

从陆架边缘三角洲到海底扇的过程响应与其控制因素

——以珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组下段为例

袁振星¹, 龚承林^{1,2}, 戈道瑶¹, 刘旭岩¹, 马文强¹

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249]

摘要: 基于地震、测井、岩心和粒度资料, 从“坡折-地貌-流体”耦合的角度, 揭示了珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组下段由陆架边缘三角洲至海底扇的完整流体演化过程及其控制因素。研究表明: ①以最大海泛面为界识别的成因层序SQ21, 其下降体系域发育陆架边缘三角洲和陆架坡折, 低位体系域发育块状搬运复合体、低位海底扇、下凹滑移面、构造坡折及沉积坡折。②在SQ21层序内部, 不同流体主导的沉积单元沿搬运路径有序演变。从陆架坡折处牵引流主导的陆架边缘三角洲, 到陆架坡折与构造坡折之间靠陆一侧滑动主导的块状搬运复合体, 再到靠海一侧滑塌-碎屑流主导的块状搬运复合体, 进而到构造坡折与沉积坡折之间砂质碎屑流主导的低位海底扇, 最终演化为沉积坡折以深浊流主导的低位海底扇, 并进一步稀释为低密度浊流。③这一“由洲到扇”的规律分布与有序演化是3阶坡折控制的结果。陆架坡折诱发陆架边缘三角洲滑动-滑塌, 滑塌体在坡度减缓处转化为碎屑流; 构造坡折促使碎屑流加速液化并与泥质分离, 形成砂质碎屑流; 沉积坡折导致砂质碎屑流分散稀释, 转化为高密度浊流, 并最终稀释为低密度浊流。④上述“地形控流”机制是深水砂体空间分异的根本原因。

关键词: 坡折带沉积特征; 重力流流体转化; 流体转化控制因素; 层序地层格架; 珠江组下段; 白云凹陷; 珠江口盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Process evolution and controlling factors from shelf-edge delta to submarine fan: A case study of the lower member of the Miocene Zhujiang Formation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

YUAN Zhenxing¹, GONG Chenglin^{1,2}, GE Daoyao¹, LIU Xuyan¹, MA Wenqiang¹

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China]

Abstract: Based on seismic, well log, core, and grain-size data, this study investigated the complete fluid evolution process from shelf-edge deltas to submarine fans and its controlling factors in the lower member of the Zhujiang Formation in the early Miocene, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB), from the perspective of slope break-geomorphology-fluid coupling framework. As indicated by the research results, (1) within the genetic sequence SQ21, bounded by the maximum flooding surface, the falling-stage systems tract characterized by the development of shelf-edge deltas and a shelf-slope break, whereas the lowstand systems tract comprises mass-transport complexes, lowstand submarine fans, concave-up slide surfaces, tectonic slope breaks, and depositional slope breaks. (2) Within sequence SQ21, sedimentary units dominated by different flow regimes exhibit an orderly evolution along the sediment transport pathway. The evolution begins with tractive current-dominated shelf-edge deltas at the shelf-slope break, followed by slide-dominated mass-transport complexes on the landward side between the shelf-slope break and tectonic slope break, and slump-debris flow-dominated mass-transport complexes on the seaward side. These deposits further evolve into sandy debris flow-dominated lowstand submarine fans between the tectonic and depositional slope breaks, and ultimately pass into turbidity current-dominated lowstand submarine fans beyond the depositional slope break, where the flows

收稿日期: 2025-10-16; 修回日期: 2025-12-22。

第一作者简介: 袁振星(2003—), 男, 硕士研究生, 源汇系统与深水沉积。E-mail: zhenxingyuanP2P@hotmail.com。

通信作者简介: 龚承林(1983—), 男, 博士、教授, 层序地层、源汇系统与深水沉积。E-mail: chenglingong@hotmail.com。

基金项目: 油气重大专项(2025ZD14027); 中海石油深海开发有限公司资助项目(CCL2023SKPS0027)。

gradually dilute into low-density turbidity currents. (3) The systematic spatial distribution and orderly evolution “from delta to fan” are controlled by third-order slope breaks. The shelf-slope break induces sliding and slumping of shelf-edge deltas, and the resulting slump deposits transform into debris flows where the slope gradient decreases. Tectonic slope breaks accelerate liquefaction and mud-sand separation within debris flows, leading to the formation of sandy debris flows. Depositional slope breaks promote the dispersion and dilution of sandy debris flows, which evolve into high-density turbidity currents and ultimately into low-density turbidity currents. (4) This “topography-controlled flow evolution” mechanism outlined above is the fundamental cause of the spatial differentiation of deep-water sand bodies.

Key words: sedimentation of slope break zones, gravity flow transformation, controlling factors of fluid transformation, sequence stratigraphic framework, lower member of Zhujiang Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

引用格式:袁振星,龚承林,戈道瑶,等. 从陆架边缘三角洲到海底扇的过程响应与其控制因素——以珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组下段为例[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1263–1280. DOI: 10. 11743/ogg20260413.

YUAN Zhenxing, GONG Chenglin, GE Daoyao, et al. Process evolution and controlling factors from shelf-edge delta to submarine fan: A case study of the lower member of the Miocene Zhujiang Formation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1263–1280. DOI: 10. 11743/ogg20260413.

陆架边缘三角洲和海底扇是深水源汇系统中最为显著的沉积单元,因其重要的科学研究意义和油气勘探价值而备受关注^[1-12]。在陆坡峡谷水道未切割陆架边缘的深水盆地中,低位正常海退驱动陆架边缘三角洲暴露剥蚀,所产生的粗碎屑进一步搬运分散至深水陆坡,形成海底扇,从而构成陆架边缘三角洲-海底扇沉积体系^[7,13-16]。其中,“陆架边缘三角洲上的粗碎屑受何种因素控制,以何种过程(沉积作用)向深水中搬运分散形成低位海底扇”一直是研究热点^[13,17-20]。

在科学研究层面,陆架边缘三角洲-海底扇沉积体系中保存的地质信息,不仅是构造升降、气候变迁、洋流活动(如等深流)和海平面变化等地球表层动力学过程的记录,同时也是深部岩石圈动力学过程的沉积档案^[5,7,21]。在油气勘探层面,该体系具有重要价值^[6-7,10];据《全球油气勘探形势与油公司动态(2017年)》统计,2010年以来全球新发现的常规油气储量中,源于陆架边缘三角洲和海底扇沉积体系的石油储量占比超过43%。

前人主要从流体稀释转化的角度揭示由陆架边缘三角洲到海底扇的过程响应与演化模式,认为陆架边缘三角洲失稳发生滑动-滑塌^[19-20,22],随后因水体“卷入”而逐渐稀释转化,沉积物浓度降低,经碎屑流化后最终转化为浊流^[6,19-20,23-26]。这一经典的“流体稀释转化模式”被广泛应用于由洲到扇过程响应的沉积解释和砂体预测,产生了深远影响^[19,24,27-29];然而,该模式未能揭示何种因素控制了由洲到扇的流体转化过程。因此,陆架边缘三角洲上的粗碎屑向深水搬运分散形成海底扇的过程响应及其控制因素仍“有待深入”^[16,21]。

在渐新世—中新世之交的白云凹陷(图1a),全球海平面下降诱发大规模海退,珠江西扩带来充沛的盆外物源,为陆架边缘三角洲的形成提供了有利外部条件;同时,陆架坡折从白云凹陷南坡大幅回撤至北坡,为重力流及海底扇的发育奠定了地貌基础^[30-33]。在此宏观背景下,形成了南海珠江陆架边缘三角洲-海底扇沉积体系,是揭示“由陆架边缘三角洲到深水扇的过程响应及其控制因素”的理想场所(图1b)。

本文利用白云凹陷 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的深度域三维地震、钻井、测井、岩心和粒度资料,以中新统珠江组下段为目的层,揭示珠江陆架边缘三角洲到深水扇的过程响应、控制因素与演化模式,以期为更深入认知“由洲到扇的沉积过程及其响应——当前深水沉积学研究的重要领域”提供有益参考。

1 区域地质概况

南海是在环太平洋构造域岩石圈伸展变薄背景下发育演化的。本文研究区位于南海北部珠江口盆地的白云凹陷。珠江口盆地自北向南可划分为5个构造带,依次为北部隆起带、北部拗陷带、中央隆起带、南部隆起带和南部拗陷带(图1a)。

珠江口盆地基底为侏罗纪与白垩纪沉积岩及岩浆岩^[34]。新生代以来,该盆地经历了始新世断陷期、渐新世断-拗转换期和中新世以来拗陷期3个演化阶段^[25,35]。新生代裂陷作用始于始新世,相应形成文昌组和恩平组2套地层:文昌组以半深湖相泥岩为主,恩平组发育河沼相煤系与炭质泥岩及滨浅湖相泥岩^[25,35-37]。伴随渐新世早期(33.0 ~ 30.0 Ma)南海扩

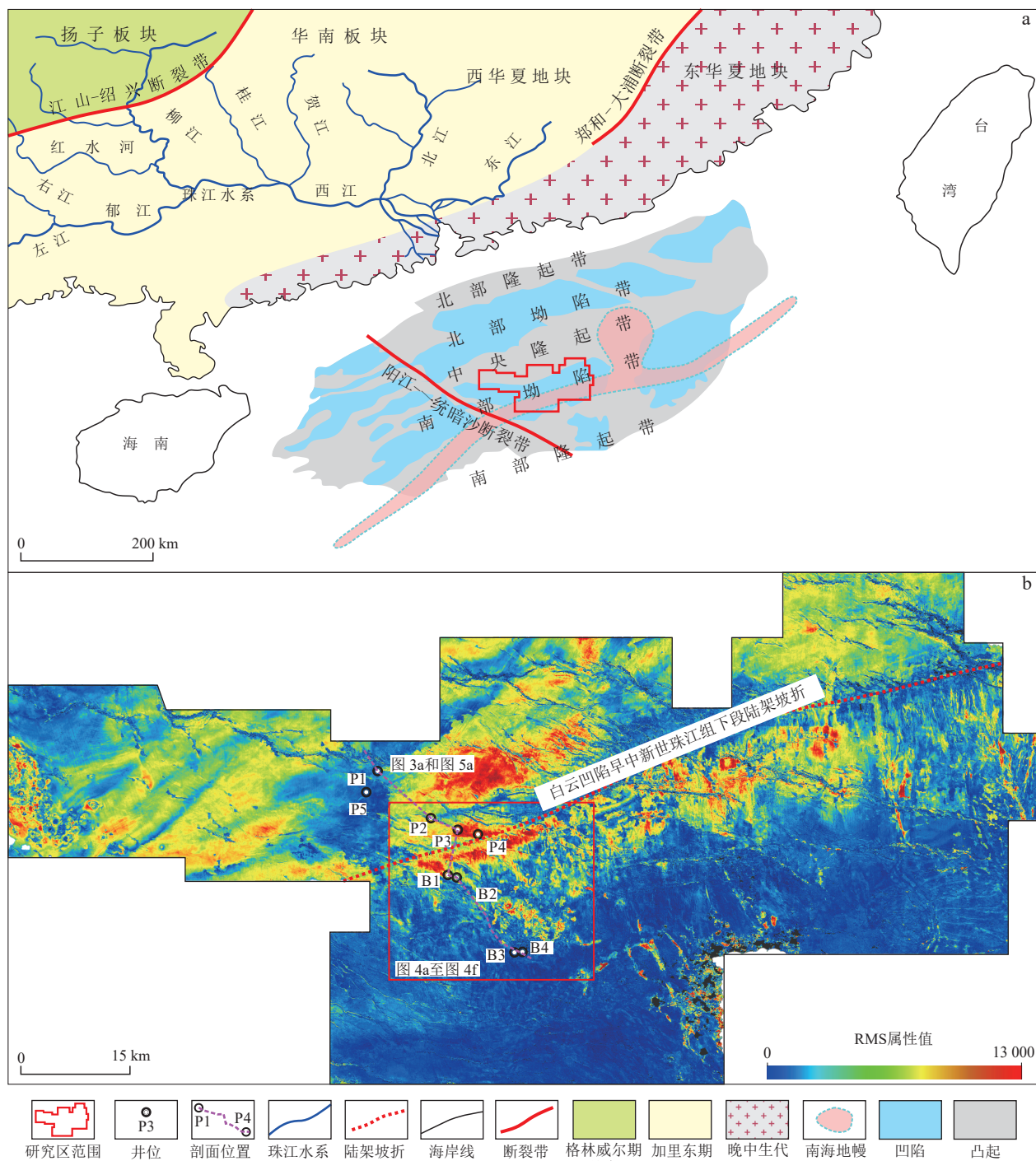


图1 珠江口盆地白云凹陷地质概况(a)及典型均方根振幅(RMS)属性平面图(b)

