀牢山-红河断裂带发生左旋走滑。作为向海延伸部分的莺歌海边缘1号断裂同样发生左旋走滑,加之新南海的持续扩张,此时,盆地处在强烈的走滑拉分阶段。③中中新世—晚

中新世,华南地块相对于稳定的印支地块向东南方向挤出,南海扩张停止。盆缘的1号断裂运动性质由左旋向右旋转变,并在莺歌海盆地北部发育了多个反转构造,此时,盆地处在走滑转换阶段。④上新世—第四纪,为继承转变后的右旋走滑应力场,盆地保持右旋剪切环境,处在加速的热沉降阶段。

莺歌海盆地新生界发育相对齐全,自下而上分别为始新统、渐新统、中新统、上新统、更新统和全新统。周期性区域构造运动和底辟隆升活动导致中央坳陷发育多个不整合界面,地震上表现为 T_7^0 、 T_6^0 、 T_5^0 、 T_4^0 、 T_3^0 、 T_2^0 、 T_1^0 和 T_1^1 等地震反射界面(图1b)。莺歌海盆地油气成藏条件是以中新统海相泥岩为主力源岩,以中新统-上新统海相砂岩为主力储层,以中新统上部-上新统巨厚海相泥岩为区域盖层,针对底辟区的油气勘探开发主要集中在上中新统黄流组、上新统莺歌海组和更新-全新统乐东组。

目前,关于莺歌海盆地底辟的性质,人们的认识已由泥底辟和泥流体底辟逐渐转变为受断裂控制的热流体底辟^[5],断裂成为热流体底辟发育的关键控制因素。因此,对于底辟区断裂的认识变得尤为重要。本文研究的乐东8-1底辟位于莺歌海盆地中央坳陷南部,是

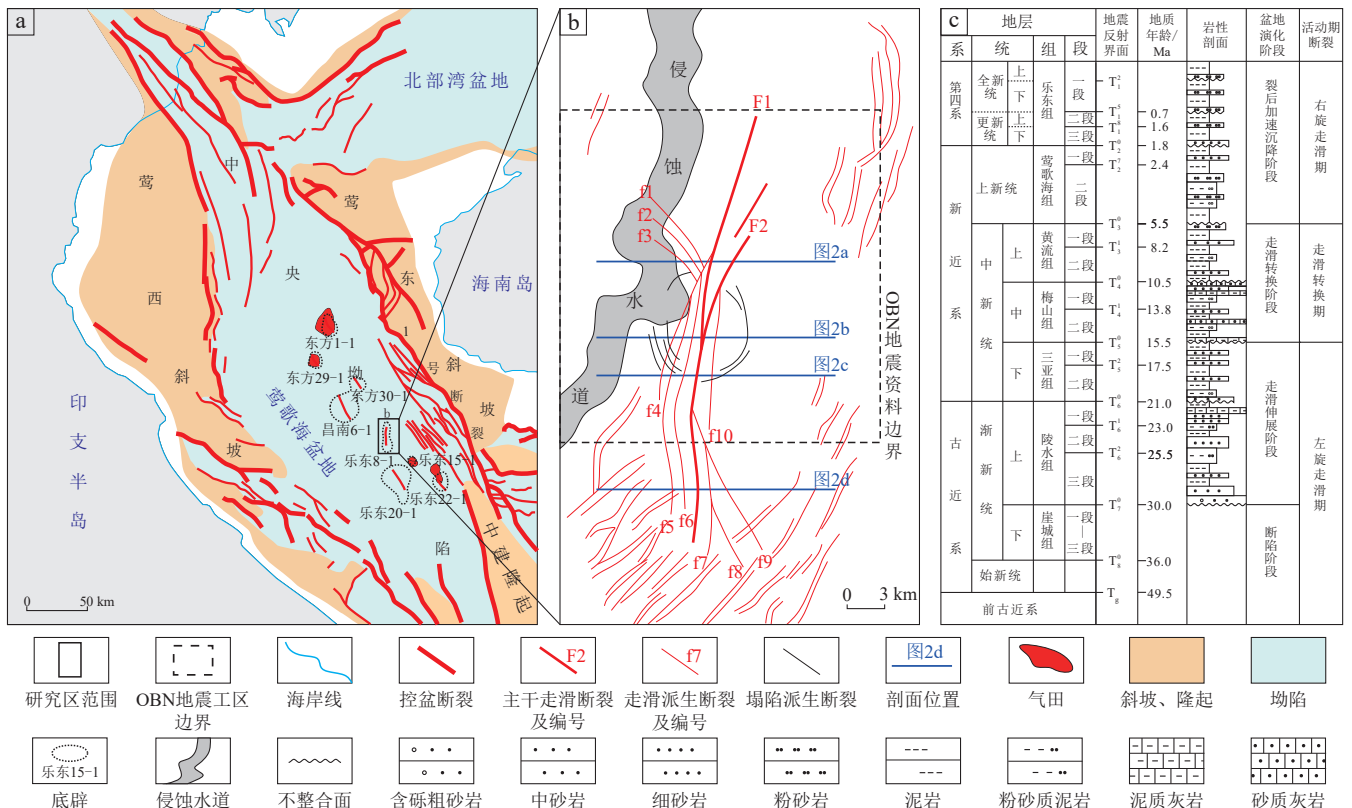


图1 莺歌海盆地构造纲要(a)、乐东8-1底辟区断裂系统(b)及新生界综合柱状图(c)

Fig. 1 Tectonic outline map of the Yinggehai Basin (a), fault system map of the Ledong 8-1 diapir zone (b), and integrated stratigraphic column of the Cenozoic (c)

OBN. 海底节点

受断裂控制且构造特征复杂的底辟构造,历经多期隆升与塌陷,内部断裂发育,并具有“分层、分类、分期”的特征(图1b)。

1.2 数据与方法

本次研究以莺歌海盆地乐东8-1底辟区为研究区,基础数据为2024年采集的OBN三维地震资料,该资料具备全方位观测、高信噪比和宽频带的技术优势^[20-22],在底辟核部及深层的地震成像精度和构造保真度较前期资料显著提升。本研究在前人成果基础上,基于最新OBN地震资料,完成了断裂体系的精细解释,系统分析了底辟区断裂的变形特征与活动特征。针对断裂活动期次与强度的判别,综合采用断穿地层时代限定、断裂生长指数和断裂古落差等方法开展定量-半定量分析^[29-31],同时结合底辟作用与断裂发育、地层拱张的耦合特征,参照上超尖灭等地层不整合接触关系辅助限定构造活动时限与期次,最终结合区域构造应力场解析底辟塌陷与断裂的成因机制。

2 断裂变形特征

乐东8-1底辟区发育多条不同类型的断裂,如主干走滑断裂及其派生断裂、塌陷作用形成的环状断裂等。其中,主干走滑断裂在平面上整体呈北北东或近南北走向,延伸长度约30 km,剖面上具有明显的分层性;环状断裂主要发育在浅层,以正断层为主,呈环形展布,沿伸长度较短(图2)。基于多层位相干切片和

典型地震剖面解释成果,本文对莺歌海盆地乐东8-1底辟区断裂开展分层和分类研究。参照海域地层埋藏深度,本文将深度大于3 500 m地层定义为深层(T_3^0 界面之下),将深度小于3500m地层定义为浅层(T_3^0 界面之上)。乐东8-1底辟区主要发育深、浅两套断裂体系,不同断裂体系在平面展布和剖面特征上具有显著差异,但在时-空上却有一定的继承性(图2,图3)。

2.1 深层断裂体系

深层断裂体系主要在中中新统及以下地层中发育(T_3^0 界面之下),具有明显的脊状特征。从剖面上看,深层走滑断裂呈近直立状,向上断穿 T_3^0 界面,向下断至 T_5^0 界面以下。边界断裂倾向相反,向深层收敛,向浅层发散。其夹持区地层压扭作用明显,局部发育逆断层,具有明显的正花状构造特征(图2,蓝色断裂)。从平面上看,深层发育6条走滑断裂(D1—D6),整体呈北北东向右阶排列,可识别3个走滑叠接区,这些叠接区向浅层继承发育,规模逐渐扩大,符合正花状构造的平面特征(图3d,e)。

