

文章编号: 1000-0550(2012)03-0461-08

南海北部白云凹陷早中新世东部沉积体系研究^①

王永凤^{1,2} 王英民^{1,2} 徐强³ 黄振凯⁴ 李冬^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

3. 中国海洋石油总公司研究总院 北京 100027; 4. 中国石油勘探开发研究 北京 100083)

摘要 基于白云凹陷东部钻井、岩芯和地震资料,通过地震属性分析、地震相分析及钻井岩芯分析,证实了白云凹陷在 23.8~21 Ma 之间除存在北部物源外还存在来自东沙隆起的东部物源体系,从而扩大了白云凹陷深水碎屑岩沉积研究领域。通过层序地层学研究和沉积相分析,建立了东部沉积体系沉积及演化模式:该体系在低位域形成海底扇沉积;水进域形成碳酸盐岩和硅质碎屑岩混合沉积;高位体系域主要发育高位三角洲沉积,其主要受相对海平面变化及物源供给控制。

关键词 白云凹陷 东沙隆起 物源 沉积模式

第一作者简介 王永凤 女 1983 年出生 博士研究生 沉积学、层序地层学、地震沉积学 E-mail: wangyongf4@163.com

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

近年来,珠江口盆地白云凹陷深水油气勘探取得了重要进展,发现的大量深水扇复合体已成为油气勘探的重要目标。层序地层学研究揭示白云凹陷 21~10.5 Ma 共发育 6 期深水扇体,垂向上相互叠置,形成了深水扇复合体^[1~2],其沉积物主要来自富砂的珠江水系陆架区前期高位体系域的珠江三角洲^[3]。本文从地震属性分析入手,结合地震与钻井资料,对白云凹陷早中新世的沉积体系进行了精细的研究。经研究发现在白云凹陷东部发育来自东沙隆起的沉积

体,并对其沉积特征及其演化模式进行了研究,为白云凹陷的进一步研究和勘探奠定了基础。

1 区域地质背景

珠江口盆地位于南中国海北部、海南岛和台湾岛之间海域,面积约为 17 5000 km²。白云凹陷位于南中国海北部大陆边缘的陆坡深水区,隶属珠江口盆地珠二坳陷。凹陷北靠中央隆起带番禺低隆,南临南部隆起带,西南为开平凹陷,东侧为东沙隆起(图 1),凹

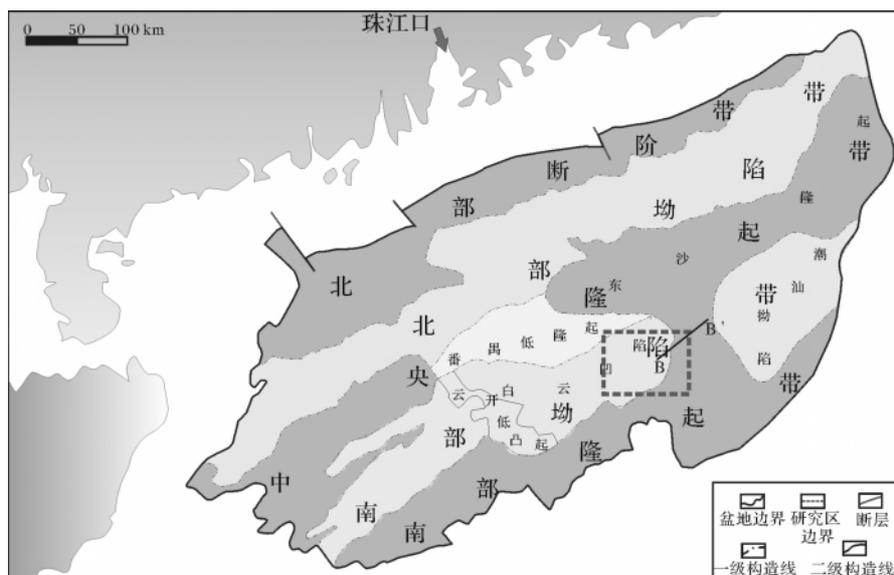


图 1 珠江口盆地构造区划图

Fig. 1 Tectonic unit compartmentalization of Pearl River Mouth basin

^①国家重点基础研究发展计划项目(973 计划):(编号:2009CB219407)、国家自然科学基金项目(批准号:40572067)资助。
收稿日期:2011-05-06; 收修改稿日期:2011-08-02

陷区水深 200 ~ 2 000 m, 为一个处于陆棚边缘斜坡带的沉积凹陷。研究区位于白云凹陷东侧, 东临东沙隆起, 共发育 8 套地层, 由上到下依次为第四系、万山组、粤海组、韩江组、珠江组、珠海组、恩平组和文昌组^[4-6]。其中珠海组发育了大型的浅海陆架沉积, 珠江组和韩江组主要发育陆坡深水沉积。

