

大角度波浪控制下的浪成砂坝新模式

黎瑞,杨娇,柴愈坤,王华,戴建文,邓永辉,孙爽,马肖琳,田腾飞

[中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳518064]

摘要:浪成砂坝为波浪改造后二次沉积产物,传统沉积模式认为其主要呈平行岸线条带状展布,但忽视了波浪入射角与岸线夹角的差异会导致沉积模式的巨大差异。结合珠江口盆地惠州凹陷以及青海湖现代浪成砂坝沉积特征,研究总结了大角度波浪控制下的浪成砂坝差异沉积模式。结果表明:①受限于东沙隆起,惠州凹陷南缘局部区域存在显著的“峡谷效应”,波浪呈大角度入射,且由于沉积期发育位置不同导致的水动力环境不同,2个邻近油田砂体在沉积过程中受波浪改造后,形态和规模存在巨大差异。②引入海岸动力学沿岸输沙机理,结合野外地质考察成果,将浪成砂坝分为全封闭斜交岸线型、平行岸线型和半开放斜交岸线型3类,并提出了一种大角度波浪控制下的浪成砂坝新模式。③实钻结果证实,该模式下迎风翼和背风翼的砂坝形态、规模及叠置样式差异巨大,且砂体之间易形成“连而不畅”的岩性油气藏。新模式对指导浪成砂坝型储层的勘探与开发具有重要的理论与现实意义。

关键词:储层特征;沉积模式;浪成砂坝;岩性油气藏;珠江口盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

A novel sedimentary pattern of wave-induced sandbars under high-angle wave incidence

LI Rui, YANG Jiao, CHAI Yukun, WANG Hua, DAI Jianwen, DENG Yonghui, SUN Shuang, MA Xiaolin, TIAN Tengfei

[Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen, Guangdong 518064, China]

Abstract: Wave-induced sandbars, wave-reworked deposits, are considered to resemble bands parallel to shorelines as reflected by the traditional depositional model, which, however, ignore the fact that varying angles between wave incidence direction and shoreline orientation can lead to significant differences in sedimentary patterns. In combination with the sedimentary characteristics of modern wave-induced sandbars in both the Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB), and Qinghai Lake, we investigate and summarize differential sedimentary patterns of wave-induced sandbars under high-angle wave incidence. Key findings are as follows: (1) Constrained by the Dongsha Uplift, local areas on the southern margin of the Huizhou Sag manifest significant “canyon effect”, leading to high-angle wave incidence. Moreover, due to the different hydrodynamic environments at varying occurrence positions during deposition, the sand bodies of two neighboring oilfields in the Huizhou Sag exhibit significantly distinct morphologies and scales post-wave reworking; (2) Based on the dynamic sediment transport mechanism for shorelines, along with field geological survey results, wave-induced sandbars are categorized into three types: the totally closed shore-oblique type, the shore-parallel type, and the semi-open shore-oblique type. Moreover, a novel sedimentary pattern of wave-induced sandbars under high-angle wave incidence is developed; (3) Drilling results corroborate that under the novel sedimentary pattern, wave-induced sandbars on windward and leeward flanks differ enormously in morphology, scale, and superimposed style. Furthermore, lithologic hydrocarbon reservoirs with poor connectivity are prone to form between the sand bodies. The novel sedimentary pattern holds critical theoretical and practical significance for guiding the exploration and exploitation of reservoirs of wave-induced sandbars.

Key words: reservoir characteristics, sedimentary pattern, wave-induced sandbar, lithologic hydrocarbon reservoir, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

收稿日期:2023-11-30;修回日期:2024-03-12。

第一作者简介:黎瑞(1994—),男,工程师,开发地质、沉积储层。E-mail:li Rui34@cnooc.com.cn。

基金项目:中国海油重大科技专项(CNOOC-KJ135ZDXM37SZ03SZ)。

引用格式:黎瑞,杨娇,柴愈坤,等. 大角度波浪控制下的浪成砂坝新模式[J]. 石油与天然气地质,2024,45(2):530–541. DOI:10.11743/ogg20240216.

LI Rui, YANG Jiao, CHAI Yukun, et al. A novel sedimentary pattern of wave-induced sandbars under high-angle wave incidence[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 530–541. DOI: 10.11743/ogg20240216.

浪成砂坝(或称作滩坝)作为波浪改造后二次沉积产物,长期以来被普遍认为会因波浪改造而呈平行于海(湖)岸线的条带状展布,但是 Ashton 等通过数值模拟等手段,发现不同角度波浪对岸线沉积有着明显不同的控制作用^[1-3]。Wang J. 等通过对青海湖沿岸砂坝进行研究,建立了风力与砂坝厚度之间的关系^[4]。朱筱敏等根据平面上发育位置的不同,将砂坝分为湖岸线拐弯处砂坝、三角洲侧缘处砂坝、水下隆起处砂坝和开阔浅湖处砂坝4类^[5]。姜在兴等根据砂坝在垂直于岸线方向上的不同水动力特征,将砂坝分为沿岸砂坝、近岸砂坝和远岸砂坝^[6]。尹力等基于沉积水槽实验,认为强波浪高水位会形成大规模砂坝砂体,弱波浪低水位则只能略微改变原始沉积物形态^[7]。一直以来,前人研究中多通过波浪破碎能量卸载以及沿岸流等来定性解释沿岸砂坝的形成机理,但是这并不能解释众多特殊形态浪成砂坝的形成,以及在哪些位置会形成何种类型浪成砂坝。

惠州凹陷南缘受限于东沙隆起的存在,局部区域存在显著的“峡谷效应”,波浪呈大角度入射,且沉积期发育的位置不同导致的水动力环境不同,因此邻近油田储集砂体在沉积过程中受波浪改造后的形态和规模存在巨大差异。为解释这一现象,本文在青海湖野外浪成砂坝实地考察的基础上,结合海岸动力学沿岸输沙机理,提出了一种大角度波浪控制下的浪成砂坝沉积模式,并最终通过调整井实钻情况,证实了新模式的准确性。

1 区域地质背景

珠江口盆地位于太平洋、欧亚和印度洋3大板块的交汇处,是南海北部一个重要的含油气盆地,盆地结构可划分为北部断阶带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带5个次级构造单元^[8]。

惠州凹陷位于北部拗陷带,研究区位于惠州凹陷南部与东沙隆起结合部(图1)。珠江口盆地发育前新生界火成岩及变质岩基底,基底之上从下至上依次发育始新统文昌组、恩平组,渐新统珠海组,中新统珠江组、韩江组、粤海组,上新统万山组及第四系地层。研究区内已发现了多个油气田,本次研究层位L层位于珠江组,是研究区内重要含油层系之一,为三角洲-滨岸沉积。南海运动后,研究区在北部古珠江三角洲稳定供源的同时,珠江组早期水体较浅且季风发育,原始

三角洲沉积受波浪改造作用强烈。

2 沉积环境与储层特征

2.1 沉积环境特征

研究区在珠江组沉积时期发育了三角洲、滨岸、潮坪、浅海陆棚和碳酸盐台地5大沉积体系,主要物源有古珠江三角洲和东沙隆起^[9]。受古珠江三角洲前积作用和来自东沙隆起的双重影响,惠州凹陷南翼形成相对低洼、局限的地貌(图2),在海侵期和高位期均发育受潮流和波浪改造的砂质条带或砂脊。特别是在海平面相对下降时期,东沙隆起相对抬升导致研究区形成相对封闭的沉积环境,且由于区域受东北风影响,三角洲前缘砂体极易被波浪改造成一系列砂质条带或陆架砂脊^[9],在后期东沙隆起的差异隆升作用下,形成了大规模岩性-构造圈闭。