2.2 浅层断裂体系

浅层断裂体系主要在上新统及以上地层中发育(T_3^0 界面之上),包括主干走滑断裂与派生断裂,具有明显的背形负花状构造特征。从剖面上看,F1和F2为主干走滑断裂,向上断至海底,向下断至 T_4^0 界面以下,与深层断裂搭接。自北向南,F1和F2主干走滑断裂倾向发生变化,由F1主干走滑断裂的东倾转变为F2主干走滑断裂的西倾。在局部应力场下,浅层还发育多条

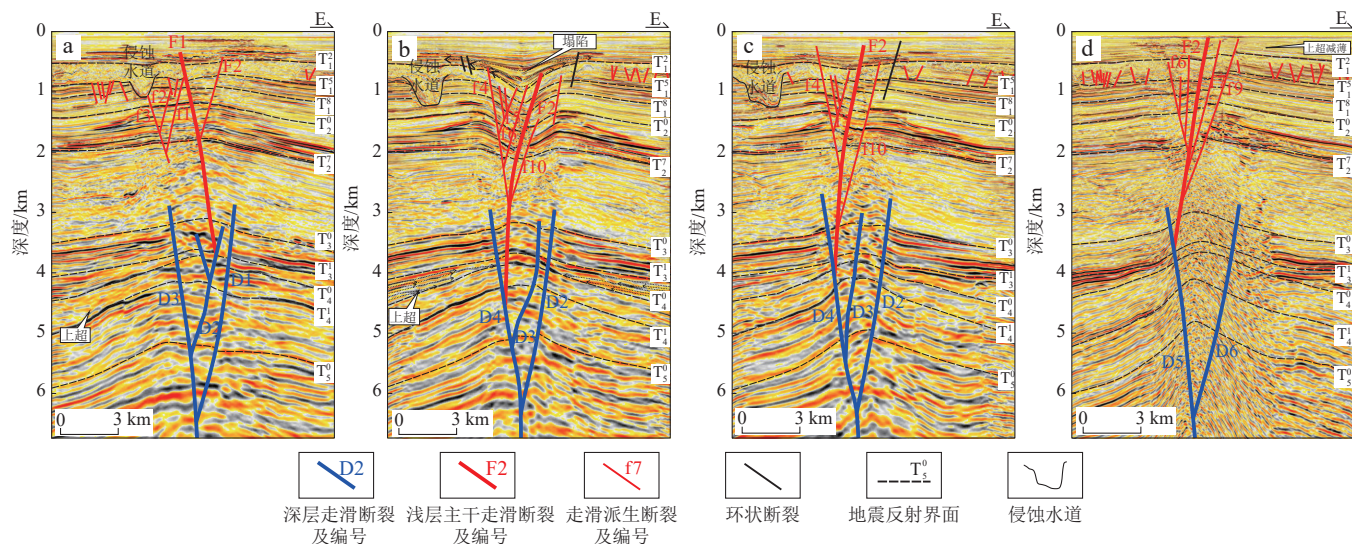


图2 过莺歌海盆地乐东8-1底辟区典型地震剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 2 Typical seismic profile across the Ledong 8-1 diapir zone in the Yinggehai Basin (see Fig. 1b for the profile location)

a—c. 海底节点(OBN)地震资料;d. 拖缆(TS)地震资料

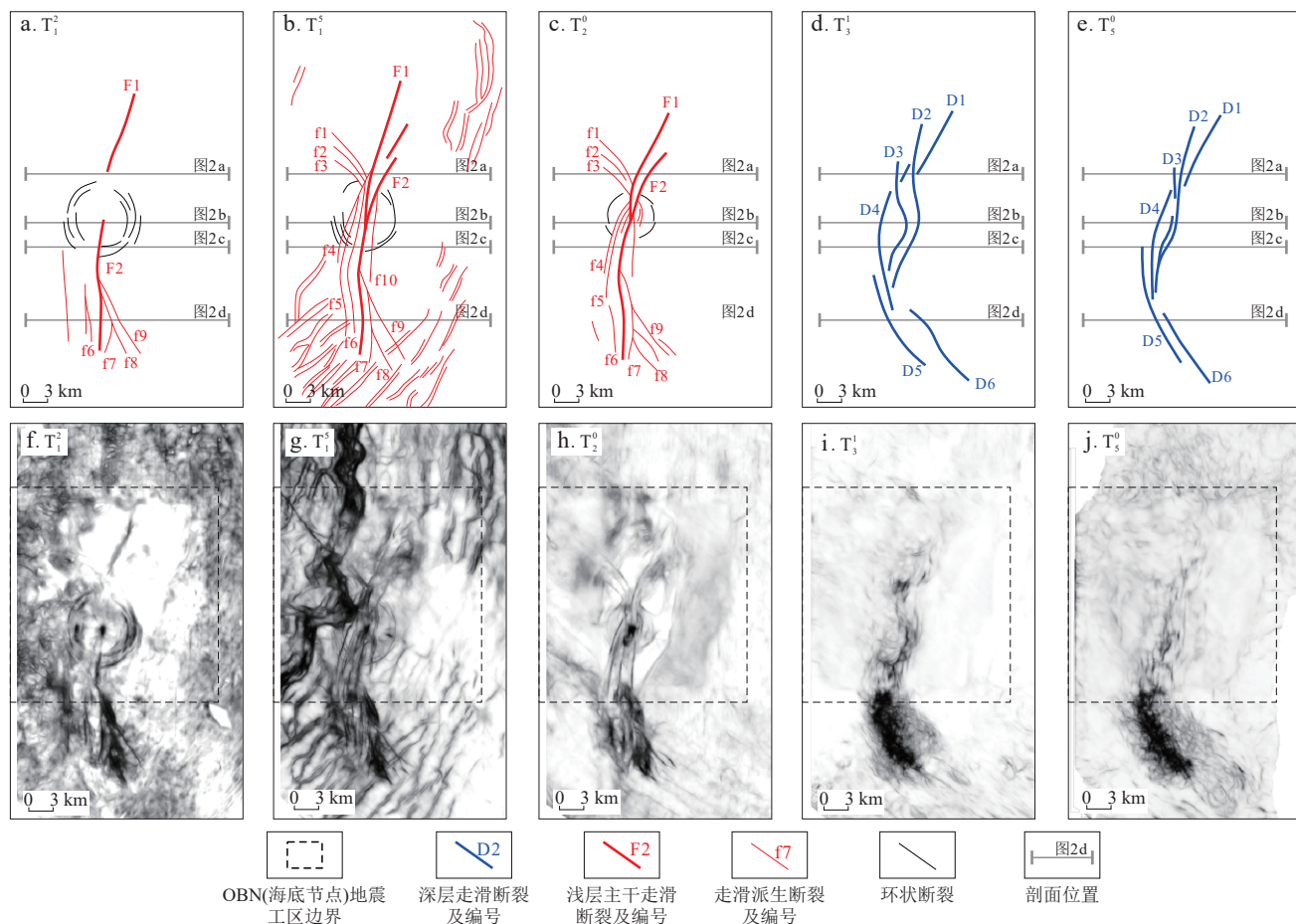


图3 莺歌海盆地乐东8-1底辟区各界面断裂分布(a—e)及沿层相干切片(f—j)

Fig. 3 Fault distribution maps of various horizons (a—e) and horizon-parallel coherence slices (f—j) of the Ledong 8-1 diapir zone, Yinggehai Basin

派生断裂(如f1—f9)。其中,北部派生断裂向上多终止在 T_1^2 界面以下(图2a,b),南部派生断裂多断穿 T_1^2 界面或至海底(图2c,d),向下与主干走滑断裂搭接,在 T_3^0 — T_2^1 界面尖灭,主干走滑断裂与派生断裂组合形成负花状构造。在平面上, T_2^0 — T_1^2 界面相干切片上的断裂数量由少变多再减少。其中, T_1^2 界面的断裂数量最多(图3a—c)。在 T_1^2 界面,F1和F2主干走滑断裂呈北北东向线性延伸,北部发育3条呈北西向的派生断裂f1—f3,与F1主干走滑断裂搭接。南部发育3条北北东向派生断裂f4—f6,北东向派生断裂f8—f9、近南北向派生断裂f7和f10。其中,北北东向派生断裂与F2主干走滑断裂形成马尾状构造(图3b)。此外,在剖面上, T_1^2 — T_1^3 地层内部发育多组相向倾斜的正断层,构成了数个小型地堑,平面上呈北北东走向线性延伸,成对出现,主要分布在乐东8-1底辟的南部(图2,图3b)。在底辟塌陷区边缘,还发育多条同向倾斜的正断层,平面呈环状,沿伸长度较短,向上断穿 T_1^2 界面,断距较小(图2b,图3a—c)。

