

文章编号:1000-0550(2017)05-0945-13

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.007

陆架边缘三角洲研究进展及实例分析

朱筱敏¹,葛家旺¹,赵宏超¹,袁立忠²,刘军²

1.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

2.中海石油(中国)深圳分公司研究院,广东深圳 518067

摘要 自上世纪90年代以来,发育在大陆架边缘的一种特殊类型的三角洲(shelf-edge delta),因其厚度大,分布面积广,储层物性好,常常与陆坡深水扇体伴生,成藏条件好等特点而引起了广泛关注,成为当前国际沉积学界研究的热点和油气勘探新领域。陆架边缘三角洲一般形成于相对海平面下降或低位时期,主要受控于物源供给、可容纳空间和气候变化,并受到陆坡构造活动影响;也可发育在高位时期,受到波浪与潮汐的影响。前人提出了利用陆架边缘迁移轨迹预测深水沉积和基于陆架斜坡发育模式预测深水沉积的模型,即强烈抬升的陆架边缘迁移轨迹、强烈加积的陆架斜坡发育模式,对应的深水区物质传输体系为泥质;水平—轻微下降的陆架边缘迁移轨迹、强烈前积的陆架斜坡发育模式,预示着大量砂体被搬运至深水区;轻微抬升的陆架边缘迁移轨迹、加积与前积的陆架斜坡发育模式,暗示深水沉积砂体发育介于上述二者陆架边缘迁移与深水扇预测模式之间。陆架边缘三角洲—深水扇规模砂体毗邻优质烃源岩,具备多种类型的油气运移通道,成藏条件良好,是油气勘探的有利领域。实例分析表明,渐新世珠海组沉积时期构造相对稳定,在古珠江充足的供源条件下,南海北坡珠江口盆地鹤山凹陷发育陆架边缘三角洲并伴随陆架不断向海迁移而不断进积,S型前积体不断向海迁移,并在晚期发育下切谷及大型盆底扇沉积。鹤山凹陷珠海组沉积时期发育水平—轻微下降的陆架边缘迁移轨迹,对应于强烈前积的陆架斜坡发育模式,在珠海组沉积晚期发育较大规模叠合连片深水扇富砂沉积体系,是研究区极好的潜在油气勘探目标。

关键词 陆架边缘三角洲;深水扇;主控因素;预测模型;鹤山凹陷;南海北部

第一作者简介 朱筱敏,男,1960年出生,博士,教授(博导),层序地层学及沉积地质学,E-mail: xzmzhu@cup.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

三角洲的研究历史已逾百年。从1885年开始,美国地质调查局Gilbert^[1]就对Bonneville湖更新世三角洲进行了相关研究。此后,针对三角洲的研究集中于静态描述,强调了外部三角洲的几何形态及搬运通道和沉积物粒度等,如Fisher *et al.*^[2]根据河道发育与海洋再改造程度之间的关系,将三角洲分为建设性三角洲和破坏性三角洲。Edwards^[3]研究美国德克萨斯州Wilcox Rosita三角洲时提出了陆架边缘三角洲的概念,强调了陆架上三角洲迁移与生长断层之间的动态关系。Penland *et al.*^[4]首次将相对海平面变化纳入到三角洲的分类研究中,标志着三角洲的概念从静态的描述演变到强调海平面变化的动态三角洲研究。众多学者研究表明,物源和海平面变化是陆架边缘三角洲的发育过程中的重要控制因素,并将陆架边缘三角洲和陆坡深水盆地纳入到一体化研究中。陆架边缘三角洲可分为物源控制型、海平面控制型和

两者混合控制型^[4-6]。

陆架边缘三角洲是指发育于大陆架边缘的一种特殊类型的三角洲,常常发育于海平面下降或低位期间,随着物源不断向陆坡方向推进,陆架坡折也逐渐向远陆方向迁移。根据海平面变化、物源供给、内部重力诱导机制的强弱,可将陆架边缘三角洲划分为稳定型陆架边缘三角洲和不稳定型陆架边缘三角洲^[6]。陆架边缘三角洲的存在使大量砂质沉积物通过陆架搬运至斜坡等深水区,为烃类的聚集提供有利储层砂体。它的形成条件、沉积特征及其与深水扇体的关系是当前国际沉积学术界研究的热点^[7-16]。近十年来,陆架边缘三角洲及其与深水扇关系的研究,逐步由定性、半定量研究向定量化和系统化方向发展。Gong *et al.*^[17-19]最近系统提出了物源供给、可容纳空间和气候变化的三因素陆架边缘划分体系,还提出了基于陆架斜坡发育样式和陆架边缘迁移轨迹预测深水沉积模型,有益推动了陆架边缘三角洲—深水扇沉积体系的定量化研究。另外,海平面高位时期陆

收稿日期:2017-05-16; 收修改稿日期:2017-06-30

基金项目: 国家科技重大专项子项目(2011ZX05025-005-02); 国家自然科学基金项目(41272133) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2011ZX05025-005-02; National Natural Science Foundation of China, No. 41272133]

架边缘三角洲的形成条件,及其与波浪潮汐等控制作用也得到了越来越多的关注^[6,10,20]。

陆架边缘三角洲的类型和及其与深水扇体的关系较为复杂,并受到构造活动、海平面升降、物源供给、水动力条件和气候变化等诸多因素的影响^[6,10,17]。不同的地质条件陆架边缘三角洲—深水扇的发育和及其相互关系具有差异性。因此,系统研究陆架边缘三角洲的形成背景、沉积特征和主控因素以及陆架边缘三角洲沉积模型,对深化三角洲沉积理论体系和扩大油气勘探领域均具有重要的意义。笔者通过调研陆架边缘三角洲最近的研究进展,结合南海北区深水区鹤山凹陷渐新世珠海组陆架边缘三角洲—深水扇的研究,探讨了厚层大规模陆架边缘三角洲的沉积特征、演化规律和控制因素,不仅丰富了中国海相沉积盆地陆架边缘三角洲的理论研究,而且为南海北坡渐新世以来发育的陆架边缘三角洲—深水扇的研究提供了参照。

1 陆架边缘三角洲的分类及发育条件

1.1 陆架三角洲和陆架边缘三角洲分类

Porebski 和 Steel^[6]根据海平面的变化,将海相三角洲划分为内陆架三角洲、中陆架三角洲、陆架边缘三角洲和湾头三角洲。内陆架三角洲(inner-shelf delta)形成于海平面高位时期,进积伴随加积层序,发育在大陆架内部;中陆架三角洲(mid-shelf delta),形

成于海平面下降时期,水体退至大陆架中部,发育向下坡推进的进积层序;陆架边缘三角洲(shelf-margin delta),形成于海平面相对下降阶段,水体退至大陆架边缘,发育前积到退积的层序样式;湾头三角洲(bay-head delta)形成于海平面相对上升初期,发育后退式前积(图1)。宏观上,受不同地质因素影响,形成具有不同时空展布特征的海相三角洲沉积体系;微观上,不同类型的陆架三角洲沉积相带发育情况、发育控制因素等方面存在差异(表1)。

陆架边缘三角洲常形成数十千米宽、数百米高以及 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 的斜坡坡度,一般认为三角洲越过陆架到达陆架边缘主要有两种机制:一种是在海平面相对稳定的情况下,硅质碎屑流的搬运(不常见),另一种是在海平面相对下降发生海退作用的情况下,正常沉积物流的搬运(常见),即海平面下降/强物源供给模式^[6]。依据陆架边缘和上斜坡是否发生断层活动,可将陆架边缘三角洲划分为不稳定型(Unstable shelf-margin deltas,图2a)和稳定型(Stable shelf-margin deltas,图2b)三角洲。不稳定型陆架边缘三角洲常以厚层沉积物(几百米)、伴生同生断层和沿着斜坡的反转活动为识别特征,通常具有较大的可容空间,在物源供给充足,海平面下降至陆架边缘以下时,直接将沉积物搬运至盆地形成盆底扇;而稳定型陆架边缘三角洲常发育平缓的陆架边缘,不发育断层,不发育大规模的垮塌沉积体,不发育斜坡反转滑动,大多海平面下降至低水位阶段

