

珠江口盆地深水区珠海组陆架边缘三角洲特征及其意义^①

曾清波¹ 陈国俊² 张功成¹ 纪沫¹ 韩银学¹ 郭帅¹ 王龙颖¹

(1.中海油研究总院 北京 100028; 2.甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室 兰州 730000)

摘要 陆架边缘三角洲发育于大陆架边缘、由物源越过陆架坡折并在陆坡沉积而形成,分布广、储层发育,其富油气性已经全球多个地区的勘探实践所证实。基于最新钻井与地震资料综合分析,首次系统揭示了珠江口盆地深水区珠海组大型陆架边缘三角洲的分布与结构充填,分析了其发育的主控因素与油气勘探意义。研究表明,珠海组陆架边缘三角洲剖面上呈S形、斜交或叠瓦状前积结构,钻井揭示为厚层水下分流河道、河口坝、席状砂与前三角洲泥互层沉积,平面上北东向展布于白云凹陷至鹤山凹陷一带。白云凹陷段三角洲规模相对较小,以斜交前积为主;白云南洼东段呈S形前积结构,顶积层为厚层水下分流河道与河口坝砂岩,前端深水水道与深水扇发育;南部隆起段以斜交、叠瓦状前积为主,规模较小;鹤山凹陷段以S形前积结构为主,发育大型下切谷与深水扇。晚渐新世构造活动相对平静,深水区形成了稳定的陆架坡折带,古珠江携带的充沛物源与珠海组时期相对海平面下降促使了陆架边缘三角洲的发育。珠海组陆架边缘三角洲的泥质沉积是一套中等—好的烃源岩,同时其发育也为海相泥岩带来了丰富的陆源有机质;陆架边缘三角洲的河口坝、水下分流河道、席状砂分布广、纵向厚度大,是深水区重要的储层类型,其前端发育的深水扇体是有利勘探目标。

关键词 陆架边缘三角洲 主控因素 珠海组 珠江口盆地深水区

第一作者简介 曾清波 男 1983年出生 博士 工程师 沉积学和层序地层学 E-mail: zengqb@cnooc.com.cn

中图分类号 P618.13 TE121.3 **文献标识码** A

随着油气资源需求的增长,油气勘探由浅水区逐渐向深水区扩展,发育于陆架和陆坡间的陆架边缘三角洲由于其良好的储集性能成为当前研究的热点^[1-4]。陆架边缘三角洲是指发育于大陆架边缘、越过大陆坡折向陆坡延伸发育的三角洲,随着物源沿平缓大陆架不断进积,至陆架坡折处地形坡度急剧增大,由于重力作用碎屑物大量沉积,形成发育于陆架边缘上的巨厚三角洲沉积层,剖面上表现为向陆和向海方向的斜坡楔形体,平面上呈不连续的弓形体或新月形^[5]。陆架边缘三角洲具有纵向厚度大、平面分布广的特征,是深水区油气富集的有利场所,在墨西哥湾、印度哥伦布盆地、非洲海岸等地陆架边缘三角洲中的油气勘探已获得成功^[6],印证了其巨大的油气勘探潜力。

珠江口盆地深水区(水深大于300 m)位于盆地南部,包括珠Ⅱ坳陷、潮汕坳陷、南部隆起及东沙隆起南部地区(图1),面积约为 $0.6 \times 10^5 \text{ km}^2$,占盆地面积的三分之一左右^[7-8]。深水区具有优越的油气地质条件,勘探成果显著,已发现了LW3-1等多个油气田,

但整体仍处于勘探早期阶段,勘探前景广阔。晚渐新世以来,深水区处于拗陷演化阶段,古珠江携带华南沿海燕山褶皱带乃至青藏高原的充沛物源堆积于深水区,形成了珠海组、珠江组沉积时期大规模的陆架边缘三角洲^[8-12],是深水区有利的勘探目的层系。基于研究区内12 000 km²二维、6 000 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,系统揭示了珠海组大型陆架边缘三角洲的平面分布,解剖了不同区域陆架边缘三角洲的结构充填及其发育的主控因素,并结合研究区油气勘探成果,探讨了其油气地质意义,以期在深水区寻找大型储集体提供依据,促进该区油气勘探。

1 珠海组陆架边缘三角洲的识别与分布

晚渐新一早中新世是南海扩张的重要时期,珠江口盆地深水区由陆相断陷盆地向陆架边缘型盆地过渡,形成了稳定的陆架边缘坡折带,珠海组沉积时期近北东向发育于深水区南部隆起带附近^[13]。另外,古珠江携带华南沿海燕山褶皱带的充沛物源、珠海组

^①国家科技重大专项(编号:2011ZX05025-006)与甘肃省重点实验室专项(编号:1309RTSA041)联合资助
收稿日期:2015-01-06;收修稿日期:2015-02-06

沉积中晚期的强烈海退也为深水区发育大规模陆架边缘三角洲创造了有利条件。与其它类型三角洲相比,陆架边缘三角洲规模较大、振幅变化强,其S形倾斜体最厚部分位于已经存在的退覆转折附近,沉降中心随着陆架坡折的向海推进而迁移,同时由于其发育于陆坡附近通常与深水水道等重力流伴生^[14],在钻井与地震上均存在明显响应,可依据已钻井分析及地震资料的精细识别追踪,对陆架边缘三角洲平面分布进行刻画。

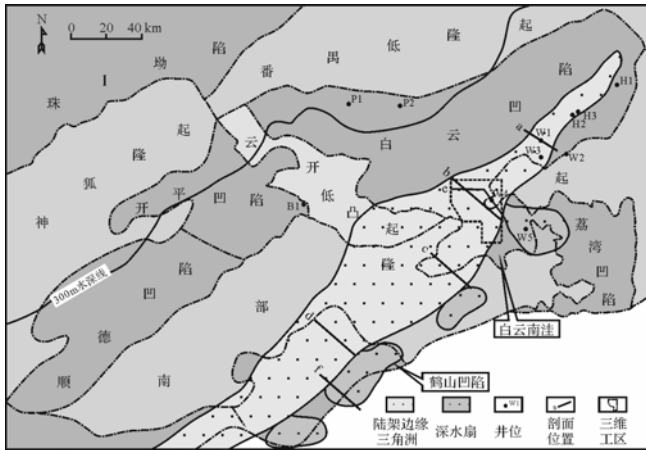


图1 研究区构造区划与珠海组陆架边缘三角洲平面分布
Fig.1 Tectonic units division of the study area and distribution of the shelf-margin delta in Zhuhai Formation

1.1 陆架边缘三角洲的识别

陆架边缘三角洲发育于陆架坡折带附近,与陆架内部的三角洲相比,其前积体规模大,顶超面与底超面的落差可达数百米、水平延伸距离可达数千米,陆架坡折附近成为最大的沉积、沉降中心,向陆、向海方向地层迅速变薄,出现两个楔形体,明显不同于陆架内部三角洲的单向前积楔^[15]。珠海组陆架边缘三角洲规模巨大,W4井钻井揭示其厚度达1430 m,为一套三角洲前缘的水下分流河道、河口坝、席状砂与前三角洲泥不等厚互层沉积;地震剖面上表现为多期大规模S形前积体,底积层、前积层与顶积层结构清晰。底积层响应于中振幅中频连续反射,厚度相对较薄;前积层振幅相对变弱,前积特征明显;顶积层响应于强振幅中高频连续反射,厚度大、分布广,钻井响应为中厚层水下分流河道、河口坝砂岩(图2)。三角洲体系的沉积、沉降中心位于陆架坡折附近,地层厚度大,向两侧迅速减薄,出现两个楔形体,随着沉积物的不断向海推进,陆架坡折点与沉积、沉降中心逐渐向海迁移。珠海组陆架边缘三角洲前积距离长、水平落差