为进一步分析断裂运动学特征,本文结合断裂性

质、构造样式及发育层系和规模,将乐东8-1底辟区断裂划分为7类:深层发育1类断裂,为近直立脊状走滑断裂;浅层发育6类断裂,包括主干走滑断裂及其派生的R断裂、R'断裂和P断裂等断裂,以及走滑派生应力场与底辟上拱张应力场背景下形成的T断裂和塌陷作用下形成的环状断裂(图4)。

3 断裂活动期次与活动强度

乐东8-1底辟发育深、浅两套断裂体系,分别对应早期和中、晚期断裂活动。其中,浅层断裂的活动具有明显的阶段性。为更好揭示底辟与断裂的活动规律,以底辟塌陷前后关键界面 T_1^2 为界,将 T_1^3 — T_1^2 沉积期划分为中期, T_1^2 界面以后为晚期。早期深层断裂活动,主要依据为深层断裂发育脊状构造, T_4^1 — T_3^1 地层(上中新统黄流组二段—中中新统梅山组一段)呈顶薄翼厚的特征,地层内部见明显上超结构(图2a,b)。中期和晚期浅层断裂活动,主要集中在 T_1^2 至今。

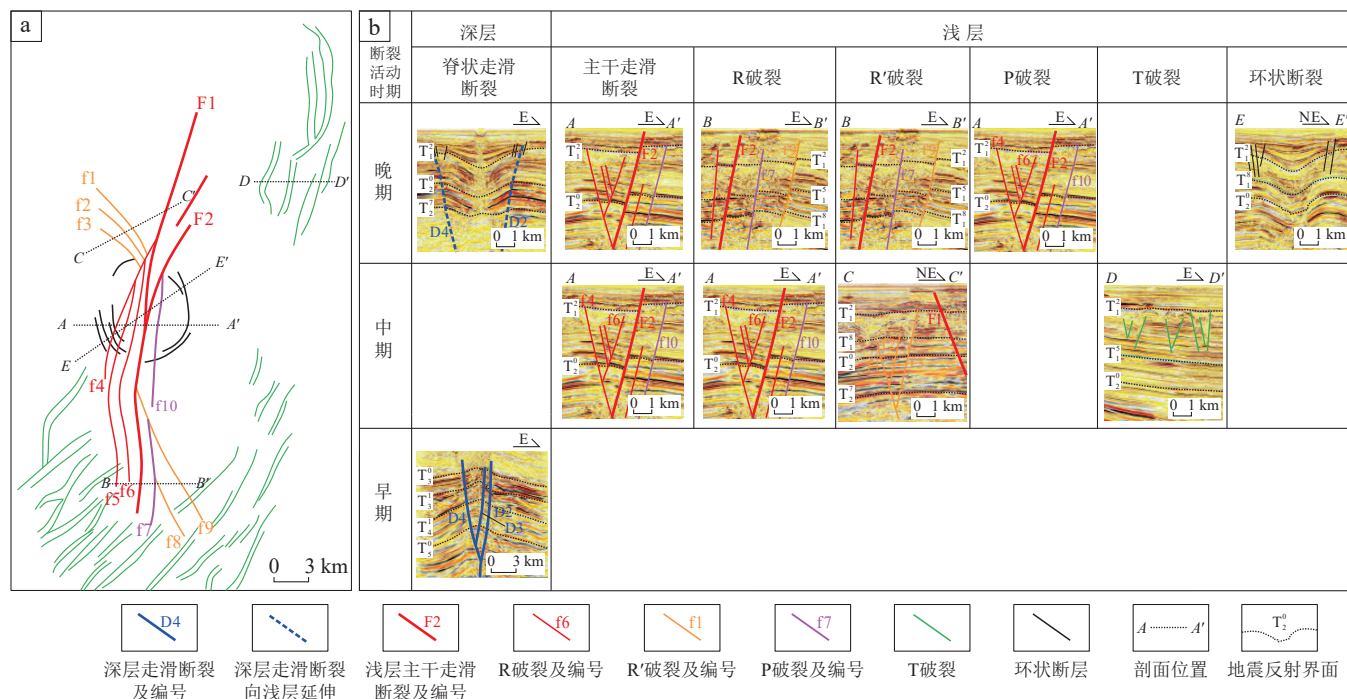


图4 莺歌海盆地乐东8-1底辟区断裂类型(a)及其时-空分布(b)

Fig. 4 Fault types (a) and their spatiotemporal distribution map (b) in the Ledong 8-1 diapir zone, Yinggehai Basin

(b图“深层”列小图剖面位置同图9b。)

从断裂生长指数上看,不同级别、不同类型和不同位置的浅层断裂活动时间存在差异,派生断裂的活动受到了主干走滑断裂的调节(图5)。①在 $T_1^8-T_1^5$ 沉积期,F1和F2主干走滑断裂初始活动,此时f1,f4,f8和f10等派生断裂也开始弱活动;②在 $T_1^5-T_1^2$ 沉积期,F1和F2主干走滑断裂开始强烈活动,F1主干走滑断裂活动性达到最强,此时大多数派生断裂也开始活动,位于主干走滑断裂北中部的f1,f4,f7和f10等派生断裂出现剧烈活动,而南部的f2,f3,f5,f6,f8和f9等派生断裂发生弱活动;③在 $T_1^2-T_0$ 沉积期,F1主干断裂活动性有减弱的趋势,位于F1附近的f1—f4和f5等派生断裂基本停止活动,而F2主干断裂活动性持续增强,位于F2附近的f6—f9和f10等派生断裂持续活动,在F2主干断裂倾没端东侧的f7和f9等派生断裂强烈活动。此外,分布在 $T_1^5-T_1^2$ 层间的T破裂,向上未断穿 T_1^5 界面,向下未断穿 T_1^2 界面,其活动时间主要在 $T_1^5-T_1^2$ 沉积期(图4b)。塌陷作用派生的环状断裂,分布在塌陷区域的边缘,断穿 T_1^2 界面,并向上发育,因此,其活动时间为 T_1^2 界面沉积以后(图4b)。随着中、晚期持续右旋走滑活动,深层断裂活化引起上新统及以上地层挠曲,并导致上覆地层塌陷。结合塌陷区地层不整合接触关系特征,深层断裂活化的时间为 T_1^2 界面沉积以后(图4b)。

综上所述,乐东8-1底辟区断裂主要在早期($T_1^4-T_1^3$ 沉积期)、中期($T_1^8-T_1^2$ 沉积期)和晚期(T_1^2 沉积期至今)

等3个阶段发生活动,其中早期深层断裂活动,中期F1,F2主干走滑断裂与R破裂、R'破裂、P破裂和T破裂等派生断裂发生强烈活动,晚期F1和F2主干走滑断裂和南部派生断裂等持续活动,环状断裂初始活动。

本文选取多条三维地震剖面,通过统计断裂古落差来反映主干断裂的活动强度与活动规律(图6)。断裂古落差显示,F1主干走滑断裂活动性较弱,F2主干走滑断裂活动性较强,两条断裂均中段活动性强、两端活动弱,具有分段连接生长的特征。不同时期的断裂古落差显示,F1和F2主干走滑断裂在 $T_1^5-T_0$ 沉积时期活动最为强烈, $T_1^5-T_1^2$ 沉积期次之, $T_1^2-T_1^3$ 沉积期相对较弱。从断裂活动性迁移规律上看,F1主干走滑断裂具有向北迁移,F2主干走滑断裂向南迁移的特征,这一现象与中、晚期右旋走滑活动密切相关,并在一定程度上控制了派生断裂的发育与活动。总体上,F1和F2主干走滑断裂在 $T_1^5-T_0$ 和 $T_1^8-T_1^2$ 沉积时期活动性最强,断裂连接生长,具有中部强、两端弱,活动性迁移方向与右行走滑方向一致的特征。

4 断裂运动学特征

乐东8-1底辟区发育一条由深层和浅层断裂、主干走滑断裂与派生断裂组成,历经早期左旋和中、晚期右旋的走滑断裂带。深层断裂早期左旋走滑的依据:

