

珠江口盆地珠三坳陷珠江组快速海侵过程中 沉积体系演化及控制因素*

范彩伟¹ 徐 杰^{2,3,4} 李顺利⁵ 刘 昆¹ 陈贺贺^{2,3,4}

1 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

2 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

3 中国地质大学(北京)极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083

4 中国地质大学(北京)海南研究院, 海南三亚 572000

5 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

摘 要 珠江口盆地珠三坳陷珠江组(23–16 Ma)形成于早中新世快速海侵背景, 记录了珠三坳陷由渐新世珠海组海陆过渡相向韩江组浅海相沉积演化的过程。但目前对该地区海侵过程中沉积相类型、沉积体系演化及控制因素尚不明确, 制约了区域沉积体系分析与油气勘探。综合地震、测井、岩心、薄片及古生物等资料, 开展沉积相类型和沉积相展布规律研究, 并揭示其主控因素。研究表明: 珠江组二段有孔虫丰度和分异度较低, 为滨海沉积环境, 至珠江组一段下亚段, 有孔虫丰度和分异度逐渐增加, 反映沉积环境向内陆架转变, 而珠江组一段上亚段则表现出更高的有孔虫丰度和分异度, 标志环境进一步演化为中—外陆架浅海相; 受控于强沉积物供给, 海侵背景下珠江组二段及一段下亚段都表现为受潮汐作用影响的三角洲沉积, 发育水下分流河道、河口坝和分流间湾 3 种微相, 三角洲沉积发育大量生物碎屑, 且含较多悬浮泥质, 同时, 岩心指示河口坝沉积受到波浪与潮汐的共同作用, 反映复杂水动力环境; 珠江组一段上亚段进入中—外陆架浅海环境, 主要发育粉砂与黏土为主的潮汐沙脊和浅海泥沉积, 砂质含量明显降低; 受持续海平面上升、物源供给减弱及古地貌控制, 研究区早期富砂三角洲沉积体系逐渐演化为富粉砂—泥质的潮汐沙脊—浅海陆架泥沉积体系, 且潮汐沙脊广泛发育于局部古地貌高点。本研究揭示了珠三坳陷琼海凸起周缘珠江组沉积体系演化及其主控因素, 有助于深化对快速海侵背景下沉积体系演化规律的理解。

关键词 海侵 潮汐 三角洲 浅海 沉积特征 珠江组 珠三坳陷 珠江口盆地

第一作者简介 范彩伟, 男, 1973 年生, 教授级高级工程师, 主要从事石油天然气地质综合研究及油气勘探开发技术管理工作。E-mail: fancw@cnooc.com.cn。

通讯作者简介 徐杰, 男, 1985 年生, 副教授, 主要从事沉积学、沉积盆地源汇系统分析和海洋地质方面的教学和科学研究工作。E-mail: jiexu@cugb.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Evolution of sedimentary systems and control factors during marine transgression of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

* 国家自然科学基金(编号: 41902108)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41902108)]

收稿日期: 2025-03-27 改回日期: 2025-06-15

FAN Caiwei¹ XU Jie^{2,3,4} LI Shunli⁵ LIU Kun¹ CHEN Hehe^{2,3,4}

¹ CNOOC Zhanjiang Branch, Guangdong Zhanjiang 524057, China

² School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

³ Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources (Ministry of Education),
China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

⁴ Hainan Institute of China University of Geosciences (Beijing), Hainan Sanya 572000, China

⁵ School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The Zhujiang Formation (23–16 Ma) in Zhu III Depression of Pearl River Mouth Basin developed during the rapid marine transgression in Early Miocene, documenting a critical depositional transition between the marine-continental transitional deposits of the Oligocene Zhuhai Formation and shallow-marine deposits of the Hanjiang Formation. However, sedimentary facies types, depositional evolution, and controlling factors during this transgression remain poorly constrained, limiting regional sedimentological interpretation and hydrocarbon exploration. This study integrates seismic, well-log, core, thin-section, and paleontological data to analyze sedimentary facies, depositional environments, and their controlling factors. Low foraminiferal abundance and diversity indicate a coastal sedimentary environment of the Member 2 of Zhujiang Formation, where as a gradual increase in abundance and diversity in the lower part of Member 1 reflects a shift to inner-shelf settings. Higher abundance and diversity of foraminifera in the upper part of Member 1 further indicate a transition to middle-outer shelf environments. Although water depth increased during the upper Member 1 deposition, strong sediment supply resulted in tidal-influenced deltaic systems prevailing in Member 2 and the lower part of Member 1. These deltas exhibit progradational patterns oriented from northwest to southeast, with distinct distributary-channel, mouth-bar, and interdistributary-bay microfacies. Abundant bioclasts and significant suspended mud indicate tidal rather than wave dominance, as wave dominated deposits typically show uniform grain size, good sorting, high rounding, and minimal mud content. Nevertheless, mouth bars exhibit evidence of both wave and tidal processes, highlighting complex hydrodynamic conditions. In the upper part of Member 1, depositional environment transitioned fully to middle-outer shelf settings characterized by tidal sand ridges and muddy shelf deposits dominated by silt and clay, reflecting significantly reduced sand input. The evolution of these sedimentary systems was primarily controlled by steadily rising sea levels, gradually decreasing sediment supply, and paleotopography, causing the depositional environment to shift from sand-rich deltaic systems to silt-and mud-dominated tidal sand-ridge and shelf-mud systems. Tidal sand ridges developed extensively but mainly occupied local paleotopographic highs. The findings provide insights into depositional evolution and controlling factors of the Zhujiang Formation around the Qionghai uplift, enhancing the understanding of sedimentary processes during rapid marine transgression.

Key words marine transgression, tide, delta, shallow marine, sedimentary characteristics, Zhujiang Formation, Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

About the first author FAN Caiwei, born in 1973, is a professor-level senior engineer. He is mainly engaged in integrated geological studies of oil and gas, as well as technical management in hydrocarbon exploration and development. E-mail: fancw@cnooc.com.cn.

About the corresponding author XU Jie, born in 1985, is an associate professor. He is mainly engaged in sedimentology, source-to-sink systems research and teaching in sedimentary basins and marine geology. E-mail: jiexu@cugb.edu.cn.

珠江口盆地是中国南海北部重要的油气勘探区,是边缘海盆地演化研究的天然实验室(米立军,2018;米立军等,2019;郑金云等,2022;范彩伟等,2022;高阳东等,2024)。近年来,该区沉积地质研究取得了丰富成果,尤其是在白云凹陷、番禺低凸起及其南部陡坡带的深水重力流沉积过程(王家豪等,2024)、珠江水系—珠江口盆地—南海北部深水区源汇系统重建(Cao *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2022a; Li *et al.*, 2024),以及古环境与古水深重建(Guo *et al.*, 2025)等方面均有重要进展。相比之下,位于渐新统珠海组之上、新近系韩江组之下的下中新统珠江组,记录了南海初步开阔后的滨海三角洲至浅海陆架的沉积演化过程,但其沉积机制、演化模式及控制因素的研究相对薄弱。目前研究多集中于珠一坳陷珠江组的基础层序地层划分与沉积相描述(丁琳等,2014;吕建波,2020;Wang *et al.*, 2021;丁琳等,2024),对于珠三坳陷西部快速海侵背景下沉积动力机制及潮汐与波浪交互作用下的沉积体系演变过程研究尚不深入。

近些年的研究表明,珠江口盆地新近系珠江组海侵背景下受三角洲和碳酸盐岩台地所局限而发育的潮汐通道系统可形成条带状陆架砂体,这些砂体侧向上与浅海泥岩相互拼接,具有形成有效岩性圈闭的条件(Zhang *et al.*, 2017;朱明等,2019)。阳江凹陷珠江组沉积学研究揭示潮汐—河流交互作用与高频海平面振荡共同控制多类型砂体展布(吴静等,2021)。张彦振等(2024)基于古生物、微量元素、特殊矿物、岩性和粒度等资料研究指出珠一坳陷惠州北凹珠海组、珠江组发育大型海相三角洲—滨浅海沉积,其中储集层主要为三角洲前缘水下分流河道砂体。

珠三坳陷珠海组、珠江组处于断拗转换期,在海平面持续上升的背景下,沉积环境由早期三角洲—海湾—障壁体系逐步向浅海陆架过渡(张迎朝等,2011;晁彩霞,2013;甘永年等,2016;钟玉婷等,2023)。琼海凸起—神狐隆起正向地貌影响三角洲发育,形成潮汐—波浪—河流多动力耦合的复杂沉积体系(钟泽红等,2018)。珠江组快速海侵过程中,高频海平面振荡以及潮汐、波浪对早期沉积物的再改造作用,易于形成多套砂—泥储盖组合,从而构成具有较大油气勘探潜力的地层岩性圈

闭群,已成为珠江口盆地下一步勘探的重要方向(徐长贵和范彩伟,2021)。然而,现阶段针对珠江组海侵过程中各类砂体及岩性圈闭形成的沉积环境、动力机制与主控因素的系统认识仍处于初级阶段(宋广增等,2023;高阳东等,2024)。钟泽红等(2018)指出珠江组二段和珠江组一段下亚段以三角洲沉积为主,珠江组一段上亚段为浅海沉积且存在浊流沉积。李伟等(2019)认为珠江组一段上部主要发育滨外沙坝、潮流沙脊、风暴砂等3种成因的陆架砂体,受到波浪、潮汐和风暴作用的共同影响;刘娜等(2025)则认为珠三坳陷主要受到波浪的影响,发育临滨沙坝、滨外沙坝和浅海泥岩等微相。

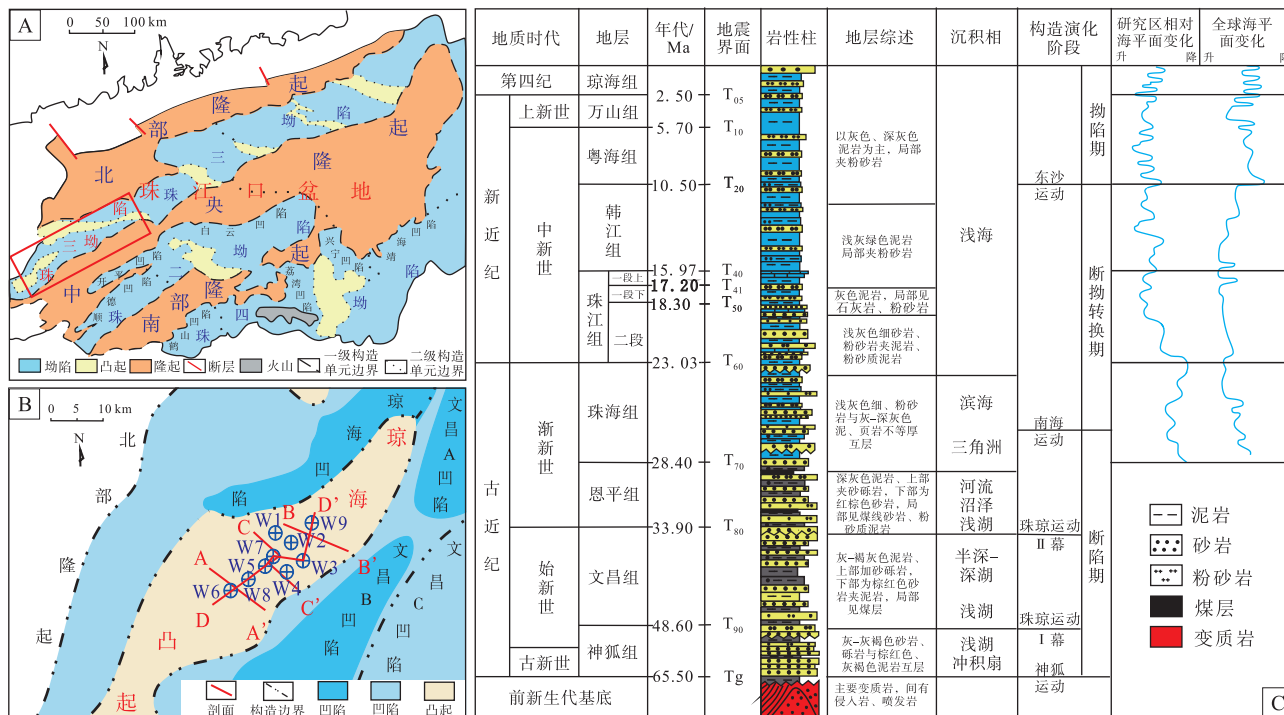
可见,对于珠三坳陷珠江组研究尚存在不同的认识,系统厘清珠江组快速海侵驱动的滨海—浅海沉积体系演化模式及其对构造沉降、海平面波动与物源供给的响应机制,已成为当前研究区沉积学与油气勘探研究的重要科学问题。基于此,综合地震、测井、岩心、薄片及古生物等资料,对珠三坳陷琼海凸起一带的沉积相类型、沉积环境演化与主控因素进行系统分析。

1 地质概况

1.1 位置及构造背景

珠江口盆地位于南海北部,东侧邻接东沙群岛和台湾岛,西侧与海南岛相接,南接西沙群岛,整体呈北东—南西向展布。盆地总长度约为800 km,宽度在100~300 km之间,面积约为 $1.75 \times 10^5 \text{ km}^2$,属于南海北部大陆架和陆坡上的1个大型新生代含油气沉积盆地。盆地内部构造复杂,分布有多个主要构造单元,其中包括3个正向的一级构造单元:北部隆起、中央隆起和南部隆起;以及4个负向的一级构造单元:珠一坳陷、珠二坳陷、珠三坳陷和珠四坳陷(图1-A)。珠江口盆地西部的珠三坳陷区域,油气资源主要集中在4个重要的油气富集区:文昌A凹陷、文昌B凹陷、神狐隆起和琼海凸起(图1-B)(权永彬,2018;陈林等,2021,2023;范彩伟等,2022)。

