



南海北部陆架早—中中新世古珠江河道发育特征及汇流冲刷模式

林理娥, 卓海腾, 冯 进, 李智高, 苏 明, 王英民, 雷亚平, 林智轩, 杨荣南

Seismic sedimentary characteristics of the Ancient Pearl River system and its depositional model of confluence scours, northern shelf of the South China Sea in Early-Mid Miocene

LIN Li'e, ZHUO Haiteng, FENG Jin, LI Zhigao, SU Ming, WANG Yingmin, LEI Yaping, LIN Zhixuan, and YANG Rongnan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022090601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90



关注微信公众号，获得更多资讯信息

林理娥, 卓海腾, 冯进, 等. 南海北部陆架早—中中新世古珠江河道发育特征及汇流冲刷模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 31-44.
LIN Li'e, ZHUO Haiteng, FENG Jin, et al. Seismic sedimentary characteristics of the Ancient Pearl River system and its depositional model of confluence scours, northern shelf of the South China Sea in Early-Mid Miocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 31-44.

南海北部陆架早—中中新世古珠江河道发育特征及 汇流冲刷模式

林理娥¹, 卓海腾¹, 冯进², 李智高², 苏明¹, 王英民³, 雷亚平¹, 林智轩¹, 杨荣南¹

1. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082

2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054

3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要:河道体系是侵蚀和沉积物搬运的重要通道, 控制了大陆边缘源汇体系中砂体总体的输送和分布格局, 并可有效指示古代构造活动、物源供给、气候变迁和海平面变化等丰富地质信息。研究基于高分辨率的三维地震、钻测井资料, 结合层序划分方法和地震沉积学综合分析手段, 揭示了南海北部珠一坳陷早—中中新世古珠江分流河道体系的类型和展布特征, 并且以典型层序为例精细揭示了海平面变化控制下河道类型由辫状向曲流的转换。同时, 在研究区地震剖面上识别到多处异常下切现象, 经研究可解释为辫状河道内的汇流冲刷, 其典型特征为: ① 下切深度局部增大; ② 平面近似圆形或椭圆形; ③ 内部为砂质充填。虽然汇流冲刷结构在地震剖面特征上与“传统”意义的下切谷极易混淆, 但在沉积特征和成因上存在较大差别, 因此, 对它的识别有助于避免层序界面的错误判别, 并且其后期充填的河道砂体具有局限分布的特点, 易于在后期海侵泥岩的覆盖下形成潜在的岩性圈闭新类型。

关键词:辫状河道; 曲流河道; 汇流冲刷; 下切谷; 珠江口盆地

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022090601

Seismic sedimentary characteristics of the Ancient Pearl River system and its depositional model of confluence scours, northern shelf of the South China Sea in Early-Mid Miocene

LIN Li'e¹, ZHUO Haiteng¹, FENG Jin², LI Zhigao², SU Ming¹, WANG Yingmin³, LEI Yaping¹, LIN Zhixuan¹, YANG Rongnan¹

1. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China

2. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen 518054, China

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

Abstract: The river channel system is an important passage for erosion and sediment transport, which controls the overall transport and distribution pattern of sand bodies in the source-sink system of the continental margin, which indicates effectively the tectonic subsidence, sediment supply, climate change, and sea level change of the ancient sedimentary environment. Based on the high-resolution 3D seismic data, well logging and coring data, the types and distributions of the fluvial system in the Early-Mid Miocene of the Zhu I Depression in the ancient Pearl River Delta, northern South China Sea were studied in combination of the classification of the sequence stratigraphy and comprehensive seismic-sedimentary analysis. Furthermore, representative sequences were used to analyze the transition mechanism of fluvial types controlled by sea-level change. Abnormal incisions in large numbers were identified from the high-resolution seismic profiles of the study area, which can be interpreted as confluence scour in a braided channel. The typical characteristics are as follows: (1) showing local increase of cutting depth; (2) being approximately circular or elliptical in plan view; and (3) the interior being filled with sand. Although the confluence scour structure is easily confused with the incised valley in seismic profile, it is quite different in sedimentary characteristics and genesis. Therefore, the identification of confluence scour could help avoid wrong interpretation of sequence boundary, and they are filled with sediments carried by

资助项目:广东省自然科学基金“南海珠江口陆坡区上新世以来富砂质深水沉积体系及其水合物储层潜力”(2019A151501078); 中海石油(中国)有限公司科研项目“珠江口盆地(东部)浅水区早-中中新世精细沉积相及多成因岩性圈闭潜力”(CCL2021SZPS0113); 国家自然科学基金“南海珠江口陆架区第四纪高精度层序地层构型、时空差异及控制因素”(41706050)

作者简介:林理娥(1999—), 女, 硕士研究生, 海洋地质专业, E-mail: linle3@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:卓海腾(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事层序地层学、沉积学和海洋地质学的教学和科研工作, E-mail: zhuoht3@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2022-09-06; **改回日期:**2022-10-10. 周立君编辑

later fluvial channels, which is easy to form a new type of potential lithologic trap under the cover of the later transgressive mudstone. The confluence scours facilitated the access to the reservoirs and connected the stacked fluvial sandstones, which effectively enhanced the internal connectivity of sandstone reservoirs.

Key words: braided river; meandering river; confluence scour; incised valley; the Pearl River Delta

三角洲沉积体系是河流沉积物搬运和卸载沉积的重要区域^[1]。现代珠江三角洲河网系统极为发育,是现今南海北部陆缘最重要的沉积物源之一,直接控制了南海北部陆缘中央区砂体输送和沉积演化格局^[2]。相比而言,受限于资料类型和精度,针对古代珠江三角洲的研究难度较大。早—中中新世时期,南海发生了多次海平面的升降,古珠江三角洲沉积体系也因此产生多期次的迁移和摆动,其沉积物记录了南海的海平面变化和滨线的迁移轨迹^[3]。很多学者从层序地层、沉积特征和控制因素等方面对南海北部珠江古河道体系和古三角洲沉积体系进行了丰富的研究^[3-7],但受限于资料条件,直观揭示珠江古河道体系的研究仍然相对较少。自 20 世纪以来,河道体系的分类研究是沉积学领域的持续研究热点之一,而下切型河道(下切谷)和非下切型河道的识别和区分问题是河道分类研究中的难点问题^[8-9]。研究发现河道的下切作用受到自旋回过程和异旋回过程的影响^[10-11]。近年来,在辫状河道中识别到一种普遍的侵蚀冲刷现象^[12],其中发育在河流汇流处的冲刷具有下切深度局部增大、侵蚀面分布广等特征^[13],其沉积表现易于与下切谷混淆,在野外露头 and 地震剖面等资料中都表现出与下切谷相似的特征^[14],而目前对汇流冲刷与下切谷准确判别尚未有系统的标准。

本研究通过对珠江口盆地珠一坳陷研究区高分辨率的 3D 地震资料、测井数据和岩芯数据进行详细的分析,运用层序地层学的相关理论知识^[15]和地层切片、属性提取等地震沉积学技术^[16],以 Gibling 的河道分类标准^[8]为依据对早—中中新世珠江古河道类型进行了分类,并讨论河道类型发生转换的控制因素。同时,在研究区发育的辫状河道体系中识别到许多异常的下切现象,研究利用多类型资料针对其开展了系统剖析,并建立了其与下切谷的区分标志。本研究相关结论对深入理解辫状河沉积过程具有一定意义,并对古珠江三角洲优质砂体预测和岩芯圈闭勘探具有启示价值。

1 区域地质背景

研究区主要位于南海北部陆缘珠江口盆地(图 1)。珠江口盆地地处华南大陆板块的南部,面积约为 17.5 万 km²,是欧亚板块、太平洋板块和印度洋板块的交汇处。在不同的历史时期,印度洋板块和欧亚板块碰撞挤压及太平洋板块俯冲均对珠江口造成影响,使珠江口盆地拥有独特的构造格局和构造演化历史。盆地总体展布为北东—南西向,受北东向断裂带的控制和分割,盆地总体构造呈现“三隆两坳”的基本格局^[17]。本次研究区域主要分

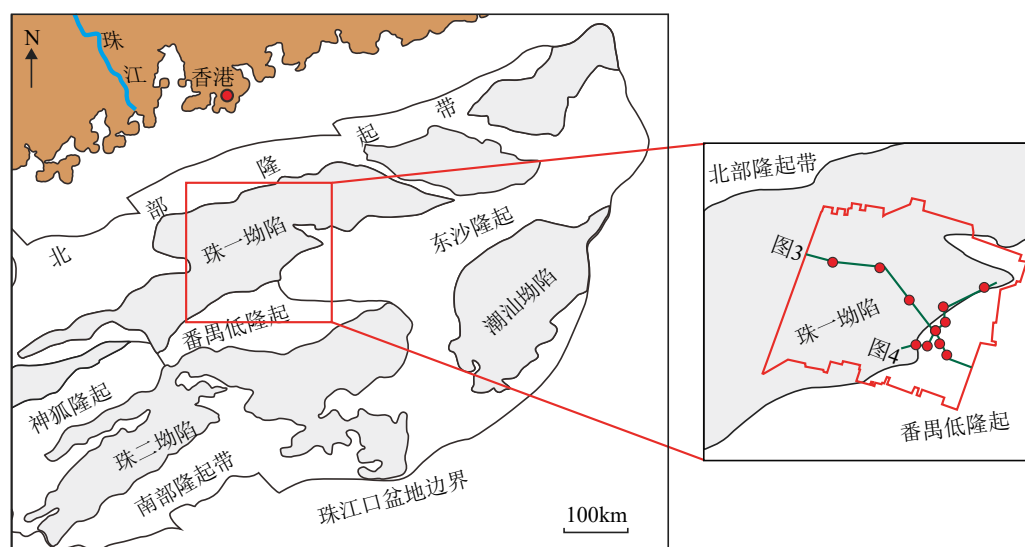


图 1 珠江口盆地珠一坳陷构造区划图^[3]

