

# 莺歌海盆地中央底辟带油气垂向运移通道研究

韩光明, 李绪深, 童传新, 宋瑞有, 曾少军

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司)

**摘要** 综合地质、地球物理及钻井资料,结合天然气勘探研究成果,识别了莺歌海盆地中央底辟带底辟构造地震反射模糊区中的裂隙—微裂隙通道,并联合应用相干技术、三维可视化技术和镂空技术等落实了中央底辟构造带上各底辟构造垂向运移通道的展布情况。研究区垂向运移通道分为底辟通道、断裂通道以及底辟外裂隙通道三大类。底辟通道是研究区最主要的烃运移通道,它由发育在底辟构造内的裂隙和微裂隙组成,可从定性判断、岩心识别、正演模拟以及多技术综合等方面来进行分析。断裂通道主要是发育在底辟构造内的断裂,在底辟之外极少发育,它有多个发育期次。尽管底辟外裂隙通道一般规模较小,但其垂向输运流体的能力不亚于底辟通道和断裂通道。莺歌海盆地近年发现的两个中深层大气田东方 13-1、东方 13-2 都是由这类裂隙通道来连通烃源与有效储层的。

**关键词** 莺歌海盆地; 油气运移; 运移通道; 底辟构造; 断裂

**中图分类号** TE112.12

**文献标识码** A

油气运移通道存在与否是一个圈闭能否成藏的关键问题之一,近十几年来它一直是石油勘探中的研究热门<sup>[1-3]</sup>。莺歌海盆地中央底辟构造带贡献了该盆地90%以上的储量和全部的产量<sup>[4]</sup>,但由于底辟发育区中地震资料分辨率低、信噪比差等原因,该区的运移通道研究一直受到制约,束缚了该盆地的勘探部署。

笔者综合近年来的地质、地球物理及钻井资料,结合近期天然气勘探研究成果,实现了对底辟构造地震反射模糊区中裂隙—微裂隙通道的识别,并联合应用砂体雕刻技术、相干技术、三维可视化技术和镂空技术等,落实了中央底辟构造带上各底辟构造垂向运移通道的展布情况,为莺歌海盆地的勘探部署提供了有力的技术保障。同时,本文还对莺歌海盆地中央底辟构造带的断裂通道和非底辟构造中的微裂隙进行了研究,较全面地揭示了该底辟构造带的油气纵向运移通道特征。

## 1 研究区的垂向运移通道

莺歌海盆地位于印支板块与华南板块之间,是受印支板块与欧亚板块陆—陆碰撞以及南海海底扩

张等多重因素控制而形成的 NW—SE 向新生代大型走滑—伸展盆地,天然气资源丰富<sup>[5-7]</sup>,是当前南海西部天然气勘探的主战场之一。

本文把研究区内单个的底辟称作“底辟构造”或“底辟”,把由若干个底辟紧密相连的一组底辟构造称为“底辟背斜带”或“底辟带”。本文的研究区为莺歌海盆地中央底辟构造带,它位于盆地的坳陷中心区,主要由 5 排轴向近南北、呈雁行式排列的大规模底辟背斜带组成,每条底辟带则由二三个底辟构造所构成(图 1)。

在莺歌海盆地中央底辟构造带,垂向运移通道广泛分布于图 1 所示的这 5 排底辟背斜带中各底辟的内部及其周缘,按照运移通道的发育规模、分布范围以及对油气运移的重要程度,我们将这些通道分为三种类型来进行分析,包括底辟通道、断裂通道以及底辟外裂隙通道。

根据地层破裂的强度,划分出断裂、裂隙、微裂隙三个层次,其中,断裂是指当前地震分辨率能分辨的地层破裂,裂隙和微裂隙则是在当前地震分辨率下均无法识别的较小地层破裂。地震可识别的裂缝

收稿日期: 2013-01-21; 改回日期: 2013-05-15

基金项目: 本文受国家“十一五”重点科技攻关项目“莺歌海盆地高温高压天然气成藏主控因素及勘探方向”(编号: 2008ZX05023-004)资助

韩光明: 1980 年生,工程师,2004 年毕业于中国海洋大学。主要从事地震解释、特殊处理工作。通讯地址: 524057 广东省湛江市坡头区 22 号信箱研究院; 电话: (0759)3911925