珠三坳陷古近纪以来分别经历了断陷期(古近纪)、断拗转换期(古近纪晚期—中新世)和拗陷期(中新世晚期以来),并先后经历了神狐运



A—珠江口盆地构造单元划分图（据钟玉婷等，2023；有修改）；B—珠三坳陷构造单元划分图（据李伟等，2019；徐万兴等，2023；有修改）；C—珠江口盆地综合地层柱状图（据林畅松等，2018；范彩伟等，2022；有修改）

图 1 珠江口盆地珠三坳陷构造单元划分及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic units and composite stratigraphic column of Pearl River Mouth Basin and Zhu III Depression

动、珠琼运动 I 幕、珠琼运动 II 幕、南海运动和东沙运动（范彩伟等，2022；郑金云等，2022；徐万兴等，2023）（图 1-C）。

1.2 沉积背景

珠江口盆地新生代经历了陆相（文昌组、恩平组）—海陆过渡相（珠海组）—海相（珠江组）—现今的沉积演变过程（张功成等，2015；高阳东等，2021）。研究区的目的层为珠江组（23~16.5 Ma），其形成于盆地的拗陷阶段，和下伏的珠海组存在整合接触关系，在部分区域则表现为角度不整合接触，在地震剖面上为 T60 与 T40 反射面之间的地层。珠江组是 1 套海相沉积地层，下部主要为三角洲沉积，上部主要为半开阔浅海相泥岩夹砂岩（高阳东等，2021；徐长贵和范彩伟，2021；吴太霏等，2024）（图 1-C）。珠江组是珠三坳陷的优质储集层，其上部及韩江组的大套泥岩能够作为有效的盖层。珠江组沉积早期，神狐隆起和琼海凸起地区仍然出露地表，为珠三坳陷内的相邻凹陷提供了重要的物源供给。随着海平面的不断上升（图 1-C），珠江组沉积晚期，琼海凸起和神

狐隆起逐渐被海水淹没，成为水下高地（钟泽红等，2018）。

2 沉积环境及沉积相类型

2.1 古生物沉积水体环境分析

海平面的升降变化会引起海水深度的波动，尤其在大陆边缘盆地，这种变化必然会影响生物群落的组成，具体表现为生物丰度和分异度的周期性波动。因此，生物丰度和分异度的变化反映了生物群落对环境变化的综合响应，可以有效的指示古水深度的变化（郝诒纯等，2000；李学杰等，2004）。毛雪莲等（2019）通过分析浮游有孔虫的丰度和相对含量，并结合微体古生物化石带、岩性、电测及地震数据，总结出了三级层序边界和最大海泛面的识别标志。可见古生物资料，如浮游有孔虫的丰度和分异度是水深的有效指标，其中当浮游有孔虫百分含量和分异度下降时，水体变浅，反之浮游有孔虫比例和分异度上升时水深增加（陈中强等，1998；Murray，2006）。

基于系统的古生物资料分析表明，珠江组整体

呈现持续海侵特征，水体深度自下而上逐渐加深。尽管在局部因海平面波动出现短暂下降，但整体趋势由珠江组至韩江组均呈上升态势，这从有孔虫丰度、分异度及浮游有孔虫比例的变化中得以体现（图 2）。以研究区 W5 井为例，珠江组二段浮游有孔虫比例较低，有孔虫分异度介于 2~4 之间，总丰度为 3~20 枚/50 g，浮游有孔虫丰度为 3~5 枚/50 g；由于这些指标较低，该层被判定为滨海沉积环境。相对地，在珠江组一段下亚段 1266 m 附近层位，分异度为 6，数值较低，大于 0.25 mm 浮游有孔虫比例达到 38.46%，总丰度为 26 枚/50 g，浮游有孔虫丰度为 10 枚/50 g，推测为内陆架内侧沉积。珠江组一段上亚段则整体表现为海侵背景下的阶段性波动，在 1190 m 处样品分异度为 8，浮游有孔虫比例为 21.52%，总丰度为 632 枚/50 g，浮游有孔虫丰度为 136 枚/50 g，推测为内陆架沉积；而向上 1080 m 处分异度最大为 48，浮游有孔虫比例达到 53.65%，总丰度 26 436 枚/50 g，浮游有孔虫丰度为 14 160 枚/50 g，推测为中、外陆架

沉积。珠江组一段上亚段自下而上（1200 m 至 990 m）呈现内陆架→外陆架→内陆架→中、外陆架的旋回特征，反映出海平面波动或沉积动力变化引起的水深反复调整，整体水深较深。韩江组时期，有孔虫丰度和分异度进一步上升，标志着水深进一步加大，进入了开阔浅海环境（图 2）。

总体而言，自珠江组二段至韩江组，浮游有孔虫丰度、分异度与水体深度呈阶梯式增长，完整记录了海侵背景下陆架环境的演化序列。

2.2 沉积相类型及识别标志

基于古生物资料水深分析，综合岩心、测井、地震及粒度数据，揭示珠三坳陷珠江组沉积体系的空间分布特征。由于珠三坳陷琼海凸起一带珠江组的取心多来自浅层（深度多小于 1400 m）而较为疏松，部分岩心由于含油和长期的暴露风化，导致大量岩心变为松散沉积物或原始的沉积现象不明显，因此本次研究使用的岩心照片基于早期的照片和最新观察和拍摄的照片。综合研究表明珠江组二

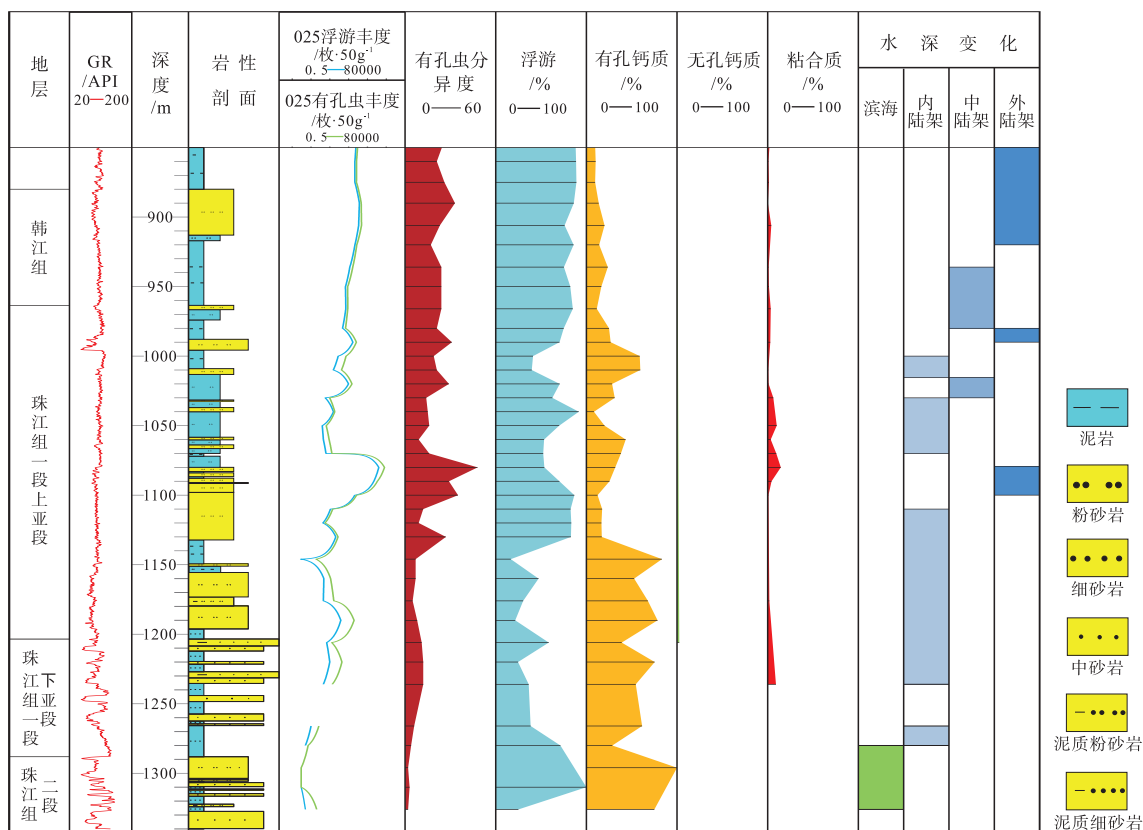


图 2 珠江口盆地珠三坳陷 W5 井珠江组测井、录井和古生物综合柱状图

Fig. 2 Integrated log, mud logging, and paleontological column in the Zhujiang Formation of Well W5, Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

段至一段下亚段主要为受潮汐作用影响的三角洲沉积，而珠江组一段上亚段则表现为浅海陆架和潮汐沙脊沉积体系。

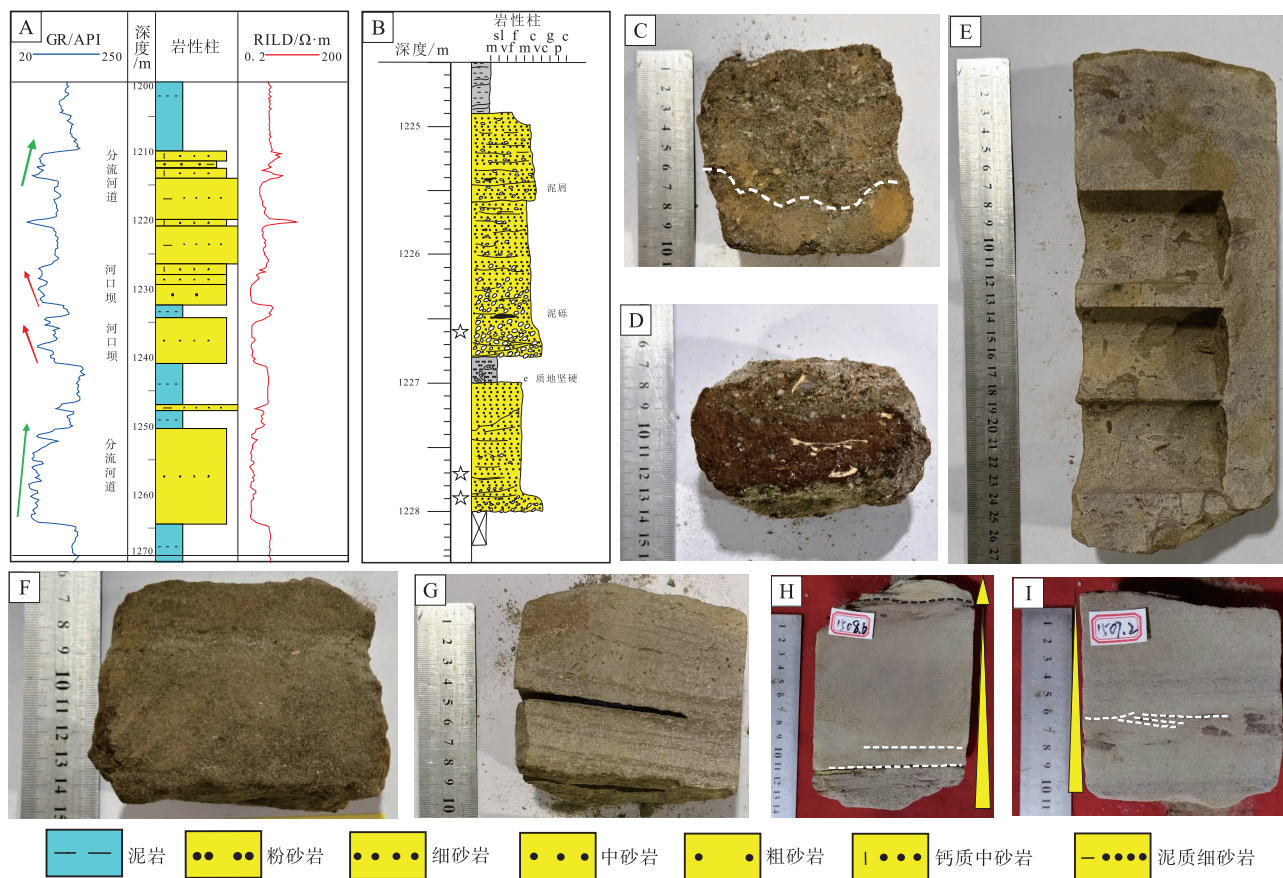
2.2.1 潮汐影响的三角洲

在珠江组二段和一段下亚段沉积期间，浮游有孔虫资料指示滨海水深条件(图 2)。综合岩心、测井和地震资料表明珠二段为潮汐影响的三角洲沉积，研究区主体位于三角洲前缘和前三三角洲亚相，三角洲平原亚相位于研究区外的西北方向。其中三角洲前缘可以进一步划分为河口坝、水下分流河道和水下分流间湾 3 种微相。

1) 水下分流河道

三角洲前缘水下分流河道是三角洲平原河道的水下自然延伸，属于分流河道系统向静水体前积发

展的部分，常位于浅水区。珠三坳陷水下分流河道表现为多期正旋回特征，底部由较粗粒岩性组成，向上逐渐过渡为细粒沉积，因此在测井曲线上常呈箱型或钟型(图 3-A)。岩心资料显示，多期正韵律叠置普遍存在(图 3-B, 3-C)，部分岩心可见冲刷面，反映新一期强水流对早期沉积物的侵蚀作用，并在冲刷面上方形成滞留砾石沉积(图 3-D)。此外，水下分流河道中的砾岩和块状砂岩(图 3-D, 3-E, 3-F) 含有大量生物碎屑及生物扰动现象，如蛇形迹 (*Ophiomorpha*) (图 3-E) 为典型的滨岸居住迹，该类生物遗迹指示半咸水—咸水环境，常发育在潮汐作用较强的滨岸带 (MacEachern *et al.*, 2005)，进一步印证了珠二段沉积时期的潮汐影响。此外，水下分流河道还可见平行层理、槽



