

南海北部陆架第四系边缘 三角洲地震反射特征

聂鑫, 彭学超, 杜文波

(国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘要:陆架边缘三角洲因其具有面积广、厚度大、储层发育等特点,在世界上已成为重要的油气勘探目标。运用高分辨率单道地震资料,对南海北部珠江口盆地番禺低隆起陆架边缘三角洲第四系地震相和沉积特征进行了详细分析,认为第四系陆架边缘三角洲主要为三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲沉积。三角洲平原主要以水道—天然堤相组合为局部特征,频繁发生水道下切与改道。三角洲前缘主要以大型的前积地震相为主,随着海平面升降及物源供给变化,前缘带不断进积,由陆架向陆坡方向生长,三角洲前缘砂体前积受控于坡折带。前三角洲特征不明显。综合分析表明,研究区第四纪以来相对海平面经历了多次缓慢下降再迅速上升的旋回,形成了慢速海退和快速海侵交替进行的陆架边缘三角洲沉积。

关键词:陆架边缘三角洲;第四系;地震反射;番禺低隆起;珠江口盆地

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.01003

与陆架有关的三角洲主要包括内陆架三角洲(inner shelf margin)、中陆架三角洲(mid-shelf delta)、陆架边缘三角洲(shelf-margin deltas)与湾头三角洲(bayhead delta)^[1]。由于海平面升降变化,陆源碎屑物质经陆架向陆坡和海盆输送过程中,沉积物沿陆架堆积,逐渐发生内陆架三角洲—中陆架三角洲—陆架边缘三角洲—湾头三角洲的转化^[2]。作为陆架和陆坡之间过渡地带的陆架坡折带是陆源碎屑物质从陆架向陆坡和海盆搬运的必经之处,具有独特的水动力条件和沉积作用过程。

陆架边缘三角洲是发育于陆架边缘的特殊陆架三角洲,其形成受沉积物供应量、构造变动和相

对海平面变化等共同影响。在相对海平面下降期,三角洲向海推进,以进积为主,沉积物逐渐在外陆架、陆架坡折带和上陆坡处堆积。随着相对海平面的持续下降,当陆架区可容空间内无法消化这种进积变化时,由于重力作用的影响,相当大一部分沉积物会越过陆架坡折,在陆架边缘形成巨厚沉积层^[3]。

国外陆架边缘三角洲早已成为油气勘探的重要目标,墨西哥湾、印度哥伦布盆地、非洲海岸等地陆架边缘三角洲沉积体系油气勘探不断获得成功^[4]。南海北部陆缘也是海洋油气勘探的重点区域。近年来,油气勘探重点已由陆架浅水区转移至陆坡深水区^[5,6]。珠江口盆地白云凹陷渐新世以来的陆架边缘三角洲和深水扇沉积体系已经成为深水油气的主要勘探层,陆架边缘三角洲已引起地学界的重视,成为当前国内外学术研究的热点。

笔者利用近年来广州海洋地质调查局在南海北部调查获取的高分辨率单道地震资料,对珠江

收稿日期:2016-08-18

基金项目:国土资源部海底矿产资源重点实验室项目(KLMMR-2014-A-13);中国地质调查局项目(1212011220115)

作者简介:聂鑫(1986—),女,硕士,工程师,主要从事海洋地质和油气地质方面的研究工作. E-mail:nie_xin@126.com

口盆地番禺低隆起—白云凹陷北坡第四系沉积充填特征开展研究,揭示陆架边缘三角洲地震反射特征及其与海平面变化的关系。本研究成果对研究陆架边缘第四纪的沉积特征和环境演化具有重要意义。

1 地质概况

南海是西太平洋面积最大的边缘海,位于欧亚板块、太平洋板块和澳大利亚—印度板块的相接部位,经历了复杂的构造演化过程。南海北部陆坡整体呈 NE—SW 向展布,东起台湾东南端,西至西沙海槽西南口,包括了南海北部东沙隆起、番禺低隆起、神狐暗沙隆起及其以南的深水陆坡区^[7]。珠江口盆地在南海运动和东沙运动作用下发育大量 NE—NEE 向正断层,形成南北分带、东西分块的构造格局^[8]。番禺低隆起是珠江口盆地中央隆起带中部的一个三级构造单元(图 1),南为白云凹陷,北为恩平凹陷,东邻东沙隆起,西与