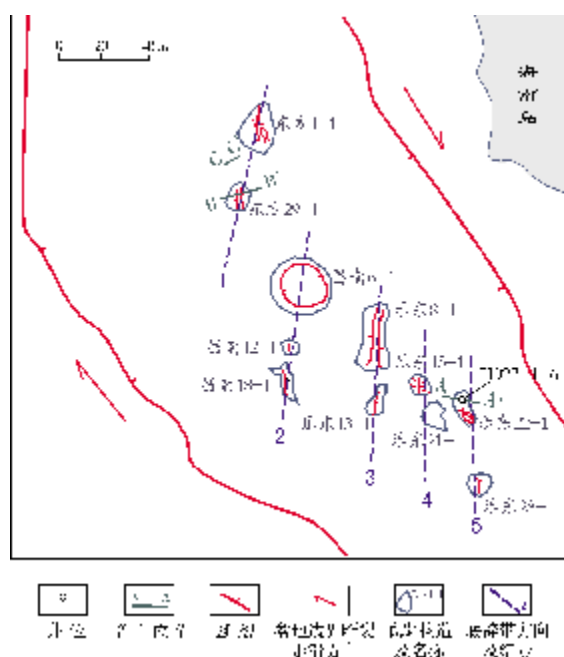


图1 莺歌海盆地中央底辟构造带底辟背斜带分布示意图

宽度不仅受控于目的层段所在深度的纵、横向分辨率,主要还受断层上下盘的阻抗差异及断距等控制,目前无法给出确切的数值。微裂隙的缝宽一般为毫米级别,裂隙的缝宽则介于断裂与微裂隙之间。在本研究中裂隙与微裂隙并没有本质的区别,均是指地震未能探测的地层破裂,因此常把这两类地层破裂统称为裂隙。

底辟通道是指发育在底辟构造内部、由裂隙和微裂隙组成的运移通道;断裂通道是发育在底辟背斜带内、分布在底辟构造之内或之外的较大地层破裂;底辟外裂隙通道则是指发育在底辟构造之外、由裂隙(包含微裂隙)组成的运移通道。

底辟构造的垂向运移通道多为复合通道,即由中深层模糊不清的底辟通道和地震可识别的浅层断裂通道组成,但也有部分底辟构造的垂向运移通道仅由底辟通道构成。但无论何种底辟构造,都必然有底辟通道广泛分布其内,因此底辟通道的重要程度居三类运移通道之首,它也是本文研究的重点。

虽然发育于底辟构造内的断裂从一般意义上看也可以认为是“底辟通道”的范畴,但由于它是容易被地震发现的构造,因此它与底辟通道的地层破裂级次具有质的差别,所以把断裂通道从底辟通道中独立出来更具有实际的勘探意义。

## 2 底辟通道

根据上面的定义,底辟通道中的流体输导渠道是裂隙(包含微裂隙)。下面我们从定性判断、岩心识别、正演模拟以及多技术综合等方面来对研究区的底辟通道进行分析。

### 2.1 定性判断

尽管前人多有文献论及流体底辟输导体系和气烟囱垂向通道等<sup>[4-5,8-9]</sup>,且认为底辟构造及其伴生断裂为烃类气体垂向输导的主要通道,但由于受制于底辟区的模糊地震反射,故这些对底辟通道的认识多还停留在定性阶段,对底辟构造中的流体输导渠道以何种形式存在也未能进行深入的论述。

本文对底辟通道的定性判断主要根据以下两个方面来进行,一是反推法,二是双侧向测井。

#### 2.1.1 定性判断法1——反推法

地层中发育裂隙,就会对地震波的纵波速度、品质因子、频率、振幅等产生影响,根据这一特性,我们可以来反推底辟构造内可能存在着裂隙、微裂隙等垂向通道的区域。如图2中,LD22-1-6井所钻遇的底辟部位品质因子较差、频率变低、振幅减弱,根据这些特征,我们可以进行反推,认为在该底辟部位可能存在裂隙、微裂隙。特别是底辟部位存在明显的同相轴下拉现象,这更有可能是由于裂隙、微裂隙的存在使得地震纵波速度降低而引起的。从图2三口井在底辟深度范围的频率对比来看,位于底辟构造上的LD22-1-6井的频率比相邻的两口井有明显下降,差值可达23Hz。

#### 2.1.2 定性判断法2——双侧向测井

各种测井资料所用的对裂缝、裂隙的识别方法各不相同,且由于各地区的地质情况不同,同一方法的使用也会存在着差异,本文主要通过双侧向测井来识别底辟内是否存在裂缝。

在双侧向测井中,有裂缝存在时,深、浅侧向电阻率均普遍减小,但减小程度有差别,且出现幅度差<sup>[10]</sup>。LD22-1-6井是在乐东22-1底辟构造的中心位置所钻的一口探井,在其目的层段具有裂缝储层双侧向测井响应特征(图3中圈内位置),其主要表现为:一组高角度平行裂缝使双侧向幅度呈现正幅度差,低角度裂缝呈现负幅度差,低角度裂缝的电阻率降低更多。

