

珠江口盆地白云凹陷地层压力演化与油气运移模拟

石万忠¹, 陈红汉¹, 陈长民², 庞雄², 朱明²

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国海洋石油深圳分公司南海东部研究院, 广东深圳 518067

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。珠江口盆地勘探逐渐由浅水区向深水区推进, 浅水区钻井揭示地层为正常压力, 但对深水区的油气运移指向和地层压力分布认识不清楚。应用钻井测试资料, 地震资料和盆地模拟技术对珠江口盆地白云凹陷深水区的地层压力演化和油气运移进行了研究。模拟结果显示地层压力的聚集与释放以及流体运移与构造运动的发生有密切的关系。从模拟结果的分析中可以得出如下结论: (1) 珠二坳陷经历了3次幕式地层压力的聚集与释放。这3次压力的释放与晚始新世珠江运动二幕、渐新世中期南海运动、中中新世末至晚中新世末东沙运动有关, 其中东沙运动期间是本区油气运移的主要期次, 现在浅水区的常压是由于东沙运动时超压释放后的结果。(2) 钻井测试与模拟结果显示, 现今地层压力在浅水区为常压, 在深水区有弱超压存在。引起地层压力分布的差异主要是由于浅水区和深水区沉积的岩相和岩性的不同。(3) 油气运移有2个指向, 一个运移指向浅水区域, 另一个指向深水区域。由于浅水区砂岩百分比含量高, 砂体连通性好, 油气聚集比较分散, 比较而言深水区油气在扇体里富集程度较高, 更有利于形成大油气田。

关键词: 盆地模拟; 油气运移; 压力演化; 珠江口盆地; 白云凹陷。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2006)02-0229-08

收稿日期: 2005-10-05

Modelling of Pressure Evolution and Hydrocarbon Migration in the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin, China

SHI Wan-zhong¹, CHEN Hong-han¹, CHEN Chang-min², PANG Xiong², ZHU Ming²

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

2. Shenzhen Limited, China Offshore Oil Company, Shenzhen 518067, China

Abstract: The Pearl River Mouth basin is one of the most important offshore basins in China. Petroleum exploration is being carried out in the deep water area of the basin. Well tests indicate that the pore pressure is normal in the shallow water area. The hydrocarbon migration and geopressure distribution in the deep water area are poorly understood at present. These issues have been considered using geological data and basin modelling. The modeled results indicate that pressure accumulation and release, and fluids migration have a close relationship with structural movement. On the basis of our investigation, the following conclusions have been drawn: (1) At least three episodic accumulations and release of pressure occurred in the Cenozoic. The pressure release and associated hydrocarbon migration occurred primarily during the Dongsha Movement, when most of the overpressure was released to normal pore pressure except for some overpressure in the deep water area. (2) Both the measured pressure and the modeling results indicate that pressure is normal in the shallow water area and is abnormally high in the deep water area at present stratigraphy. Difference of pressure distribution is caused by lithologies and facies, because of the high percentage of mudstone deposited in the deep water and the high percentage of sandstone in shallow water. (3) The hydrocarbon migrated to the shallow and deep water areas along faults. Because of the high ratio of sandstone in the shallow water and high ratio of mudstone in the deep water area, the hydrocarbon scattered into the sandstone more easily in the shallow water area, so large oil & gas fields appear to form more easily in the deep water area.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40238060)。

作者简介: 石万忠(1973—), 男, 讲师, 现在中国地质大学(武汉)石油系任教, 主要从事层序地层学与地震反演的研究。

E-mail: Wanzhong_shi@yahoo.com.cn

Key words: basin modelling; hydrocarbon migration; pressure evolution; Pearl River Mouth basin; Baiyun depression.

珠江口盆地位于中国南海北部,华南大陆的南缘,东经 $111^{\circ}0'0'' \sim 118^{\circ}0'0''$,北纬 $18.30^{\circ}0'0'' \sim 23^{\circ}0'0''$,呈北东—南西向展布,是中国近海含油气盆地中一个重要的盆地.该盆地东西长约 800 km,南北宽 100~300 km,面积约 $17.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,新生界最大沉积厚度超过 10 km.盆地可分珠一、珠二、珠三等 3 个坳陷和北部断阶、神狐暗沙隆起、东沙隆起、南部隆起及番禺低隆起 8 个二级构造单元(图 1).目前已在盆地的北部即浅水区找到了几个大油气田,现在勘探逐渐由浅水区向深水区推进.白云凹陷位于珠江口盆地西南部陆架—陆坡过渡带及上陆坡区,海水深度 200~2 000 m,主体位于深水区,是未来几年深水油气勘探的主要区块.

