https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.390



早-中中新世古珠江三角洲沉积格局及其控制因素

彭光荣,杜家元,冯 进,丁 琳,李智高,李小平

中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳 518054

摘 要:古珠江三角洲是珠江口盆地油气勘探的重要目标,但对其总体沉积面貌的揭示仍未充分,在一定程度上限制了对区内有利砂体和潜在岩性圈闭的锁定.本次研究综合利用重矿物、岩心、钻井和区域三维地震数据,采用地震沉积学综合分析手段精确复现了早一中中新世古珠江三角洲的宏观沉积格局和相带展布.重矿物分析结果显示,古珠江分流河道体系向近端侧主要发源于西侧、东侧两个主河道分支,进而确定了古珠江三角洲"双支主控"的宏观基本格局.此外,经过对这两个分支河道体系重矿物组合特征对比,发现其分别与现代西江、东/北江有一定相似性,这可能表明中新世古珠江干流的流路与现今具有较高对比性.同时,针对分流河道和外缘条带砂的精细地震地貌分析显示出中新世古珠江三角洲可能受到河流一波浪—潮汐混合动力过程的影响,并且持续的西南向古水流对整体相带展布也具有明显的控制作用.

关键词:珠江口盆地;不对称三角洲;分流河道;岩性圈闭;沉积相;沉积地质.

中图分类号: P539.2; P736.2

文章编号: 1000-2383(2022)11-3989-16

收稿日期:2022-06-24

Depositional Setting of Ancient Pearl River Delta during Early-to-Middle Miocene: Implications for Forcing Factors

Peng Guangrong, Du Jiayuan, Feng Jin, Ding Lin, Li Zhigao, Li Xiaoping China National Offshore Oil Corporation Limited-Shenzhen, Shenzhen 518054, China

Abstract: The ancient Pearl River delta (PRD) is an important target for oil and gas exploration in the Pearl River Mouth basin, whereas its overall sedimentary characteristics have not been fully revealed, limiting the recognition of multi-type sand bodies and favorable traps in the future. Utilizing heavy mineral data, core, well logs, and large-scale 3D seismic data, we comprehensively analyze the seismic geomorphology of the ancient PRD to accurately reconstruct the distribution of sedimentary facies and the macro-sedimentary patterns of the Middle Miocene ancient PRD. Heavy mineral data analysis results show that the Paleo-Pearl River distributary channel system mainly originated from two main channel branches on the west and the east sides; thus, the basic two-branch pattern is determined in the Paleo-Pearl River delta. And the characteristics of heavy mineral assemblages on both sides are similar to those of the modern Xijiang River and the Dongjiang-Beijiang rivers, respectively, suggesting a similarity between flow pathways in the Miocene and the modern Pearl River. Meanwhile, seismic geomorphology analysis results of the distributary channel and the shore-parallel sand bodies in the distal ancient PRD show that the paleo-delta may be influenced by a hybrid dynamic process of fluvial, wave, and tide. What's more, a continuous southwest paleocurrent may have an obvious control on the overall deflected facies pattern of the ancient PRD.

Key words: Pearl River Mouth basin; asymmetrical delta; distributary channel; lithologic trap; sedimentary facies; sedimentology.

基金项目:中海石油(中国)有限公司深圳分公司科研项目(No.CCL2021SZPS0113).

作者简介:彭光荣(1978-),男,硕士,高级工程师,主要从事石油地质与油气勘探综合研究工作. ORCID: 0000-0003-2014-4653. E-mail: penggr@cnooc.com.cn