2.2 岩石学特征

实钻结果显示,研究区珠江组L层为该区域油田的主力勘探层位,形成于海平面以下、浪基面以上的海陆过渡带。由于其沉积时受到波浪改造作用控制,形成了一套广泛发育岩性圈闭的砂岩地层,因此在研究区面积仅约20 km²的范围内,L层的岩石成分、厚度和物性呈现出巨大差异。本次研究采集了82个铸体薄片样品,观察结果显示,L层主要以长石石英砂岩、岩屑石英砂岩、长石砂岩和岩屑砂岩为主。其中,东侧A-4、B-1及B-2井的L层中明显更靠近石英端元(图3),以长石石英砂岩和岩屑石英砂岩为主;而西北侧已钻井A-1、A-2、A-3及A-A3P1井的则更靠近长石端元和岩屑端元,以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,二者呈现明显的成分差异。

2.3 沉积特征

除岩石成分存在明显差异外,研究区L层整体沉积厚度和沉积特征也存在显著差异。A-2井区显示L层整体呈现复合正韵律特征,发育冲刷面等构造(图4),指示了具牵引流特征的三角洲沉积环境。而A-4井区测井曲线及岩心显示,L层呈现明显的反韵律特征,且与三角洲前缘席状砂不同,成分上以石英颗

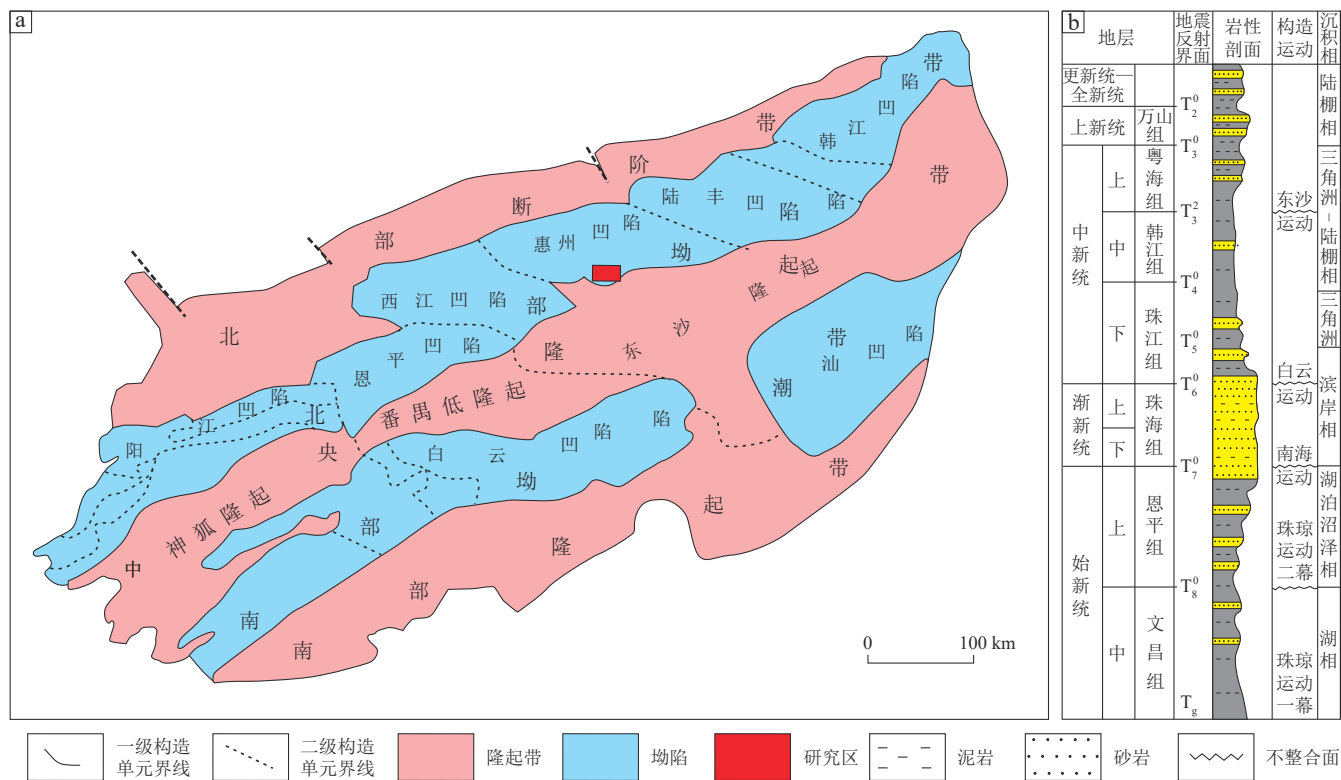


图1 珠江口盆地研究区构造位置(a)及地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Tectonic position (a) and composite stratigraphic column (b) of the study area within the PRMB

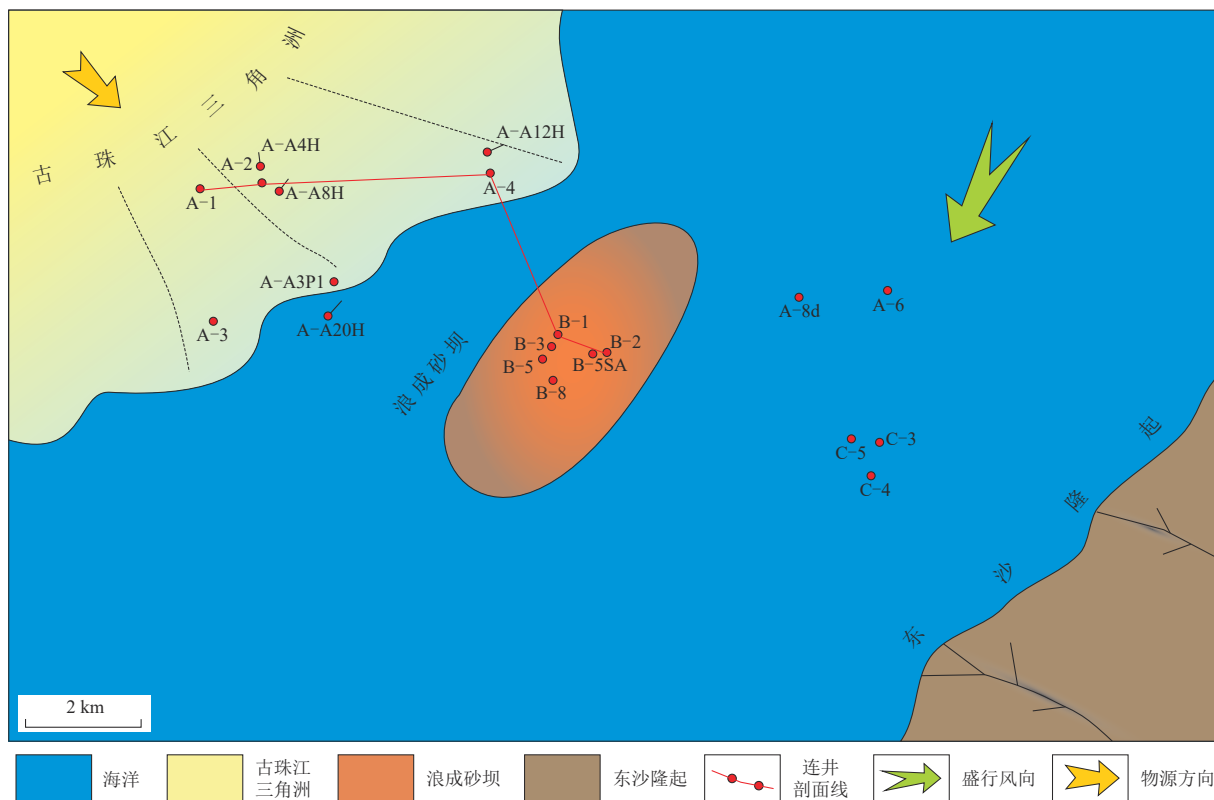


图2 珠江口盆地研究区珠江组沉积背景

Fig. 2 Sedimentary setting of the Zhujiang Formation in the study area within the PRMB

