

莺-琼盆地高压成因输导体系特征、识别及其成藏过程

范彩伟

[中海石油(中国)有限公司 湛江分公司,广东 湛江 524057]

摘要:莺-琼盆地为新生代的高温高压快速沉降盆地,通常伴随着热流底辟体的发育,形成了异于常压盆地的油气输导体系,由地层层深部压力释放形成的底辟和裂缝是莺-琼盆地天然气运移的主要输导通道。研究利用沿层三维地震相干分析及曲率分析技术对莺-琼盆地高压底辟型和裂缝型输导体系进行了系统的识别,研究其空间展布特征及演化过程,结合天然气同位素及包裹体等地球化学手段,综合分析了高压成因输导体系与研究区天然气充注、散失及富集成藏的关系。研究表明,底辟型和裂缝型输导体系在空间分布上具有由深向浅阶梯状发育的特点,其中底辟型输导体系通常发育在莺歌海盆地的中央拗陷带,裂缝型输导体系主要分布在盆地热流底辟的边缘、斜坡近凹区的高压地层中。底辟型输导体系的发育演化历史可以划分为增压期、穿刺期、平衡期、释放期和塌陷期五个阶段(类型),具有增压期深部充气、穿刺期浅层成藏、平衡期复合成藏、释放期翼部成藏、塌陷期破坏成藏的成藏规律。裂隙型输导体系具有高压和构造两种成因,天然气具有浅部早、深部晚的成藏规律。

关键词:高温高压;裂缝;输导体系;底辟;莺-琼盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

The identification and characteristics of migration system induced by high pressure, and its hydrocarbon accumulation process in the Yingqiong Basin

Fan Caiwei

(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China)

Abstract: The Yingqiong Basin is a Cenozoic high-temperature and high-pressure basin with rapid subsidence, usually accompanied by the development of thermal fluid diapirs. This formed a unique hydrocarbon migration system, with the diapirs and fractures caused by the pressure release of deep strata functioning as the major transporting pathways of natural gas in the basin. The research distinguished 2 types of migration systems in the Yingqiong Basin: the high-pressure-diapir system and the fracture system, based on 3D seismic coherence analysis and curvature analysis along the formation. The spatial distribution characteristics of these two systems and their evolution processes have been investigated, and the relationship between the overpressured migration systems and the gas charging, dissipating and accumulating in the study area is analyzed by geochemical means such as natural gas isotopes and inclusions. The results indicate that, in spatial distribution, the two types of migration systems are characterized by stepwise development from deep to shallow: the former usually develops in the central depression zone of the Yinggehai Basin and the latter mainly distributes in the margin of thermal fluid diapirs and the high-pressure strata in the subsidence center proximity part of the steep slopes. According to the evolution history, the diapir migration system consists of five stages (types): pressurization, puncture, equilibrium, release and collapse, and at each stage the gas accumulation style features deep gas charging, shallow gas accumulating, simultaneous deep and shallow accumulating, flank accumulating, and accumulation destruction respectively. The fracture migration system originates from either high pressure or certain deformation processes, characterized with early gas accumulation in shallow strata and later gas accumulation in deep ones.

Key words: high temperature and high pressure, fracture, transmission system, diapir, Yingqiong Basin

收稿日期:2017-06-22;修订日期:2018-01-21。

作者简介:范彩伟(1973—),男,高级工程师,莺-琼盆地油气地质勘探。E-mail: fanew@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024005)。

输导体系是指油气从烃源岩运移到圈闭过程中所经历的所有路径网及其相关围岩,包括连通砂体、断层、裂隙、底辟及其组合^[1]。根据油气运移的主要方向,可将莺歌海、琼东南盆地(以下简称“莺-琼盆地”)输导体系划分为垂向和侧向两大类输导体系,垂向输导体系主要包括断层、底辟和裂隙,主要运移动力为压力;侧向运移体系主要包括连通砂体和不整合面,主要运移动力为浮力^[2]。流体沿断裂垂向运移具有幕式特征^[3],在活动期以断层核为主要通道,在“地震泵”作用下“幕式”流动^[4-5],在非活动期以断层核及其两侧诱导裂缝网络为主要通道,在浮力作用下缓慢渗流^[6-7]。由于断层的分段连接及非均匀滑动等因素,导致断层面在大尺度具有波状起伏的脊、槽特征,以及在小尺度上具有各向异性的粗糙度^[8-9],导致其周围的岩石在强起伏区域(高曲率)表现出非均匀的应变场及较高的裂缝集中^[10]。统计表明,油气常分布于断裂分段连接的部位,即应变集中发育的区域,往往是流体运移的优势通道。钻遇断裂带岩心含油情况及钻遇的“断裂空腔”中的沥青等均可作为断裂输导流体提供最直接的证据^[11-12]。同时,断裂带内断层周围钻井的古热流、镜质体反射率及氧同位素和微量元素的变化也可以作为流体流动的直接证据,而气烟囱和麻坑等地球物理响应以及地层水矿化度、含氮化合物等可作为断裂输导的间接证据^[13-14]。流体沿砂体也以优势运移通道方式侧向运移^[15-16],罗晓容等(2012)从实际盆地研究可操作性的角度提出输导层的概念及模型方法,建立了利用砂地比判别砂体间连通性的统计模型方法,基于储层成岩-油气充注过程分析,确定主要运移期砂岩输导层孔渗性分布,实现对输导层非均质特征的量化表征^[17-18]。提出渗透率作为输导层和断层统一量化表征的参数,采用建立多个平面拓扑模型的方法描述复合输导格架,实现了由断层-砂岩输导层构成复合输导体系的量化表征,达到定量预测油气侧向运移路径的目的^[18-20]。

莺-琼盆地的高温高压快速沉降背景使得热流底辟体发育,也就形成了与之伴生的油气输导体系,即底辟型和裂缝型输导体系。热流底辟体演化不同阶段形成的输导体系对油气运移、聚集和成藏具有差异性的控制作用。由于莺-琼盆地为超压型盆地,前人对莺-琼盆地的研究主要集中在盆地内超压的形成演化、超压对油气成藏的控制作用等方面,而忽略了对油气输导体系的研究。本文通过研究输导体系的空间特征、形成演化,明确不同输导体系油气成藏过程的时空差异,以期对莺-琼盆地天然气进一步勘

探提供理论指导。

1 地质背景

莺-琼盆地位于欧亚板块、太平洋板块和印澳板块的交汇地带,是发育于南海北部大陆架西北部的新生代强超压、转换-伸展型含气盆地^[21-23]。受红河断裂带走滑伸展作用影响,莺歌海盆地整体呈菱形,沿北西-南东向展布,由中央坳陷带、莺东斜坡带、莺西斜坡带等多个一级构造单元组成,其中中央坳陷带包括河内凹陷、临高凸起和莺歌海凹陷^[24](图1a)。莺歌海盆地经历了早期断陷和晚期拗陷的两个演化阶段,具有典型的“断-拗”双层结构样式^[24-25](图1b)。

在始新世-渐新世早期,随着印度板块向欧亚板块汇聚,欧亚板块东缘伸展活动为印支半岛的挤出运动提供了自由边界,由此引起印支半岛发生相对快速的挤出运动,为盆地提供了左旋剪切分量,而印支地块的旋转则为盆地提供了近NE-SE向的伸展分量,二者的综合作用使盆地沿一些主要控盆断裂发生左旋斜向拉伸^[24,26]。渐新世晚期-中新世早期,印度-欧亚板块之间的汇聚向正北方向转变,导致印支半岛向南东方向的挤出运动逐渐减弱,莺歌海盆地的断陷作用渐新世晚期已明显减弱。由于应力场的改变,盆地北部发育了一系列反转构造,如临高凸起带和临高-海口区的鼻状构造。中新世早期-中期,印度-欧亚板块的碰撞促使华南地块开始向东挤出。但是,在15.5 Ma至5.5 Ma期间红河断裂仍然表现为左旋特征。莺歌海盆地在左旋剪切应力场作用下使沉积层发生轴向为南北的褶皱作用^[28]。至中新世晚期-第四纪,印支板块此时已经楔入欧亚板块内部,它对欧亚板块内部的华南地块影响作用加强。在5 Ma左右,红河断裂带由左旋走滑转变为右旋走滑^[26-27],莺歌海盆地的走滑应力场也随之改变,进而导致了底辟构造的形成,这些底辟构造对油气的聚集成藏起到了重要的作用^[28-29]。

古近系为断陷结构,沉积的地层有始新统岭头组、渐新统崖城组和陵水组。新近系为坳陷结构,沉积的地层有下中新统三亚组、中中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组、第四系乐东组(图2)。研究表明,梅山组和三亚组海相泥岩是盆地内的主要烃源岩^[30],黄流组、莺歌海组及乐东组发育的滨-浅海砂泥岩、大型重力流砂岩^[22],形成了盆地内的主要储盖组合,其中黄流组一段上部-莺歌海组二段下部泥岩为研究区内发育稳定的区域性盖层。