Fig. 1 Geological overview (a) and typical root-mean-square (RMS) amplitude attribute map (b) of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

张,珠江口盆地由断陷期进入断-拗转换期,形成海-陆过渡相沉积体系;受南海运动影响,白云凹陷南坡形成陆架坡折带和大型陆架边缘三角洲-海底扇沉积体系^[10,35]。渐新世晚期,中央海盆大洋中脊发生向南跃迁(白云运动)并伴随海底扩张,白云凹陷北坡发育大规模陆架坡折带及其伴生的以大型陆架边

缘三角洲-海底扇沉积体系为主的珠江组和韩江组^[30-31,38-39]。约15.5 Ma海底扩张结束后,南海岩石圈向东俯冲,菲律宾海板块内吕宋岛弧开始发育(东沙运动)^[39];白云凹陷整体进入拗陷期,同时南海环流活跃,形成以“深水单向迁移水道”为特色的重力流-底流复合体系^[40]。

研究区为白云凹陷,该凹陷位于中央拗陷带中部(珠二拗陷)的陆坡深水区,是珠二拗陷内面积最大(约 $2.0 \times 10^4 \text{ km}^2$)的半地堑-地堑复合断陷^[10,25,35-37]。研究目的层为中新统珠江组下段(23.8~19.1 Ma),主要包括珠江组五段和珠江组四段2套地层。

2 白云凹陷珠江组下段层序地层格架

以经典四分层序模式与成因层序模式为指导,采用井-震结合方法,识别了2个最大海泛面(MFS)、1个最大海退面(MRS)、1个暴露不整合面(SU)及1个强制海退起始面(BSFR),建立了目的层的层序地层格架

(图2a,图3a)。

2.1 基于钻井和测井资料的沉积旋回对比

在钻井和测井资料上,以“旋回为体”,基于钻井旋回识别2个稳定泥岩顶界面、1个岩性分界面、1个沉积旋回顶界面和1个沉积旋回底界面(图2a)。

2.1.1 稳定泥岩顶界面

该界面区域广泛分布,表现为“区域连续且稳定的厚层(厚度20~35 m)、暗色(灰色)泥岩,局部夹薄层(厚度2~3 m)粉砂岩”的顶界面(图2a中蓝色和紫色实线所示)。

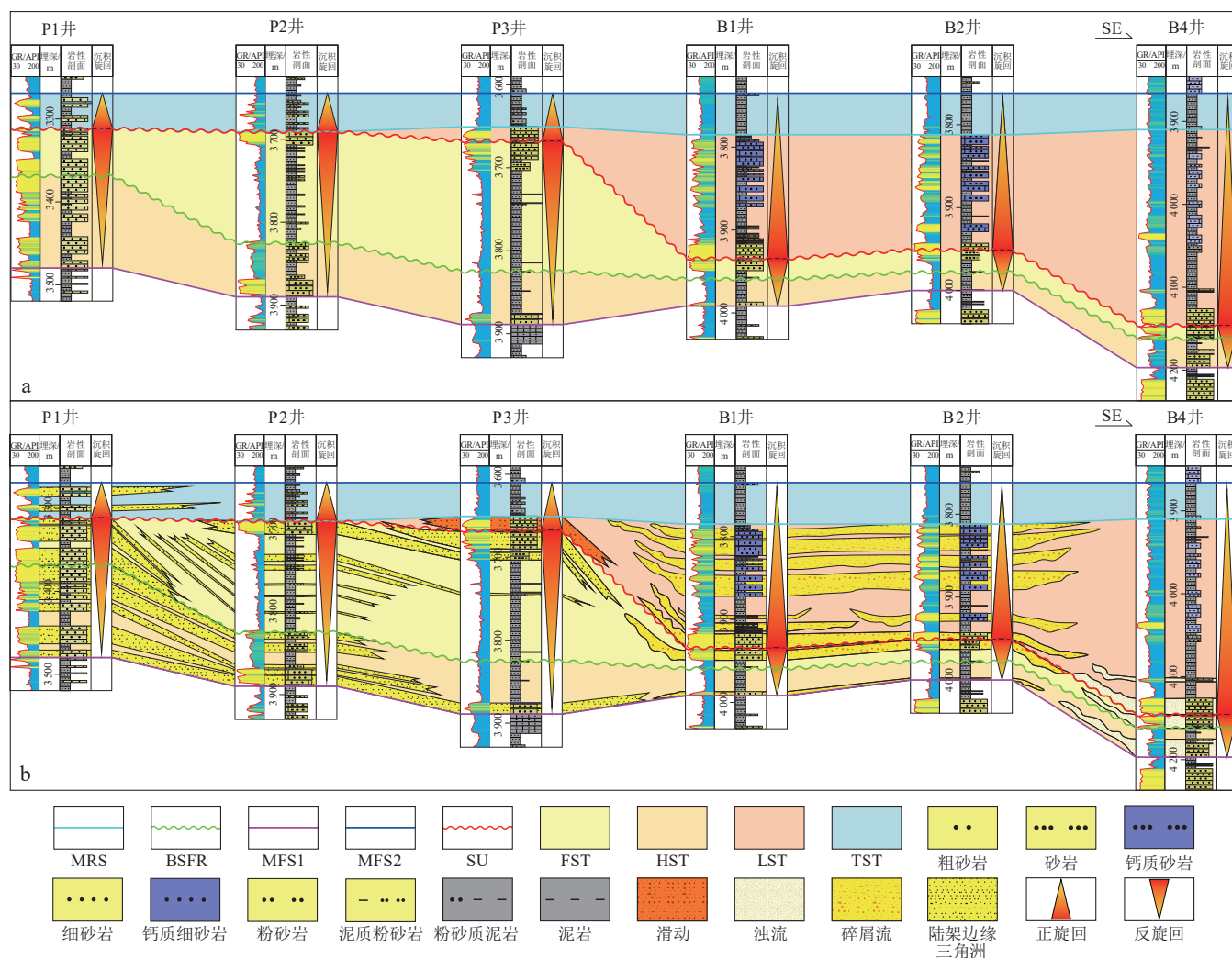


图2 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段SQ21层序体系域划分连井对比剖面

Fig. 2 Well-tied seismic section showing systems tract division for sequence SQ21 in the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

a. 层序地层格架; b. 沉积充填演化

MRS. 最大海退面; BSFR. 强制海退起始面; MFS1. 最大海泛面1; MFS2. 最大海泛面2; SU. 暴露不整合面; FST. 下降体系域; HST. 高位体系域; LST. 低位体系域; TST. 海侵体系域
(剖面位置见图1b。)

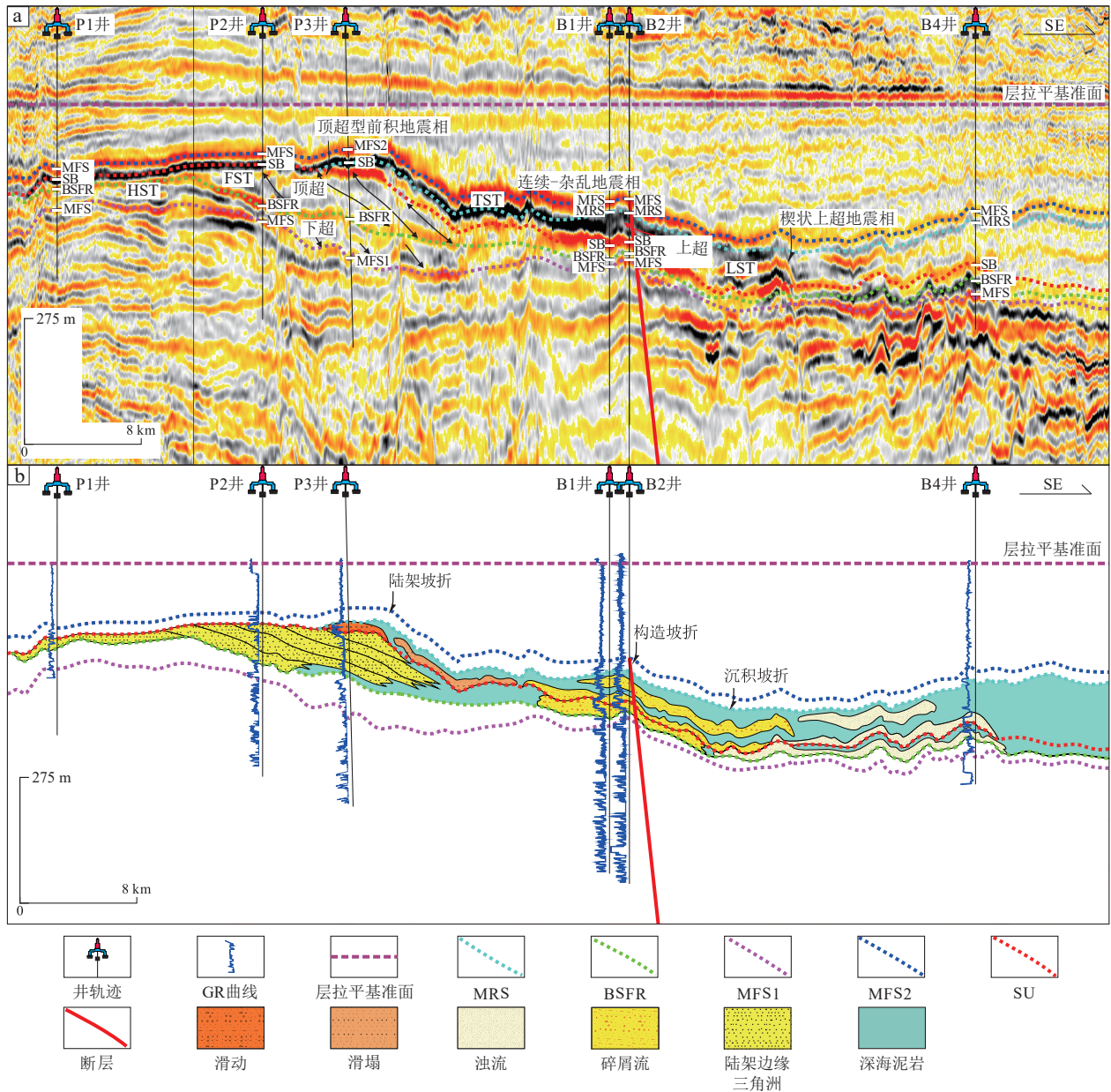


图3 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段SQ21层序井-震结合连井对比剖面

Fig. 3 Well-to-seismic integration section of sequence SQ21 of the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

a. 层序地层格架; b. 沉积充填演化示意图

MRS. 最大海退面; BSFR. 强制海退起始面; MFS1. 最大海泛面1; MFS2. 最大海泛面2; SU. 暴露不整合面; FST. 下降体系域; HST. 高位体系域; LST. 低位体系域; TST. 海侵体系域
(剖面位置见图1b。)