深水勘探的高成本要求对油气潜力和成藏规律有清楚的认识.关于珠江口盆地和珠二坳陷油气的生烃潜力,代一丁和庞雄(1999),杜德莉等(2001),季洪泉和王新海(2004)都做过详细的讨论,认为珠江口盆地珠二坳陷的油气资源潜力巨大,但关于生成的油气如何运移,运移到什么地方,没有人做过详细的讨论,这恰恰是下一步深水油气勘探需要解决的一个重要的问题.珠江口盆地北部珠一坳陷以及

番禺低隆起的探井钻遇的地层测试为正常地层压力,但这并不意味着在盆地演化过程中,没有超压的存在.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油气的运移至关重要.

在地质历史时期,不同的地层压力场分布,决定了不同的油气运移指向和分布状态(Schegg *et al.*, 1999; Vannucchi, 2001; Ye *et al.*, 2003),了解深水区的地层压力分布对于深水钻井也非常重要.基于以上认识,笔者应用地震资料、测井资料、盆地模拟技术对珠江口盆地的地层压力演化和油气运移进行了研究,得出了可信的结论.

1 珠江口基本地质特征

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北西西向俯冲的影响(陈长民等, 2003),是一个新生代盆地.其形成发育过程中共经历了 5 次构造运动,自老到新为: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

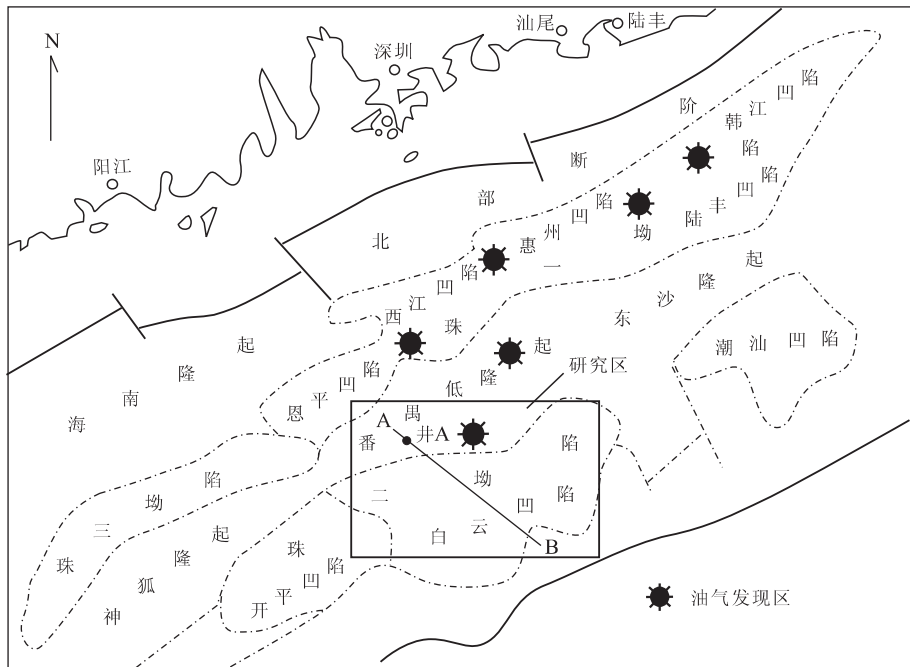


图 1 珠江口盆地构造单元(据代一丁和庞雄修改, 1999)

Fig. 1 Classification of structural units and study area in the Pearl River Mouth basin

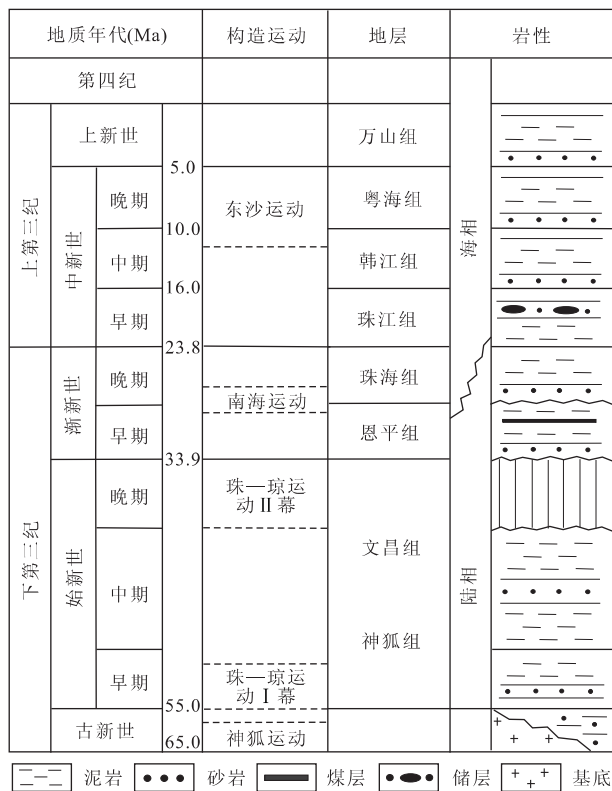


图 2 珠江口盆地地层综合柱状图(据陈长民修改,2003)