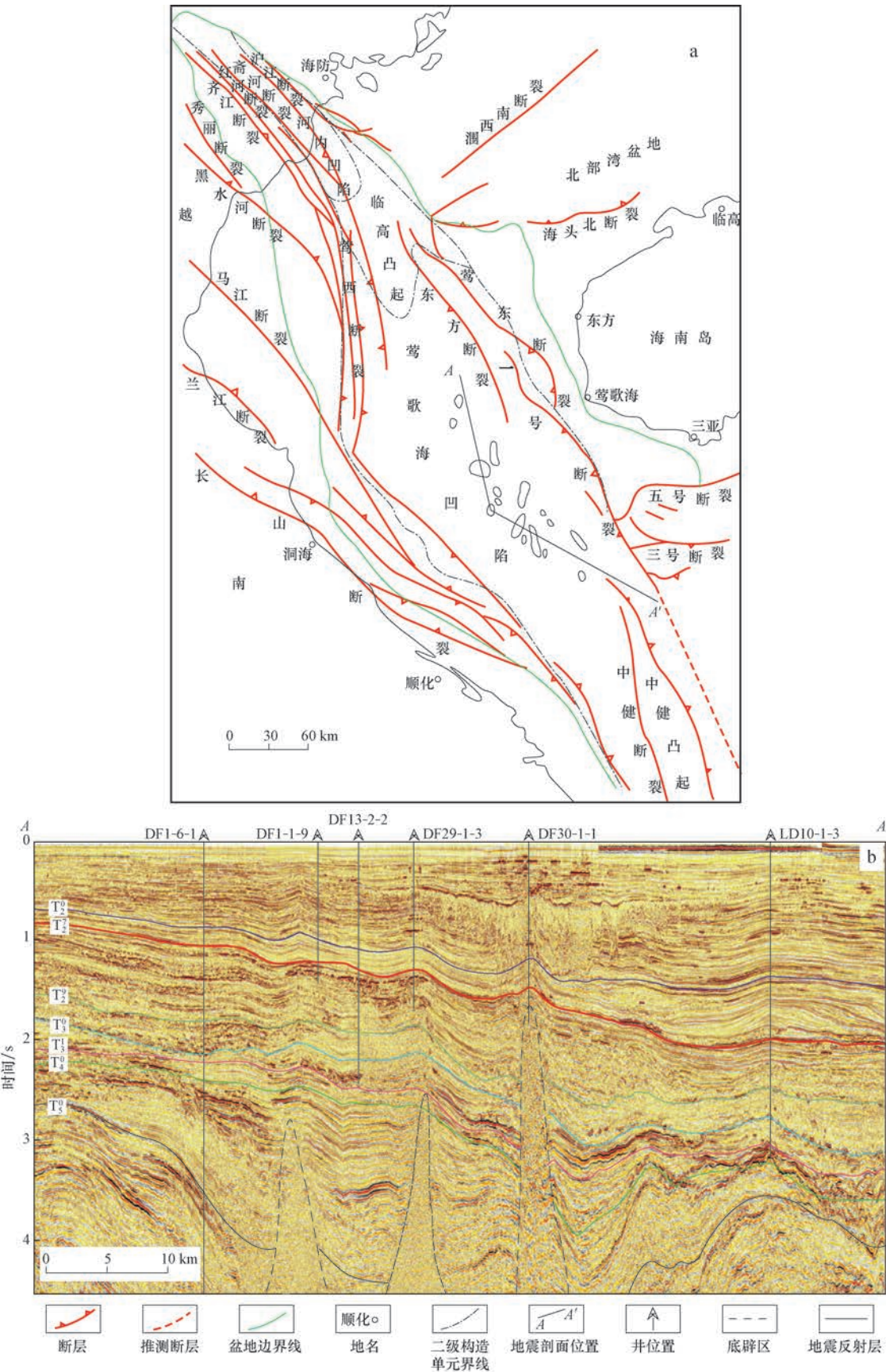


图 1 莺歌海盆地构造纲要及热流底辟构造分布

Fig. 1 Tectonic outline and thermal fluid diapir distribution of the Yinggehai Basin
a. 盆地平面构造纲要; b. 地震剖面所体现的盆地构造样式

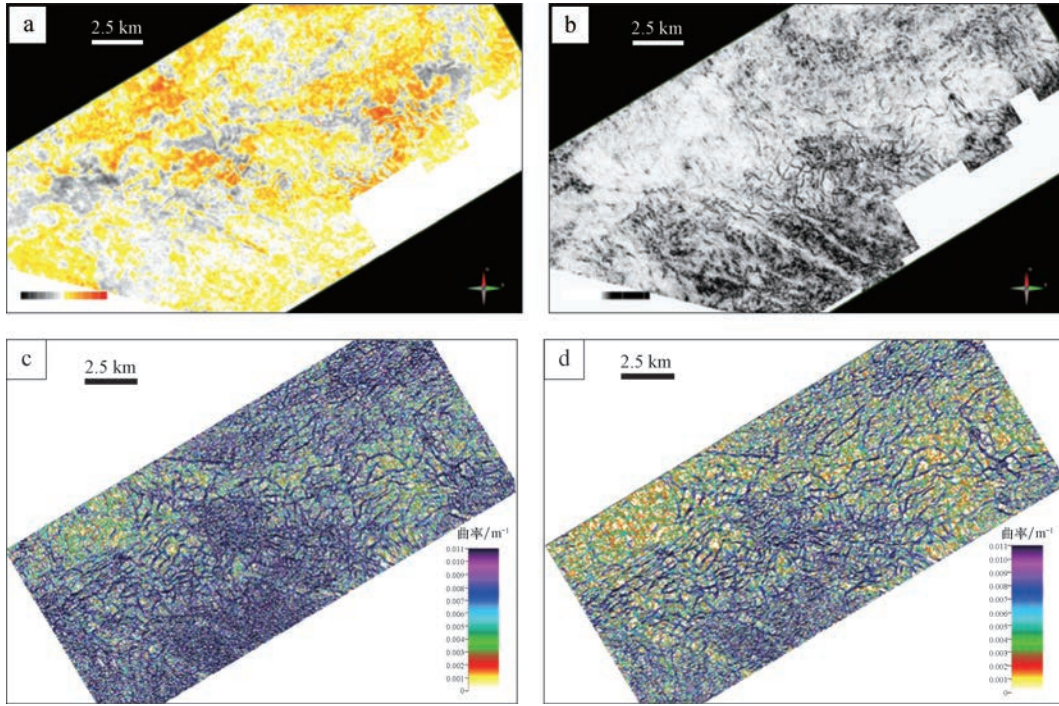


图 3 莺-琼盆地陵水 25 区地震切片特征

Fig. 3 Seismic slice characteristics of the Lingshui 25 area, Yingqiong Basin

a. 沿层振幅切片; b. 沿层相干切片; c. 最正曲率(滤波前); d. 最正曲率(滤波后)

$$K_{\text{mean}} = [a(1 + e^2) + b(1 + d^2) - cde] / (1 + d^2 + e^2)^{3/2} \quad (3)$$

$$K_{\text{Gauss}} = (4ab - c^2) / (1 + d^2 + e^2)^2 \quad (4)$$

$$K_1 = K_{\text{mean}} + (K_{\text{mean}}^2 - K_{\text{Gauss}})^{1/2} \quad (5)$$

$$K_2 = K_{\text{mean}} - (K_{\text{mean}}^2 - K_{\text{Gauss}})^{1/2} \quad (6)$$

$$K_{\text{max}} = \begin{cases} K_1, & |K_1| \geq |K_2| \\ K_2, & |K_1| < |K_2| \end{cases} \quad (7)$$

$$K_{\text{min}} = \begin{cases} K_2, & |K_1| \geq |K_2| \\ K_1, & |K_1| < |K_2| \end{cases} \quad (8)$$

$$K_{\text{pos}} = (a + b) + [(a - b)^2 + c^2]^{1/2} \quad (9)$$

$$K_{\text{neg}} = (a + b) - [(a - b)^2 + c^2]^{1/2} \quad (10)$$

式中: K 为曲率, m^{-1} ; r 为与曲线正切的圆半径, m ; a, b, c, d, e, f 为常量; K_{mean} 为平均曲率, m^{-1} ; K_{Gauss} 为 Gauss 曲率, m^{-1} ; K_1, K_2 为主曲率, m^{-1} ; K_{max} 为最大曲率, m^{-1} ; K_{min} 为最小曲率, m^{-1} ; K_{pos} 为最正曲率, m^{-1} ; K_{neg} 为最负曲率, m^{-1} 。