2.1.2 岩性分界面

该界面分布局限,仅发育于陆架坡折(P3钻井处)以深区域,表现为“连续稳定厚层泥岩与箱状钙质砂岩或细砂岩”的分界面(图2a中蓝绿色实线所示)。

2.1.3 反旋回顶界面

该界面区域广泛分布,表现为反旋回的顶界面。

该反旋回底部多见厚层(厚度20~100 m)暗色泥岩,顶部以箱状砂岩或细砂岩为主(图2a中红色波浪线所示)。

2.1.4 反旋回底界面

该界面主要发育于外陆架至深水陆坡区,界面之上出现“由底部厚层泥岩和顶部箱状砂岩或细砂岩”构成的反旋回(图2a中绿色波浪线所示)。

2.2 基于地震反射终止关系的界面划分

在地震资料上,以“界面为纲”,基于地震反射终止关系识别出2个连续稳定整一面、1个首次上超面、1个顶超包络面和1个下超包络面(图3a)。

2.2.1 连续稳定整一面

区域广泛分布,表现为“区域连续稳定分布的波峰强反射”,界面上、下没有明显地震反射终止关系,为一典型的连续整一面(图3a中蓝色和紫色点划线所示)。

2.2.2 首次上超面

仅发育于陆架坡折以深区域,向陆一侧超覆尖灭,出现上超地震反射终止关系,为首次上超点所对应的整一面(图3a中蓝绿色点划线所示)。

2.2.3 顶超包络面

区域广泛分布,在陆架边缘处界面之下出现顶超地震反射终止关系。这些顶超表现为以切线方式向上终止于倾角更小的地震反射界面之下,并伴生地层厚度向盆底方向明显增厚(图3a中红色点划线所示)。

2.2.4 下超包络面

主要分布于陆架边缘及以深区域,界面之上出现下超地震反射终止关系。这些下超表现为以切线方式向上终止于倾角更小的地震反射界面之上,并伴生地层厚度向物源方向明显增厚(图3a中绿色点划线所示)。

2.3 井-震结合的层序与体系域界面识别

井-震结合识别出2个最大海泛面、1个最大海退面、1个暴露不整合面和1个强制海退起始面(图2a,图3a)。

2.3.1 最大海泛面

钻井上的稳定泥岩顶界面对应于地震上的连续稳定整一面,界面之下为连续稳定的厚层富泥质泥岩(凝缩层),是基准面快速上升的沉积响应。因此,该界面为最大海泛面^[41-42]。

2.3.2 最大海退面

钻井上的“上泥、下砂”岩性分界面对应于地震上的首次上超面,界面向陆一侧见首次上超点,上超地震反射终止关系代表基准面快速上升的开始。因此,该界面为最大海退面^[41-42]。

2.3.3 暴露不整合面

钻井上的反旋回顶界面对应于地震上的顶超包络面,界面之下靠海一侧出现最远顶超点,该点代表“陆架边缘出现沉积过路所对应的基准面下降(强制海退)”的终止。因此,该界面为暴露不整合面^[41,43-44]。

2.3.4 强制海退起始面

钻井上的反旋回底界面对应于地震上的下超包络面,界面之下靠陆一侧出现首次顶超点,该点代表“陆架边缘出现沉积过路所对应的基准面下降(强制海退)”的开始。因此,该界面为强制海退起始面^[41,43-44]。

本文研究目的层的顶、底以最大海泛面为界,因此目的层相当于一个成因层序^[45]。该成因层序内部发育1个层序界面(暴露不整合面)(图2a,图3a)。该暴露不整合面对应于珠江组五段和珠江组四段的分界面,形成于约21 Ma,故将本文所研究的成因层序命名为SQ21。

SQ21层序内部发育1个最大海退面、1个强制海退起始面和1个暴露不整合面,这些界面将目的层划分为4个体系域,自下而上依次为高位体系域(HST,相当于成因层序的低位早期)、下降体系域(FST,相当于成因层序的低位晚期)、低位体系域(LST)和海侵体系域(TST)(图2a,图3a)。

3 SQ21层序由洲到扇的沉积响应识别与解释

在珠江组下段的下降体系域和低位体系域中,利用地震和测井资料识别并厘定了3类沉积单元:陆架边缘三角洲、块状搬运复合体和海底扇。

3.1 陆架边缘三角洲的识别与解释

珠江组下段SQ21层序下降体系域、陆架坡折以浅的外陆架区发育顶超型前积地震相(图3,图4)。

在地震剖面上,顶超型前积地震相的典型识别特征为“倾斜并向前推进的前积反射(陆架边缘斜坡进积体)”。沉积主体为前积层,可见规模的顶超地震反射终止关系,顶积层不发育,属于典型的顶超型前积地震相(图3a)。在平面属性上,该地震相表现为片状强均方根振幅属性和亮色RGB(红绿蓝)混相分频属性,其长轴方向与同期陆架坡折大致平行(图3a,b)。

在单井上,顶超型前积地震相与反旋回相对应,反

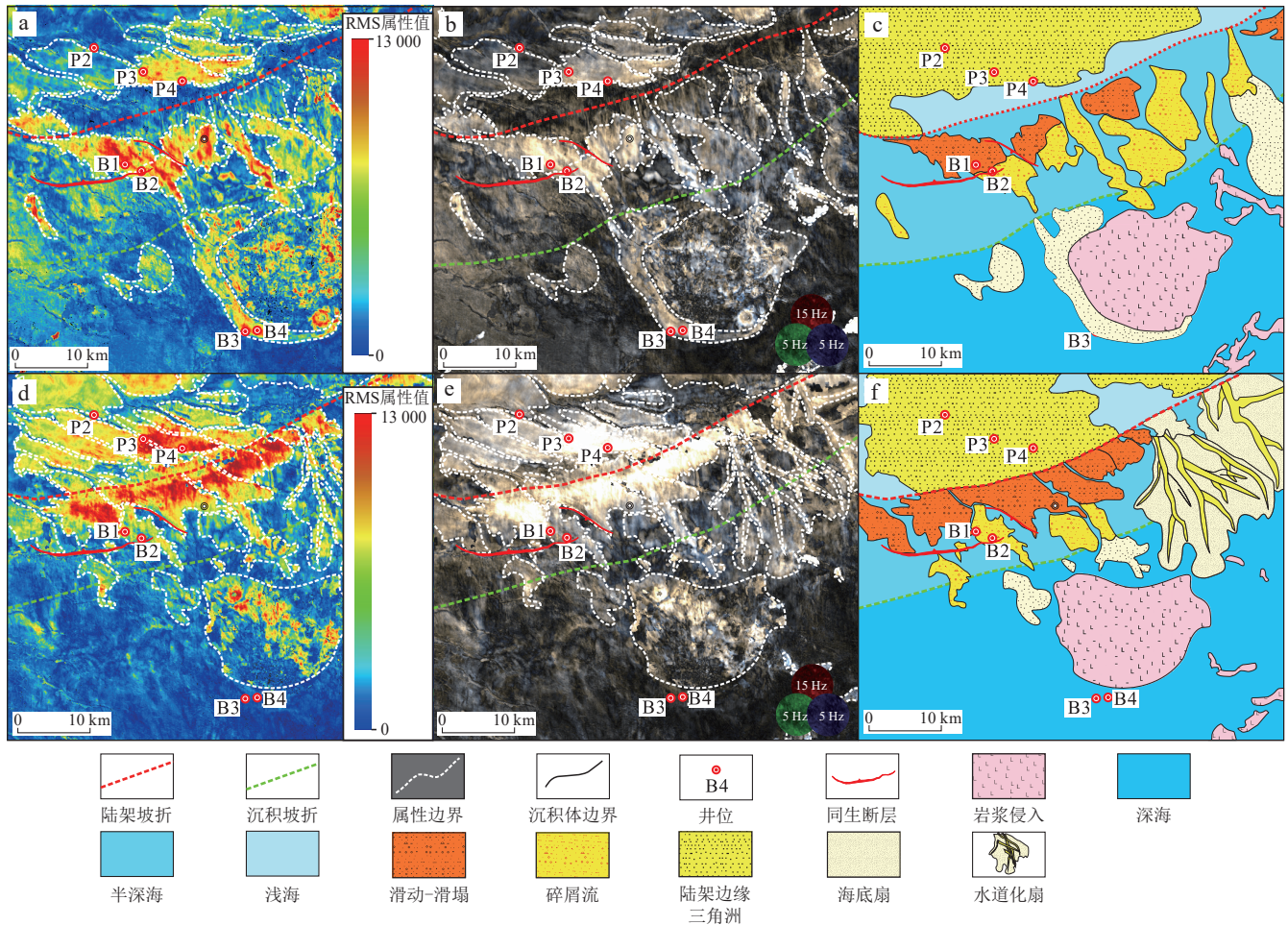


图4 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段SQ21层序典型均方根振幅(RMS)属性、RGB(红绿蓝)三色混相分频属性与沉积解释

Fig. 4 Representative root-mean-square (RMS) amplitude attribute, RGB blended frequency decomposition attribute, and depositional interpretation maps for sequence SQ21 in the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

a. FST典型均方根振幅属性平面图;b. FST典型RGB属性融合平面图;c. FST沉积相平面图;d. LST典型均方根振幅属性平面图;e. LST典型RGB属性融合平面图;f. LST沉积相平面图

FST. 下降体系域; LST. 低位体系域

(剖面位置见图1b。)

旋回内部发育厚层(厚度9.33~16.00 m)呈漏斗状测井相的砂岩或细砂岩。在连井剖面上,顶超型前积反射对应于地层厚度向盆地和物源两侧明显减薄(图2a),其沉积主体位于陆架边缘,P2井与P3井发育特征相似、相互对应的砂体,且垂向厚度明显增加。顶超型前积地震反射地震相、反旋回以及向两侧减薄的沉积特征(表1)是陆架边缘三角洲的典型识别标志。该三角洲发育于下降体系域的外陆架区,表明其是基准面强制海退驱动河流到达外陆架所形成的陆架边缘三角洲,并逐渐向前推进,形成“下细、上粗”的反旋回和垂向逐渐增厚的砂体^[3-4,46-47](图3b,图4f)。该陆架边缘三角洲与同期陆架坡折呈斜交的平面沉积相特征,表明其受到了与陆架坡折平行的洋流或波浪改造^[10,15]。