Fig. 2 Generalized stratigraphic column of the Pearl River Mouth basin

中期南海运动及中中新世末至晚中新世末东沙运动(梁杏等,2000)(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,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),而白云凹陷是珠二坳陷的一个主要凹陷。从浅水区的勘探结果来看,文昌组与恩平组这 2 套生油岩生烃潜力巨大,初步估算有大约 50 多亿吨的油气资源量(杜德莉等,2001)。

2 盆地模拟参数

珠江口盆地深水区目前没有探井,只有在番禺低隆起有部分探井,在本次模拟研究中选择井 A 作

为模拟剖面,主要是基于井 A 是番禺低隆起靠近珠二坳陷钻的最深的一口探井,钻到了恩平组地层;而且过井 A 的 A—B 剖面从北向南经过番禺低隆起、珠二坳陷的主洼白云凹陷以及南部的隆起带,该剖面清楚地反映了深水区的沉积特点。选择该剖面模拟研究既能够应用井 A 较为完整压力和温度实测数据来约束模拟结果,也能够真实地反映深水区的油气生成、压力演化与油气运移。

本文应用 IES 软件中的 PetroMod 2D/3D 模块来模拟地层压力的演化。它是基于 2 个假设应用有限元模拟方法来模拟孔压发育史:首先假设岩石和孔隙流体在压缩和变形过程中保持质量平衡;其次压实过程中,流体排出是极其缓慢的,能够以达西流法则(Darcy's law)来描述牛顿流(Newtonian fluid)。该软件是目前世界上三大盆地模拟之一。模拟中主要需要地质、岩石物理和流体力学等三大类几十种参数,但在模拟过程中一些参数必须要准确赋值,如地层年龄、沉积相分布、有机地球化学特征、断层活性等;一些参数应用缺省值,如岩石热导率、热容、初始孔隙度等。本文主要介绍几种重要参数的赋值,包括地层岩性,砂泥岩百分比,沉积相分布,断层的活动性和有机碳含量,这些参数对地层压力的演化影响至关重要。

2.1 砂泥岩百分比及沉积相

A 井钻遇了恩平组地层,选择过该井二维地震测线(A—B)作为盆地模拟的剖面(图 3)。由于地震测线(A—B)剖面有近 100 多 km 长,岩性和岩相横向上变化较大,必须要划分出沉积相,对于不同的沉积相赋予不同的参数来模拟,才可能比较客观和真实。依据钻井资料,统计了 A 井的砂泥岩百分比(表 1)。依据表 1 统计资料可以看出:A 井钻遇的恩平组、珠海组和珠江组下砂岩百分含量都大于 50%。经过分析认为,井区附近为三角洲相沉积;依据珠二坳陷陆架坡折带逐渐向陆迁移的特点分析认为从盆地发育到现在,全部沉积层序是一个大的海进层序,再综合地震相可以划出模拟剖面的沉积相图(图 3)。该沉积相图是我们进行岩性、有机碳(TOC)、氢指数(HI)赋值的重要依据。

2.2 断层活动性分析

通过油气成藏模式的分析,珠江口盆地主要的油气运移通道是断层。断层的开启与封闭控制着油气的运移与聚集,也控制着地层压力的释放与聚集。在模拟中,需要指定每条断层从形成到现在的具体开启和封闭时间,这主要依据断层在地震剖面上断