研究目的层底界为 SB23.8, 界面年龄为 23.8 Ma, ODP1148 孔显示 SB23.8 界面无论是沉积速率, 还是各种岩石地球化学数据、孢粉含量曲线、有机质含量等都表现出明显的突变^[7], 这些沉积特征表明南海北部在 23.8 Ma 经历了大的沉积环境及物源成分的改变。庞雄等认为 SB23.8 是南海北部陆架坡折从白云主凹陷侧向北侧跳跃的分界面, 23.8 Ma 之前白云凹陷为陆架沉积环境, 之后发生强烈沉降成为陆坡深水环境^[8]。而从珠江口盆地相对海平面变化曲线可知早中新世到中中新世(大约 23.8 Ma 到 10.5 Ma) 珠江口盆地经历了 7 次明显的海平面升降旋回, SB23.8 形成于相对海平面下降时期, 且海平面下降到陆架坡折带以下, 层序界面之下广泛出现削蚀^[9]。由此可知 23.8 Ma 发生了强烈海退事件导致白云凹陷北缘的番禺低隆起和东缘的东沙隆起都演变为暴露区, 前人的大量研究工作已经证实番禺低隆起为白云深水区提供物源^[3]。那么, 同样为剥蚀区的东沙隆起能否为白云凹陷提供物源, 本文以此为切入点, 对东沙隆起西部的沉积体系进行了研究。通过对近年来采集的三维地震和长电缆地震剖面的地震地层学解释, 在东沙隆起西南斜坡于层序 SQ23.8 中识别出了来自东沙隆起方向的朵体沉积, 沿西南方向伸入白云凹陷; 在纵向地震剖面中具有向西南方向的前积反射, 而在横向地震剖面中具有明显的丘状外形。这些均表明白云凹陷东部 SQ23.8 沉积时期, 可

能发育三角洲—海底扇沉积体系。

2 物源分析

在过东沙隆起的北东向地震剖面(图 2b)上, 界面 SB23.8 与下伏地层呈现明显的削蚀接触关系, 剥蚀范围如图 2(a) 所示, 面积约为 20 000 km², 紧靠白云凹陷东部, 从如此大的剥蚀面积来看东沙隆起在早中新世应该为本区提供物源。而通过高分辨率三维区 SB23.8 与 SB21 层位精细解释, 在 SB23.8 沿层提取的均方根振幅属性图(图 3a) 上显示出白云凹陷北东部存在明显呈北东向展布的强振幅异常带, 推测白云凹陷可能存在北东方向的物源。进一步利用深水区与浅水区钻井资料绘制了 SQ23.8 含砂率图(图 3b) 在含砂率图中也显示了在番禺低隆起及东沙隆起存在两个含砂率较高的区域, 并且含砂率值分别向东南方向和西南方向降低, 指示了 SQ23.8 沉积时期沉积物可能来自上述两个方向, 分别对应番禺低隆起与东沙隆起。此外, 在白云凹陷东部 NE 向的地震剖面上, SB23.8 界面与 SB21 界面之间发育明显的前积地震反射构型(图 4a), 呈现自北东向南西方向的前积, 说明东沙隆起在早中新世可为研究区提供物源。综合以上分析可知, 白云凹陷在早中新世不仅存在北部物源, 还存在东部物源。

3 东部沉积体系的识别

3.1 地震反射特征

在井控程度较低的地区, 以地震响应信息为线索, 依据地震反射结构特征可以初步预测各地质体的分布。通过地震反射特征的研究, 在白云凹陷东部 NE 向的地震剖面中 SB23.8 与 SB21 界面之间可见明显的由 N 向 S 的斜交型前积反射, 底积层发育, 平