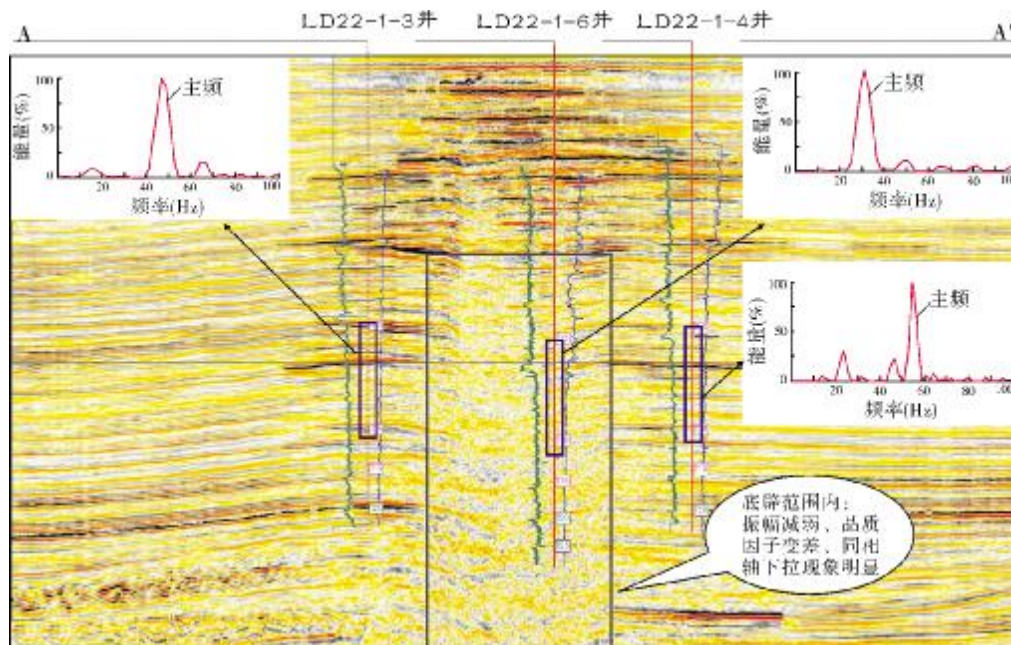


图 2 莺歌海盆地过乐东 22-1 底辟构造的典型地震剖面图

底辟构造区的地震反射相当模糊。LD22-1-6 井的主频 32Hz, 而相邻两口井的主频分别为 47Hz 和 53Hz, 之间相差达 15~23Hz。

A—A' 剖面位置见图 1

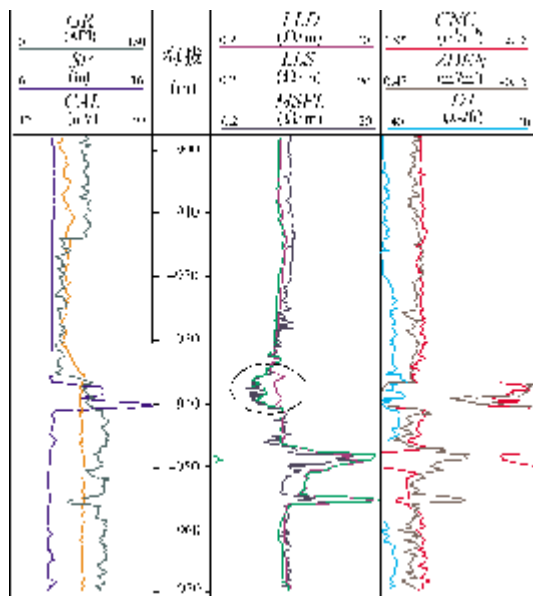


图 3 莺歌海盆地 LD22-1-6 井双侧向测井特征

图中椭圆圈出部分具有裂隙储层双侧向测井响应特征

## 2.2 岩心识别

乐东 22-1 底辟地震反射模糊区的钻井取心为底辟区微裂隙研究提供了最直观的第一手资料,从

中发现了由流体压裂的微裂隙(图 4),且部分裂隙在岩石薄片显示为早期形成的裂隙被后期绢云母类黏土矿物充填,部分发育在颗粒间或切穿石英颗粒,可以确认这些微裂隙是属于非人为因素造成的。

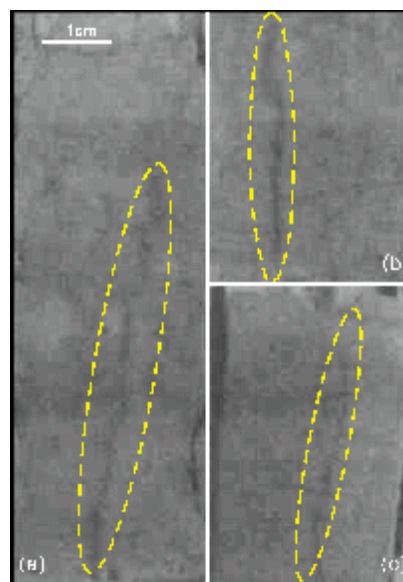


图 4 莺歌海盆地乐东 22-1 底辟内裂隙通道特征

三块岩心均来自 LD22-1-6 井 1195~1196m 井段。  
黄色虚线圈内所发育的裂隙明晰可辨



## 2.3 正演模拟

我们在上述岩心中观察到的裂缝宽度为毫米级别,如此微小的缝宽在当前的地震分辨率下根本无法辨识,尤其是当裂隙中充满流体时就更加导致了底辟内部地震反射的模糊不清。为了解决对这类裂缝的地震识别,笔者进行了类似乐东 22-1 底