应用层位曲率的谱限制估算技术后,提高了地层的横向连续性,而断裂、水沉积体等不连续结构特征得到有效地保持和增强,地质体的几何形态及其反射结构得到更加清晰的反应,同样在乐东陵水 25 区得到了较好的应用(图 3c, d)。

2.3 输导体系分布特征

识别结果及地质研究表明,莺歌海盆地高压成因

输导体系分底辟和裂缝两种类型(图 4),底辟型输导体系是由裂缝和断层复合而组成,主要发育在莺歌海凹陷中央地区。裂缝型输导体系主要分布在莺歌海凹陷底辟边缘、斜坡近凹区、乐东凹陷和陵水凹陷的高压地层中。

3 输导体系成因及演化历史

3.1 底辟型输导体系形成演化过程

莺歌海凹陷底辟形成源于地层高压,也受构造作用的激发和强化,底辟活动的本质是地层深部的高压释放,而流体是压力释放的载体。莺歌海凹陷由于新近纪快速沉积巨厚泥岩为主的地层,沉积速率在 700 m/Ma 以上,地层孔隙中的大量水不能及时排出,处于欠压实环境,形成异常高压流体,又因水热增压和生烃作用,使得高压加剧,形成超压囊,当深部地层增压积蓄到足够能量,并受基底断裂右行走滑错动和东西向拉分作用,形成地层薄弱带,超压流体会沿薄弱带垂向穿刺地层,并造成地层的塑性上拱,形成底辟体^[36-38],这种穿刺作用是阶梯式进行的,随着深部地层流体压力的增加和右旋拉分作用的增强,流体随地层压力垂向传递穿刺浅部地层,因此流体垂向穿刺的过程,即是高压传递的过程,也是高压散失的过程,还是底辟形成、演化的过程。根据地层破裂特征将其分

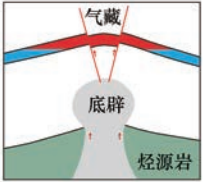
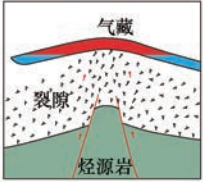
垂向疏导体系类型	模式图	主要分布	气藏代表
底辟型		莺歌海凹陷	东方1-1、东方13-2、 乐东22-1
裂缝型		莺歌海凹陷底辟周缘、 琼东南盆地乐东、陵水 凹陷超压地层	陵水25-1、乐东10-1

图 4 莺 - 琼盆地垂向输导体系类型及特征

Fig. 4 Types and characteristics of vertical migration system in Yingqiong Basin

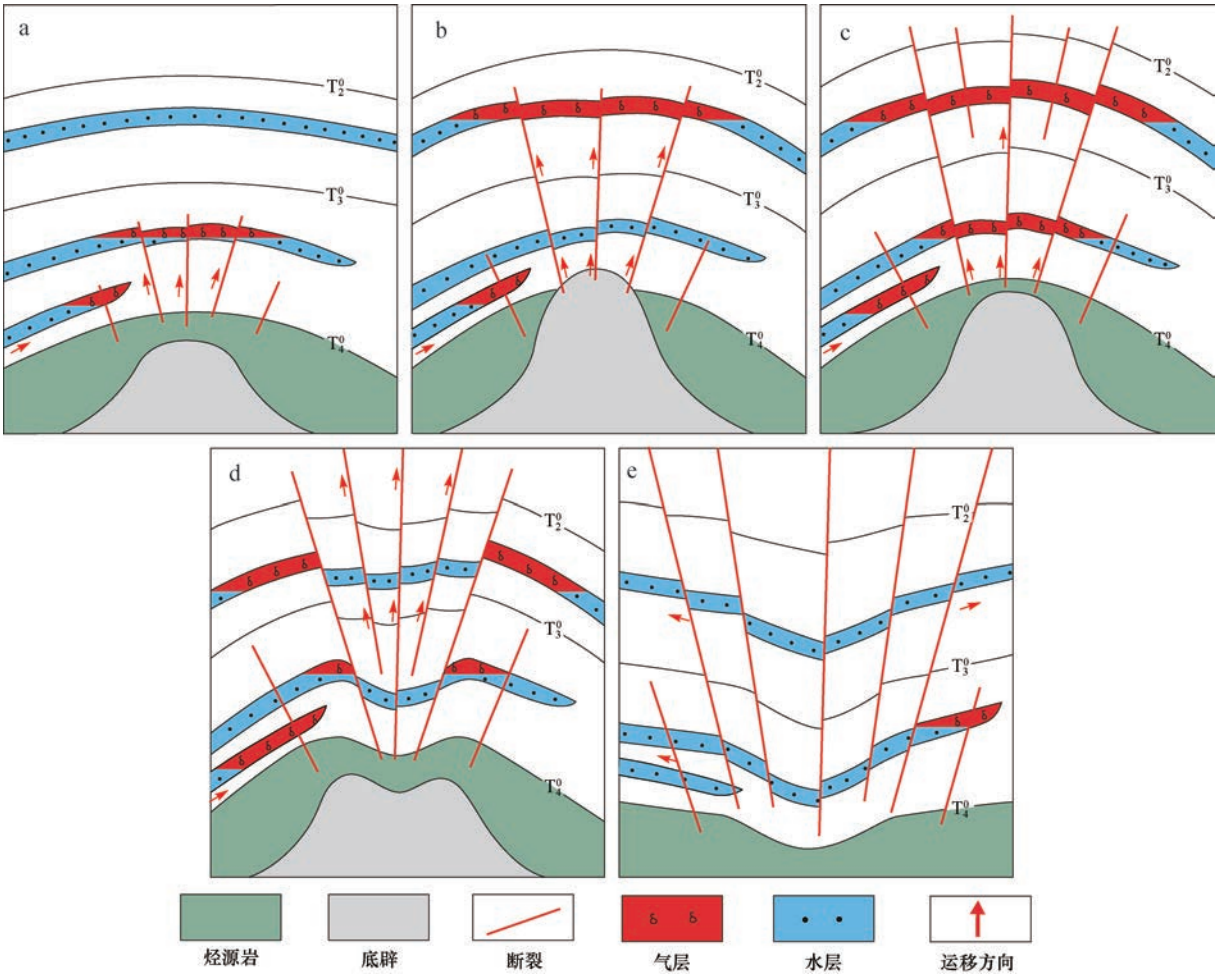


图 5 莺歌海盆地底辟演化阶段模式

Fig. 5 Evolution model of diapirs in Yinggehai Basin

a. 增压期; b. 穿刺期; c. 平衡期; d. 释放期; e. 坍塌期

为 5 个演化阶段(图 5):增压期(穿刺早期),穿刺期、平衡期、释放期和塌陷期。

1) 增压期(也称穿刺早期)

随着构造演化作用,地层内部压力逐渐增加,深部地层开始逐渐发生变形,地层开始破裂形成裂缝和小断层,而浅部地层未受到影响,断层和裂缝是流体运移的主要通道,但受到构造规模的限制,高压及热流体散逸速率慢^[39-41]。

2) 穿刺期

底辟核部地层上拱特征明显(图6a),顶部发生强烈破裂,发育大量正断层,平面走向呈放射状(图6b),断裂成为热流体的散失通道,地层内高压界面由深部向浅部地层阶梯式发育。底辟深部高压或热流体向浅部地层散失,但深部地层高压能量充足,浅部地层处于地层增压和热流体充注过程。底辟核部深部地层破裂,保存条件差,早期深部气藏气体沿断裂二次运移到浅部聚集再成藏。

3) 平衡期

深部高压和热流体散失到一定程度,地层流体压力下降,大量地层裂缝和断层主要处于闭合状态,深部热流体向浅层传递的速率迅速下降。对比穿刺期,断

层平面展布由放射状转为南北向条带状分布(图6d),反映最大地应力由垂直向上的高压穿刺力转为水平东西向伸展为主(右行走滑作用派生的东西向拉分作用),底辟核部地层产状较平缓或低幅度塌陷(图6c)。由于前期高压快速散失,底辟深部水溶相天然气析出成藏,其成藏规模与上覆盖层的封闭能力成正比,在底辟核部,断层幕式活动,圈闭中天然气的保存和散逸处于一种平衡状态,难以聚集大规模气藏。

4) 释放期

经过长期的高压流体散失,底辟演化进入释放期,底辟整体呈背斜形态,但核部地层较大规模塌陷,呈“M”型双峰构造特征(图6e),断裂剖面上呈现负花状结构,平面延伸距离较长(图6f),释放期核部地层塌