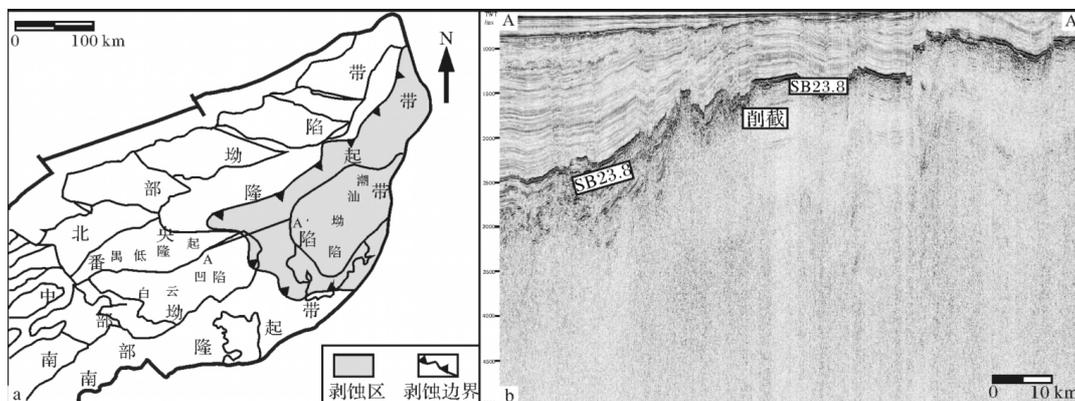


图 2 东沙隆起剥蚀特征

Fig. 2 Erosion characteristics of Dongsha Uplift

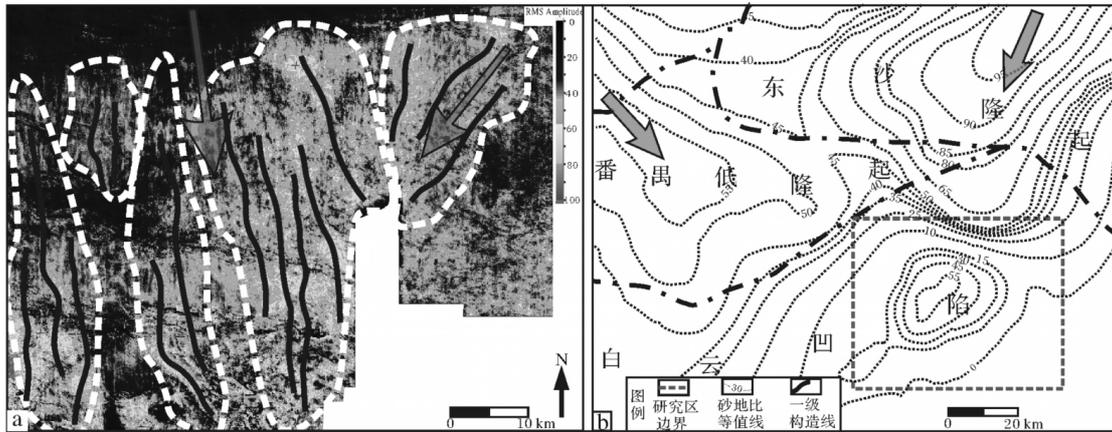


图 3 a. 研究区 SB23.8 沿层 RMS 属性 b. SQ23.8 含砂率图

Fig. 3 a. the RMS attribute of the SB23.8 b. sandstone/strata contour of SQ23.8

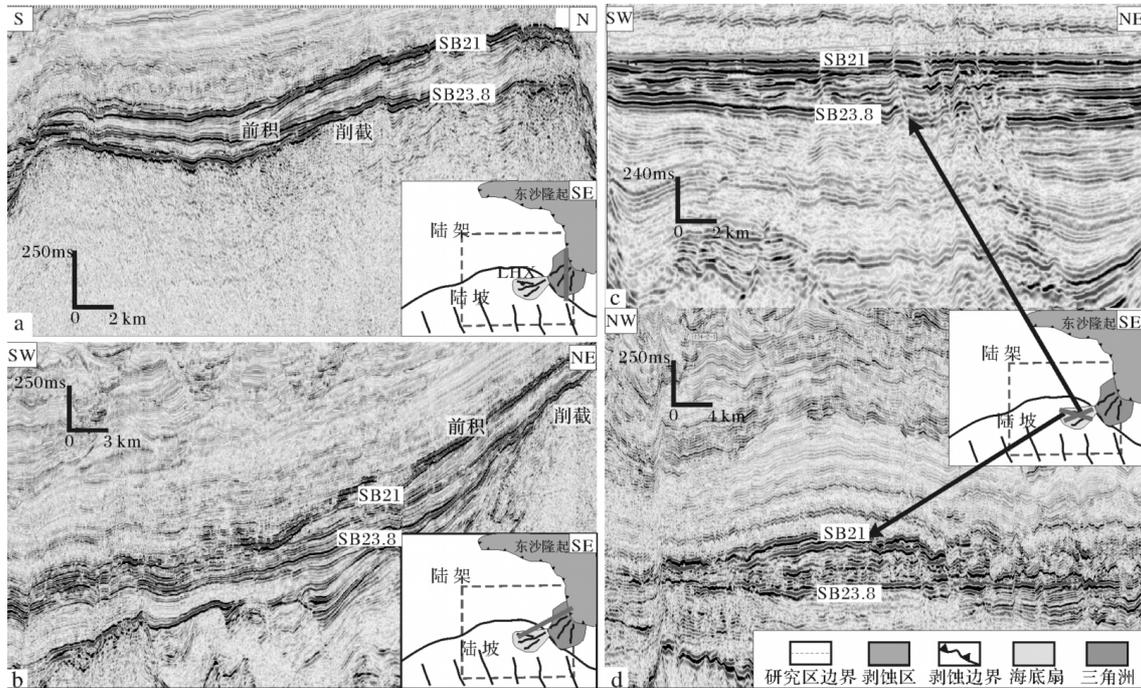


图 4 各沉积体地震反射特征

Fig. 4 Seismic reflection characteristics of each sedimentary deposit

面上呈由 NE 向 SW 的扇形展布, 面积约为 600 km² (图 4a, b)。而在前积反射的北东方向的东沙隆起上可见明显的削截现象, 为物源剥蚀区。结合 SQ23.8 沉积时期陆架坡折带的发育位置, 断定上述沉积体为来自东沙隆起的三角洲沉积。