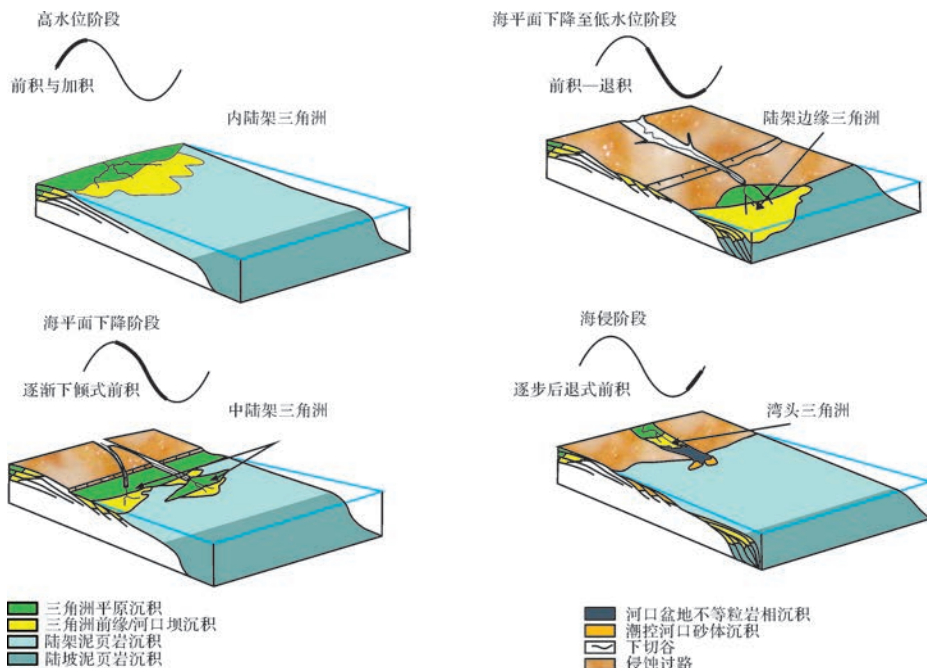


图1 基于海平面变化的海相三角洲分类体系及层序样式(据 Porebski 和 Steel^[6])

表1 陆架三角洲分类及特征(据 Porebski 和 Steel^[6])

Table 1 The classification and their characteristics of shelf-edge delta(after Porebski and Steel^[6])

	湾头三角洲	内陆架三角洲	中陆架三角洲	陆架边缘三角洲
外形	漏斗形	鸟足状,尖舌状	常改造成豆芽状	走向延伸朵叶状
斜坡坡度	不详	<0.001°	<0.5°,最大达到8°	通常3°~6°,最大可达到8°
斜坡高度				几百米,最大厚度在陆架坡折;
加厚趋势	几米;向陆方向	几十米;向陆方向	几十米;向海方向,或不明显	向海方向
三角洲前缘主要的能量形式	河流;可受潮汐影响	河流、波浪、潮汐	河流或波浪	河流或波浪;低水位晚期,潮汐影响可能比较重要
三角洲上部发育的沉积相	分流河道	三角洲平原; 厚层分流河道砂体	薄层—缺失三角洲平原;下切谷体系下部的厚层分流河道砂体;侵蚀过路普遍	缺失三角洲平原,薄层的分流河道;侵蚀过路普遍
三角洲斜坡发育的沉积相	不等粒岩相(heteroliths);发育波纹层理的前积层	根据三角洲前缘沉积方式不同而多样化	砂岩—不等粒砂岩前积层;少见浊积岩	砂岩—不等粒砂岩前积层;滑塌嵌入前三角洲页岩中的河口坝砂体;高密度浊流;同生断层和底辟
上倾终端	近海沉积的交错相变	近海沉积的交错相变	中部陆架页岩上倾尖灭	外部陆架或陆坡上部页岩上倾尖灭
下倾终端	河口盆地中部不等粒砂岩尖灭	内陆架到中陆架的页岩尖灭	外部陆架页岩尖灭	陆坡页岩尖灭
斜坡坡折带迁移轨迹	向陆抬升—向海盆抬升	向海盆抬升	水平—向海盆下降	向海盆下降;向陆加积抬升
体系域	海进体系域	高位体系域	下降阶段体系域	下降阶段—低位体系域

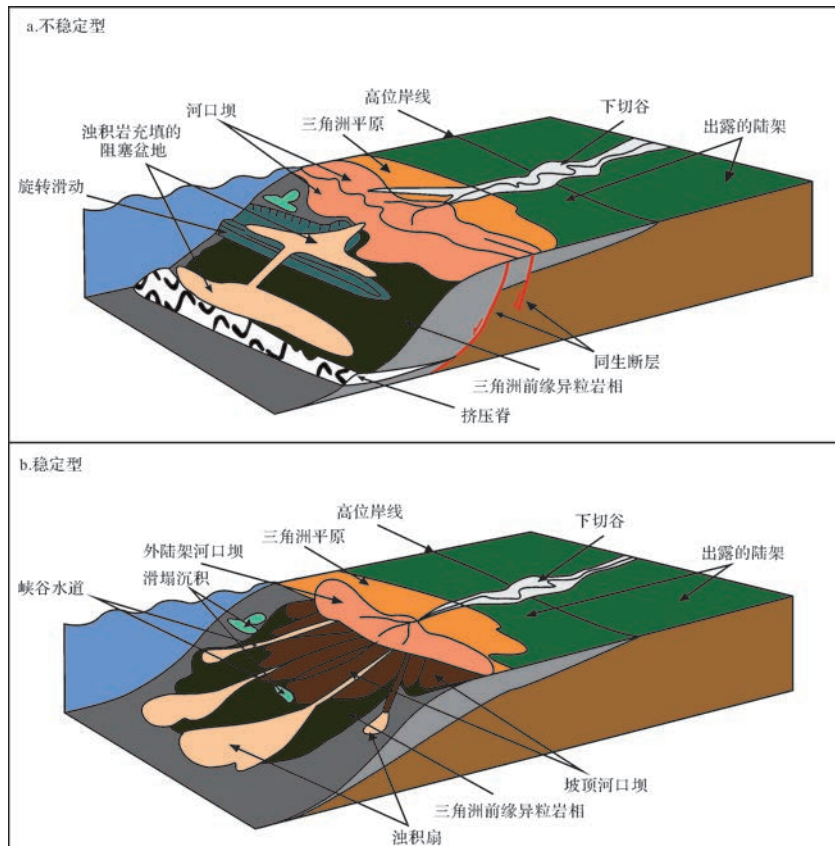


图2 不稳定型(a)和稳定型(b)陆架边缘三角洲沉积模式(据 Porebski 和 Steel^[6])

Fig.2 Depositional facies model of the instable and stable shelf-edge delta (after Porebski and Steel^[6])

数第四纪陆架边缘三角洲属于此类范畴^[6]。

位于南海北坡的白云凹陷渐新世发育大型陆架边缘前积体,前积反射的顶超面与下超面落差可达500 m,水平延长可达数千米,陆架边缘为最大的沉降、沉积中心,往往由向海、向陆分布延伸出两个斜坡楔形体^[12]。前人等基于近期新钻井、精细三维地震资料解释研究,进一步揭示了陆架的形成和演化,将陆架边缘三角洲划分为物源型、海平面变化型以及混合型三角洲^[11-12,14]。他们认为,在海平面相对静止阶段,河流的强大物源供给不断向陆坡运移,可以使陆架坡折不断向远陆方向前进,同时在陆架坡折带及上陆坡形成陆架边缘三角洲沉积;在沉积物供给相对稳定时期,海平面相对下降至陆架坡折附近也可以使大量沉积物穿过广阔的陆架地区达到陆架坡折带甚至上陆坡^[11-12]。

1.2 陆架边缘三角洲发育的影响因素

1.2.1 物源供给、海平面升降与陆架宽窄

陆架边缘三角洲易发育于海平面下降阶段,如果物源供给充足、海岸平原和陆架坡度较缓、陆架宽度较大更利于陆架边缘三角洲的发育,但是 Uroza 和 Steel^[10] 在挪威 West Spitsbergen 地区始新世 Battfjellet 地层研究过程中,发现研究区河流流量较小,明显不能搬运大量沉积物,而且陆架边缘低速率的进积伴随加积的层序可以表明该沉积时期为海平面高位时期。他们根据高度加积化的层序叠置、同时期三角洲平原和潟湖的保留以及地震图上显示的陆架轨迹持续抬升等方面特征,认为在河流流量小且海平面缓慢上升阶段(海平面高位时期),有利于陆架边缘三角洲发育的主控因素是小于 20 km 宽的相对狭窄陆架,而不是物源供给和海平面的变化。高位、窄陆架边缘三角洲通常不发育浊流和深水扇,没有广泛的不整合面和明显的层序边界;此外,高位体系域时期形成的陆架边缘三角洲往往会受到波浪和潮汐的影响,陆架地区波浪改造能力强,当越过陆架边缘向盆方向,波浪能量由高变低。因此,在低位域或者海平面下降时期形成的陆架边缘三角洲,波浪改造作用弱,其形态多呈港湾状;而海水位于高位时期,陆架更容易被海水淹没,相对平直开阔的陆架受到的波浪改造作用较为强烈,陆架边缘三角洲的形态往往呈平直状^[6,21]。高位陆架边缘三角洲岩性主要为细粒沉积物,砂岩分选变化大,发育交错层理及波状层理^[10]。

