

文章编号: 0253-2697(2013)S2-048-09 DOI: 10. 7623/syxb2013S2006

珠江口盆地白云—荔湾深水区珠江组大型水道体系的发现与勘探意义

曾清波 吴景富 赵志刚 纪沫 赵钊

(中海油研究总院 北京 100027)

摘要:综合利用大量二维、三维地震及钻井资料,首次在珠江口盆地白云—荔湾凹陷东侧珠江组中部发现了大型深水水道体系,呈“S”型近SN向展布,北起白云凹陷东北部,经南部隆起,往南延伸进入荔湾凹陷,总长约152 km,宽3.0~7.5 km。受物源远近及古地形影响,该水道在不同区段具不同的形态与沉积充填特征:北段形态相对较顺直,剖面上呈“V”型或“U”型,以垂向叠置的多期水道充填为主,钻井揭示为正旋回叠加的细砂岩;中段充填了下窄上宽的“U”型复合水道,内部可见天然堤-溢岸、水道及滑塌体;南段演化为形态弯曲的分支水道,加积充填为主,天然堤-溢岸沉积较发育,水道末端沉积了席状朵叶体。水道体系内发育优质储盖组合,经断层及底辟作用与下伏源岩沟通,油气成藏条件优越。中下部水道、天然堤-溢岸中的岩性、地层等非构造圈闭及上部水道、朵叶体中发育的构造-岩性复合圈闭为有利勘探目标。珠江组大型水道的发现,将进一步拓宽珠江组深水沉积的勘探领域,有力推动深水区油气勘探的深入。

关键词:水道体系;沉积充填;勘探目标;珠江组;深水区;珠江口盆地

中图分类号:TE111.3

文献标识码:A

Discovery and exploratory significance of a deep-water channel system in Zhujiang Formation, Baiyun-Liwan sag, Pearl River Mouth Basin

ZENG Qingbo WU Jingfu ZHAO Zhigang JI Mo ZHAO Zhao

(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: Based on the analysis of substantial 2D/3D seismic data and drilling data, a deep-water channel system was discovered for the first time in the central part of Zhujiang Formation, east of Baiyun-Liwan sag in Pearl River Mouth Basin. This channel system is NS-trending in an S pattern, with a total length of 152 km and a width of 3 to 7.5 km. It starts from the northeast of Baiyun sag, traverses the uplift zone southward, and extends into Liwan sag in the south. As influenced by the provenance distance and the palaeogeomorphology, the channel system obtains segmented morphological features and depositional fillings. The northern segment of the channel system is relatively straight with a V or U pattern in the profile, mainly filled with vertically superimposed multiple-phase channels consisting of fine sandstone superimposed upon positive cycles. The middle segment is filled with U-type channel complexes of levee-overbank, channels, and slumps with narrow bottom and broad top. The southern segment evolves into sinuous aggradational channels with levee-overbank in the flank and sheet-like lobes in the frontal side. Quality assemblage of reservoir and seal are developed in connection to the underlying source rocks through faults and diapirs, providing superior accumulation conditions in the channel system. Profitable exploration targets include nonstructural traps (e.g., lithologic and stratigraphic traps) in the low-middle channels and levee-overbank as well as structural and lithologic traps in the upper channels and lobes. Discovery of the deep-water channel system in Zhujiang Formation will broaden the exploration scope of the deep-water deposition and promote oil and gas exploration in deep-water areas.

Key words: channel system; depositional filling; exploration target; Zhujiang Formation; deep-water area; Pearl River Mouth Basin

自20世纪70年代开始深水油气勘探以来,已在深水沉积体中发现大量油气资源,并形成了西非、巴西坎波斯盆地和墨西哥湾等深水勘探热点地区^[1-3]。水道是深水沉积体系重要的组成部分,由重力流流动形

成,具有伸长的负向地貌特征,代表了相对长期的沉积物搬运通道^[4]。从成因机制上看,水道可分为无天然堤的侵蚀水道、具加积的天然堤水道以及形成于复杂侵蚀和沉积过程的水道3种类型^[5]。纵向上,水道经

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB219408)和国家重大科技专项(2011ZX05025-006)资助。

第一作者及通信作者:曾清波,男,1983年12月生,2004年获中国地质大学(北京)学士学位,2009年获中国地质大学(北京)博士学位,现为中海油研究总院工程师,主要从事沉积学、层序地层学相关研究工作。Email: zengqb@cnooc.com.cn

历初始侵蚀、初始充填、加积充填、后期充填及水道废弃等演化过程^[6],内部充填复杂,从底到顶包括底部滞留沉积层、滑塌和碎屑流、高砂泥比叠置水道、低砂泥比水道-堤坝复合体 4 个微相单元^[7]。水道是深水区油气田的重要储层,在墨西哥湾、西非、巴西东部等均发现了深水水道油藏^[8-10]。

国内深水沉积研究集中于南海北部,包括琼东南盆地中央峡谷水道^[11-13]及珠江口盆地珠江深水扇^[14-17]等。分析表明,珠江深水扇集中在珠江组下部,是白云凹陷深水区主力勘探目的层,平面上主要展布于凹陷中部,在东南部多口钻井因储层不发育相继失利,制约了油气勘探的深入。通过对工区内 6 000 km² 二维、4 500 km² 三维地震资料的精细解释,结合钻井资料与前人研究成果,在剖面追踪的基础上,利用反射能量、均方根振幅等地震属性综合分析,在白云—荔湾凹陷东侧一带珠江组深海泥岩背景中识别出了大型深水水道体系,揭示了其平面形态与剖面特征,从已知钻井出发,明确了其沉积充填,并结合凹陷内烃源与运移条件探讨了其油气地质意义,拓展了白云凹陷深水区的油气勘探领域,有利于丰富深水沉积理论、促进该区油气勘探。