在三角洲西南方向的陆架坡折带下方, 还发育一个较小的扇体沉积, 由 E 向 W 延伸, 地震反射特征以连续性较差, 振幅能量变化快为特征, 纵剖面上可见明显的前积反射构型(图 4c), 横剖面呈丘形反射、双

向下超充填(图 4d), 具典型的海底扇地震反射构型, 结合其发育部位为当时的深水环境, 故认为海底扇沉积。

3.2 钻井岩芯特征

在钻井方面, 目前在白云凹陷钻井中仅 LHX 钻遇了上述海底扇沉积。通过岩芯观察描述发现, LHX 井层序 SQ23.8 内砂岩主要为浅灰色石英质砂岩, 细粒到中粒, 次圆一次棱角状, 分选较好, 钙质胶结较发育, 碳酸盐含量较高(图 5)。岩芯多处发育钙质胶结

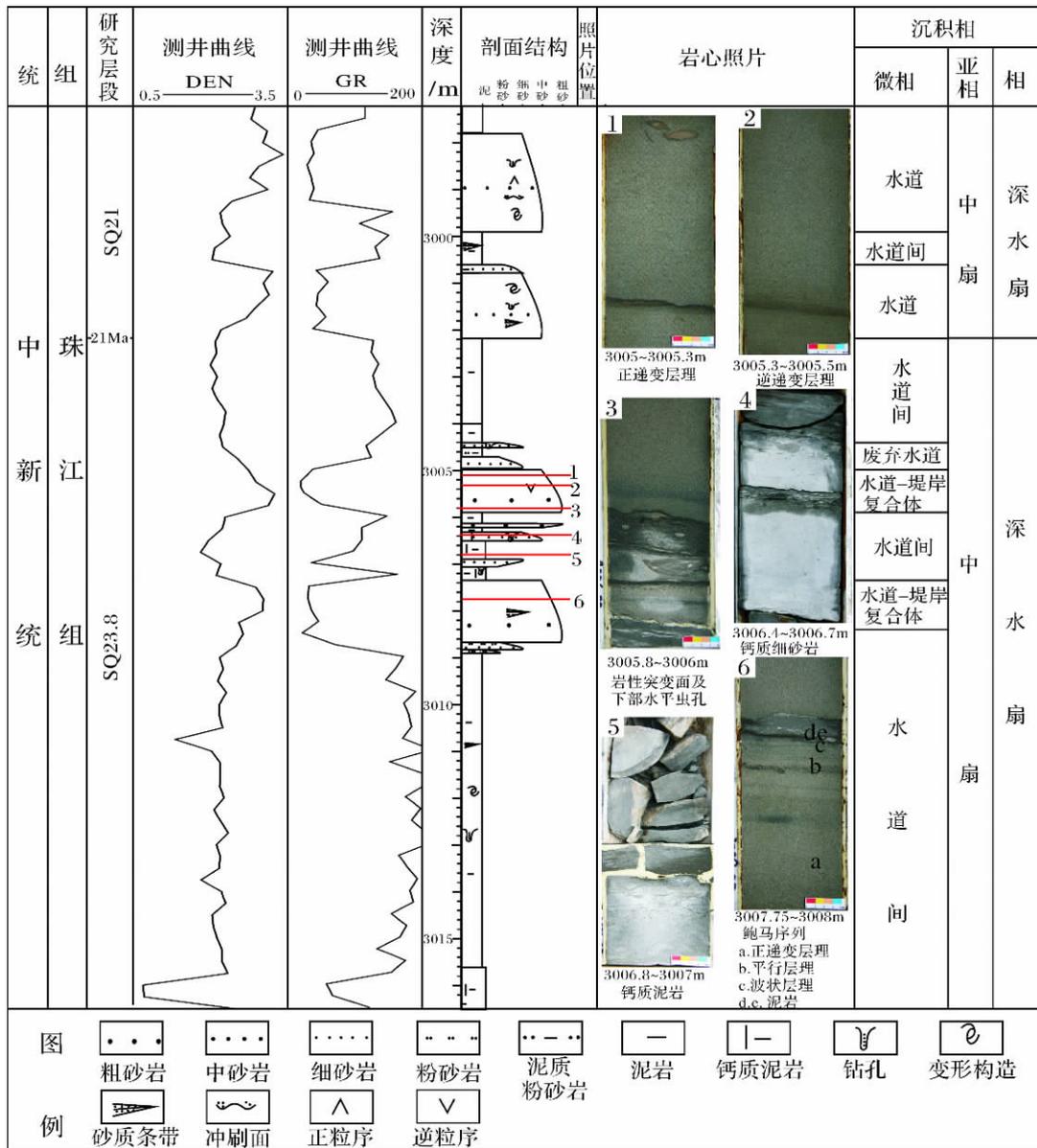


图5 LHX井SQ23.8沉积物岩电特征

Fig.5 Rock-log characteristics of the SQ23.8 deposit from LHX well

碎屑岩,如图5中岩芯照片4、5所示,分别为钙质细砂岩和钙质泥岩沉积。

前人研究认为由于早中新世的海侵,珠江组早期(SQ23.8)的东沙隆起发育了一套碳酸盐岩台地沉积,发育众多生物礁,而北部的番禺低隆起主要为硅质碎屑岩沉积。LHX井(位置见图4a)紧靠东沙隆起,而SQ23.8沉积时期LHX井处于深水环境不发育碳酸盐岩。