1.2.2 气候、波浪潮汐和同沉积断层作用

Maselli *et al.*^[22] 认为气候变化也是影响陆架边缘

三角洲的一个因素。冰川融化,会造成海平面升高,难以形成大规模的陆架边缘三角洲;热带飓风具有更强的搬运能力,高于平均值的热带飓风活动是控制陆架边缘三角洲沉积供给的主要因素,有些热带飓风事件能将巨厚层的三角洲沉积物搬运堆积在较远距离的陆坡位置。

Carvajal *et al.*^[23] 认为深水区沉积砂体主要通过河流的搬运作用发生沉积聚集,波浪和潮汐作用对这一过程影响较小,但波浪和潮汐作用在海平面相对上升至陆架边缘及其上部时显著影响陆架边缘沉积建造。根据岩芯和地震资料,Bourget *et al.*^[20] 认为波浪或者潮汐控制的、河流影响的三角洲是第三纪沉积的特征,一个波浪或潮汐控制、河流影响的陆架边缘三角洲分类与最后大冰期陆架边缘古地貌的恢复模拟有良好的相关性。

Olariu *et al.*^[24] 认为同生断层影响了沉积路径并控制沉积体系分布,同时还为陆架边缘三角洲的沉积提供可容空间。他们认为高沉积物供给更容易在同生断层的下降盘聚集较厚层沉积物,生长型外陆架发育的波浪主控型三角洲砂体,对于上陆坡地貌具有建设作用,降低了发育和保存深水扇的可能性。高度生物扰动的泥质粉砂岩与分米级丘状交错层理纯净砂岩互层表明了快速沉积作用过程。

1.3 陆架边缘—深水扇沉积建造

Yoon *et al.*^[25] 认为控制陆架边缘三角洲的主控因素为海平面、构造活动和沉积供给,其中海平面的升降以及构造活动影响可容纳空间。Gong *et al.*^[19] 根据全球 48 个典型的陆架边缘三角洲沉积特征调研分析,认为主控陆架边缘三角洲的因素为物源供给(Q_s)、可容空间($\delta(x)$)和气候变化(图 3),不同的控制因素形成的陆架边缘迁移、三角洲和深水扇具有不同的沉积建造。

(1) 在气候寒冷和物源供给较少的条件下,低可容纳空间,陆坡可发育砂岩、浊积岩,富含砂质的海底扇;中等可容纳空间,发育海底水道峡谷,泥质的斜坡和盆地平原;高可容纳空间,深水区沉积大量泥质沉积物。

(2) 在气候寒冷和物源供给较多的条件下,低可容纳空间,陆坡发育砂岩、浊积岩,富含砂质的海底扇;中等可容纳空间,发育浊积岩朵叶体、水道—天然堤复合体,三角洲前缘,高水位情况下的浊积扇朵叶—水道充填复合体的海底扇;高可容纳空间,以三角洲前缘和海侵形成的泥岩为主。

(3) 在气候温暖和物源供给较少的条件下,低可容纳空间,陆坡发育厚层砂体,砂质盆底扇(图4);中等和较高可容纳空间,发育泥质陆坡、盆底扇平原。

(4) 在气候温暖和物源供给较多的条件下,低可容纳空间,发育分布面积广泛、厚度大、体积大的盆底扇,砂质河道充填;中等可容纳空间,发育砂泥交互的沉积体系,海底扇有浊积岩朵叶、水道充填,深水泥质沉积;高可容纳空间,泥质沉积物增多。

2 陆架边缘迁移轨迹和斜坡叠置样式

陆架边缘迁移轨迹(Shelf edge trajectories,下文简称 T_{se})反映了地层叠加样式,可以用来描述层序地层格架构成特征和变化规律^[7]。对于陆架斜坡体(Shelf clinofolds),Johannesson *et al.*^[26]对组成成分进行了界定:陆架斜坡由两部分组成,其上为陆架部分

的斜坡沉积体,代表了海退或海进沉积物搬运经过的低坡度的陆架平台,通常陆架部分坡度缓,小于 0.1° ;其下为陆坡部分的斜坡沉积体,由陆架边缘坡折处到陆坡底部深水区的沉积体组成,平均坡度略大(通常 $3^\circ \sim 6^\circ$)。陆架边缘迁移轨迹可分为抬升型与平缓型。前者为受到波浪控制的三角洲将沉积物加积在陆架边缘之上,少有砂体沉积在大陆斜坡或者深水区;后者主要由河流控制的三角洲将沉积物主要以前积的方式输送至陆坡甚至深水区,且当陆架边缘存在水道充填或者下切谷时,暗示斜坡富含砂体且盆底扇富含砂体,当陆架边缘不存在水道充填时,暗示仅斜坡存在砂体沉积。当陆架斜坡仅发育上半部分时,陆坡至深水区主要覆盖泥质沉积;当陆架斜坡下半部分也较为发育时,盆底扇趋向于砂质沉积(图5)。

Gong *et al.*^[17]基于中国琼东南盆地陆架边缘三

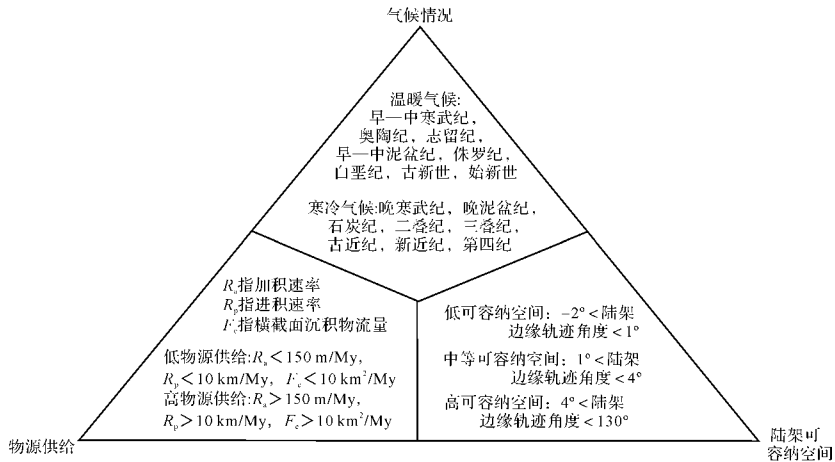


图3 陆架边缘三角洲主控因素与建造格局(据 Gong *et al.*^[19])

Fig.3 The major controlled factors and buildup of the shelf-edge delta (after Gong *et al.*^[19])

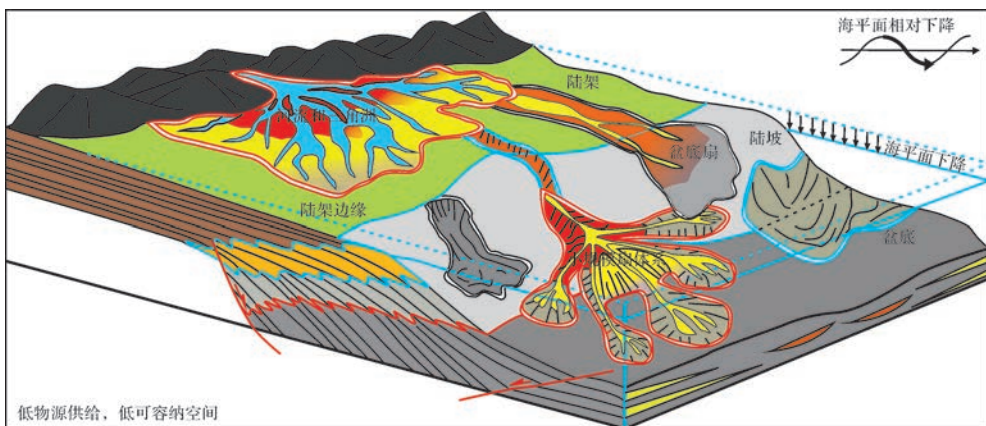


图4 低物源供给、低可容纳空间和温暖气候条件下陆架边缘三角洲—深水扇沉积模式(据 Gong *et al.*^[19])