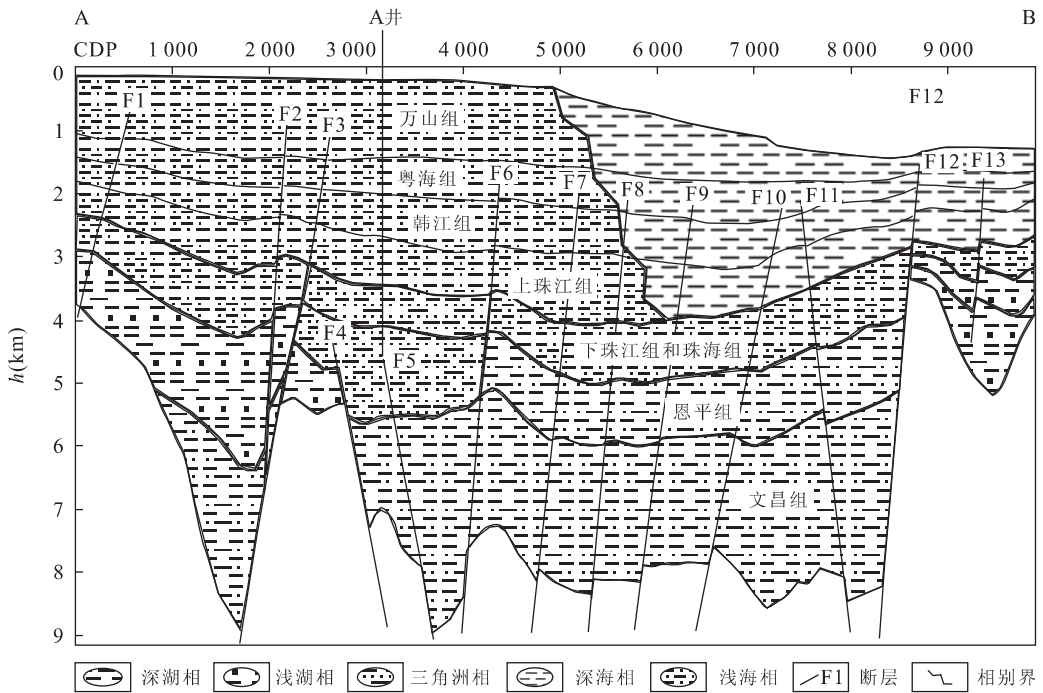


图 3 模拟剖面的岩性和沉积相剖面图

Fig. 3 Lithology and depositional facies of modeled cross-section

表 1 A 井砂岩泥岩百分含量统计表

Table 1 Percentage of sandstone and mudstone of Well A

地层	岩性	
	砂岩百分含量(%)	泥岩百分含量(%)
万山组	23.4	76.6
粤海组	30.9	69.1
韩江组	34.7	65.3
上珠江组	37.7	62.3
下珠江组和珠海组	51.2	48.8
恩平组	67.7	32.3
文昌组	未钻遇	

过的层位以及本区构造运动活动的时间来判断和估算. 陈长民等(2003)把珠江口盆地珠二坳陷断层分为 3 期: 早期断层、长期断层、晚期断层.

早期断层, 即始新世中期以前盆地张裂初期, 神狐运动和珠琼运动形成的断层, 控制着半地堑和半地堑组合而形成的凹陷, 在靠近边界断层一侧的凹陷深处, 其构造沉降幅度较大, 沉积了始新统半深湖—深湖相文昌组泥岩, 是盆地内主要的生油岩. 早期断层对于文昌组和恩平组内的油气运移, 起着重要的作用, 特别是后期构造运动使得这些断层与后期形成的断层连通, 形成了很强的运移能力. 图 3 中 F4 和 F5 断层属于典型的早期断层, 控制着凹陷的形成和烃源岩的分布.

长期断层, 无论是继承性还是间歇性的断层, 均沟通了断陷期沉积的陆相生油岩系和坳陷期沉积的海相与海陆过渡相储层, 是油气运移的主要通道. 图 3 中 F3、F6、F7、F8、F9、F10、F11、F12 都属于这种断层, 这些断层从晚白垩世—古新世神狐运动到渐新世中期南海运动一直活动, 是早期油气的主要运移通道. 在南海运动之后和东沙运动之前经历了一个平静期, 这些断层对油气的输导运移很有限, 在东沙运动时, 这些断层又开始活动, 又一次对生成的油气进行输导.

晚期断层是中中新世以后的东沙运动时期形成的张性断层. 由于晚期断裂的形成时间晚于(或同于)油气的主要运移时间, 造成了油气的散失和早期已形成油气藏的破坏. 图 3 中 F1、F2 断层是明显的晚期断层.

2.3 有机碳含量统计

在盆地模拟中, 对烃源岩的有机碳含量和干酪根类型指定非常重要, 这直接关系到生成烃类的总量和类型. 由于珠江口盆地珠二坳陷钻井资料少, 只能应用相对勘探程度较高的珠一坳陷的资料来类比和分析. 表 2 是对珠江口盆地不同凹陷, 不同沉积相的有机碳含量统计, 笔者据此指定图 3 中的恩平组和文昌组中有机碳的含量, 并进行模拟研究.

