

琼东南盆地深水区泥-流体底辟发育特征 与天然气成藏

满晓,朱继田,姚哲,吴洁,王丽君

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东 湛江 524057)

摘要: 琼东南盆地深水区发育泥-流体底辟构造,为油气垂向运移提供通道。文章基于琼东南区域构造与沉积演化认识,利用高精度三维地震资料,对深水区底辟构造进行了系统研究,识别出了底辟的分布范围,并分析了其发育机制以及对天然气成藏的控制作用。琼东南盆地深水区底辟主要发育在乐东-陵水凹陷结合部的陵南斜坡带及凸起之上,向凹陷中心规模逐渐减小。新近纪时期盆地快速沉降和生烃作用共同导致了深部异常高压的存在,其为底辟发育提供了原始的驱动力;陵南斜坡带古近纪发育的断裂为区域内的构造薄弱带,且在新近系发生活化为异常高压释放提供突破口,进而导致了底辟的形成,即底辟形成时间为新构造运动时期。底辟构造可沟通崖城组烃源岩及黄流组、莺歌海组储集体,是深水西区油气垂向运移的主要通道,控制了天然气藏的分布。根据底辟构造与烃源、储层的配置关系,提出了陵南斜坡带和松南低凸起区是深水区下步勘探的重点区带。

关键词: 琼东南盆地;深水勘探;泥-流体底辟;气烟囱;天然气成藏;海南省

中图分类号: P618.1302 **文献标识码:** A

0 引言

底辟构造是一种特殊的地质构造类型,包括泥底辟、流体底辟(气烟囱)、火山底辟(岩浆底辟)、盐底辟等多种发育形式^[1]。其中,泥-流体底辟在我国近海盆地油气成藏过程中发挥着重要的作用,莺歌海盆地、珠江口盆地、渤海湾盆地都发现了与泥-流体底辟构造有关的油气藏^[2-5]。根据前人研究成果,认为这些底辟构造发育于新构造运动时期(晚中新世—今)^[6-7],为油气垂向运移并聚集成藏提供通道。

在我国南海琼东南盆地深水区近两年相继发现了陵水17-2、陵水25-1等大中型天然气田,其同样与泥-流体底辟构造有关^[8-10]。虽然底辟构造为油气垂向穿层运移提供通道、在油气成藏过程中扮演着重要的角色,但目前对琼东南盆地深水区底辟

构造尚未有系统的研究。因此,本文将通过对琼东南盆地深水区采集的高精度三维地震资料研究,力图对区内底辟构造进行识别,并基于区域构造与沉积演化背景和前人研究成果,对底辟构造的发育机制进行分析;结合区内烃源、储层与底辟的时空配置关系,研究底辟对天然气成藏的控制作用,提出有利的勘探区带,以期为深水区后续勘探有所帮助。

1 区域地质概况

从油气勘探的角度讲,琼东南盆地深水区主要是指盆地南部水深大于300 m的区域,包括中央坳陷的大部分和南部隆起两个一级构造单元,面积约5.3万km²,主要包括乐东、陵水、松南、宝岛、长昌、北礁等多个凹陷(图1)。深水区油气勘探程度总体较低,位于深水西区的乐东-陵水凹陷是当前主要

收稿日期: 2017-01-17; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 国家科技重大专项“海洋深水区油气勘探关键技术”(编号:2016ZX05026)资助。

作者简介: 满晓(1988—),男,工程师,硕士,主要从事深水油气地质研究工作。通信地址:广东省湛江市坡头区南油一区档案楼311室; 邮政编码:524057;E-mail:manxiao@cnooc.com.cn