Fig.4 Shelf-edge delta and deep-water fan depositional model dominated by a warm climate, low rate of sediment supply and low accommodation space (after Gong *et al.*^[19])

角洲的研究:1)提出了 T_{se} 和地层叠加样式与同时期的深水砂岩体积规模的定量关系;2)建立了 T_{se} 与富含砂体环境、斜坡砂体沉积规模的定量关系。利用 T_{se} 客观分析描述侧向和垂向的陆架边缘迁移轨迹后,得出三类定量表征的 T_{se} 和地层叠加样式模型。值得说明的是,其公式原理主要是利用直角三角形中的角度与 \arctan 的关系进行换算的。 $T_{se} = \arctan(dy/dx)$; dy 指代垂向加积高度,单位 m; dx 指代侧向的前积或者退积长度,单位 m。在计算过程中,先计算出垂直加积高度与水平进积距离比值,即陆架边缘轨迹迁移角度对应的正切值,此时是以弧度为单位。然后利用 $\text{degrees}(\arctan(dy/dx))$ 计算得出十进制的陆架边缘迁移轨迹角度; R_c (Clinoform relief) 指代斜坡体高度,单位 m; A_s 指代陆架、浅水沉积的加积组分高度,单位 m; A_b 指代深水盆底沉积加积组分高度,单位 m。同理,可计算轨迹增长角度 (Growth-trajectories gradient, G_{ct}), $G_{ct} = \arctan(dy/dx)$ 。

(1) 定性分析,水平—轻微下降的 T_{se} ,向下叠加前积的地层层序;定量描述, $-2^\circ < T_{se} < 0^\circ$, $-0.04 < dy/dx < 0$, $150 \text{ m} < R_c < 550 \text{ m}$, $-0.6 < A_s/A_b < 0$;指示规模大,富砂重力流,厚层大体积的富含砂体的海底扇沉积体系(图 6a)。

(2) 定性分析,轻微抬升的 T_{se} ,前积、加积叠加的地层层序;定量描述, $0^\circ < T_{se} < 2^\circ$, $0 < dy/dx < 0.04$, $250 \text{ m} < R_c < 400 \text{ m}$, $0 < A_s/A_b < 0.6$;指示砂泥混合的重力流,中等规模的斜坡砂质沉积体系(图 6b)。

(3) 定性分析,强烈抬升的 T_{se} ,主要是加积叠加的地层层序;定量描述, $2^\circ < T_{se} < 6^\circ$, $0.04 < dy/dx < 0.10$, $350 \text{ m} < R_c < 650 \text{ m}$, $1 < A_s/A_b < 2$;指示广泛的泥质传输体系(图 6c)。

斜坡发育样式代表特定的地层叠加样式,为有效预测或建立“源—渠—汇”系统提供了一种实用的模拟地层层序的独立模型方法。基于中国南海的数据分析,Gong *et al.* [18] 认为:

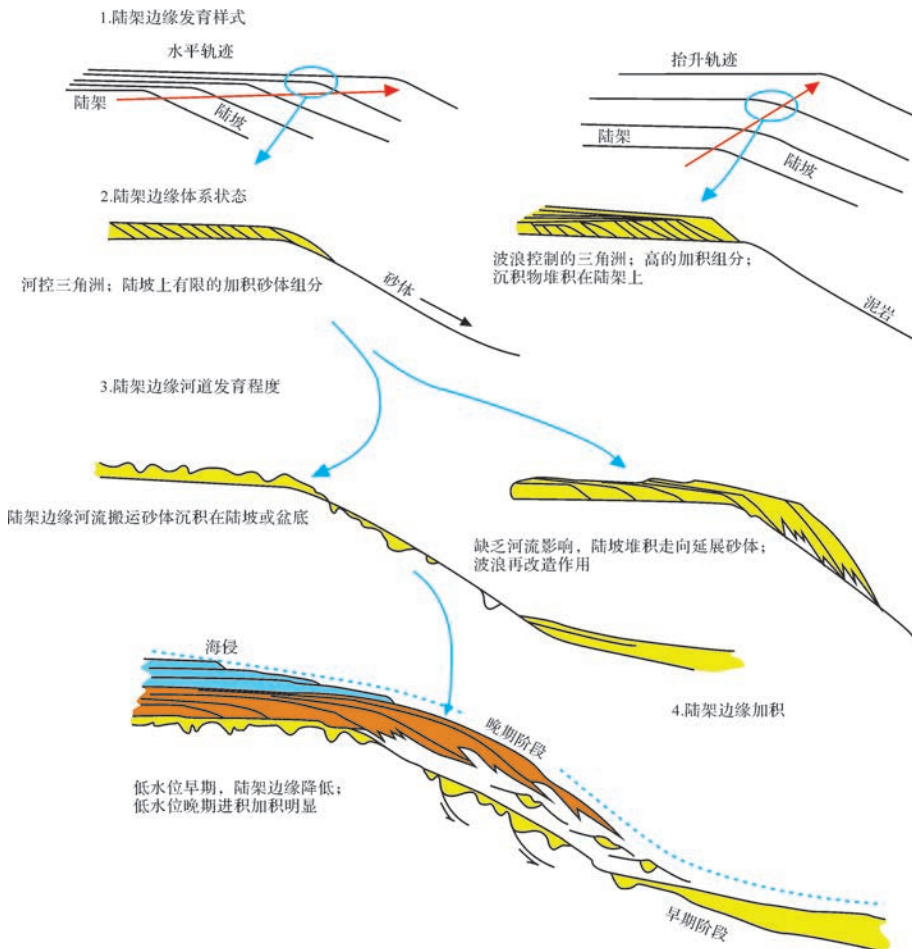


图5 陆架边缘迁移轨迹、层序样式及沉积特征(据 Johannesson 和 Steel [26])

Fig.5 Shelf edge trajectories, sequence architecture associated with depositional patterns of shelf-edge delta linked with deep-water fans (after Johannesson and Steel [26])

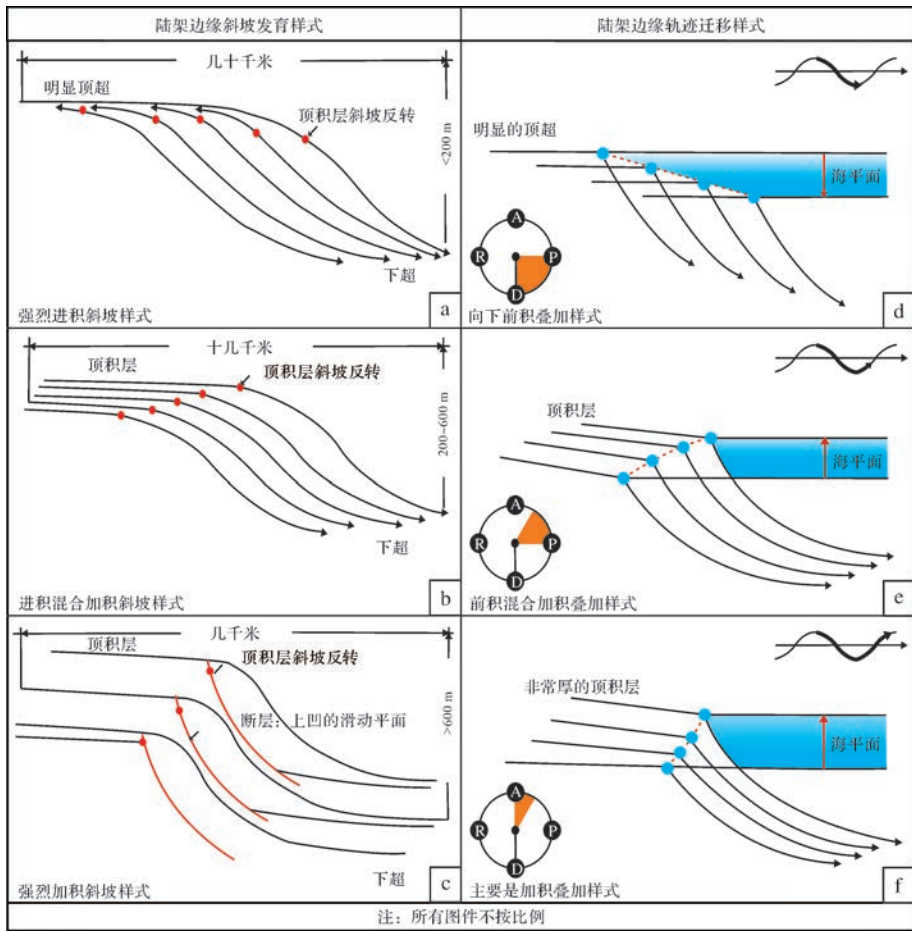


图6 陆架边缘斜坡发育样式及其对应的陆架边缘轨迹迁移样式 (据 Gong *et al.* [17-18])