Fig.1 Tectonic setting of the Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin on the northern South China Sea and the study area

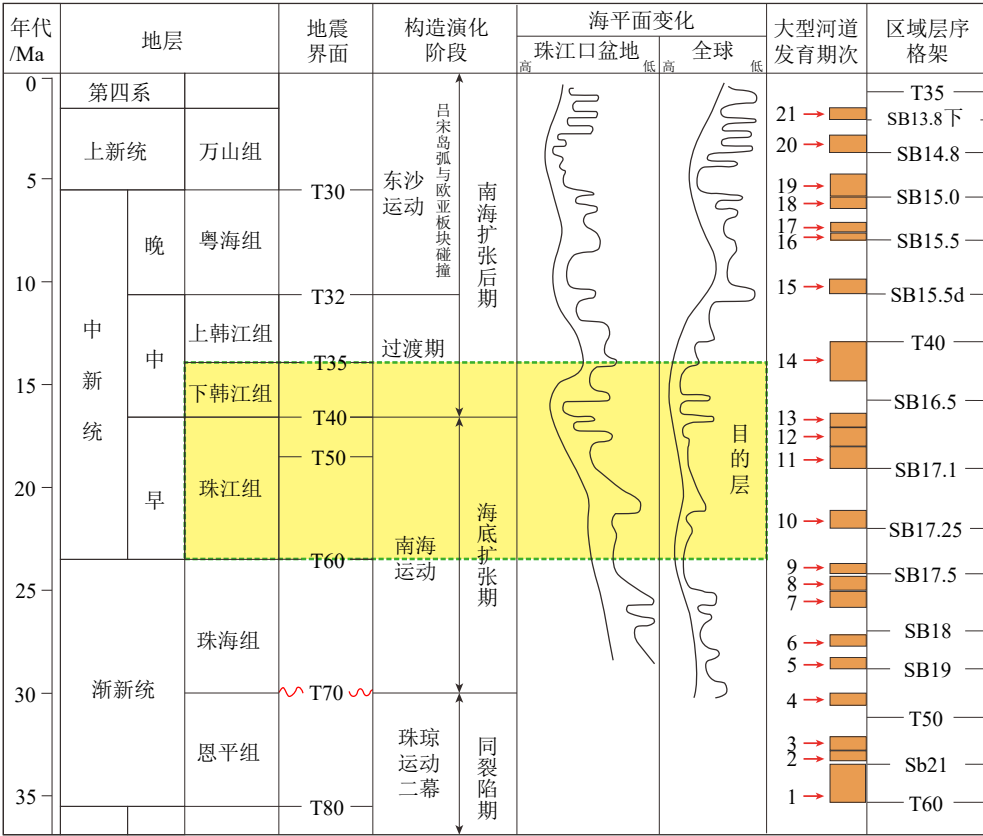


图 2 珠江口盆地珠一坳陷地层柱状图^[2]

Fig.2 Seismic-stratigraphy correlation and geological evolution of the Pearl River Mouth basin

布于珠一坳陷(图 1), 三维地震工区总面积为 4800 km², 主要目的层位集中于 T60-T35(早—中中新世)(图 2)。

2 数据和方法

利用岩芯、测井和三维地震数据, 运用地震沉积学的方法^[18]进行古河道体系沉积特征及演化研究, 揭示其主要控制因素。三维地震工区位置如图 1 所示, 地震资料采样率为 2 ms, 主频约为 40 Hz。地震沉积学技术识别古河道是目前较为先进的手段, 相关技术手段在本次研究中也得到了充分运用^[19], 主要包括地层切片、地震属性提取、频谱分解和 RGB 融合等。在地震切片制作方面, 本次主要运用 PaleoScan 全三维自动解释软件通过建模生成, 优选 19、35、60 Hz 3 个频率对地震资料进行频谱分解, 再采用 RGB 融合技术进行处理。经过上述过程, 地震切片对河道体系具有了较为良好的成像效果, 并且融合切片的颜色和亮度也与砂岩性质有明显关联, 包括砂体厚度和储层质量等^[19-20]。本研究以此为依据对古河道沉积特征进行识别、刻画。

3 结果

3.1 区域层序地层格架

基于传统的层序地层划分方法和高分辨率三维地震资料开展层序地层界面识别, 通过识别明显的地震反射接触关系或者根据岩芯和测井曲线的突变等, 在研究区确定了 16 个关键层序界面(图 3), 并进行区域追踪, 建立了高精度的地震层序格架。此外, 基于最新的层序地层学理论进展, 引入了最大海退面(Maximum Regressive Surface, 简称 MRS)和最大海泛面(Maximum Flooding Surface, 简称 MFS)^[21], 进一步精细划分了体系域界面, 进而建立了区域高精度层序地层格架(图 4)。

在地震剖面上, 层序界面主要表现为强振幅、高连续性反射, 其重要识别特征为可见明显的河道下切, 如 SB17.1 在 X33-2 和 X34-1 井之间发育明显下切侵蚀(图 3); 在测井曲线上, 层序界面主要表现为具有箱状或钟状低 GR 曲线特征的厚层砂岩底部。与层序界面相比, 最大海退面和最大海泛面的测井响应具有明显不同: MRS 界面之上 GR 值逐渐

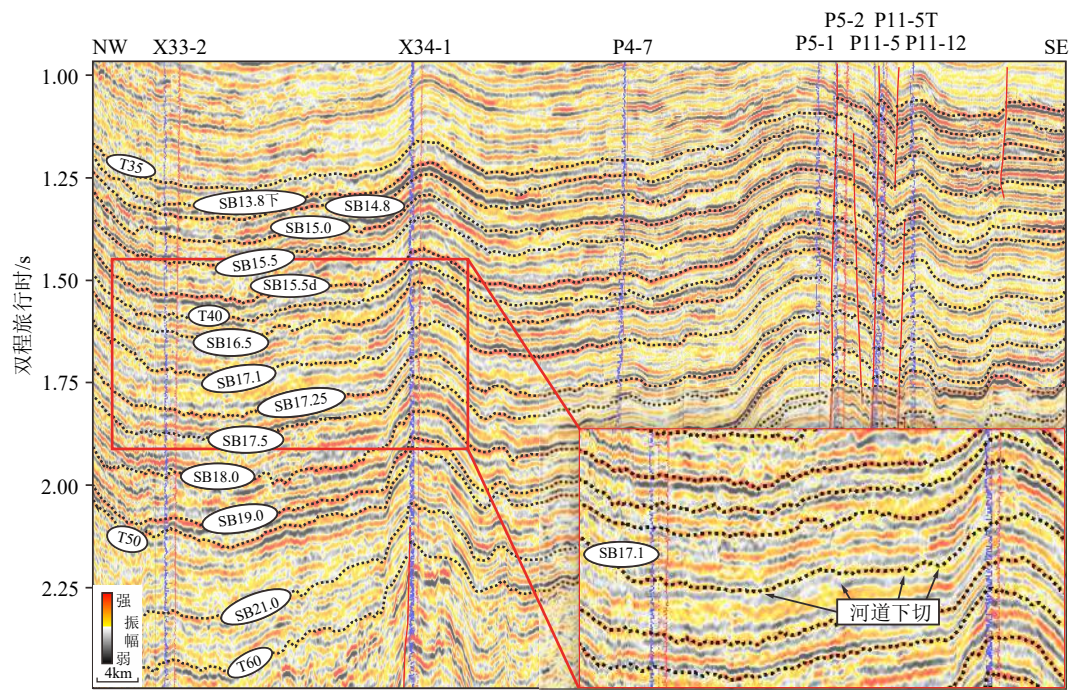


图 3 研究区 NW-SE 向地震剖面图及其层序地层界面划分
剖面位置见图 1。

Fig.3 Seismic profile in NW-SE direction of the study area and its stratigraphic framework of sequence division
See location in Fig. 1