1 水道体系的发育背景

珠江口盆地位于中国南海北部、海南岛和台湾岛之间海域,是新生代被动大陆边缘张性断陷盆地,总体呈 NE—SW 向展布,东西长约 800 km,面积约为 17.8 × 10⁴ km²^[18]。珠江口盆地深水区(水深大于 300 m)位于盆地南部,主要包括珠二坳陷、潮汕坳陷、南部隆起及东沙隆起南部地区,面积约为 6 × 10⁴ km²,约占整个盆地面积的 1/3^[19-20]。研究区位于深水区中部,是深水区油气勘探的主战场,包括白云凹陷、荔湾凹陷及南部隆起部分地区(图 1),先后经历了断陷、断拗、热沉降拗陷等构造演化阶段^[21]。在始新世至早渐新世断陷-断拗阶段,研究区沉积了文昌组河湖相及恩平组河流-三角洲-浅海相地层;在拗陷阶段,研究区接受了晚渐新世珠海组大规模浅海三角洲和滨岸沉积及中新世以来的珠江组、韩江组、粤海组、万山组的深水扇与深海泥质沉积^[22]。经钻井揭示,白云凹陷北部珠江组下段主要为中厚层状灰色砂岩、泥岩不等厚互层,上段为大套深灰色泥岩夹薄层状灰色砂岩、粉砂岩;凹陷中南部,珠江组整体为大套厚层状深灰、灰色泥岩沉积,局部夹粉砂质泥岩、粉砂岩与灰色砂岩。地层分布整体北厚南薄,凹陷北部地层厚度普遍约为 1 000 m,最大厚度达 1 200 m,往南地层欠补偿,逐渐减薄,凹陷南部厚度分布在 300~600 m。

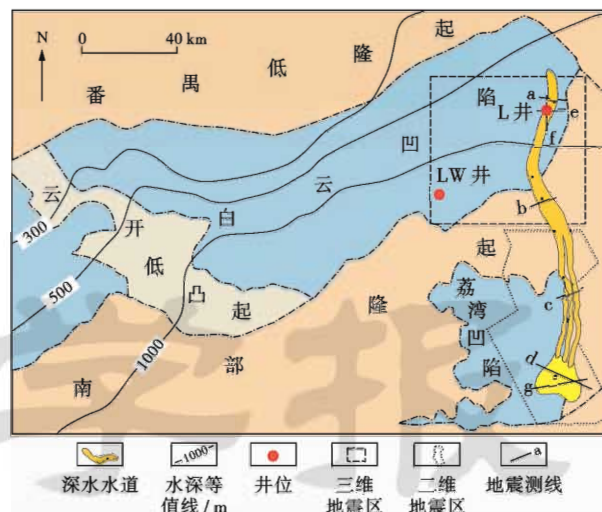


图 1 研究区构造区划与珠江组大型水道体系平面分布

Fig. 1 Tectonic units division and distribution of the great channel system in Zhujiang Formation of the study area

渐新世末期(约 23.8 Ma),受南海扩张脊向南跃迁影响,南海乃至整个东亚地区发生大规模白云运动^[20,23]。白云凹陷及以南地区整体沉降,番禺低隆起相对隆升,陆架坡折由珠海组沉积时期的白云凹陷南侧跳跃式地迁移到凹陷北坡^[24],凹陷主体为陆坡背景,LW井珠江组取心段见 Zoophycus-Nereites 遗迹相,证实了珠江组为上陆坡沉积环境^[25]。古珠江携带的华南沿海燕山褶皱带碎屑物在番禺低隆起南部至白云凹陷北坡形成的陆架边缘三角洲为水道体系的发育提供了充沛物源^[26-27],同时,该时期陆架坡折位于白云凹陷北坡,凹陷整体呈北高南低的地貌格局^[28-29],凹陷东侧受南部隆起隔挡形成峡谷地貌,为水道发育奠定了良好基础。

2 水道体系的特征

2.1 水道体系的发现

珠江组沉积时期,白云凹陷具备大型水道发育的物质基础与地质背景,在凹陷三维工区地震剖面上,珠江组中部发育大量下切谷,呈典型的充填结构,切割了下伏弱振幅海相泥质地层,深度约在 200 m,内部充填了一套中强振幅差连续反射,为典型深水水道沉积的地震响应(图 2)。珠江组时期,L井位于上陆坡,在珠江组中部钻遇中厚层状浅灰色细砂岩,呈次棱角一次圆状,分选较好,局部夹灰色粉砂岩、泥岩,测井曲线呈明显的钟形结构,具下粗上细的正旋回特征,单期充填厚度为 8~10 m,为典型深水水道岩相组合(图 2)。从水道发育层位(底界面往上 50 ms 时窗)的均方根振幅属性图上明显可以看出,整体弱振幅背景下,存在近

SN 向低弯度条带状强振幅异常,北窄南宽,进入荔湾凹陷后,强振幅异常范围增宽,并出现多个分支,揭示了珠江组大型水道的存在(图 3)。

通过在研究区范围内对该水道进行精细识别追踪,结合地震属性分析,刻画了水道体系的平面展布。

珠江组大型水道发育于白云—荔湾凹陷东部,受番禺低隆起相对隆升、白云凹陷及以南地区整体沉降影响,水道整体呈“S”型近 SN 向展布(图 1),北起白云凹陷东北部,经南部隆起,往南延伸进入荔湾凹陷,总长 152 km,一般宽度为 3~6 km,最宽处达 7.5 km。