0 引言

珠江口盆地是我国南海海域重要的含油气 盆地,到目前为止该盆地已发现原油地质储量超 10亿吨、天然气逾2000万方,为我国的油气资源 做出了极大的贡献(米立军等,2018;高阳东等, 2021;张向涛等,2021).其中,在盆地已累计生产 的 2.8 亿余吨原油产量中,80% 以上与古珠江三 角洲沉积体系直接相关.值得注意的是,盆地经 过多年勘探和开发,构造型油气藏勘探难度日趋 增大,而越发严峻的后续储量接替问题促使盆地 油气勘探方向不断从构造圈闭向岩性圈闭转 移.目前,盆地浅水区岩性圈闭勘探的主要目 标集中在中新世古珠江三角洲沉积体系(珠江 组和韩江组),古珠江三角洲的频繁进退和横 向摆动形成了丰富的沉积相带和砂体类型,在 构造背景和成藏条件的良好匹配下,具有较大 的勘探前景.但值得注意的是,考虑到与构造 性圈闭相比,岩性圈闭勘探难度更大,因此要 求我们对中新世古珠江三角洲的砂体类型、展 布规律和形成过程的理解需更加深入.

目前针对中新世古珠江三角洲的研究已较为丰富,尤其对惠州凹陷、恩平凹陷、番禺4洼等单个凹陷或洼陷尺度的研究较为成熟(梁卫和李小平,2020;高阳东等,2021;李智高等,2022;

吴静等,2022),但仍然缺少对古珠江三角洲整体面貌的精确掌握.尤其值得注意的是,作为砂体输送的"大动脉",在区域编图中的古珠江分流河道体系多数还停留在示意性编图阶段,缺少三维地震资料的直接刻画.本文以此为切入点,基于珠江口盆地浅水区最新连片三维地震数据和大量的物源、钻井和岩心资料,针对中新世古珠江三角洲宏观格局开展重建研究,阐明古珠江三角洲沉积分布规律和砂体发育特征,为后期大范围岩性圈闭勘探奠定坚实的基础.

1 区域地质背景

1.1 研究区位置

本次研究区位于南海北部陆缘中、外陆架区,主体位于 200 m 水深线(大约相当于现今陆架坡折)以内(图 1).自神狐运动(约 65 Ma)以来,研究区及周边区经历了长期的构造和沉积演变历史(龚再升和李思田,1997).在两组 NE 向断层的分隔下,珠江口盆地主要呈现三隆两坳的构造格局,隆起带分别为北部隆起带、中部隆起带、南部隆起带,而坳陷带主要包括北部坳陷带和南部坳陷带(图 2).因此,从构造区划上,本次研究区主要涵盖珠江口盆地的珠一坳陷和中部隆起带的局部区域(番禺低隆起、东沙隆起)(图 2).

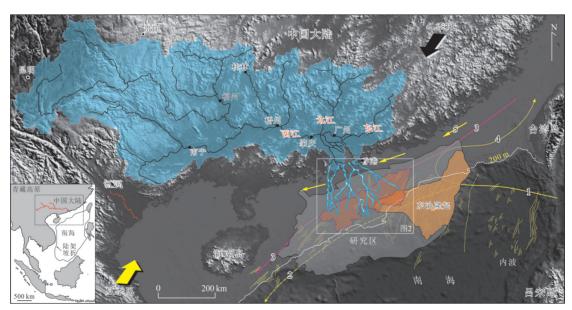


图1 研究区位置和珠江流域范围图

Fig.1 Location of the study area and map of the Pearl River basin 1. 黑潮;2. 黑潮南海分支;3. 广东沿岸流;4. 南海暖流;5. 沿岸流

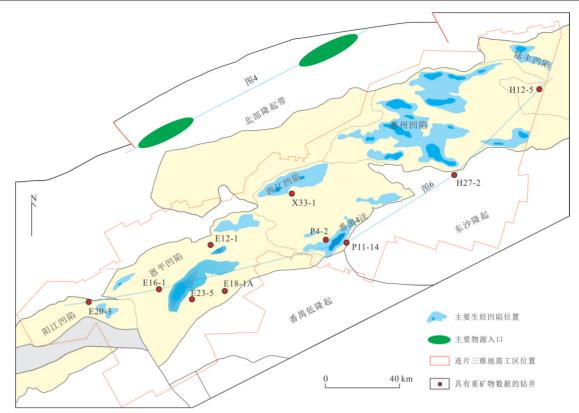


图 2 珠江口盆地珠一坳陷构造单元分布、三维工区位置及具有重矿物数据的钻井井位

Fig.2 Location map showing the tectonic elements, 3D-survey locations and well locations with heavy mineral data in Zhu I depression, Pearl River Mouth basin