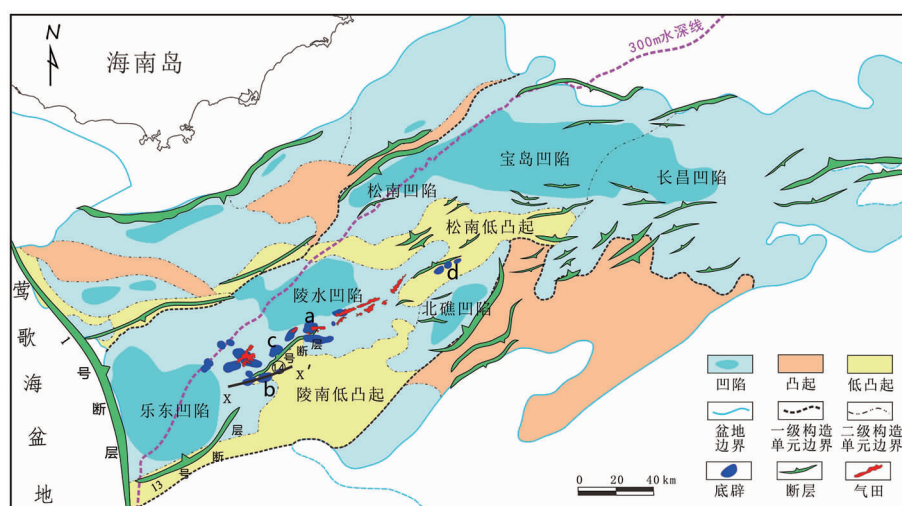


图1 琼东南盆地构造单元划分图(图中断层为 T70 时期的断层投影)

Fig. 1 Division of tectonic units of Qiongdongnan Basin

的勘探区域,其与莺歌海盆地以 1 号断层相隔。

琼东南盆地在新生代时期的演化史可分为裂陷阶段和裂后阶段,裂陷阶段又可分为断陷幕(T100—T70)和断拗幕(T70—T60),裂后阶段又可分为裂后热沉降幕(T60—T30)和裂后加速沉降幕(T30—现今)^[11]。裂陷阶段主要发育始新统(T100—T80)以及渐新统崖城组(T80—T70)、陵水组(T70—T60)地层,其中,渐新统崖城组煤系及浅海相泥岩是本区的主力烃源岩^[8,12-13]。裂后阶段主要发育中新统三亚组(T60—T50)、梅山组(T50—T40)、黄流组(T40—T30)以及上新统莺歌海组(T30—T20)和第四系乐东组地层,目前在中央水道的黄流组中发现了陵水 17-2、陵水 25-1 等油气田。裂后热沉降幕盆地逐渐停止裂陷作用,盆地构造活动十分微弱,对盆地的沉积基本不起控制作用,盆地总沉降速率和构造沉降速率都有所下降。裂后加速沉降幕(5.3 Ma—今)使整个盆地的演化进入了一个新的阶段,盆地的沉降速率突然加快,陆架—陆坡体系开始发育,特别是在跨过了陆架坡折进入深水区之后,盆地的沉降明显加快。

2 底辟构造发育特征及形成机制

2.1 发育特征

底辟构造包括多种类型,由于其各自的物质基础不同,在地震剖面上具有不同的反射特征,这些反射特征是底辟识别的主要依据。火山底辟由于岩浆

岩密度、速度与围岩相差较大,常形成很强的波阻抗界面,火山底辟内部岩性均一、不分层,常呈杂乱或空白反射^[14]。盐底辟外部形态变化较大,与其他类型底辟差别明显,在地震剖面上容易识别。泥底辟主要是低密度的塑性泥岩上拱形成的^[15],一般具有锥状的外形;由于泥岩上拱造成地层破裂,底辟内呈不连续、甚至杂乱反射的特点,两侧地层被向上牵引,泥底辟与围岩之间没有明显的波阻抗界面,在形成过程中常伴生有大量的微裂隙/小断层,有利于油气垂向运移。气烟囱又称“含气陷阱”^[14],主要是由于地层含气造成的,地层含气使地层速度降低,地震剖面上表现为下拉特征明显、烟囱状的模糊带;气烟囱往往是油气发生运移的体现,对油气勘探具有指示意义。