辟构造的正演模拟(图 5)。图 5a 为其正演模型,在连续层状的地层中夹杂着近垂向发育的交叉微裂隙,裂隙中充满流体,连续层状地层上部被浅层气藏遮挡,因此在该正演模型中考虑到了浅层气的影响。通过垂直入射的自激自收射线模拟,得到了与实际地震反射剖面底辟构造模糊反射特征相似的地震反射(图 5b)。

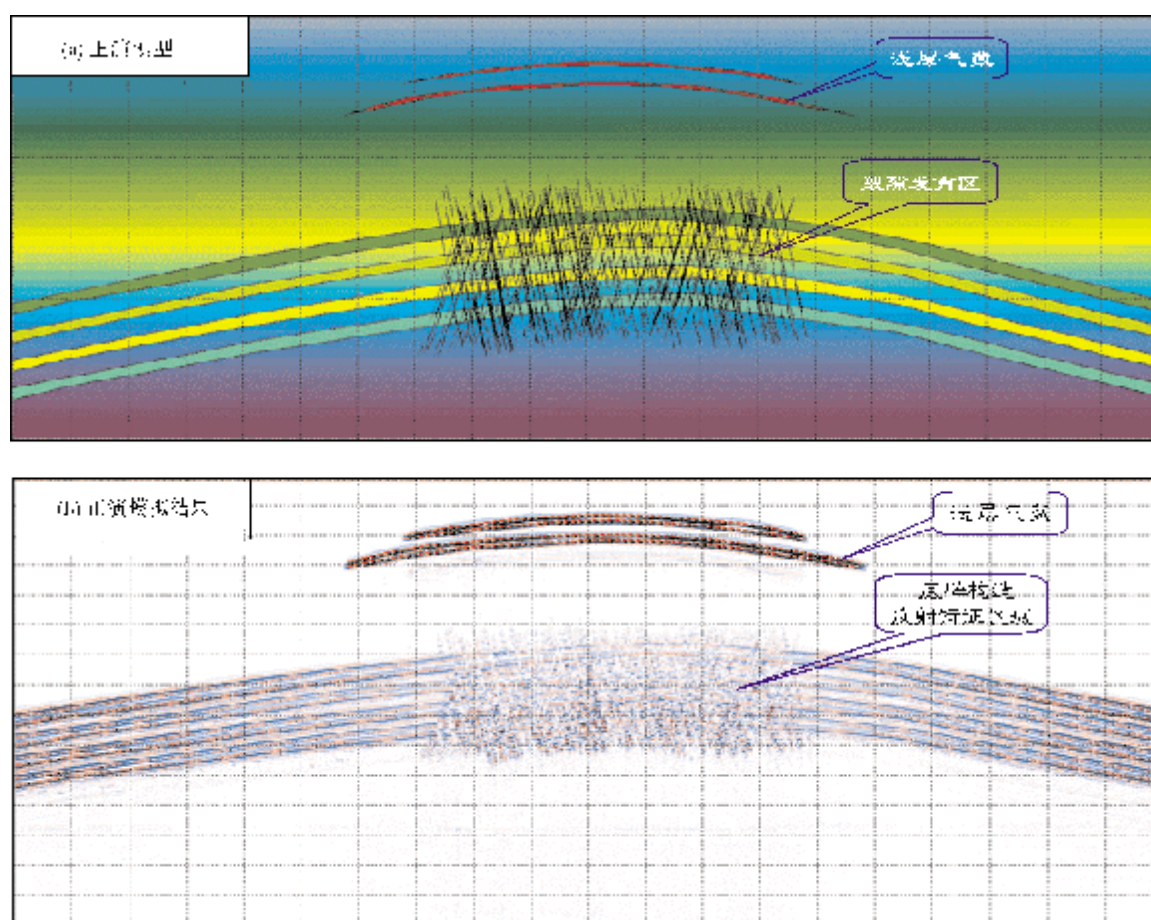


图 5 莺歌海盆地底辟通道正演模拟图

由此可见,实际地震剖面上的底辟构造模糊反射区域内可能存在着垂向运移渠道,并以裂隙、微裂隙的方式存在,且展布无规则。

## 2.4 综合运用多种技术落实底辟通道

底辟构造内存在裂隙、微裂隙等垂向运移渠道,在地震剖面上均表现为模糊特征,这阻碍了研究人员对底辟通道的直观识别,但我们可以通过对多种技术的结合来刻画底辟通道的空间展布,