3.2 块状搬运复合体的识别与解释

珠江组下段SQ21层序的低位体系域中,在陆架坡折以深的陆坡区发育连续-杂乱地震相(图3,图4)。

在地震剖面上,连续-杂乱地震相的典型识别特征为“地震反射轴整体上断续且杂乱”,整体呈“向物源一侧减薄的楔状”,其靠近陆架坡折一侧为连续强反射,向盆底方向转变为杂乱反射(图3a)。在平面属性上,该地震相整体表现为片状强均方根振幅属性和亮色RGB混相分频属性,其长轴方向与同期陆架坡折斜交(图4)。靠近陆架坡折一侧呈块状(对应“楔状连续强反射”),向盆底方向转变为不规则状(对应“楔状杂乱强反射”)。

在单井上,连续-杂乱地震相靠陆一侧被P3钻井

表 1 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段 SQ21 层序典型沉积相类型及其特征

Table 1 Representative sedimentary facies types and characteristics of sequence SQ21 of the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

沉积相特征	沉积相类型		
	陆架边缘三角洲	块状搬运复合体	海底扇
地震反射外形	楔状反射外形	楔状反射外形	楔状反射外形
地震反射参数	中振幅、中连续、中频率	中-强振幅、中-低连续、低频率	弱-强振幅、中连续、中-低频率
地震反射结构	顶超型前积反射结构	杂乱反射结构	平行-亚平行反射结构
岩性粒度	漏斗状反旋回,细砂岩为主,粒度曲线为陡峭二段式,分选磨圆中等	砂-泥互层,细砂岩为主,粒度曲线为一段式或二段式,分选较差,磨圆中等一好	箱形或钟形,细砂岩为主,分选中等-较好
沉积	平行层理、交错层理和韵律层理等	砂质注入体、侵蚀界面、块状构造和砂质团块等	不完全鲍马序列、泥质脉体和负载构造等
平面属性	片状强均方根振幅	不规则片状强均方根振幅	大面积分布的弱反射,局部见朵状或叶状强均方根振幅
与坡折关系	位于陆架坡折之上	介于陆架坡折与构造坡折之间,以下凹滑移面区分滑动-滑塌与碎屑流	位于构造坡折之下,沉积坡折区分砂质碎屑流与浊流沉积单元

钻穿,表现为钟状厚层(厚度 1.00 ~ 17.50 m)细砂岩,靠海一侧被 B1 井和 B2 井钻穿,呈砂-泥互层的单井相,内部发育多套表现为齿化箱形、钟形复合测井相的砂岩或细砂岩(图 2a)。在连井剖面上,B1 井与 B2 井的砂体特征相似,但与 P3 井的砂体明显不同。

连续-杂乱地震相靠陆一侧的楔状连续强反射发育于陆架边缘三角洲的前积层内,地震反射呈连续强反射(未出现明显揉皱扭动变形),岩性为钟状厚层细砂岩。这些特征(表 1)与“越过陆架坡折、块状搬运过程启动早期的滑块”类似,表明其为陆架边缘三角洲越过陆架坡折后,因地形坡度陡增而启动块体搬运所形成的、未变形的“滑块”^[6,20,24,48-49]。而在深水陆坡区发育的楔状杂乱反射对应于连井上的频繁砂-泥互层,杂乱反射被认为是滑塌-碎屑流的典型识别标志特征(陆坡深水环境)^[20,24,48],故将其解释为滑塌-碎屑流沉积。由此可见,发育在陆架边缘三角洲前积层内、由“滑块和碎屑流沉积”构成的连续-杂乱地震相,即为块状搬运复合体,其环绕同期陆架坡折并成群出现(图 3b,图 4d)。

3.3 低位海底扇的识别与解释

珠江组下段 SQ21 层序低位体系域中,在构造坡折以下发育楔状上超地震相(图 3,图 4)。

在地震剖面上,楔状上超地震相以“向陆一侧减薄尖灭的楔状”为反射外形,以“上超充填”为反射结构,内部见连续强反射(图 3a)。在平面属性上,该地震相整体上表现为区域大面积分布的弱反射,局部见朵状或叶状强均方根振幅属性和亮色 RGB 混相分频属性(图 4)。

在单井上,该地震相对应于正旋回,正旋回底部发育多套层厚约 5.00 ~ 20.00 m 的锯齿状箱形或钟形测井相的细砂岩(图 2a)。

这种发育于低位体系域盆底区的朵状或叶状富砂沉积(钟形或箱形)(表 1)是典型的基准面缓慢上升所对应的低位正常海退期所形成的低位海底扇^[20,41,43-44,50]。

4 SQ21 层序由洲到扇的过程恢复与演化模式

基于沉积单元的时-空分布及其控制因素分析,恢复了 SQ21 层序由洲到扇的作用过程,建立了由洲到扇过程响应的演化模式。

4.1 地貌坡折控制下的沉积单元规律分布

在深度域地震资料基础上,以 SB18 界面(区域性海泛泥岩,地震同相轴连续性强)为基准面进行层拉平。该拉平界面可近似于目的层沉积时期的海平面,因此目的层所示的地震反射同相轴与拉平层的角度可近似对应古地形坡度。

地形坡度发生陡然变化的地带即为坡折,其成因一般为沉积速率的差异或同沉积断层的发育^[51]。白云凹陷北坡珠江组下段 SQ21 层序发育 3 阶对沉积有明显控制作用的地貌坡折。

4.1.1 陆架坡折

为平坦浅水陆架与陡倾深水陆坡之间的分界线,地形坡度从外陆架的 0.08°陡增至 0.70°(图 5b)。陆架坡折是沉积作用形成的地貌坡折,也是牵引流主导

的陆架边缘三角洲顶积层与重力流主导的陆架边缘三角洲前积层和底积层之间的沉积相带分界面(图3b,图4f)。该坡折区分了SQ21层序的陆架区与上陆坡区2个次级地貌单元。

4.1.2 构造坡折

在陆架坡折以深的深水陆坡区(陆架边缘三角洲前积层)发育同沉积断层,断层上、下盘地层厚度有一定变化,且上升盘与下降盘之间的地形坡度变化明显(约 $0.25^{\circ} \sim 0.74^{\circ}$)(图5b),指示该地貌坡折为构造成因的构造坡折。它将SQ21层序的陆坡区划分为中陆坡和下陆坡2个次级地貌单元(图3b,图4f)。

4.1.3 沉积坡折

在陆坡以深的盆底区,由沉积侵蚀速率差异形成的地形坡度由陡变缓的地貌坡折(盆底区由 0.74° 陡降至 0.11°)(图5b)。沉积坡折分隔了陆坡区的陆架边缘三角洲前积层与盆底区的陆架边缘三角洲底积层(图3b,图4f)。

上述3个地貌坡折将本文所识别的沉积单元在平面上有序分割:①陆架坡折以浅的浅水外陆架区发育陆架边缘三角洲;②陆架坡折与构造坡折之间的上陆坡区以滑块为主;③经下凹滑移面后至中陆坡为流体转化过渡区;④构造坡折与沉积坡折之间的下陆坡区

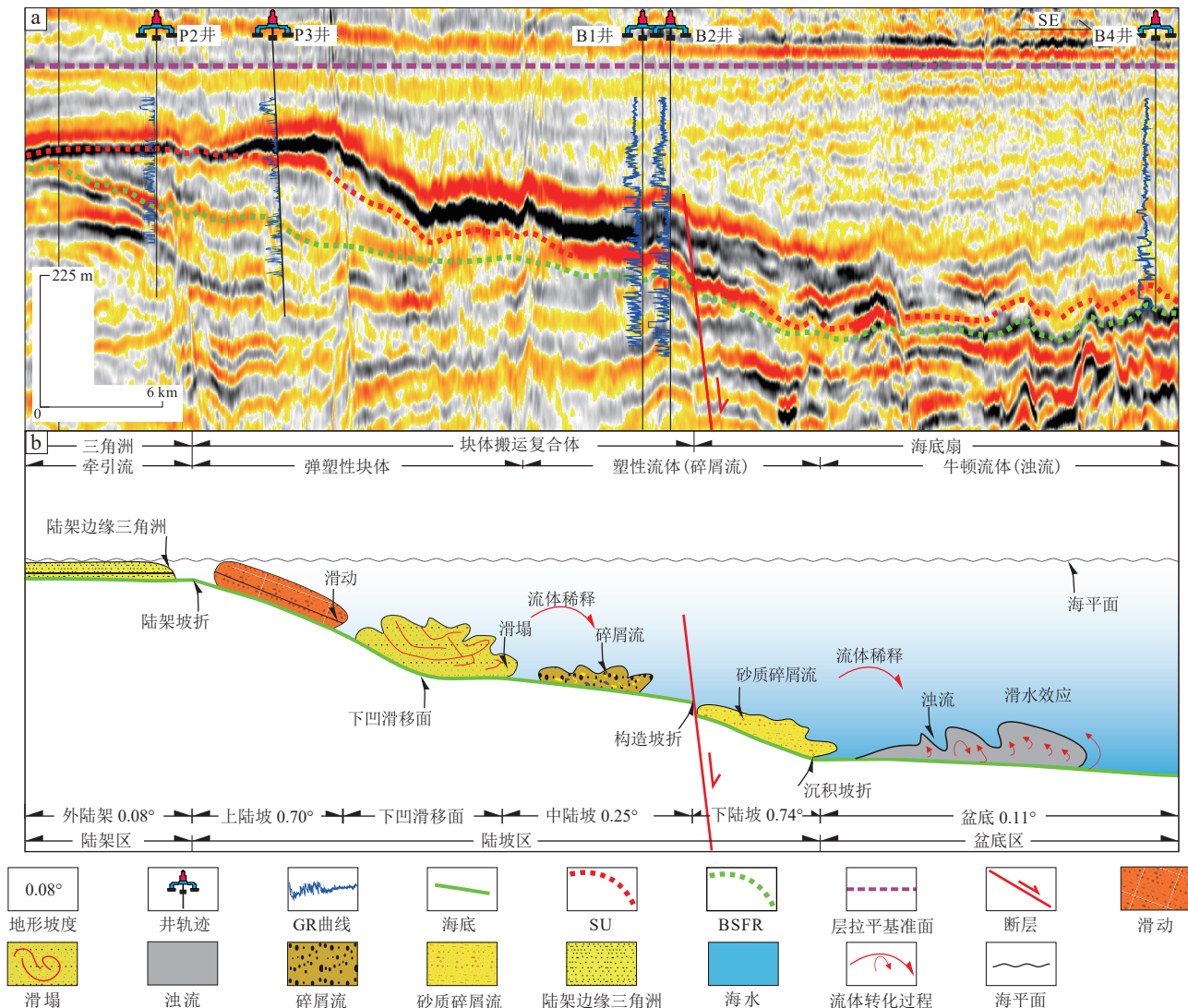


图5 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段SQ21层序顺物源方向连井对比剖面(a)及沉积过程与转化模式示意图(b)

Fig. 5 Cross-well correlation section along sediment transport direction (a) and depositional process & transformation model (b) of sequence SQ21 of the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

BSFR. 强制海退起始面; SU. 暴露不整合面

(剖面位置见图1b。)