A—水下分流河道测井和录井特征，GR 曲线多呈箱型和钟型，W6 井；B—多期正旋回河道相互叠置，W6 井；C—细砾岩，可见冲刷面和生物碎屑，W6 井，1226.6 m；D—细砾岩，含生物碎屑，W6 井，1227.9 m；E—块状细砂岩，发育蛇形迹 (*Ophiomorpha*)，W6 井，1227 m；F—块状含砾中砂岩，W6 井，1277.5 m；G—平行中砂岩层理砂岩，W6 井，1210 m；H—平行层理细砂岩，顶部可见冲刷面，粒度由底部向上变细构成正韵律，W9 井，1508.6 m；I—槽状交错层理细砂岩，可见冲刷面，粒度由底部向上变细构成正韵律，W9 井，1507.2 m

图 3 珠江口盆地珠三坳陷珠江组水下分流河道沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of subaqueous distributary channels of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

状交错层理以及冲刷泥砾层等构造,反映高能环境(图 3-G, 3-H, 3-I)。岩性组合普遍呈现粒度向上变细的正粒序结构,底部多发育明显的冲刷面及滞留砾石沉积,上部逐渐过渡为槽状交错层理和平行层理,显示出流体能量由强至弱的演化过程。上述沉积特征与粒度韵律共同构成了水下分流河道的典型识别标志。

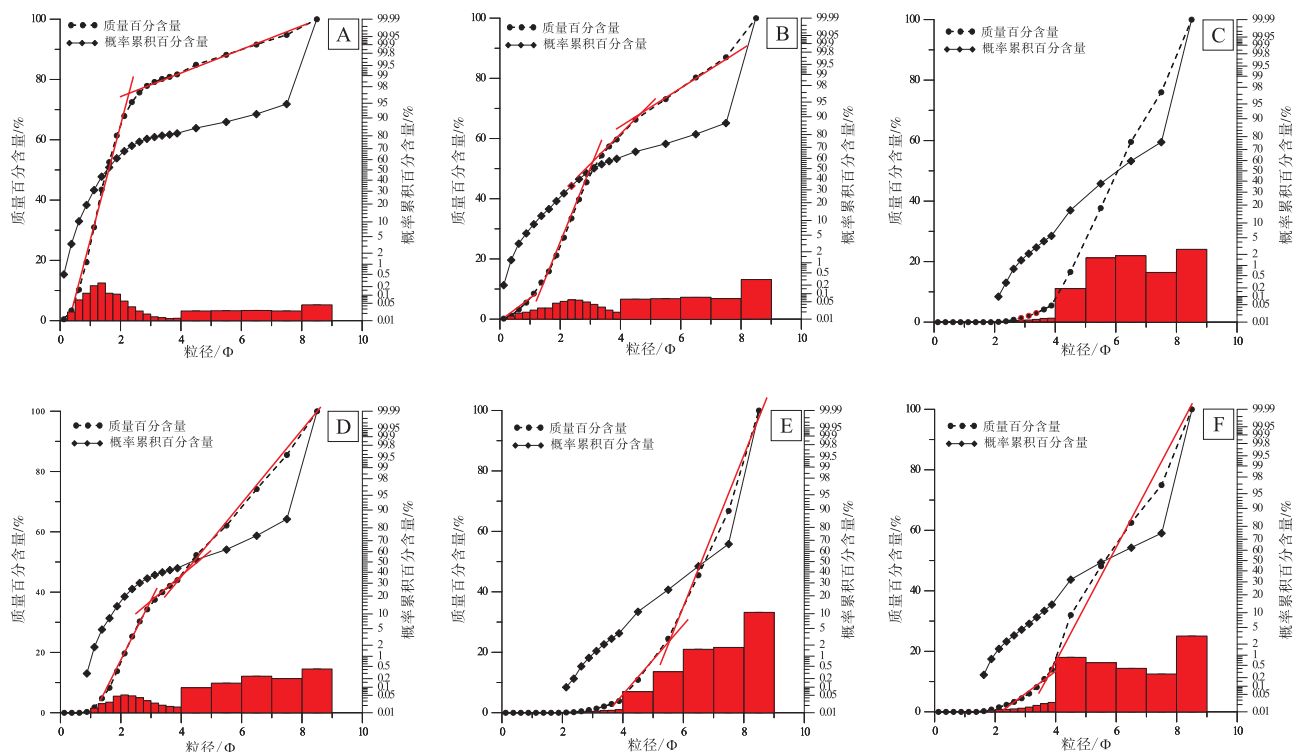
在河流主导的分流河道中,由于大多为淡水环境,常见的贝类多为内陆或河口适应种,数量有限且一般不会高度破碎。与之对比,在潮汐影响的分流河道中,贝壳碎屑出现更为频繁,这是因为短暂海侵时(如潮流上涨)将海洋贝壳带入河道后留下的残留滞积层。典型特征是在河道充填的底部存在由贝壳碎片和砂砾构成的滞留层(Tanavsuu-Milkeviciene and Plink-Bjorklund, 2009)。因此研究区观察到河道底部滞留沉积中存在生物介壳的碎片很可能是来自潮流搬运的影响。

沉积物粒度受沉积环境、搬运方式及介质特性的综合影响,因此可作为反映沉积期水动力条件的

重要指示参数之一(姜在兴和陈代钊, 2022)。研究区水下分流河道粒度概率累积曲线呈典型两段式,同时显示约 20% (小于 4Φ) 的悬浮沉积组分,较高的悬浮组分可能反映了潮汐静水期泥岩的悬浮沉积(图 4-A)。

2) 河口坝

河口坝是珠三坳陷珠江组二段和一段下亚段另一类重要沉积微相,其常与水下分流河道相伴生,其生长和迁移会导致分流河道的形成和充填,是三角洲前缘的重要组成部分(Olariu and Bhattacharya, 2006)。河口坝沉积常表现为多期反旋回特征,其沉积过程由底部以细粒岩性(如粉砂岩)为主,生物扰动程度强(扰动指数 BI 可达 5),向上逐渐过渡为较粗粒的岩性(细砂岩和中—粗砂岩),反映出水动力条件逐步增强;在测井曲线上常呈漏斗型(图 5-A)。岩心资料显示,河口坝沉积呈现多期反韵律叠置特征(图 5-B)。由于岩心含油,细—粗砂岩因孔隙度高通常呈黑色,表现为高含油性,而粉细砂岩因孔隙度较低而含油性低,

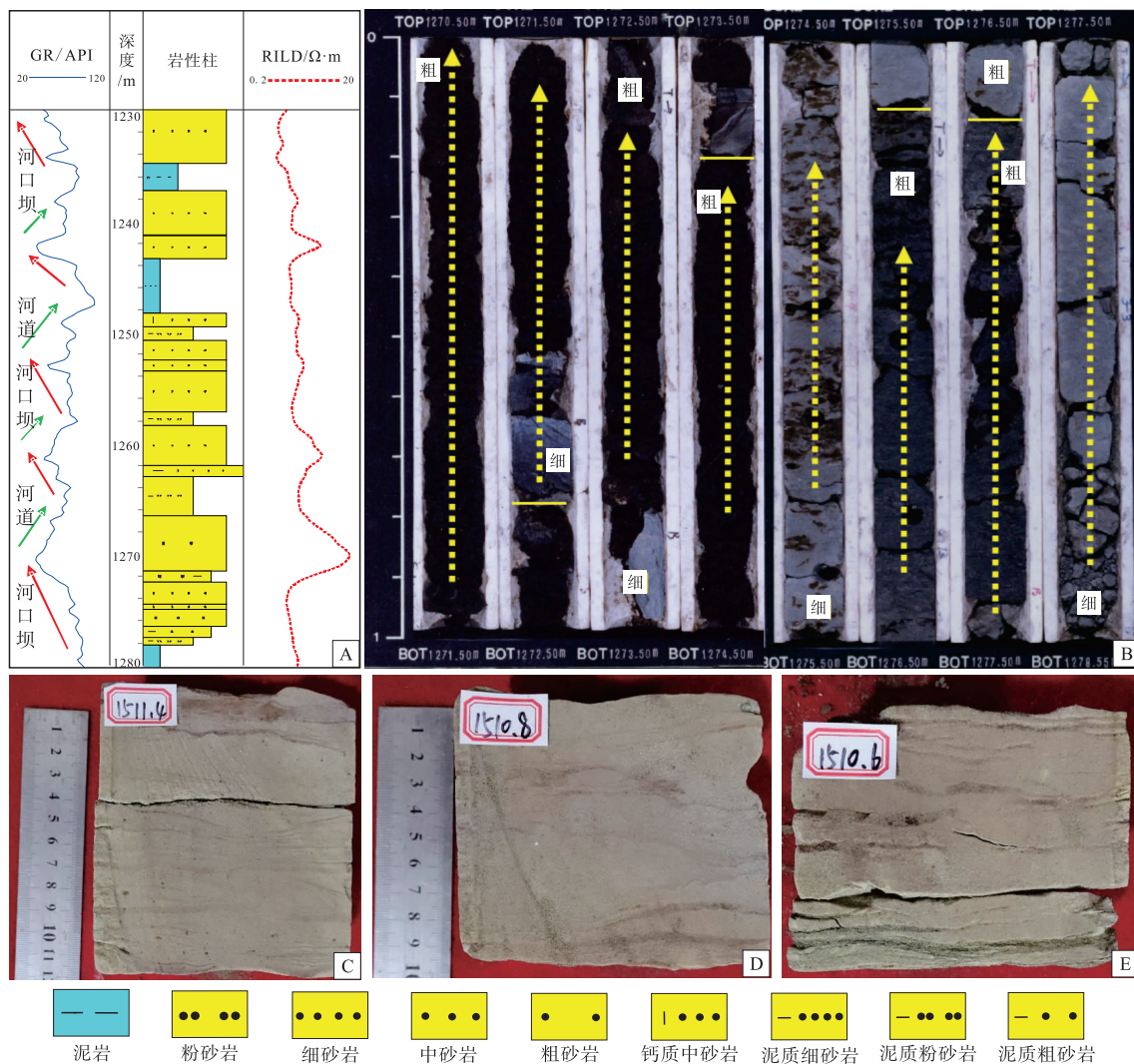


A—水下分流河道粒度特征, W3 井, 1216.45 m; B—河口坝粒度特征, W3 井, 1287.5 m; C—水下分流间湾粒度特征, W3 井, 1194.39 m;

D—潮汐沙脊粒度特征, W3 井, 1070.24 m; E—浅海泥岩粒度特征, W3 井, 1073.4 m; F—浅海泥岩粒度特征, W3 井, 1075.4 m

图 4 珠江口盆地珠三坳陷珠江组不同沉积微相粒度分布特征

Fig. 4 Grain size distribution characteristics of different sedimentary microfacies of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin



A—河口坝测井和录井特征，GR 测井曲线呈漏斗状，W3 井；B—岩心特征，可见多期反旋回叠置，深褐色部分为含油粗砂岩，W3 井；C—波状交错层理，局部可见双黏土层，W9 井，1511.4 m；D—波状交错层理，W9 井，1510.8 m；E—波状交错层理，W9 井，1510.6 m

图 5 珠江口盆地珠三坳陷珠江组河口坝测井和岩心特征

Fig. 5 Logging and core characteristics of mouth bar deposits of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

呈现灰白色。以 W3 井 1278.55~1271.5 m 处岩心为例，可观察到存在 5 期向上变粗的反粒序互相叠置，构成了一套 5 期河口坝沉积序列。虽然大量的研究表明河流三角洲的河口坝通常表现出整体向上变粗的粒度演化趋势 (Tye and Coleman, 1989; Bhattacharya and Willis, 2001; Schomacker *et al.*, 2010)。但同时也有学者指出在扇三角洲的沉积序列中也可以出现正粒序的河口坝 (Benvenuti, 2003; Fabbriatore *et al.*, 2014)。Zhang 等 (2022) 针对湖相扇三角洲开展水槽实验分析，研究表明在基底层坡度较陡、水流量较大、泥沙/水比高以及沉积物较粗的实验中，河口坝呈现出向上粒度变细

的演化趋势，这是由于水流以强惯性为主所致。而在基底坡度较缓、水流量较小、泥沙/水比较低以及沉积物较细的实验中，河口坝则表现出向上变粗的趋势，其出流过程主要受摩阻作用控制。对于研究区的海相三角洲沉积，粒度以中细砂岩为主，局部含少量砾石，泥岩多为灰色，不属于近源扇三角洲，其河口坝的粒度变化趋势符合典型的海相三角洲中的反粒度特征。因此岩心中的反粒序，测井曲线中的漏斗状可为河口坝的识别标志之一。

河口坝的形成与演化不仅受河流动力控制，还常受到波浪和潮汐的共同影响，导致其水动力条件高度复杂。珠三坳陷珠江组二段和一段下亚段岩心

上不仅能见到代表波浪影响的波状交错层理,同时部分岩心上还可以见双黏土层,反映波浪和潮汐复合的水动力条件(图 5-C, 5-D, 5-E)。镜下薄片观察发现,河口坝砂体可见大量的生物碎屑,反映波浪或潮流对于沉积物和原本完整的生物介壳的再次改造(图 6-A, 6-B)。生物碎屑中可见双壳类、腕足类海相生物化石的碎片,代表了潮汐或波浪的影响。大量的生物碎屑的富集可能指示了短暂的海侵,同时在后期可能成为砂岩中钙质流体的来源,从而在成岩阶段形成钙质砂岩,影响储集层的质量(陈金定等, 2011)。