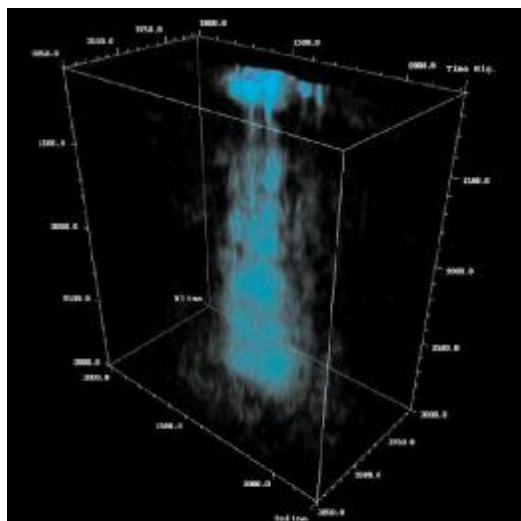
这些技术包括相干技术、镂空技术以及三维可视化技术等。

相干技术是通过量化处理地震数据体的相干属性,生成新的相干数据体,突出和强调地震数据的不相关性,这种不相关性在断层或者裂隙发育区表现得异常突出。镂空技术是三维可视化中对三维数据体操作的一种方法,它是利用高通或低通手段,压制无用信息,使有用信息更加突出。

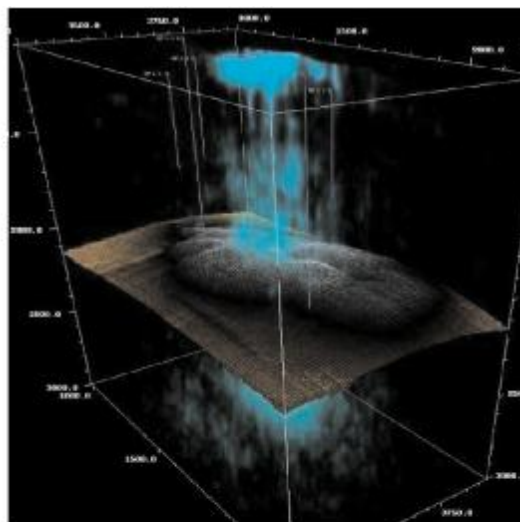
联合应用以上两种方法,并综合考虑各方法

的技术特点, 然后采用三维可视化技术可刻画出底辟中的裂隙、微裂隙等垂向运移通道的空间展布形态(图 6a)。将地震剖面上各层系中解释出的横(侧)向运移渠道层位, 经网格化后, 输入到三维