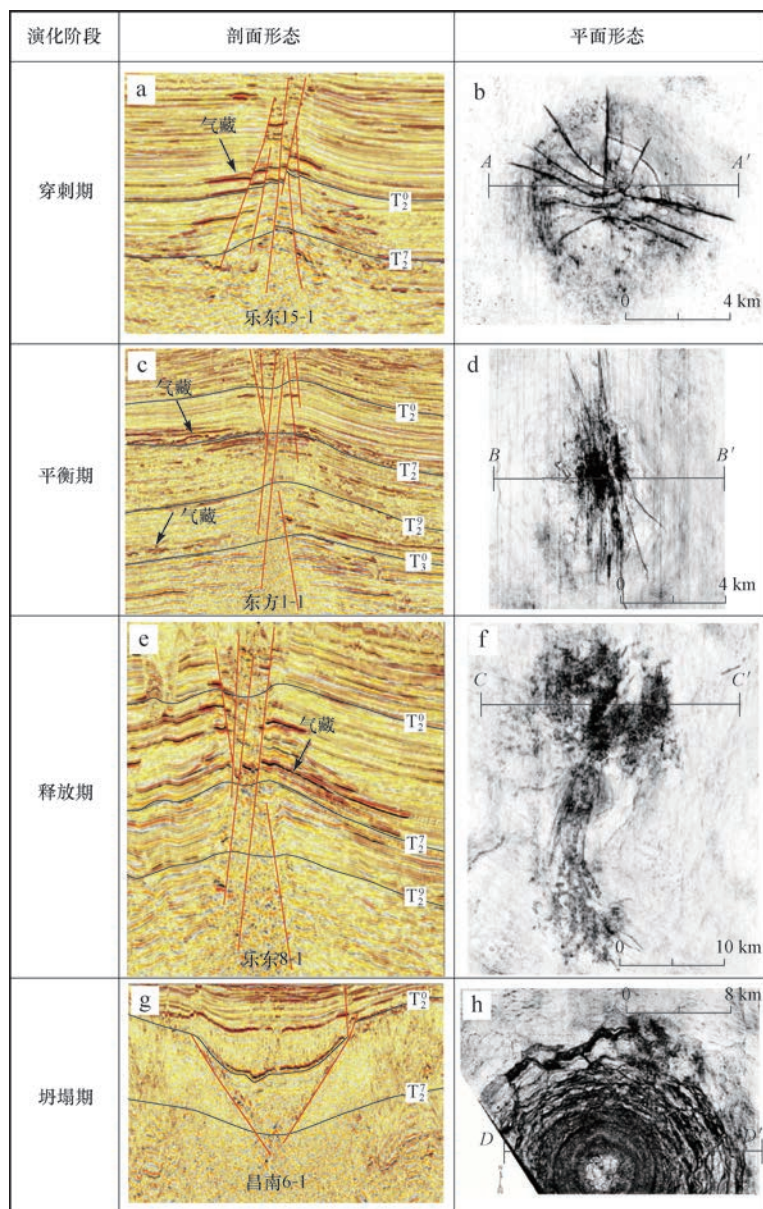


图6 不同演化阶段底辟构造形态特征

Fig. 6 Morphological characteristics of diapirs during various evolutionary stages

陷,地层破裂程度增强,高压和热流体的散失速率加快,不论浅层还是深层,底辟核部早期形成的气藏遭受破坏,残余的气藏散落在塌陷边缘高部位。

5) 塌陷期

随着地层塌陷范围从底辟核部逐步扩大到整个底辟甚至外围地区,地层高压和热流体的散失速率与底辟塌陷区面积呈几何级增长关系,地层产状呈巨大的向斜或洼陷,这是塌陷期底辟的特征(图6g,h),底辟实际已经不存在,早期形成的气藏进入塌陷期难以保存,只能在塌陷边缘地区二次运移形成少量小规模气藏。

3.2 裂缝型输导体系成因及特征

莺-琼盆地新近系大尺度断层整体不发育^[37],但是在超压和构造作用下,形成了大量的微裂缝和亚地震断层(小尺度断层),它们构成了主要的流体垂向输导体系^[37-39]。在莺歌海盆地高压地层,当地层压力达到或超过岩层抗张强度与最小主应力之和时,地层发生水力破裂^[38],形成大量的张性微裂缝。根据镜下薄片观察(图7),单条微裂缝规模一般比较小,其开度一般只有几十微米,长度为数百微米,但是它们往往密集成带发育,在垂向上可延伸数百米甚至上千米,在地震上往往表现为模糊带^[42]。这些微裂缝有的被后期矿

物充填,有的仍然充填烃类运移过程中残留的沥青,说明它们是重要的流体垂向运移通道(图7)。这些水力破裂裂缝在空间上传导发生流体运移,并形成气烟囱,在垂向上延伸长度达500~1000 m,这些气烟囱在地震上形成“亮点”,说明流体通过气烟囱进行了排泄,并且最终发生重新聚集^[40](图8)。超压微裂缝的发育与地层流体超压程度直接相关^[40-41],因此通过计算地层超压破裂面可以预测不同地层超压微裂缝发育的深度^[40-41],拟合井眼地层破裂压力与深度的关系结果表明:莺-琼盆地新近系地层破裂压力与破裂深度成正相关的关系,即破裂深度越深,对应的破裂压力越大,当压力系数达到1.9时,孔隙压力就能大于破裂压力,开始产生裂缝,当压力系数达到2.0时,新近系地层破裂具有广泛性^[40]。

超压作用还促进了剪切破裂的发生^[36]。在底辟边缘、深入凹陷的凸起区、深部断裂密集区,由于差异沉降、构造拉张、底辟张拱、先存断裂调节活动等构造作用形成了断距较小、在地震资料上难以识别的小尺度断层,这些小尺度断层发育规模较大,分布具有区域性,通过曲率等沿层地震属性技术可以达到较好的识别效果。高压成因裂缝具有规模小、密度大、沿层分布、连通性差的特点,而构造成因裂缝具有规模大、密

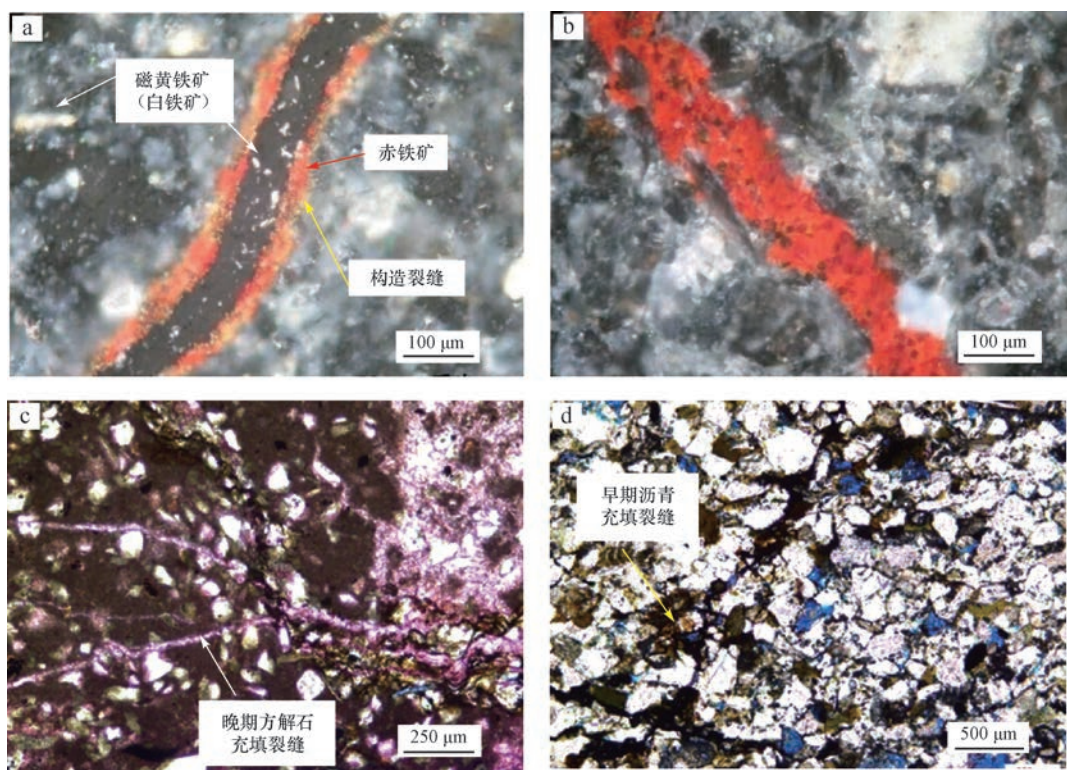


图7 琼东南盆地盖层水力破裂形成的微裂缝及裂缝充填

Fig. 7 Microfractures and their fillings in caprocks formed by hydrofracturing in Qingdongnan Basin

a. 泥底辟(断裂)作用带构造裂缝,裂缝中见两期充填,早期赤铁矿充填,晚期隐晶质及磁黄铁矿充填;b. 水力破裂裂缝,未充填;c. 水力破裂裂缝,方解石充填;d. 水力破裂裂缝,沥青充填