以碎屑流沉积为主;⑤沉积坡折以深的盆底区主要发育低位海底扇(图3b,图4f)。

4.2 由洲到扇沉积过程的有序演化

与由洲到扇沉积单元的规律分布相对应,珠江组下段SQ21层序由洲到扇的沉积过程经历了“牵引流—滑动—滑塌—碎屑流—砂质碎屑流—高密度浊流—低

密度浊流”的有序演化(图5b)。

4.2.1 外陆架区“牵引流作用过程”恢复

珠江组下段SQ21层序外陆架区发育陆架边缘三角洲(图3b,图4),岩性以黄色、灰白色中-细砂岩或灰白色细砂岩为主(部分发育含砾中砂岩和粗砂岩,砾石含量大于70%,如图6a所示),分选磨圆中等,发育正

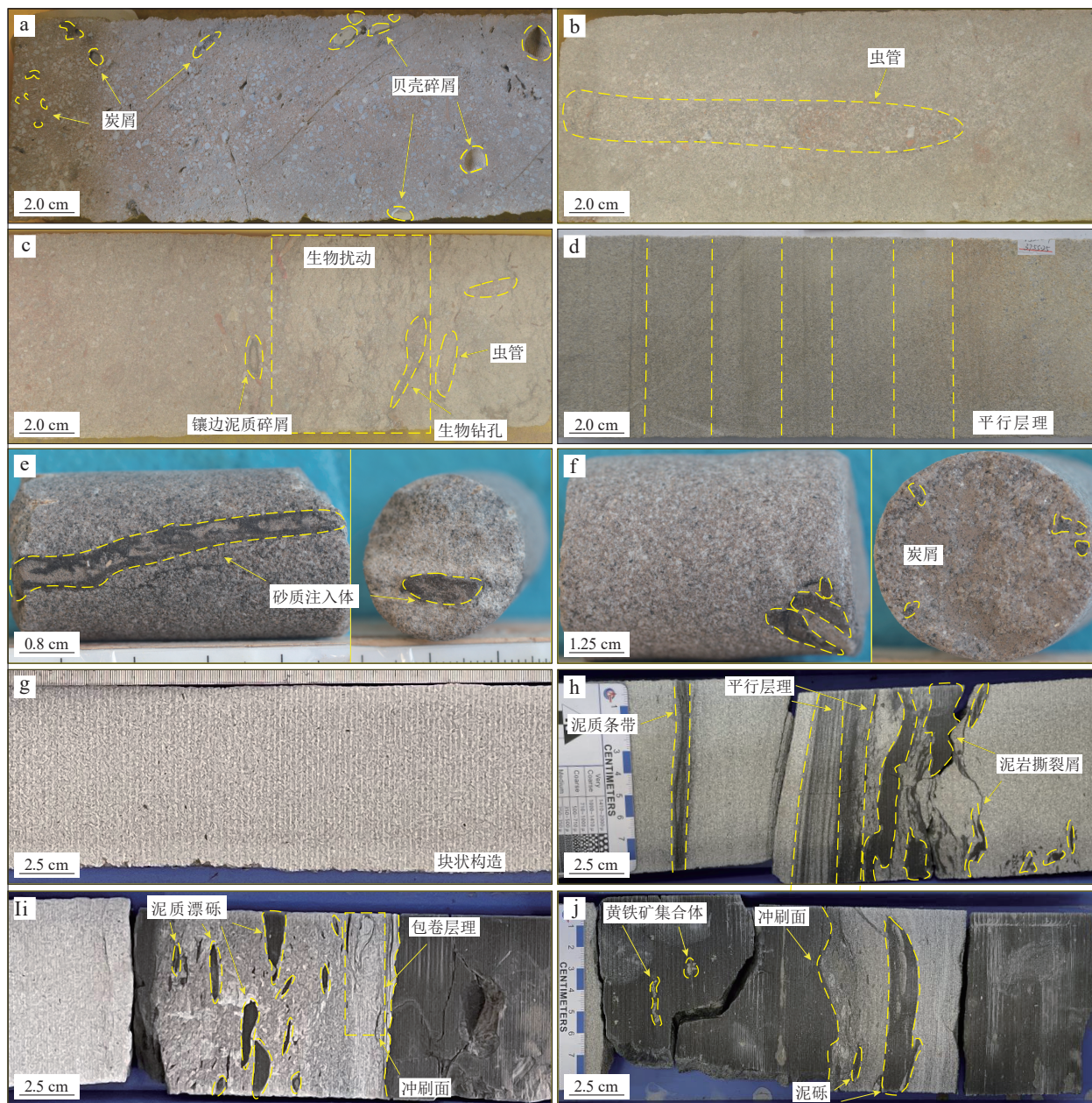


图6 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段SQ21层序典型微观沉积特征(岩心照片)

Fig. 6 Representative microscopic sedimentary characteristics (core photographs) of sequence SQ21 in the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

a. P1井,埋深3 349.10~3 349.35 m,陆架边缘三角洲;b. P1井,埋深3 370.00~3 370.25 m,陆架边缘三角洲;c. P1井,埋深3 368.50~3 368.75 m,陆架边缘三角洲;d. P4井,埋深3 755.00~3 755.25 m,陆架边缘三角洲;e. B1井,埋深3 937.50 m,砂质碎屑流;f. B1井,埋深4 150.00 m,砂质碎屑流;g. B4井,埋深4 136.60~4 136.85 m,高密度浊流;h. B4井,埋深4 143.30~4 143.50 m,低密度浊流沉积;i. B4井,埋深4 145.25~4 145.50 m,低密度浊流沉积;j. B4井,埋深4 135.65~4 135.90 m,低密度浊流沉积

韵律层理(单层厚度 10 ~ 30 cm)、平行层理、交错层理、生物扰动构造、虫孔及生物化石(图 6b—d),单期砂体底部见冲刷面(图 7b,c)。岩心上可见平行层理,单期砂体底部发育冲刷面,具多期正韵律叠置结构(图 7a),

这是陆架边缘三角洲平原亚相中分流河道微相典型的沉积特征^[52-53]。

粒度分析表明,分流河道微相的粒度累积概率曲线呈陡峭的二段式特征,总体以跳跃搬运为主

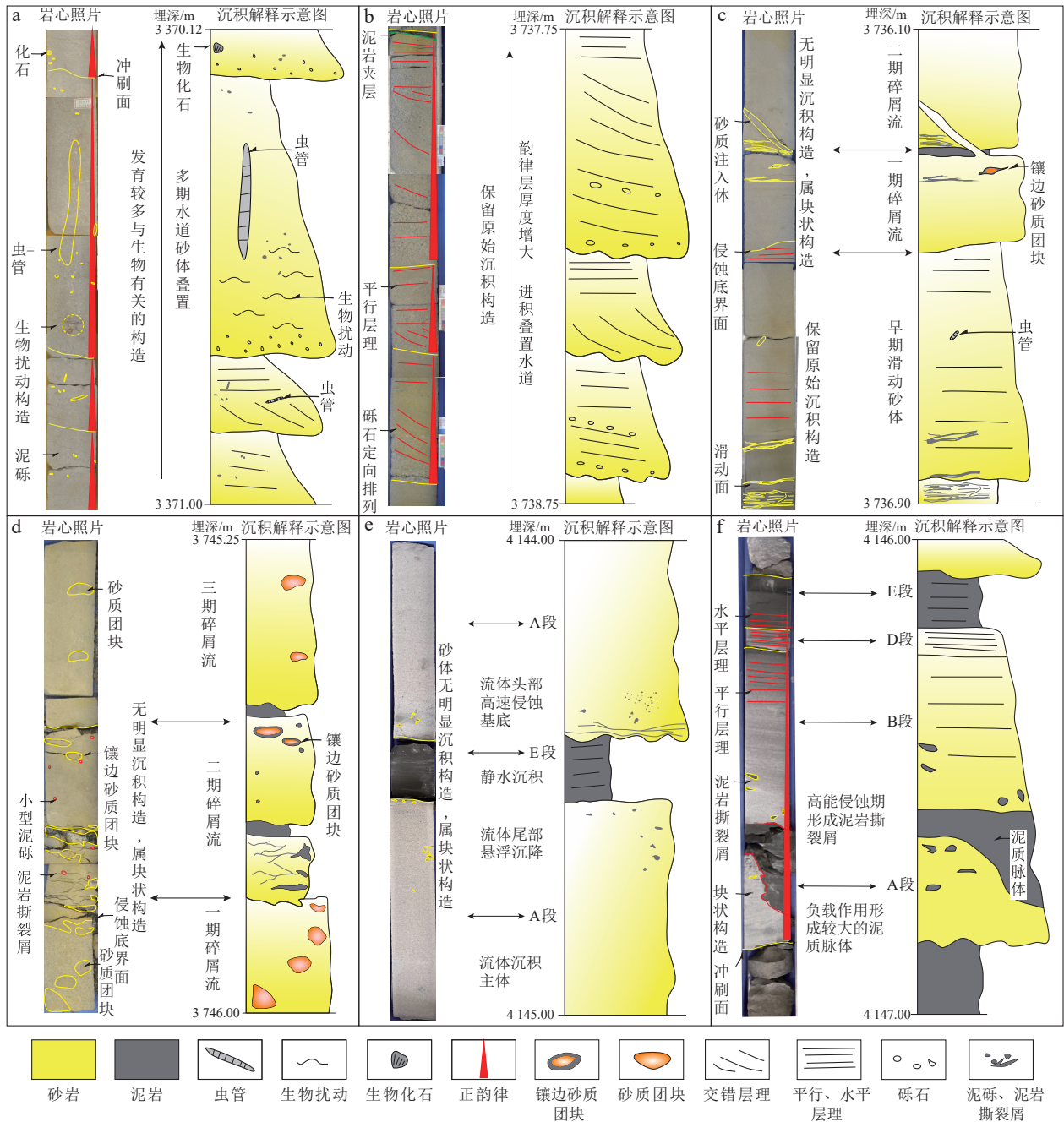


图7 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段SQ21层序典型岩心照片及沉积解释

Fig. 7 Representative core photographs and sedimentary interpretation of sequence SQ21 in the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

a. P1井,埋深3 370.12 ~ 3 371.00 m,水下分流河道;b. P4井,埋深3 737.75 ~ 3 738.75 m,滑块;c. P4井,埋深3 736.10 ~ 3 736.90 m,滑块和碎屑流沉积;d. P4井,埋深3 745.25 ~ 3 746.00 m,碎屑流沉积;e. B4井,埋深4 144.00 ~ 4 145.00 m,高密度浊流;f. B4井,埋深4 146.00 ~ 4 147.00 m,低密度浊流沉积

A段. 底部块状、递变层理段,发育冲刷充填构造等;B段. 下部平行纹层段,变细,与A段渐变接触;D段. 上部平行纹层段,厚度较小;E段. 远洋沉积、块状或粒序浊流沉积泥岩段,与上覆层突变接触

(图8a)。在 $C-M$ 图(C 为粒度累积概率曲线上颗粒含量1%处对应的粒径, M 为粒度累积概率曲线上颗粒含量50%处对应的粒径)上大多与 $C=M$ 基线平行,代表滚动-跳跃搬运(图8g)。搬运方式以滚动和跳跃为主,且与岩心上平行层理、交错层理和冲刷面对应,指示典型的牵引流作用过程^[53-55],表明SQ21层序外陆架区由牵引流主导。