此外河口坝砂岩中常见富含石英颗粒层与富黏土层交替出现的现象。这种粗细交替出现的现象反映了高能与低能水动力条件的频繁交替:在高能条件下,主要沉积较粗的富石英颗粒;而在低能环境中,则以细粒悬浮黏土的沉积为主(图 6-C, 6-D)。这种能量条件的周期性交替与潮汐能量的涨落转换密切相关,体现了潮汐作用对河口坝沉积过程的重要影响。

粒度概率累积曲线显示为一段滚动、两段跳跃和一段悬浮,其中跳跃组分反映了潮汐和波浪的往

复作用对河口坝砂体的改造效应,而悬浮组分形成于潮汐水流停歇时期的静水悬浮沉降(图 4-B)。

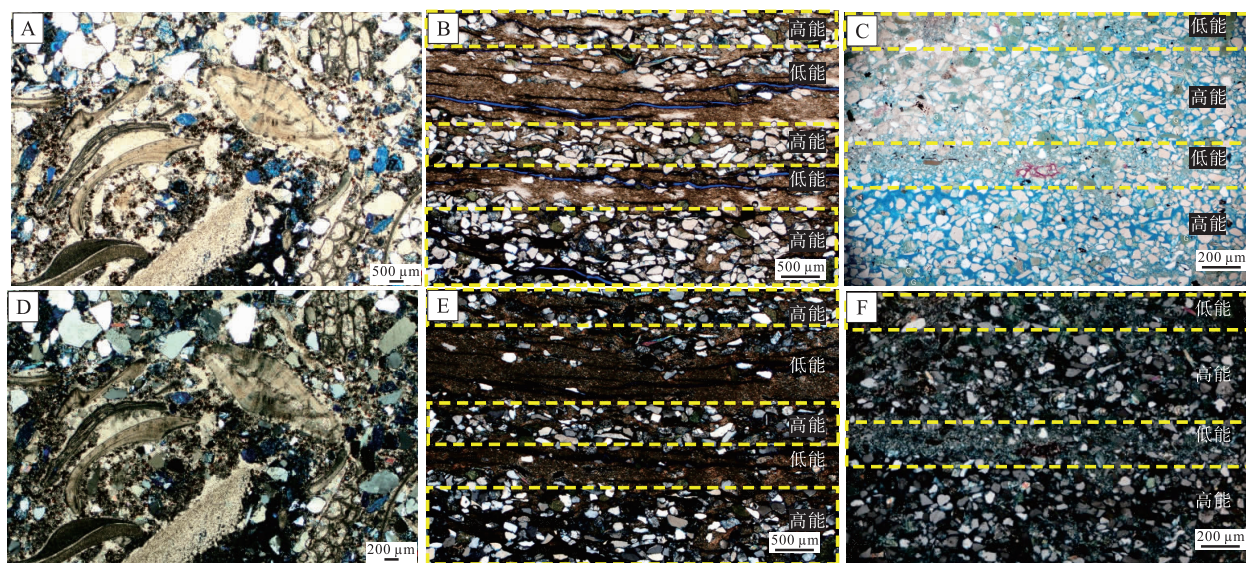
由于地震分辨率有限,地震资料通常难以区分水下分流河道与河口坝,除非能识别明显的下切水道形态。研究区地震剖面揭示,珠江组二段及一段下亚段均存在大量前积反射,指示三角洲前缘沿西北向东南方向推进(图 7-A, 7-B)。

3) 水下分流间湾

水下分流间湾位于水下分流河道与河口坝沉积之间,处于较低能环境,因此主要沉积以细粒泥岩夹薄层粉砂岩为主。在 GR 测井曲线中,其响应接近泥岩基线,或因夹杂少量薄层粉砂岩而呈现低幅锯齿状特征(图 8-A)。岩心观察显示,该区域主要以暗色泥岩沉积为主,同时可见透镜状层理和脉状层理,发育漫游迹 (*Planolite*),反映沉积时期主要为半咸水环境,表明该沉积微相受到明显的潮汐作用影响(图 8-B, 8-C, 8-D)。粒度概率累积曲线呈两段式,其中跳跃段仅占 10%,其余 90% 的粒度反映为静水悬浮泥质沉积(图 4-C)。

2.2.2 浅海陆架—潮汐沙脊沉积

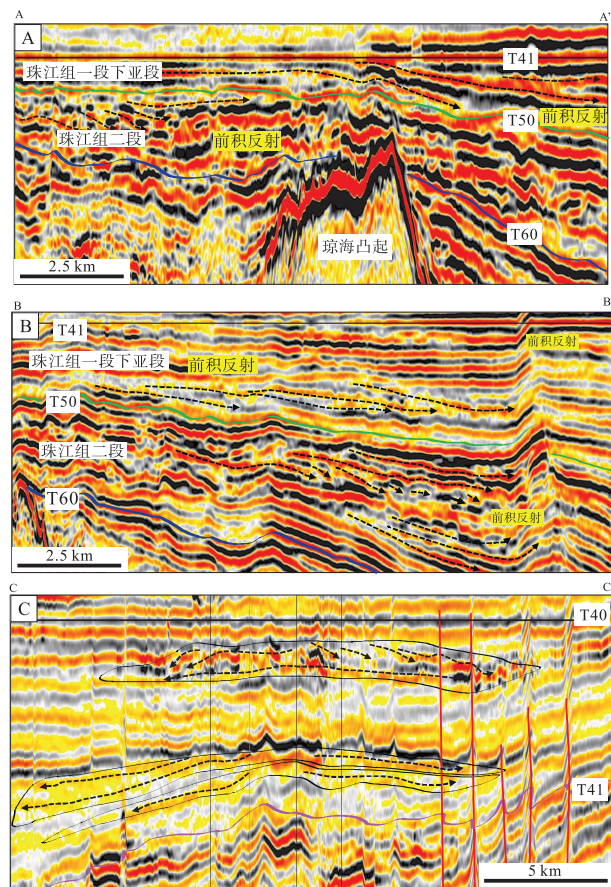
伴随着海平面不断上升,珠江组沉积晚期



A—珠江组二段河口坝砂岩微观特征,镜下可见大量生物碎屑,W3井,1305.5 m,单偏光;B—珠江组二段河口坝砂岩微观特征,镜下可见大量生物碎屑,W3井,1305.5 m,正交光;C—珠江组一段下亚段河口坝砂岩微观特征,可见富含石英颗粒层和富含黏土层交替出现,W10井,2734.7 m,单偏光;D—珠江组一段下亚段河口坝砂岩微观特征,W10井,2734.7 m,正交光;E—珠江组一段上亚段,潮汐沙脊砂岩微观特征,可见可见富含石英颗粒层和富含黏土层交替出现,海绿石广泛发育,W7井,1098.67 m,单偏光;F—珠江组一段上亚段,潮汐沙脊砂岩微观特征,W7井,1098.67 m,正交光

图 6 珠江口盆地珠三坳陷珠江组不同沉积微相镜下特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of different sedimentary microfacies of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin



A—珠江组二段、珠江组一段下亚段三角洲前积反射；B—珠江组二段、珠江组一段下亚段三角洲前积反射；C—珠江组一段上潮汐沙脊地震反射特征

图 7 珠江口盆地珠三坳陷珠江组三角洲和潮汐沙脊地震反射特征

Fig. 7 Seismic reflection characteristics of deltaic and tidal sand ridge deposits of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

(即珠江组一段上亚段) 逐渐转入浅海陆架沉积背景(图 2) (钟泽红等, 2018; 毛雪莲等, 2019), 古生物数据表明该层整体为浅海内—外陆架沉积环境。在此背景下, 珠江组一段上亚段粗粒岩石组分明减少, 几乎不含细砂及以上粒度沉积物, 主要由粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩构成(图 2)。珠三坳陷在此环境下主要发育了 1 套潮汐沙脊和浅海陆架泥岩沉积。

1) 陆架潮汐沙脊 (浅海)

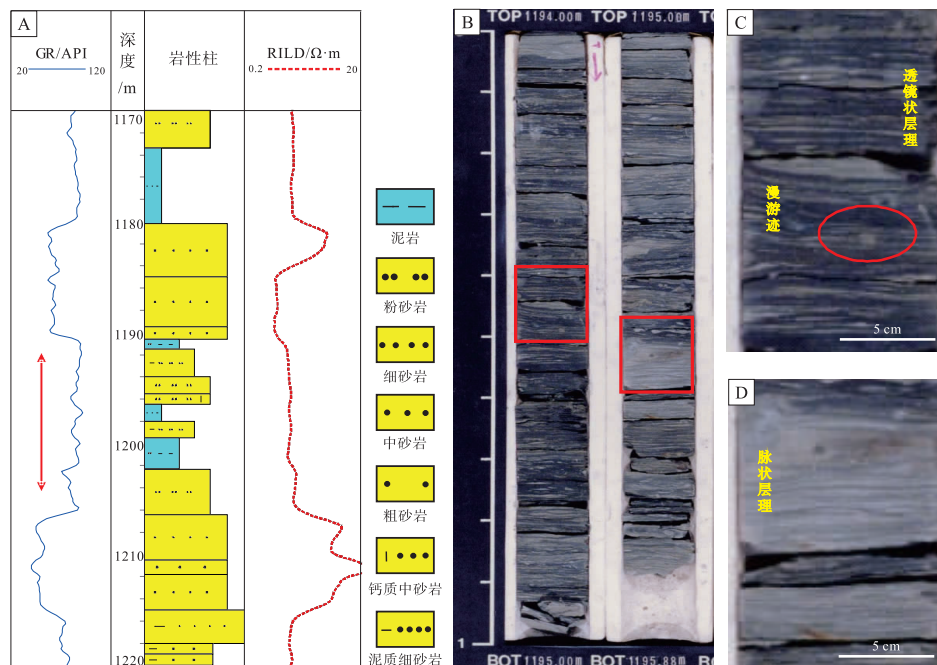
珠三坳陷陆架潮汐沙脊粒度较细, 主要由粉砂岩和泥质粉砂岩组成, 其 GR 测井曲线呈漏斗状和箱状。由于沉积环境水深较大、泥质含量高, 潮汐沙脊的 GR 值较高, 临近泥岩基线, 从而与珠江组

二段及一段下亚段三角洲砂体的 GR 值明显不同(图 2; 图 9-A)。岩心资料显示, 潮汐沙脊普遍发育沙纹层理和交错层理, 且生物扰动较强(图 9-B, 9-C, 9-D), 生物扰动指数 (BI) 可达 6, 反映沉积时期生物种类与数量都很高, 为开阔海的咸水环境。其粒度概率累积曲线呈现两段跳跃与一段悬浮的组合, 其中跳跃组分仅占总粒度的 40%, 而悬浮组分占 60%, 反映出整体水动力条件较弱。进一步分析表明, 跳跃组分可细分为 2 个次总体, 分别对应主潮流与次潮流条件下的粉细砂岩沉积(图 4-D)。李清和殷勇 (2013) 在对南黄海辐射沙脊群里磕脚 11DT02 孔粒度分析中也指出潮流沙脊和潮滩在概率累积曲线上以跳跃次总体为主, 并呈双跳跃特点, 与研究区的潮流沙脊具有相似的粒度分布特征。潮汐沙脊在镜下观察中表现出富含石英颗粒的纯净砂层与富黏土层交替出现的特征, 反映了潮流强弱变化所引起的水动力条件交替。与此同时, 在部分层段中还可可见大量海绿石的发育, 指示其形成环境为浅海环境(图 6-E, 6-F)。

南北向地震剖面显示, 潮汐沙脊整体呈丘状凸起, 其内部向南、向北方向呈现双向前积特征, 表明沙脊由核部向两侧扩展且逐渐减薄(图 7-C)。这一特征与惠州凹陷陆架沙脊相似 (丁琳等, 2014; 谢世文等, 2015; 苑坤和方欣欣, 2016)。丁琳等 (2014) 和 Zhang 等 (2017) 在研究区以东的惠州凹陷发现, 珠江组沉积期间受北东—南向古潮流影响, 在浅海背景下发育了一系列陆架沙脊沉积, 证实了珠江口盆地珠江组陆架潮汐沙脊发育具有区域性。