神狐暗沙隆起毗邻,面积约 7 500 km²,为一下断上拗、向北掀斜的低隆起。23.8 Ma 以来,与南海扩张脊南迁有关的深部幔源作用使白云凹陷产生强烈沉降,白云凹陷演变为陆坡深水环境,陆架坡折带骤然北撤至番禺低隆起区^[9]。第四纪以来番禺低隆起区处于陆架坡折带,跨越了陆架浅水区—陆坡深水区,发育了多期次叠置的陆架边缘三角洲^[10]。

2 地震反射界面特征及其时代

研究区从西北到东南水深逐渐增大。通过地震资料解释和钻井对比可知,第四系厚度介于 50~450 m 之间,双程反射时间为海底往下 500 ms 以内,由于单道地震资料的探测深度最大可达约 500 m,故通过单道地震剖面可以清楚反映第四系的沉积特征。

2.1 主要的地震反射界面及其时代

区域不整合界面在地震剖面上最明显的特征是削截、顶超和上超的反射终止现象。根据剖面地震反射特征,研究区识别出了 7 个主要地震反射界面,自海底而下分别命名为 R₀、R₁、R₂、R₃、R₄、R₅、R₆(图 2)。各界面主要反射特征如下:

R₀ 为海底,呈高频、强振幅、高连续、双相位反射特征。

R₁ 以高频、中振幅、中—高连续、双相位反射为特征,同相轴总体上相对平直、稳定、可连续追踪。部分区域受到侵蚀而缺失,界面上下可见上超、削截以及下超等现象。

R₂ 呈中强振幅、中—高连续反射特征,可连续追踪。界面上下可见上超、削截等现象。局部地区削蚀,上下反射层呈不整合接触。下切河道反射特征明显。

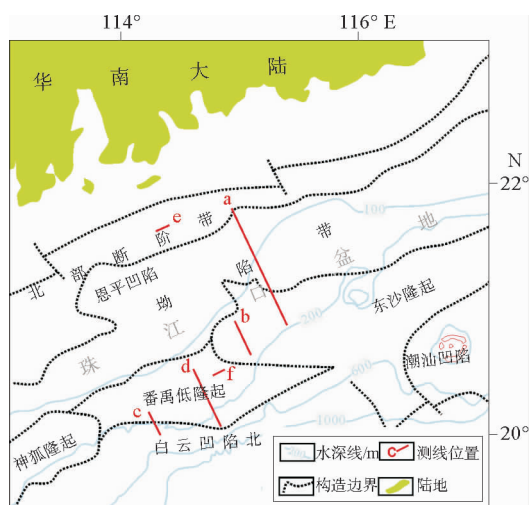


图 1 研究区构造区划

Fig. 1 Tectonic map of the study area

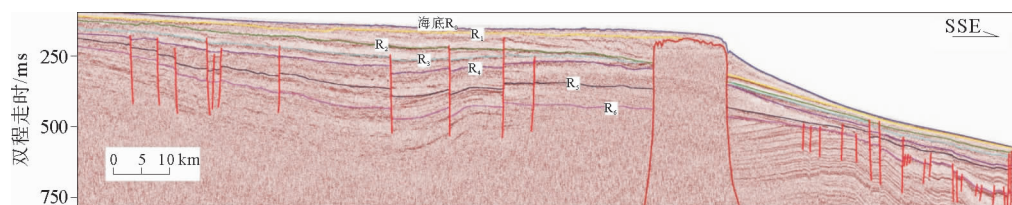


图 2 测线 a 各界面地震反射特征(位置见图 1 中 a)

Fig. 2 Seismic reflection characters of seismic reflecting interfaces(see Fig. 1 for location of seismic section)

R_3 呈高频、中强振幅、中—高连续反射特征,同相轴双相位反射特征明显,该界面上下地层呈不整合接触,上覆反射层呈平行或低角度斜交其上,与下伏反射层一般为平行或低角度削截接触。界面之上地层厚度变化较大。在外陆架界面缺失。