4.2.2 上陆坡区“滑动”沉积过程恢复

珠江组下段SQ21层序上陆坡区发育块状搬运复合体(图3b和图4),岩性以钙质砂岩、钙质细砂岩和不等粒砂岩为主,分选中等、磨圆中等(图7b,c),发育平

行层理和交错层理,顶、底部见滑动面(图7c)及砂质注入体。

粒度分析表明,滑块沉积的粒度累积概率曲线呈较为陡峭的两段式,由跳跃组分和悬浮组分构成(图8e)。在 $C-M$ 图上,大多数样点表现为平行于 $C=M$ 基线的牵引流特征,少部分分散在重力流区间内(图8g)。牵引流和重力流兼有的粒度特征,以及滑动面和砂质注入体的沉积特征,均指示了平移剪切(滑动)作用过程^[19,22,27,49,56-57]。

4.2.3 中、上陆坡浅水区“碎屑流作用过程”恢复

珠江组下段SQ21层序上陆坡区搬运复合体

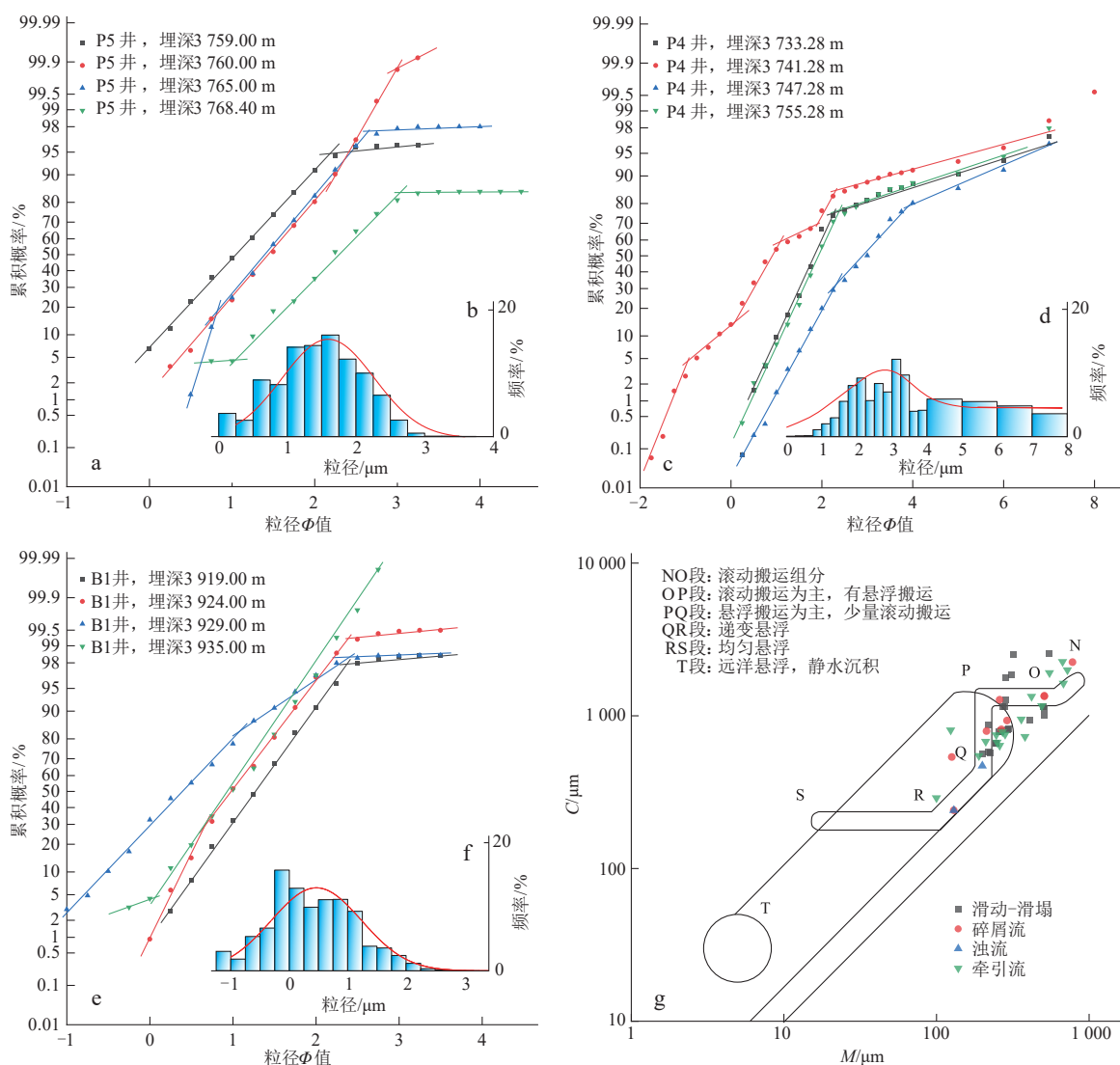


图8 珠江口盆地白云凹陷珠江组下段SQ21层序典型沉积单元粒度累积概率曲线、粒径频率分布直方图及 $C-M$ 图

Fig. 8 Grain-size cumulative probability curves, grain-size frequency distribution histograms, and $C-M$ diagrams of typical sedimentary units of sequence SQ21 in the lower member of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

a. P5井, 粒度累积概率曲线; b. P5井, 埋深3 760.00 m, 粒径频率分布直方图; c. P4井, 粒度累积概率曲线; d. P4井, 埋深3 747.28 m, 粒径频率分布直方图; e. B1井, 粒度累积概率曲线; f. B1井, 埋深3 929.00 m, 粒径频率分布直方图; g. P5井、P4井和B1井 $C-M$ 图

C. 粒度累积概率曲线颗粒含量1%处对应的粒径; M. 粒度累积概率曲线颗粒含量50%处对应的粒径

(图3b,图4)中,岩性以黄色不等粒砂岩和含砾细砂岩为主,分选中等-较差、磨圆中等-较好,底部可见侵蚀底界面、砂质注入体以及泥砾(图7c,d),还可见镶边砂质团块(砂层和泥层抗剪切强度差异+碎屑流流体分异成因)与均质砂质团块(碎屑流成因)。

粒度分析表明,浅水区碎屑流沉积单元的粒度累积概率曲线呈平缓的上拱形态(图8c),泥质含量较高。在C-M图和粒径分布直方图上显示典型的以碎屑流为主的重力流流体特征(图8d,g)。

这种块状构造、内部发育泥砾、砂质团块(镶边砂质团块)与高泥质含量相对应,指示碎屑流以杂基支撑的悬浮搬运为主^[29,58-60];代表着砂-泥混杂的沉积过程,为滑动-滑塌进一步转化而成的碎屑流沉积作用。

4.2.4 下陆坡深水区“砂质碎屑流作用过程”恢复

珠江组下段SQ21层序下陆坡深水区发育低位海底扇,岩性以灰褐色粗-中砂岩和细砂岩为主(图6e,f),岩心上见块状构造和底部砂质注入体,测井相为弱齿化。

粒度分析表明,碎屑流沉积单元的粒度累积概率曲线呈平缓的上拱形态(图8e),分选较差。在C-M图和粒径频率分布直方图上显示典型的以碎屑流为主的重力流流体特征(图8f,g)。

岩心上可见块状构造和底部砂质注入体,微齿化箱形测井相,粒度累积概率曲线呈平缓的上拱形态,C-M图具有典型重力流特征。这些特征指示深水区砂体呈层流状态(冻结沉积)及底部高速剪切的流体动力学特征,是碎屑流沉积单元的典型识别标志^[19,22,27,29,58,60-61]。与前期碎屑流相比,该深水区碎屑流的泥质含量大幅下降,指示碎屑流长距离搬运后泥质随孔隙水排出,形成较为纯净的砂岩^[29,62-64]。这种以层流状态整体搬运的纯净流体被解释为砂质碎屑流,指示SQ21层序下陆坡区由砂质碎屑流主导。

4.2.5 盆底区“浊流作用过程”恢复

珠江组下段SQ21层序盆底区以海底扇沉积单元为主,岩性以灰色中-细砂岩和泥质细砂岩为主(图6g-j;图7e,f)。岩心上砂体呈块状构造或正韵律层理构造,每一期沉积底部均发育冲刷面,顶部被薄层深海泥岩覆盖。一期正韵律层理内部可见平行层理泥岩和水平层理砂岩,构成不完整鲍马序列Ta,Tb,Td和Te段,部分沉积单元内还可见泥岩撕裂屑、泥砾或泥质脉体(图7e,f)。

粒度分析表明,在C-M图上显示为平行于C=M的

悬浮搬运特征(图8g),粒径分布相对集中,代表分选和磨圆相对较好。岩心观察可见多期次、分选良好的块状砂体(图6g),顶部被薄层泥岩覆盖;砂体中发育两种泥砾:底部的小型密集泥砾和上部的大型稀疏泥砾;砂体底部发育冲刷面(图7e)。上述特征构成以Ta段和Te段为主的不完整鲍马序列,表明海底扇沉积主体多处于层流状态,流体强烈侵蚀下伏地层形成小型泥砾,小型泥砾经向上和向后运移汇聚而形成大型泥砾并以悬浮方式沉降,代表了海底扇内扇多期砂体与深海泥岩的叠置关系,为高密度浊流的典型沉积标志^[27,65-66]。中、外扇沉积的岩心特征与内扇存在显著差异:岩心上可见泥质脉体、相对发育的层理构造(图6h,i)、底部冲刷面(图6j)及顶部较厚的深水泥岩,整体表现为以Ta,Tb,Td和Te段为主的不完整鲍马序列(图7f),是低密度浊流的典型识别特征^[22,29,60,66-71]。

4.3 由洲到扇过程响应的控制因素与演化模式

白云凹陷北坡珠江组下段SQ21层序由陆架边缘三角洲到海底扇的过程响应受控于“坡折-地貌-流体”耦合作用(图5b)。整个过程体现了地形坡度控制下,流体流变性质由塑性向湍流态的系统转化,以及碎屑流和浊流分异沉积带来的陆坡与盆底区差异化沉积响应。

4.3.1 陆架坡折驱动“平坦外陆架区牵引流—陡倾上陆坡区滑动-滑塌”流体转换

平坦的外陆架区(平均坡度约 0.08°)(图5b)发育陆架边缘三角洲。当其越过陆架坡折后,上陆坡区地形坡度陡增至 0.70° ,在一定的触发机制下(如地震和海啸等使驱动力超过摩擦阻力),块体开始滑动。内部发育的剪切面及保留的三角洲沉积构造(图7c)表明滑块以非旋转平行移动的形式沿上陆坡滑动(对应图5a连续反射的沉积响应)。底部发育滑动面和砂质碎块等,指示滑块与底部下伏地层摩擦并侵蚀,同时与顶部环境水体摩擦,内部剪应力持续积累,促使滑块内部剪切塑性变形逐渐转化形成滑塌-碎屑流(使颗粒结构趋于紧实,孔隙压力开始积累,对应杂乱反射的沉积特征,如图5a)。

4.3.2 构造坡折驱动“中、上陆坡区滑动-滑塌-碎屑流—下陆坡区砂质碎屑流”流体转换

滑动砂体顺坡运移,经过下凹滑移面转化后进入中陆坡。此处坡度陡然下降至 0.25° (图5b),导致驱动力降低而摩擦力升高(对于一般弹塑性体而言,这会

使其减速)。然而,在中、下陆坡仍钻遇了碎屑流沉积单元(图6e,f;对应图5a中的连续反射),表明该区域流体发生了转化,使碎屑物质得以继续搬运至中、下陆坡。为此,本文引入孔隙压力模型来解释这一沉积转化过程。