从沉积充填结构看,以T70界面为界,研究区整体呈现下断上坳结构,分别对应裂陷期和裂后坳陷期两个沉积充填阶段,自下而上呈现从陆相(湖泊、河流相)—过渡相(三角洲、碳酸盐岩台地)—浅海相的沉积演变序列.本次研究的主要目的层段为下—中中新统(T60至T35界面之间),对应于珠江组和韩江组下段(图3).该时期内,珠一坳陷内广泛发育古珠江三角洲及其相关沉积相带(Heet al., 2017; Chen et al., 2020).同时,在东沙隆起之上,碳酸盐岩台地经历了生长、扩大和逐渐淹没的演化过程(梁卫和李小平等,2020).

1.2 沉积动力条件

现今南海北部陆架区发育有活跃的水动力条件,并且持续受到南海表层环流系统的影响(栾锡武等,2010;刘安等,2011).具体到研究区附近来说,尤其以东亚季风气候影响下的环流系统为特色.由于南海及邻区在夏季(即5月中旬至9月)盛行西南季风,在冬季(即11月到次年4月)盛行东北季风.考虑到冬季风的速度和持续时间占有,冬季洋流的强度较之夏季洋流更强,持续时间更长(图1).南海北部陆架总体的环流系统如图1所

示,其中,广东沿岸流和黑潮向陆架的入侵流的流向均为从北东向到南西向,对于珠江三角洲的形成演化具有一定的影响作用.前人研究揭示了南海北部陆架区的多期条带砂体,通过砂体几何结构和地震相特征解析发现其形成发育与陆架水流系统有着密切的关系(Zhuo et al., 2015).通过陆架条带砂体的分析,认为南海古环流系统至少在13.8 Ma时期便已经形成并且一直持续至今(Zhu et al., 2010).

此外,南海北部现代陆架地区广泛分布沙波、沙丘和砂脊(栾锡武等,2010),推测潮汐和潮流也对海底砂质沉积物(如砂丘、砂脊、砂席等)的形成产生了重要作用,通常情况下潮流方向与岸线垂直,切向南的退潮流明显强于向北的退潮流(Zhuo et al.,2015).

1.3 珠江水系演变

现今珠江全长 2 300 余公里, 是我国境内长度 仅次于长江、黄河的第三长河, 也是南方最大河系, 其流域组成主要包括西江、东江和北江 3 个支流. 珠 江水系具有较强的沉积物搬运能力, 据估计, 整个 珠江流域汇水盆地面积达 0.453 7×10⁶ km², 而每年

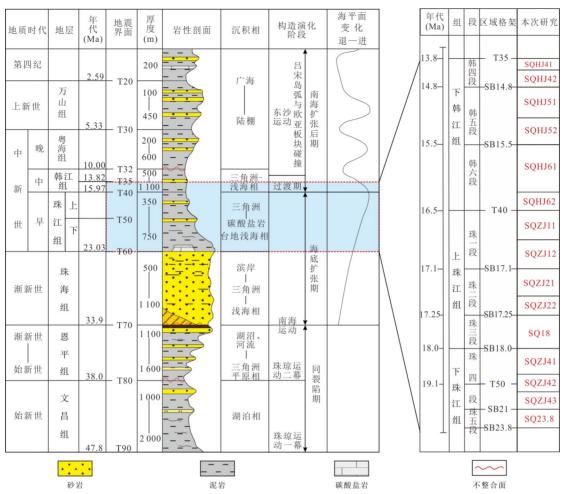


图 3 珠江口盆地珠一坳陷地层柱状图和层序划分方案

Fig.3 Stratigraphic column and sequence division scheme in Zhu I depression, Pearl River Mouth basin