R_4 呈高频、中强振幅、中—高连续反射,同相轴双相位反射特征明显,界面上下地层呈不整合接触,易于识别。

R_5 呈中频、中弱振幅,连续性较好,可全区追踪,不整合特征明显。

R_6 呈中频、中振幅,连续性变化较大,以中连续为主,同相轴由 1~2 个相位组成。下切水道不发育,界面上下局部可见上超、削截现象。

通过与南海北部陆坡区域地质资料和钻孔资料结合进行地震层位划分对比,各个地震界面的地质属性划分如下: R_1 为全新统的底界面; R_2 为

上更新统与中更新统的分界; R_3 为上中更新统和下中更新统分界; R_4 为中更新统与下更新统分界; R_5 、 R_6 为下更新统内部界面。

2.2 主要的地震相

研究区第四系主要存在席状、充填型、前积型、弱反射和杂乱反射等地震相单元。其组合与研究陆架边缘三角洲的形态和特征密切相关。陆架边缘三角洲在地震相外形上表现为席状、楔状或透镜状外形,在内部结构上表现为平行—亚平行内部结构、S 型前积结构、斜交型前积结构和 S 型/斜交复合型前积结构。对于陆架边缘三角洲在不同的部位表现为不同的地震相特征。

2.3 第四纪相对海平面变化

研究区第四纪相对海平面变化曲线表明(图 3)^[11,12],在更新世存在着一段气候转型事件,其

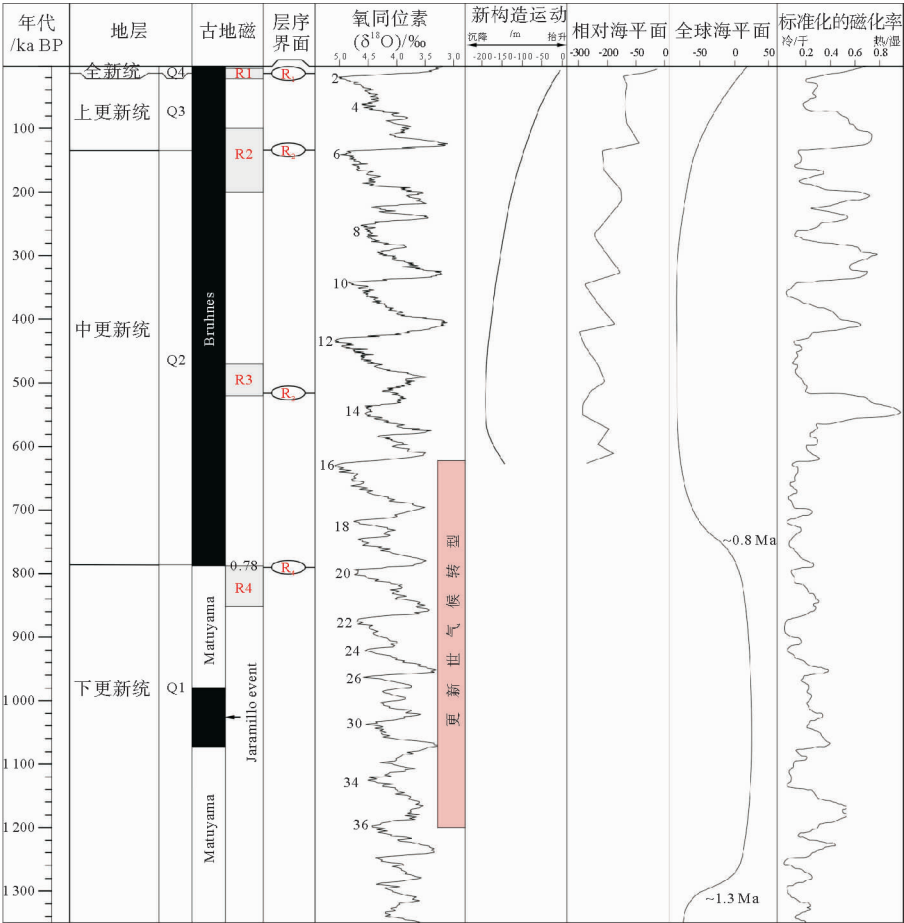


图 3 研究区第四纪海平面变化曲线

Fig. 3 Sea level changes during the Quaternary of the study area

时代跨度从早更新世晚期到中更新世早期,时间跨度约为 1.2~0.6 Ma。在更新世气候转型之前,通过氧同位素曲线可以看出,在海平面旋回短周期的控制之下,陆缘海平面下降幅度通常仅在几十米左右,这使得陆架区三角洲推进作用较弱,河流下切作用也不强。而转型之后(0.6 Ma 以来),海平面变化逐渐开始受控于稳定的约 100 ka 长周期旋回,每个旋回中海平面降幅最大超过 100 m,这种海平面变化的幅度有利于三角洲向陆架边缘的推进和陆架区下切河谷的形成。