琼东南盆地深水区近年来已采集了大面积的高精度三维地震资料,其为底辟构造的识别、研究提供了资料基础。在地震剖面上可以看出,区内的底辟构造主要为古近系的泥源层,多呈尖锥状、长柱状;底辟类型为泥底辟和气烟囱,以及二者的垂向叠加组合(“两段式”结构)三种类型。

三种底辟类型在三维地震剖面上的反射特征:

第一类主要表现为泥底辟的特征,以泥岩上拱为主,两侧地层被向上牵引,中—弱振幅,同相轴横向连续性差,底辟主体上部发育高角度小断裂(图 2a)。

第二类为长柱状“反射模糊区”,内部呈弱振幅杂乱反射或空白反射,两侧地层未见被向上牵引,表现为“气烟囱”的特征(图 2b)。

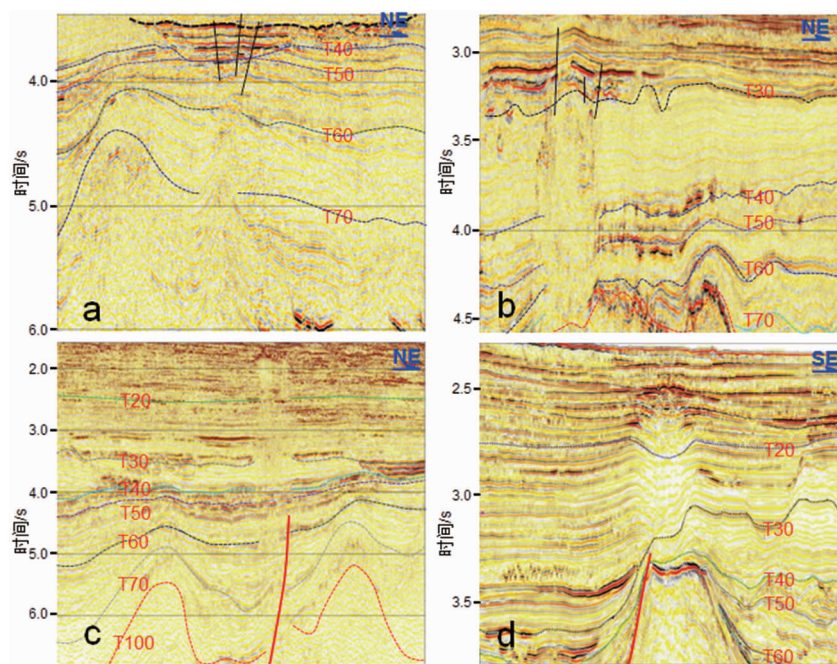


图2 琼东南盆地深水区底辟的典型地震反射特征图

(图 a、b、c、d 对应于图 1 底辟位置)

Fig. 2 Typical seismic reflection characteristics of diapir in Qiongdongnan Basin

第三类表现为“两段式”结构,下段地层上拱特征明显,中—弱振幅,同相轴横向连续性差,应为泥底辟及垂向裂隙系统;上段可向上延伸至第四纪地层甚至海底,表现为长柱状“反射模糊区”,呈弱振幅杂乱反射或空白反射,两侧地层未见被向上牵引的特征,推测是由于地层含气导致吸收异常,表现为“气烟囱”的特点(图 2c)。

速度分析发现,本区发育的泥-流体底辟构造相对围岩具有明显的低速特征(图 3),这是由于底辟的发育伴随着天然气垂向运移,从而导致地层含气所致,因此统称为泥-流体底辟。经过识别,发现本区底辟构造主要发育在乐东—陵水凹陷结合部的陵南斜坡带,陵南低凸起上也有少量发育,平面上总体沿 NE-SW 向展布,向凹陷中心规模逐渐减小。另外,底辟在陵水凹陷东缘的松南低凸起之上也有发育,在地震剖面上地层下拉特征明显,更多的表现为“气烟囱”的特点(图 2d)。

