

珠江口盆地白云凹陷底辟构造类型及其成因

石万忠, 宋志峰, 王晓龙, 孔 敏

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 珠江口盆地位于中国南海北部, 是中国近海含油气盆地中一个重要的盆地。盆地内发育众多形态各异的底辟构造, 目前仅有少量的文章对其进行过分类研究, 缺少系统地论述。底辟构造是流体穿层流动的一种特殊形式, 对其展开分类及成因分析有助于洞察白云凹陷内流体的活动信息和油气运移特征。本文针对珠江口盆地白云凹陷地震剖面上所显示的大量而且种类丰富的底辟构造, 开展了底辟构造识别、分类及其内涵流体活动信息的研究, 依据盆地模拟结果和区域构造特征讨论了底辟构造的成因特征, 得出如下两个结论: (1) 珠江口盆地发育多种类型的底辟构造, 有底辟初期的龟背上拱、泥底辟、气体泄流通道、裂缝带这4种类型, 不同的底辟构造类型内涵有不同的地质信息; (2) 底辟构造的成因与构造活动密切相关, 超压对底辟构造的形成与活动影响较小, 不起主要的作用。

关键词: 底辟; 盆地模拟; 底辟成因; 白云凹陷; 珠江口盆地。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2009)05-0778-07

收稿日期: 2008-12-03

Diapir Structure and Its Origin in the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin, China

SHI Wan-zhong, SONG Zhi-feng, WANG Xiao-long, KONG Min

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract As one of the most important offshore basins in China, there exist many different kinds of fluid diapirs in the Pearl River Mouth basin, which have been introduced in some papers. However, the systemic study of these diapirs is still to be expected on its classification and origin, which can understand fluid migration better. Fluid diapir structure is a special style of fluid migrating upwards. The aim of this paper is to identify and classify the fluid diapir structure, to analyze the messages implied by the fluid diapir structure, to find out a new method of evaluating the fluid diapir structure characterized by the blank seismic reflection, and to discuss the origin of the diapirs according to basin modeling and structure analysis. On the basis of the investigation, we can come to the following conclusions: (1) There are four kinds of diapirs in the Pearl River Mouth basin including the turtleback-like arch, mud diapir, gas seepage, fault (or crack), which indicate different geological messages; (2) Structure activity rather than the overpressure is the primary driving pressure on diapirs.

Key words: diapir; basin modeling; diapir origin; Baiyun depression; Pearl River Mouth basin.

0 引言

珠江口盆地是中国近海含油气盆地中一个重要的盆地, 近年来在白云凹陷深水區发现了大量深水扇沉积(Pang *et al.*, 2004; 彭大钧等, 2005), 使之成为我国深海油气勘探的重要选区。按照中国海洋总公司的战略部署, 珠江口盆地勘探逐渐由浅水区

向深水區推进。2006年在珠江口盆地钻探了我国第一口深水探井, 钻遇了200多米厚的气层, 这标志着我国深水勘探的正式开始。深水钻探的高成本要求对珠江口盆地深水區的油气运移特征有全面的理解, 以减少深水油气勘探的风险。

珠江口盆地白云凹陷地震剖面显示有大量而且种类较多的流体底辟构造, 流体底辟构造是盆内流

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40602015); 中国地质大学(武汉)优秀青年基金(No. CUGQNL0605); 中国地质大学(武汉)湖北省油气勘探开发理论与技术重点实验室开放基金(No. YQ2006KF17)。

作者简介: 石万忠(1973—), 副教授, 主要从事层序地层与沉积学、地震反演和油气成藏动力学研究。E-mail: wanzhong-shi@yahoo.com.cn

体穿层流动的一种特殊形式, 并表现为泥底辟和流体底辟叠加作用的特点. 流体底辟构造按照发育的不同形式, 可分为: 流体(泥岩)底辟(diapirium)、气烟囱(gas chimney)、泥火山(mud volcanoes)、流体泄漏通道(seepage)和海底麻坑(pockmark)等类型. 流体底辟(或泥岩底辟)、气烟囱、泥火山以及海底麻坑分别代表了热流体和低密度岩石由塑性上拱—刺穿—塌陷等不同演化阶段和不同幅度的底辟作用结果(何家雄等, 1994; 董伟良和黄保家, 2000). 这些底辟现象反映了盆内流体的活动, 它们是了解盆内流体活动重要窗口. 王家豪等(2006)曾对白云凹陷的底辟构造做过介绍, 但不同底辟构造内涵的地质意义及成因仍需做进一步的理解和分析. 本文以流体底辟构造的识别和划分为基础, 结合地层压力的模拟结果探讨流体底辟构造的成因及对油气的意义.