大,以其中一期前积体为例(图2),其上超点与下超点水平延伸距离达5.87 km、纵向落差为324 m(地层速度参考附近W4井,取均值3500 m/s),将上超点与下超点纵向落差与水平距离的比值进行反三角函数($\arctan X$)计算,推测其沉积时期陆坡坡度为 5.5° ,远大于正常陆架三角洲,属发育于陆坡的三角洲前积体。另外,中晚期三角洲前积层中可见多期次下切谷充填,地震上表现为切谷外形、内部为双向上超的充填沉积,单个下切谷宽约0.7 km左右,厚约30 ms,为深水水道沉积。深水水道与前积体共生也表明三角洲发育于陆坡深水环境,整体属典型陆架边缘三角洲沉积体系。

钻井上,陆架边缘三角洲垂向沉积序列通常以多期反旋回三角洲前缘带叠置为特征,同时,由于其发育于陆架坡折附近,往往与重力流水道等陆坡沉积共生。深水区过H3—W2井珠海组连井剖面分析表明(图3),H3、W1井钻井揭示珠海组为大套厚层三角洲前缘沉积,H3井中下部以席状砂与前三角洲泥岩互层沉积为主,测井曲线呈指状,上部发育中厚层河口坝砂岩,测井曲线呈漏斗形。W1井主要为水下分流河道、河口坝沉积与前三角洲泥岩互层沉积,测井曲线呈箱状或漏斗状。岩芯上,水下分流河道以灰色中—细粒岩屑石英砂岩为主,夹深灰色泥质粉砂岩条带,呈清晰的下粗上细正粒序结构,具楔状、槽状和板状斜层理;河口坝主要为具逆粒序结构的浅灰色粉—细粒岩屑长石砂岩,含纹层状和条带状粉砂质泥岩和钙质胶结斑块,砂岩中发育生物扰动和大型生物钻孔,泥、粉砂质条带变形强烈。向海一侧紧邻W1井的W2井揭示为厚层泥灰岩、泥岩及页岩,薄片上可见大量抱球虫灰岩(图3),整体为上陆坡深水沉积,表明H3、W1井揭示的三角洲为陆架边缘三角洲。

1.2 陆架边缘三角洲的分布

晚渐新世,珠江口盆地整体处于拗陷演化阶段,接受了广泛分布的海相沉积。珠海组沉积中晚期,深水区南部的荔湾凹陷区发生强烈沉降,深水区由早期的局限海湾演化为大陆边缘,白云凹陷及其以南地区基本上处于水下,并形成了稳定的陆架坡折带^[13],整体呈北东向展布,北起白云凹陷东北部,往西南延伸至鹤山凹陷。受陆架坡折带控制,珠海组陆架边缘三角洲北东向条带状展布于白云凹陷、南部隆起至鹤山凹陷一带,整体东北窄西南宽,东北部白云凹陷段宽约13 km左右,往西南规模逐渐增大,白云南洼东段宽约30 km(图1)。

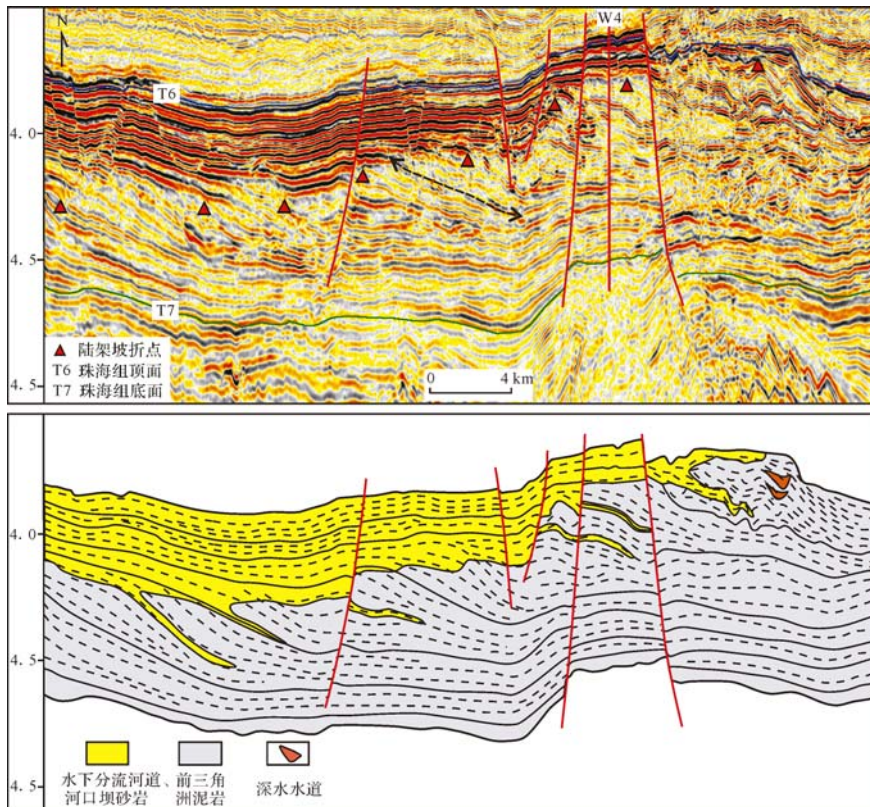


图 2 珠海组陆架边缘三角洲典型过井地震剖面(位置见图 1e)
 Fig.2 The profile characteristics of the shelf-margin delta in Zhuhai Formation

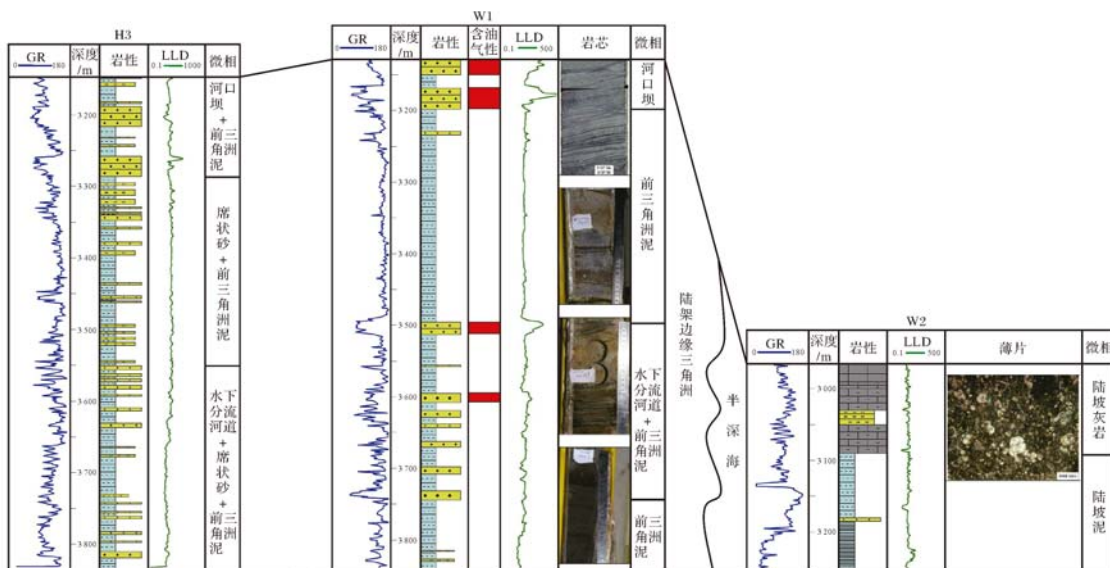


图 3 珠海组陆架边缘三角洲连井剖面
 Fig.3 The correlation section of the shelf-margin delta in Zhuhai Formation