Fig.6 The patterns of shelf edge clinoforms and their relationship with trajectories styles (after Gong *et al.* [17-18])

(1) 强烈进积的陆架边缘斜坡, 低的轨迹增长角度 (G_{ct}), 低的加积高度/进积长度比值 (A/P), 低的斜坡高度 (H_c), 长的斜坡延伸距离 (L_c) (图 6d); 会搬运大量沉积物到深水区, 形成明显的顶超, 海底扇沉积体系具有高砂岩/页岩比例。

(2) 进积混合加积的陆架边缘斜坡, 中等的轨迹增长角度 (G_{ct}), 中等的加积高度/进积长度比值 (A/P), 中等的斜坡高度 (H_c), 中等的斜坡延伸距离 (L_c) (图 6e); 会搬运适量沉积物到陆坡, 形成砂泥混合沉积的海底峡谷沉积体系, 中等的砂岩/页岩比例。

(3) 强烈加积的陆架边缘斜坡, 高的轨迹增长角度 (G_{ct}), 高的加积高度/进积长度比值 (A/P), 高的斜坡高度 (H_c), 短的斜坡延伸距离 (L_c) (图 6f); 会搬运大量沉积物到陆架坡折带附近; 在斜坡和深海平原形成泥质沉积为主的物质传输体系, 具有低的砂岩/页岩比例。

笔者分析认为, 上文提出的利用陆架边缘迁移轨迹预测深水沉积和基于陆架斜坡发育模式预测深水沉积模型的原理是相通的, 即强烈抬升的陆架边缘迁移轨迹、强烈加积的陆架斜坡发育模式, 均暗示深水区的物质传输体系偏泥质; 水平—轻微下降的陆架边缘迁移轨迹、强烈前积的陆架斜坡发育模式, 均暗示大量砂质沉积物被搬运至深水区, 形成富含砂体的海底扇沉积体系; 轻微抬升的陆架边缘迁移轨迹、加积混有前积的陆架斜坡发育模式, 暗示深水沉积特征介于上述二者之间。

3 陆架边缘三角洲—深水扇砂体与油气勘探

墨西哥湾、印度哥伦比亚盆地和非洲海岸等陆架边缘三角洲沉积体系—深水扇的油气勘探不断获得成功, 极大的推动了石油工业的发展。陆架边缘三角洲砂体及其深水扇砂体是当前油气勘探的重点和热点,

陆架边缘三角洲具有成藏条件好、生储盖组合优越的特征。此外,位于南海北部陆坡区的白云—荔湾深水区,特别是白云凹陷北坡的一系列天然气发现和LW3-1气区的突破,带来了丰厚的经济效益,极大的推动了南海北坡陆架边缘三角洲—深水扇的油气勘探^[14-15,27-28]。

(1) 毗邻优质的烃源岩:烃源岩主要来源于两个方面,其一,深水区的厚层泥质沉积物,作为良好的烃源岩^[15];其二,被陆架边缘三角洲搬运的陆源有机质,大量的有机质等碎屑物质经过河流的搬运作用、潮汐作用、浊流^[9]、伴随偶尔的风暴沉积作用,最终沉降在深水区,在深水高压缺氧的环境下,形成烃源岩。

(2) 丰富的砂体储层:当陆坡坡度在 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 、延伸 $3\sim 8$ km、高度 $100\sim 250$ m时,在河口处发育细粒沉积物;当陆坡坡度大于 3° 、延伸 $1\sim 2$ km、高度 $10\sim 50$ m时,在河口处发育粗粒沉积物^[20,29-30]。陆架边缘三角洲的储层类型主要为陆架边缘三角洲前缘的河口坝、远砂坝、水下分流河道等中—细粒砂质沉积体^[15,31-32],以及在低可容纳空间的情况下形成的盆底扇砂质沉积体^[23]。陆架边缘三角洲本身的砂体以及重力流成因的浊积岩体均有良好的储集性能,可以较好的储集和富集油气。例如,珠江口盆地白云凹陷珠海组陆架边缘三角洲砂体,为灰色中粗粒岩屑长石砂岩,部分为灰色中—粗粒岩屑长石砂岩,储层孔隙度多为 $20\%\sim 25\%$,渗透率平均为 $731.7\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属于中—高孔高渗储层,储层条件较好^[12-13]。

(3) 多种类型的运移通道:陆架边缘三角洲作为陆坡深水沉积体系主要的物源供给,与深水区富集油气的盆底扇等深水沉积体存在着良好的“源—汇”关系^[14,27,33]。由于陆架边缘的独特性,三角洲体系进积到深水区时变得不稳定,这一点与稳定陆架上沉积的三角洲体系有很大的不同。不稳定三角洲产生了多种同沉积(早期)构造,包括生长断层、滑移断层以及许多的组合断层、底辟和重力滑塌构造。这些陆架边缘三角洲供给的滑塌扇体,常发育早期构造、地层超压以及分布广泛的储盖组合^[11]。因此,陆架边缘三角洲及深水扇体往往是极好的油气勘探目标。

4 陆架边缘三角洲实例分析

随着我国南海油气勘探程度的逐渐加深,珠江口盆地新生代陆架—陆坡区具有较为特殊的地质背景,特别是南海珠江口盆地白云凹陷深水扇、荔湾凹陷深

水扇油气勘探取得了重大突破,伴随陆架坡折迁移形成的陆架边缘三角洲—深水扇沉积系统已经成为了沉积地质学和石油地质学研究热点,针对琼东南盆地及珠江口盆地珠海组和珠江组陆架边缘三角洲的研究取得了不少成果^[11-15]。本文以珠江口盆地深水区鹤山凹陷古近系珠海组陆架边缘三角洲为研究实例,分析陆架边缘三角洲沉积特征和发育背景,探讨三角洲与深水扇的发育关系。

4.1 区域地质背景为陆架边缘三角洲形成有利条件

鹤山凹陷位于珠江口盆地南部坳陷带的西南部,现海水平均水深约 $2\ 000$ m,属于超深水区,是南海北部向超深水迈进的油气勘探新区(图7a)^[16,34]。该深水盆地(凹陷)发育了与浅水区相似的古新统一渐新统的陆相—海陆过渡相的裂陷期地层,以及新近系海相沉积的裂后期沉积地层^[35-36]。渐新世珠海组沉积时间跨度约 9.2 Ma,顶底分别由二级区域重大不整合面T60(距今 23.8 Ma)和T70(距今约 32 Ma)界定^[28]。研究区横跨珠江口盆地陆棚和陆坡,层序界面容易识别,依据典型的层序界面接触关系(削截、顶超、上超和下超),在珠海组内部识别ZHSB2、ZHSB3、ZHSB4、ZHSB5和ZHSB6五个三级层序界面,将珠海组划分为6套三级层序(图8)^[16]。

渐新世,深水区鹤山凹陷处于断拗转化阶段,即构造演化的相对稳定期,发育大陆边缘沉积盆地^[27-28],构建了稳定的陆架坡折及陆架边缘三角洲发育的构造基础。渐新世中晚期,珠江口盆地相对海平面继续下降,陆架坡折带继续向海盆方向推进(推进距离 $2.4\sim 8$ km),坡折带宽度依次变大(图7b)。南海开始扩张后,华南古珠江水系逐渐成为珠江口盆地最重要的区域性物源^[37],古珠江沉积物通量大($100\sim 40\ 000$ t/km²·a)^[15],为深水区的大型陆架边缘三角洲—深水扇发育提供了的充沛物质基础。珠海组发育大套斜交或S型前积反射,前端可见深水扇沉积,构成良好的“源—渠—汇系统”,具有形成大中型油气田的石油地质条件(图8)^[34,38]。