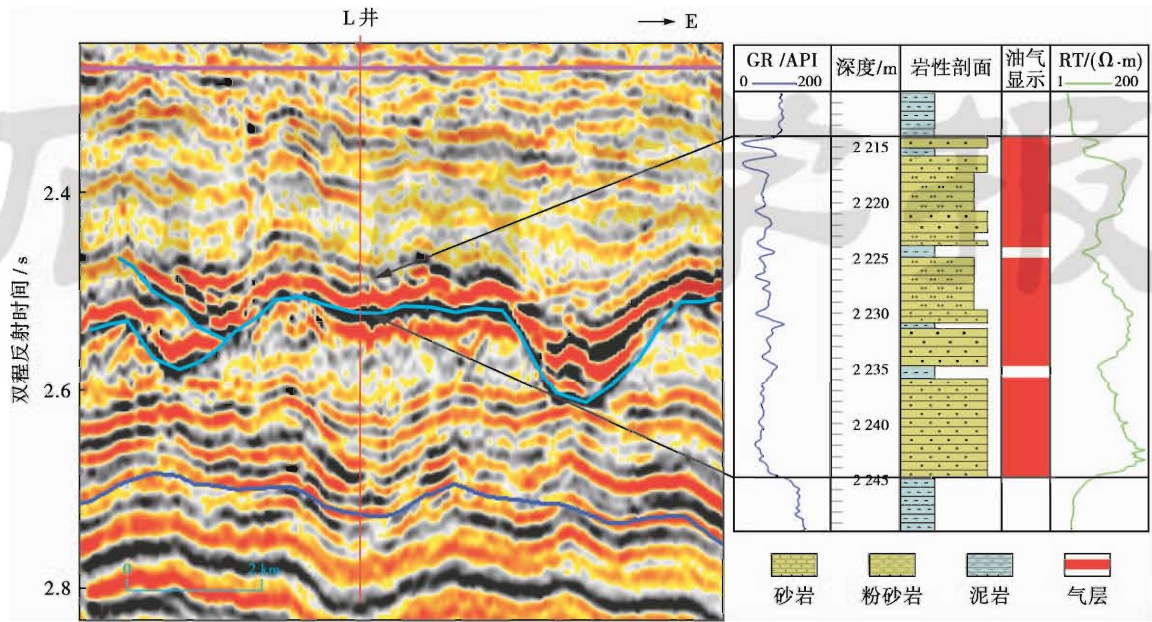


图 2 珠江组水道岩性组合与剖面特征(珠江组顶面层拉平,剖面位置见图 1 中 e)

Fig. 2 Lithologic association and profile characteristics of the channel in Zhujiang Formation(location see Fig. 1 seismic line e)

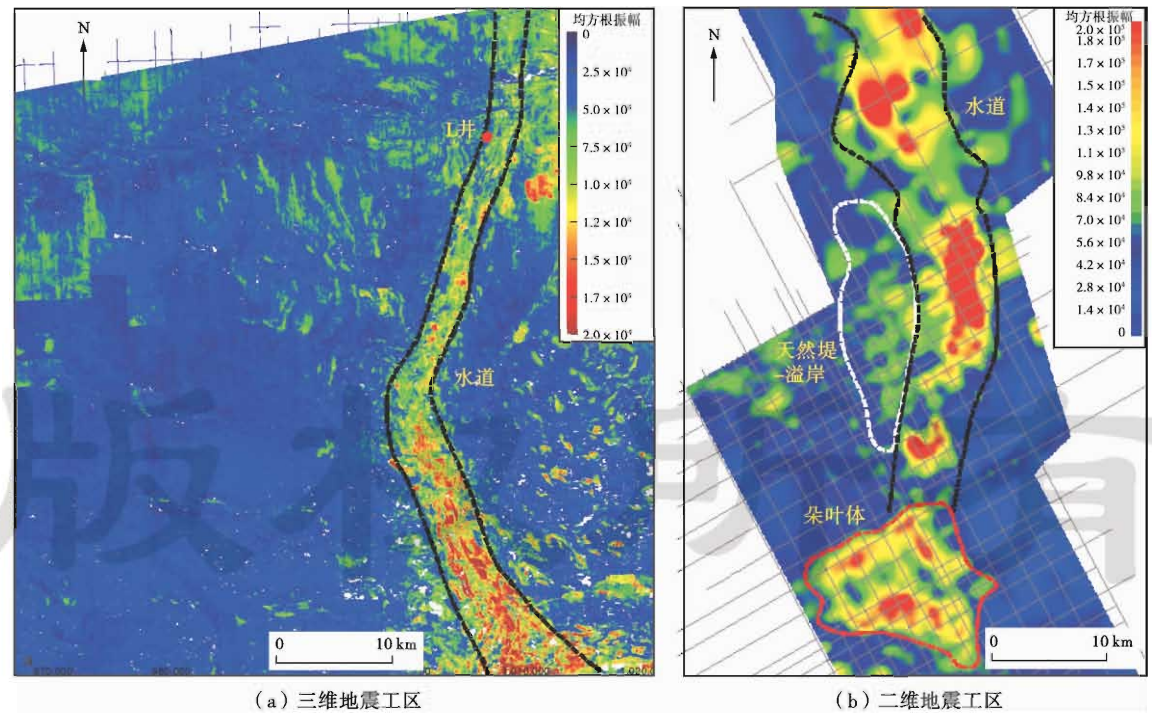


图 3 水道体系均方根振幅属性响应

Fig. 3 RMS amplitude attribute of the channel system

2.2 水道平面形态特征

受物源供给差异及古地貌变化等因素影响,不同区域的水道在宽度、深度、剖面形态及内部充填等方面

均存在着明显差异,整体呈北窄南宽的特征,北部较窄,中部逐渐加宽,往南进入荔湾凹陷后,水道逐渐演化为多条分支水道,前端发育深水朵叶体(图 1)。

由于古地形及物源供给的变化,水道在平面上分段性明显。依据水道体系平面形态、剖面特征及内部充填的差异性,由北往南可将其划分为 4 段(图 1):第 1 段主要位于白云凹陷,为水道的上游,受番禺低隆起隆升的影响,白云凹陷呈北高南低的古地貌背景,整体地形较陡,水道发育于限制性地貌内,水道宽度较窄,在 2.0~3.5 km,形态较为顺直;第 2 段北起白云凹陷与南部隆起结合带,南至荔湾凹陷北侧,主要分布于南部隆起,受珠海组填平补齐及白云运动后白云凹陷及以南地区的整体沉降影响,白云凹陷中南部与南部隆起连成一片,地形相对变缓,水道宽度增大,为 4.0~7.5 km;第 3 段位于荔湾凹陷北部,水道表现为多个分支水道,单个水道宽度约为 1.5 km,其形态较弯曲;第 4 段特指荔湾凹陷中南部的水道末端朵叶体,分布范围增大,最大宽度达 11 km。整体看来,水道的分段性与其流经区域构造背景的转换基本吻合,不同水道区段发育于不同的构造单元内。

2.3 水道剖面结构特征

通过对研究区大量地震剖面的精细解释,刻画了水道不同部位的剖面形态(图 4)。白云凹陷段为水道发育的上游,受番禺低隆起隆升作用影响,该区地形较陡,可容空间较低,水体流速快,水道侵蚀作用较强。在地震剖面上,该段水道明显可划分出 2 个期次:早期水道外形呈典型“V”型形态,表明其较强的侵蚀性,切割深度达 200 m,而宽度约为 2 km,宽厚比较小;伴随海平面上升,晚期水道表现为形态较宽缓的“U”型,宽厚比较大,切割了下伏的早期水道,叠合成不规则的“W”型[图 4(a)]。