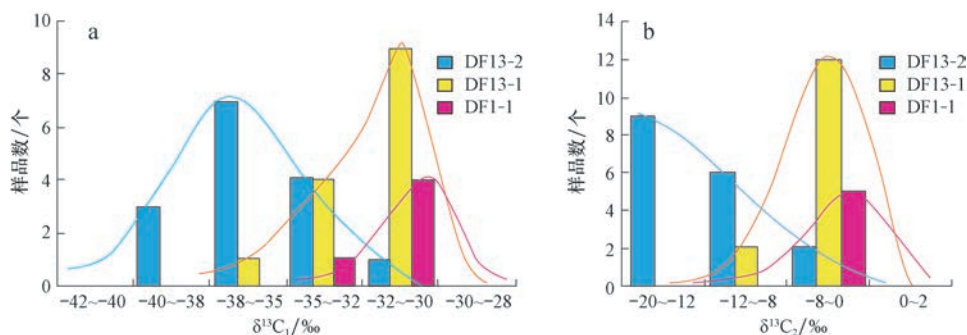


图8 莺歌海盆地 DF1-1 地区中深层黄流组-梅山组天然气充注序列

Fig. 8 Gas charging sequence of the medium-to-deep Huangliu-Meishan Formation in DF1-1 area, Yinggehai Basin

a. $\delta^{13}\text{C}_1$ 含量分布; b. $\delta^{13}\text{C}_2$ 含量分布

度小、穿层分布、垂向联通性好的特点,两种成因裂缝在莺-琼盆地高温高压地层中叠加,可以有效提高裂缝的油气输导效率。

4 不同输导体系成藏过程

4.1 底辟构造造成藏特征及成藏过程

莺-琼盆地底辟在不同演化阶段形成的不同类型输导体系对天然气聚集成藏的作用具有明显差异。目前勘探成果证实了与底辟穿刺期、平衡期及释放期相对应的三种类型气藏,其中以处于平衡期的底辟构造形成的气藏规模最大。以东方气田为例,该类气藏不仅在垂向上具有浅部和深部气藏分布的复合叠置特征,还具有与底辟输导体系阶段性演化相对应的气体多期充注成藏特征^[41-44]。

1) 不同构造部位天然气组分差异明显

多期次的底辟活动使得底辟波及区具有多期次天然气充注的特点。东方气田烃源岩成熟门限大约在 2 800 m,底辟区浅层气层埋深小于 1 300 m,尚未成熟,不可能有大量成熟天然气的生成^[41],而核部浅层发现的大量天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分布范围在 -43.35% ~ -30.3% , $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 -28.8% ~ -21.8% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 -20.7% ~ -0.7% ,气态烷烃碳同位素序列局部倒转,表明存在成熟~过成熟不同化阶段天然气垂向运移混入充注。另一方面,底辟核部中深层天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分布在 -35.3% ~ -30.3% ,重 $\delta^{13}\text{C}_1$ 样品居多, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 -26.6% ~ -24.9% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 -10.5% ~ -3.2% ,气态烷烃碳同位素序列局部倒转^[45],天然气成熟度更高,同样具有不同成熟度混合充注特征。底辟核部浅层和中深层天然气这种同位素特征反映了天然气多期混合充注,天然气成熟度高,后期改造作用强的特征(图8)。

相反,底辟波及区中深层天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分布在

-39.3% ~ -33.1% , $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 -28.6% ~ -25.2% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 -15.9% ~ -7.2% ,气态烷烃碳同位素序列倒转比例很少,反映天然气早期单一充注特征,天然气成熟度较低, CO_2 以有机成因为主(图8)。

2) 流体包裹体具有多期次特征

东方气田底辟核心区流体包裹体分布具有明显的多期次特征,均一温度测试结果统计表明,与含气态烃包裹体共生的盐水包裹体均一温度主峰温度为 110 ~ 120 °C,与 CO_2 包裹体共生的盐水包裹体均一温度主峰温度为 140 ~ 150 °C,分别对应于上新世晚期及更新世晚期两次流体充注(图9)。这些特征均表明东方气田底辟垂向输导体系形成演化过程中的多期次流体活动,导致底辟核部浅层、深层具有明显的多期成藏特征,而底辟边部则为早期单一充注成藏(图10)。

3) 底辟活动与天然气成藏过程相匹配

如前所述,底辟发育过程可以分为 5 个演化阶段。在底辟增压期,天然气散逸速度较慢,天然气成藏规模较小。底辟核部在穿刺期急剧上拱,使顶部浅层盖岩发生强烈破裂,当下部地层压力超过盖层突破压力时,含气水体沿着裂缝穿过盖层向上运移,由于地层压力的降低甲烷析出聚集成藏。由于热液流体的散失,底辟深部压力也呈降低趋势,部分天然气在底部析出成藏。通过对中深层高温高压带与浅层常压带、压力过渡带天然气的组成、碳同位素特征差异的对比分析,表明底辟活动期为早期成熟气充注,是底辟区主要的成藏期之一^[46-48]。当压力随热液流体散失到一定程度时,底辟进入活动静止的平衡期,圈闭中天然气处于聚散动平衡状态。随着底辟压力的进一步积聚,底辟再活动,一方面带来了晚期高成熟天然气的充注,一方面对早期形成的成熟天然气藏进行改造,在底辟核部纵向上形成多层位天然气聚集成藏的特点。这样,周而复始的压力积聚、盖岩破裂、压力释放过程使得底辟核

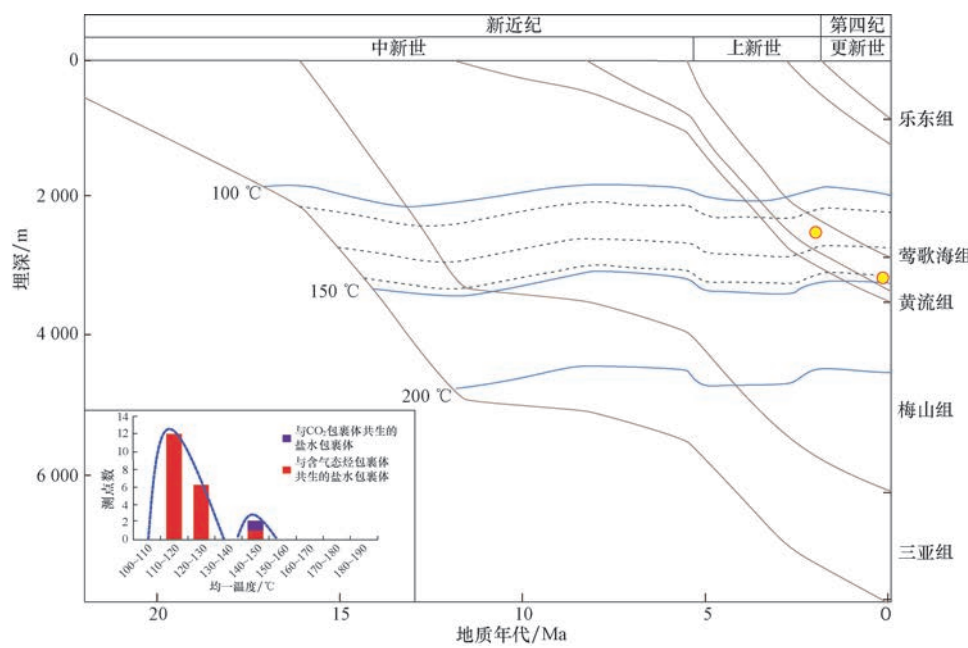


图 9 莺 - 琼盆地东方气田底辟核部中深层成藏演化史

Fig. 9 Evolution history of accumulation in middle and deep layers of diapir nucleus in the Dongfang gas field of the Yingqiong Basin