综合上述分析可知LHX井SQ23.8较高碳酸盐含量主要是由于东沙隆起碳酸盐岩台地所致,从而再次证明了东部物源的存在。此外,岩芯中发育多种类型的沉积构造,发育典型的重力流沉积构造(图

5)如递变层理、漂砾、滑塌变形和鲍马序列等,还发育有少量反映牵引水流机制的交错层理、斜波状层理等。前人研究认为真正的浊流只存在悬浮沉积,仅能应用“正递变层理”这个标志来鉴定浊积岩^[10,11],而在LHX井岩芯中正递变层理较发育,主要为中细砂岩沉积,可作为沉积物重力流的鉴别相标志,且泥岩中虫孔多为水平虫孔(图5),指示了泥岩沉积环境为较深水的静水环境,由上述分析可知,LHX井岩芯中重力流沉积构造发育,指示了其沉积物为半深海环境下的重力流沉积,综合分析断定为海底扇沉积。

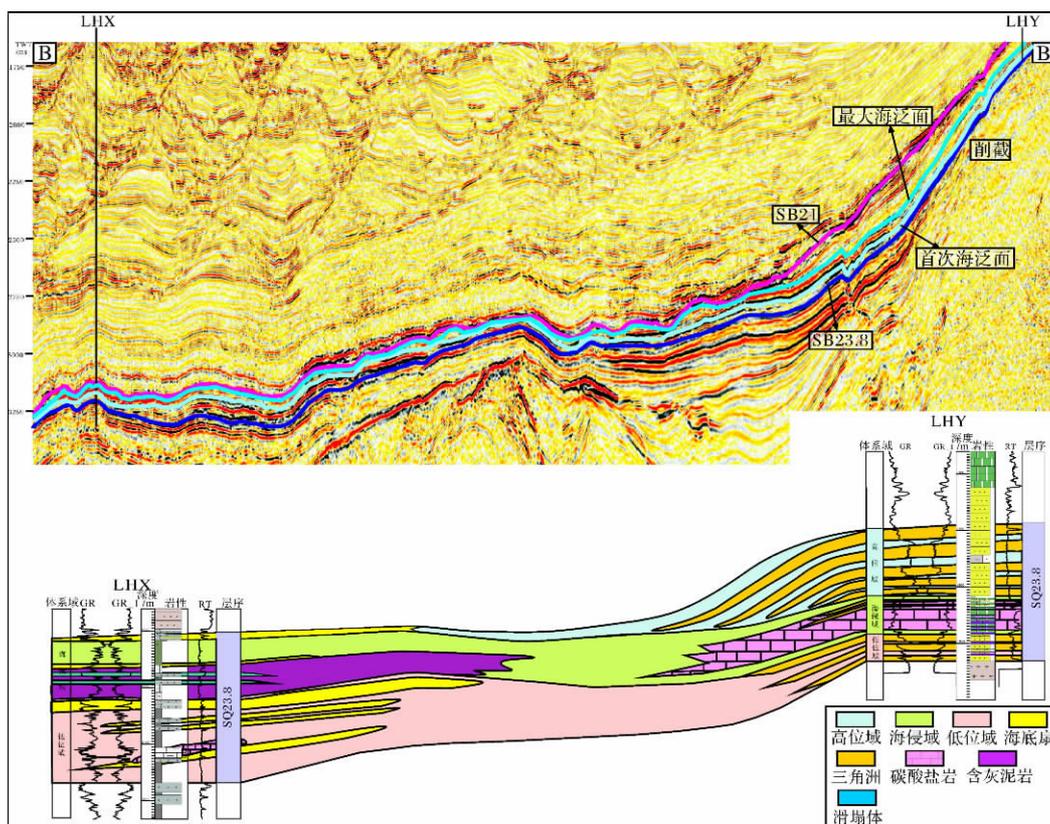


图 6 SQ23.8 体系域对比与剖面演化特征(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Systems tract correlation and evolution characteristics on cross section of SQ23.8(see Fig.1 for location)