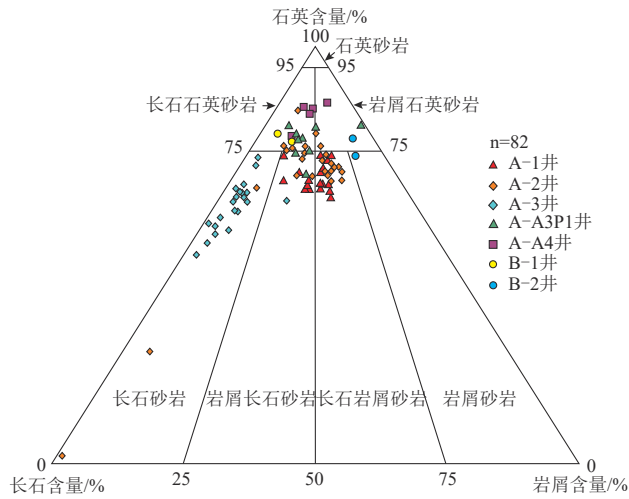


图3 珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组L层岩石组分三角图
Fig. 3 Ternary diagram showing the rock compositions in layer L of the Zhujiang Formation in the southern Huizhou Sag, PRMB

粒为主,不含泥质沉积,粒度较A1井区更粗,磨圆呈圆-次圆状,表明其成分成熟度和结构成熟度均较高,且在局部呈现出冲洗交错层理等典型的代表波浪改造作用特征(图4),指示了浪成砂坝沉积环境。

在测井相上可以看出,研究区A-1、A-2和A-3井砂体均较厚,厚度可达10~15 m,且纵向上表现为多期砂体叠置,测井形态以箱形为主。而A-4、B-1和B-

2井实钻砂体厚度薄,仅为3~5 m,多呈漏斗形(图4),明显表现出浪成砂坝特征(表1)。

3 浪成砂坝新模式

3.1 浪成砂坝野外考察

考虑到惠州凹陷南部珠江组沉积时期受到东沙隆起控制,形成相对低洼、局限的古地貌,在此环境控制下浪成砂坝沉积模式差异巨大。现代是解开过去的钥匙,可以通过优选沉积环境类似的青海湖开展沉积模式研究。青海湖是中国最大的内陆咸水湖^[10],受区域构造影响及北部大通山和南部青海南山地形控制,西北风非常盛行,形成了西北向的盛行风浪(图5)。此外,青海湖湖区发育近40条河流,物源供给充足,三角洲非常发育,是研究浪成砂坝沉积模式的绝佳场所^[11-13]。

通过对青海湖浪成砂坝进行实地考察发现,其沉积特征与珠江口盆地研究区非常相似。浪成砂坝均呈现磨圆好、泥质条带不发育的特征,且单一坝体中下部反韵律,发育槽状交错层理、板状交错层理、平行层理等^[14-19],上部则为发育典型冲洗交错层理正韵律。

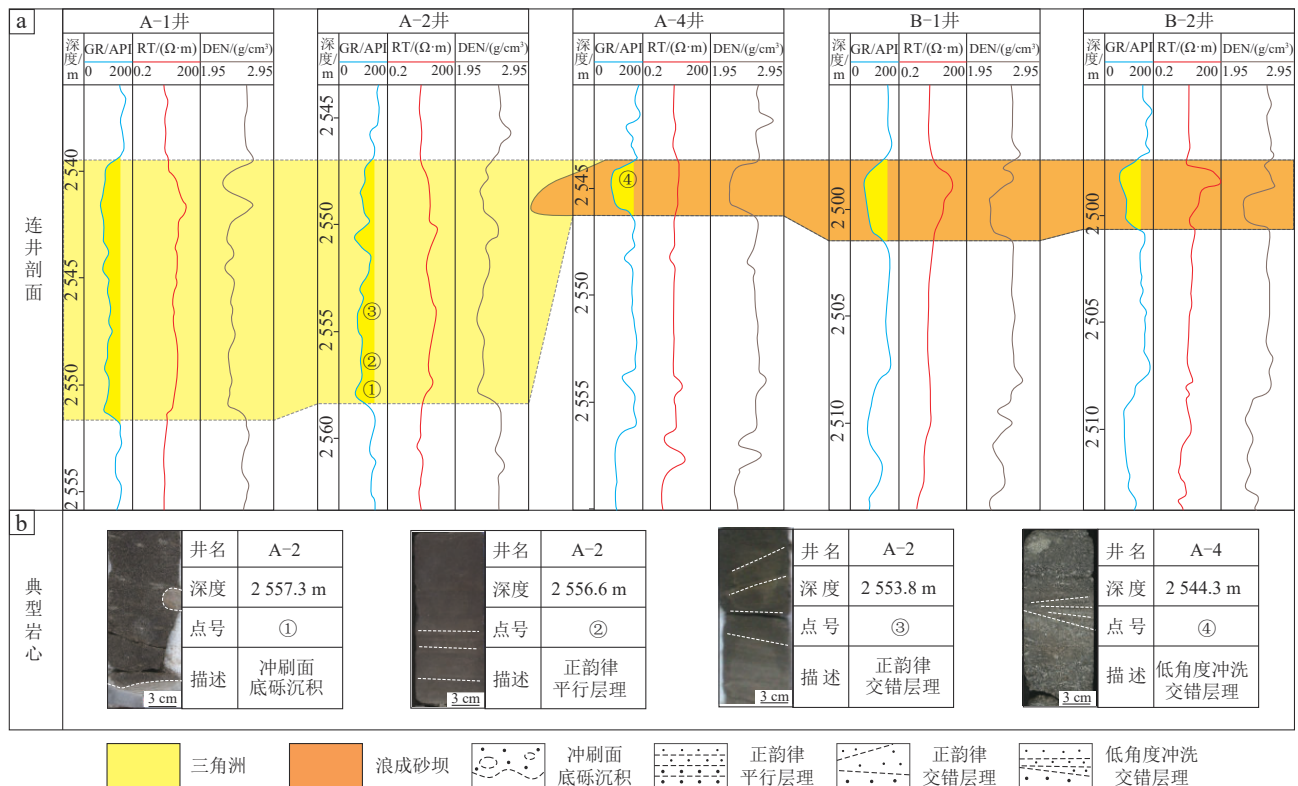


图4 珠江口盆地研究区L层连井剖面(a)及岩心特征(b)

Fig. 4 Well-tie cross-section (a) and core description (b) of layer L in the study area within the PRMB

表1 珠江口盆地惠州凹陷南部L层实钻沉积特征

Table 1 Drilling-revealed sedimentary characteristics of layer L in the southern Huizhou Sag, PRMB

井名	岩性	厚度/m	形态	沉积构造
A-1	岩屑长石砂岩为主	13.6	箱形	—
A-2	长石岩屑砂岩为主	13.0	钟形	板状交错层理、冲刷面
A-3	长石砂岩	8.2	漏斗形	—
A-A3P1	岩屑长石砂岩为主	6.0	钟形	—
A-4	长石石英砂岩为主	3.3	箱形	冲洗交错层理
B-1	长石石英砂岩	4.9	漏斗形	—
B-2	岩屑石英砂岩为主	4.2	漏斗形	—

注:“—”表明该井L层无钻井取心。

青海湖主要发育3种类型浪成砂坝:全封闭斜交岸线型、平行岸线型和半开放斜交岸线型(图5)。但3种类型浪成砂坝在沉积特征方面存在一定区别:①全封闭斜交岸线型浪成砂坝仅发育在青海湖东南岸,复合砂坝宽约1.6 km(图5a,b),砂坝规模大,由于风浪吹程大,波浪能量强,砂坝主体以发育平行层理为主(图5c),上部冲洗交错层理几乎不发育。由于波浪搬运沉积物汇聚此处,该类型浪成砂坝远源细砂、近源粗砾均发育,并由波浪改造形成复合反韵律砂体;②平行岸线型浪成砂坝全区发育,砂坝宽约0.4 km,砂坝规模较小(图5d),复合程度低,中部发育少量板状交错层理,上部冲洗交错层理非常发育(图5e);③半开放斜交岸线型浪成砂坝仅发育在青海湖的南岸和东岸,复合砂坝宽约1.5 km(图5a,f),沉积规模大,平面上又可分为迎风翼和背风翼,其中迎风翼砂坝叠置程度高,背风翼砂坝叠置程度低,砂坝中部发育板状、槽状交错层理(图5g),顶部发育少量冲洗交错层理。