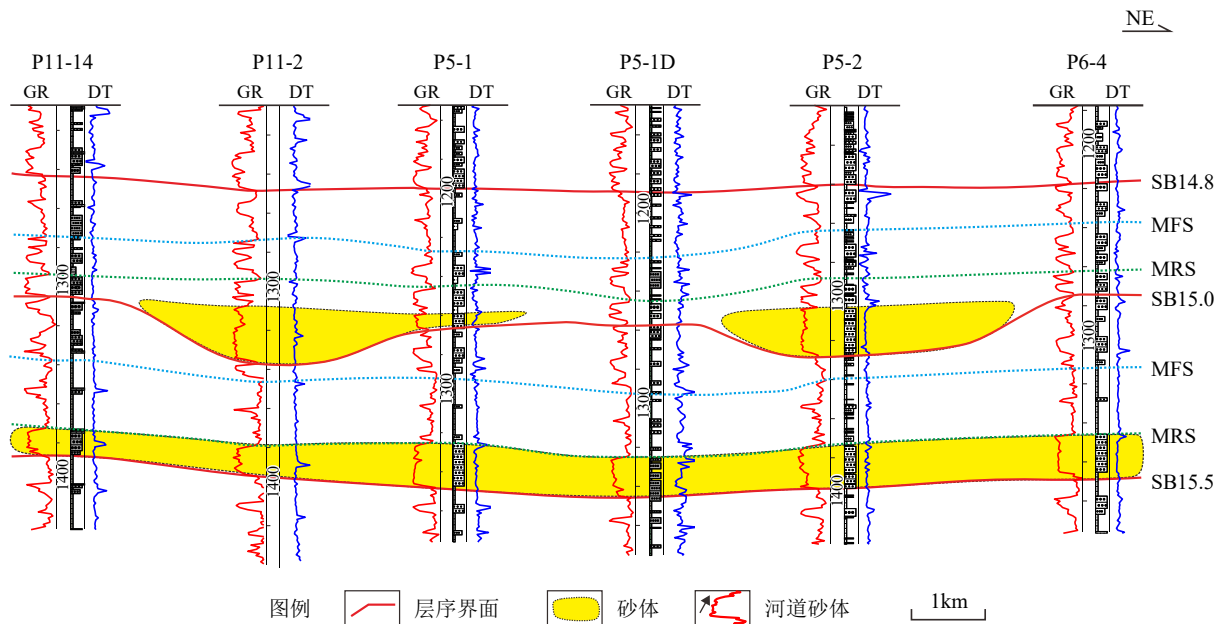


图 4 珠一坳陷 NE-SW 向早—中新世的连井剖面图
测线位置如图 1。

Fig.4 NE-SW Early-Middle Miocene stratigraphic correlation of key wells in Zhu I Depression
See location in Fig. 1

增大, 沉积物岩性逐渐变细, 表现为海侵的特征; MFS 则通常为层序中 GR 值最大的界面, 沉积物粒度最小, 界面之上 GR 值减小, 为海侵转换为海退的界面(图 4)。

在研究区的岩芯数据中, 以 P5-1D 井为例, 取芯段处层序界面之上为分流河道相, 沉积物主要为中-粗粒砂岩, 含有砾石和碳质碎屑, 也有河道冲刷面, 分选和磨圆度较差; 层序界面之下为分流间湾沉积

相, 沉积物粒度相对较细, 主要为灰色粉砂岩或粉砂质泥岩, 含泥岩夹层。此外 P10-2D 井取芯段为搬运距离较远的河口坝沉积相, 沉积物粒度相对分流河道较细, 主要为灰白色中-细砂岩, 粒度呈现自下而上逐渐变粗的反韵律, 含较多生物碎屑(图 5)。

3.2 古珠江河道体系地震沉积特征

响应于全球海平面变化, 陆架古河道体系的空间叠置样式和切割关系及发育规模等都发生了周期性变化^[22]。早—中中新世南海北部陆架经历了多次区域性海平面升降活动的改造, 古珠江发育了多期次大、中、小型河道, 河道的类型和展布规律在时间和空间上具有很大差异, 但由于中中新统珠江古河道埋藏时间较久, 地震资料的分辨率相对有限, 本次研究基于 Gibling 对河道的分类方式^[8], 根据古河道的地震沉积特征及其发育规模识别出了

大型辫状河道、中型河道和小型曲流河道三种河流类型(表 1), 并揭示了其在分频 RGB 融合切片、均方根(RMS)振幅属性切片上的展布特征。

3.2.1 大型辫状分流河道

河道体系是三角洲平原上最重要的砂质沉积相带, 不仅发育了较好的储集层砂体, 而且由于其规模大, 相对于小型河道, 大型的主河道是整个三角洲体系内最为快速高效的砂体运输通道。但识别大型河道的类型需要多方面的证据相互印证, 在 RGB 融合切片上可以看到多期大规模的辫状河道体系(图 6)。

值得注意的是, 由于保存条件的限制, 利用地震资料直接揭示大型辫状河道的研究较少, 因此单靠地震资料尚不足以完全证实大型辫状河的存在^[23], 需要通过地震地貌学与现代沉积地貌的类比、测井资料、岩芯资料等多个方面相互结合识别证明。辫

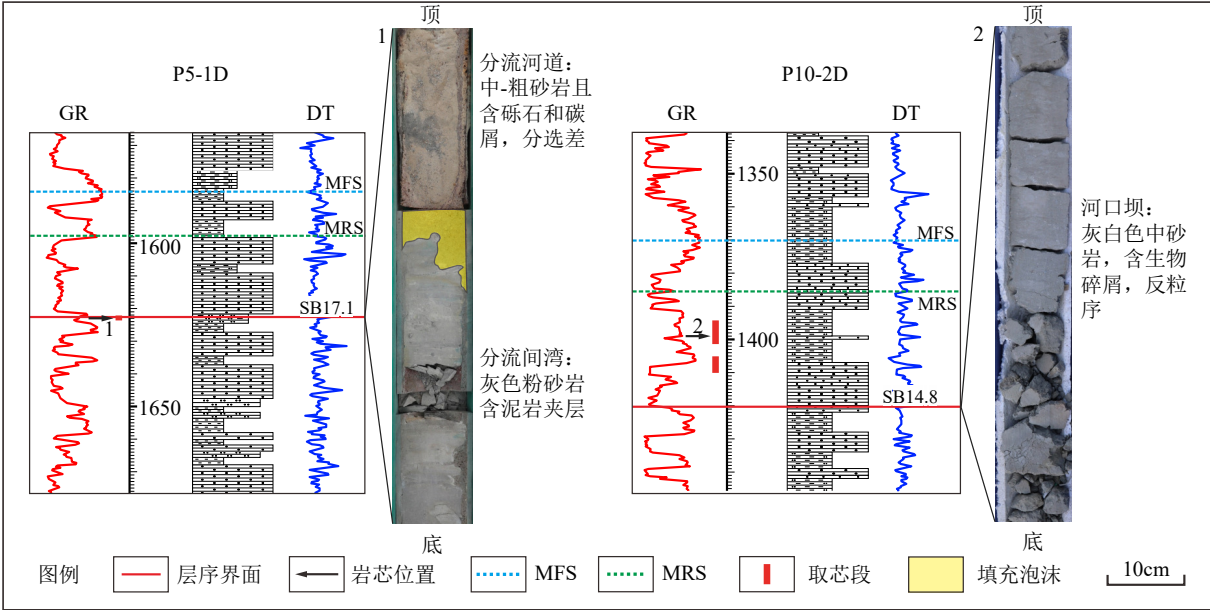


图 5 研究区不同沉积相的岩芯照片
1 代表分流河道和分流间湾沉积, 中间具有分界面(对应切片位置见图 6a, 取芯深度为 1 622.73~1 623.60 m); 2 代表河口坝沉积(对应切片位置见图 9a, 取芯深度为 1 398.50~1 399.25 m)。

Fig.5 Core photos of different depositional facies in the study area

1- braided distributary channel deposits and interdistributary bay deposits of fluvial system (see location of core in Fig.6a, borehole P5-1D in 1 622.73~1 623.60 m depth); 2- estuary dam deposits of the fluvial system (see location of core in Fig.9a, borehole P10-2D in 1 398.50~1 399.25 m depth).