水道中段位于南部隆起,整体地形较为平坦,流体能量相对减弱,水道侵蚀作用减弱,在剖面上整体表现为下窄上宽不规则的“U”型,厚约 300 m,内部充填了多期形态宽缓的水道,宽厚比较大,早期水道以垂向叠置充填为主,晚期水道摆动,互相切割,表现出“W”形态[图 4(b)]。

水道中南段位于荔湾凹陷,地形宽缓,流体能量进一步变弱,水道分散为多条分支水道,以加积充填作用为主。剖面上,单个分支水道表现为顶平底凸的宽缓“U”型形态,厚度 180~240 m[图 4(c)]。水道南段为末端朵叶体,整体呈中间厚、两边薄的透镜形态,宽厚比较大[图 4(d)]。

综合来看,不同部位水道的平面与剖面形态揭示了水道从发育到消亡的空间演化过程。水道上游发育区,流体能量强、可容空间低、侵蚀作用强,水道平面上较顺直,剖面上呈“V”型形态。中下游地区,流体能量减弱,水道两侧限制性地貌逐渐消失,水道逐渐变宽并出现多个分支,剖面上表现为宽缓的“U”型或透镜状。

3 水道体系充填演化

3.1 水道体系沉积组构

水道体系内发育碎屑流、颗粒流、液化流、滑动及滑塌等多种重力流沉积物,充填了砾岩、砂岩、粉砂岩等不同岩性,其类型及结构复杂,可划分出多种微相类型。珠江组深水水道体系流域较广,横跨白云凹陷、南部隆起及荔湾凹陷,沉积充填复杂,综合地震反射结构、反射能量属性、均方根振幅属性及钻井岩电剖面资料,可识别出水道、天然堤及溢岸、朵叶等沉积体(图 4)。

水道具长条形负地形特征,产生和(或)一直保留浊流特征,代表了相对长期的沉积物搬运通道,按成因可将其划分为侵蚀-充填型水道、加积型水道及侵蚀-加积混合型水道。水道充填通常以正旋回砂岩为主,测井曲线表现为箱形或钟形,地震上呈充填状、透镜状强振幅差连续反射。白云凹陷段水道发育于地形坡度较大且靠近物源的背景下,水道为侵蚀-充填型,底部为早期侵蚀作用形成的侵蚀通道,轴部充填了多期垂向叠置的水道沉积砂体,在能量属性剖面表现为明显的反射能量高值特征,地震剖面上为充填状强振幅差连续响应,水道两侧为呈弱振幅反射的海相泥岩地层[图 4(a)]。L 井钻遇上部水道侧翼,钻井揭示为浅灰色次棱角一次圆状细砂岩,整体呈下粗上细的正旋回特点(图 2)。荔湾凹陷段水道为加积型,具透镜状外形,内部为平行—亚平行中强振幅反射[图 4(c)]。

天然堤-溢岸沉积是单一沉积物重力流溢出堤岸并侧向延伸超过水道边缘的细粒沉积,以泥质沉积为主,也发育薄层粉砂岩、砂岩,一般具有较好储集物性,地震上通常具有连续性较好、振幅能量强、具楔状外形反射的特征。珠江组水道体系的天然堤-溢岸沉积主要发育于中下游的南部隆起及荔湾凹陷,平面上与水道近平行,分布于水道两侧,呈强振幅异常[图 3(b)]。剖面上,由于流速降低,近端天然堤接收沉积物要多于远端天然堤,其厚度从水道边缘向远端逐渐降低,形成楔状外形,内部为中强振幅连续反射,能量属性剖面上,反射能量呈中高值特征,表明天然堤-溢岸沉积中局部发育砂体[图 4(b)和图 4(c)]。

朵叶体是由于在水道末端水流速度降低而形成的席状沉积体,宽厚比较高、横向分布较广、连续性强,地震上往往表现为席状强振幅连续反射。荔湾凹陷的朵叶沉积发育于水道末端,平面上呈典型朵叶状强振幅特征[图 3(b)],面积约为 90 km²,能量属性剖面表现为反射能量中—高值异常,地震剖面响应为席状平行—亚平行强振幅连续反射,两侧可见典型的侧积充填,揭示了不同时期朵叶体的迁移摆动[图 4(d)]。