这3种类型浪成砂坝中半开放斜交岸线型浪成砂坝发育形态特殊,且仅发育在青海湖东岸和南岸,发育水动力环境独特。在青海湖南岸,在三角洲侧缘发育了一郎剑和二郎剑这样的典型的半开放斜交岸线型浪成砂坝(图6),由于受到北部大通山和南部青海南山控制,其由强劲波浪改造作用形成,沉积环境与珠江口盆地研究区L层沉积环境相似,且同样发育规模巨大:一郎剑向湖延伸长约5.0 km,宽约1.5 km,二郎剑向湖延伸长约8.0 km,宽约2.0 km。

除此之外,笔者发现此类型浪成砂坝在迎风翼和背风翼呈现两种完全不同的沉积平面形态、砂体规模和砂体叠置关系。迎风翼浪成砂坝叠置程度非常高,砂体规模相对更大,且形态相对平直;背风翼浪成砂坝叠置程度相对较低,砂体规模相对较小,且整体在平面上呈对数螺旋形弯曲特征。

3.2 海岸动力学机理

结合珠江口盆地研究区及青海湖现代沉积环境特征,解释不同角度波浪控制下浪成砂坝形成和演变的控制作用。笔者通过广泛调研发现,在海岸动力学中,沿岸输沙率对研究浪成砂坝的沉积过程有着指导作用:波浪方向与岸线方向的夹角控制了沿岸砂坝的生长形态,而浪成砂坝的沉积过程又会反过来改变岸线的形态。因此,本文通过假定理论条件下的原始沉积物沉积形态,再利用输沙率公式得到不同角度下的沿岸输沙率相对大小变化,即可得到在波浪不同入射角情况下,类似三角洲和平直形滨岸沉积的演化过程。

沿岸输沙率有很多计算方式,美国《海岸防护手册》的CERC公式有较多实验室以及现场资料作为依据被众多学者接受,应用也非常广泛^[20-21],故本文采用CERC公式对盛行风下沿岸输沙率进行计算。Ashton等对CERC公式进行了改进^[3],将未遇浅折射波浪的波峰线走向与岸线走向进行了联系,得到:

$$Q_s = K_2 H_0^{12/5} T^{1/5} \cos(\varphi_0 - \theta)^6 \sin(\varphi_0 - \theta) \quad (1)$$

其中 Q_s 为沿岸输沙率,单位为方每天; K_2 为经验常数; H_0 为波浪遇浅折射前波高,单位米; T 为波浪周期,单位为秒; φ_0 为未遇浅折射波浪的波峰线走向,单位为度; θ 为岸线走向,单位为度。因此,在波浪遇浅折射前波高 H_0 与波浪周期 T 一定的情况下,相对输沙率($Q_s/\max(Q_s)$)与波浪入射角($\varphi_0 - \theta$)之间关系如图7所示。

长期以来,定性观点认为波峰线与岸线夹角越大,沿岸输沙能力越强,但海岸动力学最新研究表明这个观点是不正确的^[3]。由公式(1)可知,沿岸输沙率在波峰线与岸线呈约42°时达到最大,而由于波峰线与盛行风方向垂直(图7),等效于当盛行风与岸线呈约48°时沿岸输沙率最大。这是因为随着夹角度数减小,虽然波浪的沿岸方向分量增大,但是其相对的垂直岸线方向的分量也相应减小,因此波浪破碎倒转产生的能量减小,很难将砂体“掀”起来。

也正因如此,本文将波浪波峰线与岸线夹角 $<42^\circ$ 称作波浪小角度入射,反之则称为波浪大角度入射。考虑沉积古环境中三角洲沉积等会导致原始岸线呈现凹凸形态,本文在海岸动力学岸输沙指导下,通过假设同一原始凹凸岸线(图8a,图9a),发现波浪大角度入射或者小角度入射两种情况下,会形成截然不同形态和规模的浪成砂坝(图8,图9)。

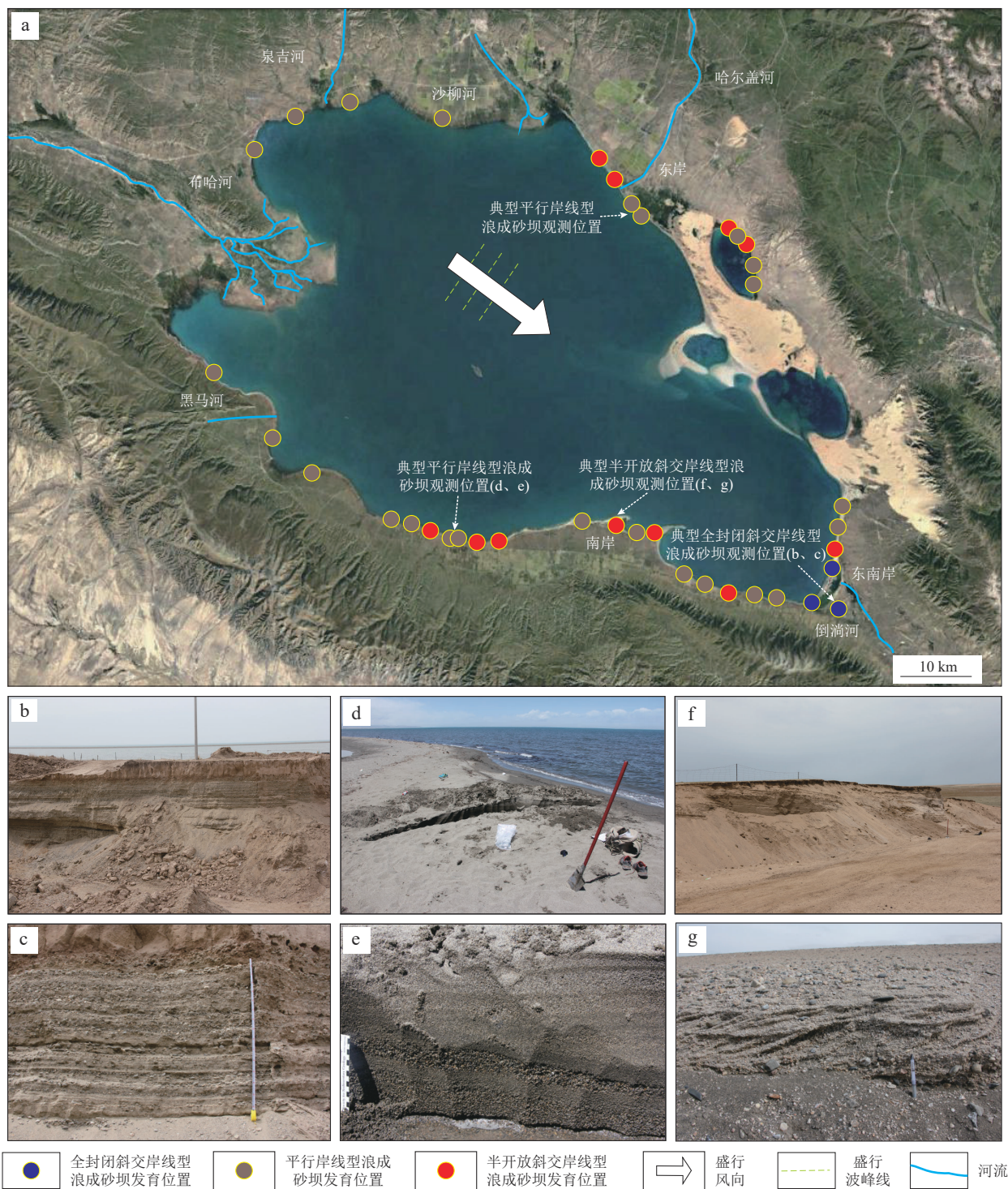


图5 青海湖3种类型浪成砂坝发育位置卫星照片(a)及沉积特征野外照片(b—g)