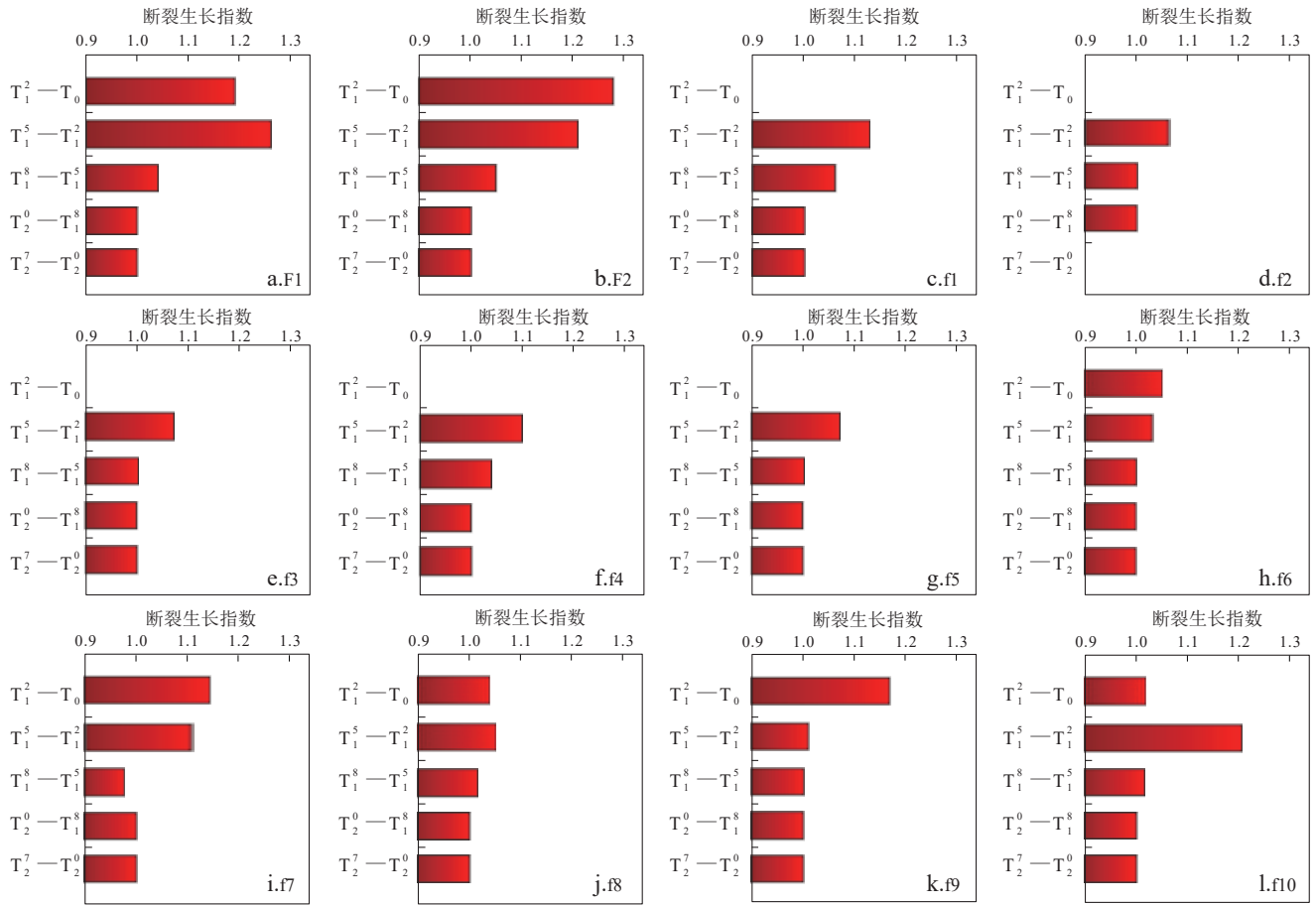


图5 莺歌海盆地乐东8-1底辟区断裂生长指数统计

Fig. 5 Fault growth index in the Ledong 8-1 diapir zone, Yinggehai Basin

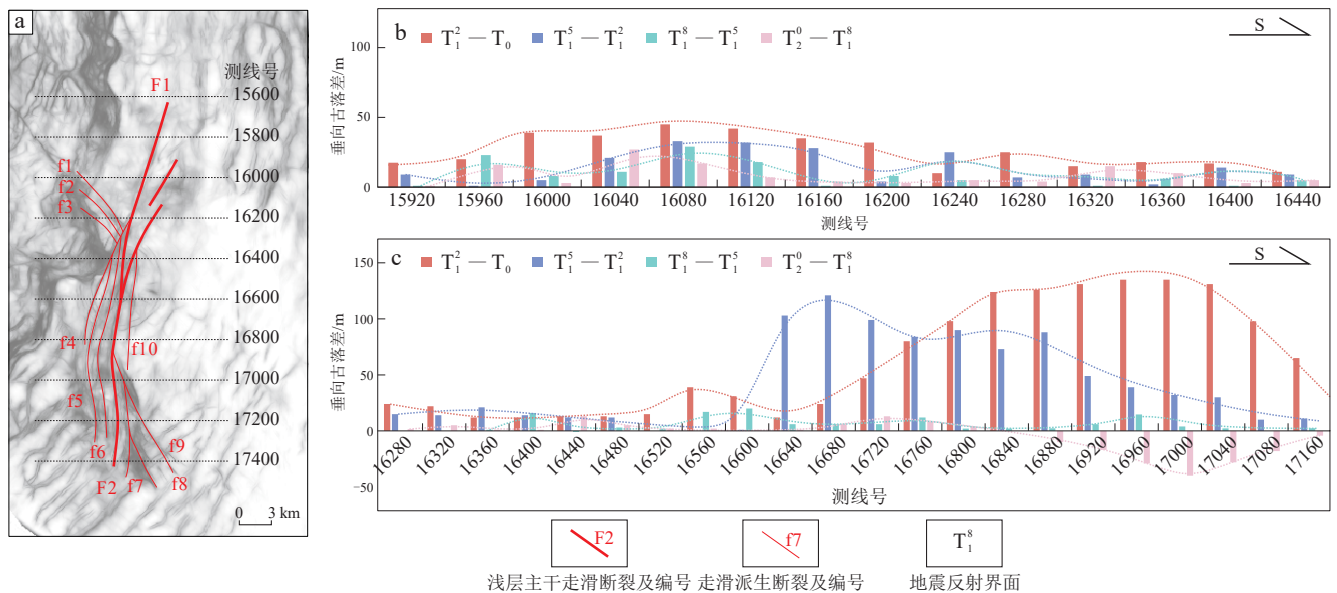


图6 莺歌海盆地乐东8-1底辟区F1和F2断裂垂向古落差分布

Fig. 6 Vertical fault paleo-throw distribution map of faults F1 and F2 in the Ledong 8-1 diapir zone, Yinggehai Basin

a. 浅层走滑断裂平面展布; b. F1断裂垂向古落差; c. F2断裂垂向古落差

平面上边界断裂呈右阶线性排列(图3c,d),剖面上断裂叠接区为压扭性的脊状构造(图2b,c)。综合走滑

断裂运动方向、排列组合和剖面样式之间的关系,判断深层断裂早期发生左旋走滑。深层断裂晚期右旋活化

的依据:深层断裂由左旋向右旋转变后,叠接区转变为伸展应力环境,导致叠接区上覆的地层发生挠曲塌陷(图2b,图3b)。浅层断裂持续性右旋走滑的依据:①浅层断裂平面展布与简单剪切应变椭圆断裂发育规律显示,马尾状断裂(f4—f6)为F1和F2主干走滑断裂派生的R破裂,与主干走滑断裂的锐夹角指示了主干走滑断裂及R破裂发生右旋走滑(图7a,b);② T_1 — T_0 地层厚度与 T_1^2 界面断裂叠合显示,F1和F2主干走滑断裂控制了西北与东南部地层隆升、东北与西南部地层沉降,从走滑断裂对沉积地层的控制作用上也证实F1和F2主干走滑断裂发生右旋走滑(图7c,d)。