2) 浅海泥岩沉积

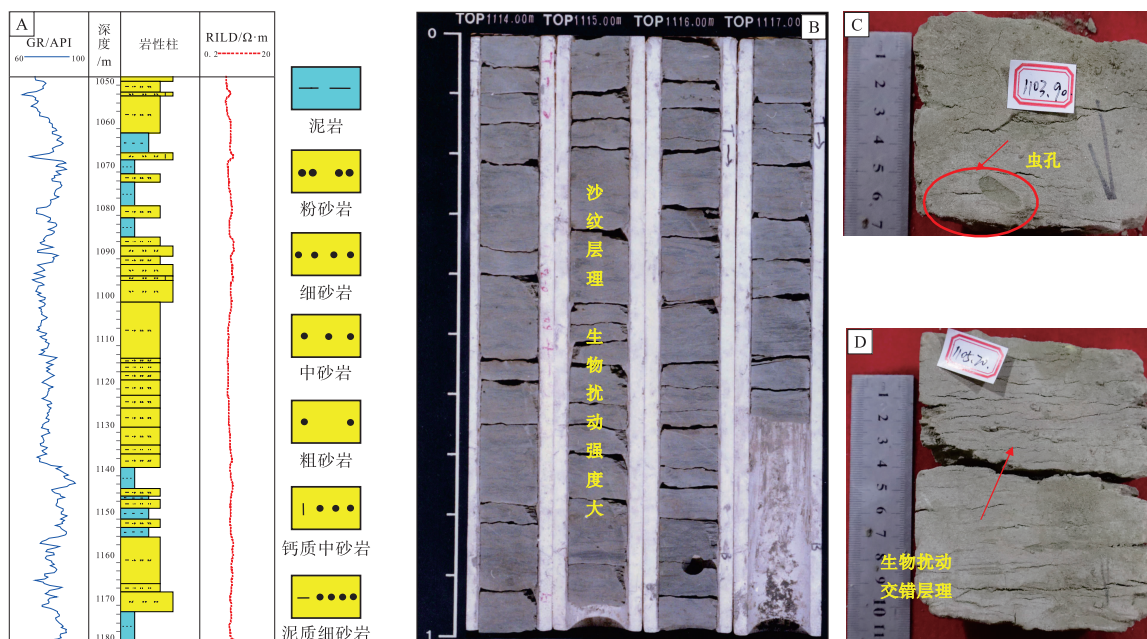
在浅海陆架沉积环境中, 由于水深较大, 除潮汐沙脊外, 珠三坳陷还发育了浅海泥岩沉积。测井数据显示, 该沉积体 GR 值较高且贴近泥岩基线, 受风暴潮影响, 浅海泥岩中常伴生薄层风暴岩沉积, 导致高 GR 曲线中出现指状特征 (图 9-A 中 1070~1088 m)。岩心观察显示, 浅海泥岩主要由厚层泥岩和粉砂质泥岩构成(图 10), 以水平层理为主 (图 10-E), 可见流水沙纹层理 (图 10-B) 和明显的生物扰动 (图 10-C, 10-D), 扰动指数 (BI) 为 3~4, 反映出水动力较弱。粒度概率累积曲线上, 浅海泥岩几乎不含跳跃组分, 悬浮沉积成分占绝对主导地位(图 5-E, 5-F)。



A—水下分流间湾测录井特征，水下分流间湾以泥岩为主，夹粉砂质泥岩和泥质粉砂岩，GR 曲线贴近泥岩基线，W3 井；B—水下分流间湾岩心沉积特征，厚层泥岩夹薄层粉砂岩和泥质粉砂岩，可见较强生物扰动（漫游迹为主）、脉状层理和透镜状层理，W3 井，1194.00 ~ 1195.88 m；C—透镜状层理，可见漫游迹，W3 井，1194.5 m；D—脉状层理，W3 井，1195.5 m

图 8 珠江口盆地珠三坳陷珠江组水下分流间湾测井和岩心沉积特征

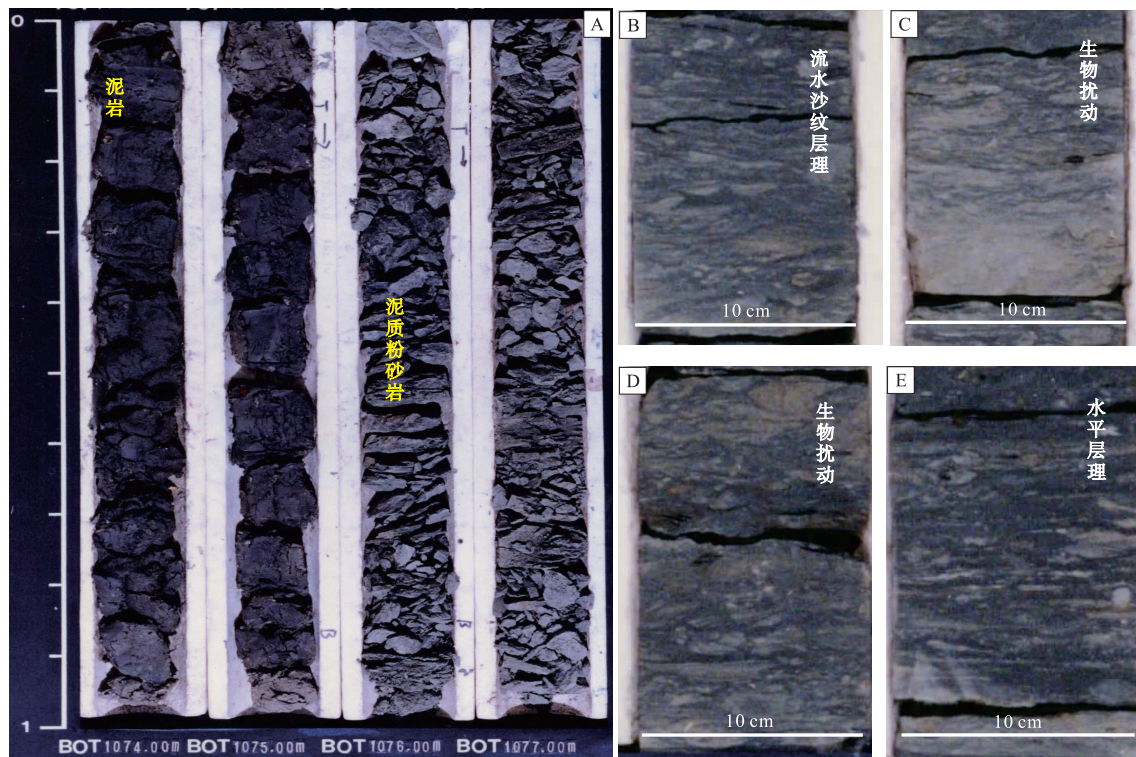
Fig. 8 Logging and core sedimentary characteristics of interdistributary bay deposits of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin



A—潮汐沙脊 GR 曲线表现为漏斗状、钟型复合状，岩性以粉砂岩和泥质粉砂岩为主；B—陆架潮汐沙脊岩心上可以见交错层理和沙纹层理，但由于生物扰动较强，导致大部分层理特征不明显，W3 井，1117.0 ~ 1117.6 m；C—块状粉砂岩，可见虫孔，W3 井，井深 1103.9 m；D—交错层理，W3 井，井深 1105.7 m

图 9 珠江口盆地珠三坳陷珠江组陆架潮汐沙脊沉积特征

Fig. 9 Sedimentary characteristics of shelf tidal sand ridges of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin



A—厚层浅海灰色泥岩，底部为一层浅灰色泥质粉砂岩、粉砂岩和泥岩互层，W3 井，1073~1077 m；B—流水沙纹层理，W3 井，1017.6 m；
C—生物扰动，可见虫孔，W3 井，1018.85 m；D—生物扰动，W3 井，1020 m；E—弱水平层理，可见生物扰动现象，W3 井，1021 m

图 10 珠江口盆地珠三坳陷珠江组浅海泥岩沉积特征

Fig. 10 Sedimentary characteristics of shallow shelf mudstones of the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

3 沉积体系展布规律

3.1 剖面展布规律

基于岩心、测井及古生物资料，通过连井沉积相对比揭示了珠江口盆地珠三坳陷珠江组沉积体系的侧向展布特征。结果表明，珠江组二段及一段下亚段整体表现为受潮汐作用影响的三角洲沉积体系，呈显著的西北向东南推进特征（图 11；图 12），这一沉积模式与北西—南东向地震剖面上显示的前积反射结构一致（图 7-A，7-B）。

北西—南东向连井剖面显示，自西北物源区向东南方向，可容纳空间逐渐增大；例如，在珠江组二段，W4 井地层厚度明显增厚，砂体期次由 W1 井的 5 期增至 7 期。该差异归因于近物源区（W1 井、W2 井）因可容纳空间有限而主要以过路沉积为主，而向盆地方向（W3 井、W4 井）因可容纳空间增大，更利于多期三角洲砂体的叠置保存。测井相分析（箱型、钟型、漏斗型曲线组合）表明，水下分流河道与河口坝微相呈交互叠置或受分流间

湾泥质分隔（图 11）。珠江组一段下亚段也呈现类似规律，表现为北西—南东向地层增厚、砂体期次增多及表现为前积的沉积特点。与之相对，珠江组一段上亚段展布模式呈“中间厚、两侧薄”特征（图 11），对应地震剖面（图 7-C）显示潮汐沙脊核部砂岩厚度最大，向两翼逐渐减薄。

南西—北东向剖面同样显示，可容纳空间整体上呈自西向东增加的趋势。在珠江组二段及珠江组一段下亚段沉积时期，研究区西部三角洲砂体期次较少（3~5 期），而东部地区厚层三角洲砂体期次显著增多（7~10 期）（图 12）。这一差异主要反映出西部地区可容纳空间有限，沉积物多表现为过路沉积，缺乏大规模堆积，而东部地区则具备更大的可容纳空间，形成了规模较大的砂体沉积，这一现象与地震剖面（图 7-A，7-B）所展示的特征一致。三角洲砂体中以河口坝沉积为主，水下分流河道沉积次之。水下分流河道中的岩性多为含砾砂岩、粗砂岩及中砂岩，而河口坝沉积物相对较细，主要由中砂岩—粉砂岩组成。珠江组一段上亚段则

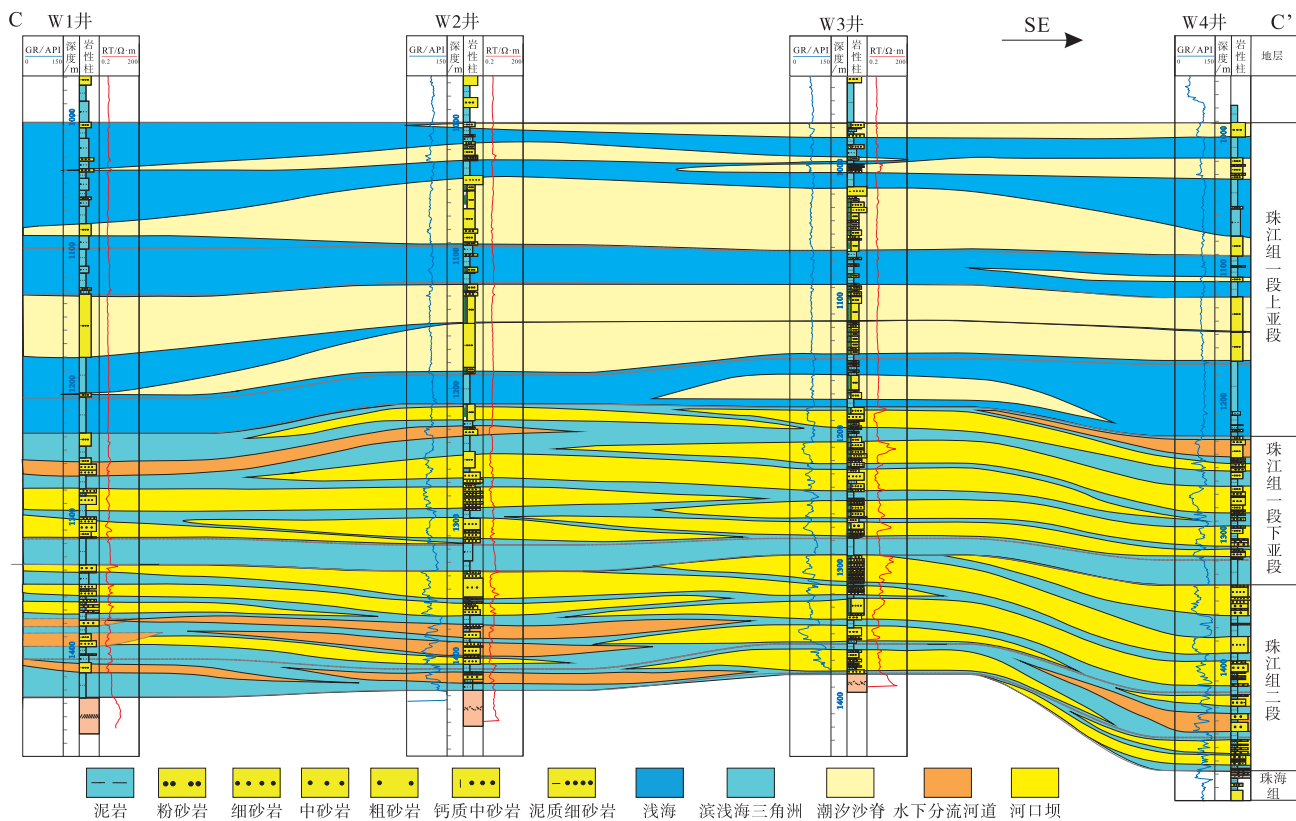


图 11 珠江口盆地珠三坳陷琼海凸起珠江组 NW-SE 向连井剖面

Fig. 11 NW-SE cross section of the Zhujiang Formation across Qionghai uplift in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