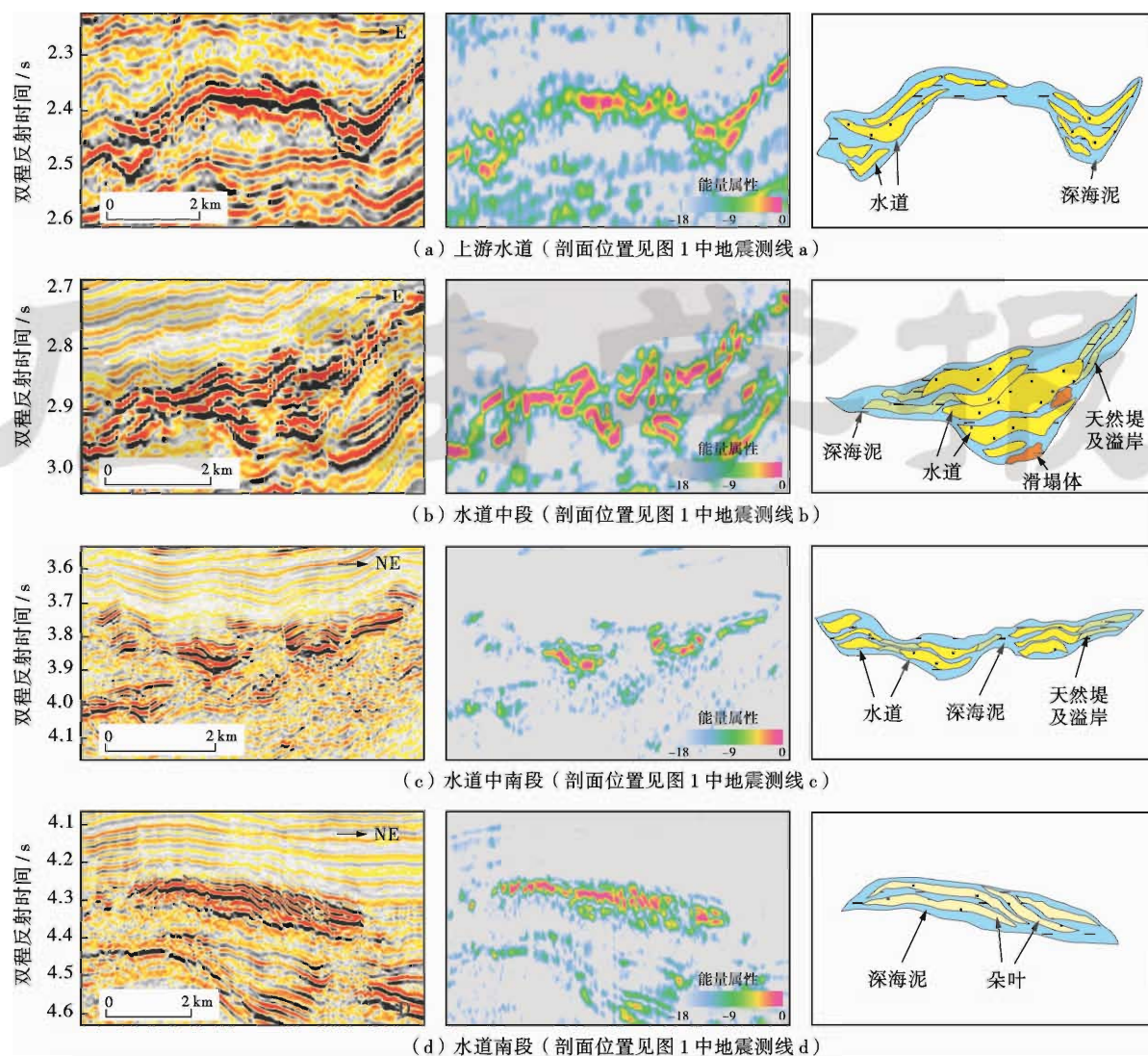


图4 不同区段水道剖面结构、能量属性特征与沉积充填(地震剖面位置见图1中a、b、c、d)

Fig. 4 Profile, attribute characteristics and filling features of the channels in different area (location see Fig. 1 seismic line a, b, c, d)

3.2 充填模式与演化

珠江组水道体系的发育受构造活动、物源供给及古地貌格局等因素影响,其中构造活动最为关键。白云运动使番禺低隆起隆升、白云凹陷及以南地区整体沉降,陆架坡折稳定在凹陷北坡,凹陷主体为陆坡环境,并形成北高南低的地貌,利于水道发育。中新世,青藏高原隆升,珠江组物源区向西拓展,古珠江携带广阔物源区的碎屑物形成大型陆架边缘三角洲,为重力流发育提供了物资基础。白云凹陷北坡多条生长断层的持续活动造成番禺低隆起陆架边缘三角洲发生滑塌、滑移,形成以细碎屑物为主的间歇性重力流往南流动并侵蚀下伏地层,促成了大型水道体系的发育。与珠江组沉积早期白云凹陷北部的水道加朵体的深水扇^[30]不同,珠江组中期的水道体系主体为水道沉积,规模巨大,横跨了白云凹陷、南部隆起及荔湾凹陷,仅

仅在末端发育小规模朵叶体(图5)。

受控于物源供给及古地形,该水道体系在平面上具明显的分段性,不同水道发育段具有不同的形态特征与沉积组构。白云凹陷段近物源、地形较陡,水道较为顺直,剖面上呈“V”型形态,为典型的侵蚀-充填型水道,内部充填为水道砂体,天然堤-溢岸沉积不发育。南部隆起地形相对变缓,水道体系以复合体形式发育,呈下窄上宽的“U”型特征,水道充填为主,可见天然堤-溢岸及滑塌体沉积。在水道下游地区的荔湾凹陷,水道分散为多个分支水道,单支水道形态较弯曲,加积充填为主,剖面形态呈透镜状,天然堤-溢岸沉积较发育,水道末端演化为朵体沉积。整体来看,随着水道逐渐远离物源,剖面上由“V”型、“U”型转变为透镜状或丘状。沉积组构上,随着物源越来越远,水道下切充填作用减弱,加积充填增强,天然堤-溢岸沉积逐渐发育。

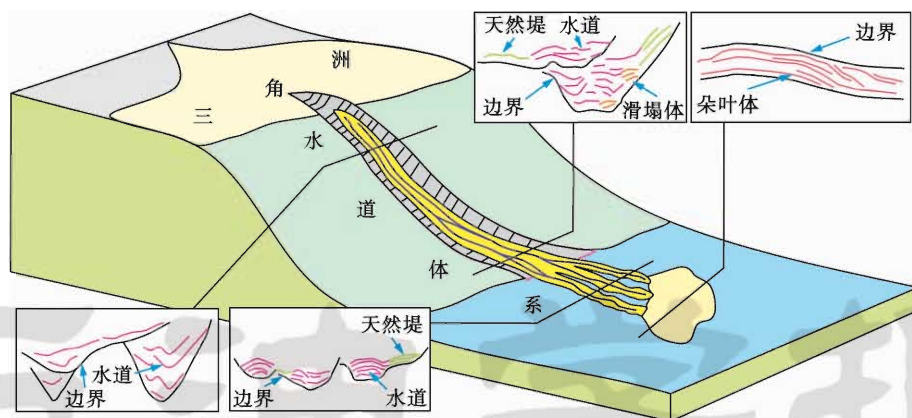


图 5 珠江组水道体系沉积充填模式

Fig. 5 Depositional model of the channel system in Zhujiang Formation

纵向上,在水道发育初始阶段,随着海平面的快速下降,白云凹陷北坡的三角洲发生滑塌与滑移,形成高密度重力流沿凹陷东北部的负向地形快速流动,下切侵蚀下伏地层或过路不留,形成了水道的“V”型或“U”型切谷形态。后期海平面上升,流体能量减弱,沉积物从切谷侧翼向中心逐渐开始卸载堆积,侧翼主要为滑塌体充填,侵蚀切谷中心部位为垂向叠置水道砂体。随着海侵的继续,可容空间逐渐增大,下切作用变弱,水道体系整体形态相对变宽缓,水道砂体发生侧向迁移摆动,水道两侧天然堤-溢岸沉积逐渐发育。水道发育末期,远源低密度浊流及半深海泥岩沉积占主导,水道充填结束,被海相泥质沉积物覆盖。