表 1 河道体系类型的划分
Table 1 Classification of the river system types

河道类型	河流宽度	弯曲度	地震反射特征	地震地貌特征
大型辫状分流河道	平均宽度>10 km 最大宽度可达30 km	较低	强-中振幅、好-中等连续、 平行-亚平行反射	内部河道交切明显, 呈现“辫状”
中型河道	0.5~7 km	中等	强-中振幅、中等连续性	辫状河道体系末端分支河; 下切谷: 延伸较远且地震剖面见明显下切
小型曲流河道	100~300 m	较高	单点状的强振幅且连续性较好	单支河道孤立发育

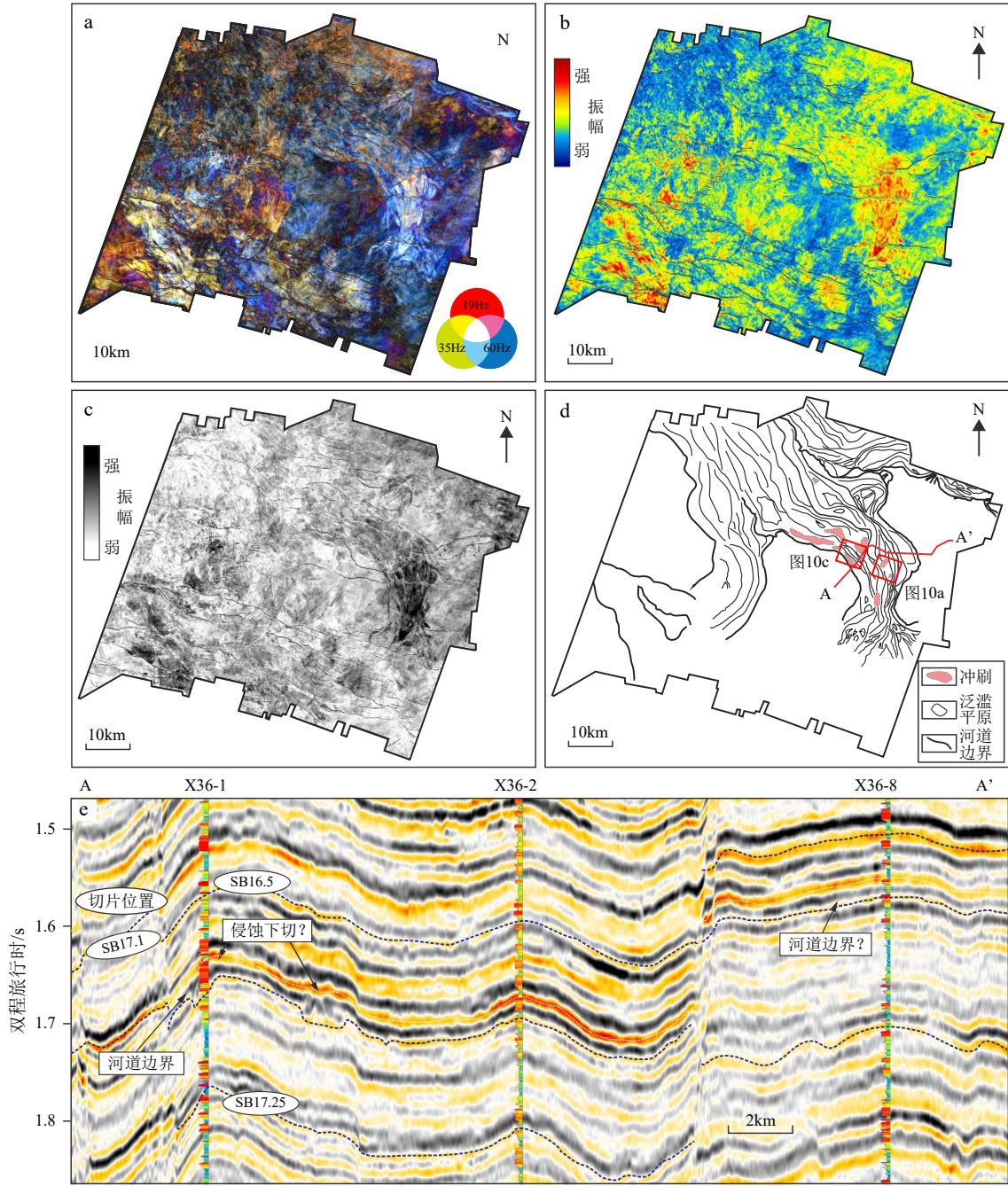


图 6 层序 SQ17.1 低位体系域发育的大型辫状河道体系
a. RGB 融合属性地层切片, b. RMS 均方根振幅属性地层切片, c. 最小值振幅属性地层切片, d. 河道素描图, e. 测线 A-A'地震剖面。
测线位置见图 6d。

Fig.6 Trunk channels developed in the LST of SQ17.1 in large braided river system

a: RGB color blending stratal slice; b: root-mean square (RMS) amplitude attribute stratal slice; c: minimum amplitude attribute stratal slice; d: corresponding interpretation; e: typical interpreted seismic profile showing trunk channels in large braided river system.

状河往往出现在泥沙量大或颗粒粗大的河流中,在研究区 RGB 融合切片上识别到的大型河道形状沉积体的平面地震地貌(图 6a)与现代辫状河样式很相似^[6],大规模的主干河道内部的小型河道相互交切明显,呈现出辫状河非常明显的“辫状”特点,复杂河道体系平均宽度超过 10 km,最大宽度甚至达

到 30 km,且河道延伸距离较远,达到研究区东南缘的番禺低隆起,总体上河道覆盖面积约占研究区总面积一半以上。结合测井资料,GR 曲线值偏低且呈现为厚层的箱状外形(图 6e),推测该层段砂体含量较高。地震剖面上的地震特征为强-中振幅、好-中连续、平行-亚平行反射。综合以上特征,将此种

地层切片上显示的大型河道形状沉积体识别为大型辫状河。

3.2.2 中型河道

在中中新统的地震切片中可以识别到一些与主干河道相比规模较小、弯曲度较高的河道, 多发育在主干河道的分叉区域或者末端(图 7), 根据河道的规模将其定义为中型分支河道。以发育在层序 SQ15.0 低位体系域的河道为例, 河道宽度范围为 0.5~5 km, 地震同相轴表现为强振幅、连续性较

好的反射特征。RGB 属性切片呈现高亮度, RMS 均方根振幅属性也呈现出红色的强振幅砂体反射。

测线 B-B' 横切的河道是自西北向东南方向的一条延伸到研究区边缘的河道(图 7d), 河道平均宽度约 5~7 km, 弯曲度中等, 为中型河道类型。RGB 属性切片显示为偏白色且亮度较高; 均方根振幅属性切片呈现出红色的强振幅反射, 最小值振幅属性切片呈黑色, 也表现为强振幅反射, 因此推测沉积充填在通道中的是砂质沉积, 结合图 7d 的 B-B' 和

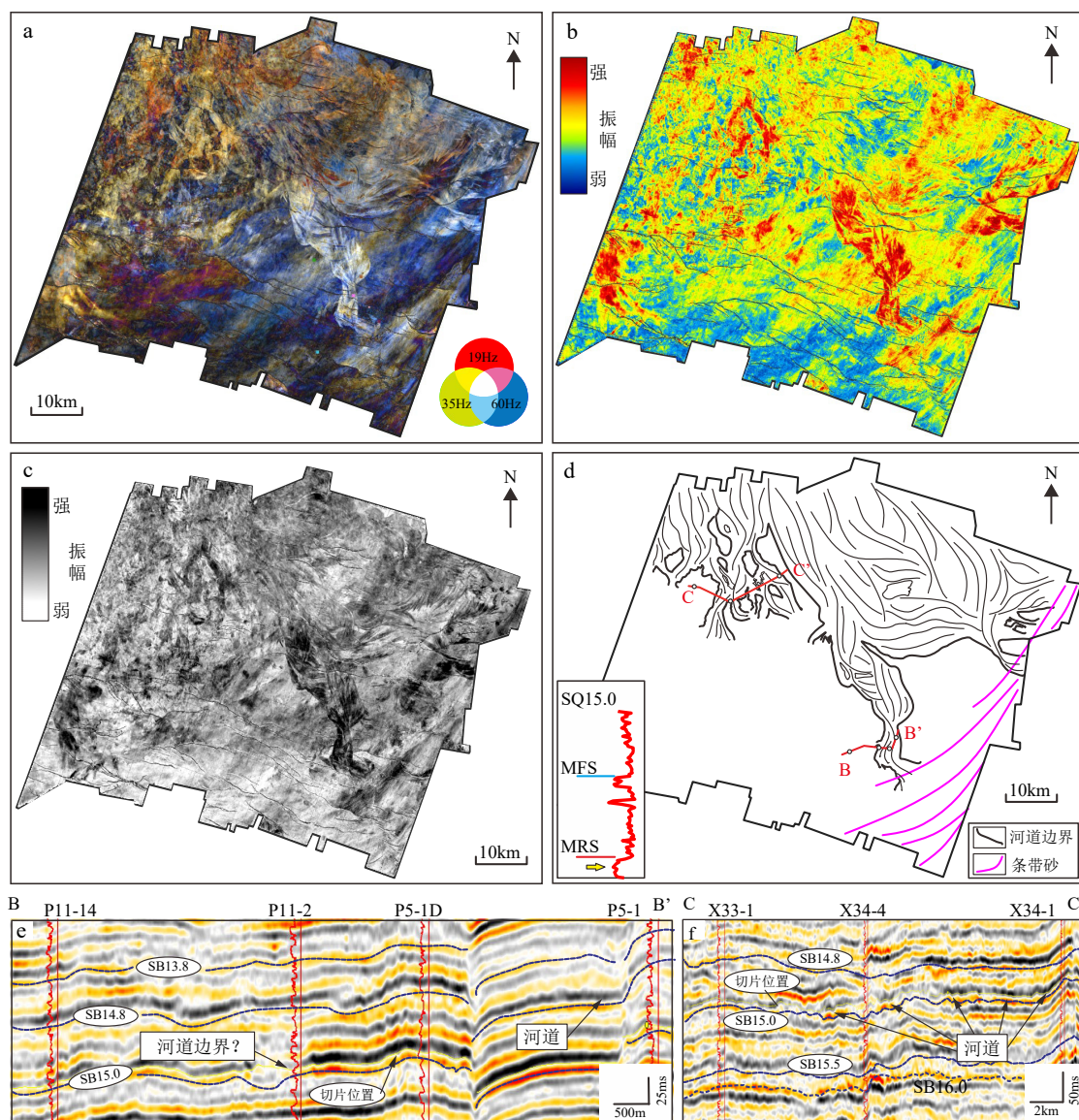


图 7 层序 SQ15.0 低位体系域发育的中型河道体系

切片位置见图 7d 黄色箭头, 测线位置见图 7d。a. RGB 融合属性地层切片, b. RMS 均方根振幅属性地层切片, c. 最小值属性地层切片, d. 河道素描图, 地震剖面为河道横截面。e-f. 测线 B-B' 和 C-C' 的地震剖面, 测线位置见图 7d。

Fig.7 Medium-sized distributaries of fluvial system developed in the LST within SQ15.0

See the location of lines in Fig.7d, and the slice location in yellow arrow. a: RGB color blending stratal slice, b: Root-mean square (RMS) amplitude attribute stratal slice, c: Minimum amplitude attribute stratal slice, d: Corresponding interpretation, e: Typical interpreted seismic profiles of line B-B' and line C-C'.