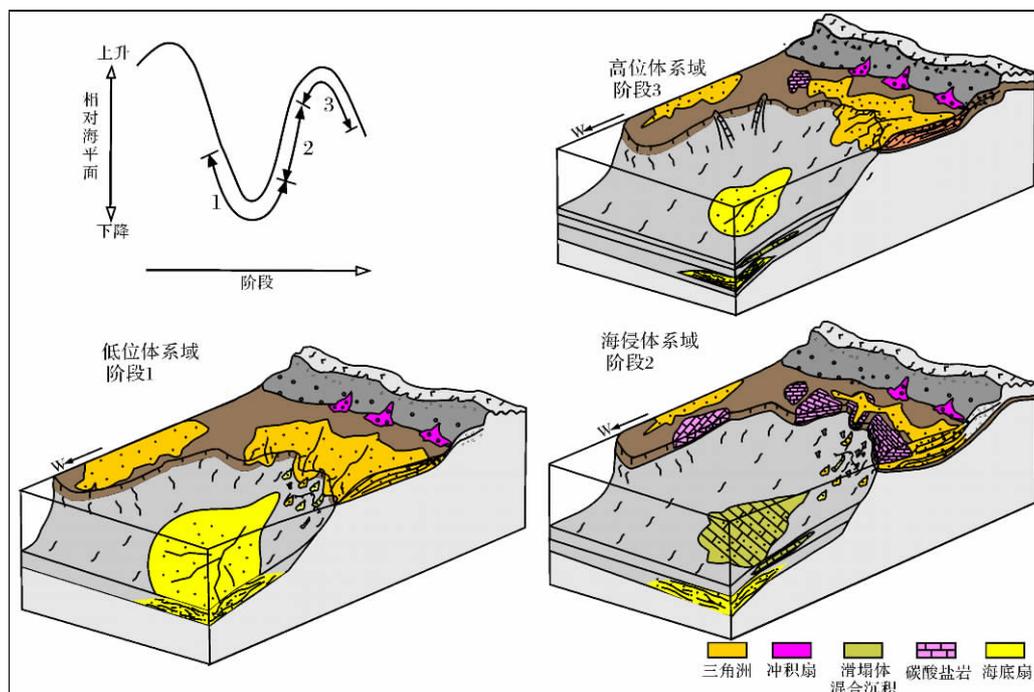


图 7 东部沉积体系沉积模式

Fig. 7 Sedimentary model of the eastern depositional system

3.3 剖面沉积特征

为建立东部沉积体系从东沙隆起到白云凹陷的沉积响应关系,分别取两个构造上的井及过井地震剖面(位置见图1)进行井震结合层序划分及沉积相分析。通过地震反射终止关系分析及井震结合对比,在SQ23.8层序内部识别出了首次海泛面和最大海泛面,将SQ23.8层序划分为3个体系域(图6)。低位体系域:陆架与陆坡区均发育,陆架上LHY井为砂岩夹薄层灰岩沉积,多个反韵律叠置,为三角洲前缘沉积;陆坡区LHX井为大套泥岩中夹三套海底扇朵体沉积,朵体岩性为泥灰岩、砂岩,地震反射剖面可见明显的前积反射构型。海侵体系域:地震反射特征上表现为明显的向东沙隆起方向的上超,陆架上LHY井碳酸盐岩较发育,砂岩厚度较小,以白云岩为主,曲线呈钟形;坡折带下方LHX井主要发育碳酸盐岩和硅质碎屑岩混合沉积,岩性相对较细,自然伽马曲线整体呈正旋回,表现为退积准层序组特征。高位体系域:LHY井为前面所发现的大型三角洲沉积,地震反射剖面表现为明显的由NE向SW方向前积,下超于最大海泛面之上,岩性为厚层砂岩,低自然伽马,以反韵律为主;坡折带下方LHX井发育海底扇沉积,为上述取芯部位,主要为中细粒砂岩沉积,扇体规模较小。

4 沉积模式及成因探讨

通过以上地震相、岩芯相及连井相的分析,结合研究区高分辨率三维地震资料及钻井资料所揭示的海底扇、混合沉积及陆架三角洲的沉积特征,总结出了研究区沉积体系特征,建立了白云凹陷东部台缘斜坡沉积体系沉积演化模式(图7)。