4 油气勘探意义

白云凹陷是大型富烃凹陷,目前已探明石油地质储量超过 $2700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、天然气超过 $1400 \times 10^8 \text{ m}^3$,主力烃源岩为海陆过渡相煤系及海相地层。煤系烃源岩发育于恩平组,平面上分布于凹陷北部,主要为煤层、碳质泥岩及暗色泥岩,具有较高的有机质丰度。其中煤层的 TOC 平均 58.8%, $S_1 + S_2$ 平均 186.3 mg/g; 碳质泥岩 TOC 平均 19.8%, $S_1 + S_2$ 平均 44.6 mg/g, 生烃能力较强^[31]。海相烃源岩发育于恩平组及珠海组,具有陆源生烃母质和海相生烃母质双源输入的特征,有机质类型为 II₂-III 型,平面上广泛分布于凹陷中南部,TOC 平均 1.2%,具生油气的潜力。深水水道是粗粒沉积物的卸载堆积场所,通常发育优质储层。L 井水道发育部位的 3 个井壁取心样品资料表明,珠江组水道砂岩的孔隙度为 23%~32%,渗透率为 28~1892 mD,证实了该水道良好的储集物性。珠江组大型深水水道体系的发现,将进一步拓宽白云凹陷勘探领域,推动深水区油气勘探的深入。

深水水道体系发育过程中,伴随着多期的海平面升降,形成了水道、天然堤-溢岸、朵叶体、深海泥岩在纵向上的复杂叠置关系,构成了良好的储盖组合。同时,水道体系内连续发育、垂向上相互叠置的砂岩复合体,成为油气长距离运移的优势输导体,而下伏地层中发育的底辟、断裂沟通了烃源岩与水道内储集层,因此水道体系具有优越的油气成藏条件。在岩性变化、切谷谷壁遮挡、断层错断遮挡和底辟作用等因素控制下,水道体系内发育的岩性、地层等非构造圈闭和构造-岩性复合圈闭等成为有利勘探目标。

(1) 非构造油气藏主要包括岩性油气藏及岩性-地层油气藏。在水道发育早中期,侵蚀充填作用为主,水道分布于限制性地貌单元内,切谷内部的水道砂岩沿切谷底界面向溯源方向逐层叠置超覆于下伏的海相泥岩地层,顺源方向渐变为远源浊积岩尖灭于深海相泥岩,横向上两侧往往受早期海相地层遮挡,形成岩性-地层油气藏[图 6(a)]。天然堤-溢岸沉积及末端朵叶体内单砂体与深海或半深海泥质充填相互叠置成岩性透镜体,形成岩性油气藏。

(2) 构造-岩性油气藏。水道发育晚期,海平面逐渐上升,可容空间增大,水道不断侧向迁移摆动,形成横向连通分布较广的水道砂岩,与末端朵叶砂岩后期在断层或底辟等构造因素作用下形成构造-岩性圈闭,主要包括断层-岩性圈闭及背斜-岩性圈闭。水道砂岩在其上倾方向受到斜交断层切割,断层在侧向与岩性变化结合起到了遮挡封堵作用,易形成断裂和岩性共同控制的断层-岩性圈闭。L 井证实为该类油气藏,在水道砂岩中解释出了 3 套累计厚度 25 m 的气层[图 2、图 6(a)]。水道体系沉积后地层遭受底辟拱升或构造变形,水道或朵叶砂体分布于背斜部位,两侧尖灭于海相泥岩中,形成背斜-岩性圈闭[图 6(b)]。

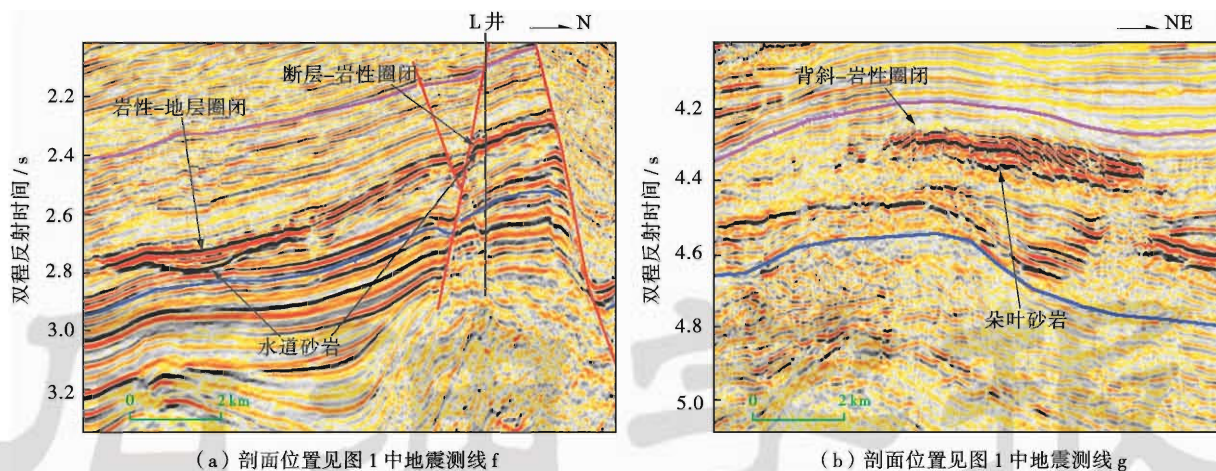


图 6 珠江组水道体系圈闭的典型剖面(位置见图 1)

Fig. 6 Typical profile of traps in the channel system in Zhujiang Formation(location see Fig. 1)