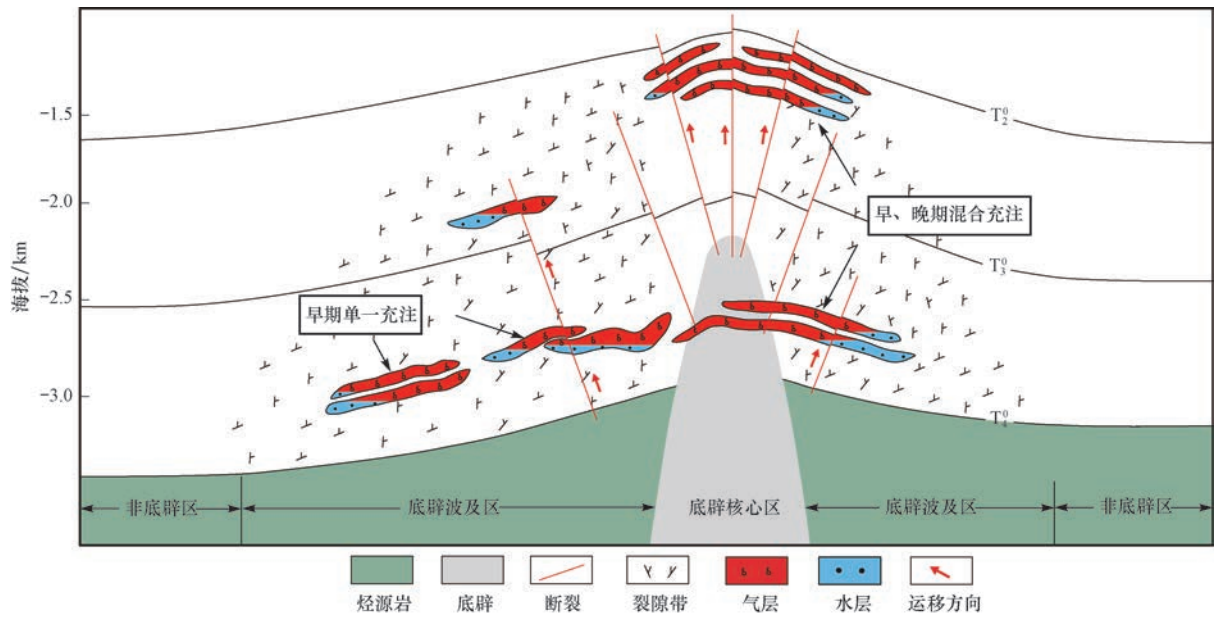


图 10 莺 - 琼盆地东方气田底辟垂向输导体系成藏模式

Fig. 10 Accumulation model of vertical transmission system of diapir in the Dongfang gas field of the Yingqiong Basin

部浅层、深层天然气的运聚成藏具有明显的多期幕式特征(图 11)。由于底辟在地质历史活动时,不同构造部位波及程度不同。在底辟核部区和底辟斜坡区分别为多期次天然气成藏的“改造残留型”、“优质高效型”。而在非底辟区的平稳带为单一期次成藏的“水相脱溶型”。

4.2 裂缝型输导体系成藏特征

与底辟输导体系成藏规律不同,裂缝型地层垂向

输导体系天然气成藏规律表现为:深层圈闭天然气充注时间相对晚,浅层圈闭天然气充注时间相对早。以琼东南盆地乐东凹陷黄流组为例,从不同埋深岩性地层圈闭天然气同位素分析结果可知,埋深最大和地层压力最高 YC27 含气构造(埋深 4 000 m 附近,地层孔隙流体压力超过 85 MPa)天然气 $\delta^{13}C_1$ 分布在 $-34.5\% \sim -34.0\%$, $\delta^{13}C_2$ 为 $-22.6\% \sim -22.2\%$, 甲烷含量为 $89.4\% \sim 90.6\%$, C_{2+} 的含量为 $2.7\% \sim 2.8\%$, C_1/C_{1-5} 的比值为 0.97,均反映较高的气体成熟度;而

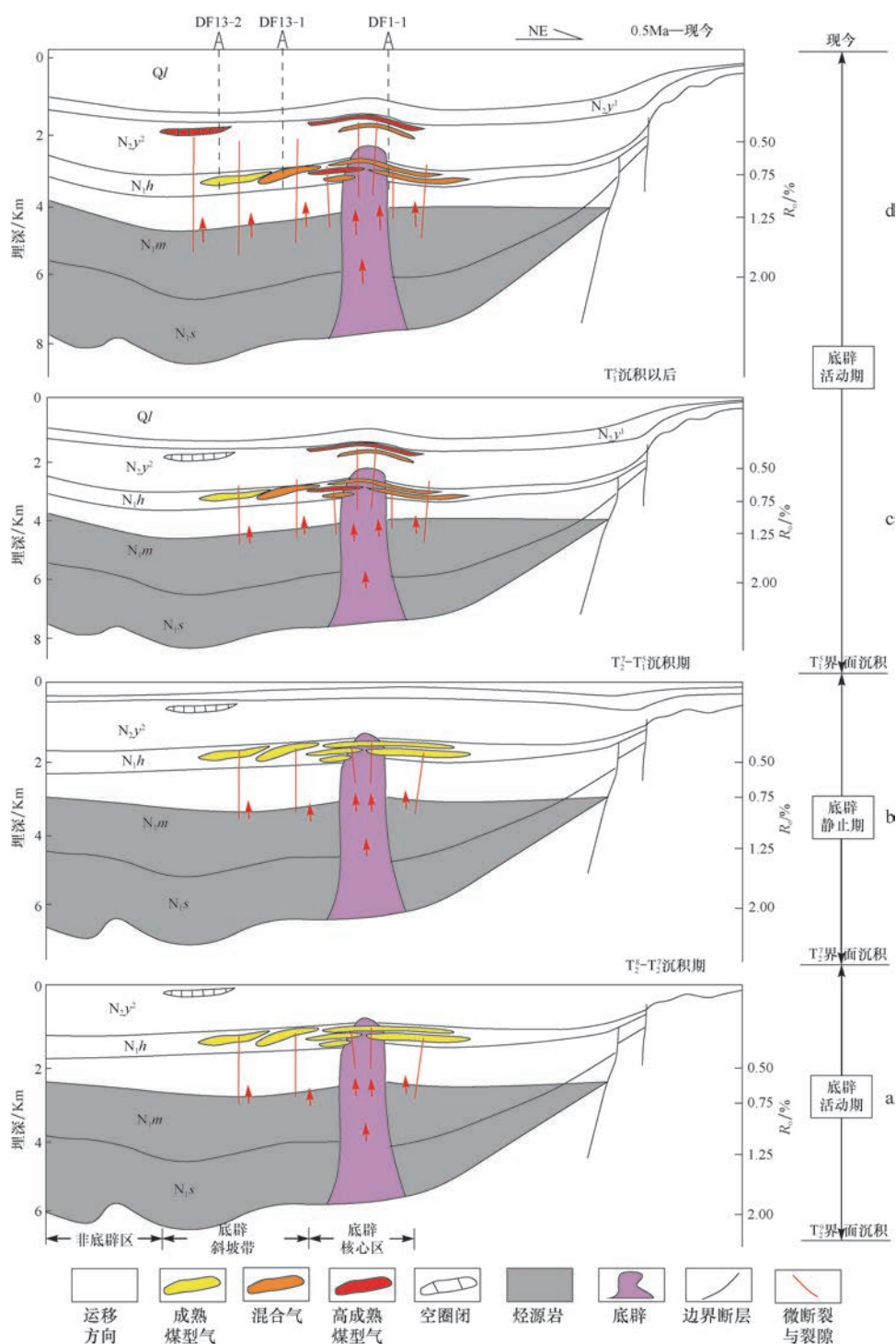


图 11 莺-琼盆地底辟活动与天然气成藏过程模式

Fig. 11 Illustrative diagram of diapir activity and gas accumulation process in Yingqiong Basin

a. $T_2^0-T_2^7$ 沉积期, 梅山组气源岩进入成熟演化阶段, 底辟开始持续活动, 使成熟煤型气沿底辟核部密集微断裂-裂缝系运移, 以混相幕式充注的方式在黄流组岩性圈闭中聚集成藏; b. $T_2^7-T_1^5$ 沉积期, 底辟活动不明显, 微断裂-裂缝系封闭, 天然气在剩余压力差的作用下通过盖层薄弱带主要以水溶相向浅层运移, 聚集成藏; c. T_1^5 界面沉积至今, 底辟再次活动, 活动早期梅山组和黄流组早已聚集成藏的成熟煤型气藏首先被破坏, 天然气大量散失或向中浅层发生再运移, 在莺歌海组再聚集形成次生气藏; d. 梅山组气源岩此时已进入高成熟演化阶段, 大量生成高成熟煤型气, 与来自基底和三亚组钙质泥岩所生的无机 CO_2 先后以混相幕式充注的方式向浅层运移, 形成碳同位素倒转序列气藏