See locations in Fig. 7d.

C-C'测线地震同相轴表现为强振幅以及 GR 曲线呈箱状外形,可知砂体总体含量高。根据属性切片该河道平面上具有崎岖的边界且延伸距离较远,地震剖面上具有截然的边界(图 7d 测线 B-B'),连井剖面(图 4)上也表现出明显的下切特征,以此推测该河道为下切谷。因此,中型河道可能包括了辫状河道末端中等规模的末端分支河道和下切谷两种类型。

3.2.3 小型曲流河道

在某些地层切片上识别出一些小型的、弯曲度高的河道形状沉积体,RGB 融合切片上表现为高弯曲度、白色高亮度的特征,均方根属性切片的特征为中-强振幅(图 8c-d),且可见明显的河道迁移特征——既有横向上的扩张或摆动,又有向下游的平移或下摆。在地震剖面上,呈现弱振幅背景中的单点状的强振幅且不连续,推测为小型曲流河道沉积。这种类型的河道与前两种类型的河流系统不同,其在规模上相对较小,河道宽度通常为 100~300 m(图 8e),主要发育在高位体系域(图 8f),地震反射特征和其他河道类型一致,为强振幅、连续性较好,通常为由单支河道而不是相互叠置的多期河道组成的河道体系。

3.3 异常下切现象

研究区不同层序的低位体系域发育了多期次的辫状河道体系,结合地震属性切片发现在辫状河道体系中普遍存在一种异常的下切现象,尤其在 SQ17.1 和 SQ14.8 层序中较为发育(图 6 和图 9 中红色充填区域)。虽然从局部地震剖面上,该异常下切与下切谷相似,但是从精细的平面地震切片解释发现,这种异常的下切横向展布局限(图 10),仅仅在辫状河道的部分区域局部出现,如河道的边缘、河道支流汇流区域以及主干河道突然变窄的区域等(图 6,图 9)。地震剖面上异常下切的深度达到河流平均深度的近两倍,振幅较强且连续性好,不同层序发育的辫状河道都表现出多期次下切的特征(图 9b),且下切沉积单元的边缘较陡,边缘侵蚀坡度大,但是侵蚀面范围较小,汇流处发育的下切平面上呈近椭圆形或者透镜状,长轴平均宽度约

2.5 km,短轴约 1 km,发育在河道边缘处的呈现长条状或不规则的形状。RGB 属性切片呈红色,表明下切处频率较高,地层沉积厚度大。此外,恰好有口钻井穿过了异常下切区域,GR 曲线上显示为厚层箱状的砂体(图 10h)。结合图 7 和相关文献^[9,15-16],下切谷是响应于海平面下降,在平面上呈现明显河道状、延伸距离较远且边界崎岖的多期充填复杂河道体系,在沉积特征、规模和平面几何特征以及层序意义等方面存在明显的区分标志(表 2)。

4 讨论

4.1 河道类型的转化及其控制因素：从辫状河到曲流河

珠一坳陷位于南海北部大陆架,是珠江古河道入海的必经区域^[5,24]。经过对地震切片的精细分析和刻画,本次研究在不同时空尺度内均揭示出了类型丰富的三角洲分流河道体系,其河流类型包括了大型主干辫状河道、中型分支河道、小型曲流河道等。随后,结合区域高精度层序地层格架的分析显示(图 3-4),古珠江河道体系在早—中中新世的沉积特征存在规律性变化,主要表现为受控于体系域的河道类型的转换^[5,25-26]。

以层序 SQ17.1 为例,可见其河道类型在不同的体系域发生了明显的转换:低位体系域以大型的辫状河道体系为主(图 6),发现在这些高能量的辫状河道的沉积地层中下切现象明显(图 6e),且不同期次的河道之间互相切叠、垂向加积。结合研究区的层序地层格架(图 2-3),可知该时期全球海平面总体正在上升,但是区域海平面正在下降,因此该层序主要受控于南海区域的海平面下降的影响,发育大型的河道体系。随后海平面均处于上升阶段,河流的均衡剖面发生调整^[15],河道整体规模减小,因此,在高位体系域内主要发育中小型的分支河道和小型曲流河道(图 8a-b)。

与层序 SQ17.1 类似,其他多个层序内的河道体系在时间和空间上具有相同的特征,例如在层序 SQ15.0 的高位体系域内发育中型的分支河道(图 7a)。

表 2 汇流冲刷和下切谷的识别特征
Table 2 The distinctive features between confluence scour and incised valley

	平面形态特征	下切深度	充填特征	岩性特征	层序意义
汇流冲刷	近似圆形或椭圆形,分布局限,宽度约 0.5~5 km	中等	单期充填	中-粗河道砂岩	无明显层序意义
下切谷	明显河道状,延伸距离远	较大	多期充填	中-粗河道砂岩至海相泥岩,岩性多样	层序边界标志

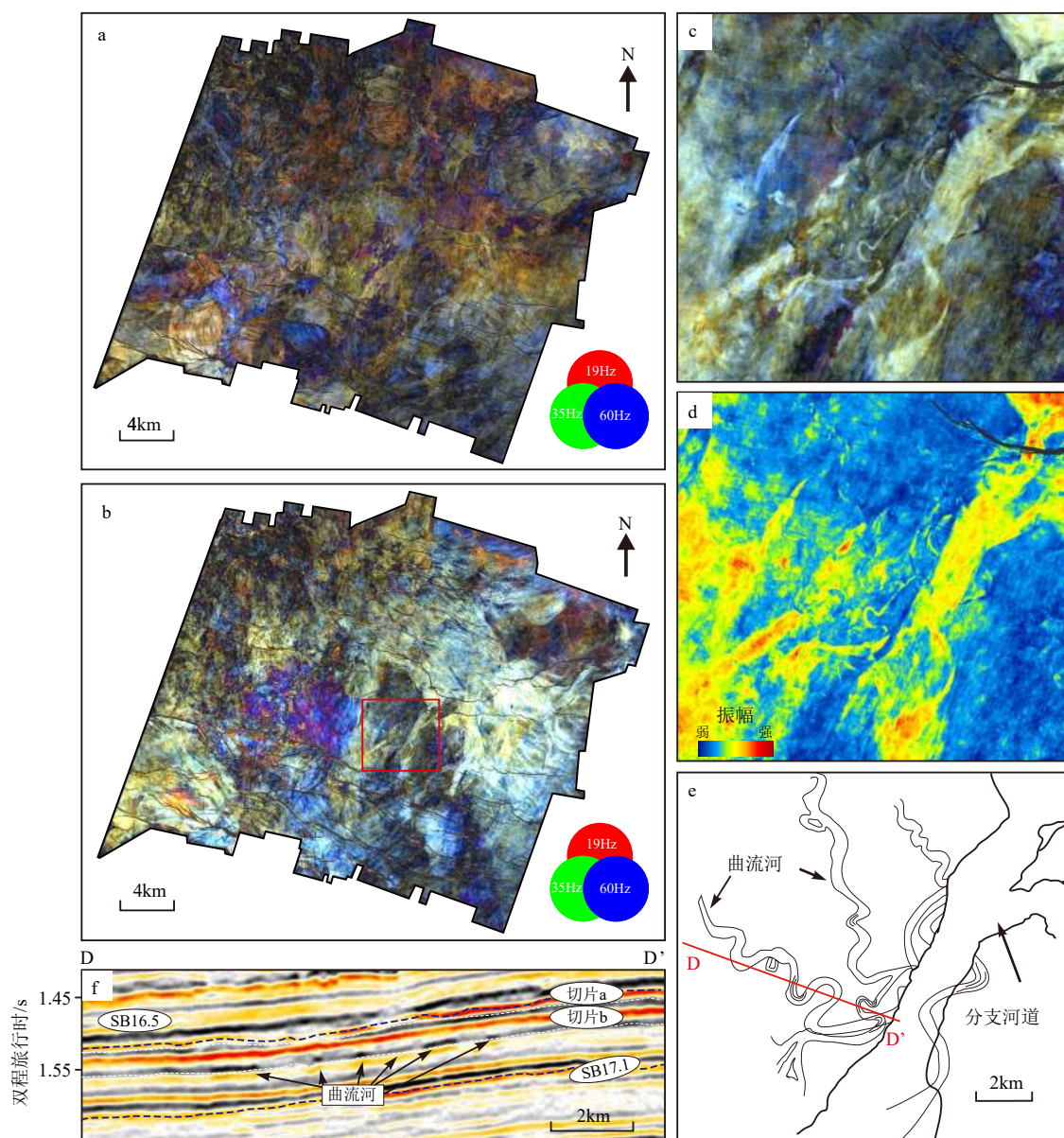


图 8 层序 SQ17.1 高位体系域发育的小型河道体系

切片位置见图 8f。a. 切片 a 处 RGB 融合属性地层切片, b. 切片 b 处的 RGB 融合属性地层切片, c. 红色方框范围内的 RGB 融合属性地层切片, d. 红色方框范围内的均方根振幅属性地层切片, e. 切片位置小型河道的素描图, f. 测线 D-D' 的地震剖面, 测线位置见图 8e。