1 珠江口盆地基本地质特征

珠江口盆地是位于南海北部大陆架上的中、新生代盆地, 白云凹陷属其南部坳陷带的一个次级构造单元(图 1), 面积约 20 000 km² (石万忠等, 2006). 珠江口盆地的形成与演化, 主要受印度板块与欧亚板块的碰撞以及太平洋板块对欧亚板块

NWW 向俯冲的影响, 是一个新生盆地, 晚白垩世—古新世神狐运动促使该盆地的形成与发育. 在新生代发生了 5 次构造运动, 自老而新为: 晚白垩世—古新世神狐运动, 早、中始新世之间珠—琼运动一幕, 晚始新世珠—琼运动二幕, 渐新世中期南海运动及中中新世末至晚中新世末东沙运动(图 2). 其中, 珠—琼运动二幕和南海运动在研究区内表现强烈, 地层有明显的剥蚀特征, 而东沙运动在研究区内没有明显的剥蚀特征, 相对表现较弱. 陈长民等(2003)认为, 总的说来, 珠江口盆地处于拉张的构造背景下, 拉张作用在整个新生代起着主导地位.

珠江口盆地地层发育较为特殊, 为陆海混合相沉积, 陆丰组—恩平组为陆相地层, 珠海组—万山组为海相地层(图 2). 研究区内文昌组和恩平组是主要的烃源岩层, 沉积相主要以中深湖相为主. 研究区主体位于白云凹陷(图 1), 而白云凹陷是珠二凹陷的一个主要凹陷.

2 流体底辟构造类型及其地质意义

经地震资料精细解释与对比, 珠江口盆地白云凹陷发育种类较多的模糊带类型, 具体有如下几类:

(1) 龟背上拱. 龟背上拱是底辟活动初期的产

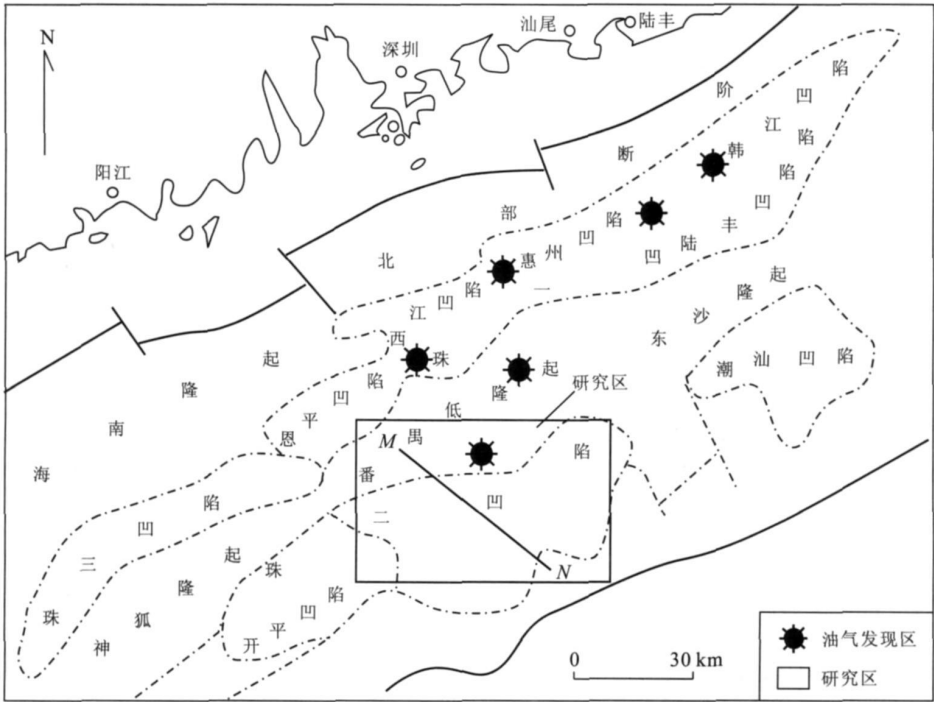


图 1 珠江口盆地构造单元(据代一丁和庞雄(1999)修改)