3 陆架边缘三角洲地震相特征

高分辨地震剖面直观地反映了陆架边缘三角洲的形态结构特征,展现了多期次的三角洲前缘砂体的叠置。地震剖面揭示研究区发育大型的三角洲前缘前积,其地震相主要表现为楔状或透镜

状外形,S 型前积结构、斜交型前积结构和 S 型/斜交复合型前积结构等(图 4)。多期前积沉积叠加组成陆架边缘三角洲沉积复合体,前积结构形态变化较大,楔状体之间通常由强振幅、双相位、连续性好的界面所分隔,各个楔状体间界限清晰,沉积楔的外部形态、内部结构各有不同。有的前积楔状体呈低角度,近似平行,伸展达十几到二十几千米;有的前积楔状体在地震剖面上显示角度较大,呈束状近距离收敛,其结构形态明显地反映了水体能量的强弱和沉积物的供给。研究认为^[13],沉积物供给强烈控制了陆坡形态,即较强沉积物供给往往形成平缓陆坡,而较弱的沉积物供给则形成陡峭的陆坡。古珠江具有大量的沉积物供给,发育了较为平缓的 S 型的陆坡和以海退为主的三角洲体系。在可容纳空间和不同能量河流和海洋的共同作用下,体现了第四纪频繁变动的海平面升降和不同时期沉积物的补给速率的差异。

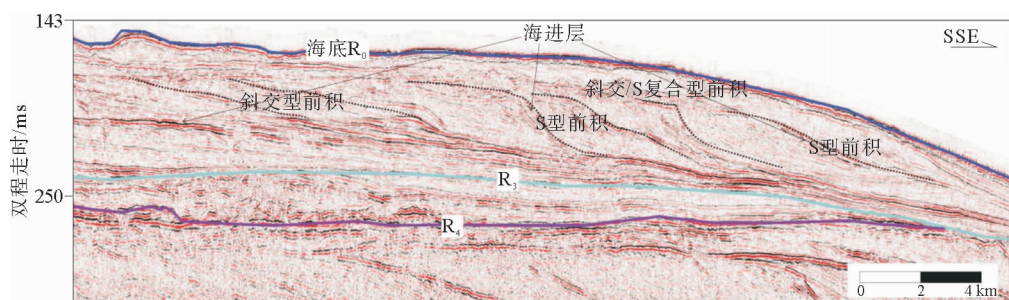


图 4 陆架边缘三角洲前缘前积地震相特征(位置见图 1 测线 b)

Fig. 4 The seismic facies of foreset at shelf-margin delta front (see Fig. 1 for location of seismic section)

R_3 — R_4 之间为番禺低隆起区陆架坡折带处较为典型的三角洲前缘的一个相对海平面旋回的一套沉积。下更新统 R_4 到上中更新统 R_3 沉积期间(图 5),从剖面的沉积特征可以看出,位于坡

折带附近的三角洲的形成经历了低位三角洲进积和高位三角洲退积的一个旋回,其中, R_3 为一个海平面旋回变化的最大海泛面。高位域三角洲和低位域三角洲之间的过渡面为初始海泛面。