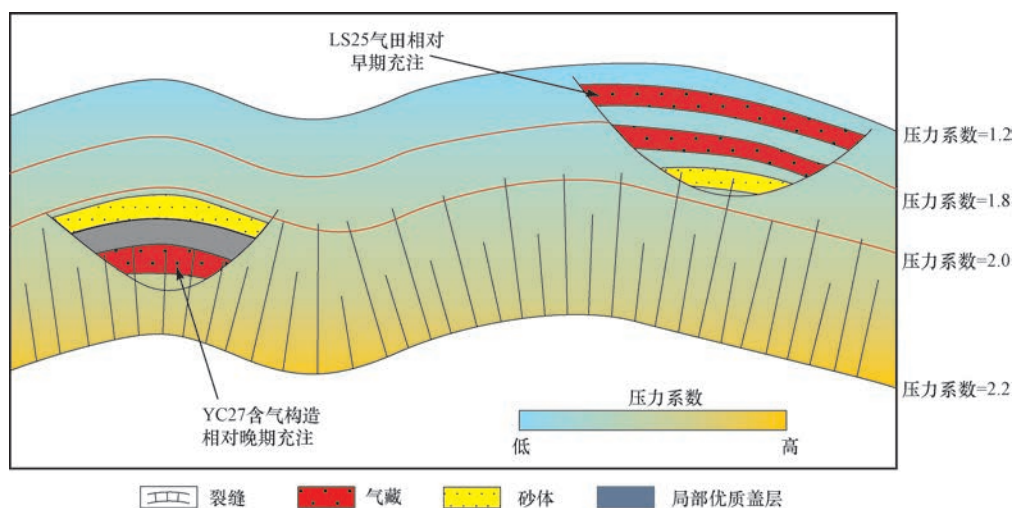


图12 莺-琼盆地岩性圈闭高压裂缝输导成藏模式

Fig. 12 The accumulation pattern of lithologic trap and high-pressure fracture migration in Yingqiong Basin

相邻埋深较浅、压力较小的LS25气田(埋深3 000 m, 地层孔隙流体压力45 MPa附近)天然气 $\delta^{13}C_1$ 为 $-39.7\text{‰} \sim -36.1\text{‰}$, $\delta^{13}C_2$ 为 $-25.8\text{‰} \sim -24.1\text{‰}$, 甲烷含量85.2%~87.9%, C_{2+} 的含量为7.1%~7.8%, C_1/C_{1-5} 的比值为0.92, 对比成熟度相对低, 成藏相对早。

莺歌海盆地斜坡高压区也有类似的成藏特征, 即深层圈闭裂缝型输导体系的天然气充注时间相对晚而浅层圈闭天然气充注时间相对早, 这反映了高压裂缝阶梯状由深向浅部散失高压和流体的规律, 每次当深部地层流体压力超过或相当于地层破裂压力时, 地层破裂产生裂缝, 圈闭内的流体沿裂缝逃逸到最近的相对低压储层中^[49-50], 裂缝重新闭合直到下次增压, 因此浅层的圈闭聚集相对早期生成、运移的天然气, 而深部超压圈闭聚集相对晚期生成、运移的天然气(图12)。

5 结论

1) 莺-琼盆地高压成因输导体系分底辟型和裂缝型两种类型, 是地层深部压力释放的表现形式, 具有阶梯状由深向浅逐步发育的特点, 流体随地层压力垂向传递穿刺浅部地层, 使高压发生传递和散失。

2) 底辟输导体系演化划分为增压期(深部充气)、穿刺期(浅层成藏)、平衡期(复合成藏)、释放期(翼部成藏)和塌陷期(破坏成藏)5个阶段(类型)。裂缝型输导体系具有超压和构造两种成因, 超压成因裂缝具有规模小、密度大、沿层分布、连通性差的特点, 而构造成因裂缝具有规模大、密度小、穿层分布、垂向联通性好的特点, 两种成因裂缝在莺-琼盆地高温高压地层

中叠加区, 油气输导效率最高。

3) 通过对天然气组分、碳同位素、流体包裹体等地化参数对比分析表明, 底辟的多期活动是莺歌海盆地底辟区天然气成藏的主控因素。早期底辟活动, 使深部的烃源岩生成的天然气沿着底辟型输导体系向上运移, 在有效的圈闭中聚集成藏; 当压力随热液流体散失到一定程度时, 底辟进入活动静止的平衡期, 圈闭中天然气处于聚散动平衡状态; 后期底辟再次活动将深部气藏调整至浅层, 并对早期浅层气藏形成了破坏, 周期性的压力积聚、盖岩破裂、压力释放过程使得底辟核部浅层、深层天然气的运聚成藏具有明显的多期幕式特征。

4) 裂缝型输导体系与底辟输导体系成藏规律略有不同, 高压裂缝阶梯状由深向浅部散失高压和流体的规律, 使得深层圈闭裂缝型输导体系的天然气充注时间相对晚而浅部圈闭天然气充注时间相对早。

参考文献

- [1] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] 李明诚. 对油气运聚若干问题的再认识[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(2): 133-137.
Li Mingcheng. Re-understanding of some problems about petroleum migration and accumulation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(2): 133-137.
- [3] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 断-压双控流体流动与油气幕式快速成藏[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 38-47.
Hao Fang, Zou Huayao, Fang Yong, et al. Overpressure fault controlled fluid flow and episodic hydrocarbon accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 38-47.

- [4] 华保钦. 构造应力场、地震泵和油气运移[J]. 沉积学报, 1995, 13(2): 78-85.
Hua Baoqin. Stress field, seismic pumping and oil-Gas migration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(2): 78-85.
- [5] 孙永河, 万军, 付晓飞, 等. 贝尔凹陷断裂演化特征及其对潜山裂缝的控制[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 316-322.
Sun Yonghe, Wan Jun, Fu Xiaofei, et al. Evolutionary of faults and their control on fractures in buried hill in Beier Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 316-322.
- [6] Levorsen R I. The Search for Petroleum[J]. Science, 1976, 192(4243): 993-994.
- [7] 庞雄奇, 罗群, 姜振学, 等. 叠合盆地断裂上、下盘油气差异聚集效应及成因机理[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 413-424.
Pang Xiongqi, Luo Qun, Jiang Zhenxue, et al. Accumulating diversity and its mechanism between Hanging and lower walls of fault in super-imposed basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 413-424.
- [8] Sagy A, Brodsky, Emily E L, Axen G J. Evolution of fault-surface roughness with slip[J]. Geology, 2007, 35(3): 283-286.
- [9] Power W L, Tullis T E. Euclidean and fractal models for the description of rock surface roughness[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1991, 96(B1): 415-424.
- [10] Lisle R J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1994, 78(12): 1811-1819.
- [11] 蒋有录, 刘华. 断裂沥青带及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 36-41.
Jiang Youlu, Liu Hua. Fault asphalt zone and its significance in petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 36-41.
- [12] 陈伟. 含油气盆地断裂带内部结构特征及其与油气运聚的关系[D]. 中国石油大学, 2011.
Chen Wei. Fault zone internal structure in hydrocarbon-bearing basin and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation[D]. China University Of Petroleum, 2011.
- [13] Ligtenberg J H. Detection of fluid migration pathways in seismic data: implications for fault seal analysis[J]. Basin Res, 2005, 17(1): 141-153.
- [14] 于翠玲, 曾溅辉, 林承焰, 等. 断裂带流体活动证据的确定——以东营凹陷胜北断裂带为例[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 34-38.
Yu Cuiling, Zeng Jianhui, Lin Chengyan, et al. Evidences of fluid flow along fault zones in Shengbei Fault Zone of Dongying Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 34-38.
- [15] Catalan J. Evolution of dissolved and particulate matter during the ice-covered period in a deep, high-mountain lake[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1992, 49(5): 945-955.
- [16] 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等. 石油二次运移的模式及其影响因素[J]. 石油试验地质, 2003, 25(1): 69-75.
Zhang Faqiang, Luo Xiaorong, Miao Sheng, et al. The patterns and its effect factors of secondary hydrocarbon migration[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2003, 25(1): 69-75.
- [17] 罗晓容, 雷裕红, 张立宽, 等. 油气运移输导层研究及量化表征方法[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 428-436.
Luo Xiaorong, Lei Yuhong, Zhang Likuan, et al. Characterization of carrier formation for hydrocarbon migration: concepts and approaches[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 428-436.
- [18] 罗晓容, 张立宽, 廖前进, 等. 埕北断阶带沙河街组油气运移动力学过程模拟分析[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 191-215.
Luo Xiaorong, Zhang Likuan, Liao Qianjin, et al. Simulation of hydrocarbon migration dynamics in shahejie formation of Chengbei fault step zone[J]. Oil and Gas Geology, 2007, 28(2): 191-215.
- [19] 张立宽, 王震亮, 曲志浩, 等. 砂岩输导层内天然气运移速率影响因素的实验研究[J]. 天然气地球科学, 2003, 18(3): 342-346.
Zhang Likuan, Wang Zhenliang, Qu Zhihao, et al. Experiment research on influencing factors of gas migration rate in sandstone carrier beds[J]. Nature Gas Geoscience, 2003, 18(3): 342-346.
- [20] 吴孔友. 准噶尔盆地乌夏地区油气输导体系与成藏模式[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(5): 25-30.
Wu Kongyou. Oil and gas transportation system in Wuxia area of Junggar basin and reservoir model[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2009, 31(5): 25-30.
- [21] 冯冲, 黄志龙, 童传新, 等. 莺歌海盆地莺歌海组二段泥岩盖层封闭性综合评价[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 33(4): 373-377.
Feng Chong, Huang Zhilong, Tong Chuanxin, et al. Comprehensive evaluation on the sealing ability of mudstone cap rock in member 2 of Yinggehai Formation of Yinggehai Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 33(4): 373-377.
- [22] 谢玉洪, 张迎朝, 李绪深, 等. 莺歌海盆地高温超压气藏控制要素与成藏模式[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 601-609.
Xie Yuhong, Zhang Yingzhao, Li Xushen, et al. Main controlling factors and formation models of natural gas reservoirs with high-temperature and overpressure in Yinggehai Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 601-609.
- [23] 刘峰, 裴建翔, 汪洋, 等. 古地貌对海底扇沉积过程的控制及与尤其富集的关系——以莺歌海盆地东方区黄流组一段为例[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 37-46.
Liu Feng, Pei Jianxiang, Wang Yang, et al. Palaeogeomorphologic control on sedimentary process of submarine fans and hydrocarbon accumulation: a case study of Member 1 of Huangliu Formation in DF area, Yinggehai Basin[J]. China offshore oil and gas, 2015, 27(4): 37-46.
- [24] 徐新德, 张迎朝, 裴建翔, 等. 构造演化对莺歌海盆地天然气成藏差异性的控制作用[J]. 天然气工业, 2015, 32(2): 12-20.
Xu Xinde, Zhang Yingzhao, Pei Jianxiang, et al. Control effect of tectonic evolution on gas accumulation difference in the Yinggehai Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 32(2): 12-20.
- [25] 万志峰, 夏斌, 何家雄, 等. 南海北部莺歌海盆地与琼东南盆地油气成藏条件比较研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 648-651.
Wan Zhifeng, Xia Bin, He Jiaxiong, et al. The comparative study of hydrocarbon accumulation conditions in Yinggehai and Qiongdongnan basins, northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 648-651.
- [26] 徐兆辉, 王露, 江青春, 等. 莺歌海-琼东南盆地对比分析[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 17: 105-108.
Xu Zhaohui, Wang Lu, Jiang Qingchun, et al. Differences between Yinggehai Basin and Qiongdongnan Basin[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 17: 105-108.
- [27] 万志峰, 夏斌, 徐力峰, 等. 莺歌海盆地构造演化动力学机制探讨[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 654-657.
Wang Zhifeng, Xia Bin, Xu Lifeng, et al. Study on the dynamic mech-