4.2 陆架边缘三角洲—深水扇发育及演化

4.2.1 陆架边缘三角洲—深水扇地震识别特征

珠江口盆地深水区鹤山凹陷尚无钻井资料,故本文充分利用二维地震资料开展研究。珠海组沉积时期,鹤山凹陷发育典型的陆架边缘三角洲及斜坡深水沉积体系。陆架边缘三角洲沉积体的地震反射表现为一组同相轴倾斜并向盆推进、与顶部和底部的同相轴呈角度相交或切线相交,整体具有斜交—S型前积

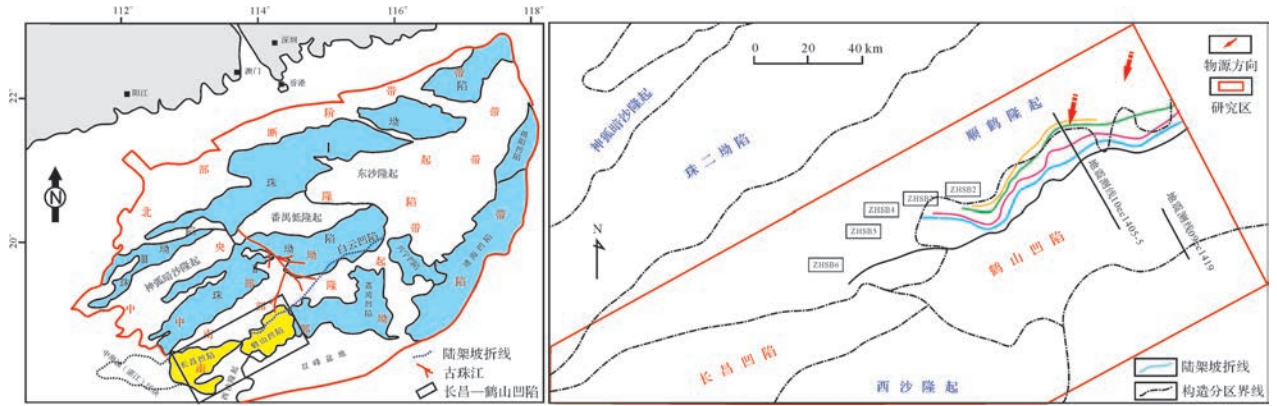


图7 珠江口盆地和鹤山凹陷工区位置图(a)及陆架边缘迁移规律(b)

Fig.7 The location of Heshan Depression and the distribution of shelf slope-break belts during different sequence deposition of the Zhuhai Formation(ZHSB2-ZHSB6) (the red arrows refer to the source direction)

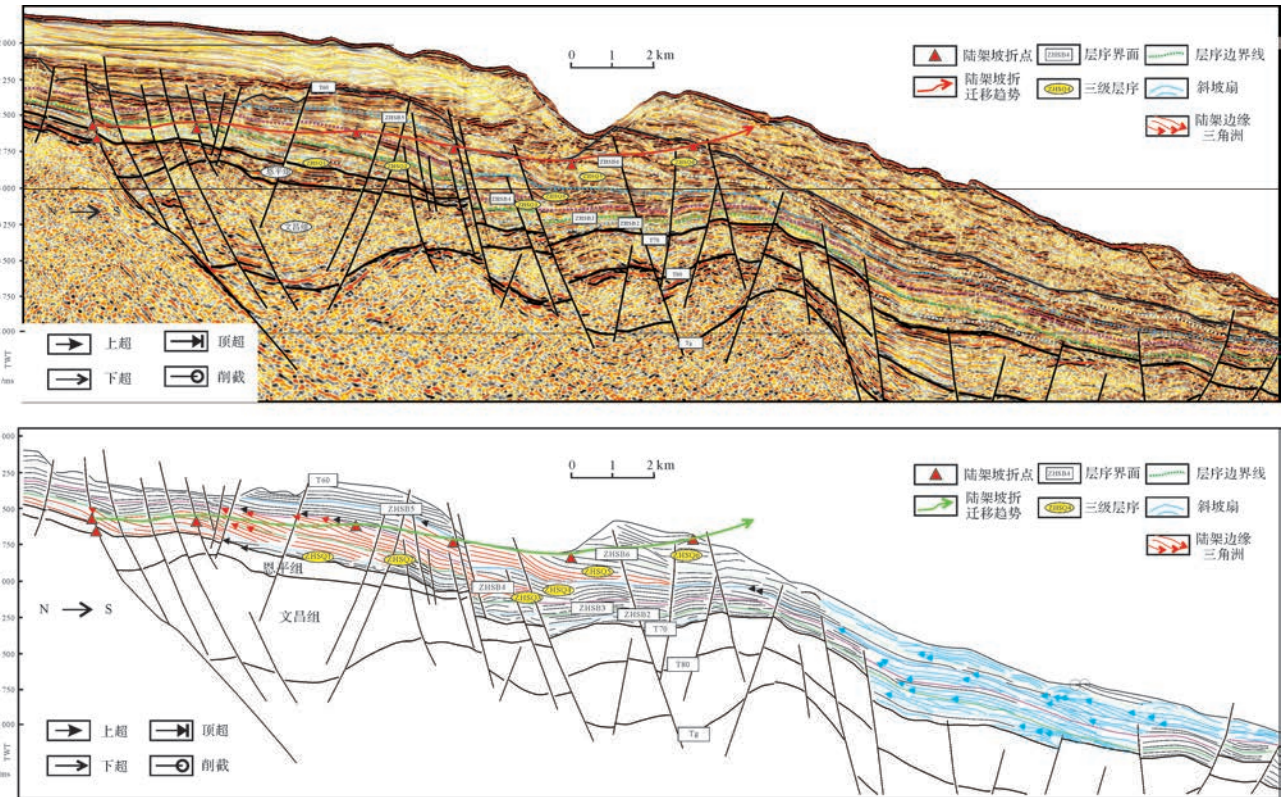


图8 鹤山凹陷 10ec1405-5 测线珠海组地震原始剖面(上)和层序、坡折点解释剖面(下)(测线位置见图7b)

Fig.8 The original seismic reflection profile (upper) and its interpretation of sequence and shelf break (below) of 10ec1405-5 line (seismic profile location shown in Fig.7b)

反射结构特征,地震振幅中等—强、连续性好,外形呈楔状,地震相常常与上部界面顶超接触,主要分布在陆架边缘、上斜坡等区域,下倾方向与浊积岩伴生,上倾方向过渡为浅海沉积。这些前积反射代表着海平面下降至陆架边缘附近(低位体系域),古珠江携带的沉积物迅速向海盆方向推进的过程。渐新世鹤山凹陷发育的陆架边缘三角洲多与大型的陆坡滑塌、铲

状生长断层相伴生(图9),也发育有底辟构造,在上陆坡普遍发育滑动滑塌及浊流沉积。根据 Porebski *et al.* [6] 等学者的分类,鹤山凹陷陆架边缘三角洲为不稳定陆架边缘三角洲类型。

深水扇地震反射通常表现为低幅上超地震相和丘形地震相。低幅上超地震相具有丘形外部形态、不规则亚平行内部结构、强振幅不连续的特征,常发育

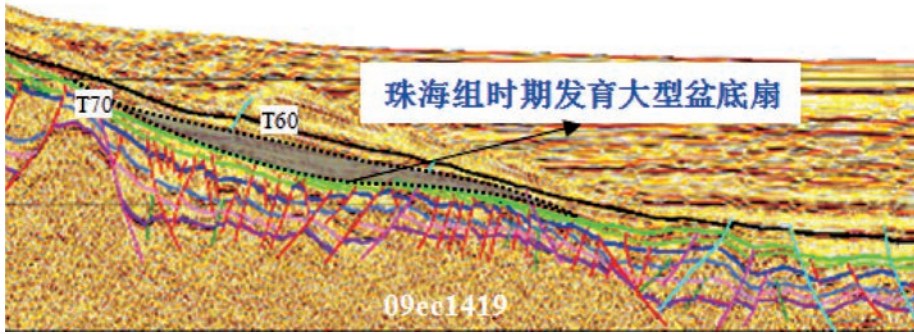


图 9 鹤山凹陷 09ec1419 测线珠海组深水盆地扇沉积(测线位置见图 7b)

Fig.9 The seismic reflections and depositional interpretation of basin floor fan in Zhouhai Formation, Heshan depression (refer the seismic profile to Fig.7b)

于斜坡地区,对应浊流成因的斜坡扇,横向上常递变为丘形双向上超或杂乱充填地震相,常包裹于席状披覆地震相内(图 8);丘形地震相分布于研究区下斜坡和盆底的构造低部位,对应盆底扇沉积(图 9)。这里将斜坡扇和盆地扇统称为深水扇,横向上递变为低幅上超充填或席状披覆地震相。