2 不同区带陆架边缘三角洲结构与充填

珠海组沉积时期,深水区北部开平—顺德凹陷、南部隆起西段及白云凹陷主体均为浅水陆架区,往南

过渡为陆坡区。不同区段的陆坡具不同结构特征,白云凹陷陆坡整体处于凹陷内部,地形变化不大,坡度相对较缓;白云南洼东段陆架坡折位于白云凹陷、白云南洼及荔湾凹陷结合带,地形变化快,坡度较陡;鹤

山凹陷段陆架坡折处于凹陷北侧,为隆起区与凹陷的过渡带,陆坡的坡度较陡。另外,受陆架坡折向陆一侧的古地貌形态影响,不同区段陆架边缘三角洲的物源供给也不尽相同。因此,珠海组陆架边缘三角洲在不同区段具有不同的规模与结构特征,大致可以将其分为4段(图4)。

白云凹陷内的珠海组陆架边缘三角洲规模相对较小,宽约11~15 km,纵向厚度最大约530 m左右,大致可划分为四个期次,整体由早到晚向东进积推进。各期三角洲整体以斜交前积为主,由相对倾斜而互相平行的反射结构组成,向上倾方向呈现顶超或削蚀特征,向下倾方向下超于下界面之上,局部可见S型前积结构。前积层地震反射连续性差、振幅弱、频率较低,单个前积体的水平落差最大可达400 m左右、水平延伸距离可达4 km以上,计算推测陆坡坡度为4.5°左右。白云凹陷陆架边缘三角洲主要为一套水下分流河道、河口坝与前三角洲泥沉积,其中三角洲的顶积层充填了富砂相的河口坝、水下分流河道,前积层则以前三角洲泥岩沉积为主,局部夹河口坝、分流河道砂岩(图4a,3W1井)。

白云南洼东段处于白云凹陷、南部隆起与荔湾凹陷结合带,地形相对开阔,物源供给充分,陆架边缘三角洲规模巨大,宽约30~33 km,厚度达1500 m左右,剖面上呈大规模S形前积结构,沿物源方向呈中间厚两侧薄的形态,底积层、前积层与顶积层结构清晰,代表了一种水流能量较低、地形变化大的沉积环境,按内部地层接触关系大致可以划分为6期。由于沉积物的不断进积,陆架坡折点与沉积、沉降中心逐渐向海迁移,同时陆坡坡度逐渐变陡,三角洲规模不断增大,早期三角洲规模相对较小,单个前积体水平延伸距离约4.5 km、落差约380 m,推测其陆坡坡度约4.7°;中晚期三角洲规模逐渐增大,单个前积体的水平延伸距离可达5.8 km、落差达570 m,陆坡坡度可达6.1°。该套三角洲沉积发育大套厚层水下分流河道、河口坝砂体,主要位于珠海组顶部,砂地比达70%以上,测井曲线呈典型的箱状或漏斗状(图2W4井),地震上响应于三角洲顶积层的强反射,而三角洲前积层整体以中弱振幅反射为主,充填了一套前三角洲相泥岩,局部夹水下分流河道、河口坝砂岩(图2,4b)。另外,伴随着充分的物源供给与陆坡坡度的不断变陡,中晚期三角洲前端发育多支深水水道,在整体弱振幅的前积层中出现切谷状强振幅充填(图4b)。

南部隆起段晚渐新世为水下低隆起,珠海组地层为填平补齐沉积,陆架边缘三角洲主要在珠海组中晚期发育,规模相对变小,宽约17~22 km,大致可以划分为4期,剖面上以斜交前积—叠瓦状前积为主,整体呈向海进积的叠置关系。早期三角洲主要发育于白云南洼,呈斜交前积结构,单个前积体水平延伸距离为3.7 km,水平落差为280 m,推测其陆坡坡度为4.3°左右。晚期三角洲发育于南部隆起之上,呈叠瓦状前积结构,剖面上表现为在两个平行的上、下界面之间存在倾斜且互相平行的不连续反射层,顶积层和底积层不发育,代表一种浅水环境下的短期强水流堆积(图4c)。

鹤山凹陷段陆架边缘三角洲发育于南部隆起与鹤山凹陷过渡带,地形变化大,三角洲的纵向厚度大、延伸较远,宽约22~25 km。三角洲受后期构造活动改造强烈,内部地层接触关系相对复杂,大致可以划分为3期(图4d)。早期三角洲位于西侧,整体呈大型切谷充填特征,内部响应于具前积结构的弱振幅充填,中晚期三角洲逐渐向海进积,表现为大型S型或斜交前积,前积体呈中振幅连续反射,被后期断层错断,单个前积体水平延伸距离为3.7 km左右,前积体顶部被后期地层切割,形成大型切谷,前端发育大型深水扇体(图1)。

受物源与古地形影响,不同区域珠海组陆架边缘三角洲具不同结构与充填特征,白云凹陷段陆坡坡度较缓,三角洲的规模整体相对较小;白云南洼东段处于结合带,地形变化大,发育多期次大规模陆架边缘三角洲,呈大型S型前积结构,水下分流河道、河口坝砂体发育,同时其前端发育深水水道与深水扇;南部隆起段整体发育于南部隆起上,地形较平坦,以斜交前积及叠瓦状前积为主,规模较小;鹤山凹陷段处于隆起与凹陷转换带,三角洲规模较大,发育大型深水扇体与下切谷。

3 陆架边缘三角洲发育的主控因素

陆架边缘三角洲的概念源于动态三角洲研究,是物源沿着陆架运移与相对海平面升降过程中特定阶段的产物,成因上陆可分为物源控制型、海平面控制型和两者混合控制型^[5]。珠海组大型陆架边缘三角洲的生长发育与珠海组沉积时期稳定的构造环境、古珠江携带的充沛物源及珠海组沉积中晚期强烈的相对海平面下降密不可分。