2.2 形成机制

中国近海新生代盆地普遍发育泥-流体底辟构造,结合前人研究成果,发现其形成机制具有一定的相似性,强超压和区域应力场变化产生的构造薄弱带是泥-流体底辟形成的两个主要因素^[4]。例如,以 1 号断层与琼东南盆地相隔的莺歌海盆地就是一个典型的底辟控藏盆地,盆地中央发育了 5 行雁列式

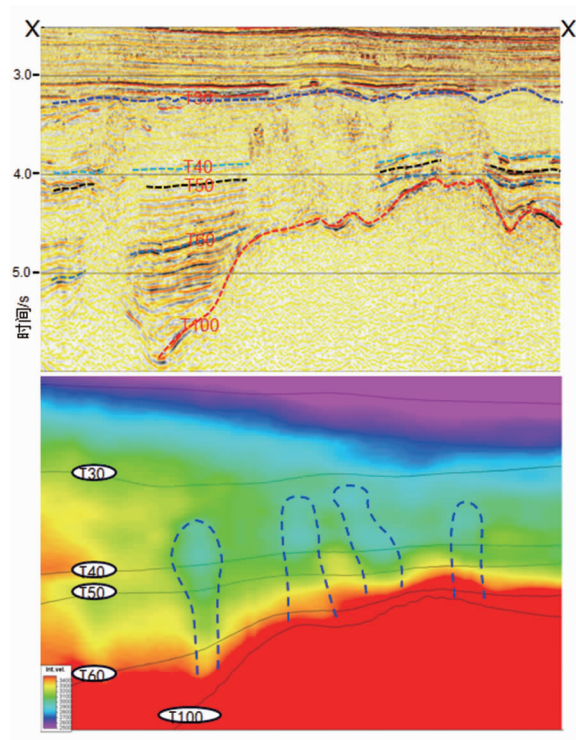


图3 底辟构造在速度剖面上的特征图

(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Characteristics of diapir in velocity profile

排列的底辟,这些底辟规模较大,成群分布。其原因,一方面是盆地快速沉降形成的异常压力,为底辟

形成提供原始驱动力;另一方面是在新构造运动时期红河断裂带右旋走滑剪切作用在盆地中央形成一系列近 SN 向的雁列式断裂,是塑性泥岩上拱、热流体活动得以发生的构造薄弱带^[16]。

与莺歌海盆地底辟相比,琼东南盆地深水区的底辟规模要小的多,形态上没有那么典型,但其形成机制具有一定的相似性。

(1) 异常高压

根据速度分析和压力模拟结果,地层埋深越大,压力越大。梅山组以下地层发育超压,陵水组及下部地层压力系数普遍超过 1.7,凹陷中心甚至达到 2.1,黄流组及莺歌海组向上逐渐过渡到正常压力带(图 4)。根据钻井 MDT 分析和实时压力监测结果,钻遇莺歌海组、黄流组的压力系数均小于 1.2, T40 界面是一个压力分界面,中央峡谷钻探的 LS22-1-1 井钻穿 T40 界面(峡谷底)后压力系数迅速达到 1.5^[8]。盆地晚期快速沉降作用是形成超压的主要因素^[17],裂陷期物源补给充分,沉积速率较快,崖城组及陵水组沉积了厚层的海陆过渡相—滨浅海相地层;裂后期(T60—今)盆地以拗陷为主,西区陆坡推进,沉积沉降速率快,尤其是自 5.3 Ma 进入加速沉降阶段以来,盆地大幅度沉降,乐东凹陷最大沉降速率可到 900 m/Ma(距今 1.8 Ma),陵水凹陷最大沉降速率近 500 m/Ma(距今 4.2 Ma),从而导致深部崖城组、陵水组地层埋深迅速增大,压实与排液不均衡,使孔隙流体压力高于静水压力,造成欠压实,且随着埋深增大,异常压力也逐渐增大^[18]。由于乐东—陵水凹陷裂后期构造运动较弱,断层不再活动,垂向上沉积的巨厚泥岩的封盖作用使得异常地层压力得以集聚保存。