表 2 珠江口盆地不同沉积相的有机碳含量统计(据陈长民等,2003 修改)

Table 2 Percentage of TOC in different depositional facies, Pearl River Mouth basin

含油气系统	沉积相	地层	C _{org} (%)	平均 C _{org} (%)	
恩平	I		0.16~4.39	1.43/59	
西江			0.82~4.26	2.02/21	
西江东			1.64~2.78	2.21/2	
惠州西			0.18~0.6	0.37/3	
惠州北			0.46~4.87	1.93/12	
惠州东			0.44~1.84	0.86/12	
陆丰南			0.01~1.26	0.42/9	
小计			0.01~4.87	1.44/118	
恩平		II		0.05~3.64	1.19/15
西江东				0.25~4.39	2.05/5
惠州西			0.18~4.91	2.14/77	
惠州北			0.15~4.52	1.34/49	
惠州东	恩平组			0.43~4.99	1.56/7
陆丰南				0.22~0.5	0.13/8
小计				0.02~4.99	1.68/161
恩平	III			3.44~4.2	3.82/2
西江				1.01~4.35	2.31/17
惠州西				0.44~2.85	0.96/6
惠州东			0.09~5	1.15/50	
陆丰南			0.10~1.33	0.5/4	
小计			0.09~4.35	1.42/79	
恩平		IV		0.73~1.9	1.32/2
西江				1.34~1.84	1.62/4
西江江				0.63	0.63/1
惠州东				0.51~1.42	0.91/5
小计			0.51~1.84	1.19/12	
恩平	V			1.61	1.61/1
陆丰南				1.50~4.88	2.27/43
珠二拗陷		文昌组		1.40~4.88	2.5/22
小计				1.40~4.88	2.34/66
恩平	VI		1.25~1.3	1.27/3	
惠州西			0.50~2.53	1.03/62	
小计			0.50~2.53	1.04/65	
惠州西	Ⅶ		0.62~2.03	1.22/7	

I. 三角洲; II. 冲击平原; III. 湖沼; IV. 浅湖; V. 半深湖~深湖; VI. 浅湖; VII. 三角洲.

3 模拟结果

盆地模拟的正确与否只有通过模拟结果与钻井的测试结果对比来检验,两者结果一致,说明模拟结果较真实,如果模拟结果与钻井资料相差太大,模拟结果是不可信的.在盆地模拟中,对模拟结果的检验主要应用地温和镜质体反射率(Vitrinite Reflectance)来反应模拟结果与实际测量值的吻合程度(Durand *et al.*, 1986; Price and Barker, 1985). A 井有较详细的地温和镜质体反射率资料,其模拟结果与实际资料

表 3 A 井地层压力 RFT 测试数据

Table 3 RFT data of Well A in Pearl River Mouth basin

钻井	h(m)	孔压(MPa)	压力系数
B	2 626.00	25.55	0.97
B	3 353.00	32.71	0.98
B	3 418.00	33.30	0.97
B	3 523.00	34.26	0.97
B	3 589.00	34.86	0.97
B	3 650.00	36.70	1.01

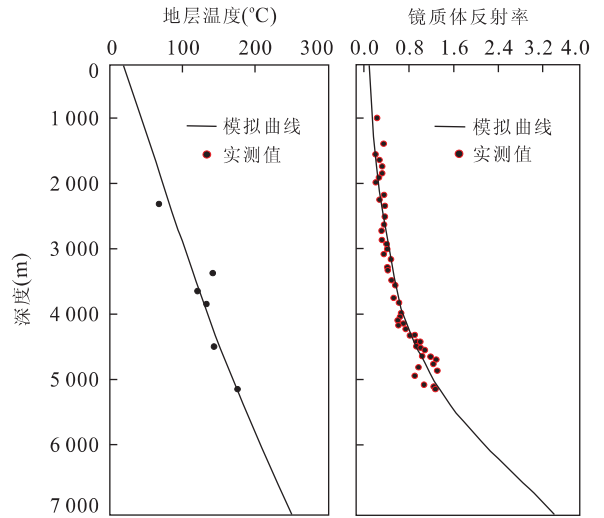


图 4 A 井地温和 VR 实测值与模拟值对比

Fig. 4 Correlation between observed geotemperature and VR modeled geotemperature in Well A

的对比如图 4.从图 4 中可以发现,模拟曲线与实际测试值比较一致,这说明模拟结果是较准确的,可以用模拟结果来解释盆地的压力演化问题.