Fig.8 Small-sized distributaries of fluvial system or single meandering river developed in the HST within SQ17.1

See the location of lines in Fig.8f. a:RGB color blending stratal slice of slice a in Fig.8f, b: RGB color blending stratal slice of slice b in Fig.8f, c:RGB color blending stratal slice of the red frame,d: Root-mean square (RMS) amplitude attribute stratal slice, e: Corresponding interpretation, f:Typical interpreted seismic profile of line D-D', see location in Fig. 8e.

从以上分析不难看出, 古珠江河道体系总体发育特征明显受到体系域控制: 在低位体系域的低可容空间影响下, 易于发育多期次河道相互叠置, 形成大型、中型的辫状河道; 伴随着体系域的变化, 河道类型也相应发生辫曲转换, 因此, 海侵和高位体系域主要发育高弯曲度的中、小型分支河道和小型的分支河道。

河道类型与体系域的耦合实际上是海平面和可容空间的间接作用。利用三维地震数据, 本次研

究中在研究区内共识别出了 21 期大型的河道体系 (图 2), 其中 15 期位于低位体系域, 符合海平面和可容空间的控制效果。但值得注意的是, 其余 6 期河道均出现在海侵和高位域, 似乎是难于解释的。近年来, 除了海平面、可容空间等下游因素的影响外, 源区变化(构造、气候、物源供给)等上游因素对河道体系的影响受到了越来越多的关注。值得注意的是, 研究目的层发育在南海运动后的海底扩张期, 构造环境较为稳定, 因此可以排除珠江口盆

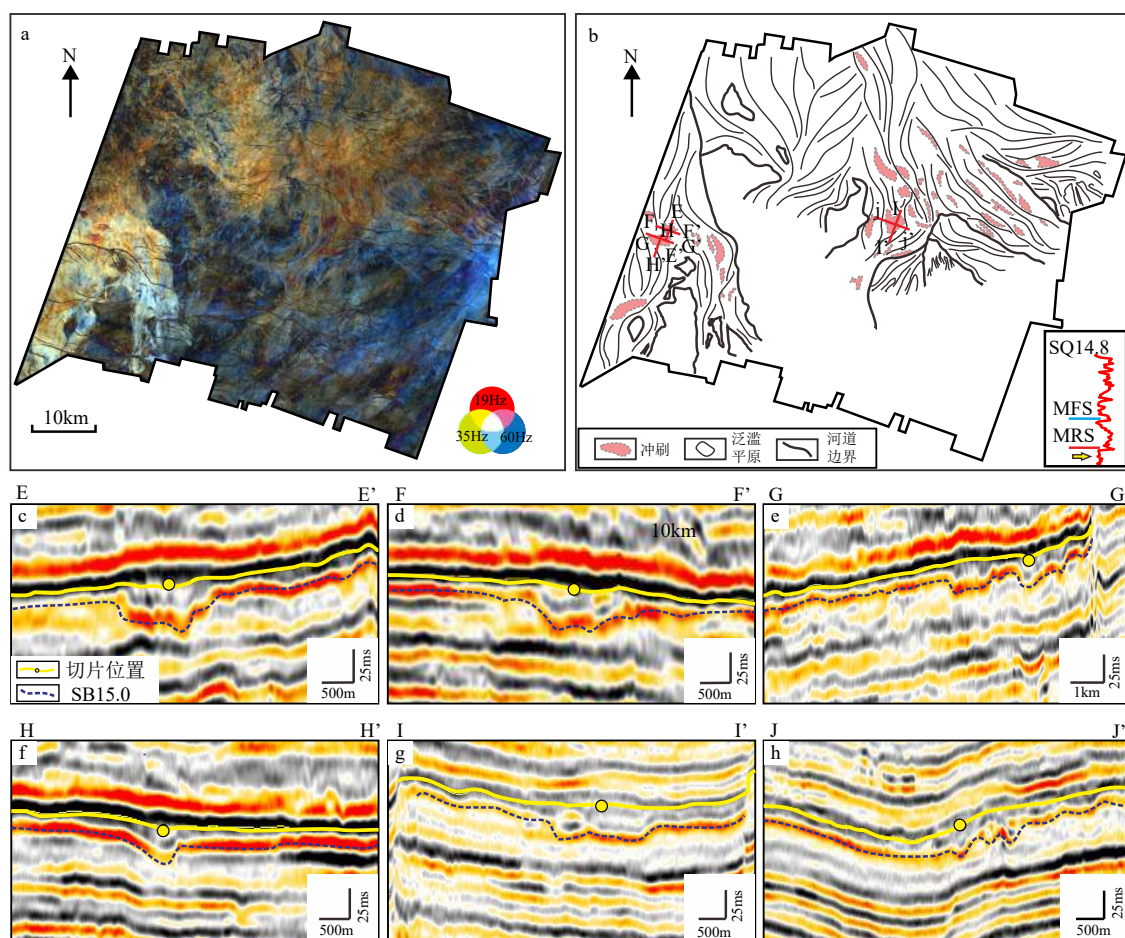


图9 异常下切现象示意图

a. 层序 SQ14.8 低位体系域的辫状河道的 RGB 融合属性地层切片 (切片位置见图 9b 黄色箭头), b. 图 a 属性切片的河道素描图, c-h. 研究区辫状河道异常下切现象的典型地震剖面 (测线位置见图 9b)。

Fig.9 Abnormal incised structures in large braided river system of the study area

a: RGB color blending stratal slice in the LST with SQ14.8 (see the location of slice in yellow arrow in Fig.9b), b: Corresponding interpretation showing the fluvial system developed in Fig.9a, c-h: representative seismic profiles showing abnormal incised structures in large braided river system (see the location of the lines in Fig.9b).

地构造环境的剧烈变化对河流体系的主导作用^[5]。但由于中新世初青藏高原发生大范围强烈隆升,珠江流域面积快速扩大,物源供给明显增加^[5,27],此外,随着青藏高原抬升幅度的变化,东亚季风气候对流域的影响逐渐变强,可导致河道系统径流量的明显变化^[2]。即使在海侵和高位体系域,河道径流量的突然增加依然可以造成河道规模的突然增加和河道体系总体展布范围的扩大。

4.2 辫状河道汇流冲刷过程

辫状河道体系内部河道系统复杂交错,形成水浅、流急且迁移性强等特征,是河流沉积学持续的研究热点和难点^[28-29]。区别于响应海平面变化而发育的下切谷,汇流冲刷是河道体系中自旋回作用产生的沉积结构,不同区域发育的汇流冲刷具有不同

的沉积特征,下切深度也各不相同,这使得在识别层序界面的时候具有一定的困难^[30]。由于古河道的埋藏时间较长,因此冲刷结构保存下来的规模远小于实际情况^[29],在一些古河道野外露头的研究中,汇流冲刷造成的下切深度达到了平均河流深度的3~4倍,通常汇流冲刷发育的位置是辫状河道中下切最深的区域,因其相似的下切特征导致在划分层序界面的时候容易与下切谷混淆^[29,31]。

在研究区内识别层序界面时不应只局限于下切侵蚀的深度和充填的砂体厚度,应该综合考虑侵蚀地貌以便排除汇流冲刷等的影响。

在古河道体系的层序界面划分过程中,下切谷是划分层序界面的重要依据^[13]。本次研究运用RGB融合技术等对珠一坳陷的地震资料进行了详细分析,以及对层序 SQ17.1 和 SQ14.8 发育的汇流