另外,研究认为生烃作用也是超压形成的重要

因素^[19]。钻探结果分析以及区域沉积相研究表明,渐新统崖城组海陆过渡相煤系源岩和海相泥岩是深水区主力烃源岩,其有机质主要来自陆生高等植物,以生气为主。乐东—陵水凹陷烃源岩体积巨大,有机质含量高,而且烃源岩热演化程度高,生气强度达到 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ — $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,其对于凹陷内部超压的形成具有一定的贡献。

(2) 构造薄弱带

琼东南盆地深水区在古近纪主要发育 NE、NW—NWW、近 EW 向三组断裂体系,陵南斜坡区主要发育 13、14 号两条控凹大断层及一些次级断层,呈 NE—SW 向展布,为区域内的构造薄弱带,乐东—陵水凹陷发育的底辟构造基本上是沿 13 号断裂带分布(见图 1)。裂后期盆地以拗陷为主,断裂基本停止活动,有利于深部高压的保存。当深部高压积累到一定程度,在构造再活动或地震等某些机制的触发作用下,断裂活化,就有可能成为深部异常高压释放的突破口。深部携带烃类气的热流体沿断裂向上运移,若流体压力超过地层破裂压力便会压裂上覆地层,形成流体垂向运移的通道,并总体表现为泥—流体底辟的特征(图 5)。

从底辟构造的发育机制来看,其形成时期应为晚中新世以后,也就是所谓的新构造运动时期,这一点与前人的研究是吻合的^[20]。

莺—琼盆地经历了相似的构造与沉积演化,但两个盆地发育的底辟却有较大的差异。从大的方面来讲,其形成都受到异常高压和构造运动(断裂带)的影响,但这两方面的因素还是存在很大的不同。一方面,在新近纪琼东南盆地的沉积、沉降速率远小于莺歌海盆地,地层厚度、埋藏深度相差较大,压力异常特征没有莺歌海盆地显著;另一方面,莺歌海盆地

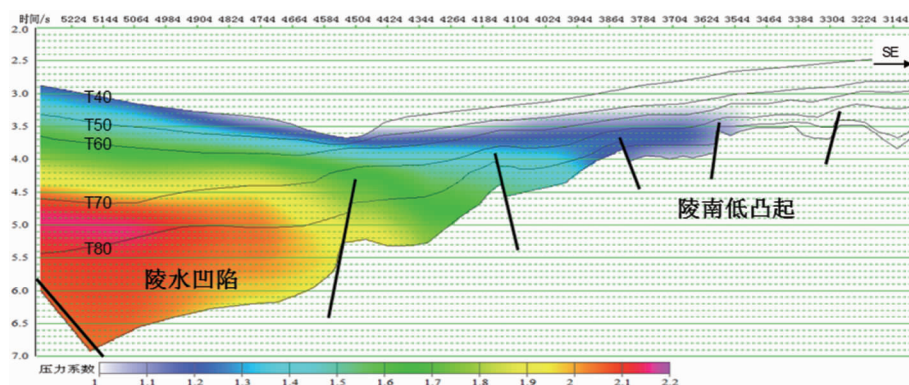


图 4 琼东南盆地陵水凹陷典型地层压力剖面图

Fig. 4 Typical formation pressure profile of Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin

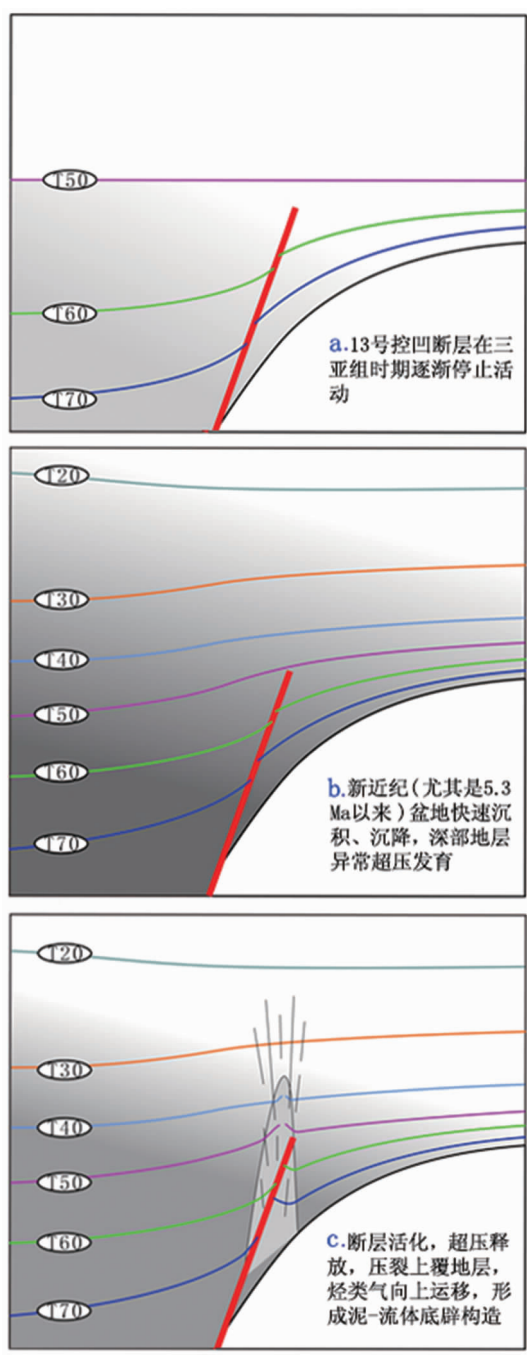


图5 底辟形成机理示意图

Fig. 5 Sketch map of developmental mechanism of diapir structure

中央发育的近南北向雁行排列的张裂带是在新近纪时期由于红河断裂带左旋走滑转右旋走滑而产生的,乐东—陵水凹陷的断裂形成于古近纪,只是在新近纪可能因某种原因发生了活化。

琼东南盆地深水东区宝岛—长昌凹陷与西区经历了同样的构造演化过程,但不发育泥底辟构造,主要原因有两方面。首先,新近系深水以西物源为

主,深水东区远离物源区,沉积厚度小,欠压实作用相对西区较弱,产生的异常压力也较小,底辟发育的原动力先天不足;其次,深水东区构造更为活跃,断裂体系十分发育,泄压通道多,不利于异常高压的集聚。

3 底辟构造对天然气成藏的控制作用

根据钻探成果分析,渐新统崖城组煤系地层和海相泥岩是深水西区乐东—陵水凹陷的主力烃源岩,中央峡谷黄流组浊积水道砂和莺歌海组海底扇则为油气成藏提供了优越的储集条件。但烃源岩与储层之间沉积了巨厚的海相泥岩,厚度可达数千米,而盆地在新近系时期以拗陷为主,断层不发育,底辟构造作为沟通烃源与储层的桥梁,是深水西区油气垂向穿层运移的主要通道,控制了深水西区天然气藏的分布。深水区已获得的油气发现集中于中央峡谷领域的陵水 25-1—陵水 17-2 构造区,油气通过底辟垂向运移至中央峡谷内,并沿峡谷底部的砂体侧向运移,寻找圈闭聚集成藏,形成了带状的气田群。

在地质历史时期,乐东—陵水凹陷崖城组烃源岩存在两个生气峰值段:晚渐新世—早中新世和晚中新世—现今。该区底辟构造形成于晚中新世以后,此时圈闭已经形成,且生烃灶开始排烃,生、储、运时间配置关系较好。底辟构造的发育往往具有幕式的特点,有利于集中排烃,油气运移效率高。

乐东—陵水凹陷结合部的陵南斜坡带既是底辟构造的集中发育区,也是有利于油气汇聚的低压力势区,同时还是新近系莺歌海组海底扇和中央峡谷水道砂大型优质储集体发育的部位,形成了多个大型岩性圈闭(图6)。压力系统分析显示梅山组以下地层发育超压,而发育优质储层的黄流组、莺歌海组地层为压力过渡区或常压区,是天然气成藏的有利层系^[21]。底辟构造及伴生的小断层或微裂隙可以沟通崖城组烃源岩和黄流组、莺歌海组储层,为油气垂向运移提供通道。另外,由于本区底辟规模小,对圈闭条件的影响较小。因此,陵南斜坡带油气成藏条件十分有利,可作为深水区下步勘探的重点区域。