4.2.2 陆架边缘三角洲—深水扇演化规律

珠海组沉积时期构造相对稳定,在古珠江充沛的供源条件下^[39],受控于珠海组中晚期(28.5~32 Ma)二级海平面下降^[28],陆架边缘三角洲伴随陆架不断向海迁移进积,坡折带宽度依次加大。形成的多期斜交—S 型前积体,顶积层不断向海扩展(图 8)。单期陆架边缘三角洲向前推进距离约 2~4 km。伴随着陆架坡折带的向海迁移,ZHSQ3—ZHSQ6 层序中发育的 4 套大型陆架边缘三角洲,累计推进距离约 20 km

(图 8)。同期 S 型前积体不断进积,造成陆坡的坡度越来越陡(平均角度在 2.7°~6.1°变化),深水扇出现的频率越来越高,规模和面积越来越大(图 8)。值得指出的是,在珠海组沉积晚期,海平面持续下降,在研究区形成两条明显的“U”型或“V”字形下切谷,可见上部层序明显的削截现象(图 8),这些下切谷作为沉积物搬运通道,向下斜坡和盆地供源,形成大型的砂质深水扇(盆底扇)沉积,分布于鹤山凹陷中东部,构成研究区珠海组成藏条件最为有利的储层砂体(图 9,10)。

根据鹤山凹陷珠海组地震剖面 and 层序、坡折带地质解释剖面以及理论化模型(图 8,10),可以看出,珠海组每个层序内部的陆架边缘三角洲都发育强烈的前积,以明显的下超为识别特征,前积最大距离可达 20 km。通过识别珠海组每个发育时期的陆架坡折点

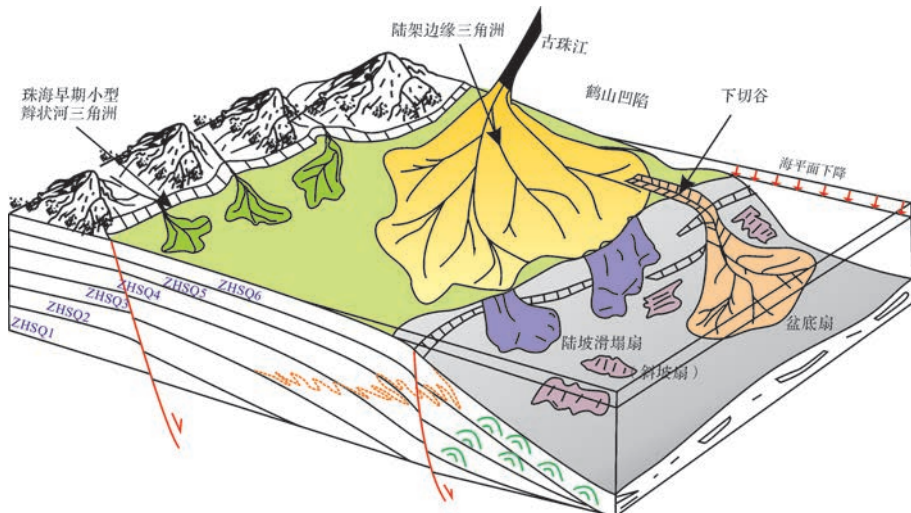


图 10 珠江口盆地鹤山凹陷珠海组陆架边缘三角洲—深水扇沉积模式

Fig.10 Sedimentary diagram of the shelf-edge delta and its relationship with deep-water fan deposits in the Heshan Depression, Pearl River Mouth basin

及变化过程,表明 $dy/dx < 0$, 陆架边缘迁移轨迹属于水平至轻微下降类型(图 8)^[17]。相应地,珠海组早期层序 ZHSBQ2 时期开始发育深水扇,晚期 ZHSQ5 与 ZHSQ6 时期深水扇规模达到最大,可见叠合连片的海底扇(图 9)。因此,鹤山凹陷的海底扇沉积规律总体上符合前人的陆架边缘迁移轨迹与深水扇的理论预测模型(图 9)^[19],为陆架边缘迁移轨迹的预测模型在南海的运用提供了一个新的实例。

南海北部渐新世时期陆架边缘,普遍发育陆架边缘三角洲及深水扇沉积,该时期对应海平面下降以及古珠江区域性供源,随着研究实例的增多、地震和测井资料增加以及研究的深入(例如,古珠江供源体系,气候及水动力条件,陆架宽度及地形坡度,同沉积断层的活动及其多因素的综合影响等),陆架边缘三角洲—深水扇的结构及其相互关系将会得到更为精细的表征,这显然对于寻找预测大规模的盆地扇具有指导作用,无疑会促进珠江口深水盆地及超深水盆地古近系的油气勘探工作,为南海深水油气储量预测和评价提供科学依据。

5 结论

通过本次调研和实例研究,得出以下结论:

(1) 陆架边缘三角洲一般形成于相对海平面下降或低位时期,主要受控于物源供给、可容纳空间和气候变化,并受到陆坡构造活动影响;也可发育在高位时期,受到波浪与潮汐的影响。

(2) 强烈抬升的陆架边缘迁移轨迹、强烈加积的陆架斜坡发育模式,对应的深水区物质分散体系为泥质;水平—轻微下降的陆架边缘迁移轨迹、强烈前积的陆架斜坡发育模式,预示着大量砂体被搬运至深水区;轻微抬升的陆架边缘迁移轨迹、加积与前积的陆架斜坡发育模式,暗示深水沉积砂体发育介于上述二者之间。

(3) 陆架边缘三角洲—深水扇规模砂体毗邻优质烃源岩,砂体类型丰富且储层条件好,具备多种类型的油气运移通道,生储盖组合优越,是油气勘探的有利领域。

(4) 珠江口盆地鹤山凹陷实例分析表明:渐新世珠海组沉积时期构造相对稳定,在古珠江充沛的供源条件下,发育大套陆架边缘三角洲沉积。发育水平—轻微下降的陆架边缘迁移轨迹,对应于强烈前积的陆架斜坡发育模式,地震前积体不断向海迁移,并在晚期发育下切谷及大型盆底扇沉积,是研究区极好的潜

在油气勘探目标。

参考文献 (References)