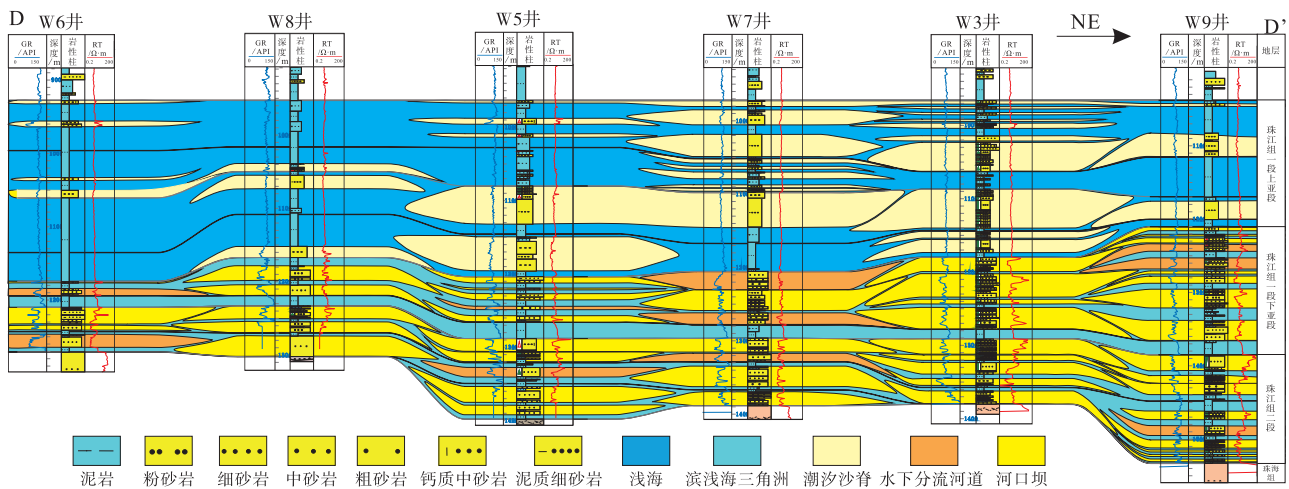


图 12 珠江口盆地珠三坳陷琼海凸起珠江组 SW-NE 向连井剖面

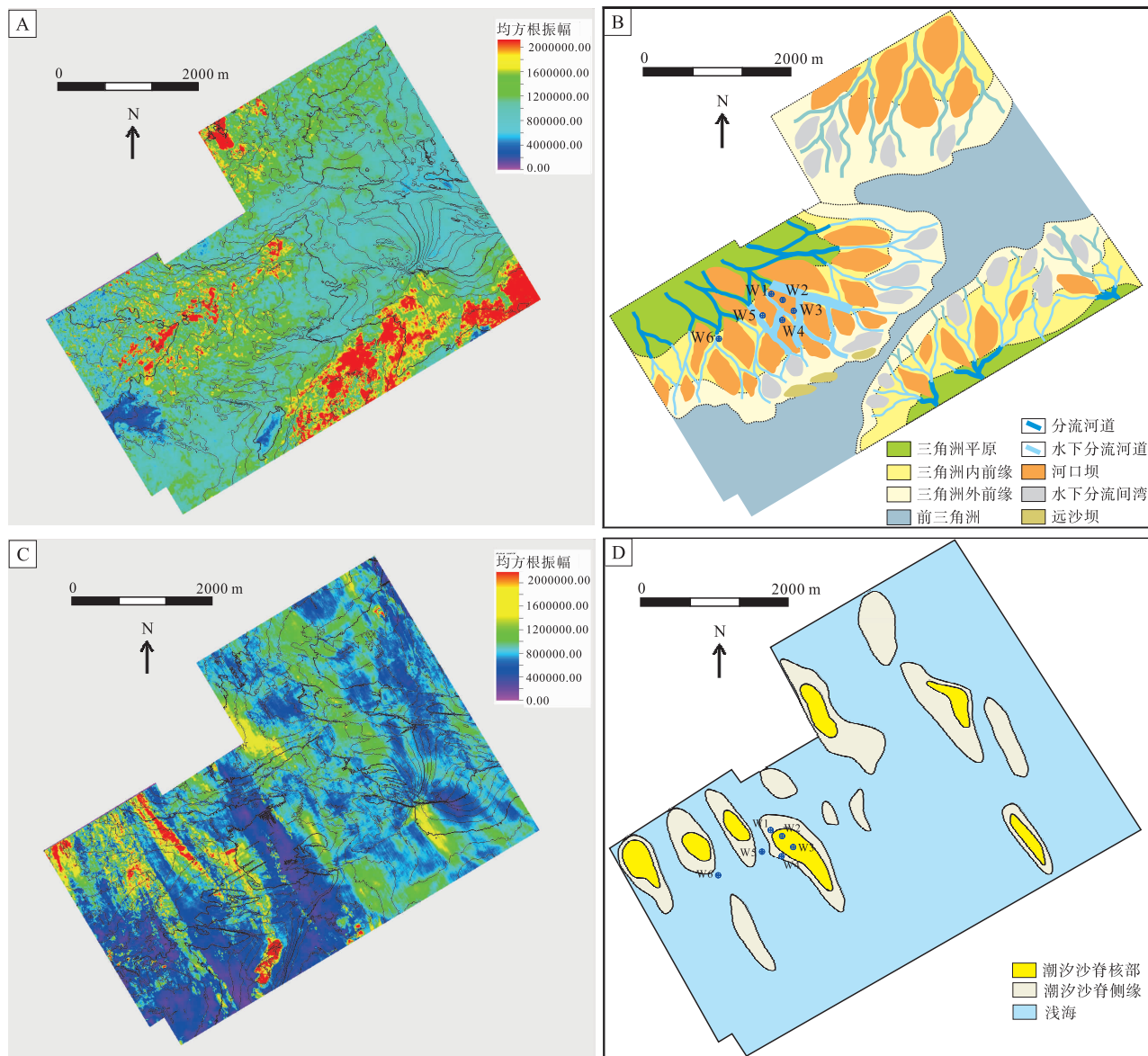
Fig. 12 SW-NE cross section of the Zhujiang Formation across Qionghai uplift in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

以潮汐沙脊沉积与浅海陆架泥沉积为主(图 12)。潮汐沙脊区的 GR 测井曲线值明显高于珠江组二段及一段下亚段的三角洲砂体, 接近泥岩基线但仍具有一定差异。潮汐沙脊在研究区中部发育较好, 两侧则相对欠发育, 常被浅海泥岩包覆。例如, W7 井和 W3 井中潮汐沙脊沉积厚度大、期次多, 且自

东向西表现为侧向迁移特征, 反映可能存在自北东向南西的古海流, 这也与邻区的古海流认识相一致 (Zhang *et al.*, 2017)。

3.2 平面分布规律

基于上述沉积相类型分析、单井相、地震剖面



A—珠江组二段均方根振幅属性；B—珠江组二段平面沉积体系展布特征；C—珠江组一段上亚段均方根振幅属性；

D—珠江组一段上亚段平面沉积体系展布特征

图 13 珠江口盆地珠三坳陷西部珠江组地震属性与平面沉积体系展布特征

Fig. 13 Seismic attributes and planar distribution of sedimentary systems of the Zhujiang Formation in western Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

及连井相对比研究，结合地震均方根振幅属性(图 13-A, 13-C)，进而划分了珠江组二段和珠江组一段上亚段的沉积相图(图 13-B, 13-D)；因珠江组一段下亚段与珠江组二段的三角洲沉积相似，故此处不再单独展示。珠江组二段均方根振幅属性图呈现出多个“朵叶状”分布，指示珠江组二段存在来自多个方向的物源，包括西北、东北及南部神狐隆起供源(图 13-A)。前人古地貌研究显示，在珠江组沉积早期(珠江组二段)，神狐隆起尚出露于地表，

为周边沉积体提供碎屑，进而形成三角洲沉积(徐万兴等, 2023; 吴太霏, 2024)。自北西向东南推进的三角洲沉积也与区域内北部隆起供源的认识一致(图 1)，大量 S 型前积反射在地震剖面上亦证实了三角洲的前积方向(图 7-A, 7-B)。

与珠江组二段和珠江组一段下亚段沉积特征不同，由于持续海侵，珠三坳陷珠江组一段上亚段主要发育浅海陆架潮汐沙脊沉积，地震属性表现为多条北西—南东方向呈孤立长条状的强振幅反射，彼

此之间被弱振幅反射分隔(图 13-C)。结合连井剖面、地震剖面和地震均方根振幅属性(图 7-C; 图 11; 图 12; 图 13-C), 进一步证明研究区内存在多列彼此平行的潮汐沙脊, 这些沙脊被浅海陆架泥岩所分隔(图 13-D)。前人研究也表明潮汐沙脊沉积常呈现多列分布特征 (Longhitano *et al.*, 2012; Olariu *et al.*, 2012; 钟泽红等, 2018; 李伟等, 2019)。

4 沉积主控因素分析

沉积体系的展布通常受海平面升降、盆地构造沉降、水动力条件、古地貌和物源供给等多重因素控制 (姜华等, 2009; 陈维涛等, 2012; 朱锐等, 2015; 徐杰和姜在兴, 2019)。

珠江口盆地珠三坳陷珠江组沉积早期处于海平面较低、可容纳空间有限且水动力较强的滨海环境, 形成广泛发育的三角洲相。三角洲砂体不断向南部和东部的文昌 B 凹陷及 A 凹陷输送, 构成大范围、连续分布的三角洲沉积体(图 7-A, 7-B)。岩心观察、粒度分析及薄片资料显示, 珠江组二段及一段下亚段发育的三角洲沉积受多种水动力因素共同控制。在河口坝沉积中, 波状交错层理普遍发育, 反映出波浪作用的影响; 而岩心中频繁出现的透镜状层理与脉状层理则表明潮汐作用亦十分显著。大量海相生物碎屑的分布特征, 进一步指示波浪或潮流对沉积物及生物壳体的反复搬运与破碎过程。总体而言, 波浪作用倾向于使沉积物富砂、贫泥, 且具较好分选性; 而潮汐环境下, 受涨落潮流与静水期交替作用, 沉积物通常表现出较高的非均质性与富泥性。结合研究区粒度数据中相对较高的粉砂与黏土含量, 以及薄片石英颗粒层与黏土层交替叠置的现象, 表明研究区三角洲沉积体系在成因过程中更受潮汐作用的影响。然而, 研究区内并未观察到大量典型的潮汐水道、潮汐沙坝等沉积单元, 主要发育河口坝沉积, 水下分流河道和水下分流间湾次之。测井曲线及录井岩性垂向上普遍表现出整体向上变粗的反旋回特征, 指示该区为潮汐影响下的河控三角洲。综合各种证据表明研究区三角洲沉积受到河流影响为主, 潮汐作用次之, 同时也受到一定程度波浪作用的影响。

有孔虫的丰度和分异度指示尽管珠江组内部存在海平面波动, 但整体上从珠江组二段至珠江组一段上亚段呈逐渐海侵趋势(图 2)。相对海平面的持

续上升直接控制了砂体富集程度, 导致珠江组二段一段下亚段的富砂体系转变为珠江组一段上亚段的富泥体系, 粒度资料也指示从珠江组二段一珠江组一段亚段砂质组分明显减少, 而粉砂岩和黏土组分占比向上增加(图 4)。伴随砂岩含量下降、储集岩性由中一细砂岩转为粉砂岩, 同时珠江组一段上亚段储集砂体的 GR 值显著升高、接近泥岩基线, 反映出泥质含量增加及水动力减弱(图 2; 图 11; 图 12)。珠江组一段上亚段的浅海沉积环境有利于陆架砂体的发育, 促使潮汐沙脊大规模形成。潮汐沙脊砂岩薄片的镜下观察可发现存在大量浅海环境中自生形成的海绿石(图 6-E)。

物源供给同样对砂体展布产生显著影响。珠江组二段沉积早期受西北部海南隆起与南部神狐隆起的双向供源影响; 随着海平面上升, 南部神狐隆起逐渐淹没, 其供源作用减弱, 至珠江组二段沉积晚期北部海南隆起逐渐成为主要的沉积物供源区(钟泽红等, 2018)。Liu 等(2022b)通过碎屑锆石 U-Pb 年龄分析发现, 珠三坳陷珠江组一段的碎屑锆石年龄谱呈多峰分布, 主要集中在 ~245 Ma、~450 Ma、~850 Ma、970 ~ 980 Ma、1825 ~ 1845 Ma 和 ~2500 Ma 6 个峰段。这一锆石 U-Pb 年龄谱系特征表明该时期珠三坳陷的沉积物主要由古珠江系统提供, 代表了一个远源搬运、区域供源占主导的沉积格局。样品中显著增加的古生代和前寒武纪年龄组分, 反映出物源区由以往局限于盆地内部隆起的近源供给, 逐渐过渡到由广泛的华南板块基底提供的远源物质。这一变化指示古珠江作为主要搬运通道的形成与活跃, 显著增强了珠三坳陷与华南地块的沉积联系。彭光荣等(2022)通过对惠州凹陷、西江凹陷和恩平凹陷早新世—中新世沉积物的重矿物、碎屑锆石等研究指出中新世古珠江三角洲可能受到河流—波浪—潮汐混合动力的影响, 同时还存在持续的西南向古水流对砂质沉积物进行侧向搬运。此外前人基于地震沉积学研究, 综合岩心和测井资料指出珠一坳陷珠江组晚期主要为浅海陆架沉积, 且存在北东—南西方向的古海流将沉积物向西南方向搬运 (丁琳等, 2014; Zhang *et al.*, 2017)。

古地貌是控制沉积体系的重要因素, 在源汇过程中起关键作用 (Liu *et al.*, 2020; 李伟等, 2019)。李伟等(2019)认为, 海流长距离搬运遇到水下低隆遮挡后能量衰减, 促使沉积物卸载堆

积。徐海春等（2021）指出，珠三坳陷珠江组沉积时期局部高古地貌对砂体分布具有决定性影响。对珠江组一段上亚段的古地貌重建与潮汐沙脊分布叠加分析显示，珠三坳陷存在多列潮汐沙脊，且大多位于相对较高的水下隆起部位（图 14；图 15），表明古地貌对于砂体的分布具有重要的控制作用。由于珠江组一段上亚段沉积时期水深较深，沉积物供给有限，沉积物以粉砂岩为主，搬运过程中遇到水下低隆逐渐卸载，在研究区的西部沉积物则以泥质沉积为主，仅发育少量的潮汐沙脊沉积（图 12）。