Fig.1 Structural units and study area in the Pearl River Mouth basin

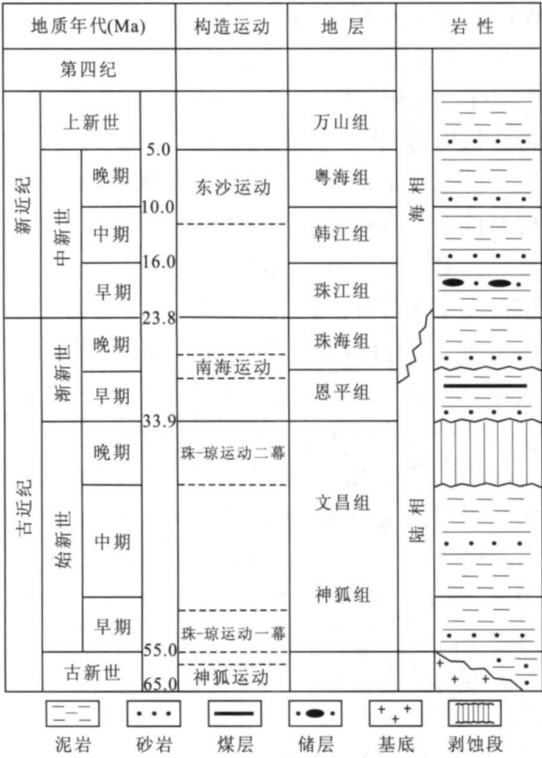


图 2 珠江口盆地地层综合柱状图(据陈长民等(2003)修改)
Fig. 2 Generalised stratigraphic column of the Pearl River Mouth basin

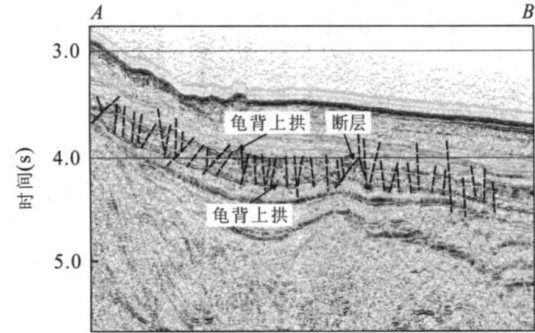


图 3 塑性变形层中的断层与龟背上拱
Fig. 3 Turtleback-like arches and associated faults in the plastic deformation stratigraphy

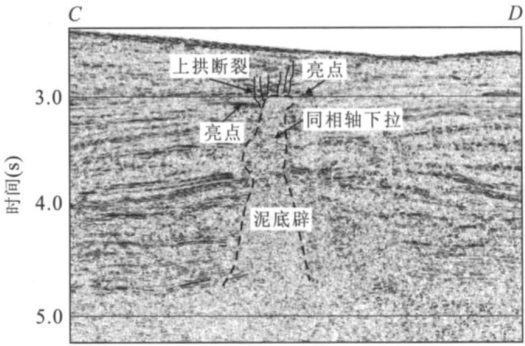


图 4 盆地中心的泥岩底辟带及底辟断层
Fig. 4 Mud diapir and associated faults in the central basin

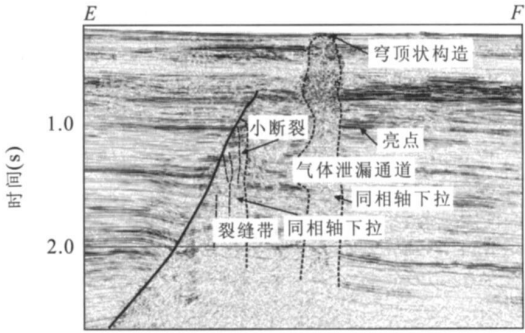


图 5 气体泄漏通道及裂缝带
Fig. 5 Gas seepage and fault or crack in seismic profile
岩沉积区. 在该底辟带没有发现亮点以及同相轴下拉等反应气体的地震反射特征, 这表明龟背上拱所在区缺少游离天然气的生成, 其生烃潜力值得怀疑.