- [1] Gilbert G K. The topographic features of lake shores[R]. Washington, DC: US Geologic Survey, 5th Annual Report, 1885.
- [2] Fisher W L, Brown L F, Jr, Scott A J, et al. Delta systems in the exploration for oil and gas[M]. Austin, Texas, USA: Texas University, 1969: 54-66.
- [3] Edwards M B. Upper Wilcox Rosita delta system of South Texas: growth-faulted shelf-edge deltas[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(1): 54-73.
- [4] Penland S, Boyd R, Suter J R. Transgressive depositional systems of the Mississippi delta plain: a model for barrier shoreline and shelf sand development[J]. Journal of Sediment Petrology, 1988, 58(6): 932-949.
- [5] Kolla V, Biondi P, Long B, et al. Sequence stratigraphy and architecture of the late Pleistocene Lagnappe delta complex, Northeast Gulf of Mexico[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2000, 172(1): 291-327.
- [6] 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.
- [7] Mellere D, Plink-Björklund P, Steel R. Anatomy of shelf deltas at the edge of a prograding Eocene shelf margin, Spitsbergen[J]. Sedimentology, 2002, 49(6): 1181-1206.
- [8] 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.
- [9] Carvajal C R, Steel R J. Thick turbidite successions from supply-dominated shelves during sea-level highstand[J]. Geology, 2006, 34(8): 665-668.
- [10] Uroza C A, Steel R J. A highstand shelf-margin delta system from the Eocene of West Spitsbergen, Norway[J]. Sedimentary Geology, 2008, 203(3/4): 229-245.
- [11] 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.]
- [12] 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(54): 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(54): 733-742.]
- [13] 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, 2011, 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*, 2011, 27(7): 28-33.]
- [14] 祝彦贺, 朱伟林, 徐强, 等. 珠江口盆地 13.8Ma 陆架边缘三角洲与陆坡深水扇的“源—汇”关系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(12): 3827-3834. [Zhu Yanhe, Zhu Weilin, Xu Qiang, et al. Sedimentary response to shelf-edge delta and slope deep-water fan in 13.8 Ma of Miocene epoch in Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(12): 3827-3834.]
- [15] 曾清波, 陈国俊, 张功成, 等. 珠江口盆地深水区珠海组陆架边缘三角洲特征及其意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 595-606. [Zeng Qingbo, Chen Guojun, Zhang Gongcheng, et al. The shelf-margin delta feature and its significance in Zhuhai Formation of deep-water area, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 595-606.]
- [16] 朱筱敏, 葛家旺, 宋爽, 等. 南海北部长昌—鹤山凹陷渐新世陆架边缘三角洲—深水扇地震响应及形成条件[J]. *古地理学报*, 2016, 18(3): 367-380. [Zhu Xiaomin, Ge Jiawang, Song Shuang, et al. Seismic responses and forming conditions of the Oligocene shelf-edge delta and deepwater fan system in Changchang-Heshan sag, northern South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(3): 367-380.]
- [17] Gong C L, Wang Y M, Pyles D R, et al. Shelf-edge trajectories and stratal stacking patterns: their sequence-stratigraphic significance and relation to styles of deep-water sedimentation and amount of deep-water sandstone [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(7): 1211-1243.
- [18] Gong C L, Wang Y M, Steel R J, et al. Growth styles of shelf-margin clinoforms: prediction of sand- and sediment-budget partitioning into and across the shelf [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(3): 209-229.
- [19] Gong C L, Steel R J, Wang Y M, et al. Shelf-margin architecture variability and its role in sediment-budget partitioning into deep-water areas [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 72-101.
- [20] Bourget J, Ainsworth R B, Thompson S. Seismic stratigraphy and geomorphology of a tide or wave dominated shelf-edge delta (NW Australia): process-based classification from 3D seismic attributes and implications for the prediction of deep-water sands [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 359-384.
- [21] Sydow J, Finneran J, Bowman A P. Stacked shelf-edge delta reservoirs of the Columbus Basin, Trinidad, West Indies [M] // Roberts H H, Rosen N C, Fillon R H, et al. Shelf Margin Deltas and Linked Down Slope Petroleum Systems. Gulf Coast Section Society for Sedimentary Geology 23rd Annual Research Conference. Houston, 2003: 441-465.
- [22] Maselli V, Trincardi F, Asioli A, et al. Delta growth and river valleys: the influence of climate and sea level changes on the South Adriatic shelf (Mediterranean Sea) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 99: 146-163.
- [23] Carvajal C, Steel R, Petter A. Sediment supply: the main driver of shelf-margin growth [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96(4): 221-248.
- [24] Olariu M I, Hammes U, Ambrose W A. Depositional architecture of growth-fault related wave-dominated shelf edge deltas of the Oligocene Frio Formation in Corpus Christi Bay, Texas [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 48: 423-440.
- [25] Yoon S H, Chough S K, Park S J. Sequence model and its application to a Miocene shelf-slope system in the tectonically active Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(10): 1089-1103.
- [26] Johannessen E P, Steel R J. Shelf-margin clinoforms and prediction of deepwater sands [J]. *Basin Research*, 2005, 17(4): 521-550.
- [27] 庞雄, 彭大钧, 陈长民, 等. 三级“源—渠—汇”耦合研究珠江深水扇系统 [J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 857-864. [Pang Xiong, Peng Dajun, Chen Changmin, et al. Three hierarchies "Source-Conduit-Sink" coupling analysis of the Pearl River deep-water fan system [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(6): 857-864.]
- [28] 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.]
- [29] Houseknecht D W, Bird K J, Schenk C J. Seismic analysis of clinoform depositional sequences and shelf-margin trajectories in Lower Cretaceous (Albian) strata, Alaska North Slope [J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 644-654.
- [30] Magyar I, Radivojevic D, Sztanó O, et al. Progradation of the paleo-Danube shelf margin across the Pannonian Basin during the Late Miocene and Early Pliocene [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 103: 168-173.
- [31] Bruce S H, David M S, Peter B F. Seismic stratigraphy, facies architecture, and reservoir character of a Pleistocene shelf-margin delta complex, Eugene Island Block 330 field, offshore Louisiana [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(3): 380-397.
- [32] Alfaro E, Holz M. Seismic geomorphological analysis of deepwater gravity-driven deposits on a slope system of the southern Colombian Caribbean margin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 294-311.
- [33] Petter A L, Steel R J, Mohrig D, et al. Estimation of the paleoflux of terrestrial-derived solids across ancient basin margins using the stratigraphic record [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125(3/4): 578-593.
- [34] 刘军. 南海北部超深水区鹤山凹陷古近系沉积充填特征分析 [J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2013, 35(7): 15-18. [Liu Jun. Depositional filling characteristics of Paleogene in Heshan sag of ultra deepwater area in the northern South China Sea [J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2013, 35(7): 15-18.]
- [35] 崔莎莎, 何家雄, 陈胜红, 等. 珠江口盆地发育演化特征及其油

- 气成藏地质条件[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 384-391. [Cui Shasha, He Jiexiong, Chen Shenghong, et al. Development characteristics of Pearl River Mouth Basin and its geological conditions for oil and gas accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 384-391.]
- [36] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水油气成藏与勘探[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1833-1841. [Zhu Weilin, Zhong Kai, Li Youchuan, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deep-water basins[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 1833-1841.]
- [37] 黄维, 汪品先. 渐新世以来的南海沉积量及其分布[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2006, 36(9): 822-829. [Huang Wei, Wang Pinxian. Sediment mass and distribution in the South China Sea since the Oligocene[J]. Science China (Seri.D): Earth Sciences, 2006, 36(9): 822-829.]
- [38] 纪沫, 杨海长, 曾清波. 南海北部深水鹤山凹陷构造演化及其油气地质意义[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(17): 19-23. [Ji Mo, Yang Haizhang, Zeng Qingbo. Structural evolution and the significance of oil and gas analysis of Heshan sag of the deep-water area in the north of South China Sea[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(17): 19-23.]
- [39] 赵中贤, 周蒂, 廖杰. 珠江口盆地第三纪古地理及沉积演化[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6): 52-60. [Zhao Zhongxian, Zhou Di, Liao Jie. Tertiary Paleogeography and depositional evolution in the Pearl River Mouth Basin of the northern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6): 52-60.]

Development of Shelf-edge Delta Researches and Typical Case Analyses

ZHU XiaoMin¹, GE JiaWang¹, ZHAO HongChao¹, YUAN LiZhong², LIU Jun²

1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Shengzhen Institute of CNOOC Limited, Shenzhen, Guangdong 518067, China

Abstract: Since last century nineties, a special marine delta named shelf-edge delta widely developed at the margin of the shelf has been an international interest and new field for petroleum exploration, which is commonly characterized by thick-bedded sand-rich deposits, large-scaled distribution, high porosity and perfect petroleum accumulation conditions associated with marine slope or deep-water fan deposits. The shelf-edge delta is usually developed during the falling stage or low-stand stage of sea-level, influenced by the slope tectonic structures. However, it can also occur during the high-stand stage, comprehensively controlled by sediment supply, accommodation space and climate conditions, and sometimes of wave or tide influence. Previous studies have extensively indicated that the deepwater sedimentation prediction based on shelf-slope clinoform growth model is similar to the shelf edge trajectory migration motif. Steeply rising shelf-edge trajectories and dominantly aggradational stacking patterns are fronted by large-scale mass-transport systems, while, flat to slightly falling shelf-edge trajectories and progradational and downstepping stacking patterns are empirically related to large-scale submarine fan systems associated sand-rich gravity flows. Slightly rising shelf-edge trajectories and progradational and aggradational stacking patterns are associated with mixed sand/mud gravity flows and moderate-scale slope-sand deposits. Abundant examples have been identified that the sand-rich deposits of shelf-edge delta and deep-water fan systems serve a perfect source-reservoir-capping condition, prove to be good petroleum exploration targets. A large-scale and thick-bedded Oligocene shelf-edge delta deposits are observed in the Heshan Depression of Pearl River Mouth basin, northern slope of the South China Sea, in response to the sufficient sediment supply from the ancient Pearl River with a slow tectonic subsidence. Associated with the migration of shelf edge, the sigmoid seismic progradations of shelf-edge delta are significantly seaward prograded. The occurrence of incised valley and large scale submarine fan systems during the late Oligocene times, together with observed seismic reflection geometries suggest the development of flat to slightly falling shelf-edge trajectories and progradational and downstepping stacking patterns in the Heshan Depression. The related thick-bedded submarine fan systems associated sand-rich deposits are important and potential strategic oil and gas exploration targets in the future.

Key words: shelf-edge delta; deep-water fan; controlling factors; predication model; Heshan Depression; Northern South China Sea