Fig. 5 Locations (a) and depositional characteristics (b—g) of the three types of wave-induced sandbars in the Qinghai Lake

a. 青海湖3种类型浪成砂坝发育位置; b. 全封闭斜交岸线型浪成砂坝沉积规模形态; c. 全封闭斜交岸线型浪成砂坝沉积剖面; d. 平行岸线型浪成砂坝沉积规模形态; e. 平行岸线型浪成砂坝沉积剖面; f. 半开放斜交岸线型浪成砂坝沉积规模形态; g. 半开放斜交岸线型浪成砂坝沉积剖面

当波浪小角度入射时,水动力会对沿岸沉积物进行改造再沉积,在凸岸线剥蚀,而凹岸线沉积形成封闭潟湖(图8),使得岸线逐渐趋于平直。而当波浪大角度入射时,随着沉积作用的持续,会使得沉积作用更加局部集中化(图9),从而形成生长的“岬角”,且在其后

由于波浪绕射作用,形成叠置程度较低的对数螺旋形砂坝和开阔潟湖。

总的来说,不同角度波浪控制下,浪成砂坝在规模和形态上会存在巨大差异。

在规模上,当波浪小角度入射时,浪成砂坝大规模



图6 青海湖典型半开放斜交岸线型浪成砂坝卫星照片(a)及野外照片(b—i)

Fig. 6 Typical wave-induced sandbars of the semi-open shore-oblique type in the Qinghai Lake

a. 青海湖典型半开放斜交岸线型浪成砂坝; b. 一郎剑迎风翼浪成砂坝; c. 一郎剑浪成砂坝及潟湖; d. 二郎剑浪成砂坝及潟湖; e. 二郎剑浪成砂坝背风翼形态; f. 二郎剑尖浪成砂坝; g. 一郎剑浪成砂坝典型剖面; h. 一郎剑浪成砂坝侧缘探槽; i. 二郎剑浪成砂坝迎风翼典型剖面

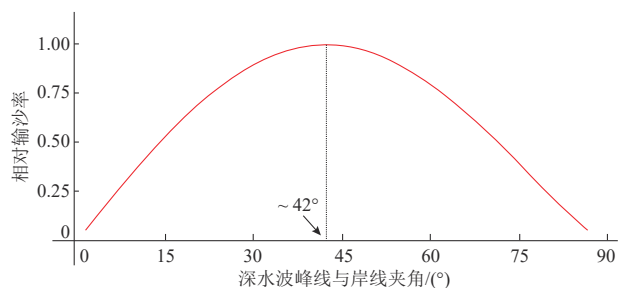


图7 相对输沙率与主峰线和岸线夹角关系(据文献[3]修改)

Fig. 7 Relative sediment transport rate vs. the included angle between the wave crest line and shoreline orientation (modified after reference [3])

发育在岸线凹陷处;当波浪大角度入射时,浪成砂坝则倾向于集中发育在岸线凸起处。

在形态上,当波浪小角度入射时,更易汇聚形成封闭形浪成砂坝和潟湖;当波浪大角度入射时,浪成砂坝砂体会在平直岸线上发育平行于岸线的条带状浪成砂坝,而在岸线凸起处,则形成特殊的斜交岸线的浪成砂坝(图8,图9)。

3.3 浪成砂坝新模式

此前主要根据浪成砂坝发育位置及形态来进行定性分类,而本次研究则基于不同角度下波浪对沉积物

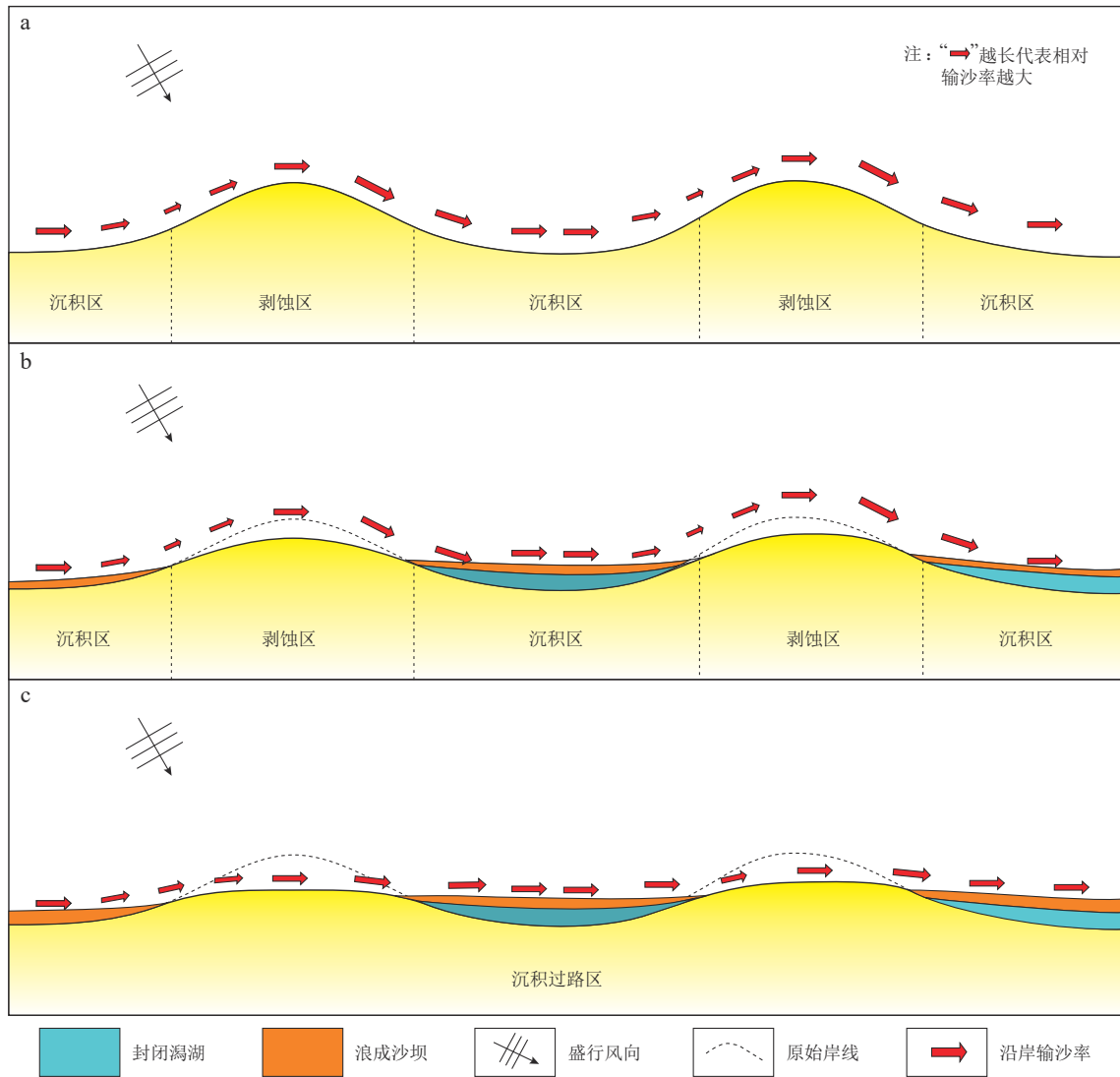


图8 小角度波浪作用下沉积机理及演化过程

Fig. 8 Depositional mechanism and evolutionary process of wave-induced sandbars under low-angle wave incidence

a. 小角度波浪作用前原始沉积平面形态; b. 小角度波浪作用过程中沉积平面形态及输沙率变化; c. 小角度波浪作用过程后沉积平面形态及输沙率

的差异改造作用,结合青海湖考察实例,根据成因的不同(形成位置的不同)将浪成砂坝分为3类:全封闭斜交岸线型、平行岸线型和半开放斜交岸线型,并详细阐述了它们的成因和发育位置(图10)。