输入的沉积物达 90×10° t (Lüdmann et al., 2001),是南海北部陆缘的主要沉积物来源之一. 值得注意的是,珠江水系中西江的沉积物输送量 大约占据整个珠江的86.97%,而东江、北江的输 沙量贡献相对较少,分别为3.77%和9.14%(向 绪洪等,2011). 沉积物供给量的巨大差异也导致 现今珠江三角洲在不同位置的沉积特征迥异,例 如在西侧形成明显的三角洲平原推进,河口沉积 作用极为活跃;相比而言,在东侧区域则明显受 到陆架水入侵作用,塑造为典型的河口湾地貌特 征(陈耀泰等,1994)(图1).目前,针对古珠江流 域的形成和演化问题尚存在较大争议,主要集中 在古珠江起源的时间、古珠江流域扩大、主要物 源区演变等方面(邵磊等,2008;向绪洪等,2011; 张向涛等,2021).同时,近期研究提出珠江流域 的发展演变与青藏高原隆升引起的东亚地形倒 转密切相关(向绪洪等,2011;张向涛等,2021).

2 研究数据和方法

本次研究主要运用了珠一坳陷内的重矿物、岩心、测井和三维地震数据(图 2).其中,重矿物数据主要来自油气钻井的岩心、井壁取心样品开展的分析测试,数据包合计有重矿物数据 3 391 组,主要分布于珠海组内.考虑到研究区(珠一坳陷级所属各凹陷)、目的层段(T60-T35)后,最终用于本次研究的有 58 组数据.研究中,所有重矿物数据均依据最新层序格架的约束,以层序为单元进行编图(图 4).本次研究运用了最新采集和拼接的大面积三维地震数据体,共有 5 块,从东向西依次为惠州坳陷三维区、西江凹陷三维区、番禺 4 挂三维区及恩平—阳江三维区,总面积超过 29 000 km²(图 2).

3 研究结果及分析

3.1 区域层序地层分析

珠一坳陷层序地层研究已经具备了较好的研究基础,本次研究在界面类型、界面特征和层序划分位置等方面充分继承了前人的研究成果(He et al., 2017;高阳东等,2021;李智高等,2022),并主要解决了跨凹陷拉通问题.研究从地层系统最为成熟的惠州凹陷出发,从基本观测开始,层序地层划分对比不依赖于固定的模式,通过特定的地层堆砌样式和界面构建层序地层格架开展了跨凹陷的区域层序地层划分对比,最终将中新世古珠江三角洲T60-T35目的层段内识别出了15个主要的层序界面,并将目的层整体划分为15个沉积层序(图3和图4).

总体来看,层序界面在地震剖面上主要表现为

强振幅反射,且多具有U型或V型下切反射特征,解释为海平面下降期间的陆架河道下切,在测井资料上则多呈现箱状砂体的底界(图4)(详见高阳东等,2021).随后,基于最大海泛面MFS、最大海退面MRS、强制海退体系域底界面BSFR等界面类型(Posamentier and Allen, 1999; Catuneanu, 2006; Catuneanu *et al.*,2009),可进一步将每个层序划分为体系域,并由此建立了适用于中新世古珠江三角洲体系域级别的层序地层划分方案(图3).

3.2 古珠江三角洲主要物源通道分析

3.2.1 重矿物组合特征 在层序地层格架划分基础上,以层序为单元开展了重矿物数据的汇编和成图,结果显示珠一坳陷各层序内的重矿物组合特征呈现出明显的分带性,主要表现为:①珠一坳陷内的整体物源主要呈现规律性的两个大的分支,因此推测中新世时期古珠江三角洲主要发育两个大的

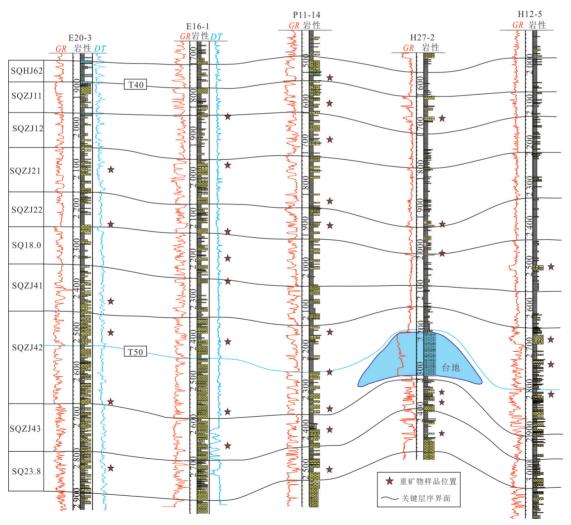


图 4 珠一坳陷内 SW-NE方向关键井联井剖面(剖面位置见图 2)