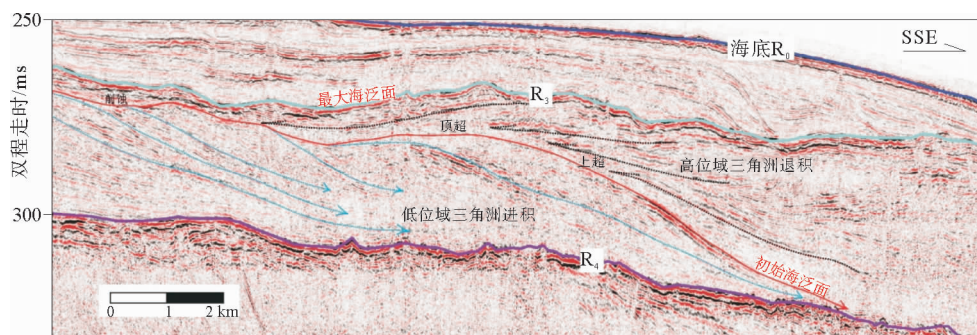


图 5 陆架边缘三角洲地震反射特征(位置见图 1 测线 c)

Fig. 5 The characteristics of seismic reflection of a shelf-margin delta(see Fig. 1 for location of seismic section)

自早更新世(R_4)以来,该区域可容空间增大速率小于物源供应速率,相对海平面大范围下降,形成强制海退,三角洲向海推进,发育大规模的低位域三角洲进积。到达初始海泛面之后,相对海平面开始上升,三角洲依然为进积,陆架边缘三角洲向海推进并扩大范围,当海平面快速上升时,形成海进,可容纳空间增大,使得三角洲向陆退积,沉积了高位三角洲。高位三角洲砂体上超甚至顶超至初始海泛面上。相对海平面的上升抑制了三角洲的前积作用,三角洲前缘规模变小且沉积薄,发育进入相对缓慢的停歇期。三角洲先往南推进再向北迁移,整体表现为一个海退再海进的过程。

晚中更新世(R_3)以后(图 4),三角洲向海推进,发育大规模的低位域三角洲进积。 R_3 之上的进积体层层叠置,界限清晰,每个进积体都呈中间厚,向首尾两端减薄的楔状体特征。从剖面的沉积特征可以分析出相对海平面的变化特征,即上中更新统以来,物源供应速率大于可容空间增大速率,物源源不断地从陆架上过来,随着相对海平面大范围下降,形成强制海退,陆架边缘三角洲向海推进并扩大范围,海退结束后,形成快速海侵,海侵带来的薄层沉积覆盖在厚层的前积砂体上。

经典的三角洲相模式将三角洲沉积分为顶积层、前积层和底积层 3 层结构。本文研究的珠江

口盆地番禺低隆起区的大多数陆架边缘三角洲沉积由于水流冲刷缺失顶积层,仅较少部位部分保留了较完整的 3 层结构。沉积的顶积层主要由支流河道—水下天然堤的沉积物混合而成,因后期改造侵蚀缺失或不完整。底积层多分辨不清,结构不详,发育在楔状体的前缘,向深水区迅速尖灭或与上覆楔状体的前积层归并,推断其主要由浅海相组成^[14],反映了较强的水动力环境。

南海北部陆架坡折带在地形上控制了陆架边缘三角洲及海底扇等深水沉积的发育,同时,陆架边缘三角洲前积体的向前推进又改变或影响了陆架坡折带的坡度和形态。由于南海北部陆架坡折带在 200~400 m 水深附近,因此,地形变化对三角洲的发育十分有利。受相对海平面升降变化和物源供应的影响,南海北部陆缘三角洲砂体上下叠置,向前推进并导致坡折带不断往深水方向变迁(图 6),这种砂体的叠置是在经历了较长时间的强制海退而形成的,或由三角洲自身的自旋回而形成。所谓自旋回,即在沉积背景相对稳定的条件下,为了使自身能量平衡而形成的沉积旋回^[15]。海进较快或后期改造侵蚀强烈,故少见高水位体系沉积。各期次的三角洲朵体都基本在陆架坡折带上呈 SE 向展布。随着三角洲不断推进,陆架坡折带不断变化,形成现今的坡折带的位置和形态。