低位体系域:23.8 Ma相对海平面下降,东沙隆起露出水面,遭受大面积剥蚀,沉积物供给增大,使得三角洲迅速向西南方向推进,由于东沙陆坡较陡,东沙隆起坡折带沉积物处于不稳定状态,发生滑塌,较陡的斜坡不发育可供沉积物停留的可容纳空间,沉积物在斜坡区主要发生侵蚀和过路作用,沉积厚度较薄,在前方深水区即LHX部位堆积下来形成低位海底扇沉积。

海侵体系域:随着海平面的快速上升,三角洲向岸方向退缩,东沙隆起逐渐被海水淹没,处于浅水环境,有利于造礁生物的生长,碳酸盐岩比较发育。当海平面保持稳定时,礁就会沿自身的碎石斜坡向海推进^[12]。随着海平面的次级摆动,三角洲为台缘斜坡及周围海盆盆地幕式地提供硅质碎屑,从而在海侵体系

域陆坡深水区形成了硅质碎屑岩和碳酸盐岩的混合沉积^[13~15]。

高位体系域:早期相对海平面较高,伴随着海平面开始下降以及东沙隆起物源供给强度增加,三角洲开始向白云凹陷推进,并侵蚀早期形成的生物礁,为白云深水区提供碳酸盐岩碎屑,形成钙质胶结沉积物;高位晚期海平面下降,东沙隆起剥蚀面积增大,沉积物供给强度增加,三角洲快速向西南推进,在东沙隆起边缘斜坡发育大型前积体,即高位三角洲沉积,并在前方深水区发育小型的海底扇沉积。

5 结论

通过对物源、地震相分析以及相关岩芯的研究,可以得到如下结论

(1) 在白云凹陷东部层序SQ23.8中存在来自东沙隆起的东部物源沉积体系,该体系的主体为三角洲和海底扇沉积。

(2) 东部沉积体系在SQ23.8中的沉积模式为:23.8 Ma珠江口盆地发生大规模海退事件,导致东沙隆起暴露遭受剥蚀,为白云深水区提供物源,形成海底扇沉积,并在陆架区形成三角洲沉积;海侵期,东沙隆起发育碳酸盐岩台地,在深水区形成混合沉积;高位时期海平面开始下降,在陆架区形成三角洲进积沉积,而在深水区发育规模较小的海底扇沉积。

(3) 该体系的形成与演化受控于海平面变化以及物源供给等因素。

参考文献(References)

- 1 庞雄,陈长民,施和生,等. 相对海平面变化与南海珠江深水扇的响应[J]. 地学前缘,2005,12(3): 167-177 [Pang Xiong, Chen Changmin, Shi Hesheng, et al. Response between relative sea-level change and the Pearl River deep-water fan system in the South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 167-177]
- 2 彭大钧,庞雄,陈长民,等. 从浅水陆架走向深水陆坡-南海深水扇系统的研究[J]. 沉积学报,2005,23(1): 1-11 [Peng Dajun, Pang Xiong, Chen Changmin, et al. From shallow-water shelf to deep-water slope: the research of deepwater fan systems in South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1): 1-11]
- 3 郑晓东,朱明,何敏,等. 珠江口盆地白云凹陷荔湾深水扇砂体分布预测[J]. 石油勘探与开发,2007,34(5): 529-533 [Zheng Xiaodong, Zhu Ming, He Min, et al. Prediction of Liwan deep submarine fan sandbody distribution, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 529-533]
- 4 陈长民,施和生,许仕策,等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社,2003: 1-121 [Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice, et al. The Conditions of Hydrocarbon Accu-

- mulation of the Tertiary Petroleum System in the Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-121]
- 5 代一丁, 庞雄. 珠江口盆地珠二凹陷的石油地质特征[J]. 中国海上油气: 地质, 1999, 13(3): 169-180 [Dai Yiding, Pang Xiong. Petroleum geological characteristics of Zhu II Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 1999, 13(3): 169-180]
 - 6 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 19(1): 1-9 [Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 19(1): 1-9]
 - 7 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP1148 站深海沉积物中的证据[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 539-544 [Shao Lei, Li Xianhua, Wang Pinxian, et al. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the Oligocene: evidence from deep sea sediments of ODP site 1148 [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(4): 539-544]
 - 8 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统-中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 145-152 [Pang Xiong, Chen Changmin, Shao Lei, et al. Baiyun movement: a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications [J]. Geological Review, 2007, 53(2): 145-152]
 - 9 彭大钧, 陈长民, 庞雄, 等. 南海珠江口盆地深水扇系统的发现[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 17-23 [Peng Dajun, Chen Changmin, Pang Xiong, et al. Discovery of deep-water fan system in South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 17-23]
 - 10 张兴阳, 罗顺社, 何幼斌. 沉积物重力流深水牵引流沉积组合鲍玛序列多解性探讨[J]. 江汉石油学院学报, 2001, 23(1): 1-5 [Zhang Xingyang, Luo Shunshu, He Youbin. Deposit assemblage of gravity flow and traction current in deep water: a study of the multiple interpretation of the Bouma sequence [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2001, 23(1): 1-5]
 - 11 Middleton G V, Hampton M A. Turbidites and Deep-Water Sedimentation [M]. United States: Pacific Section SEPM Publication, 1973
 - 12 刘宝瑞. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1980: 497 [Liu Baojun. Sedimentology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 497]
 - 13 Mount J F. Mixing of siliciclast and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. Geology, 1984, 12(2): 432-435
 - 14 Mount J F. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification [J]. Sedimentology, 1985, 32(3): 435-442
 - 15 Armstrong A K. Carboniferous carbonate depositional models, preliminary lithofacies and paleotectonics maps, Arctic Alaska [J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(4): 621-645