在莺歌海盆地多期构造运动的影响下,乐东8-1底辟及断裂发生多期活动。①中中新世晚期—晚中新世早期(T_4 — T_3 沉积期),深层走滑断裂呈右阶排列,发生左旋走滑,断裂向深层收敛,浅层发散,控制地层脊状隆升,形成正花状构造(图8a)。②晚中新世晚期—更新世早期(T_3 — T_1^8 沉积期),地层平稳连续。此时,深层走滑断裂停止发育,浅层断裂还未活动(图8b)。③更新世中期—全新世早期(T_1^8 — T_1^2 沉积期),浅层断裂广泛发育(图8c)。F1、F2主干走滑断裂右旋走滑活动的同时,向下与深层走滑断裂搭接,向上发育R破裂、R'破裂、P破裂等派生断裂。深层走滑断裂和浅层主干走滑断裂、派生断裂组合形成花状构造,并在垂向上组成了一套连通的断裂薄弱带。此时,深层高温、高压热流体沿断裂薄弱带上涌导致地层拱升,形成背形

负花状的热流体底辟构造。在底辟拱升的张应力场和持续的右旋走滑活动共同作用下,促使 T_1^5 — T_1^2 之间发育了大量的层间断裂(T破裂)。④全新世晚期至今(T_1^2 沉积期至今),浅层主干走滑断裂和南部少量派生断裂持续右旋活动。深层走滑断裂右旋活化导致上部地层挠曲塌陷,并派生出一系列环状断裂(图8d)。

5 讨论

OBN地震资料的应用解决了乐东8-1底辟区核部成像问题。剖面上清晰的同相轴和地层接触关系,对于研究底辟区核部构造特征、形成机制等具有重要意义。与传统意义上的底辟认识不同^[14-19],本研究认为乐东8-1底辟是核部走滑断裂与深层高温、高压热流体共同控制的“断控热流体”底辟^[5],历经多期隆升和塌陷,构造特征复杂。在上述研究与前人研究的基础上,本文对乐东8-1底辟区的断裂成因机制、底辟塌陷与断裂的关系进行讨论。

5.1 塌陷与断裂的关系

乐东8-1底辟是一个先隆后塌的“塌陷型”底辟,其塌陷受多种因素共同控制。通过对深、浅层断裂空间叠合分析发现,平面上,深层走滑断裂叠接区与浅层环状断裂具有较好的平面叠置性;剖面上,深层脊状构造与浅层塌陷区也具有垂向叠置性,可见底辟塌陷与深

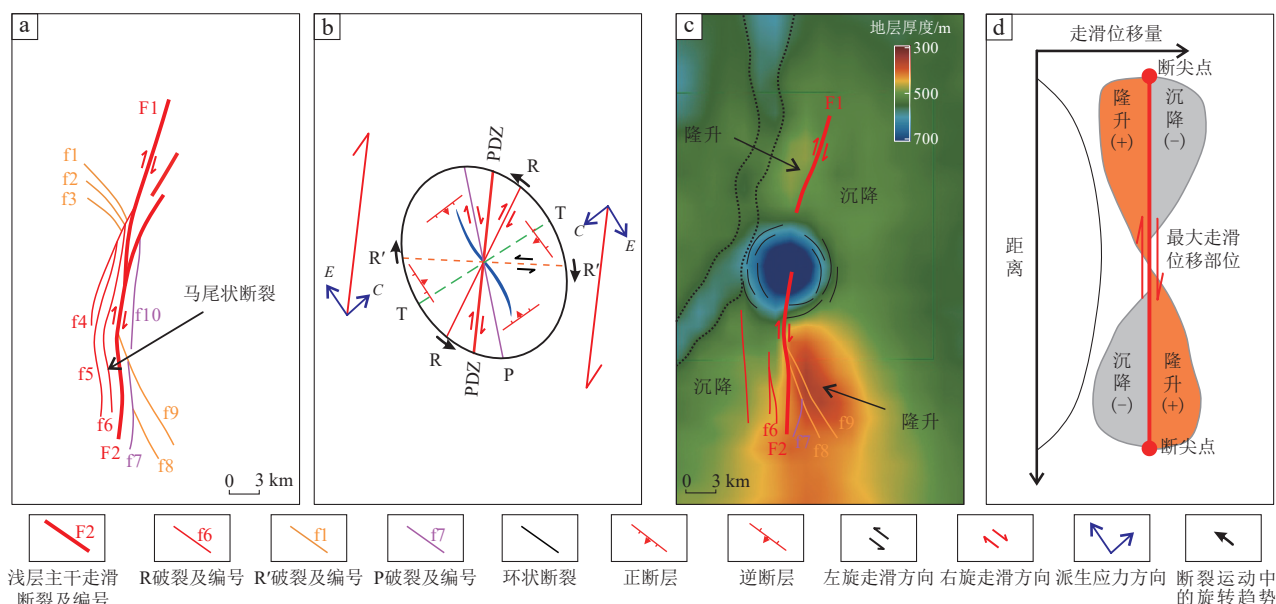


图7 莺歌海盆地乐东8-1底辟区浅层断裂运动方向判别示意图

Fig. 7 Schematic diagram illustrating kinematic directions of shallow faults in the Ledong 8-1 diapir zone, Yinggehai Basin

a. 浅层走滑断裂平面展布; b. 右旋简单剪切应变椭圆; c. T_0 — T_1^2 地层厚度与 T_1^2 界面断裂叠合图; d. 右旋走滑对地层控制作用示意图

PDZ. 主位移带; C. 收缩分量; E. 伸展分量; R. R破裂; R'. R'破裂; P. P破裂; T. T破裂

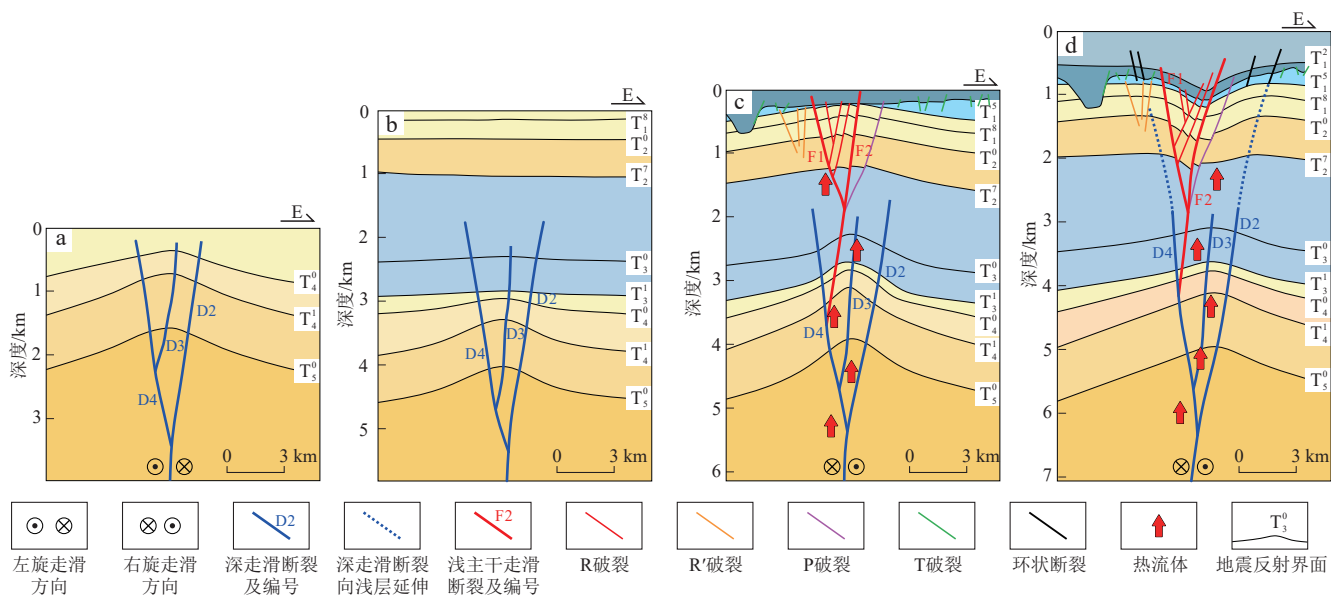


图8 莺歌海盆地乐东8-1底辟区构造演化模式示意图

Fig. 8 Tectonic evolution model of the Ledong 8-1 diapir zone, Yinggehai Basin

a. 中中新世晚期—晚中新世早期; b. 晚中新世晚期—更新世早期; c. 更新世中期—全新世早期; d. 全新世晚期至今

层走滑断裂有着密切关系(图9)。进一步分析深层走滑断裂、 $T_2^2-T_1^2$ 地层和 T_1^1 以上地层之间的关系发现,深层走滑断裂引起了 $T_2^2-T_1^2$ 地层的挠曲,却没有控制其沉积,说明深层走滑断裂的活化是在 $T_2^2-T_1^2$ 地层沉积之