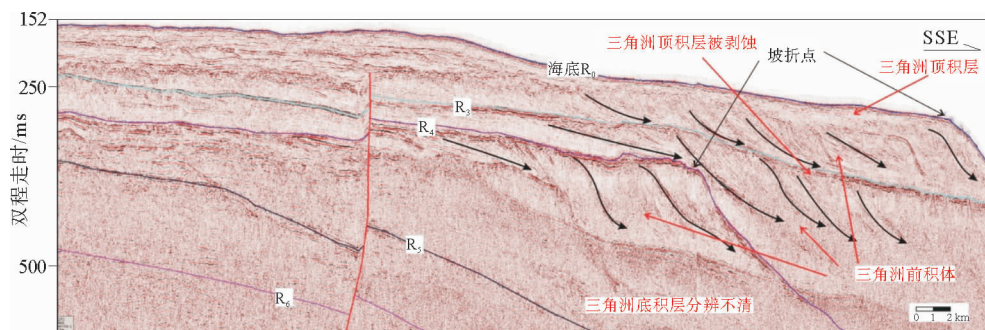


图 6 研究区陆架边缘三角洲及陆架坡折带沉积特征(位置见图 1 测线 d)

Fig. 6 Sedimentary characteristics of the shelf-edge and shelf-margin delta (see Fig. 1 for location of seismic section)

4 三角洲物源供给通道

珠江口盆地北部断阶带广泛发育三角洲平原相,陆架上存在大量的三角洲平原的河道侵蚀,发育水道—天然堤沉积,河道中下部为粗粒沉积,上

部为后期海侵沉积的细粒沉积物。其地震反射特征总体上以水道—天然堤相复合体为主,其中水道相是陆架边缘三角洲良好的物源通道。在高分辨率地震剖面上,水道侵蚀下切充填特征明显,可见下切水道和天然堤层层叠置,成组出现,侧壁及底部边界清楚,总体上以充填状变振幅低连续—

杂乱反射地震相特征为主,外部表现形态大致呈“U”型、楔型或透镜体型,内部结构主要呈侧向加积、双向上超、发散和杂乱 4 种^[16],表明第四纪南海北部海平面发生多次升降变化。

高分辨率地震剖面的解释结果表明,水道的底层、中层、上层和顶层分别具有不同的地震反射特征(图 7a)。水道底层(A)为强振幅、低频、低连续杂乱反射特征,显示出低水位时期粗粒的不连续的河道滞留沉积,水动力条件较强;水道中层(B)为弱振幅、低频率、中连续地震反射,反映出

沉积物较细,地层成层性和连续性逐渐变好,内部出现双向上超结构;水道上层(C₁、C₂)为强—弱振幅、中—高频率、中连续地震反射特征,内部呈现典型的侧向加积充填,体现了海侵时期沉积物在坡度上的分布;水道顶层(D)为中—弱振幅、高频率、高连续的地震相,说明为一套薄层的相对细粒的较连续地层,水动力条件相对稳定,为海平面相对较高时期的细粒沉积。水道充填沉积结构层从下到上的这种变化揭示了水道回填期间沉积可容纳空间的变化,显示出海平面不断上升的海进沉积过程。