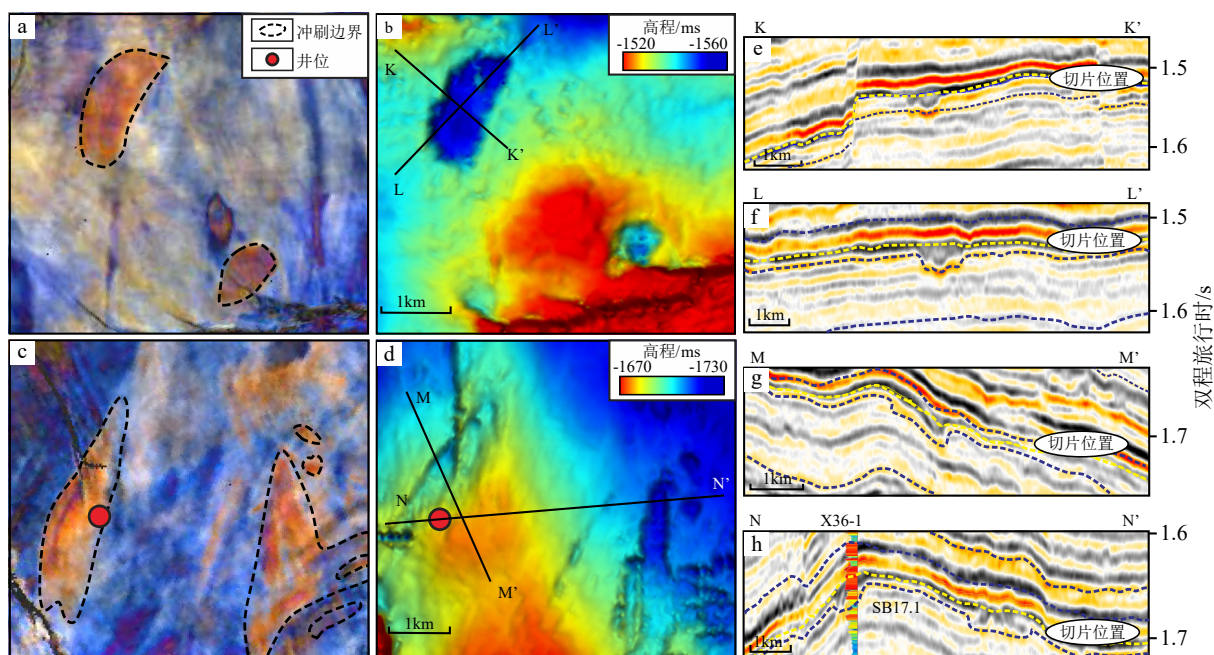


图 10 层序 SQ17.1 发育的大型辫状河道体系的异常下切作用的细节刻画

切片位置见图 6d。a, c: 辫状河道汇流处异常下切现象的 RGB 融合属性切片, b, d: 异常下切的构造地形图, e-h: 测线处异常下切现象的地震剖面。

Fig.10 Detailed interpretation of abnormal incised structures in the large braided river system within SQ17.1

See locations in Fig.6d. a, c: RGB color blending stratal slices showing abnormal incised structures in the confluence of the braided river system in Zhu I Depression; b, d: the structural topographic maps of a and c, respectively; e-h: typical seismic profiles (see the location of the lines in Fig.10b,10d).

冲刷进行了详细刻画, 优选的地震属性切片可以很好地展示汇流冲刷的平面形态特征(图 9), 常呈透镜状或不规则椭圆状, 广泛分布于研究区发育的复杂辫状河道。此外, 研究区发育的汇流冲刷的深度达到河流深度的两倍, 层序界面的深度应该大于该深度, 更加准确地区别于下切谷为珠江古河道流域的汇流冲刷所致提供了新的证据, 有利于南海北部珠江口盆地研究区进行更加精细准确的层序界面划分工作。

目前对于汇流冲刷的发生条件尚未有统一认识。部分研究认为河流坡降可能是重要的影响因素, 指出汇流冲刷易于发育在坡降较低的辫状河道内。此外, 河流汇流的角度、不同支流的径流量和河流下游的宽度等^[12, 32]都会对汇流冲刷的深度产生影响。基于河流动力学理论, 汇流冲刷的过程也得到了初步揭示: 汇流处两支河流形成的螺旋流在表面汇聚, 然后在接近河床底部位置分离^[33-34], 从而导致了河床侵蚀下切, 而冲刷深度和规模随着汇流角度的增大而增大(图 11)。但值得注意的是, 由于前人的野外观察研究和实验室模拟大部分局限于小型的河流汇流口, 技术还无法达到模拟复杂的大型辫状河道^[30]。而且在研究区早—中中新世珠江

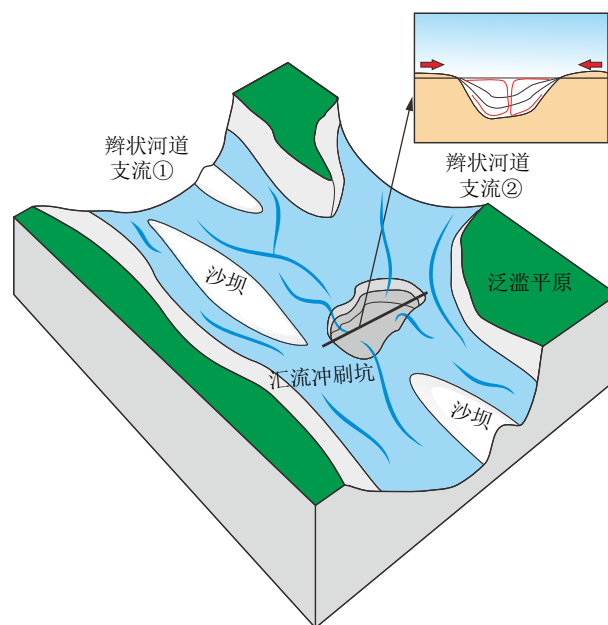


图 11 辫状河道汇流冲刷沉积模式图^[31]

Fig.11 Depositional model of confluence scour in a braided river system

古河道的目的层段, 大型辫状河道的汇流处不一定都发育了汇流冲刷, 不同层序的辫状河道发育的汇流冲刷的数量也存在较大差异, 因此汇流冲刷现象

在研究区的时间和空间上的差异及其控制因素, 仍然有待更加深入的研究。

4.3 汇流冲刷的地质意义

前已述及, 汇流冲刷效应在地震剖面上形成的冲刷坑与下切谷的响应特征极为相似, 但实际上两者发生的过程、条件和地质意义完全不同, 将两者混淆有可能导致层序界面位置的误判, 因此, 准确地判断汇流冲刷坑和下切谷具有重要的地质意义。此外, 通过本次研究发现, 广泛发育在辫状河道中的汇流冲刷截断了多条地震同相轴, 下切深度可以达到河流平均深度的两倍甚至更深(图 9-10)。在后期, 汇流冲刷的负地形经过充填作用, 形成大套的河道砂体, 研究区的测井 GR 曲线(图 10h)在汇流冲刷处表现为厚层的箱状。因此可预测辫状河道中汇流冲刷结构的出现将可以在很大程度上增加沉积地层的垂向连通性, 为流体流动创造潜在的垂向运移路径^[35]。

考虑到汇流冲刷结构充填的也是河道砂体, 并且具有局限发育的特征, 如果在后期海平面上升时被泥岩覆盖后可能具有一定的岩性圈闭成藏条件。从整个古珠江流域的角度分析, 早—中中新世珠江三角洲分布面积大, 发育稳定, 沉积了巨厚的海陆过渡相和海相地层, 且在多期次海平面变化旋回中形成了多旋回、多层序的地层叠置关系, 为岩性圈闭提供了有利的储盖条件^[36-37]。因此, 汇流冲刷坑后期充填的砂体在合理的生储盖配置情况下, 将可能为岩性圈闭勘探带来新的目标类型。

珠江古河道作为一个重要的沉积物输送通道, 在中中新世期间向海延伸的距离变远, 使得砂体向海的搬运距离变长甚至越过陆架, 是深水区重力流、深水扇等发育的重要砂体来源。近年来, 大型河道在发育背景和沉积特征上与中小规模河道具有截然不同的特征, 逐渐成为河流沉积学领域研究的热点^[38-39]。大量的模拟实验和地震数据等表明, 汇流冲刷的分布数量和冲刷侵蚀面的规模指示了河道的流量和分支河道的数量, 通常情况下, 只有空间上广泛暴露且持续时间足够长才能在地质记录中留下面积较大的侵蚀冲刷面, 因此汇流冲刷一定程度上可用于大型河道存在的判别和指示^[29]。受控于全球海平面变化, 中新世早期南海海平面整体上处于低位, 并且该时期温暖湿润的气候条件以及青藏高原的隆升带来更大的河流流量^[40-42]。例如在 SQ17.1 层序, 河道体系的展布面积非常大, 约占研究区总面积的 1/3, 而且延伸距离达到研究区的

边缘。因此, 汇流冲刷现象的出现很有可能与大型、高能河道体系相伴生, 具有重要的指示意义。

5 结论

(1) 以岩芯、测井和高分辨三维地震资料为基础, 针对南海珠江口盆地珠一坳陷下—中中新统开展了精细的层序地层研究, 识别出 16 个主要的层序界面, 并引入最大海泛面、最大海退面进一步精细划分了体系域界面, 进而建立了适用于海相陆架—三角洲的高精度层序地层格架。