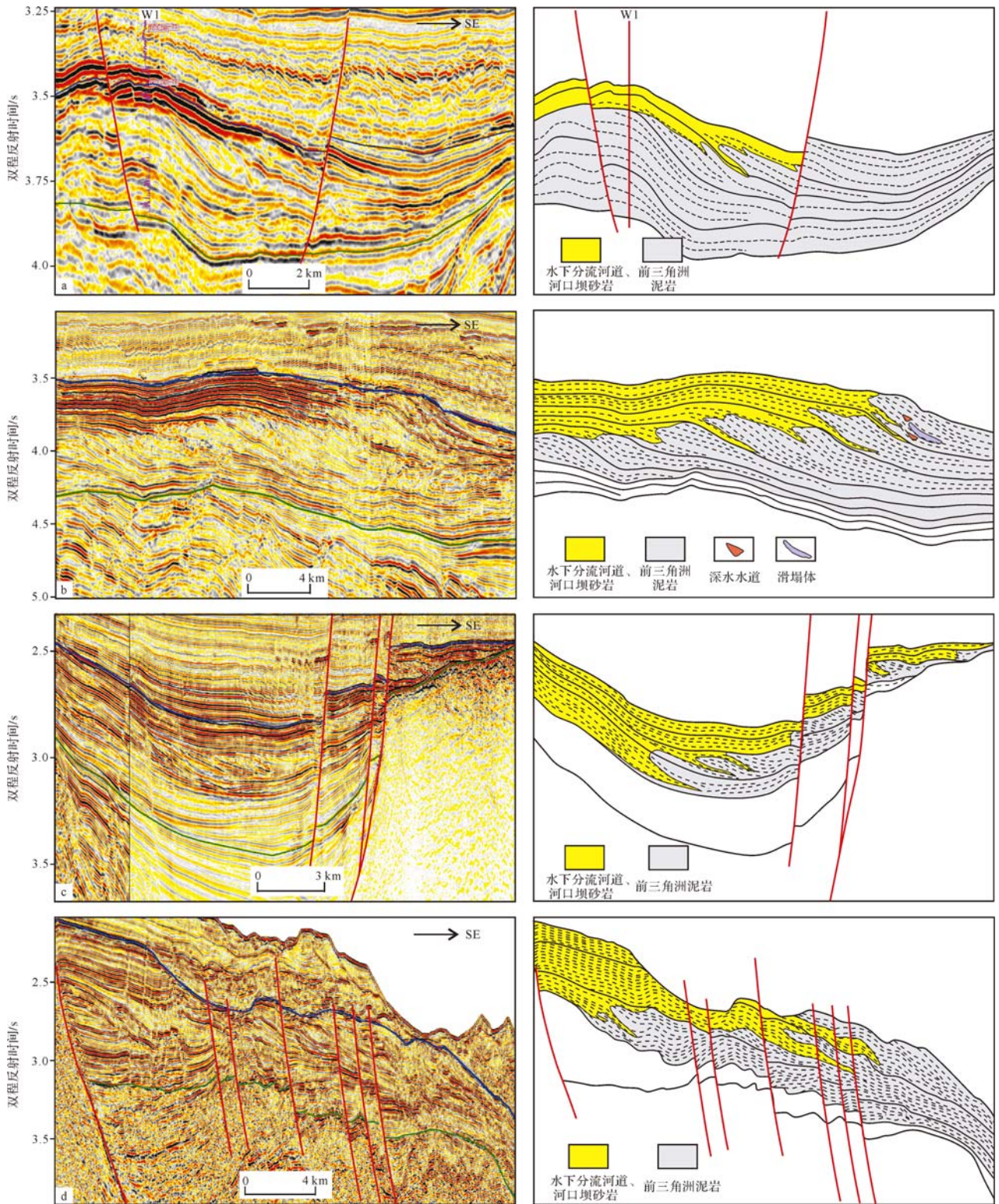


图4 不同地区珠海组陆架边缘三角洲特征(剖面位置见图1)

Fig.4 Feature of the shelf-margin delta in Zhuhai Formation in different area

3.1 构造活动

大型陆架边缘三角洲发育于稳定的陆架坡折带

附近,通常需要构造活动相对稳定的大陆边缘沉积背景。晚渐新世,珠江口盆地在南海运动之后结束了拉

张断陷阶段,深水区由早期的断拗期进入拗陷沉积阶段,该时期南海海盆开始扩张,海底扩张活动主要发生在西北海盆及东部海盆^[16],海侵作用形成,白云凹陷、开平—顺德凹陷及先前暴露于水上的南部隆起等大部分区域演化为浅海陆架,深水区由早渐新世时期的局限海湾演化为具有稳定陆架坡折的大陆边缘型盆地,接受了分布广泛的珠海组三角洲相及海相沉积。晚渐新世末期(距今约 23.8 Ma)南海扩张轴发生了重要的向南跃迁和改向,扩张脊发生了一次向南跃迁的过程,走向由近东西向转变为 NE—SW 向^[16],该期跃迁代表了深部地幔产生了异常涌动,使得深水区在距今约 23.8 Ma 时发生了强烈沉降^[17],由浅海陆架环境骤然演变为深水陆坡环境。因此,珠海组沉积形成于两次大的构造运动之间,处于构造和沉降的相对稳定期^[18],为大型陆架边缘三角洲的发育奠定了坚实基础。

3.2 物源供给

充沛的物源供给是形成大型陆架边缘三角洲的必要条件。珠江口盆地深水区经历了多期构造活动,陆源碎屑物质来源复杂,不同时期存在较大差异。晚渐新世珠海组沉积时期,物源主要来自于华南沿海地区,ODP148 站位和珠江口盆地 PY33 井珠海组沉积物钕同位素比值为 -9~-11,与华南沿海燕山期花岗岩的钕同位素值相当^[19]。从岩石骨架组分上看,珠海组以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,含少量岩屑砂岩,与华南沿海花岗岩母岩区一致^[20]。

受构造演化影响,深水区不同沉积时期物源区存在差别,物源供给量也经历了多期变化。ODP1148 站沉积物堆积是深水区沉积物充填的向前延伸部分,其堆积速率经历渐新世高、中新世低及之后又增高的特点。晚渐新世早期,南海海盆开始扩张,古珠江携带华南沿海地区的沉积物供给相对早渐新世时期更为丰富,深水区与 ODP1148 站均接受了沉积速率极高的陆源碎屑物质。化学蚀变指数(CIA = $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$, CIA 值越高,表明母岩风化程度越高)分析表明, PY33 井在 32Ma 时期存在物理风化突然增强,化学风化减弱的突变,表明该时期构造运动造成母岩区在短时期内强烈快速剥蚀,引起沉积物化学蚀变指数突然降低^[21]。Mclennan 等(1993)统计了全球现今主要河流的沉积物通量与化学风化指数(CIA)的关系(图 5),即沉积物通量($\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$) = $(2.25 \times 10^5) (10^{-0.0435[\text{CIA}]})$,因此可以通过化学蚀变指数来计算该时期沉积物通量。基于

深水区 P1 井等 5 口钻井珠海组常量元素分析,计算了化学蚀变指数(CIA)及沉积物通量,珠海组时期化学蚀变指数在 20%~80%之间,沉积物通量在 100~40 000 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 之间(图 6),与黄河、恒河等大型现代输砂量较大的河流的沉积物通量相似,表明珠海组沉积时期物源供给非常充沛,为大型陆架边缘三角洲发育创造了条件。

3.3 相对海平面变化

陆架边缘三角洲的发育受物源条件、陆架坡折带形态和海平面变化等因素共同控制,但海平面变化的控制作用最为强烈^[22]。以更新世 Gulf Coast 为例,在其生长过程中受陆地三角洲发展影响,但在很大程度上受长期性的海平面下降控制,而且陆架边缘三角洲的加积主要发生在海平面下降和低水位期^[23]。海平面的下降及充足的物源供给使三角洲主体可能越过陆架边缘到达陆坡,并在之后的海平面缓慢上升过程中逐渐发育三角洲前积楔,直至后期海平面快速上升三角洲退积,演化为正常陆架三角洲。珠海组沉积时期,深水区经历了四期大规模相对海平面下降,钻井上表现为浮游有孔虫丰度和百分含量低,出现近岸类型的有孔虫组合,岩性偏粗等特征,地震上可见海岸上超点多次向海迁移,海平面变化与全球海平面变化基本吻合^[24]。上述相对海平面变化过程在珠海组陆架边缘三角洲剖面存在明显响应特征,尽管不同区域三角洲规模与期次存在一定差异,但各区域三角洲均不断向海进积,新的斜坡体不停向已形成的三角洲早期斜坡体下超,S 型前积体的顶积层不断的向海扩展,富砂相带的河口坝、水下分流河道逐渐向海推进迁移,陆架坡折也随之不断向海推移(图 4)。