可视化图中, 便可直观地得到纵、横向运移通道的空间匹配情况(图 6b), 这些可为寻找纵横向运移渠道匹配较好的底辟构造提供了一种快速有效的方法。



(a) 纵向运移渠道分布。采用相干体三维接空技术, 突出显示底辟内部难以识别的裂隙、微裂隙等垂向运移通道的空间展布



(b) 纵、横向运移渠道叠合分布。在突出显示垂向运移渠道的基础上, 叠加横向有效储层在空间的展布范围, 便可清晰勾勒出底辟内部及周缘纵、横向运移渠道的匹配情况

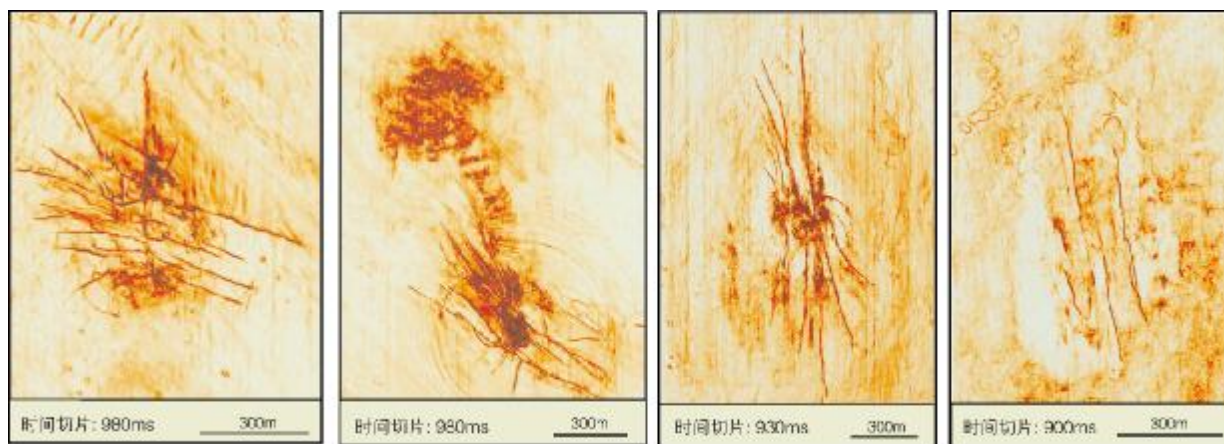
图 6 莺歌海盆地东方 1-1 底辟区运移渠道空间展布特征

### 3 断裂通道

#### 3.1 断裂展布及形成期次

莺歌海盆地中央底辟构造带中的断裂以南北向

为主, 其中部分呈北偏西向或北偏东向展布, 在图 1 中的东方 1-1、乐东 8-1、乐东 15-1 等底辟构造中都较清楚地反映出了这个特点。图 7 是时间切片图, 更加清晰地反映了断裂的展布情况。这主要是受基底断裂和底辟构造自身活动影响的结果。



(a) 乐东 15-1 底辟。断裂呈放射状形态展布 (b) 乐东 22-1 底辟。受底辟构造近垂向抬升和塌陷活动产生的环状断裂展布特征逊于早期产生的北西向断裂 (c) 东方 1-1 底辟。断裂以近南北向展布 (d) 东方 29-1 底辟。断裂以近南北向展布

图 7 莺歌海盆地部分底辟发育区的方差体时间切片



渐新世开始,莺歌海盆地的右旋走滑作用形成近南北向的张性破裂,并由此诱导了底辟活动,所以底辟构造呈有规律的近南北向雁行式排列<sup>[11-12]</sup>。此后的底辟活动形成了新一期断裂,其展布样式严格受底辟活动的控制,主要分布在底辟构造的上部或两翼。在这新一期断裂中,根据断裂的动力成因及展布方式可以分为三组。

**第一组断裂** 是沿先期构造的薄弱处发展起来的断裂,或者是早期断裂再次发生活动,不断地向上延伸,甚至达到地表。所以第一组断裂总体的展布主要为继承性的近南北向,如东方 1-1、东方 29-1、昌南 18-1、昌南 12-1、乐东 8-1 等底辟构造上所发育的断裂。

**第二组断裂** 在底辟上隆过程中,其顶部形成局部的张性应力场,由此引发第二组断裂。这组断裂无论在剖面上或平面上均呈放射状,如乐东 15-1 底辟构造等。

**第三组断裂** 受底辟构造近垂向抬升和塌陷活动的影响所产生,该组断裂具有非常明显的环状展布特征,如昌南 6-1 底辟构造、乐东 22-1 底辟的南区构造(图 7b)等。

从上面三组断裂的发育位置来看,莺歌海盆地中央底辟构造带上的断裂绝大多数发育于底辟之内,但也有少量断裂发育在底辟构造发育的波及区,位于底辟之外。这种情况在研究区非常有限,因此不作更多分析。所以,本文所述的断裂通道一般是指发育在底辟内部的断裂。

### 3.2 不同期次断裂对含气性的影响

底辟伴生的断裂严格受底辟活动影响,不同期次底辟活动所受应力不同,其伴生断裂的产状及强度往往也有差异,因此可根据底辟伴生断裂产状、强度的不同来反推底辟活动期次,以此为寻找和落实油气藏提供帮助。

以东方 29-1 底辟为例,它与东方 1-1 底辟构成莺歌海盆地第 1 排底辟构造带(图 1),而在东方 1-1 底辟构造上发现了莺歌海盆地最大的东方 1-1 气田。东方 29-1 底辟具备同东方 1-1 相似的成藏环境,但在其浅层钻探的 W1、W2、W3、W4 各井,测试的气层组分却存在较大差异,W1 与 W3 井气体组分以  $\text{CO}_2$  为主,W2 与 W4 井气体组分以  $\text{CH}_4$  为主(图 8,表 1)。