(2)泥底辟. 泥底辟是底辟作用发展至强刺穿—塌陷阶段的结果. 泥底辟一般伴随着泥岩的底辟作用而形成(图 4), 刺穿规模大, 泥岩底辟带呈模糊反射, 周边的振幅比内部振幅强, 在模糊带内保留有原来的成层性. 在与围岩接触带, 呈现成层与地震模糊的地震样式. 泥岩底辟带内出现空白或杂乱反射, 这也可能是由于泥岩的均质性和充气所造成. 同相轴下拉一般认为是热流体特别是天然气充注造成低速异常所致.

图 4 所示的泥底辟发育在白云凹陷中心(见图 9 所示的位置), 底辟带的顶部有明显的亮点反射特征, 这表明已有天然气通过底辟通道到达了其顶部, 底辟带所在的白云凹陷深水区具有一定的生烃潜力.

(3)气体泄漏通道. 泥底辟通道于地表就形成了气体泄漏通道, 这在珠江口盆地也常见(图 5). 气体泄漏地震反射特征一般表现为: 呈垂直柱状穿透地层, 在柱状内地震振幅急剧减小, 有的近乎空白反射, 地层层状不清; 大多数情况下, 气体泄漏的通道, 下部较宽上部较窄呈圆锥形. 在海底附近伴随有泥

物. 越来越多的研究表明在异常高地层压力带由于密度反转和重力不稳定性使欠压实泥岩产生波状变形, 同时超压孔隙流体起到润滑作用, 能够降低颗粒之间的剪切阻力, 随着上覆压力的增大会渐次形成龟背上拱和压裂断层(解习农等 1999; 董伟良和黄保家, 2000; 王家豪等, 2006).

图 3 显示在一套地震反射模糊的地层内, 发育有大量较陡的小断层, 这些小断层基本分布在该模糊带内, 仅有少量的断层断到该模糊带的顶面和底面, 从地层沉积属性来看, 该模糊带主要属于深海泥

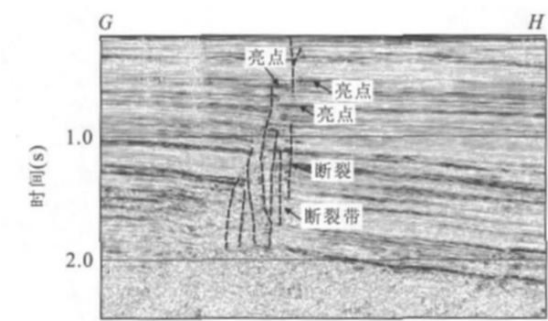


图6 地震剖面解释的裂缝带

Fig. 6 Crack or fault in the seismic profile

坑或呈穹顶状的构造(Lüdmann and Wong, 2003);在模糊带内,由于充气地震速度降低,出现相位下拉现象.图5所示的气体泄漏通道地震反射特征符合以上的一般描述特征,表明划分是可靠和准确的.

图5所示的气体泄漏通道位于图9所示的番禺低隆起地区,在图中所示气体泄漏通道附近缺少烃源岩,不可能有大规模的天然气生成,因此该泄漏通道主要泄漏的是白云凹陷生成的天然气经基底不整合面运移来的天然气,这表明番禺低隆起是白云凹陷天然气运移的重要指向,是有利的勘探区带,番禺29-1等一系列的气田的发现已经证实了这一内涵的信息.

(4)裂缝带.裂缝带一般由弱变形的构造作用产生,由于在裂缝带中有很多小裂缝,形成了地震模糊

发射的特征.图5和图6显示裂缝带由众多的小裂缝组成,在裂缝带附近分布有亮点且在裂缝带内有弱振幅特征,这表明裂缝带是气体运移或泄漏的通道.该裂缝带位于图9所示的番禺低隆起区,同图5所内涵的信息一致:番禺低隆起区为白云凹陷天然气运移的重要指向,是有利的勘探目标带.