(2) 采用频谱分解、RGB 融合切片、振幅属性切片等地震综合分析技术, 对古珠江河道系统开展了精细刻画, 并基于综合依据进行了河道类型的界定; 进而, 以典型层序为例, 揭示了古河道类型受控于体系域变化由辫状河向曲流河的转换过程, 同时探讨了源区变化(构造、气候、物源供给)等上游因素对河道体系的潜在控制机理。

(3) 汇流冲刷是由辫状河道内河流自旋回过程产生的沉积结构, 单个冲刷坑的面积较小但侵蚀下切深度可达到河道平均深度的两倍甚至更深, 易于与下切谷的识别混淆, 但平面属性切片上呈现透镜状或近椭圆状, 与下切谷明显不同。因此, 对于两者的准确区分有助于避免层序界面位置的误判。

(4) 汇流冲刷效应除了对识别层序界面具有重要意义之外, 其分布数量和冲刷侵蚀面的规模对河道的流量和分支河道的数量也具有一定的指示意义, 通常情况下汇流冲刷与大型、高能河道体系伴生。此外, 汇流冲刷结构的深切和充填特征可以在很大程度上增加沉积地层的垂向连通性, 为流体流动创造潜在的垂向运移路径, 并且在后期泥岩覆盖后具备形成岩性圈闭的潜力。

致谢: 感谢中海油深圳分公司提供了地震数据、测井数据和岩芯数据。

参考文献 (References)

- [1] Bhattacharya J. Deltas and estuaries[M]//Middleton G V, Church M J, Coniglio M, et al. Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks. Dordrecht: Springer, 2003: 195-203.
- [2] Zhuo H T, Wang Y M, Shi H S, et al. Contrasting fluvial styles across the mid-Pleistocene climate transition in the northern shelf of the South China Sea: evidence from 3D seismic data [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 129: 128-146.
- [3] He M, Zhuo H T, Chen W T, et al. Sequence stratigraphy and depos-

- itional architecture of the Pearl River Delta system, northern South China Sea: an interactive response to sea level, tectonics and paleoceanography [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 84: 76-101.
- [4] Fisk H N, Kolb C R, McFarlan E Jr, et al. Sedimentary framework of the modern mississippi delta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(2): 76-99.
- [5] Wang Y R, Lin C S, Zhang Z T, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of Early-Mid Miocene Deltaic systems in the Northern Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 6134.
- [6] 李智高, 丁琳, 李小平, 等. 珠江口盆地珠一坳陷西部中新世早-中期沉积特征及控制因素[J]. 古地理学报, 2022, 24(1): 99-111. [LI Zhigao, DING Lin, LI Xiaoping, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of the western Zhu I depression during the early-middle Miocene, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2022, 24(1): 99-111.]
- [7] Weissmann G S, Hartley A J, Nichols G J, et al. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: distributive fluvial systems [J]. *Geology*, 2010, 38(1): 39-42.
- [8] Gibling M R. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(5): 731-770.
- [9] Posamentier H W. Lowstand alluvial bypass systems: incised vs. unincised [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(10): 1771-1793.
- [10] Smith N D. Sedimentology and bar formation in the upper kicking horse river, a braided outwash stream [J]. *The Journal of Geology*, 1974, 82(2): 205-223.
- [11] Hein F J, Walker R G. Bar evolution and development of stratification in the gravelly, braided, Kicking Horse River, British Columbia [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1977, 14(4): 562-570.
- [12] Ashmore P, Parker G. Confluence scour in coarse braided streams [J]. *Water Resources Research*, 1983, 19(2): 392-402.
- [13] Best J L, Ashworth P J. Scour in large braided rivers and the recognition of sequence stratigraphic boundaries [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 275-277.
- [14] Dalrymple R W, Boyd R, Zaitlin B A. Incised - Valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences[M]. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1994.
- [15] Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy[M]. 2nd edn. Amsterdam: Elsevier, 2022.
- [16] Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic Sequence Stratigraphy – Concepts and Applications[M]. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology, 1999.
- [17] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的基本构造特征与成因模型: 问题与进展及论争[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 35-53. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basic structural pattern and tectonic models of the South China Sea: problems, advances and controversies [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 35-53.]
- [18] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 中国地震沉积学研究现状和发展思考[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 397-411. [ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, ZENG Hongliu, et al. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(3): 397-411.]
- [19] Posamentier H W, Paumard V, Lang S C. Principles of seismic stratigraphy and seismic geomorphology I: extracting geologic insights from seismic data [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 228: 103963.
- [20] Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[M]//Wilgus C K, Hastings B S, Posamentier H, et al. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1988.
- [21] Embry A F, Johannessen E P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup basin, Arctic Canada [J]. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 1993, 2: 121-146.
- [22] Schumm S A. River response to baselevel change: implications for sequence stratigraphy [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 279-294.
- [23] Zeng H L, Zhu X M, Liu Q H, et al. An alternative, seismic-assisted method of fluvial architectural-element analysis in the subsurface: neogene, Shaleitian area, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 118: 104435.
- [24] 梁旭, 范廷恩, 胡光义, 等. 海相辫状河三角洲沉积基准面旋回划分及砂体叠置样式分析: 以西江W油田珠江组为例[J]. 现代地质, 2018, 32(5): 913-923. [LIANG Xu, FAN Ting'en, HU Guangyi, et al. Division of base-level cycles and superimposition of sandbodies in marine braided delta reservoir: a case study of Zhujiang Formation in Xijiang W Oilfield, Pearl River Estuary Basin [J]. *Geoscience*, 2018, 32(5): 913-923.]
- [25] Talling P J. How and where do incised valleys form if sea level remains above the shelf edge? [J]. *Geology*, 1998, 26(1): 87-90.
- [26] Schumm S A, Ethridge F G. Origin, evolution and morphology of fluvial valleys[M]//Dalrymple R W, Boyd R, Zaitlin B A. Incised-Valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences. Tulsa: SEPM, Special Publication, 1994: 13-26.
- [27] 陈维涛, 孙珍, 何敏, 等. 珠江口盆地中中新世SQ14.8层序-沉积演化及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(5): 875-891. [CHEN Weitao, SUN Zhen, HE Min, et al. The Mid-Miocene stratigraphic-depositional evolution recorded by the SQ14.8 layer in Pearl River Mouth Basin and its geological significances [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(5): 875-891.]
- [28] Miall A D. Architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(7): 1201-1216.
- [29] Smith G H S, Nicholas A P, Best J L, et al. The sedimentology of river confluences [J]. *Sedimentology*, 2019, 66(2): 391-407.
- [30] Ardies G W, Dalrymple R W, Zaitlin B A. Controls on the geometry of incised valleys in the Basal Quartz unit (Lower cretaceous), Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(5): 602-618.
- [31] Ullah M S, Bhattacharya J P, Dupre W R. Confluence scours versus incised valleys: examples from the cretaceous ferron notom delta, south-

- eastern Utah, USA [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85 (5): 445-458.
- [32] Huismans Y, Koopmans H, Wiersma A, et al. Lithological control on scour hole formation in the Rhine-Meuse Estuary [J]. *Geomorphology*, 2021, 385: 107720.
- [33] Rhoads B L, Sukhodolov A N. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37 (9): 2393-2410.
- [34] Best J L. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology [M]//Ethridge F G, Flores R M, Harvey M D. Recent Developments in Fluvial Sedimentology. Tulsa: SEPM, 1987: 27-35.
- [35] Snedden J W. Channel-body basal scours: observations from 3D seismic and importance for subsurface reservoir connectivity [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39 (1): 150-163.
- [36] Fielding C R. Sedimentology and stratigraphy of large river deposits: recognition in the ancient record, and distinction from 'incised valley fills' [M]//Gupta A. Large Rivers: Geomorphology and Management. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007: 97-113.
- [37] 杜家元, 施和生, 丁琳, 等. 珠江口盆地(东部)地层岩性油气藏勘探有利区域分析[J]. 中国海上油气, 2014, 26 (3): 30-36,55. [DU Jiayuan, SHI Hesheng, DING Lin, et al. An analysis of favorable exploration areas for stratigraphic-lithologic hydrocarbon accumulation in the eastern Pearl River Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26 (3): 30-36,55.]
- [38] Miall A D. How do we identify big rivers? And how big is big? [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 186 (1-2): 39-50.
- [39] Ashworth P J, Lewin J. How do big rivers come to be different? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114 (1-2): 84-107.
- [40] Clift P D, Wan S M, Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 86-102.
- [41] 张向涛, 向绪洪, 赵梦, 等. 珠江水系演化与东亚地形倒转的耦合关系[J]. 地球科学, 2022, 47 (7): 2410-2420. [ZHANG Xiangtao, XIANG Xuhong, ZHAO Meng, et al. Coupling relationship between Pearl River water system evolution and East Asian terrain inversion [J]. *Earth Science*, 2022, 47 (7): 2410-2420.]
- [42] 郑荣才, 马奇科, 杨宝泉, 等. 白云凹陷珠江组深水扇砂岩储层特征及控制因素[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2012, 39 (5): 455-462. [ZHENG Rongcai, MA Qike, YANG Baoquan, et al. Characteristics of Miocene Zhujiang Formation submarine fan sandstone reservoirs in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2012, 39 (5): 455-462.]