除陵南斜坡带之外,陵水凹陷东缘的松南低凸起之上也发育了少量的气烟囱,指示该区也是油气有利汇聚区。研究发现,松南低凸起区同样发育黄流组水道砂和莺歌海组海底扇储层,尽管距离陵水凹陷生烃中心较远,但是黄流组、莺歌海组发育的大套砂体可作为良好的输导体系,油气通过底辟垂向

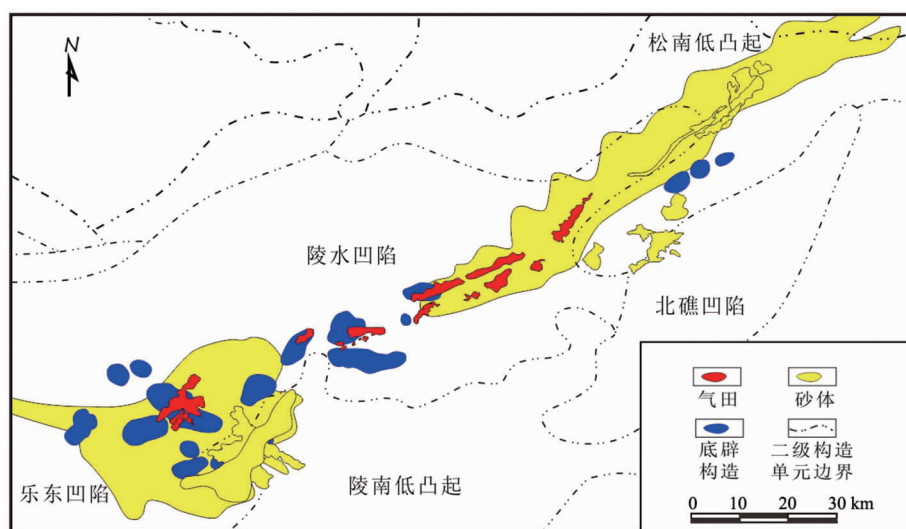


图 6 底辟发育区烃源、储层、运移的配置关系图

Fig. 6 Spatial distribution of hydrocarbon source, reservoir and migration condition in the diapir-distribution region

运移至浅层后,再侧向运移至圈闭内聚集成藏。因此,松南低凸起区也具备良好的油气成藏条件,可在下步勘探中进行积极探索。

4 结语

(1)琼东南盆地深水区发育泥-流体底辟构造,主要分布在乐东-陵水凹陷结合部的陵南斜坡带及凸起之上,向凹陷中心规模逐渐减小。陵水凹陷东缘的松南低凸起上也有少量分布。

(2)异常高压和构造薄弱带是本区研究区底辟发育的两大控制因素。新近纪时期盆地快速沉降作用和生烃作用使深部地层形成异常高压,并发生集聚,为底辟形成提供原始驱动力;陵南斜坡带在古近纪发育控凹断层,为区域构造薄弱带,新近纪因构造再活动或地震等原因断层发生活化,为压力释放提供突破口,携带烃类气的热流体向上运动压裂上覆地层,形成泥-流体底辟。

(3)底辟构造可沟通崖城组烃源岩与黄流组、莺歌海组储集体,是深水西区油气垂向运移的主要通道,控制了天然气藏的分布。本区烃源、储层、运移条件时空配置关系好,陵南斜坡带和松南低凸起区成藏条件好,可作为深水区下步勘探的重点区域。

(4)由于三维地震未全覆盖、二维测线稀疏且分辨率不足等原因,故在乐东凹陷东南部的 13 号断层发育区并未识别出大的底辟构造;根据乐东-陵水

凹陷沉积沉降史,西南部沉积沉降速率更大,模拟结果表明超压更明显,且受红河断裂带构造运动影响更为显著,其应具备底辟构造发育的条件,但尚需待采集三维资料后作进一步研判。