对剖面 A—B(图 3)的模拟结果(图 5),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,珠二拗陷有稳定的沉降,在其下部大约有 1.1 MPa 超压的聚集.在珠琼运动 II 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,珠二拗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,最大达到 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

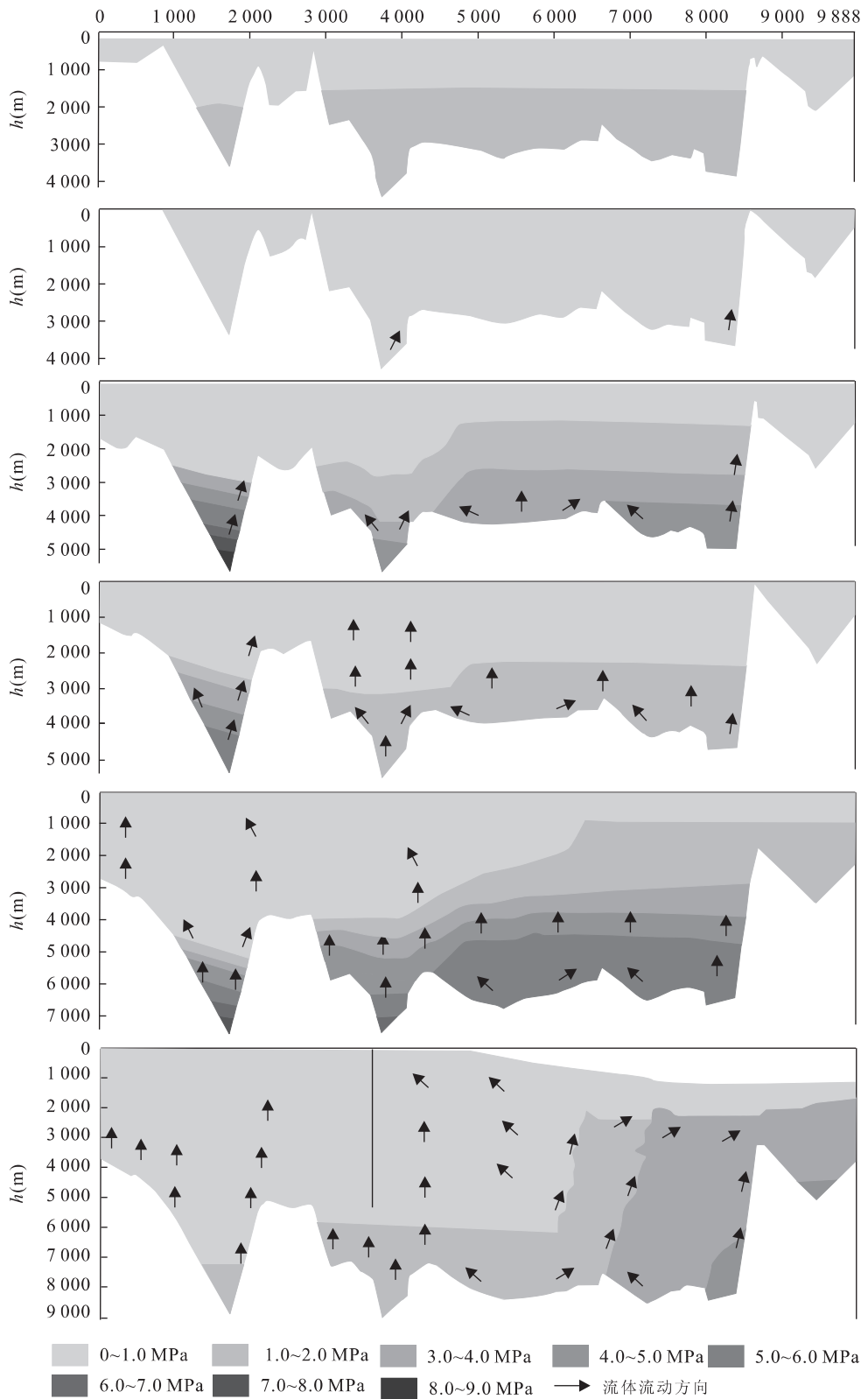


图 5 A—B 剖面地层超压模拟

Fig. 5 Modeled pressure section of A—B

a. 47 Ma 时的地层压力剖面 (珠琼运动二幕前); b. 39.4 Ma 时的地层压力剖面 (珠琼运动二幕后); c. 32 Ma 时的地层压力剖面 (南海运动前); d. 30 Ma 时的地层压力剖面 (南海运动后); e. 13.8 Ma 时的地层压力剖面 (东沙运动前); f. 现今的地层压力剖面 (东沙运动后)