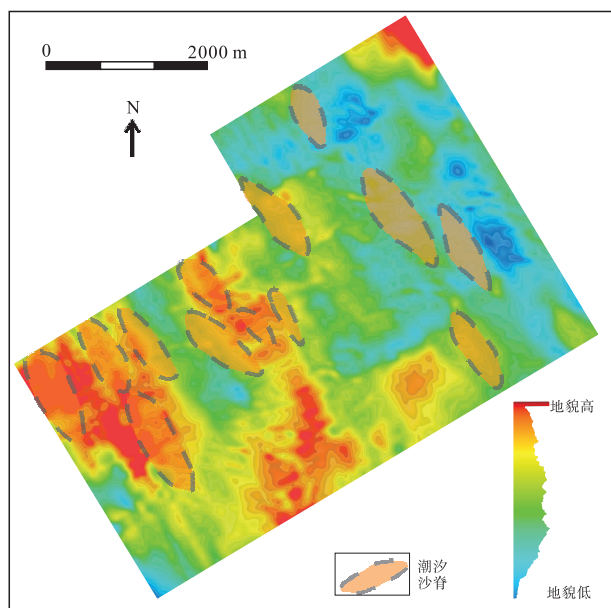


图 14 珠江口盆地珠三坳陷珠江组一段上亚段古地貌对潮汐沙脊分布的控制作用

Fig. 14 Palaeogeomorphology and tidal sand ridge overlay map of the upper submember Member 1 of Zhujiang Formation, in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

综上，海平面逐渐上升塑造了珠江组二段至一段下亚段的富砂三角洲沉积背景及珠江组一段上亚段的浅海富泥背景；物源供给和古地貌因素分别控制了珠江组二段多源多朵叶三角洲砂体的分散过程，以及神狐隆起逐渐淹没后珠江组一段下亚段以海南隆起供源为主、东北古珠江供源为辅的物源格局。

5 结论

1) 珠江口盆地珠三坳陷珠江组沉积体系在早中新世海侵过程中呈现出显著的时空差异性。珠江

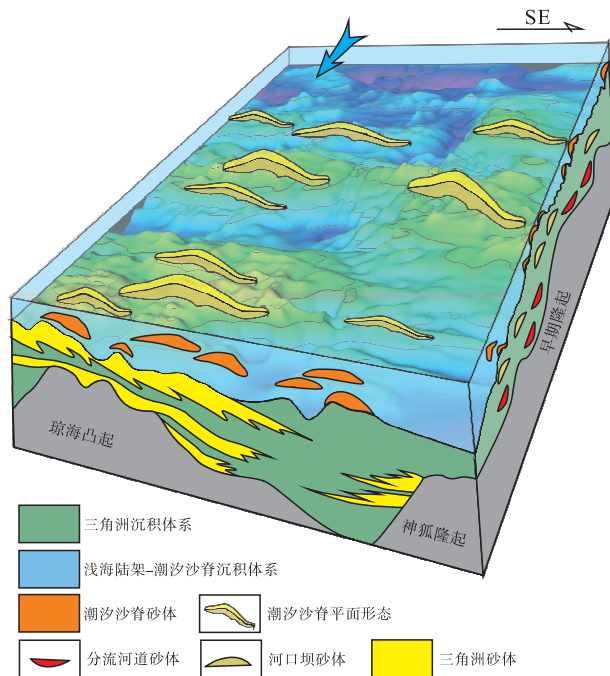


图 15 珠江口盆地珠三坳陷珠江组沉积模式

Fig. 15 Depositional model in the Zhujiang Formation in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin

组二段及一段下亚段主要发育受潮汐作用影响的三角洲沉积体系，河口坝与水下分流河道中的储集砂体以中—细砂岩为主。较高的粉砂与黏土含量、生物碎屑、半咸水—咸水环境下的生物遗迹、透镜状层理、脉状层理等现象反映了潮汐作用的影响。

2) 珠江口盆地珠三坳陷珠江组一段上亚段沉积环境转变为浅海陆架环境，沉积物粒度以粉砂与黏土为主，广泛分布有海绿石，有孔虫丰度及分异度相较于下部地层显著增加。潮汐沙脊多呈北西—南东向展布，表现为被浅海泥岩包裹的透镜状以及核部厚侧翼薄的特征。

3) 相对海平面的持续上升塑造了珠江组二段至一段下亚段富砂滨海三角洲、珠江组一段上亚段浅海潮汐沙脊—陆架泥岩的沉积水深背景。珠江组沉积早期，多源物源供给与古地貌格局共同控制了珠江组二段三角洲砂体的分散展布；随着神狐隆起逐渐淹没，珠江组一段下亚段的物源供给转变为以北部海南隆起为主、东北方向古珠江为辅；至珠江组一段上亚段，东北方向古珠江物源的贡献进一步增强。同时，古地貌格局持续控制潮汐沙脊的展布，水下隆起区成为潮汐沙脊的优势发育区。

参考文献 (References)

- 昌建波. 2020. 珠江口盆地珠江组强制海退砂体与岩性油气藏: 以惠州凹陷南部为例. 海相油气地质, 25(2): 121–131. [Chang J B. 2020. Forced-regressive sand bodies and the related lithologic reservoirs of Zhujiang Formation in Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 25(2): 121–131]
- 晁彩霞. 2013. 文昌 13–1 油田珠江组地震沉积学及其应用研究. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Chao C X. 2013. Study on seismic sedimentology and its application of Zhujiang Formation in Wenchang 13–1 Oilfield. Masteral dissertation of China University of Petroleum(Huadong)]
- 陈金定, 周晓林, 钟国楼, 郑洪元, 胡胜辉. 2011. 琼海凸起珠江组砂岩钙质层成岩模式探讨. 西南石油大学学报(自然科学版), 33(4): 27–32, 186. [Chen J D, Zhou X L, Zhong G L, Zheng Q Y, Hu S H. 2011. The diagenetic model for sandstone calcareous layers of Zhujiang formation in Qionghai bulge. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 33(4): 27–32, 186]
- 陈林, 范彩伟, 刘新宇, 李明, 雷明珠. 2021. 珠江口盆地西部文昌 A 凹陷油气富集规律与有利勘探方向. 中国海上油气, 33(5): 14–23. [Chen L, Fan C W, Liu X Y, Li M, Lei M Z. 2021. Hydrocarbon enrichment patterns and favorable exploration directions of the Wenchang A Depression, western Pearl River Mouth Basin. China Offshore Oil and Gas, 33(5): 14–23]
- 陈林, 李明, 胡德胜, 张璐, 张坤坤. 2023. 珠江口盆地神狐隆起北缘油气富集主控因素及成藏模式. 东北石油大学学报, 47(3): 11–22. [Chen L, Li M, Hu D S, Zhang L, Zhang K K. 2023. Main controlling factors for hydrocarbon enrichment and accumulation models in the northern margin of Shenhu Uplift, Pearl River Mouth Basin. Journal of Northeast Petroleum University, 47(3): 11–22]
- 陈维涛, 杜家元, 龙更生, 张尚锋, 李向阳. 2012. 珠江口盆地海相层序地层发育的控制因素分析. 沉积学报, 30(1): 73–83. [Chen W T, Du J Y, Long G S, Zhang S F, Li X Y. 2012. Analysis on controlling factors of marine sequence stratigraphy evolution in Pearl River Mouth Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 30(1): 73–83]
- 陈中强, 钟石兰, 杨少坤. 1998. 微古生物在高分辨层序地层学中的应用: 以珠江口盆地惠州凹陷层序地层分析为例. 微体古生物学报, 15(2): 134–143. [Chen Z Q, Zong S L, Yang S K. 1998. Application of micropaleontology in high resolution sequence stratigraphy: a case study of sequence stratigraphy in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. Acta Micropalaeontologica Sinica, 15(2): 134–143]
- 丁琳, 张昌民, 杜家元, 施和生, 罗明, 王湘蜀, 贾培蒙. 2014. 珠江口盆地惠州凹陷珠江组 K 系列陆架砂脊沉积演化与成因. 石油与天然气地质, 35(3): 379–385. [Ding L, Zhang C M, Du J Y, Shi H S, Luo M, Wang X S, Jia P M. 2014. Depositional evolution and genesis of K set of shelf sand ridges in the Zhujiang Formation of Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. Oil & Gas Geology, 35(3): 379–385]
- 丁琳, 黄书勤, 卓海腾, 李潇, 刘溢世, 杨佳颖. 2024. 砂体成因驱动下的岩性圈闭形成模式: 以珠江口盆地惠州凹陷中新世强制海退砂为例. 地球科学进展, 39(8): 862–876. [Ding L, Huang S Q, Zhuo H T, Li X, Liu Y S, Yang J Y. 2024. Models of stratigraphic trap formation derived by sandstone genesis: a case study of the Miocene forced regressive sandstone in Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. Advances in Earth Science, 39(8): 862–876]
- 范彩伟, 李明, 李才, 李伟. 2022. 珠江口盆地文昌 A 凹陷西南部断裂转换带特征及其控藏作用. 中国海上油气, 34(5): 36–45. [Fan C W, Li M, Li C, Li W. 2022. Characteristics of fault transfer zone in southwest Wenchang A sag, Pearl River Mouth Basin and its role in hydrocarbon accumulation. China Offshore Oil and Gas, 34(5): 36–45]
- 甘永年, 杨朝强, 吴倩, 郇金来, 曹阳. 2016. 琼海凸起珠江组储层微观特征及对储层的影响. 科技通报, 32(1): 44–48. [Gan Y N, Yang C Q, Wu Q, Xun J L, Cao Y. 2016. Microscopic characteristic and its influences on reservoirs of Zhujiang Formation in Qionghai bulge. Bulletin of Science and Technology, 32(1): 44–48]
- 高阳东, 向绪洪, 张向涛. 2021. 南海北部新生代沉积演变及其油气地质意义. 天然气地球科学, 32(5): 645–656. [Gao Y D, Xiang X H, Zhang X T. 2021. Cenozoic sedimentary evolution and its geological significance for hydrocarbon exploration in the northern South China Sea. Natural Gas Geoscience, 32(5): 645–656]
- 高阳东, 刘军, 彭光荣, 陈林, 王梓颐, 史玉玲. 2024. 珠江口盆地油气勘探新领域及资源潜力. 石油学报, 45(1): 183–201. [Gao Y D, Liu J, Peng G R, Chen L, Wang Z Y, Shi Y L. 2024. New fields and resource potential of oil and gas exploration in Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 45(1): 183–201]
- 郝治纯, 陈平富, 万晓樵. 2000. 南海北部莺歌海—琼东南盆地晚第三纪层序地层与海平面变化. 现代地质, 14(3): 237–245. [Hao Y C, Chen F P, Wan X Q. 2000. Late Tertiary sequence stratigraphy and sea level changes in Yinggehai–Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. Geoscience, 14(3): 237–245]
- 姜华, 王华, 李俊良, 陈少平, 林正良, 方欣欣, 蔡佳. 2009. 珠江口盆地珠三拗陷层序地层样式分析. 海洋地质与第四纪地质. 29(1): 87–93. [Jinag H, Wang H, Li J L, Chen S P, Lin Z L, Fang X X, Cai J. 2009. Analysis on sequence formation styles of Zhu–3 Depression in Pearl River Mouth Basin. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(1): 87–93]
- 姜在兴, 陈代钊. 2022. 沉积学(第三版). 北京: 中国石化出版社. [Jiang Z X, Chen D Z. 2022. Sedimentology(third edition). Beijing: China Petrochemical Press]
- 李清, 殷勇. 2013. 南黄海辐射沙脊群里礁脚 11DT02 孔沉积相分析及环境演化. 地理研究, 32(10): 1843–1855. [Li Q, Yin Y. 2013. Sedimentary facies and evolution of the Likejiao sandy ridge, in the South Yellow Sea offshore area, eastern China. Geographical Research, 32(10): 1843–1855]
- 李伟, 左倩媚, 刘平, 陈亚兵, 周刚. 2019. 珠江口盆地文昌凹陷浅海陆架砂体沉积特征及油气勘探意义. 科学技术与工程, 19(33): 94–100. [Li W, Zuo Q M, Liu P, Chen Y B, Zhou G. 2019. Sedimentary characteristics of continental shelf sand bodies and their significance for the oil-gas exploration in Wenchang sag of Pearl River Mouth Basin. Science Technology and Engineering, 19(33): 94–100]
- 李学杰, 陈芳, 陈超云. 2004. 南海西部浮游有孔虫含量与水深关系定量研究. 古地理论, 6(4): 442–447. [Li X J, Chen F, Chen C Y. 2004. Quantitative study on the relationship between planktonic foraminifer content and water depth in the western South China Sea.

- Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 6(4) : 442-447]
- 林畅松,施和生,李浩,何敏,张忠涛,宫越,张博,张曼莉,舒梁峰,马铭. 2018. 南海北部珠江口盆地陆架边缘斜坡带层序结构和沉积演化及控制作用. 地球科学, 43(10) : 3407-3422. [Lin C S, Shi H S, Li H, He M, Zhang Z T, Gong Y, Zhang B, Zhang M L, Shu L F, Ma M. 2018. Sequence architecture, depositional evolution and controlling processes of continental slope in Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. Earth Science, 43(10) : 3407-3422]
- 刘娜,邓玄,鲁瑞彬,付晓树,叶蓉,李华,何幼斌. 2025. 断块油气田. 32(4) : 589-596. [Liu N, Deng X, Lu R B, Fu X S, Ye R, Li H, He Y B. 2025. Sedimentary characteristics and main controlling factors of coastal-shallow sea in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin. Fault-Block Oil & Gas Field, 32(4) : 589-596]
- 毛雪莲,徐守立,刘新宇. 2019. 珠江口盆地西部新近纪高分辨率生物地层及海平面变化分析. 海洋地质与第四纪地质, 39(3) : 40-50. [Mao X L, Xu S L, Liu X Y. 2019. Late Cenozoic high resolution bio stratigraphy and its bearing on sea level fluctuation in the western Pearl River Mouth Basin. Marine Geology & Quaternary Geology, 39(3) : 40-50]
- 米立军. 2018. 认识创新推动南海东部海域油气勘探不断取得突破: 南海东部海域近年主要勘探进展回顾. 中国海上油气, 30(1) : 1-10. [Mi L J. 2018. Continuous breakthroughs on petroleum exploration of the eastern South China Sea with innovative understanding: review of recent exploration progress. China Offshore Oil and Gas, 30(1) : 1-10]
- 米立军,张向涛,庞雄,郑金云,张丽丽. 2019. 珠江口盆地形成机制与油气地质. 石油学报, 40(S1) : 1-10. [Mi L J, Zhang X T, Pang X, Zheng J Y, Zhang L L. Formation mechanism and petroleum geology of Pearl River Mouth Basin. Acta Petrole Sinica, 40(S1) : 1-10]
- 彭光荣,杜家元,冯进,丁琳,李智高,李小平. 2022. 早-中中新世古珠江三角洲沉积格局及其控制因素. 地球科学, 47(11) : 3989-4004. [Peng G R, Du J Y, Feng J, Ding L, Li Z G, Li X P. 2022. Depositional setting of ancient Pearl River Delta during Early-to-Middle Miocene: implications for forcing factors. Earth Science, 47(11) : 3989-4004]
- 权永彬. 2018. 珠江口盆地珠三坳陷湖相烃源岩发育机理及其成藏贡献. 中国地质大学博士学位论文. [Quan Y B. 2018. Lacustrine source rock development mechanism and its contribution to hydrocarbon accumulation in Zhu III Sub-basin, Pearl River Mouth Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences]
- 宋广增,李明,张帅,严德天,刘恩涛,陈思. 2023. 珠三坳陷西北部浅海陆架砂体时空演化及成因机制. 海洋学报, 45(2) : 62-73. [Song G Z, Li M, Zhang S, Yan D T, Liu E T, Chen S. 2023. Temporal and spatial evolution and genetic mechanism of shallow continental shelf sandbodies in the northwestern Zhushan Depression. Haiyang Xuebao, 45(2) : 62-73]
- 王家豪,庞雄,王华,柳保军,陈鑫鑫. 2024. 珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组潮流改造的砂质海底扇沉积. 地球科学, 49(1) : 71-83. [Wang J H, Pang X, Wang H, Liu B J, Chen X X. 2024. Tide current-reworked sandy submarine fan deposits in miocene Zhujiang Formation, Baiyun sag of Pearl River Mouth Basin. Earth Science, 49(1) : 71-83]
- 吴静,张晓钊,白海军,郑小波,蔡国富,李志垚. 2021. 珠江口盆地阳江凹陷中新统潮控体系及其岩性圈闭勘探意义. 地球科学, 46(10) : 3673-3689. [Wu J, Zhang X Z, Bai H J, Zheng X B, Li Z Y. 2021. Miocene tidal control system and its exploration significance of lithologic trap in Yangjiang sag, Pearl River Mouth Basin. Earth Science(Chinese Edition), 46(10) : 3673-3689]
- 吴太霏,王华,刘恩涛,陈林,张璐,陈思,谢卫东,谷志宇,张启扬. 2024. 珠三坳陷珠江组一段沉积体系演化过程及其控制因素. 地质科技通报, 43(2) : 111-122. [Wu T F, Wang H, Liu E T, Chen L, Zhang L, Chen S, Xie W D, Gu Z Y, Zhang Q Y. 2024. Evolutionary and controlling factors of sedimentary system in the First Member of the Zhujiang Formation in the Zhu III Depression. Bulletin of Geological Science and Technology, 43(2) : 111-122]
- 谢世文,李庆明,柳保军,王绪诚,李小东. 2015. 惠州 X 油区潮流砂脊特征及其对开发的指导意义. 特种油气藏, 22(2) : 70-73. [Xie S W, Li Q M, Liu B J, Wang X C, Li X D. 2015. Features of tidal sand ridges and their instructive significance to development in X Oil Zone, Huizhou. Special Oil and Gas Reservoirs, 22(2) : 70-73]
- 徐万兴,何卫军,陈奎,刘芳,罗威. 2023. 珠江口盆地西部珠三坳陷古近系物源体系及沉积充填演化特征. 海洋地质与第四纪地质, 43(2) : 145-159. [Xu W X, He W J, Chen K, Liu F, Luo W. 2023. Provenance system evolutions and sedimentary filling characteristics of the Paleogene in Zhu III Depression, the western Pearl River Mouth Basin. Marine Geology & Quaternary Geology, 43(2) : 145-159]
- 徐长贵,范彩伟. 2021. 南海西部近海大中型油气田勘探新进展与思考. 中国海上油气, 33(2) : 13-25. [Xu C G, Fan C W. 2021. New exploration progress and thinking of offshore large-medium-sized oil and gas fields in the western South China Sea. China Offshore Oil and Gas, 33(2) : 13-25]
- 徐杰,姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理论报. 21(3) : 379-396. [Xu J, Jiang Z X. 2019. Provenance analysis of clastic rocks: current research status and prospect. Journal of Palaeogeography(Chinese edition). 21(3) : 379-396]
- 苑坤,方欣欣. 2016. 珠江口盆地惠州凹陷 HZ21 区岩性地层油气藏分布特征. 科学技术与工程, 16(22) : 143-148. [Yuan K, Fang X X. 2016. Distribution of stratigraphic and lithologic reservoirs in block 21 of Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. Science Technology and Engineering, 16(22) : 143-148]
- 张功成,王璞珺,吴景富,刘世翔,谢晓军. 2015. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式. 地学前缘, 22(3) : 27-37. [Zhang G C, Wang P J, Wu J F, Liu S X, Xie X J. 2015. Tectonic cycle of marginal oceanic basin: a new evolution model of the South China Sea. Earth Science Frontiers, 22(3) : 27-37]
- 张迎朝,陈志宏,李绪深,徐新德,李琦. 2011. 珠江口盆地文昌 B 凹陷及周边油气成藏特征与有利勘探领域. 石油实验地质, 33(3) : 297-302. [Zhang Y Z, Chen Z H, Li X S, Xu X D, Li Q. 2011. Petroleum accumulation characteristics and favorable exploration directions in Wenchang B sag and its surrounding areas, Pearl River Mouth Basin. Petroleum Geology & Experiment, 33(3) : 297-302]
- 张彦振,覃军,蒋一鸣,姜勇,刘培,王辉,常文琪. 2024. 珠江口盆地惠州北凹珠海组、珠江组储层发育特征及主控因素. 海相油气地质, 29(2) : 179-187. [Zhang Y Z, Qin J, Jiang Y M, Jiang Y, Liu P, Wang H, Chang W Q. 2024. Characteristics and main controlling factors of the reservoirs of Zhuhai Formation and Zhujiang For-

- mation in northern Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 29(2): 179–187]
- 郑金云, 高阳东, 张向涛, 庞雄, 张青林, 劳妙姬, 冯轩. 2022. 珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁. *地球科学*, 47(7): 2374–2390. [Zheng J Y, Gao Y D, Zhang X T, Pang X, Zhang Q L, Lao M J, Feng X. 2022. Tectonic evolution cycles and Cenozoic sedimentary environment changes in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7): 2374–2390]
- 钟玉婷, 董艳蕾, 李顺利, 孙连浦, 闻伟, 齐昕彤. 2023. 珠三坳陷珠海组海陆过渡相沉积特征及储层控制因素. *东北石油大学学报*, 47(4): 39–56. [Zhong Y T, Dong Y L, Li S L, Sun L P, Lü W, Qi X L. 2023. Sedimentary characteristics and reservoir controlling factors of sea-land transition in Zhuhai Formation, Zhu-3 Depression. *Journal of Northeast Petroleum University*, 47(4): 39–56]
- 钟泽红, 徐万兴, 刘芳, 何卫军, 王亚辉. 2018. 珠江口盆地西部珠三坳陷珠江组沉积演化. *世界地质*, 37(4): 1122–1136. [Zhong Z H, Xu W X, Liu F, He W J, Wang Y H. 2018. Sedimentary evolution of Zhujiang Formation in Zhu Ⅲ Depression, western Pearl River Mouth Basin. *World Geology*, 37(4): 1122–1136]
- 朱明, 陈维涛, 杜家元, 颜承志, 刘汉卿. 2019. 珠江口盆地惠西南地区新近系岩性圈闭形成条件及发育类型. *油气地质与采收率*, 26(6): 62–69. [Zhu M, Chen W T, Du J Y, Yan C Z, Liu H Q. 2019. Formation conditions and development types of Neogene lithologic traps in southwestern Huizhou area, Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 26(6): 62–69]
- 朱锐, 张昌民, 杜家元, 张尚锋, 李向阳. 2015. 珠江口盆地新近纪海平面升降过程及其对砂体的控制. *高校地质学报*, 21(4): 685–693. [Zhu R, Zhang C M, Du J Y, Zhang S F, Li X Y. 2015. Controls of Neogene sea level change on sand bodies in the Pearl River Mouth Basin. *Geological Journal of China Universities*, 21(4): 685–693]
- Bhattacharya J P, Willis B J. 2001. Lowstand deltas in the frontier formation, powder river basin, Wyoming: implications for sequence stratigraphic models. *AAPG Bulletin*, 85(2): 261–294.
- Benvenuti M. 2003. Facies analysis and tectonic significance of lacustrine fandeltaic successions in the Pliocene-Pleistocene Mugello Basin, Central Italy. *Sedimentary Geology*, 157: 197–234.
- Cao L C, Shao L, Qiao P J, Chen S, Wu M. 2017. Geochemical evolution of Oligocene-middle Miocene sediments in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 80: 358–368.
- Fabbriatore D, Robustelli G, Muto F. 2014. Facies analysis and depositional architecture of shelf-type deltas in the Crati Basin (Calabrian arc, south Italy). *Italian Journal of Geosciences*, 133(1): 131–148.
- Guo B Q, Gao D, Peng G R, Yu J, Liu W Q, Wang G X, Li Q, Zhang B, Wu W. 2025. Astronomical time scale and Paleo-water depth evolution of the Miocene in the Pearl River Mouth Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 661: 112736.
- Liu H, van Loon A J, Xu J, Tian L X, Du X F, Zhang X T, Chen D L. 2020. Relationships between tectonic activity and sedimentary source-to-sink system parameters in a lacustrine rift basin: a quantitative case study of the Huanghekou Depression (Bohai Bay Basin, E China). *Basin Research*, 32: 587–612.
- Liu E T, Chen S, Yan D T, Deng Y, Wang H, Jing Z H, Pan S Q. 2022a. Detrital zircon geochronology and heavy mineral composition constraints on provenance evolution in the western Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea: a source-to-sink approach. *Marine and Petroleum Geology*, 145: 105884.
- Liu E T, Deng Y, Lin X D, Yan D, Chen S, Shi X. 2022b. Cenozoic depositional evolution and stratal patterns in the Western Pearl River Mouth Basin, South China Sea: implications for hydrocarbon exploration. *Energies*, 15(21): 8050.
- Li Y C, Gong C L, Qiu X W, Tim Breitfeld H T, Barbarand J, Colin C. 2024. Provenance history of the eastern Pearl River Mouth Basin: implications for the evolution of the South China margin. *GSA Bulletin*, 136(11–12): 5191–5207.
- Longhitano S G, Mellere D, Steel R J, Ainsworth R B. 2012. Tidal depositional systems in the rock record: a review and new insights. *Sedimentary Geology*, 279: 2–22.
- MacEachern J A, Bhattacharya J P, Howell C D. 2005. Ichnology of Deltas: organism responses to the dynamic interplay of rivers, waves, storms, and tides. River deltas-concepts, models and examples. In: Giosan L, Bhattacharya J P (eds). *SEPM*, 83: 49–85.
- Murray J W. 2006. Ecology and applications of Benthic Foraminifera. 2008. *Journal of Paleolimnology*, 40(2): 747–749.
- Olariu C, Bhattacharya J P. 2006. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems. *Journal of Sedimentary Research*, 76(2): 212–233.
- Olariu C, Steel R J, Dalrymple R W, Gingras M K. 2012. The sedimentological, ichnological and architectural characteristics of compound dunes in a tidal seaway, the Lower Baronia sandstones (Lower Eocene), Ager Basin, Spain. In: Longhitano S G, Mellere D, Ainsworth R B (eds). *Modern and ancient depositional systems: perspectives, models and signatures*, 279: 134–155.
- Schomacker E R, Kjemperud A V, Nystuen J P, Jahren J S. 2010. Recognition and significance of sharp-based mouth-bar deposits in the Eocene Green River Formation, Uinta Basin, Utah. *Sedimentology*, 57: 1069–1087.
- Tanavsuu-Milkeviciene K, Plink-Bjorklund P. 2009. Recognizing tide-dominated versus tide-influenced deltas: middle devonian strata of the Baltic Basin. *Journal of Sedimentary Research*, 79: 887–905.
- Tye R S, Coleman J M. 1989. Depositional processes and stratigraphy of fluvially dominated lacustrine deltas: Mississippi Delta Plain. *Journal of Sedimentary Geology*, 59(6): 973–996.
- Wang Y R, Lin C S, Zhang Z T, Zhang B, Liu H Y. 2021. Sedimentary evolution and controlling factors of Early-Mid Miocene Deltaic systems in the Northern Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Scientific Reports*, 11: 6134.
- Zhang K, Wu S H, Wang J H, Xu Y J, Xu Z H, Zhang J J. 2022. Vertical grain-size trend of mouth bar in lacustrine fan delta: flume experiments. *Petroleum Science*, 19: 1964–1977.
- Zhang X T, Ding L, DU J Y, Liu D L, Liu H Q. 2017. Sedimentary characteristics and controlling factors of shelf sand ridges in the Pearl River Mouth Basin, northeast of South China Sea. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2(2): 141–155.

(责任编辑 王绍华)