当波浪小角度入射时,可形成全封闭斜交岸线型浪成砂坝、平行岸线型浪成砂坝;当波浪大角度入射时,可形成平行岸线型浪成砂坝、半开放斜交岸线型浪成砂坝。因此,平行岸线形浪成砂坝可以在任何角度入射波浪改造形成,而半开放斜交岸线型浪成砂坝只能在大角度波浪改造形成。

在空间形态上,半开放斜交岸线型浪成砂坝由于其生长过程的特殊性,会在迎风翼生长形成叠合程度较高的浪成砂坝(图6b,f),而生长的浪成砂坝的背风

翼由于波浪绕射作用,形成对数螺旋形浪成砂坝,叠合程度相对较低(图6c,d,f)。

4 珠江口盆地研究区沉积模式及潜力

4.1 沉积模式

根据珠江口盆地研究区众多已钻井信息,同时提取L层的均方根振幅属性发现,均方根振幅属性很好地反映岩性、厚度及叠置关系。其中C-5井钻遇泥岩,在属性图中对应低振幅响应,而根据其余钻遇砂岩井显示,砂体厚度越大、叠置程度越高,对应振幅属性越强。

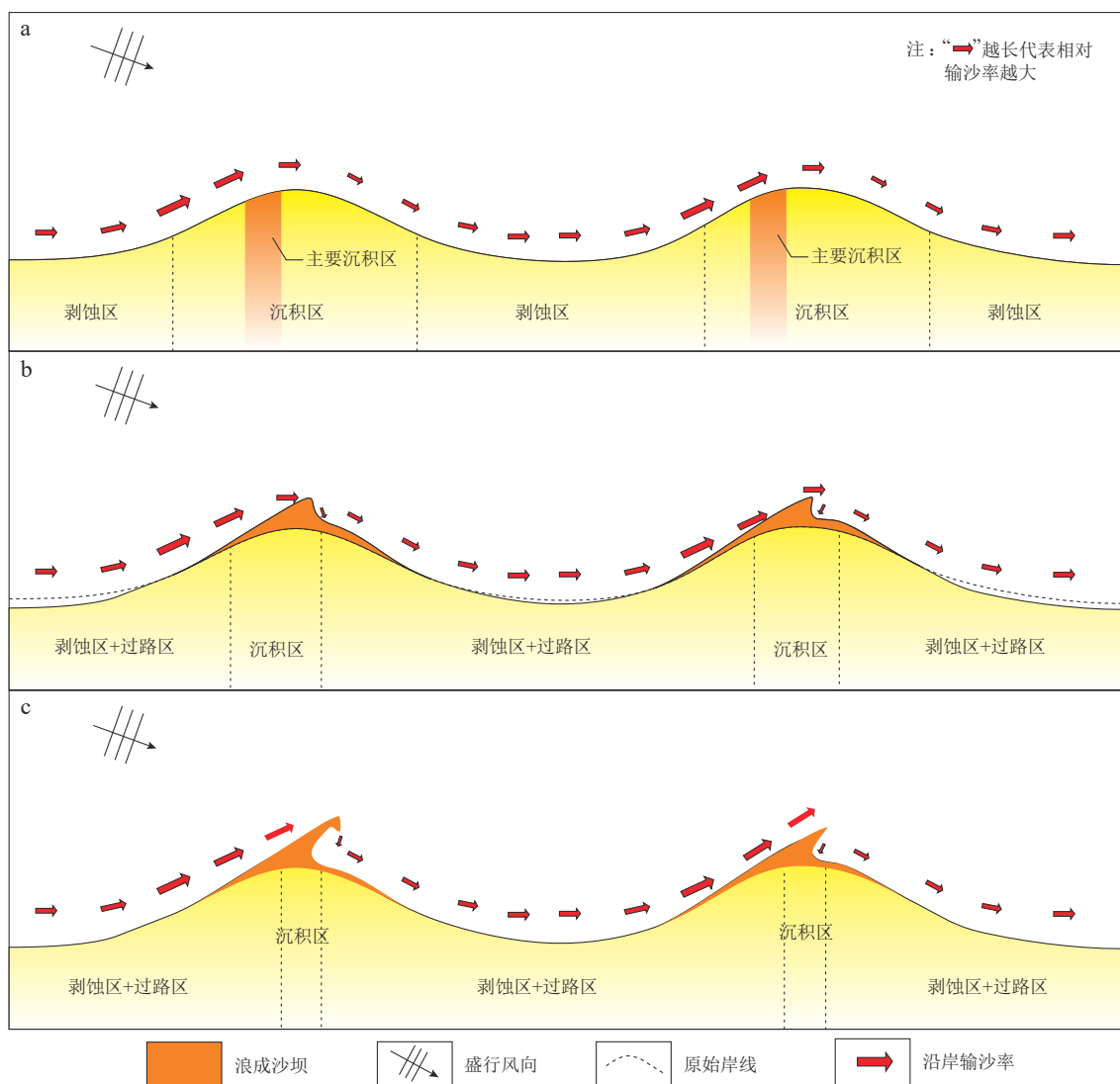


图9 大角度波浪作用下沉积机理及演化过程

Fig. 9 Depositional mechanism and evolutionary process of wave-induced sandbars under high-angle wave incidence

a. 大角度波浪作用前原始沉积平面形态;b. 大角度波浪作用过程中沉积平面形态及输沙率变化;c. 大角度波浪作用后沉积平面形态及输沙率

结合区域沉积水动力背景,从振幅属性图中可明显看出,受到东南部东沙隆起影响,研究区浪成砂坝砂体呈现显著的半开放斜交岸线型浪成砂坝特征。研究区A-4井区与B-1井区显示振幅属性强,砂体呈条带砂体连接,砂体叠置程度高,为迎风翼浪成砂坝。而在研究区西南侧,振幅属性稍弱,呈强弱交互显示,结合半开放斜交岸线型浪成砂坝沉积特征,推断此处也存在叠合程度相对较低的背风翼浪成砂坝,且与主区储层相连,存在一定潜力。

基于振幅属性图特征,结合测井响应,通过平面图和剖面图结合等手段,绘制了珠江口盆地惠州凹陷A/B油田L层沉积相图。由于在珠江组沉积时期,珠江口盆地东北季风盛行,并且由于东沙隆起造成的局部区域“峡谷效应”(图2),在该区域强大角度波浪会形

成半开放斜交岸线型浪成砂坝(图11),其中迎风翼复合砂坝长约6 km,宽约2 km,在背风翼则形成分散的对数螺旋形浪成砂坝。

由于大角度波浪控制,在储层厚度方面,珠江口盆地研究区A-4井区与B-1井区均为浪成砂坝沉积,而A-1井区为三角洲沉积,因此在沉积厚度上相较A-1井区会更薄。储层成分方面,由于古珠江三角洲为相对近源沉积,而浪成砂坝物源来受到上游物源以及本区三角洲改造共同作用,且沉积时受到强烈波浪作用,A-4井区和B-1井区成分成熟度明显更高。