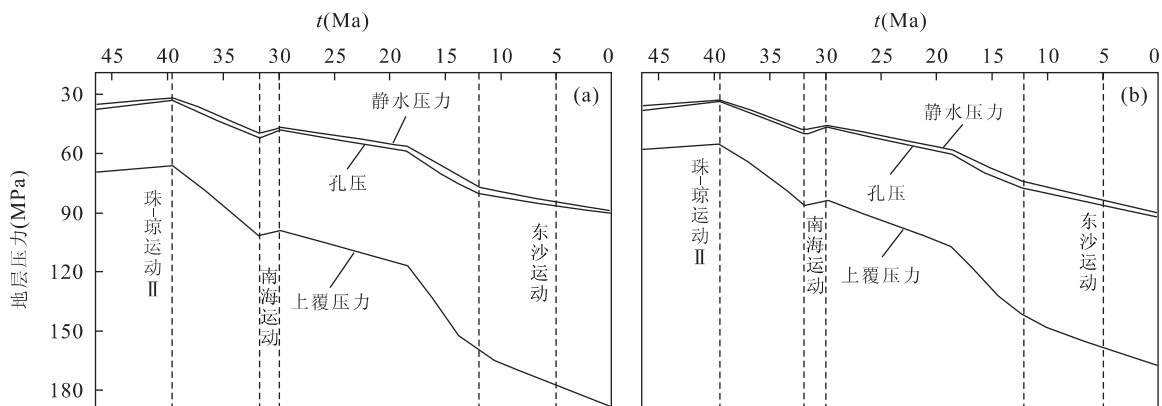


图6 地层压力演化

Fig. 6 Evolution of pressure. (a) is in offshore; (b) is in slope of seabed

a. 陆架区文昌组地层压力演化; b. 陆坡区文昌组地层压力演化

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,只有在深水区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。A 井现今地层压力测试如表 3 所示,测试结果与模拟结果非常吻合,这也表明模拟结果比较准确。

从图 5 的地层压力演化中可以看出,珠二坳陷地层压力呈现幕式活动特点 (Wang and Xie, 1998)。有 3 次幕式压力聚集与释放,2 次大的排烃活动。幕式压力聚集与释放与区域内的构造活动,即晚始新世珠琼运动二幕、渐新世中期南海运动、中中新世末至晚中新世末东沙运动有关。正是这 3 次构造运动抬升,使得断层处于开启状态,集聚的压力得以释放。在压力释放过程中,油气也随之向上运移。有 2 次大规模的油气运移:第一次发生在渐新世中期南海运动期间;第二次发生在中中新世末至晚中新世末东沙运动期间。油气向上运移的主要通道是断层,一个指向是浅水区,即现在的勘探区块,另一个运移指向陆架坡折带以下的深水区。

4 模拟结果讨论

4.1 构造运动与地层压力释放

依据模拟结果,从珠二坳陷的形成到现在,地层压力经过了 3 次幕式释放,其中最大的一次释放是在中中新世末至晚中新世末东沙运动,最主要的烃类的运移也主要发生在这个时候。压力的释放和油气运移与构造运动密切相关。图 6 中 39.4 Ma 和 30 Ma 分别是珠琼运动二幕和南海运动的活动终止点,在构造抬升过程中,孔压由超压变为常压,之后

压力逐渐增大。由于东沙运动在本区表现不强烈,没有大的抬升和剥蚀,但仍有断层产生和活动。在浅水区,压力逐渐被释放为常压,而在陆坡深水区,由于岩性主要以泥岩为主,超压释放不畅,集聚的超压有所下降,仍表现为弱超压。

从现今超压模拟剖面可以看出,在陆架区域的整个地层中,除文昌组底部有部分弱超压外,其他地层都为常压;而陆坡以下的深水区,可以看出有广泛的弱超压分布。其中一个重要的原因是岩相上的差异。依据 A 井的岩性统计(表 1)可以看出,在陆架区,目的层段珠江组上段、韩江组和粤海组的砂岩含量都大于 30%,这样高的砂泥比地层和活动的断层很容易使得运移来的油气得以散失和运移到其他地方,超压难以在这里集聚。在陆坡以下区域,除了部分粗碎屑扇体可以在这里沉积外,几乎沉积的都是泥岩,运移来的油气一方面没有足够的存储空间,另一方面由于断层两盘为泥岩,其输导能力相对下降,致使超压得以集聚,形成超压分布。

4.2 油气运移及油气富集差异

从图 5 模拟结果可以看出,油气运移的指向大致有 2 个方向;一个运移指向陆架浅水区,另一个指向陆架以下的深水区。番禺低隆起的油气显示已证实珠二坳陷的油气已经运移到了这里。最有意义的油气运移发生在东沙运动时期,因为在晚始新世珠琼运动二幕发生在恩平组沉积晚期,虽有部分油气运移,但由于烃源岩埋深浅,缺少储集层,难以形成大油气田,即使形成大油气田也会在随后的东沙运动中得以破坏。中中新世末至晚中新世末东沙运动期间是油气运移和成藏最好时期,因为在这个时候,