后,即晚期深层走滑断裂的右旋走滑促使D2和D4断裂叠接区由压扭应力场转变为张扭应力场,导致 $T_2^2-T_1^2$ 地层释压塌陷,控制了 T_1^1 以上地层的沉积,并派生出一系列环形断裂。此外,在 $T_3^0-T_2^2$ 莺歌海组二段巨厚泥岩层

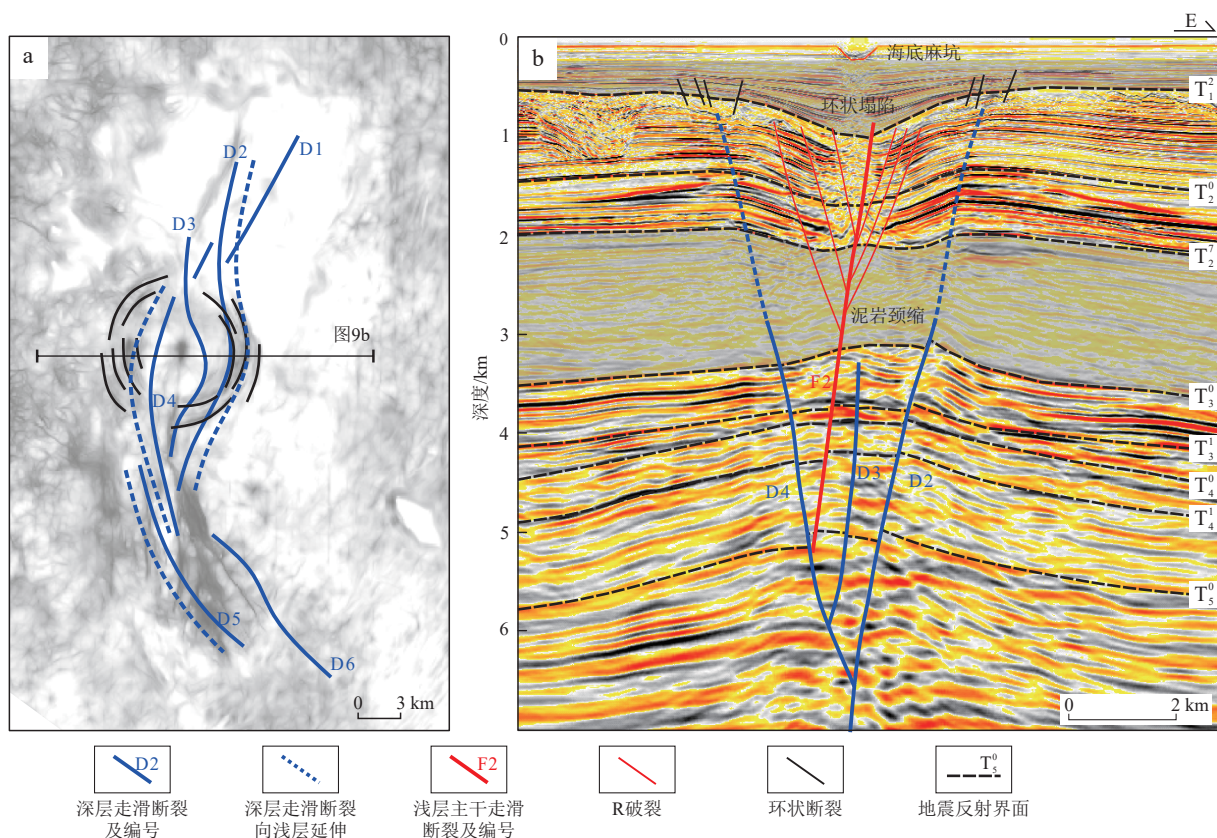


图9 莺歌海盆地乐东8-1底辟区深、浅层断裂叠合图(a)及典型地震剖面(b)

Fig. 9 Overprint map of deep and shallow faults (a) and a typical seismic profile (b) in the Ledong 8-1 diapir zone, Yinggehai Basin

发生了明显的颈缩现象,颈缩区与深层脊状构造和浅层塌陷在空间上也具有叠置性,表明莺歌海组二段泥岩颈缩主要受垂向最大主应力控制,是上覆荷载地层的压应力与热流体上涌造成下伏地层拱升的支撑力共同作用的结果,在晚期塌陷开始后同步发育,并加剧了塌陷作用。对于底辟塌陷的成因还存在一种普遍认识,即超压油气快速泄露导致底辟区地层塌陷^[32-33]。本研究认为,乐东8-1底辟未发生油气的快速泄露,主要原因是底辟区浅部地层多未固结成岩,油气的快速泄露会导致地层发生一定程度的侵蚀,并形成麻坑(如图9b呈现的现今海底油气泄露形成的麻坑),而塌陷区地层(图2b)同相轴稳定连续,并未有大规模地层缺失现象。因此,本文认为乐东8-1底辟发生了一定程度的油气泄露,以一种沿断裂带缓慢泄露的方式进行,并不是导致塌陷的主因。

5.2 断裂形成机制

莺歌海盆地周缘板块的相对运动,造就了不同时期应力场大小和应力方向的转换,在盆缘和盆内形成了多套断裂系统。前人通过对哀牢山-红河断裂带、莺东斜坡走滑断裂带开展几何学和运动学分析发现,其主要经历渐新世一早中新世左旋走滑期、中中新世一晚中新世走滑转换期和上新世至今右旋走滑期等3个阶段^[34-35]。受不同阶段区域应力背景影响,位于盆内中央坳陷的乐东8-1底辟区断裂也发生多期走滑活动。

①渐新世一早中新世,印度板块向欧亚板块俯冲碰撞,印支地块顺时针挤出逃逸,导致哀牢山-红河断裂带发生强烈的左旋走滑活动,莺歌海盆缘1号断裂同样发生强烈左旋活动。在渐新世走滑拉张裂陷作用影响下,沉积地层主要位于盆地边缘;在早中新世持续左