5 结 论

(1) 珠江组大型水道发育于白云—荔湾凹陷东部,呈“S”型近 SN 向展布,北起白云凹陷东北部,经南部隆起,往南延伸进入荔湾凹陷,总长 152 km,一般宽度为 3~6 km,最宽处达 7.5 km,呈北窄南宽的特征,中北部形态较顺直,剖面上呈“V”型或“U”型,南部演化为多条分支水道,剖面上呈“U”型或透镜状,水道末端发育扇状深水朵叶体。

(2) 水道体系内发育水道、天然堤-溢岸、朵叶体等沉积单元。水道位于沟谷中心,呈充填状中强振幅差连续反射,钻井揭示为呈正旋回叠加的细砂岩;天然堤-溢岸位于水道两侧,响应于楔状中强振幅连续反射;朵叶体发育于水道末端,呈透镜状平行强反射,两翼可见侧积充填。距离物源区的远近决定了水道形态及内部充填,上游区切割作用较强,充填了多期水道砂体,中下游加积充填作用增强,天然堤-溢岸沉积逐渐发育,在末端演化为朵叶体。受海平面升降控制,水道体系早期发育于限制性地貌单元内,以垂向叠置水道砂沉积为主,晚期水道侧向迁移摆动,形成横向连通、分布较广的砂体。

(3) 水道体系内发育优质储集体,是白云—荔湾凹陷重要的勘探领域,断层及底辟作用的垂向输导通道将其与下伏源岩沟通,油气成藏条件优越,中下部水道及天然堤-溢岸沉积是岩性、地层等非构造油气藏发育的有利部位,而晚期水道及朵叶体应以寻找构造-岩性复合油气藏为主。

参 考 文 献

- [1] Shanmugam G, Moiola R J. Types of submarine fan lobes: models and implications[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(1): 156-179.
- [2] Shanmugam G, Moiola R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (pennsylvanian jackfork group) Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(5): 672-695.
- [3] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 全球深水盆地群分布格局与油气特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 369-378.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Qu Hongjun, et al. A basic distributional framework of global deepwater basins and hydrocarbon characteristics[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 369-378.
- [4] 刘军, 庞雄, 颜承志, 等. 南海北部陆坡白云深水区浅层深水水道沉积[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 255-259.
Liu Jun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. Shallow deepwater channels in Baiyun deepwater region of northern continental slope, South China Sea [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 255-259.
- [5] 蒋想, 王华, Weimer P. 深水沉积层序特点及构成要素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2008, 33(6): 825-833.
Jiang Shu, Wang Hua, Weimer P. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary elements in deepwater[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(6): 825-833.
- [6] 刘新颖, 于水, 陶维祥, 等. 刚果扇盆地上中新世深水水道充填结构及演化特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(1): 106-111.
Liu Xinying, Yu Shui, Tao Weixiang, et al. Filling architecture and evolution of upper Miocene deep-water channel in Congo Fan Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(1): 106-111.
- [7] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs: key elements in facies prediction and effective development[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(8): 821-841.
- [8] Broucke O, Temple F, Rouby D, et al. The role of deformation processes on mud-dominated turbiditic systems, Oligocene and Lower-Middle Miocene of the Congo basin (West African margin) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(3): 327-348.
- [9] Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evo-

- lution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/8): 649-676.
- [10] Posamentier H W. Depositional elements associated with a basin floor channel—levee system; case study from the Gulf of Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/8): 677-690.
- [11] 李冬, 王英民, 王永凤, 等. 琼东南盆地中央峡谷深水天然堤—溢岸沉积[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 689-693.
Li Dong, Wang Yingmin, Wang Yongfeng, et al. The sedimentary and foreground of prospect for levee-overbank in Central Canyon, Qiongdongnan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 689-693.
- [12] 许怀智, 蔡东升, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地中央峡谷沉积充填特征及油气地质意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(4): 642-649.
Xu Huaizhi, Cai Dongsheng, Sun Zhipeng, et al. Filling characters of Central Submarine Canyon of Qiongdongnan Basin and its significance of petroleum geology [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4): 642-649.
- [13] 苏明, 李俊良, 姜涛, 等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 81-92.
Su Ming, Li Junliang, Jiang Tao, et al. Morphological features and formation mechanism of central canyon in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 81-92.
- [14] 彭大钧, 庞雄, 黄先律, 等. 南海珠江深水扇系统的形成模式[J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 7-11.
Peng Dajun, Pang Xiong, Huang Xianlü, et al. Depositional model of Pearl River deep-water fan system in South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 7-11.
- [15] 庞雄, 陈长明, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 220-229.
Pang Xiong, Chen Changming, Peng Dajun, et al. Sequence stratigraphy of Pearl River deep-water fan system in the South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 220-229.
- [16] 王昌勇, 郑荣才, 高博禹, 等. 珠江口盆地荔湾井区珠江组深水扇沉积特征[J]. *中国地质*, 2010, 37(6): 1628-1637.
Wang Changyong, Zheng Rongcai, Gao Boyu, et al. Deepwater fan sedimentary characteristics of Zhujiang Formation in Liwan area of Zhujiang River mouth basin [J]. *Geology in China*, 2010, 37(6): 1628-1637.
- [17] 郑荣才, 马奇科, 杨宝泉, 等. 白云凹陷珠江组深水扇砂岩储层特征及控制因素[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 39(5): 455-461.
Zheng Rongcai, Ma Qike, Yang Baoquan, et al. Characteristics of Miocene Zhujiang Formation submarine fan sandstone reservoirs in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2012, 39(5): 455-461.
- [18] 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: 1-280.
Chen Changming, Shi Hesheng, Xu Shice, et al. Tertiary formed condition of hydrocarbon reservoir in Pearl River Mouth Basin (East) [M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-280.
- [19] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区—南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 15-21.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.
- [20] 吴景富, 张功成, 王璞珺, 等. 珠江口盆地深水区 23.8Ma 构造事件地质响应及其形成机制[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2012, 37(4): 655-664.
Wu Jingfu, Zhang Gongcheng, Wang Pujun, et al. Geological response and forming mechanisms of 23.8Ma tectonic events in deepwater area of the Pearl River Mouth basin in South China Sea [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(4): 655-664.
- [21] 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 南海北部陆坡白云深水区油气成藏条件探讨[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(4): 145-149.
Pang Xiong, Chen Changmin, Zhu Ming, et al. A discussion about hydrocarbon accumulation conditions in Baiyun Deep-water Area, the northern continental slope, South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(4): 145-149.
- [22] 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云深水区沉积充填演化及控制因素分析[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(1): 195-25.
Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. An analysis of depositional evolution and its controls in Baiyun deep-water area, Pearl River Mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(1): 195-25.
- [23] 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]. *地质评论*, 2007, 53(2): 145-151.
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): 145-151.
- [24] 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 234-242.
Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and its significance in oil-gas exploration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 234-242.
- [25] 徐强, 王英民, 王丹, 等. 南海白云凹陷深水区渐新世—中新世断阶陆架坡折沉积过程响应[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 906-915.
Xu Qiang, Wang Yingmin, Wang Dan, et al. Sedimentary responses of retreating shelf break from Oligocene to Miocene, in deep-water area of Baiyun Depression, South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 906-915.
- [26] 吴景富, 徐强, 祝彦贺. 南海白云凹陷深水区渐新世—中新世陆架边缘三角洲形成及演化[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2010, 35(4): 681-690.
Wu Jingfu, Xu Qiang, Zhu Yanhe. Generation and evolution of the shelf-edge delta in Oligocene and Miocene of Baiyun sag in the South China Sea [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(4): 681-690.
- [27] 李云, 郑荣才, 高博禹, 等. 珠江口盆地白云凹陷渐新世/中新世地质事件的碎屑组分响应[J]. *现代地质*, 2011, 25(3): 476-482.