中陆坡(图5b)坡度较缓的地形为孔隙流体压力的累积提供了有利条件,剪切作用引起的体积应变逐渐积累,并将压力传递至孔隙水,促使孔隙水压力上升。孔隙水压力的增加会导致有效正应力逐渐下降,从而降低摩擦阻力,且阻力下降的幅度远超驱动力衰减的幅度,使得滑塌体仍能维持运动。当有效正应力基本丧失时,沉积物达到临界状态,此时沉积物应力几乎全部由孔隙水承担(即黏土-水基质支撑),内聚力消失,剪切强度彻底丧失,发生流体转化,形成宾汉流体(即碎屑流)。这一过程基本在中陆坡完成(见图5b中的碎屑流沉积单元),而液化后的碎屑流具备远距离搬运能力,解释了为何滑塌-碎屑流能够越过平缓的中陆坡并抵达下陆坡(图5b)。在该位置的高泥质碎屑流沉积基本不发育沉积构造,内部可见“漂浮”泥质与砂质碎块,底部发育砂质注入体(图7c,d)。由此推断,其内部以层流性质为主(无剪切应力),而底部剪切应力强烈,指示其为砂-泥混杂的碎屑流沉积单元。

滑塌-碎屑流发生流体转化并越过中陆坡区(平均坡度约 0.25°)后,于构造坡折处遭遇地形坡度的陡增,下陆坡区坡度上升至 0.74° (图5b)。这一坡度变化导致驱动力增大,进而导致原本呈层流性质的碎屑流加速运动,流体顶部与水体的摩擦混杂作用增强,淘洗砂-泥混杂的碎屑流沉积,使泥质逐渐随流体运移排出,最终碎屑流转化为砂质碎屑流(图6e,f)。

4.3.3 沉积坡折驱动“中、下陆坡区碎屑流-砂质碎屑流—盆底区浊流”流体转换

陡倾的下陆坡(平均坡度约 0.74°)上,砂质碎屑流越过沉积坡折后,地形坡度陡然下降至 0.11° 。在盆底区观测到浊流沉积(图5a,楔状上超地震相),指示随着流体继续向盆底区运移,平缓的坡度会导致流体整体快速减速,被水体掺杂稀释,直至屈服强度完全消失,最终转化为湍流支撑的浊流。

早期形成的碎屑流沉积呈块状,内部发育大量泥砾,顶部被深水泥岩覆盖(图7e),对应鲍马序列的Ta段和Te段,指示高浓度浊流快速沉积形成块状构造(杂基支撑),并在与环境水体剧烈掺杂过程中,因滞留作用形成大量泥砾(图7e)。浊流沉积结束后,水动力

恢复平静,沉积了深水泥岩。

在盆底区还观测到发育鲍马序列Ta,Tb,Td和Te段的浊流沉积,并伴有大量泥质脉体。这指示高密度浊流在继续运移过程中发生自然稀释,能量逐渐衰减,水动力逐渐减弱,发育较完全的鲍马序列(图7f)。此外,浊流在遇到底辟时发生偏转甚至绕行(图4c),表明在滑水效应作用下,浊流具有较快的速度,能够被搬运至较远区域。

5 结论

1) 建立了珠江口盆地白云凹陷北坡珠江组下段SQ21层序的四分层序地层格架。通过井-震结合,以地震上连续整一面、钻井上稳定泥岩指示的凝缩层(代表基准面快速上升)所对应的最大海泛面为层序界面,在早中新世珠江组下段识别出SQ21层序,该层序在性质上相当于一个成因层序。在内部成功识别出3个关键体系域界面:最大海退面(标志基准面上升开始)、暴露不整合面(其最远顶超点代表强制海退终止)和强制海退起始面(其首个顶超点代表强制海退开始)。据此划分出4个体系域:HST,FST,LST和TST。

2) 识别了珠江口盆地白云凹陷北坡珠江组下段SQ21层序内发育的3种沉积单元:陆架边缘三角洲、块状搬运复合体和海底扇。陆架边缘三角洲具“顶超型前积地震相、反旋回测井曲线和片状平面高属性值”特征;块状搬运复合体具“连续-杂乱地震相、砂-泥互层测井曲线及平面呈片状、成群环绕陆架坡折的高属性值”特征;海底扇则具“楔状上超地震相、正旋回测井曲线、呈大范围低属性值、内部发育少量朵-叶状高属性值”特征,为盆底区的朵状或叶状富砂沉积单元。这3类深水沉积体系的识别为流体类型的辨识提供了重要依据。

3) 明确了珠江口盆地白云凹陷北坡珠江组下段SQ21层序内沉积单元流体类型与坡折发育的空间耦合关系。在珠江组下段SQ21层序内识别了陆架坡折、构造坡折和沉积坡折3阶坡折,并明确了在陆架坡折以上的外陆架区发育牵引流主导的陆架边缘三角洲;在陆架坡折以下、构造坡折以上发育滑动主导和滑塌-碎屑流主导的“中、上陆坡区块状搬运复合体”;在构造坡折以下的下陆坡区发育以砂质碎屑流主导的海底扇,在沉积坡折以下的盆底区发育由浊流主导的海底扇。

4) 明确了珠江口盆地白云凹陷北坡珠江组下段SQ21层序内的陆架边缘三角洲到海底扇的过程响应

受控于“坡折-地貌-流体”耦合作用。陆架边缘三角洲在外陆架边缘到上陆坡坡度陡增处因失稳发生滑动,由牵引流主导的陆架边缘三角洲转化为滑动主导的块状搬运复合体;块状搬运复合体在中、上陆坡区内因剪切作用转化为滑塌并积累孔隙压力;至中陆坡坡度减缓引发液化临界效应,使滑塌体转化为碎屑流;碎屑流越过构造坡折后坡度陡增,在下陆坡流体加速导致泥质析出,形成砂质碎屑流;砂质碎屑流越过沉积坡折后坡度陡降,在盆底区与水体混杂稀释形成高密度浊流,高密度浊流在进一步稀释下转化为低密度浊流。这一“地形控流”机制是深水砂体空间分异的根本原因。

致谢:本论文撰写得到了审稿人的悉心指导建议,对该文章的逻辑梳理具有重要指导意义,在此致以衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] BOUMA A H, KUENEN P H, SHEPARD F P. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962.
- [2] POSAMENTIER H W, ALLEN G P, JAMES D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: Concepts, examples, and exploration significance [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(11): 1687-1709.
- [3] POREBSKI 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.
- [4] POREBSKI S J, STEEL R J. Deltas and sea-level change [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(3): 390-403.
- [5] COVAULT J A, ROMANS B W, FILDANI A, et al. Rapid climatic signal propagation from source to sink in a southern California sediment-routing system [J]. The Journal of Geology, 2010, 118(3): 247-259.
- [6] SHANMUGAM G. Glossary: a supplement to “submarine fans: A critical retrospective (1950-2015)” in the journal of palaeogeography (2016, 5[2]) [J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 5(3): 258-277.
- [7] FISHER W L, GALLOWAY W E, STEEL R J, et al. Deep-water depositional systems supplied by shelf-incising submarine canyons: Recognition and significance in the geologic record [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 214: 103531.
- [8] 谈明轩, 吴峰, 马皓然, 等. 海底扇沉积相模式、沉积过程及其沉积记录的指示意义 [J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 435-449.
- [9] TAN Mingxuan, WU Feng, MA Haoran, et al. Facies model, sedimentary process and depositional record of submarine Fans, and their implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 435-449.
- [10] 徐长贵, 龚承林. 从层序地层走向源-汇系统的储层预测之路 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 521-538.
- [11] XU Changgui, GONG Chenglin. Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 521-538.
- [12] TANG Wu, XIE Xiaojun, XIONG Lianqiao, et al. Coupling relationship and genetic mechanisms of shelf-edge delta and deep-water fan source-to-sink: A case study in Paleogene Zhuhai Formation in South subsag of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 589-603.
- [13] 龚承林, 齐昆, 徐杰, 等. 深水源-汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制 [J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 231-252.
- [14] GONG Chenglin, QI Kun, XU Jie, et al. Process-product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi-scale climate changes [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 231-252.
- [15] 龚承林, 徐长贵, 尤丽, 等. 深海重力流与底流交互作用的沉积响应及其勘探意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(4): 721-733, 687.
- [16] GONG Chenglin, XU Changgui, YOU Li, et al. Depositional responses of the interaction between deep-marine gravity and bottom currents and their exploration significance [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024, 43(4): 721-733, 687.
- [17] GONG Chenglin, STEEL R J, WANG Yingmin, 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.
- [18] GONG Chenglin, BLUM M D, WANG Yingmin, et al. Can climatic signals be discerned in a deep-water sink?: An answer from the Pearl River source-to-sink sediment-routing system [J]. GSA Bulletin, 2018, 130(3/4): 661-677.
- [19] GONG Chenglin, LI Dongwei, STEEL R J, et al. Delta-to-fan source-to-sink coupling as a fundamental control on the delivery of coarse clastics to deepwater: Insights from stratigraphic forward modelling [J]. Basin Research, 2021, 33(6): 2960-2983.
- [20] CHANDRA J, PAUMARD V, SHEPHERD J W, et al. Variability of shelf-edge processes and linked deep-water systems in an underfilled rift basin with structural inheritance (Porcupine Basin, offshore Ireland) [J]. Earth-Science Reviews, 2025, 270: 105224.
- [21] WALKER R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(6): 932-966.
- [22] READING H G, RICHARDS M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(5): 792-822.
- [23] SHANMUGAM G, LEHTONEN L R, STRAUME T, et al. Slump and debris-flow dominated upper slope facies in the Cretaceous of the Norwegian and Northern North Seas (61-67°N): Implications