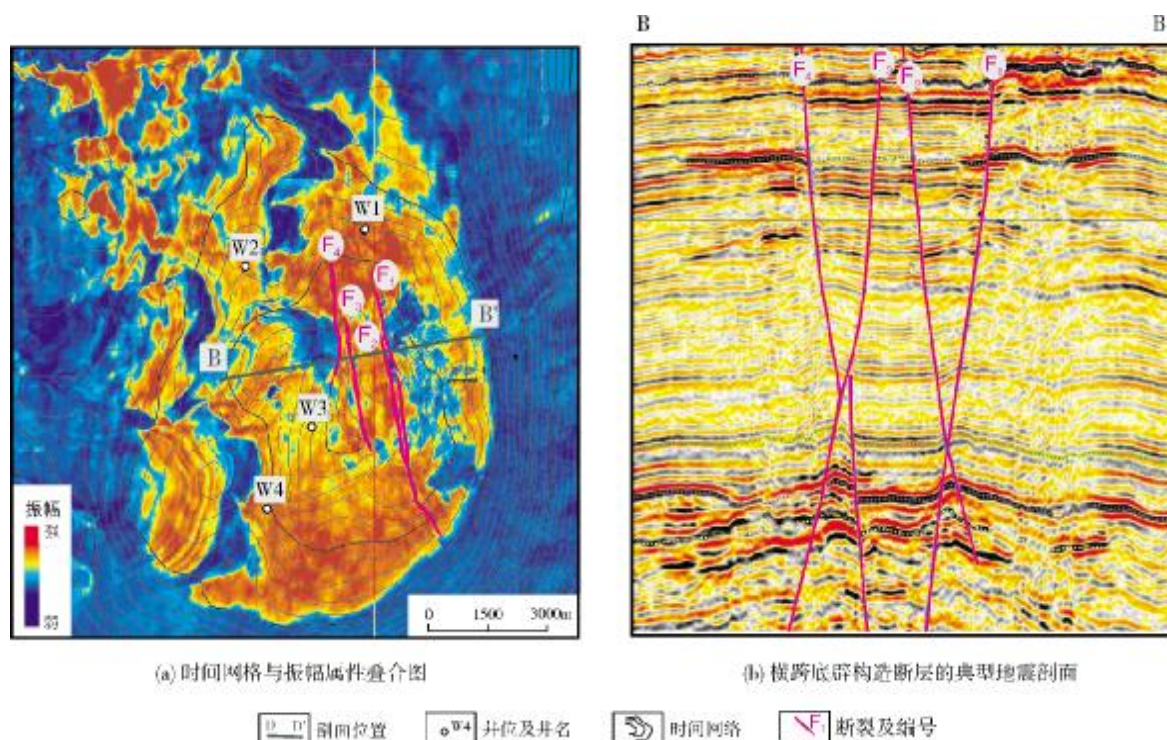


图 8 莺歌海盆地东方 29-1 底辟构造地震图

B—B'剖面位置见图 1

表1 莺歌海盆地东方 29-1 底辟各井取样段气体组分特征

井 名	取样方式	取样深度(m)	气体组分(%)		
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
W1	钻杆地层测试	1494~1502	71.4	16.7	11.3
W2	钻杆地层测试	1470~1475	23.7	65.8	9.0
W3	电缆取样	1462.6	53.1	30.2	16.2
W4	电缆取样	1482.2	0.4	61.74	36.8

分析东方 29-1 底辟中发育的断裂,发现该底辟同样存在两期活动,其中第一期底辟活动主要发育了两条东掉断层 F<sub>2</sub> 和 F<sub>4</sub>,第二期底辟活动主要发育两条西掉断层 F<sub>1</sub> 和 F<sub>3</sub>,且第二次底辟活动发育的西掉断层对第一次底辟活动发育的东掉断层切割明显(图 8b)。伴随着底辟的第二次活动,该区非生物源型成因的 CO<sub>2</sub><sup>[7,10]</sup> 随着第二期发育的断裂运聚到中央泥底辟带浅层,一方面对早期已经成藏的圈闭具有破坏作用,另一方面充注到有效圈闭中与早期以烃类为主的气田形成混合气体,使得越靠近该期发育的断裂,或与该期断裂所处储层连续性越好的气层,其非烃含量越高(图 8a,表 1)。从图 8a 上看, W1 和 W3 两口井距离第二期发育的断裂 F<sub>1</sub> 和 F<sub>3</sub> 相对较近,从表 1 可见,这两口井的 CO<sub>2</sub> 含量明显高于另外两口井。

#### 4 底辟外裂隙通道

在底辟构造外,裂隙通道还分布于盆地中央底辟构造带的其他区域,其规模较小且分布无规律,地震反射剖面特征与底辟模糊区反射特征较为相似(图 9)。尽管底辟外裂隙通道一般规模较小,但其垂向输运流体的能力丝毫不逊色于底辟通道和断裂通道。研究认为,莺歌海盆地近年发现的两个中深层大气田(东方 13-1 气田和东方 13-2 气田)都是由这类裂隙通道来连通烃源与有效储层的<sup>[13]</sup>。