- Li Yun, Zheng Rongcai, Gao Boyu, et al. Characteristics of the detrital response to oligocene/miocene geological events in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Geoscienc, 2011, 25(3): 476-482.
- [28] 秦成岗, 施和生, 张忠涛, 等. 珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷北坡 SQ21.0 层序陆架坡折带沉积特征及油气勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2011, 23(1): 14-18.
- Qin Chenggang, Shi Hesheng, Zhang Zhongtao, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon exploration potential along the SQ21.0 sequence shelf-break zone on Panyu low-uplift and the north slope of Baiyun sag, Pearl River Mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(1): 14-18.
- [29] 张忠涛, 秦成岗, 高鹏, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡陆架坡折带地质特征及其油气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 39-44.
- Zhang Zhongtao, Qin Chenggang, Gao Peng, et al. Geological characteristics and exploration potentials of the shelf break zone on the north slope of the Baiyun De-pressure, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 39-44.
- [30] 李胜利, 于兴河, 刘玉梅, 等. 水道加朵体型深水扇形成机制与模式: 以白云凹陷荔湾 3-1 地区珠江组为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 32-40.
- Li Shengli, Yu Xinghe, Liu Yumei, et al. Formation mechanism and pattern of deep-water fan with channel and lobe: a case study of the Zhujiang Formation in Liwan3-1 area, Baiyun Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 32-40.
- [31] 李友川, 傅宁, 张枝焕. 南海北部深水区盆地烃源条件和油气源[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 247-254.
- Li Youchuan, Fu Ning, Zhang Zhihuan. Hydrocarbon source conditions and origins in the deepwater area in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 247-254.

(收稿日期 2013-07-09 改回日期 2013-11-14 责任编辑 熊英)

关于出版《石油学报: 海洋油气勘探论文专辑》的说明

2006 年以来, 中国海洋油气勘探不断获得重大突破, 但总体而言, 油气资源探明程度较低, 中国海洋油气勘探亟需发现新的重大接替领域。中国海洋油气勘探比陆地更具有挑战性, 海上油气资源的规模勘探和高效开发面临诸多重大科技难题, 亟待攻关解决。为此, 设立了国家重大科技专项《近海大中型油气田形成条件及勘探技术》和《海洋深水区油气勘探关键技术》科技攻关项目。围绕近海和深海油气田形成条件、分布特点和勘探技术, 展开系统技术攻关, 以期明确中国海域及邻区原油与天然气勘探方向。

经过相关项目的攻关研究, 取得以“源热共控论”、中生代花岗岩潜山稠油油藏、南海高温超压天然气勘探领域和深水区中央峡谷天然气成藏领域为代表的地质新认识, 以及勘探理念和勘探技术的重大进展。具体包括: ①“源热共控”中国南海及邻区“近岸油、远岸气”两个巨型原油带和天然气带分布, 深水区具有以生气为主的油气地质特征; ②针对渤海东部海域中生代花岗岩潜山储层分布复杂及其是否具有商业产能问题, 开展该类储层地质-地震综合预测技术和稠油热采技术攻关, 首次在渤海海域发现与成功评价了中国最大的中生代花岗岩潜山稠油油藏; ③针对莺歌海盆地高温超压地层条件下天然气能否成藏的世界级难题, 通过高温超压条件下天然气与 CO_2 在地层水中的溶解实验, 结合高温超压储层、盖层评价以及储层含气性预测技术攻关, 首次在南海莺歌海盆地高温超压领域发现千亿立方米大气田, 创建“储层、盖层、微断裂”三元耦合控藏超压成藏新模式, 形成了配套的高温超压天然气勘探技术系列; ④针对深水无井及少井区烃源岩薄煤层预测、水道砂体储层预测及烃类检测技术等难题展开技术攻关, 建立了烃源岩识别方法与富生烃凹陷评价方法、重力流储层评价技术流程, 发现陵水 22-1 深水气田, 首次揭开琼东南盆地深水区长达 500 余千米的中央峡谷天然气成藏领域。

攻关研究形成的理论认识与配套关键技术促进了近海、深海领域的油气勘探开发, 推动了蓬莱 9-1 油田、东方 13-2 气田和陵水 22-1 深水气田的发现, 为建成海上大庆目标的实现提供了理论指导和技术支持, 为中国海洋油气发展的二次跨越打下了坚实的技术基础。其中: 蓬莱 9-1 油田探明石油地质储量超过 $2 \times 10^8 \text{ t}$, 创造了近 10 年来中国国内单个构造的勘探发现之最; 南海莺歌海盆地高温超压领域东方 13-2 气田探明储量超过千亿立方米, 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气成藏领域陵水 22-1 气田储量也超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

本专辑选择发表了上述相关科研项目的代表性成果共 15 篇论文, 以期为推动中国海洋油气勘探与开发工作, 提供理论依据与技术支持。