3 珠江口盆地流体底辟构造成因探讨

目前研究表明,流体底辟构造主要在超压和拉张性的构造背景下形成(Lüdmann and Wong, 2003),具体到该盆地流体底辟构造成因,需要进一步分析.

3.1 压力分析

番禺低隆起位于白云凹陷北部,在该隆起上钻遇的地层测试都表现为正常压力.图7为11口钻井的地层压力和地层温度测试结果,从图中可以看出:现今地层总体表现为正常压力,没有超压现象.

现今地层压力为正常压力,并不意味着盆地的沉积演化过程中不存在超压,在盆地演化过程中,超压形成与释放往往与油气的大规模生成与运移密切相关,因而了解地层压力的演化对了解流体底辟构造的形成与油气的运移至关重要.

应用盆地模拟软件模拟了图9中M-N剖面,模

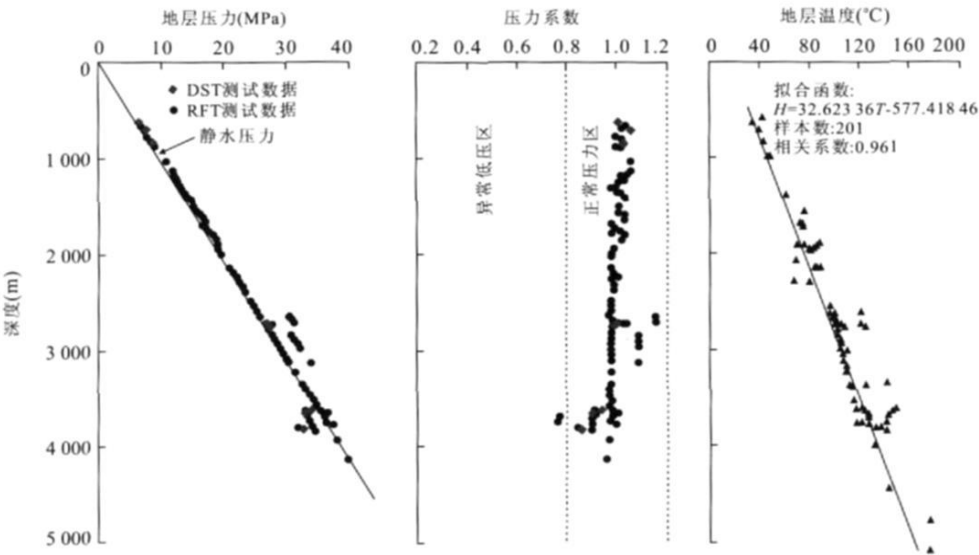


图7 珠江口盆地番禺低隆起地层压力、压力系数和地层温度随深度分布图(据11口钻井测试资料)

Fig. 7 Plots of formation pressure, coefficient of pressure and formation temperature vs. depth in Panyu low uplift, the Pearl River Mouth basin