- for sand distribution [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78 (6): 910-937.
- [20] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J W. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 125: 244-287.
- [21] SHEPHERD J W, PAUMARD V, LANG S, et al. Investigating relationships between shoreline process regime, shelf-margin architecture, and deep-water sand delivery: Insights from the early post-rift Hammerhead shelf margin (Bight Basin, southern Australia)[J]. Gondwana Research, 2024, 135: 208-233.
- [22] SHANMUGAM G. New perspectives on deep-water sandstones: Implications[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 316-324.
- [23] DOTT R H. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes[J]. AAPG Bulletin, 1963, 47(1): 104-128.
- [24] SHANMUGAM G. Chapter 2-mass transport: Slides, slumps, and debris flows[M]//SHANMUGAM G. Mass Transport, Gravity Flows, and Bottom Currents. Amsterdam: Elsevier, 2021: 7-88.
- [25] HE Min, ZHONG Guangfa, LIU Xuefeng, et al. Rapid post-rift tectonic subsidence events in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea margin [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 147: 271-283.
- [26] YANG Tian, CAO Yingchang, LIU Keyu, et al. Genesis and depositional model of subaqueous sediment gravity-flow deposits in a lacustrine rift basin as exemplified by the Eocene Shahejie Formation in the Jiyang Depression, Eastern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 231-257.
- [27] 鲜本忠, 安思奇, 施文华. 水下碎屑流沉积: 深水沉积研究热点与进展[J]. 地质论评, 2014, 60(1): 39-51.
XIAN Benzong, AN Siqi, SHI Wenhua. Subaqueous debris flow: Hotspots and advances of deep-water sedimentation [J]. Geological Review, 2014, 60(1): 39-51.
- [28] NIU Xiaobing, YANG Tian, CAO Yingchang, et al. Characteristics and formation mechanisms of gravity-flow deposits in a lacustrine depression basin: Examples from the Late Triassic Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Ordos Basin, Central China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 148: 106048.
- [29] YANG Tian, SUN Haonan, CAO Yingchang, et al. Gravel-inlaid mud clasts as indicators of transport processes of subaqueous sediment gravity-flows [J]. Sedimentary Geology, 2024, 472: 106741.
- [30] 庞雄, 陈长民, 施和生, 等. 相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 167-177.
PANG Xiong, CHEN Changmin, SHI Hesheng, et al. Response between relative sea-level change and the Pearl River deep-water fan system in the South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 167-177.
- [31] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 145-151.
- PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications[J]. Geological Review, 2007, 53(2): 145-151.
- [32] 吴景富, 徐强, 祝彦贺. 南海白云凹陷深水区渐新世-中新世陆架边缘三角洲形成及演化[J]. 地球科学, 2010, 35(4): 681-690.
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, 2010, 35(4): 681-690.
- [33] 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.
- [34] WANG Guangzeng, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Cenozoic source-to-sink driven by tectono-geomorphic evolution: A systematic detrital zircon U-Pb analysis in the central northern South China Sea [J]. Earth-Science Reviews, 2023, 239: 104365.
- [35] LIN Changsong, JIANG Jing, SHI Hesheng, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: Responses to tectonic processes and changes in sea level [J]. Basin Research, 2018, 30 (S1): 568-595.
- [36] 林畅松, 施和生, 李浩, 等. 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[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3407-3422.
LIN Changsong, SHI Hesheng, LI Hao, et al. Sequence architecture, depositional evolution and controlling processes of continental slope in Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3407-3422.
- [37] 刘军, 柳保军, 谢世文, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带珠江组岩性圈闭发育条件与天然气勘探前景[J]. 天然气工业, 2025, 45(6): 78-87.
LIU Jun, LIU Baojun, XIE Shiwen, et al. Development conditions and natural gas exploration prospects of Zhujiang lithologic traps in the central diapir zone of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(6): 78-87.
- [38] BARCKHAUSEN U, ENGELS M, FRANKE D, et al. Evolution of the South China Sea: Revised ages for breakup and seafloor spreading [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58 (Part B): 599-611.
- [39] LI Chunfeng, XU Xing, LIN Jian, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. Geochemistry

- Geophysics Geosystems, 2014, 15(12): 4958–4983.
- [40] GONG Chenglin, WANG Yingmin, ZHU Weilin, et al. Upper Miocene to Quaternary unidirectionally migrating deep-water channels in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 285–308.
- [41] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 17–332.
- [42] 龚承林, STEEL R J, 彭畅, 等. 深海碎屑岩层序地层学50年(1970—2020)重要进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 292–318. GONG Chenglin, STEEL R J, PENG Yang, et al. Major advances in deep-marine siliciclastic sequence stratigraphy, 1970 to 2020 [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40 (2) : 292–318.
- [43] HUNT D, TUCKER M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level' fall [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1/2): 1–9.
- [44] POSARNENTIER H W, ALLEN G P. Siliciclastic sequence stratigraphy—Concepts and applications [M]. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1999: 210.
- [45] GALLOWAY W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(2): 125–142.
- [46] SYLVESTER Z, DEPTUCK M E, PRATHER B E, et al. Seismic stratigraphy of a shelf-edge delta and linked submarine channels in the northeastern Gulf of Mexico [M]//PRATHER B E, DEPTUCK M E, MOHRIG D, et al. Application of the Principles of Seismic Geomorphology to Continental Slope and Base-of-Slope Systems: Case Studies from SeaFloor and Near-Sea Floor Analogues. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2012: 31–59.
- [47] LAUGIER F J, PLINK-BJÖRKLUND P. Defining the shelf edge and the three-dimensional shelf edge to slope facies variability in shelf-edge deltas[J]. Sedimentology, 2016, 63(5): 1280–1320.
- [48] MOSCARDELLI L, WOOD L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad [J]. Basin Research, 2008, 20(1): 73–98.
- [49] ZHOU Yongsheng, WU Wei, FENG Jianwei, et al. Mechanism and controlling factors of mass transport complexes migration: A case study of the mass transport complexes in the Taranaki deep water basin, New Zealand [J]. Geomorphology, 2024, 467: 109464.
- [50] 龚承林, 朱一杰, 邵大力, 等. 海底扇规模优质储集体的分布模式与成因分析——以上新世—更新世孟加拉扇为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 1–17, 341. GONG Chenglin, ZHU Yijie, SHAO Dali, et al. Distribution patterns and genetic analyses of potentially productive good deep-water reservoirs: A case study from the Pliocene-Pleistocene Bengal fan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 1–17, 341.
- [51] XU Qiang, YANG Wenjie, WEN Long, et al. Controlling effects of the Mid-Permian multistage slope-break zones on paleogeomorphology and large-scale shoals in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52 (4): 952–967.
- [52] 唐武, 谢晓军, 熊连桥, 等. 陆架边缘三角洲—深水扇源汇耦合关系及成因机制——以珠江口盆地白云南洼古近系珠海组为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(3): 513–525. TANG Wu, XIE Xiaojun, XIONG Lianqiao, et al. Coupling relationship and genetic mechanisms of shelf-edge delta and deep-water fan source-to-sink: A case study in Paleogene Zhuhai Formation in South subsag of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 513–525.
- [53] MAHANTA A, BANERJEE S, CHAKRABARTY S. Depositional architecture of the tide-dominated late Oligocene hydrocarbon reservoirs in the Tapti-Daman Block, Mumbai Offshore Basin, India[J]. Marine and Petroleum Geology, 2024, 167: 106979.
- [54] OLIVERO E B, MALUMIÁN N. Mesozoic-Cenozoic stratigraphy of the Fuegian Andes, Argentina [J]. Geologica Acta, 2008, 6 (1): 5–18.
- [55] MARTINEZ T, DESCHAMPS R, AMOROSI A, et al. Holocene stratigraphic architecture of a Mediterranean delta and implication for sediment budget evolution: Example of the Rhône delta [J]. Sedimentary Geology, 2024, 462: 106574.
- [56] VARNES D J. Slope movement types and processes [R]// Landslides: Analysis and Control: TRB Special Report 176. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1978: 11–33.
- [57] MOSCARDELLI L, WOOD L, MANN P. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90 (7) : 1059–1088.
- [58] 李相博, 刘化清, 张忠义, 等. 深水块状砂岩碎屑流成因的直接证据: “泥包砾”结构——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组研究为例[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 611–622. LI Xiangbo, LIU Huaqing, ZHANG Zhongyi, et al. “Argillaceous parcel” Structure: A direct evidence of debris flow origin of deep-water massive sandstone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 611–622.
- [59] 李相博, 刘化清, 杨伟伟, 等. 一个由于干湿交替极端气候事件主导的内陆湖盆: 来自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组露头剖面的沉积学证据[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 293–316. LI Xiangbo, LIU Huaqing, YANG Weiwei, et al. A lacustrine basin driven by extreme events of alternate dry-wet climatic cycles: Evidence from outcrops of Yanchang Formation in Upper Triassic, Ordos Basin [J]. Earth Science, 2023, 48 (1) : 293–316.
- [60] TINTERRI R, CIVA A, LAPORTA M, et al. Chapter 17-Turbidites and turbidity currents [M]//SCARSELLI N, ADAM J, CHIARELLA D, et al. Regional Geology and Tectonics. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2020: 441–479.
- [61] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机

- 制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1065–1075.
- ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065–1075.
- [62] 李怡哲. 海底滑坡碎屑流-浊流转化过程力学机制及致灾机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2023.
- LI Yizhe. The mechanical mechanism from debris flow to turbidity currents in submarine landslide and disaster causing mechanism [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2023.
- [63] 窦鲁星, 张昌民, 张莉, 等. 过渡型流体转换对洪水型重力流沉积研究的启示及地质意义[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1952–1966.
- DOU Luxing, ZHANG Changmin, ZHANG Li, et al. Transitional flow transformation mechanism: Implication for hyperpycnal flow sedimentary research and geological significance [J]. *Geological Review*, 2023, 69(5): 1952–1966.
- [64] 章诚诚, 方朝刚, 刘桃, 等. 沉积盆地洪水异重流研究进展[J]. 华东地质, 2024, 45(1): 49–61.
- ZHANG Chengcheng, FANG Chaogang, LIU Tao, et al. Research progress on flood-triggered hyperpycnal flows in sedimentary basins [J]. *East China Geology*, 2024, 45(1): 49–61.
- [65] LIAO Jianbo, XI Aihua, LI Zhiyong, et al. Microscopic characterization and formation mechanisms of deep-water sandy-debris-flow and turbidity-current sandstones in a lacustrine basin: A case study in the Yanchang Formation of the Ordos Basin, China [J]. *Petroleum Science*, 2018, 15(1): 28–40.
- [66] SHAN Xin, YU Xinghe, JIN Lina, et al. Bed type and flow mechanism of deep water sub-lacustrine fan fringe facies: An example from the Middle Permian Lucaogou Formation in Southern Junggar Basin of NW China[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(2): 339–361.
- [67] 陈伟涛, 赵靖舟, 高振东, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长7—长9油层组深水重力流沉积特征及含油性[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1466–1484.
- CHEN Weitao, ZHAO Jingzhou, GAO Zhendong, et al. Characteristics and oil-bearing properties of deep-water gravity-flow deposits in the 7th–9th oil groups of the Yanchang Formation, Zhidan area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(5): 1466–1484.
- [68] 袁静, 赵广昊, 景安语, 等. 埕岛-桩海地区断陷湖盆不同触发机制深水重力流成因扇体沉积特征及其差异[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(1): 1–13.
- YUAN Jing, ZHAO Guanghao, JING Anyu, et al. Sedimentary characteristics and differences of deep-water gravity flow fans with different triggering mechanisms in continental faulted basin in Chengdao-Zhuanghai area [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(1): 1–13.
- [69] 王琳茜, 赵靖舟, 高振东, 等. 深水重力流沉积类型及含油性对比——以鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长7—长9油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1504–1521.
- WANG Linqian, ZHAO Jingzhou, GAO Zhendong, et al. Types of deep-water gravity-flow deposits and comparison of their oil-bearing properties: A case study of the 7th–9th oil groups in the Triassic Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(5): 1504–1521.
- [70] 谈明轩, 袁赛赛, 陈绵培, 等. 西秦岭洮河盆地上三叠统窄陆架型海底扇发育特征与运移机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 894–909.
- TAN Mingxuan, YUAN Saisai, CHEN Mianpei, et al. Developmental characteristics and transport mechanisms of the Upper Triassic submarine fans controlled by narrow shelf in the Taohe Basin, West Qinling Orogenic Belt[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(3): 894–909.
- [71] 杨宏宇, 胡明毅, 蔡全升, 等. 琼东南盆地乐东北坡梅山组海底扇沉积特征及沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 550–566.
- YANG Hongyu, HU Mingyi, CAI Quansheng, et al. Sedimentary characteristics and models of submarine fans in the Meishan Formation on the north slope of the Ledong Sag, Qiongdongnan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(2): 550–566.

(编辑 董奕含)