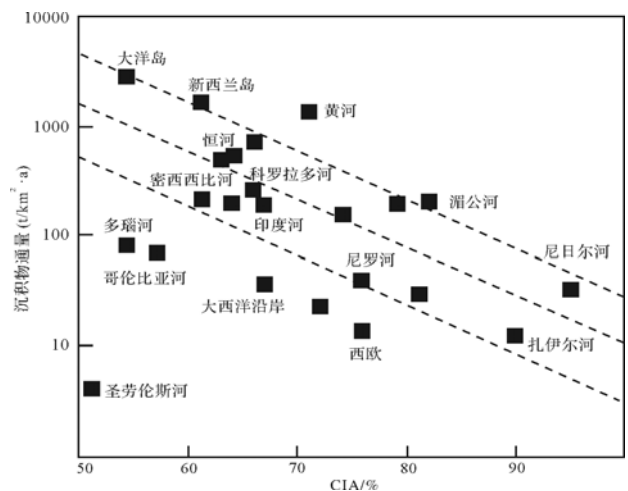


图5 世界主要河流沉积物通量与CIA值

Fig.5 Sediment flux and CIA of main rivers in the world

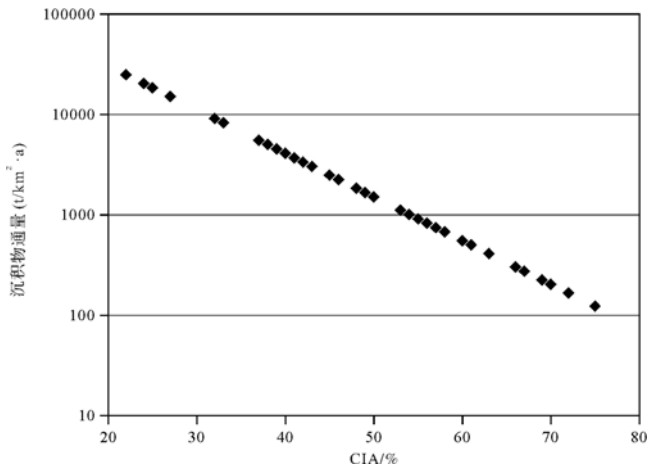


图6 白云凹陷珠海组沉积物通量与CIA值

Fig.6 Sediment flux and CIA of Zhuhai Formation in Baiyun Sag

大规模的海退事件控制了不同期次三角洲的向海进积,中短期海平面变化则控制了同一期三角洲内前积斜坡体的发育演化。陆架边缘三角洲通常由一套前积斜坡体构成,而每一斜坡之间由分流河道或河道冲蚀谷形成的不整合面互相分开,单个前积斜坡体就代表了一次高频的海平面升降旋回,在斜坡体的前端显示向上生长并且保存完好的S形一般指示在一次短时期内的海平面上升。在海平面下降或稳定期,由于物源的进积,单个前积体之间通常向海进积,在地震上表现为后期斜坡体向海一侧进积,其顶超点与下超点相对前一期前积体更靠海;在海平面上升期,后期前积体的向陆退积,下超于前期斜坡体之上,其顶超点相对于前一期前积体向陆一侧迁移(图4c)。

4 与盆地北部浅水区三角洲对比

与大陆架有关的三角洲包括内陆架三角洲、陆架三角洲、陆架边缘三角洲与湾头三角洲,上述各类三角洲形成于海平面升降变化的动态过程中,其中内陆架三角洲形成于三角洲发育初期;陆架三角洲形成于海平面下降期,发育时间长,向外陆架延伸;陆架边缘三角洲分布于陆架边缘及陆坡之间,发育于海平面低位时期;湾头三角洲形成于海平面上升期,规模小,海侵限制其发育^[2]。珠江口盆地珠海组陆架边缘三角洲与北部陆架浅水区三角洲同样形成于海平面升降的不同时期,二者存在诸多异同点。整体来看,珠海组沉积时期,珠江口盆地由断陷转为坳陷,大面积沉降,古珠江携带华南沿海的充沛物源在珠I坳陷至珠II坳陷的广阔范围内形成了规模巨大的三角洲体系,根据其位置可进一步划分为陆架三角洲及陆架边缘

三角洲,其中陆架三角洲发育于北部浅水区,物源来自于盆地北部、东北部及南部东沙隆起;陆架边缘三角洲分布于白云凹陷至鹤山凹陷一带,是北部浅水区三角洲的自然延伸。

北部浅水区三角洲分布于珠I坳陷、番禺低隆起、东沙隆起至白云凹陷北部等地区,可划分为三角洲平原及三角洲前缘亚相(图7)。平原亚相分布于珠I坳陷北部,靠近华南大陆,钻井揭示为分流河道相厚层含砾砂岩、粗砂岩砂岩,常发育板状、槽状交错层理及冲刷充填构造,局部夹分流间湾相薄层泥岩,测井曲线呈典型箱形或钟形,岩性粗,砂岩含量高,砂地比达85%(图7)。前缘亚相分布于珠I坳陷南部、番禺低隆起至白云凹陷北部,揭示为厚层水下分流河道、河口坝、席状砂及水下分流间湾泥质沉积,砂岩含量相对平原相降低,砂地比在50%~70%之间,岩性也逐渐变细,表明其与物源区的距离增大。水下分流河道为厚层中砂岩、砂岩、粉砂岩沉积,泥质含量低,整体呈下粗上细的正韵律,测井曲线表现为箱形或钟形,河口坝沉积下部多为泥质粉砂、粉细砂岩,向上变为细砂岩、砂岩,测井曲线呈漏斗形,席状砂以中薄层砂岩、粉砂岩沉积为主,测井曲线呈指状(图7)。

与北部浅水区三角洲相比,陆架边缘三角洲分布于白云凹陷与鹤山凹陷一带,相距北部华南大陆物源区更远,沉积物逐渐变细,砂地比降低,普遍在20%~30%,岩性主要为砂岩、粉砂岩及泥岩,砂岩单层厚度变薄,最大厚度普遍在20~30m,远小于北部浅水区的50~60m的最大单层厚度。从砂体岩石学特征上看,北部浅水区三角洲砂岩石英颗粒含量普遍大于80%,岩石分选较好,但磨圆主要为次棱角状,反映其为近物源单旋回沉积产物。陆架边缘三角洲砂岩主要为长石质石英砂岩和长石岩屑质石英砂岩,泥质杂基含量较少,一般为0.30%~8.90%,成分成熟度和结构成熟度较高,碎屑颗粒以中—细粒径为主,分选、磨圆中等,一般为次棱角状—次圆状^[25]。从沉积相带上看,北部浅水区三角洲发育三角洲平原、三角洲前缘等亚相,从珠I凹陷往南整体由平原亚相的分流河道、分流间湾向前缘亚相的水下分流河道、河口坝、席状砂及前三角洲泥变迁;陆架边缘三角洲整体以三角洲前缘沉积为主,分流间湾、前三角洲泥沉积占优,局部夹河口坝、水下分流河道、席状砂沉积。从储层物性来看,据E1井等7口井测井解释资料,北部浅水区三角洲砂岩孔隙度普遍在13%~25%之间,渗透率普遍在20~200×10⁻³μm²之间,整体属于一套中低孔