Fig.4 Well correlation of key wells in SW-NE direction in Zhu I depression (see location in Fig. 2)

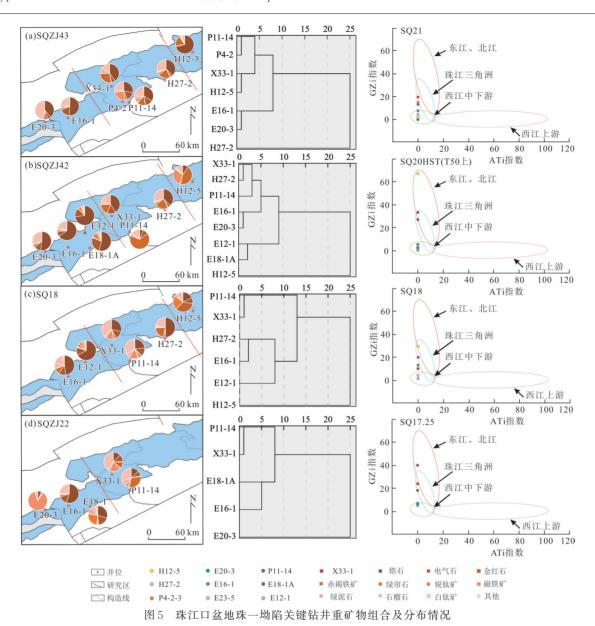


Fig. 5 Heavy mineral combination and distribution of key drilling wells in Zhu I depression, Pearl River Mouth basin

水系分支(图 5);② 西侧分支主要分布在恩平 凹陷及邻区,而东侧分支则主要涵盖有惠州凹陷、西江凹陷和番禺 4 洼等(图 5).值得注意的是,东北侧的 H12-5 井重矿物组合在多个层序内均体现出与其他钻井差异较大的特征,结合前人研究分析,认为该井位于陆丰凹陷内,其在中新世时期的主要沉积物来源以古韩江为主,而并非是古珠江物源(图 5).研究中同时开展了重矿物组合的聚类分析,结果显示出类似的特征,证实古珠江分流河道具有明显的分带性.

3.2.2 ATi 指数和 GZi 指数分析 考虑到重矿物组合在搬运、沉积、成岩等过程中容易受到风化、水力分选以及成岩作用影响,有学者提出通过矿物的相

对含量作为指标如 GZi、ATi等,以减弱相关因素对结果的影响,更敏感地反映物源的信息.在空间上,这些指标有助于区分沉积物的源区,在时间序列上则可以指示物源的变化.结合现今珠江流域的重矿物组合特征(向绪洪等,2011),认为 GZi 指数可以揭示含有石榴子石母岩(主要是变质岩和岩浆岩)组成变化,在本区具有较好的适用性.从图 5中可知,研究区西边钻井数据的 GZi 指数都偏小甚至等于0,说明该井所在位置的沉积物源区含石榴子石母岩较少,这与前人总结的西江物源区含石榴子石母岩较少,这与前人总结的西江物源区含石榴子石母岩较少,这与前人总结的西江物源区含石榴子石母岩较少,这与前人总结的西江物源区含石榴子石母岩较少,这与前人总结的西江物源区含石榴子石母岩较少方。其一步证实研究区西边的沉积物源区可能为西江支流.相比而言,研究区东边的钻井重矿物数据分析结果显示 GZi 指数较

高,范围大概在4.4~66.7,说明井所在位置的沉积物的源区存在变质岩和岩浆岩.前人研究表明北江和东江流域源区普遍存在变质岩及岩浆岩,使其 GZi 指数均大于0,大约为4~67.这与本研究的结果接近,因此进一步证实了研究区东边的沉积物物源可能为东江/北江流域.