4.2 钻井特征

基于以上地质模式及理论认识,综合评估认为研究区西南方向弱振幅区存在岩性圈闭潜力,应存在与

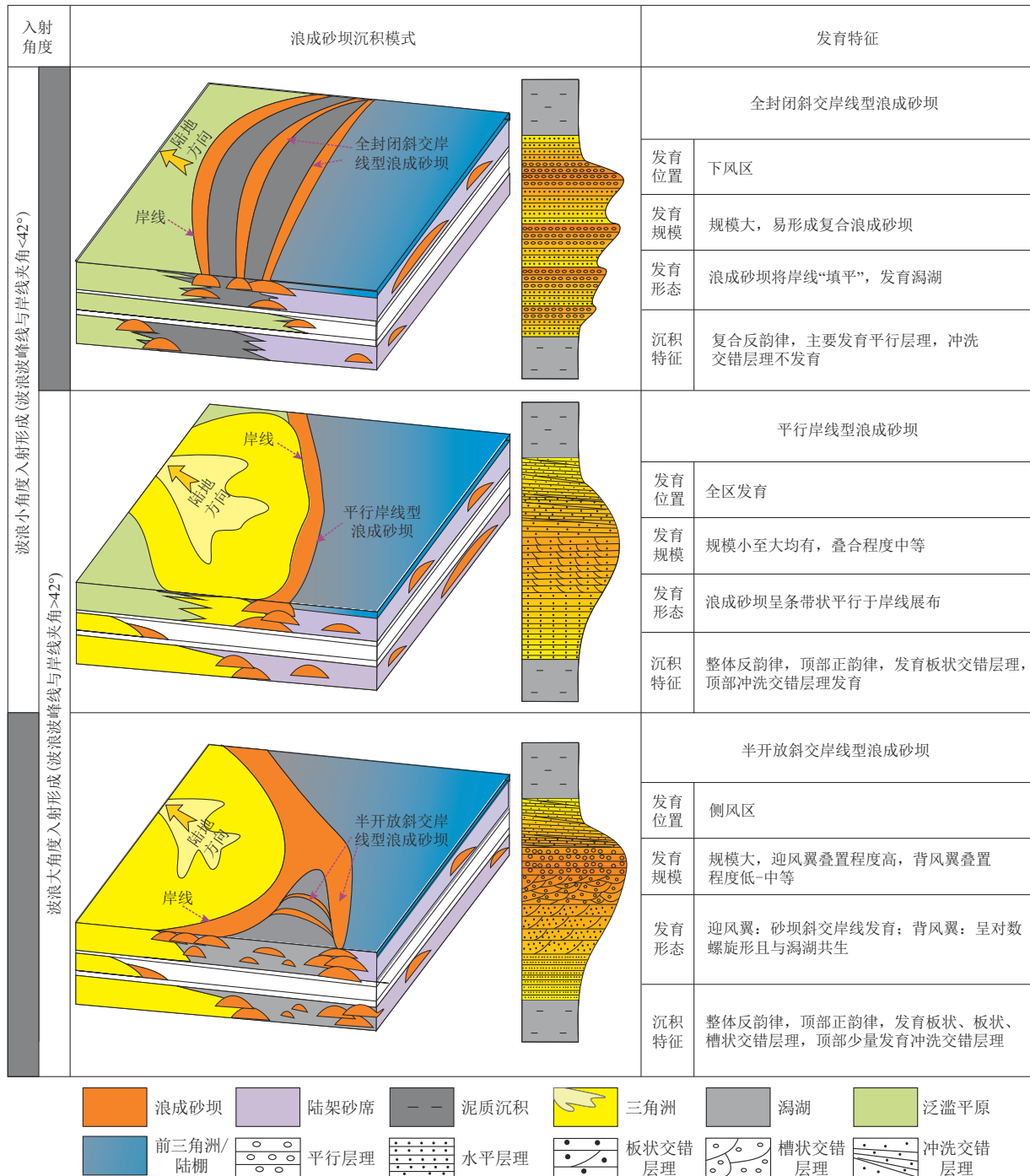


图10 波浪不同角度入射下形成的3种浪成砂坝模式

Fig. 10 Three sedimentary patterns of wave-induced sandbars under wave incidence at different angles

主区相连的背风翼浪成砂坝。为更好动用油藏,在该区域垂直于砂体方向设计了A-A20H调整井,目的是尽可能穿过多期浪成砂坝砂体。

调整井实钻情况显示(图12):A-A20H水平井总共钻遇3套砂体和2套泥岩,且通过探边工具探测发现,3套砂体呈现底平顶凸的特征,厚度为3~5 m。调整井实钻结果证实,该区域砂体呈条带状展布,且砂岩发育的地方含油性均较好,在证实该区域潜力的同时,

进一步验证了该大角度波浪改造形成的浪成砂坝沉积模式。

5 结 论

1) 受限于东沙隆起,惠州凹陷南缘局部区域存在显著的“峡谷效应”,波浪呈大角度入射,且由于沉积期发育的位置不同导致的水动力环境不同,致使两个邻

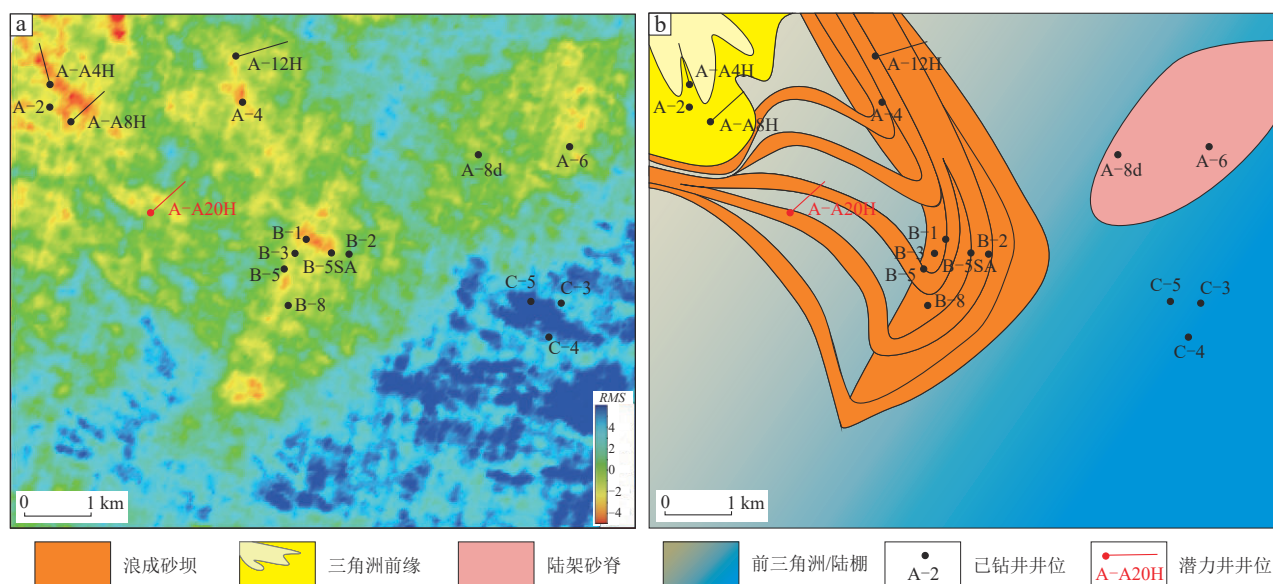


图 11 珠江口盆地研究区 L 层均方根振幅 (RMS) 属性图 (a) 及半开放斜交岸线型浪成砂坝沉积相图 (b)

Fig. 11 Maps showing the Root Mean Square (RMS) amplitude of layer L (a) and the sedimentary facies of wave-induced sandbars of the semi-open shore-oblique type (b) in the study area within the PRMB