- anism of tectonic evolution in Yinggehai Basin[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(6): 654-657.
- [28] 任建业, 雷超. 莺歌海-琼东南盆地构造-地层格架及南海动力变形分区[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3303-3314.
Ren Jianye, Lei Chao. Tectonic stratigraphic framework of Yinggehai-Qiongdongnan Basins and its implication for tectonic province division in South China Sea[J]. China Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3303-3314.
- [29] 张启明, 胡忠良. 莺-琼盆地高温高压环境及油气运移机制[J]. 中国海上油气, 1992, 6(1): 1-9.
Zhang Qiming, Hu Zhongliang. Hot Geopressured Yinggehai-Qiongdongnan Basin and its hydrocarbon migration[J]. China Offshore Oil, 1992, 6(1): 1-9.
- [30] 黄保家, 肖贤明, 董伟良. 莺歌海盆地烃源岩特征及天然气生成演化模式[J]. 天然气工业, 2002, 22(1): 26-30.
Huang Baojia, Xiao Xianming, Dong Weiliang, et al. Source rocks and generation and evolution model of natural gas in Yinggehai basin[J]. Natural gas industry, 2002, 22(1): 26-30.
- [31] Everitt B S. The Cambridge dictionary of statistics[M]. Cambridge University Press, 2002.
- [32] Dodge Y. The Oxford dictionary of statistical terms[M]. Oxford University Press, 2003.
- [33] Spivak M. A comprehensive introduction to differential geometry[M]. Publish or Perish, inc, 1975.
- [34] Goldman R. Curvature formulas for implicit curves and surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 2005, 22(7): 632-658.
- [35] Kühnel W. Differential Geometry: Curves-Surfaces-Manifolds[M]. American Mathematical Society, 2006.
- [36] 解习农, 李思田, 胡祥云等. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(3): 247-256.
XieXinong, Li Sitian, Hu Xiangyun, et al. Transportation system and its information mechanism of hot fluid in diapir belt, Yinggehai basin[J]. Science in China (Series D), 1999, 29(3): 247-256.
- [37] 郝芳, 李思田, 龚再生等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(6): 471-476.
HaoFang, Li Sitian, Gong Zaisheng, et al. Diapir development mechanism and the episodic fluid charging, Yinggehai basin[J]. Science in China (Series D), 2001, 31(6): 471-476.
- [38] 郝芳, 刘建章, 邹华耀等. 莺歌海-琼东南盆地超压层系油气聚散机理浅析[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 69-180.
HaoFang, Liu Jianzhang, Zou Huayao, et al. Mechanisms of natural gas accumulation and leakage in the overpressured sequences in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 69-180.
- [39] 黄保家, 李绪深, 谢瑞永. 莺歌海盆地输导系统及天然气主运移方向[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 6.
Huang Baojia, Li Xushen, Xie Ruiyong. Carrier system and dominant migration direction of natural gas in the Yinggehai basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(4): 6.
- [40] 赵宝峰, 陈红汉, 孔令涛等. 莺歌海盆地流体垂向输导体系及其对天然气成藏控制作用[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2014, 39(9): 1323-1332.
Zhao Baofeng, Chen Baofeng, Chen Honghan, et al. Vertical migration system and its control on natural gas accumulation in Yinggehai basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(9): 1323-1332.
- [41] 隋风贵. 东营断陷盆地地层流体超压系统与油气运聚成藏[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(3): 17-21.
Sui Guifeng. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying Fault Basin[J]. Journal of the University of Petroleum (Natural Science Edition), 2004, 28(3): 17-21.
- [42] 黄春菊, 陈开远, 李思田. 莺歌海盆地泥底辟活动期次分析[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 44-46.
Huang Chunju, Chen Kaiyuan, Li Sitian. Periodicities of diapiric rise in the Yinggehai Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 44-46.
- [43] 韩光明, 张迎朝, 胡潜伟, 等. 莺歌海盆地底辟多期活动证据及其与含气性关系[J]. 地质与资源, 2013, 22(1): 55-58.
Han Guangming, Zhang Yingzhao, Hu Qianwei, et al. The multiple movements of diapir in Yinggehai Basin; effective proof and affection to natural gas accumulation[J]. Geology and Resources, 2013, 22(1): 55-58.
- [44] 宫少波, 王彦. 莺歌海盆地中央底辟带油气成藏条件分析[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 232-235.
Gong Shaobo, Wang Yan. Analysis on hydrocarbon pool-forming condition of central diapiric zone in Yinggehai Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2000, 21(3): 232-235.
- [45] 韩光明, 李绪深, 宋鹏, 等. 莺歌海盆地底辟区天然气组分的影响因素及其与天然气成藏的关系[J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 27-34.
Han Guangming, Li Xushen, Song Peng, et al. Influencing factors of gas components and their relationship with gas accumulation in the diapir zone of the Yinggehai Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(2): 27-34.
- [46] 朱建成, 吴红烛, 马剑, 等. 莺歌海盆地 D1-1 底辟区天然气成藏过程与分布差异[J]. 现代地质, 2015, 29(1): 54-62.
Zhu Jiancheng, Wu Hongzhu, Ma Jian, et al. Nature gas accumulation process and distribution differences in D1-1 diapir district, Yinggehai Basin[J]. Geoscience, 2015, 29(1): 54-62.
- [47] 何家雄, 刘全稳, 刘宝明, 等. 从两口深井看莺歌海盆地中深层天然气藏特征[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3): 230-237.
He Jiaxiong, Liu Quanwen, Liu Baoming, et al. Analysis of the characters of forming natural gas reservoirs basing on two deep drilling wells in the middle-deep beds in Yinggehai Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(3): 230-237.
- [48] 吴红烛, 黄志龙, 等. 莺歌海盆地底辟带 DF 区天然气地球化学特征差异及其成因[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 213.
Wu Hongzhu, Huang Zhilong, etc. Causes of natural gas geochemical differences in the high-temperature and overpressure zone of DF1-1 diapir belt in Yinggehai Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(2): 213.
- [49] Gersztenkorn A, Marfurt K J. Eigen structure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping[J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1468-1479.
- [50] Marfurt K J, Kirlin R L, Farmer S L, et al. 3-D Seismic Attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1150-1165.