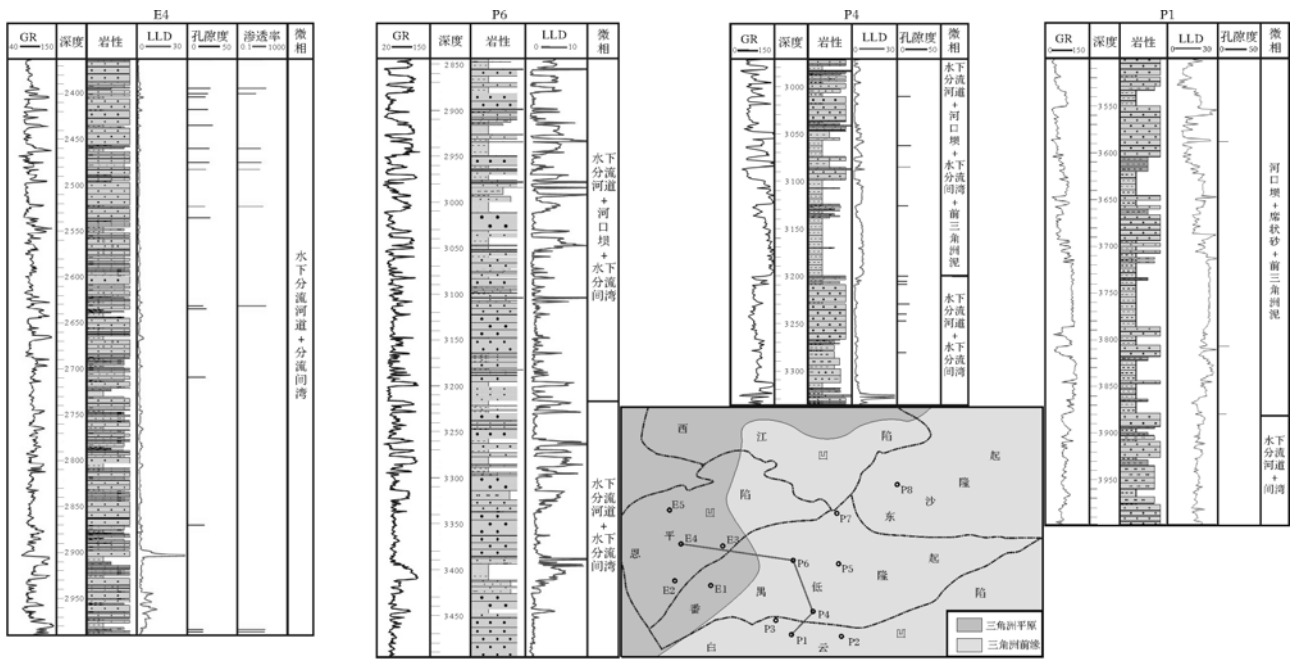


图7 珠海组北部浅水区三角洲连井剖面

Fig.7 The correlation section of the shallow water delta in Zhuhai Formation

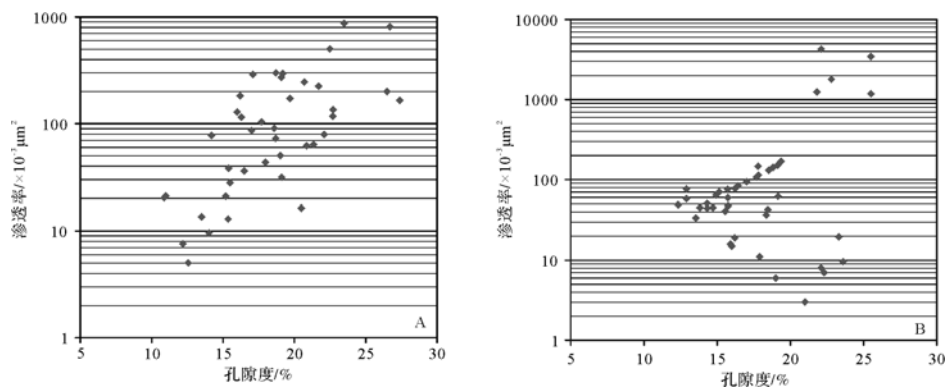


图8 珠海组三角洲砂岩储层孔隙度与渗透率关系(A为浅水区,B为陆架边缘三角洲)

Fig.8 Relationship between porosity and permeability from the delta in Zhuhai Formation

低渗—中低孔中高渗储层(图8A),但整体的孔—渗相关性较差,表明砂体的分选磨圆程度相对较低,杂基含量较高,储层非均质性较强。据W1井等6口井测井解释资料,陆架边缘三角洲砂岩孔隙度在11%~27%之间,渗透率普遍在 $40\sim 200\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,整体属于一套中低孔低渗—中低孔中高渗储层,孔隙度—渗透率整体具有良好的正相关关系,表明岩石的分选程度高,储层均质性好(图8B)。

5 油气勘探意义

陆架边缘三角洲自身是良好的储集体,同时由于其发育于陆架坡折附近,相对于正常陆架三角洲稳定

性较差,在物源进积过程中,容易形成海底扇及斜坡扇,被深水泥岩包围,成为良好的勘探目标,油气勘探意义重大。墨西哥湾近30年的油气勘探过程中,滨岸和陆架上所有大的目标均来自陆架边缘三角洲体系^[26],印证了其巨大的油气勘探潜力。另外,陆架边缘三角洲的发育带来了丰富的陆源有机质,大大提高了海相泥岩的生烃潜力,陆架边缘三角洲自身泥质沉积也是良好的烃源岩,因此,陆架边缘三角洲还具有重要的烃源意义。

5.1 陆架边缘三角洲的烃源岩意义

珠海组是珠江口盆地深水区重要的烃源岩,白云凹陷东部及东北部已发现的LW3-1、LH34-2等油气

田或含油气构造的原油中含有丰富的奥利烷,表明其有珠海组烃源岩的贡献,从奥利烷的相对含量看,珠海组烃源岩的油气贡献可达50%左右^[27]。珠海组烃源岩主要为三角洲及海相泥岩,有机质类型为Ⅱ₂和Ⅲ型,TOC普遍在0.39%~2.08%之间,平均为1.08%,S₁+S₂在0.5~6.56 mg/g之间,平均为2.2 mg/g,具有较强的生烃潜力。陆架边缘三角洲是珠海组烃源岩的重要组成部分,W1、H3井钻井揭示珠海组为大套厚层陆架边缘三角洲砂泥岩互层沉积,泥岩含量高、单层厚度大,最大单层厚度达260 m(图3)。从地化指标上看,W1井珠海组陆架边缘三角洲泥岩的TOC在0.66%~1.47%之间,平均为1.08%,W3、H2井TOC均大于0.5%,大部分大于1%,为一套中等—好的烃源岩(图9)。