储层物性较好的珠江组上段、韩江组以及粤海组都已沉积,运移来的油气可以集聚成藏。

陆架区的番禺低隆起钻了很多钻井,在珠江组上段、韩江组和粤海组都有很好的油气显示,但并未形成大油气田,这充分说明了油气运移来并不意味着可以形成大油气田。虽然陆架区域地层砂泥比较高,有足够的存储空间,但由于构造活动频繁,断层多处于开启状态,砂体连通性较高,聚集的油气很容易发生再次运移,在砂体里发生分散,使得富集程度下降。在陆坡以下的深水区,除了部分粗碎屑扇体外,绝大多数为泥岩沉积,这样运移到扇体里的油气不容易再运移,使得油气富集程度提高,有利于形成大油气田。

5 结论

(1)珠二坳陷经历了 3 次幕式地层压力的聚集与释放。这 3 次压力的释放与晚始新世珠琼运动二幕、渐新世中期南海运动、中中新世末至晚中新世末东沙运动有关。其中东沙运动期间是本区油气运移的主要期次,现在陆架上的常压是由于东沙运动时超压释放后的结果。(2)应用较详细的 A 井实测地层温度、镜质体反射率(vitrinite reflectance)和压力测试结果对模拟结果进行检验,认为地层压力的模拟结果是较准确的,可以应用模拟结果来解释地层压力和油气运移。依据模拟结果,现今地层压力在陆架浅水区为常压,在陆架以下深水区有弱超压存在,引起地层压力分布的差异主要是由于陆架浅水区和陆架以下深水区沉积的岩相和岩性的不同。(3)油气运移有 2 个指向,一个运移指向陆架浅水区,另一个指向陆架以下的深水区。由于陆架浅水区和陆架以下深水区岩性和岩相的差异,陆架浅水区砂岩百分含量高,砂体连通性好,油气聚集比较分散。陆架以下深水区,油气在扇体里富集程度较高,有利于形成大油气田。

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. Science Press, Beijing (in Chinese).

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).

Du, D. L., Wang, S. M., Chen, H., et al., 2001. Study on the

oil & gas resources in the eastern basins on the north margin of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(3): 67—74 (in Chinese with English abstract).

Durand, B., Alpern, B., Pittion, J. L., et al., 1986. Reflectance of vitrinite as a control of thermal history in sediments. In: Burrus, J., ed., *Thermal modeling in sedimentary basins*. Editions Technip, Paris.

Ji, H. Q., Wang, X. H., 2004. Potential of oil & gas exploration in Wenchang: A sag of Pearl River Mouth basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 15(3): 238—242 (in Chinese with English abstract).

Liang, X., Wang, X. S., Zhang, R. Q., et al., 2000. Tertiary sedimentary environments and palaeo ground water flow patterns in eastern Pearl River Mouth basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(5): 542—546 (in Chinese with English abstract).

Price, L. C., Barker, C. E., 1985. Suppression of vitrinite reflectance in amorphous rich kerogen—A major unrecognized problem. *Journal of Petroleum Geology*, 8(1): 59—84.

Schegg, R., Cornford, C., Leu, W., 1999. Migration and accumulation of hydrocarbons in the Swiss molasse basin: Implications of a 2D basin modeling study. *Marine and Petroleum Geology*, 16(6): 511—531.

Vannucchi, P., 2001. Monitoring paleo-fluid pressure through vein microstructures. *Journal of Geodynamics*, 32(4—5): 567—581.

Wang, C. Y., Xie, X. N., 1998. Hydrofracturing and episodic fluid flow in shale-rich basins—A numerical study. *AAPG Bulletin*, 82(10): 1857—1869.

Ye, J. R., Hao, F., Chen, J. Y., 2003. Development of overpressure in the Tertiary Damintun depression, Liaohe basin, northern China. *Acta Geologica Sinica English Edition*, 77(3): 402—412.

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.

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.

杜德莉, 王树民, 陈弘, 等, 2001. 南海北缘东部盆地油气资源研究. 海洋地质与第四纪地质, 21(3): 67—74.

季洪泉, 王新海, 2004. 珠江口盆地西部文昌 A 凹陷油气勘探潜力分析与预测. 天然气地质学, 15(3): 238—242.

梁杏, 王旭升, 张人权, 等, 2000. 珠江口盆地东部第三纪沉积环境与古地下水流模式. 地球科学——中国地质大学学报, 25(5): 542—546.