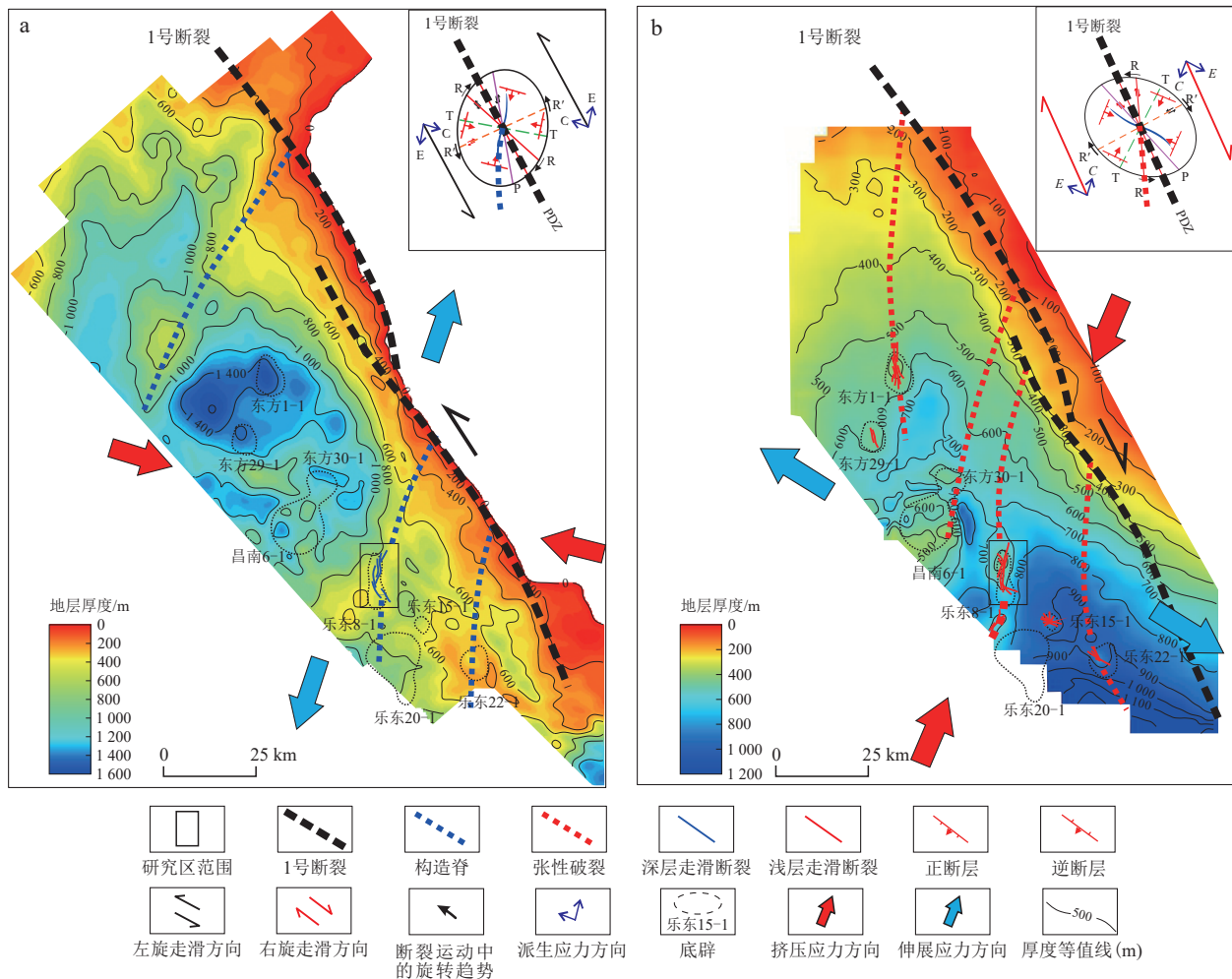


图10 莺歌海盆地不同构造演化时期应力场平面分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of planar distribution of stress fields in different tectonic evolution stages of the Yinggehai Basin

a. 晚中新世区域应力示意图(底图为 T_4 — T_0 地层厚度); b. 更新世—全新世区域应力示意图(底图为 T_2 — T_1 地层厚度)

PDZ. 主位移带; C. 收缩分量; E. 伸展分量; R. R破裂; R'. R'破裂; P. P破裂; T. T破裂

旋走滑活动下,由裂陷向拗陷作用转变,盆地进入热沉降阶段^[10,36]。此时乐东8-1底辟区开始沉积地层,并未见明显的构造活动。②中中新世—晚中新世,受印度板块向欧亚板块俯冲强度减弱影响,印支地块顺时针旋转速度放缓和华南地块相对南移,红河断裂带处在左旋走滑向右旋走滑的转换期,莺歌海盆地也经历左旋走滑向右旋走滑的转换^[14,37]。莺歌海盆地中、南部受区域构造运动远程效应影响,左旋走滑向右旋走滑转换的时间更晚,持续左旋走滑活动的时间更长。在中中新世晚期—晚中新世早期,在由1号断裂左旋走滑活动产生的近东西向挤压应力控制下,由盆缘至中央拗陷发育3条北北东向—近南北向构造脊(图10a)。其中一条构造脊贯穿乐东8-1底辟区,发育多条近南北向走滑断裂,并具有明显的压扭特征。③上新世至今,印支板块相对于华南板块逃逸速率变小,哀牢山—红河断裂带整体表现为右旋走滑活动,1号断裂在同样构造背景下发生右旋走滑活动^[24,37]。在更新世—全新世,莺歌海盆缘1号断裂右旋走滑活动产生的北东—南西向伸展应力场,控制乐东8-1底辟区发育一系列张性破裂,包括北北东向主干走滑断裂及派生断裂(图10b)。此时,深层的高温、高压热流体沿张性断裂上涌^[5,38-40],引起地层隆升,形成现今背斜构造。

综上所述,乐东8-1底辟区断裂主要受控于盆缘1号断裂产生的区域应力场。①中中新世晚期—晚中新世早期(早期),受1号断裂左旋走滑产生的近东西向挤压应力控制,发育压扭构造脊,并伴随地层破裂;②更新世中期—全新世早期(中期)和全新世晚期(晚期),受1号断裂右旋走滑产生的近北东—南西向伸展应力控制,发育一系列张性破裂;③全新世晚期(晚期),深层断裂右旋活化导致塌陷,并派生环状断裂。

6 结论

1) 乐东8-1底辟是走滑断裂控制下多期演化形成的塌陷型底辟。底辟区共发育7类断裂,断裂体系具有分层性:深层以近直立脊状走滑断裂为主,浅层发育主干走滑断裂及其派生的R破裂、R'破裂、P破裂和T破裂,以及环状断裂等6类断裂。

2) 乐东8-1底辟区走滑断裂具有多期性,在中中新世晚期—晚中新世早期(早期)、更新世中期—全新世早期(中期)和全新世晚期(晚期)等3个主要阶段发生强烈活动。运动学标志显示,早期断裂发生左旋走滑,中、晚期发生右旋走滑。

3) 乐东8-1底辟区断裂受控于盆缘1号断裂活动产生的区域应力场,早期受1号断裂左旋走滑控制发育北北东向左旋走滑断裂,形成构造脊;中、晚期受1号断裂持续右旋走滑控制发育张性破裂,同时引发深层断裂活化。

参考文献

- [1] BISHOP R S. Mechanism for emplacement of piercement diapirs [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(9): 1561-1583.
- [2] VENDEVILLE B C, JACKSON M P A. The fall of diapirs during thin-skinned extension [J]. Marine and Petroleum Geology, 1992, 9(4): 354-371.
- [3] STEWART S A. Seismic interpretation of circular geological structures [J]. Petroleum Geoscience, 1999, 5(3): 273-285.
- [4] KOPF A J. Significance of mud volcanism [J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(2): 2-1-2-52.
- [5] 杨金海, 马晨曦, 胡林, 等. 莺歌海盆地底辟构造的“断控-流体”成因——基于海底节点采集地震资料的新认识 [J]. 地质学报, 2025, 99(7): 2354-2366.
YANG Jinhai, MA Chenxi, HU Lin, et al. The ‘fault-controlled fluid’ genesis of diapir structure in Yinggehai Basin: A new understanding based on ocean bottom nodes seismic data [J]. Acta Geologica Sinica, 2025, 99(7): 2354-2366.
- [6] ROCA E, FERRER O, ROWAN M G, et al. Salt tectonics and controls on halokinetic-sequence development of an exposed deepwater diapir: The Bakio Diapir, Basque-Cantabrian Basin, Pyrenees [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 104770.
- [7] 蔡周荣, 夏斌, 万志峰, 等. 南海西部晚渐新世主要断裂活动特征及与红河断裂之关系 [J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(4): 436-440.
CAI Zhourong, XIA Bin, WAN Zhifeng, et al. Relationship on the movement characteristics of the main fault and Red River Fault in Western South China Sea at late Oligocene [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(4): 436-440.
- [8] 范彩伟, 刘爱群, 吴云鹏, 等. 莺歌海盆地乐东10区新近系黄流组储层天然气充注与超压演化史 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1370-1381.
FAN Caiwei, LIU Aiqun, WU Yunpeng, et al. Gas charging and overpressure evolution history of the Neogene Huangliu Formation reservoir in Ledong 10 area, Yinggehai Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1370-1381.
- [9] 杨路, 胡林, 胡高伟, 等. 莺歌海盆地超压形成演化过程与控藏作用 [J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(7): 2241-2267.
YANG Lu, HU Lin, HU Gaowei, et al. Formation and evolution of overpressure and its control on hydrocarbon accumulation in the Yinggehai Basin [J]. Science China Earth Sciences, 2025, 55(7): 2241-2267.
- [10] 张家轩, 郭玲莉, 张京京, 等. 红河断裂带对南海西部盆地成盆过程影响机制实验研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 79-97.