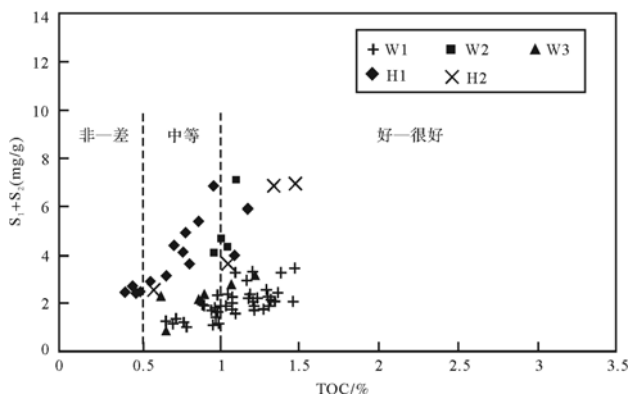


图9 珠海组烃源岩 TOC 与 S₁+S₂ 关系图

Fig.9 Relationship between TOC and S₁+S₂ of Zhuhai Formation

珠海组烃源岩的有机质主要来源于陆生高等植物,其数量对烃源岩有机质丰度具有重要的控制作用。珠江口盆地不同地区珠海组烃源岩的有机质组成对比分析表明,从珠 I 坳陷到珠 II 坳陷再到 ODP1148 站,有机质中煤质、木质体含量逐渐降低,而壳质体和孢质体含量逐渐增大,TOC 随着煤质、木质体含量降低也逐渐降低^[27],揭示了陆源有机质的重要作用。因此,陆架边缘三角洲除自身的泥岩是优质烃源岩外,也为海相泥岩带来了丰富的有机质。H2 井珠海组有机质以煤质、木质和壳质为,其中煤质、木质占优,表明其陆源高等植物为其主要有机质来源。从 TOC 上看,钻遇珠海组陆架边缘三角洲的 W1、W3 及 H2 井的 TOC 值均在 0.5% 以上,大部分大于 1%,而钻遇海相泥的 H1 及 W2 井 TOC 基本上小于 1%、部分小于 0.5%(图 9),表明陆源有机质随着

与物源区距离的增大逐渐降低。

5.2 陆架边缘三角洲的储层意义

陆架边缘三角洲为远源的硅质碎屑沉积,自身可以作为良好的储集层,同时由于其位于陆架坡折附近,地形较陡,容易产生滑塌、滑移作用形成各类深水扇体。在珠江口盆地深水区,珠海组陆架边缘三角洲是重要的勘探目的层,LW3-1、LH34-2 等油气田或含油气构造发现了多套以陆架边缘三角洲砂岩为储集体的油气层,其中 LW3-1 气田在珠海组发现 4 套气层(图 3W1 井),累计厚度达 61 m,控制地质储量 101×10⁸ m³。珠海组陆架边缘三角洲的水下分流河道、河口坝沉积主要为灰色中—细粒砂岩及浅灰色粉—细粒砂岩,具有良好的储集物性。深水区 H3、W1、W3 等多口钻井样品资料分析表明,珠海组陆架边缘三角洲砂体孔隙度在 12.2%~26.7%之间,渗透率在 7.6~1 000×10⁻³ μm² 之间(图 8B),其中 W1 井孔隙度为 10%至 20%,渗透率为 100×10⁻³ μm² 至 10 000×10⁻³ μm²,为一套中低孔中高渗储层^[25]。珠海组陆架边缘三角洲砂体主要发育于顶积层(图 2),地震剖面上呈强振幅中频连续反射,分布于陆架坡折点向陆方向,地震属性图上响应于强振幅异常,分布广泛、纵向厚度较大,为一套优质储层(图 10)。

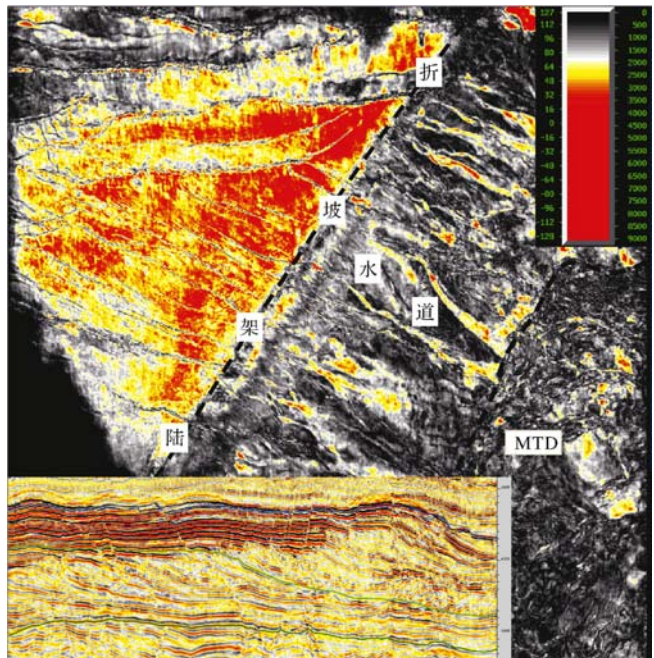


图10 珠海组内部界面均方根振幅属性(工区见图1)

Fig.10 RMS amplitude attribute of inner boundary in Zhuhai Formation

陆架边缘三角洲前缘发育的各类深水水道及扇

体也是有利的勘探目标。珠海组沉积中晚期经历了多期次强烈海平面下降,同时物源供给充沛,具备发育大型深水扇体的有利条件。白云南洼东段陆坡坡度较陡,陆架边缘三角洲规模较大,其前端发育的深水扇体从白云南洼一直延伸至荔湾凹陷,目前已经W5井钻井证实。该扇体在珠海组内部界面的均方根振幅属性图上存在明显响应,在陆架坡折带向海一侧发育多条深水水道,形态弯曲,呈典型的强振幅异常,水道前端发育块体滑塌沉积(图10)。鹤山凹陷陆架边缘三角洲前缘也发育多个深水扇体,三角洲内部可见多期下切谷,为深水扇体的物源通道(图4d)。凹陷东侧扇体规模较大,面积达500 km²,剖面上呈双向上超充填结构,内部响应于强振幅中频差连续反射,纵向厚度约为200 ms,被呈弱反射的深水泥质沉积物包围,为有利的岩性圈闭体(图11)。

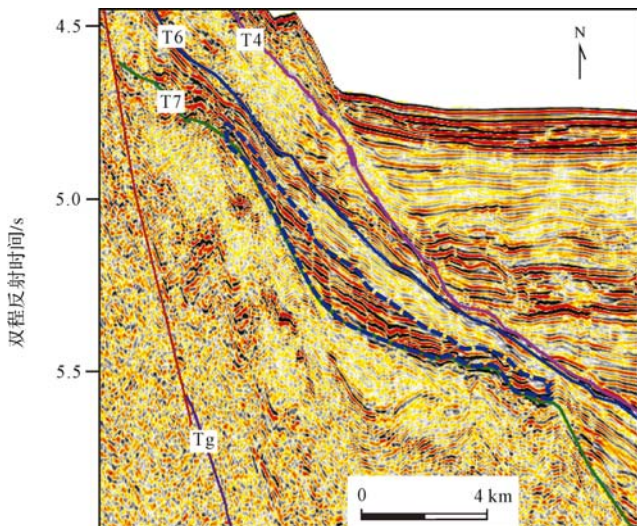


图11 鹤山凹陷珠海组深水扇(位置见图1f)

Fig.11 Deep-water fan in Zhuhai Formation, Heshan sag

6 结论

(1) 珠江口盆地深水区珠海组发育大型陆架边缘三角洲,北东向条带状展布于白云凹陷至鹤山凹陷一带,整体东北窄西南宽,地震上表现为大型S型、斜交或叠瓦状前积结构,前积体水平延伸距离长、落差大,钻井上揭示为厚层反旋回叠置的水下分流河道、河口坝、席状砂与前三角洲泥互层沉积,前端过渡为陆坡深水泥岩、页岩沉积。

(2) 不同区段陆架边缘三角洲具不同规模与结构,白云凹陷段三角洲规模相对较小,以斜交前积为主;白云南洼东段发育多期次大规模三角洲,呈S型前积结构,顶积层为厚层水下分流河道、河口坝沉积,

前端发育深水水道与深水扇;南部隆起段三角洲以斜交、叠瓦状前积为主,规模较小;鹤山凹陷段发育于隆起与凹陷转换带,三角洲规模较大,以S型前积结构为主,水下分流河道、河口坝沉积发育,前端形成了大型下切谷与深水扇。