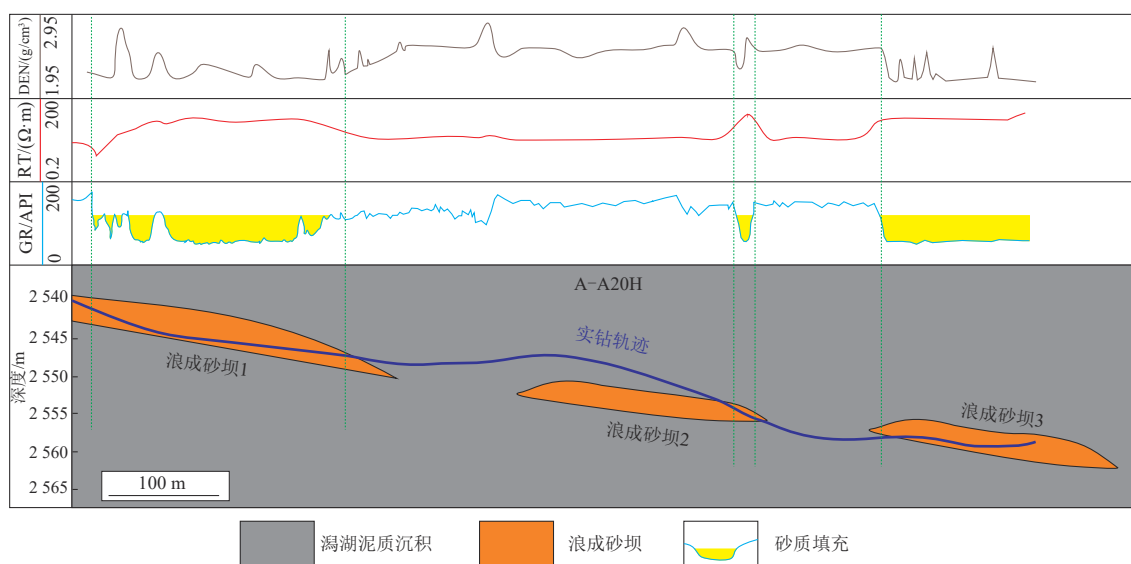


图 12 珠江口盆地研究区 A-A20H 水平井实钻剖面

Fig. 12 Profile revealed by the drilling of horizontal well A-A20H in the study area within the PRMB

近油田的储集砂体在沉积过程中受波浪改造后的形态和规模存在巨大差异;

2) 创新引入海岸动力学沿岸输沙机理,并结合野外地质考察成果,将浪成砂坝分为3类,并首次提出了一种大角度波浪控制下的浪成砂坝新模式;

3) 实钻结果证实,该模式下迎风翼和背风翼砂坝形态、规模及叠置样式差异巨大,且砂体之间易形成“连而不畅”的岩性油气藏,新模式对指导浪成砂坝型储层的勘探与开发具有重要的理论与现实意义。

参 考 文 献

- [1] ASHTON A D, MURRAY A B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 2. Wave climate analysis and comparisons to nature [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2006, 111(F4): F04012.
- [2] ASHTON A D, MURRAY A B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2006, 111(F4): F04011.
- [3] ASHTON A, MURRAY A B, ARNAULT O. Formation of coastline

- features by large-scale instabilities induced by high-angle waves [J]. *Nature*, 2001, 414(6861): 296–300.
- [4] WANG Junhui, JIANG Zaixing, XIAN Benzong, et al. A method to define the palaeowind strength from lacustrine parameters [J]. *Sedimentology*, 2018, 65(2): 461–491.
- [5] 朱筱敏, 信荃麟, 张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. *沉积学报*, 1994, 12(2): 20–28.
- ZHU Xiaomin, XIN Quanlin, ZHANG Jinren. Sedimentary characteristics and models of the beach-bar reservoirs in faulted down lacustrine basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 20–28.
- [6] 姜在兴, 王俊辉, 张元福. 滩坝沉积研究进展综述[J]. *古地理学报*, 2015, 17(4): 427–440.
- JIANG Zaixing, WANG Junhui, ZHANG Yuanfu. Advances in beach-bar research: A review [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(4): 427–440.
- [7] 尹力, 冯文杰, 尹艳树, 等. 波浪作用下砂质滩坝的沉积过程与沉积模式——基于水槽沉积模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2022, 40(5): 1393–1405.
- YIN Li, FENG Wenjie, YIN Yanshu, et al. Process and model of sedimentation of sandy beach bar due to wave action: An experimental study based on sink sedimentation simulation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(5): 1393–1405.
- [8] 刘富强. 利用卫星重力资料研究珠江口盆地北部边界及构造区划[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LIU Fuqiang. Study on the northern border and tectonic division of Pearl River Mouth Basin by using satellite gravity data [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [9] 陈骥, 傅恒, 刘雁婷, 等. 珠江口盆地东沙隆起珠江组沉积环境及演化[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(2): 21–26.
- CHEN Ji, FU Heng, LIU Yanting, et al. The sedimentary environment and evolution of Zhujiang Formation in Dongsha uplift of Pearl-River Mouth Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(2): 21–26.
- [10] 陈骥, 姜在兴, 刘超, 等. “源-汇”体系主导下的障壁滨岸沉积体系发育模式——以青海湖倒淌河流域为例[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(3): 71–79.
- CHEN Ji, JIANG Zaixing, LIU Chao, et al. Depositional models of barrier shoreline sedimentary system under guidance of source-to-sink system theory: A case from Daotang river in Qinghai Lake [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(3): 71–79.
- [11] 袁坤. 青海湖砂砾质滩坝沉积特征和构型研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- YUAN Kun. Sedimentary characteristics and architecture research of sandy-gravel beach-bar in Qinghai lake [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [12] 陈启林, 黎瑞, 金振奎, 等. 青海湖滩坝分布规律及其古气候意义[J]. *现代地质*, 2019, 33(1): 187–197.
- CHEN Qilin, LI Rui, JIN Zhenkui, et al. Beach bar distribution and paleoclimate implications in Qinghai lake [J]. *Geoscience*, 2019, 33(1): 187–197.
- [13] 黎瑞. 滩坝分布规律及控制因素研究——以青海湖现代沉积为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- LI Rui. Distributional pattern and controlling factors of beach-bars——A case study on beach-bars in the Qinghai lake [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [14] 杜晓峰, 庞小军, 黄晓波, 等. 辽西凹陷北部古近系沙河街组二段源-汇系统及其对滩坝砂体的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 662–674.
- DU Xiaofeng, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics of the source-to-sink system for the Paleogene Sha 2 Member of northern Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin and its control on beach bar sands [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 662–674.
- [15] 万琼华, 刘伟新, 罗伟, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷A油田储层质量差异及低渗储层主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 551–560.
- WAN Qionghua, LIU Weixin, LUO Wei, et al. Reservoir quality differences and major factors controlling low-permeability reservoirs of Oilfield A in the Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 551–560.
- [16] 袁坤, 金振奎, 彭飏, 等. 青海湖东南岸现代滩坝沉积模式与识别标志[J]. *现代地质*, 2020, 34(2): 309–320.
- YUAN Kun, JIN Zhenkui, PENG Biao, et al. Sedimentary model and identification marks of modern lacustrine beach-bar on southeast coast of Qinghai lake [J]. *Geoscience*, 2020, 34(2): 309–320.
- [17] 夏辉, 王龙, 张道锋, 等. 鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1段层序结构与沉积演化及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1397–1412, 1488.
- XIA Hui, WANG Long, ZHANG Daofeng, et al. Sequence architecture, sedimentary evolution and controlling factors of the Permian Shan-1 Member, Qingyang Gas Field, southwestern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1397–1412, 1488.
- [18] 万琼华, 刘伟新, 王华, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷辫状河三角洲前缘储层沉积构型模式[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(12): 1732–1742.
- WAN Qionghua, LIU Weixin, WANG Hua, et al. Research on sedimentary architecture pattern of braided river delta front of Lufeng Depression in Pearl River Mouth Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(12): 1732–1742.
- [19] 赵俊威, 孙海航, 张东伟, 等. 典型海相砂质滨坝沉积演化过程及成因机制[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 65–80.
- ZHAO Junwei, SUN Haihang, ZHANG Dongwei, et al. Sedimentary evolution and genetic mechanisms of typical marine nearshore sandbars [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 65–80.
- [20] KOMAR P D. The mechanics of sand transport on beaches [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(3): 713–721.
- [21] 白玉川, 冀自青, 杨艳静. 沿岸输沙计算研究综述[J]. *泥沙研究*, 2012, 37(5): 70–80.
- BAI Yuchuan, JI Ziqing, YANG Yanjing. Review of theoretical models for long-shore sediment transport [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012, 37(5): 70–80.