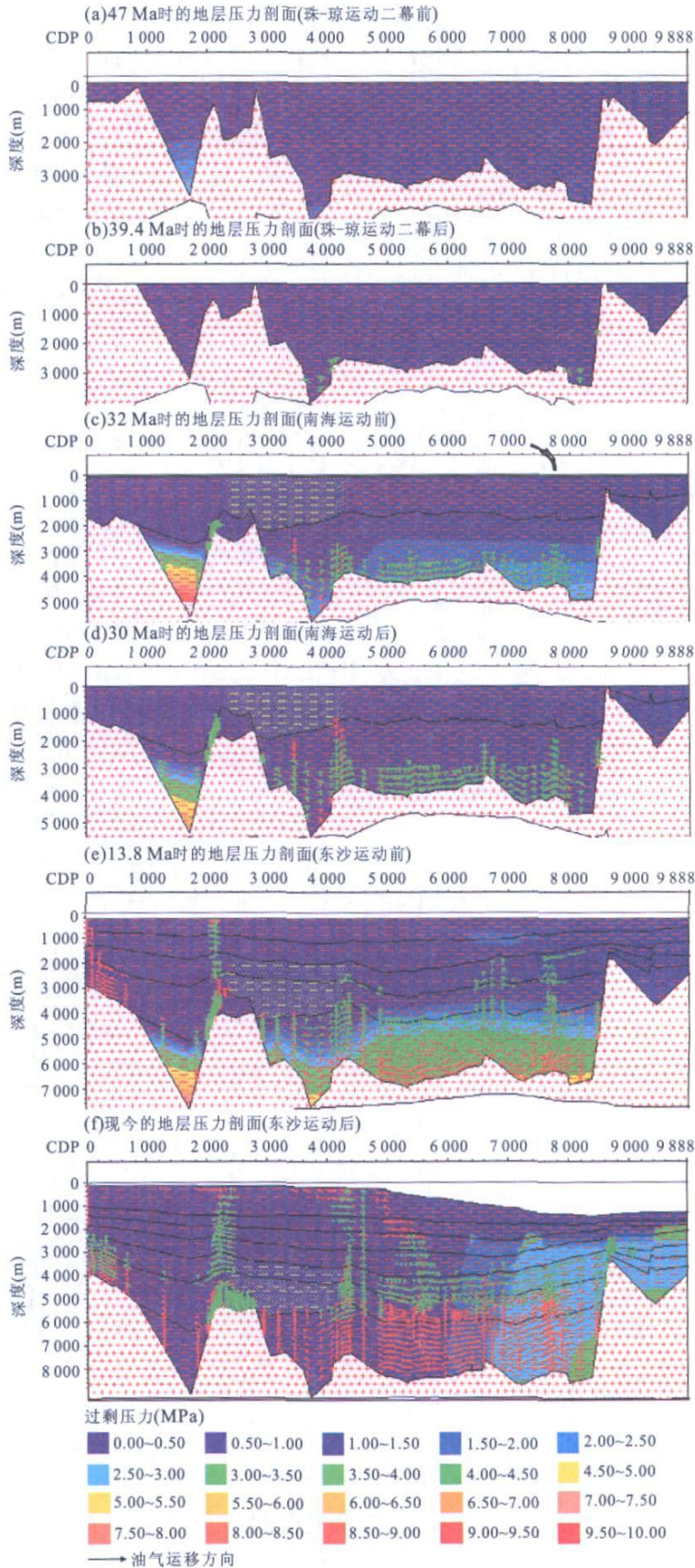


图 8 M-N 剖面地层超压模拟图

Fig. 8 Modelled evolution profiles of excess pressure for the cross-section M-N

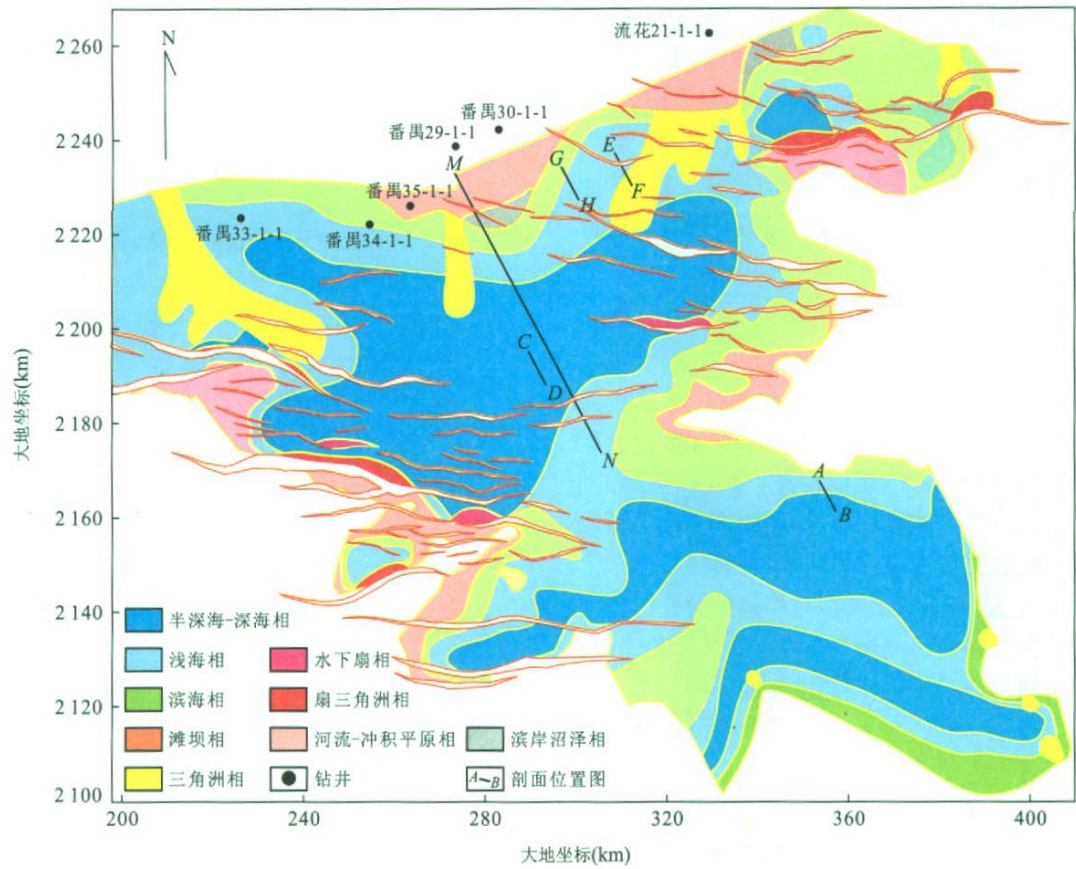


图 9 白云凹陷文昌组沉积相与断层叠合

Fig. 9 Depositional facies and faults in Wenchang Formation, Baiyun depression

拟结果如图 8 所示, 可以看出在整个新生代, 地层压力随着构造运动的发生经历了 3 次幕式变化. 在 65 ~ 47 Ma 期间, 特别是神狐运动之后, 白云凹陷有稳定的沉降, 在其下部大约有 1.1 MPa 超压的聚集. 在珠一琼运动二幕晚期, 即 39.4 Ma 时, 由于构造运动的抬升, 使得地层遭受剥蚀, 下部集聚的超压通过断层释放. 从 39.4 ~ 32 Ma, 白云凹陷又经历了一个稳定沉降期, 下部的有机质开始成熟, 集聚的超压增大, 最大增大到 9.0 MPa. 