参考文献:

- [1] 石万忠,宋志峰,王晓龙,等. 珠江口盆地白云凹陷底辟构造类型及其成因[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2009, 34(5): 778-784.
- [2] 张敏强. 莺歌海盆地底辟构造带天然气运聚特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 39-42.
- [3] 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:中国地质大学学报, 2004, 29(2): 203-210.
- [4] 王家豪,庞雄,王存武,等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2006, 31(2): 209-213.
- [5] 周心怀,余一欣,汤良杰,等. 渤海地区底辟构造及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 518-521.
- [6] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2004, 29(5): 513-517.
- [7] 龚再升. 中国近海新生代盆地至今仍然是油气成藏的活跃期[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 1-6.
- [8] 黄保家,王振峰,梁刚. 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气来源及运聚模式[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 8-14.
- [9] 王振峰,孙志鹏,朱继田,等. 南海西部深水区天然气地质与大气田重大发现[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 11-20.
- [10] 姚哲,朱继田,左倩媚,等. 琼东南盆地深水区重力流沉积体系及油气勘探前景[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 21-30.
- [11] 雷超,任建业,李绪深,等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 560

- 569.
- [12] 王振峰, 甘华军, 王华, 等. 琼东南盆地深水区古近系层序地层特征及烃源岩分布预测[J]. 中国海上油气, 2014, 6(1): 9-16.
- [13] 黄保家, 李绪深, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 1-7.
- [14] 何家雄, 祝有海, 马文宏, 等. 火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱与油气运聚关系[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1720-1732.
- [15] 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, 31(3): 332-334.
- [16] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(1): 75-86.
- [17] 王敏芳. 琼东南盆地超压特征及超压体与油气分布的关系[J]. 海洋石油, 2003, 23(1): 15-22.
- [18] 张金亮 常象春. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 132-140.
- [19] 苏龙, 郑建京, 王琪, 等. 琼东南盆地超压研究进展及形成机制[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 662-672.
- [20] 朱继田, 裴健翔, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地新构造运动及其对晚期油气成藏的控制[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 649-656.
- [21] 谢玉洪, 李绪深, 童传新, 等. 莺琼盆地高温超压天然气成藏理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015: 260-262.

The characteristic of Mud-Fluid diapir and its control on hydrocarbon accumulation in deep water area, Qiongdongnan Basin

MAN Xiao, ZHU Jitian, YAO Zhe, WU Jie, WANG Lijun

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

Abstract: Mud-Fluid diapir structures have been proved to be the vertical migration pathway of oil-gas in deep water area, Qiongdongnan Basin. Based on the regional tectonic and sedimentary evolution and high-resolution 3D seismic data, diapir structures of deep water area were studied systematically for the first time. Result of the study shows distribution range of the diapir and the study analyzed development mechanism of the diapir and its control on the oil-gas accumulation. The diapir develops mainly on the slope zone and uplift close to the junction of Ledong-Lingshui Sag. To center of the sag size of the diapir gets smaller. rapid subsidence in Neogene and hydrocarbon generation jointly resulted in the deep abnormal high pressure which provides drive force for the diapir development. Fracture developed during paleogene in Lingnan slope zone is the tectonic weak zone and activated to be window for abnormal pressure release in Neogene so as to leading to formation the diapir, i. e., the diapir was formed during Neo tectonic movement. The diapir connects the hydrocarbon source rock of Yacheng formation and reservoir of Yinggehai formation acting as vertical channel to transport oil-gas in the west deep water area and controls distribution of reservoirs. According to layout of the diapir and hydrocarbon source rock and reservoir is pointed out that Lingnan slope zone and Songnan uplift zone are the key areas for further prospecting in the deep water area.

Key Words: Qiongdongnan Basin; deep water exploration; Mud-Fluid diapir; gas-chimney; hydrocarbon accumulation; Hainan province