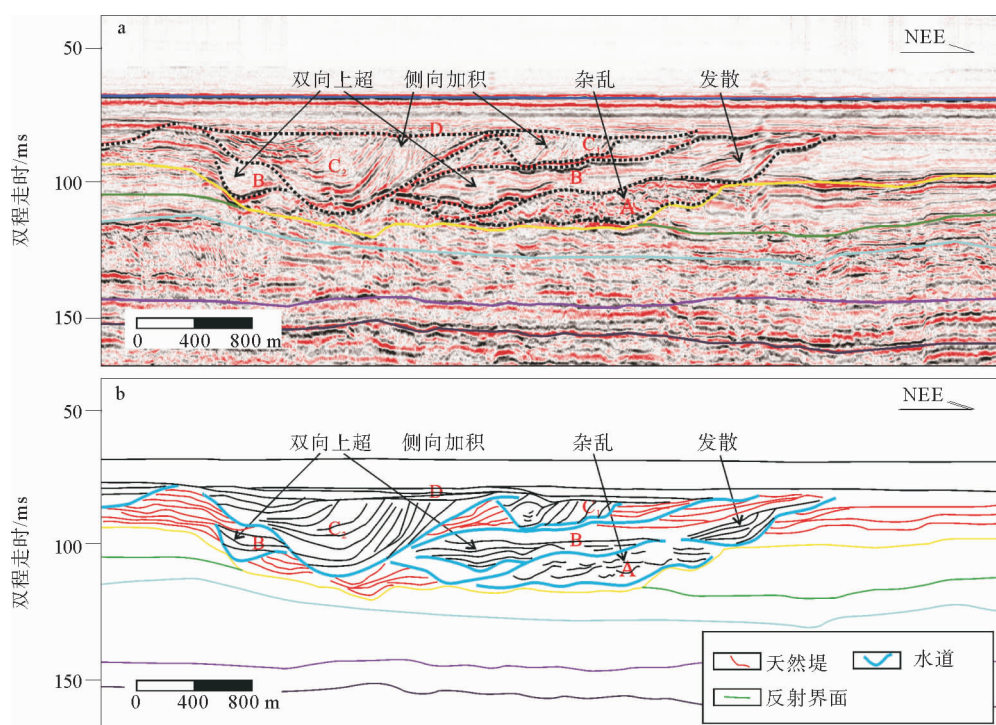


图 7 三角洲平原水道—天然堤地震剖面及解释沉积特征(位置见图 1 测线 e)

Fig. 7 Seismic section and the sedimentary features of a channel-levee complex on shelf-margin delta plain
(see Fig. 1 for location of seismic section)

水道两侧天然堤以强振幅、中—高连续、中频地震反射特征为主,外形为丘状、楔状、透镜状或台地状(图 7b)。天然堤是沉积物越过水道边缘,沉积于水道堤岸之上形成的,由泥、粉砂、薄层砂等细粒沉积物组成。当沉积物溢出堤岸时,由于流速骤减,大量的粗粒沉积物在天然堤近端发生卸载,沉积较厚,而较细的沉积物在远端沉积且较薄,形成楔状沉积体^[17]。

水道长期侧向迁移形成了水道—天然堤复合

体。侧向加积指示水道发生了频繁的迁移摆动,且有一定的曲度,推测晚第四纪水流动力条件较强。局部地区水道较发育,充填结构简单,说明相对海平面下降后有小幅上升,水道回填。随着水道—天然堤的迂回摆动、改道,构成了区域性的输沙骨架。作为物源的主要搬运通道,水道的相互叠置引起了不同期次三角洲前缘砂体的叠置与迁移(图 8)。三角洲前缘朵体的形成和分布与物源供应、水动力条件和区域海平面升降变化密切相关。

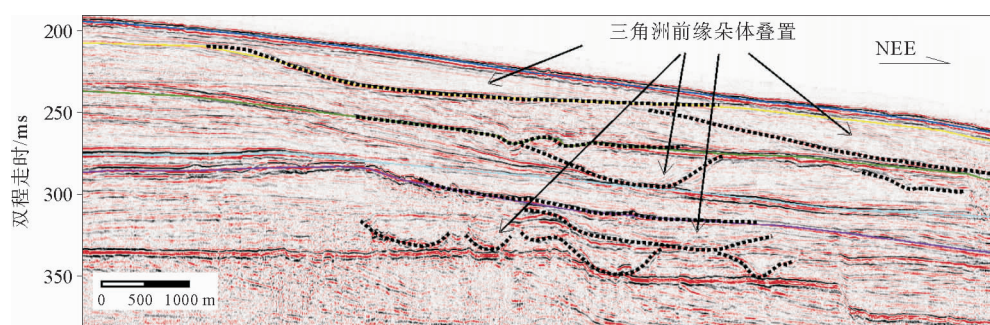


图8 三角洲前缘砂体叠置特征(测线位置见图1中f)

Fig. 8 Characters of sandbodies of shelf-margin delta front (see Fig. 1 for location of seismic section)

5 结论

利用高分辨单道地震剖面对南海北部陆架边缘三角洲地震反射特征进行了分析,主要结论如下:

(1)对研究区地震界面的地质属性进行了划分: R_1 为全新统的底界面; R_2 为上更新统与中更新统的分界; R_3 为上中更新统和下中更新统分界; R_4 为中更新统与下更新统分界; R_5 、 R_6 为下更新统内部界面。

(2)研究区第四系主要存在席状、充填型、前积型、弱反射和杂乱反射等地震相单元。陆架边缘三角洲前缘在外形上表现为席状、楔状或透镜状,在内部结构上表现为平行—亚平行、S型前积、斜交型前积和S型/斜交复合型前积等结构。广泛发育在北部陆架上的三角洲平原相总体以水道—天然堤相复合体为主,其物源主要来自于古珠江。水道—天然堤相复合体引起了三角洲前缘砂体的叠置与迁移。

(3)第四纪期间海平面多次变化,产生了大套的前积砂体。地震剖面所反映的每套地层都具有薄层海侵沉积,说明南海北部坡折带处经历的海侵过程非常快。整个第四纪沉积期间的相对海平面升降主要为慢速的海退和快速的海侵交替进行。

参考文献:

[1] Porebski S J, Steel R J. Shelf-margin deltas: their stratigraphic significance and relation to deep water sands[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62: 283-326.