随着南海运动的发生, 地层再次被抬升剥蚀, 超压被部分释放. 在 30 Ma 时, 最高超压层由 9.0 MPa 减小到了 5.0 MPa. 从 30 ~ 13.8 Ma, 地层进入了又一个平静沉降期, 随着有机质的成熟和油气的生成, 集聚的超压也在增大, 在 13.8 Ma 时, 深部地层和海相泥岩地层都有超压存在, 是超压分布最广泛的时期. 在 13.8 Ma 之后, 随着东沙运动的发生, 先前集聚的超压再次释放, 到现今, 只有在陆坡以下的海相泥岩地层中和深部烃源岩地层中有较小的超压存在.

以上模拟结果可以看出: (1) 在沉积盆地的演化过程中, 最大超压只有 9.0 MPa, 这么小的超压不足

以驱动流体产生底辟构造; (2) 随着超压的释放, 在纵向上油气主要沿着主断层运移, 在横向上来看, 油气从白云凹陷运移到了番禺低隆起区, 这与前面的底辟构造所揭示的信息一致.

3.2 构造分析

前面的数值模拟已经证实超压不是该区底辟构造的主要驱动力, 依据目前底辟构造的形成机制认识来看, 构造成因应该是白云凹陷底辟构造的主要机制. 图 9 显示了珠江口盆地新生代处于右旋张扭性区域构造作用下, 凹陷内发育一系列雁行状排列的 NWW 向断裂, 这样的断裂分布对该区的底辟构造有重要的影响.