#### 5 结 论

(1)莺歌海盆地中央底辟构造带主要由 5 排轴向近南北、呈雁行式排列的大规模底辟背斜带(底辟带)组成,每条底辟带则由二三个底辟构造所构成。

(2)莺歌海盆地中央底辟构造带垂向运移通道划分为底辟通道、断裂通道以及底辟外裂隙通道三大类。

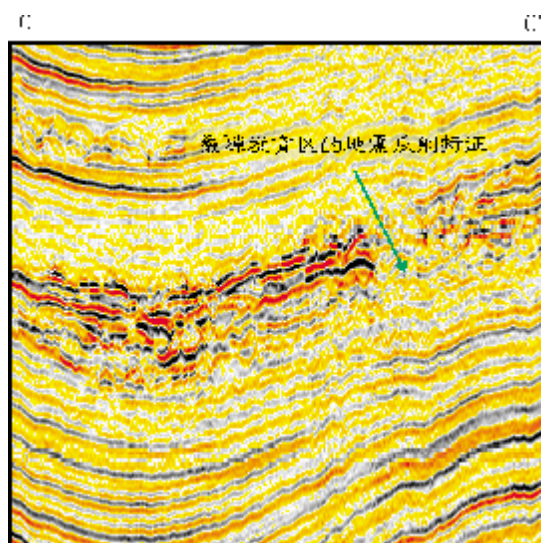


图 9 莺歌海盆地底辟外裂隙通道地震剖面特征

C—C'剖面位置见图 1

(3)底辟通道是研究区的最主要运移通道,它由发育在底辟构造内的裂隙和微裂隙组成。

(4)断裂通道主要是发育在底辟构造内的断裂,在底辟之外,断裂通道极少发育。

(5)底辟构造后期发育的断裂,沟通了深层的壳源 CO<sub>2</sub> 向上运移,使得气体中的 CO<sub>2</sub> 含量显著增加。

#### 参 考 文 献

- [1] 付广,付晓飞. 断裂输导系统及其组合对油气成藏的控制作用[J]. 世界地质,2001,20(4):344-349.
- [2] 李绪宣,朱光辉. 琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J]. 中国海上油气,2005,17(1):1-7.
- [3] 陈瑞银,罗晓容,吴亚生. 利用成岩序列建立油气输导格架[J]. 石油学报,2007,28(6):43-47.
- [4] 裴健翔,于俊峰,王立峰,等. 莺歌海盆地中深层天然气勘探的关键问题及对策[J]. 石油学报,2011,32(4):573-578.

- [5] 张启明. 莺—琼盆地的演化与构造—热体制[J]. 天然气工业, 1999, 19(1):12-17.
- [6] 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等. 莺歌海盆地周边区域构造演化[J]. 高校地质学报, 2001, 7(1):1-12.
- [7] 郝芳, 董伟良, 邹华耀, 等. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏[J]. 石油学报, 2003, 24(6):79-85.
- [8] 解习农, 李思田, 董伟良, 等. 热流体活动示踪标志及其地质意义: 以莺歌海盆地为例[J]. 地球科学 中国地质大学学报, 1999, 24(2):183-188.
- [9] 何家雄, 刘全稳. 南海北部大陆架边缘盆地 CO<sub>2</sub> 成因及运聚规律分析与预测[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1):12-19.
- [10] 高松洋. 测井资料在裂缝识别中的应用——以 H 地区砂岩储层为例[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(2):272-274.
- [11] 殷秀兰, 李思田, 杨计海, 等. 莺歌海盆地 DF1-1 底辟断裂系统及其对天然气成藏的控制[J]. 地球科学 中国地质大学学报, 2002, 27(4):391-395.
- [12] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [13] 谢玉洪, 张迎朝, 李绪深, 等. 莺歌海盆地高温高压气藏控藏要素与成藏模式[J]. 石油学报, 2012, 33(4):601-609.

编辑: 吴厚松

## Study of Vertical Pathways of Hydrocarbon Migration in Central Diapir Zone, Yinggehai Basin

Han Guangming, Li Xushen, Tong Chuanxin, Song Ruiyou, Zeng Shaojun

**Abstract:** By the hand of available geology, geophysics and core data, and combining with recent exploration and research, the fissure and microfissure pathways for hydrocarbon migration have been identified in the blurry seismic reflection area of diapiric structure zone in the central diapir zone, Yinggehai Basin. The distribution of those vertical pathways in each diapiric structure is also revealed by using the coherence and 3-D visualization and hollowed-out techniques. The vertical pathways in the study area can be divided into diapir pathway, fault pathway and fissure pathway. The diapir pathway is the most important hydrocarbon migration pathway, which is made up of fissures and microfissures developing within diapir structures. It can be analyzed by using the qualitative judgment, core identification, forward modeling and other integrated technique. The fault pathways commonly are the faults developing within diapir structures, which seldom develop outside diapir structures. They may have several periods of development. Although the fissure pathways outside diapirs are commonly small in scale, they are better in the capacity of vertically migrating fluid than the diapir pathways or fault pathways. Dongfang 13-1 and Dongfang 13-2 are the large mid-deep gas fields discovered in recent years in Yinggehai Basin where the connection of hydrocarbon source with reservoirs just depends on fissure pathways.

**Key words:** Diapiric structure, Hydrocarbon migration, Migration pathway, Faults, Yinggehai Basin

Han Guangming: Geology Engineer. Add: Zhanjiang Branch Company of CNOOC (China) Ltd., Mail Box 22, Potou, Zhanjiang, Guangdong, 524057, China