(3) 陆架边缘三角洲的发育受构造活动、物源供给与相对海平面变化控制,构造活动促使深水区形成了稳定分布的陆架坡折带,古珠江携带的充沛物源与珠海组晚期强烈的相对海平面下降使碎屑沉积物能够进积至陆架坡折附近形成陆架边缘三角洲。

(4) 珠海组陆架边缘三角洲具有重要的油气勘探意义,其泥质沉积是一套中等—好的烃源岩,同时其为海相泥质烃源岩带来了丰富的陆源有机质,陆架边缘三角洲的河口坝、水下分流河道、席状砂是深水区重要的油气储层,分布广、厚度大,其前端发育的深水扇体是有利勘探目标。

参考文献 (References)

- 1 Plink-Björklund P, Steel R J. Sea level fall below the shelf edge, without basin-floor fans[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 115-118.
- 2 Porębski S J, Steel R J. Shelf-margin deltas: their stratigraphic significance and relation to deepwater sands [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62(3/4): 283-326.
- 3 Petter A L, Steel R J. Hyperpycnal flow variability and slope organization on an Eocene shelf margin, central basin, Spitsbergen[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(10): 1451-1472.
- 4 Covault J A, Romans B W, Graham S A. Outcrop expression of a continental-margin-scale shelf-edge delta from the Cretaceous Magallanes basin, Chile[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(7): 523-539.
- 5 Suter J R, Berryhill H L Jr. Late Quaternary shelf-margin deltas, north-west Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(1): 77-91.
- 6 Muto T, Steel R J. In defense of shelf-edge delta development during falling and lowstand of relative sea level[J]. *The Journal of Geology*, 2002, 110(4): 421-436.
- 7 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 Petroli Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.]
- 8 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*, 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*, 2012, 37(4): 655-664.]
- 9 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*, 2010, 35(4): 681-688. [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*, 2010, 35(4): 681-688.]
- 10 徐强,王英民,吕明,等. 陆架边缘三角洲在层序地层格架中的识别及其意义——以南海白云凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(5): 733-742. [Xu Qiang, Wang Yingmin, Lü Ming, et al. Identification of the shelf margin delta in sequence stratigraphic frameworks and its significance: A case study of the Baiyun sag, South China Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(5): 733-742.]
- 11 易雪斐,张昌民,李少华,等. 珠江口盆地 NSQ2 陆架边缘三角洲的识别标志及沉积模式[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2012, 39(3): 257-261. [Yi Xuefei, Zhang Changmin, Li Shaohua, et al. Identification marks and depositional model of the shelf-margin delta from NSQ2 of the Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2012, 39(3): 257-261.]
- 12 王永凤,王英民,李冬,等. 陆架边缘三角洲沉积特征研究及其油气意义[J]. *海洋地质前沿*, 2010, 27(7): 28-33. [Wang Yongfeng, Wang Yingmin, Li Dong, et al. Depositional characteristics of shelf-margin deltas and their petroleum significance[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2010, 27(7): 28-33.]
- 13 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.]
- 14 Kolla V, Biondi P, Long B, et al. Sequence stratigraphy and architecture of the Late Pleistocene Lagniappe delta complex, northeast Gulf of Mexico [C]//Hunt D, Gawthorpe R L. *Sedimentary Responses to Forced Regressions*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 2000, 172(1): 291-327.
- 15 Januszczak N, Eyles N. ODP drilling leads to a new model of shelf and slope sedimentation along the Antarctic continental margin [J]. *Geoscience Canada*, 2001, 28(4): 203-210.
- 16 Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea, implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 - 2012), 1993, 98(B4): 6299-6328.
- 17 庞雄,陈长民,邵磊,等. 白云运动:南海北部渐新统一中新世重大地质事件及其意义[J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 145-150. [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): 145-150.]
- 18 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): 19-25. [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): 19-25.]
- 19 邵磊,庞雄,陈长民,等. 南海北部渐新世末沉积环境及物源突变事件[J]. *中国地质*, 2007, 34(6): 1022-1031. [Shao Lei, Pang Xiong, Chen Changmin, et al. Terminal Oligocene sedimentary environments and abrupt provenance change event in the northern South China Sea [J]. *Geology in China*, 2007, 34(6): 1022-1031.]
- 20 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.]
- 21 邵磊,雷永昌,庞雄,等. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2005, 33(9): 1177-1181. [Shao Lei, Lei Yongchang, Pang Xiong, et al. Tectonic evolution and its controlling for sedimentary environment in Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2005, 33(9): 1177-1181.]
- 22 Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129-147.
- 23 McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- 24 秦国权. 珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变化[J]. *中国海上油气:地质*, 2002, 16(1): 1-10. [Qin Guoquan. Late Cenozoic sequence stratigraphy and sea-level changes in Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 2002, 16(1): 1-10.]
- 25 吕成福,陈国俊,张功成,等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组碎屑岩储层特征及成因机制[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2011, 42(9): 2765-2773. [Lü Chengfu, Chen Guojun, Zhang Gongcheng, et al. Reservoir characteristics of detrital sandstones in Zhuhai Formation of Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(9): 2765-2773.]
- 26 Meckel L D. Shelf margin deltas: the key to big reserves [C]//Roberts H H, Rosen N C, Fillon R H, et al. *Proceedings of the 23rd Annual GCSSEPM Research Conference*. [s.l.]: Gulf Coast Section SEPM, 2003: 167-204.
- 27 李友川,邓运华,张功成,等. 南海北部第三系海相烃源岩[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 219-225. [Li Youchuan, Deng Yunhua, Zhang Gongcheng, et al. Tertiary marine source rocks in the northern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 219-225.]

The Shelf-margin Delta Feature and Its Significance in Zhuhai Formation of Deep-water Area, Pearl River Mouth Basin

ZENG QingBo¹ CHEN GuoJun² ZHANG GongCheng¹ JI Mo¹
HAN YinXue¹ GUO Shuai¹ WANG LongYing¹

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028;

2. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: A shelf-margin delta is built up on shelf-margin, where sediments pass across the shelf break and settle down to form the delta. Oil richness of shelf-margin delta has been confirmed by exploration in the world for its wide distribution and well-developed reservoirs. Based on analysis of seismic and drilling data, distribution and architecture of large shelf-margin delta in Zhuhai Formation in deep-water area have been systematically studied for the first time, as well as the main control factors and exploration significance. With “S”, oblique and imbricated progradation configuration in profile, interbedding of underwater distributary channel, mouth bar, sand sheet and prodelta clay on wells, the large shelf-margin delta striking NE is located in Baiyun and Heshan sag. In Baiyun sag, this delta is relatively small with mainly oblique progradation configuration. The delta in South Baiyun depression developed deepwater channel and fans with “S” progradation configuration. The segment in southern uplift show oblique and imbricated progradation configuration. In Heshan sag, the delta developed incised valley and fans with “S” progradation configuration. Shelf break developed firmly in deepwater area for quiescence of tectonic movement in Late Oligocene. Shelf-margin delta developed because of the abundant sediment from Paleo-Pearl River and falling of relative sea-level. The delta takes abundant terrestrial organic matter to marine mudstone and, moreover, mudstone in the delta is fair-good source rock. With wide distribution and big thickness, underwater distributary channel, mouth bar and sand sheet in shelf-margin delta are significant reservoir in deepwater area and the deepwater fans before delta are profitable target.

Key words: shelf-margin delta; main control factors; Zhuhai Formation; Deep-water area in Pearl River Mouth Basin