图 3 位于图 9 所示的 A-B 位置, 该区虽然没有断层发育, 但模糊带所在韩江组地层主要为深海泥岩沉积, 受粤海组快速沉积和沉降的影响, 欠压实和重力不稳定性使欠压实泥岩产生波状变形, 随着上覆压力的增大会渐次形成龟背上拱和压裂断层. 图 4 位于图 9 所示的 C-D 位置, 在该位置有一个大的断裂系发育, 受其右旋张扭的影响, 能够在其附近产生薄弱带, 并受局部压力的驱动形成底辟构造, 图 5

和图6位于图9所示的断裂区带内,受应力场的影响能够产生局部弱变形的裂缝带,这些裂缝带直接或间接与基底不整合面相连通,形成了输导系统的一个组成部分,裂缝带内充气便形成地震模糊反射。

总体上来看,除了图3所示的龟背上拱周缘没有断层外,其他3类底辟构造周缘都有断裂的发育,其形成与构造活动密不可分。

4 结论

(1)依据地震资料的精细解释与对比分析,珠江口盆地发育多种类型的底辟构造,有底辟初期的龟背上拱、泥底辟、气体泄流通道、裂缝带4种类型,不同的底辟构造类型内涵有不同地质信息。

(2)经盆地超压演化模拟与构造应力分析,底辟构造的成因与构造活动密切相关,超压对底辟构造的形成与活动影响较小,不起主要的作用。

References

Chen, C. M., Shi, H. S., Xu, S. C., et al., 2003. Formation conditions of Tertiary oil & gas reservoir in Pearl River Mouth basin China. Science Press, Beijing (in Chinese).

Dong, W. L., Huang, B. J., 2000. Overpressured fluid fracturing, heat fluid flowing and episodic gas migration in the diapir belt, Yinggehai basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(4): 36—40 (in Chinese with English abstract).

Dai, Y. D., Pang, X., 1999. Petroleum geological characteristics of Zhu II depression, Pearl River Mouth basin, China. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 13(3): 169—173 (in Chinese with English abstract).

He, J. X., Huang, H. Y., Chen, L. C., 1994. The formation and evolution of mud diapir and its relationship with hydrocarbon accumulation mechanism in Yinggehai basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(3): 120—129 (in Chinese with English abstract).

Lidmann, T., Wong, H. K., 2003. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern sea of Okhotsk. *Marine Geology*, 201: 269—286.

Pang, X., Yang, S. K., Zhu, M., et al., 2004. Deep-water fan systems and petroleum resources on the northern slope of the South China Sea. *Acta Geological Sinica*, 78(3):

626—631.

Peng, D. J., Pang, X., Chen, C. M., et al., 2005. From shallow-water shelf to deep-water slope—The study on deep-water fan systems in South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 1—11 (in Chinese with English abstract).

Shi, W. Z., Chen, H. H., Chen, C. M., et al., 2006. Modeling of pressure evolution and hydrocarbon migration in the Baiyun depression, Pearl River Mouth basin, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 229—236 (in Chinese with English abstract).

Wang, J. H., Pang, X., Wang, C. W., et al., 2006. Discovery and recognition of the central diapiric zone in Baiyun depression, Pearl River Mouth basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 209—213 (in Chinese with English abstract).

Xie, X. N., Li, S. T., Hu, X. Y., et al., 1999. Fluid migration system and its origin in diapir belt, Yinggehai basin, China. *Science in China (Ser. D)*, 29(3): 247—256 (in Chinese).

附中文参考文献

陈长民, 史和生, 许仕策, 等, 2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件. 北京: 科学出版社.

董伟良, 黄保家, 2000. 莺歌海盆地流体压裂与热流体活动及天然气的幕式运移. 石油勘探与开发, 27(4): 36—40.

代一丁, 庞雄, 1999. 珠江口盆地珠二坳陷石油地质特征. 中国海上油气(地质), 13(3): 169—173.

何家雄, 黄火尧, 陈龙超, 1994. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与油气运聚机制. 沉积学报, 12(3): 120—129.

彭大钧, 庞雄, 陈长民, 等, 2005. 从浅水陆架走向深水陆坡——南海深水扇系统的研究. 沉积学报, 23(1): 1—11.

石万忠, 陈红汉, 陈长民, 等, 2006. 珠江口盆地白云凹陷地层压力演化与油气运移模拟. 地球科学——中国地质大学学报, 31(2): 229—236.

王家豪, 庞雄, 王存武, 等, 2006. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别. 地球科学——中国地质大学学报, 31(2): 209—213.

解习农, 李思田, 胡祥云, 等, 1999. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制. 中国科学(D辑), 29(3): 247—256.