Research on the Eastern Depositional System in Early Miocene , Baiyun Sag , Northern South China Sea

WANG Yong-feng^{1 2} WANG Ying-min^{1 2} XU Qiang³
HUANG Zhen-kai⁴ LI Dong^{1 2}

(1. School of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249;

3. The Research Institute of CNOOC, Beijing 100027;

4. Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083)

Abstract: Based on a large amount of drill, core and seismic data from the eastern Baiyun Sag, by the analysis of seismic attributes, seismic facies as well as drilling sedimentary facies, it is proved that in Baiyun Sag there is not only the north provenance but also the eastern depositional system which is derived from the Dongsha Uplift in early Miocene, and this discovery will lead to the expansion of the exploration scope for the deepwater clastic deposits of Baiyun Sag.

The Eastern Depositional System is mainly developed in SQ23.8, with the bottom boundary SB23.8. Previous studies reported that the "Baiyun Movement" occurred in 23.8 Ma B. P. results in tremendous changes of Baiyun sag, causing the thermal subsidence of the sag, making the shelf neritic environment transform into slope deepwater environment, and SB23.8 is the interface of the shelf break belt migrating from the south of Baiyun sag to north. In 23.8 Ma B. P. the relative sea level fell to the lowest, which made the Panyu Low Uplift in the north and the Dongsha Uplift in the east be in a state of exposure. The formers' study has confirmed that the Panyu Low Uplift provides debris for the deep water of Baiyun sag, and then, whether the Dongsha Uplift which was also exposed in SQ23.8 can serve

as the provenance for Baiyun sag is the breakthrough point of this paper.

The erosion area of Dongsha uplift during early Miocene is about 20 000 km², which is close to Baiyun sag, and considering such a great erosion area the uplift should provide materials for Baiyun sag. Besides, on the image of 3D seismic RMS amplitude slices present an abnormally high amplitude in the east of Baiyun sag, and the graph of sandstone/strata contour of SQ23.8 also presents high values in the east. In addition, on seismic, a wedge-shaped progradational reflection configuration with the direction from Dongsha Uplift to Baiyun sag in SQ23.8 is developed. Therefore, according to the above analysis, it is concluded that the Dongsha Uplift is one of the provenances of Baiyun sag during the period of SQ23.8 deposition.

On seismic, the deposits characterized by wedge-shaped progradational reflection configuration are interpreted as the deposits of deltas for their developed location, and the deposits in front characterized by high-amplitude, good continuity, progradational reflection on the trend seismic profile, a hummocky bidirectional progradation configuration on the cross profile, are interpreted as the submarine fan. Through observation of the core it is found that the carbonate content is fairly high in the core of SQ23.8, indicating that the sediments come from Dongsha Uplift, because during the period of SQ23.8 deposition, only Dongsha Uplift developed carbonate, also, again confirming the viewpoint that Dongsha Uplift is the provenance of Baiyun sag. Besides, a variety of gravity flow sedimentary structures are found in the core, such as normal graded bedding, Bouma sequence and slump-deformation bedding and so on, indicating a kind of gravity flow deposits in bathyal environment. The sediments of the core are identified as submarine fan deposits.

Based on the sequence division result by integrating well and seismic data, SQ23.8 can be divided into three system tracts: LST, TST and HST. Combining the sequence stratigraphic analysis and the study of the sedimentary facies, the sedimentary and evolution model of the eastern sedimentary system has been established. In this depositional system, the lowstand system tracts (LST) are represented by submarine fans, and the transgressive system tracts (TST) are dominated by the mixed deposits of clastic and carbonate rock, while in the highstand system tracts (HST) the deltaic deposits are well developed. The deposits and sedimentary model are mainly controlled by the change of relative sea level and material supply.

Key words: Baiyun Sag; Dongsha Uplift; provenance; sedimentary model