- ZHANG Jiaxuan, GUO Lingli, ZHANG Jingjing, et al. Red River fault zone affected the formation of basins in the western South China Sea: An experimental study [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2025, 45(2): 79–97.
- [11] 谢玉洪, 童传新, 裴健翔, 等. 莺歌海盆地黄流组二段碎屑锆石年龄与储层物源分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(3): 517–530.
- XIE Yuhong, TONG Chuanxin, PEI Jianxiang, et al. Detrital zircon ages and reservoir source of the second member of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(3): 517–530.
- [12] 贾茹, 付晓飞, 范彩伟, 等. 超压盆地水力破裂与天然气成藏的关系——以莺歌海盆地乐东斜坡区LD-A气田为例[J]. *天然气工业*, 2024, 44(6): 23–32.
- JIA Ru, FU Xiaofei, FAN Caiwei, et al. Relationship between hydraulic fracture and natural gas accumulation in over-pressured basin: A case study on the LD-A Gas Field in the Ledong slope belt of the Yinggehai Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(6): 23–32.
- [13] 吴克强, 郭潇潇, 罗威, 等. 莺歌海盆地天然气勘探历程与大中型气田成藏模式[J]. *中国海上油气*, 2025, 37(3): 16–25.
- WU Keqiang, GUO Xiaoxiao, LUO Wei, et al. Exploration history of natural gas and accumulation model of large and medium-sized gas fields in Yinggehai Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2025, 37(3): 16–25.
- [14] 何家雄, 夏斌, 张树林, 等. 莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1336–1344.
- HE Jiaxiong, XIA Bin, ZHANG Shulin, et al. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai Basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas [J]. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1336–1344.
- [15] 冯琦, 胡高伟, 徐涛, 等. OBN地震资料在莺歌海盆地东方1底辟勘探中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2025, 40(3): 1296–1304.
- FENG Qi, HU Gaowei, XU Tao, et al. Application of OBN seismic data in the exploration of DF1 diapir in Yinggehai Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2025, 40(3): 1296–1304.
- [16] 单家增, 张启明, 汪集旸. 莺歌海盆地泥底辟构造成因机制的模拟实验(一)[J]. *中国海上油气*, 1994, 8(5): 25–31.
- SHAN Jiazeng, ZHANG Qiming, WANG Jiyang. Model experiments on the mechanism of mud diapir structure in Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 1994, 8(5): 25–31.
- [17] 徐嫣, 万志峰. 莺歌海盆地泥底辟构造与天然气成藏的关系[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(2): 1–5.
- XU Yan, WAN Zhifeng. Relationship between diapir structure and hydrocarbon accumulation in Yinggehai Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2008, 24(2): 1–5.
- [18] 郝芳, 李思田, 龚再升, 等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注[J]. *中国科学: 地球科学*, 2001, 31(6): 471–476.
- HAO Fang, LI Sitian, GONG Zaisheng, et al. Formation mechanism of diapirs and episodic fluid charging in Yinggehai Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2001, 31(6): 471–476.
- [19] 张敏强, 钟志洪, 夏斌, 等. 莺歌海盆地泥-流体底辟构造成因机制与天然气运聚[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(2): 118–125.
- ZHANG Minqiang, ZHONG Zhihong, XIA Bin, et al. Genetic mechanisms of mud-fluid diapir in Yinggehai Basin and Hydrocarbon accumulation [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(2): 118–125.
- [20] 徐涛, 胡高伟, 冯琦, 等. 莺歌海盆地乐东底辟带地震成像及构造—储集体响应特征[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(12): 2205–2216.
- XU Tao, HU Gaowei, FENG Qi, et al. Seismic imaging and structural reservoir response characteristics of Ledong Diapir Belt in Yinggehai Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025, 36(12): 2205–2216.
- [21] 张明强, 谢涛, 王炜, 等. OBN地震资料正演模拟技术研究与开发[J]. *海洋工程装备与技术*, 2019, 6(增刊1): 238–241.
- ZHANG Mingqiang, XIE Tao, WANG Wei, et al. Research and development of OBN forward modeling algorithm [J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2019, 6(S1): 238–241.
- [22] 张明强, 焦叙明, 王炜, 等. OBN资料三维水层相关多次波压制方法研究[J]. *石油物探*, 2020, 59(6): 872–879.
- ZHANG Mingqiang, JIAO Xuming, WANG Wei, et al. 3D water-layer-related multiples attenuation for OBN data [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(6): 872–879.
- [23] 杨东辉, 童亨茂, 范彩伟, 等. 莺歌海盆地构造转折界面的确定及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(3): 590–601.
- YANG Donghui, TONG Hengmao, FAN Caiwei, et al. Determination of the tectonic transformation surface in Yinggehai Basin and its geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(3): 590–601.
- [24] 雷超, 任建业, 裴健翔, 等. 莺歌海—琼东南盆地结合部记录的红河断裂带向海延伸及其演化过程[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(1): 81–97.
- LEI Chao, REN Jianye, PEI Jianxiang, et al. Tectonics of the offshore Red River Fault recorded in the junction of the Yinggehai and Qiongdongnan basins [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(1): 81–97.
- [25] 杨培, 张佳豪, 宋荣彩, 等. 红河断裂对莺歌海盆地地热系统的控制作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(3): 428–438.
- YANG Pei, ZHANG Jiahao, SONG Rongcai, et al. Structural control of Red River Fault on geothermal system in Yinggehai Basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(3): 428–438.
- [26] LIU Baoming, XIA Bin, LI Xuanan, et al. Southeastern extension of the Red River fault zone (RRFZ) and its tectonic evolution significance in western South China Sea [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(8): 839–850.

- [27] ZHU Mangzheng, GRAHAM S, MCHARGUE T. The Red River fault zone in the Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2009, 476(3): 397-417.
- [28] YIN Zhengxin, CAI Zhouong, YAO Yongjian, et al. Tectonic dynamics of the Zhongjiannan Basin in the western South China Sea since the late Miocene[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 996267.
- [29] DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(1): 109-137.
- [30] 唐贤君, 朱虹浩, 李宁, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷宁波构造带反转背斜分段差异变形及其油气地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(1): 167-177.
- TANG Xianjun, ZHU Honghao, LI Ning, et al. Segmented differential deformation of inverted anticlines and its significance on hydrocarbon accumulation in the Ningbo structural zone, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(1): 167-177.
- [31] 刘景东, 任成刚, 王小娟, 等. 川中地区中侏罗统沙溪庙组断层输导有效性定量评价[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1705-1719.
- LIU Jingdong, REN Chenggang, WANG Xiaojuan, et al. Quantitative assessment of hydrocarbon transport effectiveness along faults in the Middle Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(6): 1705-1719.
- [32] 韩光明, 周家雄, 裴健翔, 等. 莺歌海盆地底辟本质及其与天然气成藏关系[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(5): 27-31.
- HAN Guangming, ZHOU Jiaxiong, PEI Jianxiang, et al. Essence of diapir and its relationship with natural gas accumulation in Yinggehai Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(5): 27-31.
- [33] 于俊峰, 侯静娴. 莺歌海盆地底辟构造演化非同期性[J]. *广东石油化工学院学报*, 2018, 28(1): 1-5.
- YU Junfeng, HOU Jingxian. Non-synchronism of diapir tectonic evolution in Yinggehai Basin[J]. *Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology*, 2018, 28(1): 1-5.
- [34] TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431-437.
- [35] LELOUP P H, ARNAUD N, LACASSIN R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B4): 6683-6732.
- [36] LI Lun, LU Shaoping, GAO Rui, et al. Seismic reflection imaging of a deep-penetrating Red River Fault in the Yinggehai Basin, northwest of the South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(19): e2023GL104598.
- [37] 高红芳. 南海西缘断裂带走滑特征及其形成机理初步研究[J]. *中国地质*, 2011, 38(3): 537-543.
- GAO Hongfang. A tentative discussion on strike-slipping character and formation mechanism of western-edge fault belt in South China Sea[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 537-543.
- [38] 王振峰, 何家雄, 解习农. 莺歌海盆地泥-流体底辟带热流体活动对天然气运聚成藏的控制作用[J]. *地球科学*, 2004, 29(2): 203-210.
- WANG Zhenfeng, HE Jiaxiong, XIE Xinong. Heat flow action and its control on natural gas migration and accumulation in mud-fluid diapir areas in Yinggehai Basin[J]. *Earth Science*, 2004, 29(2): 203-210.
- [39] 曹江骏, 罗静兰, 范彩伟, 等. 深部热流体活动对储层成岩作用及孔隙演化的影响: 以莺歌海盆地 LDX 区中新统黄流组为例[J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 412-429.
- CAO Jiangjun, LUO Jinglan, FAN Caiwei, et al. Deep thermal fluid activity and its influence on the diagenesis and pore evolution of reservoirs: A case study from the Miocene Huangliu Formation reservoir in the LDX area, Yinggehai Basin, northern South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 412-429.
- [40] 冯子齐, 郝芳, 胡林, 等. 深部热流体活动背景下氦气的成因来源与运聚机制——以莺歌海盆地乐东底辟区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 655-666.
- FENG Ziqi, HAO Fang, HU Lin, et al. Genetic source, migration and accumulation of helium under deep hydrothermal fluid activities: A case study of Ledong diapir area in Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 655-666.

(编辑 王 迪)