[2] Porebski S J, Steel R J. Deltas and sea-level change[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(3): 390-403.

[3] 武强,解习农,姜涛. 陆架边缘三角洲的研究现状及其意义[J]. *海洋地质动态*, 2005, 21(3): 1-5.

[4] Plink-Björklund P, Steel R. Sea-level fall below the shelf edge, without basin-floor fans[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 115-118.

[5] 彭大均,庞雄,陈长民,等. 南海珠江深水扇系统的形成特征与控制因素[J]. *沉积学报*, 2006, 24(1): 10-19.

[6] 庞雄,申俊,袁立忠,等. 南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2006, 27(3): 11-15.

[7] 钱星,张莉,易海,等. 南海北部双峰南陆坡区的构造层序及沉积充填过程[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 21-27.

[8] 何家雄,刘海龄,姚永坚,等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京:石油工业出版社,2008.

[9] 柳保军,申俊,庞雄,等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组浅海三角洲沉积特征[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 49-56.

[10] 谢利华,张博,秦成岗,等. 陆架坡折盆地强制海退及正常海退沉积——以珠江口盆地珠江组韩江组为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1093-1100.

[11] Lisiecki L E, Raymo M E. Plio-Pleistocene climate evolution: trends and transitions in glacial cycle dynamics[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1-2): 56-69.

[12] Lüdmann T, Wong H K. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 1999, 311(1-4): 113-138.

[13] O'Grady D B, Syvitski J P M, Pratson L P, et al. Categorizing the morphologic variability of siliciclastic passive continental margins[J]. *Geology*, 2007, 35(3): 207-210.

[14] 寇养琦. 珠江口外第四纪沉积相的初步划分[J]. *石油与天然气地质*, 1992, 13(4): 371-380.

[15] 史长林,纪友亮,刘灵童,等. 自旋回—异旋回控制的扇三角洲相高精度层序地层对比模式[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(3): 6-13.

[16] 高红芳. 南海西北海盆晚中新世以来浊积体地震相特征及海平面变化[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(3): 113-119.

- [17] 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.
- [18] 黄永祥, 葛同明. 珠江口盆地晚第四纪地层及环境初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(4): 23-36.

SEISMIC FACIES OF QUATERNARY SHELF-MARGIN DELTAS IN NORTHERN SOUTH CHINA SEA

NIE Xin, PENG Xuechao, DU Wenbo

(Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources,
Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Shelf-margin deltas have been regarded as one of the important hydrocarbon exploration targets in the world for years for its wide distribution, big thickness and well-developed reservoirs. Using high-resolution seismic data, the authors analyzed the seismic facies and sedimentary characteristics of the shelf-margin deltas of Quaternary in details located in the Panyu Low Uplift of the Pearl River Mouth Basin (PRMB), South China Sea. A shelf-margin delta is composed of three components i. e. a delta plain, a fore-delta and a delta front. The shelf-margin delta plain consists of the channel-levee complexes with frequent ravinement and deposition. The delta front usually shows a large scale of foreset seismic facies. When sea level rises and if the supply of sediment is sufficient, it moves quickly seawards, and the shelf-edge grows toward the slope. The delta front deposits are much influenced by shelf break. The depositional pattern of the fore-delta in the region is not clear to present. An integrated study of the deltaic deposits shows that the sea level changes in a cyclic manner in Quaternary. It drops slowly and rises rapidly in the research area. As the results, the deltaic deposits show a clear pattern of slow regression and fast transgression.

Key words: shelf-margin deltas; Quaternary; seismic reflection; Panyu Low Uplift; Pearl River Mouth Basin