此外,重矿物分析结果显示研究区磷灰石等不稳定矿物含量少,可能有两种主要的原因:① 化学风化作用强:由于磷灰石在酸性条件下极易溶蚀,且主要受源区化学风化作用程度的控制,这些沉积物母岩经历了强烈的化学风化和多期风化-搬运-沉积作用,导致磷灰石含量极低或者被完全损耗.② 搬运距离长:与辉石、角闪石、绿帘石类似,磷灰石属于不稳定重矿物,由于较长距离的搬运,不稳定组分含量大大降低.此外,中新世古珠江重矿物组合中赤褐铁矿大量出现,可能与源区存在一定关联,与流域区普遍发育的岩

浆岩及变质岩有关.另外,与磷灰石含量少的原因类似,赤褐铁矿大量出现也可能是强烈化学风化作用的反映(图5),活跃的化学风化作用使母岩中的铁质矿物以相对稳定的高价氧化铁的形式存在,进而导致赤褐铁矿大量出现.

3.2.3 碎屑锆石年代学分析 目前,针对珠江流域的沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱已经多有报道和总结(赵梦等,2015; 邵磊等,2019; 张向涛等,2021)(图 6a 和 6b).其中,普遍认为珠江流域不同支流具有差异的碎屑锆石年龄谱系和峰值,例如,西江水系主要以印支期峰值为主(380~240 Ma),相比而言,东江-北江的碎屑锆石主要来自于东南沿海花岗岩带,具有明显的200~90 Ma的峰值(燕山期)(邵磊等,2019)(图 6a 和 6b).值得注意的是,焦鹏等(2018)提供了部分钻井珠江组下段的碎屑锆石数据,并且涵盖了珠一坳陷东侧的几处取样位置(图6c~6e,其平面位置见图 2),总体显示出明显的

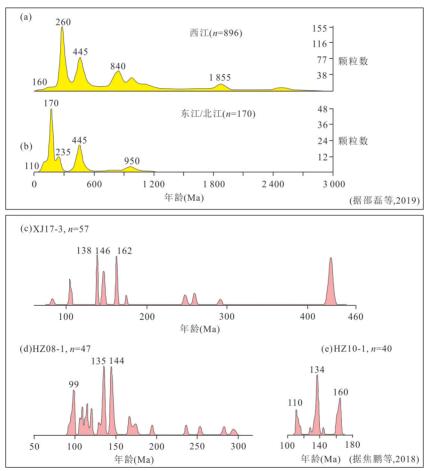


图 6 珠江流域及珠一坳陷珠江组典型样品碎屑锆石年龄谱系对比

Fig. 6 Comparison of detrital zircon age spectra in typical samples from Zhujiang Formatin of Zhu I depression and the Pearl River drainage basin

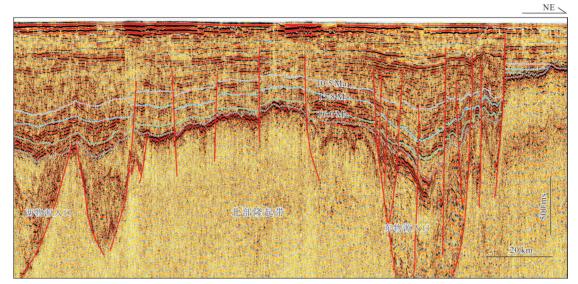


图 7 珠一坳陷北部 SW-NE方向地震剖面(剖面位置见图 2)

Fig.7 A regional SW-NE seismic profile across the Zhu I depression (see location in Fig.2)

200~90 Ma峰值,总体符合东江/北江物源区特征,与重矿物的认识相符合.西侧恩平凹陷内目前缺少目的层内的碎屑锆石年龄数据,因此暂时无法从年龄谱系角度精确评价其与西江物源的亲缘关系.

3.2.4 来自关键二维地震剖面的证据 沉积物源对于沉积盆地内沉积体系的展布具有关键的控制作用,准确把握住了物源的整体展布规律,则抓住了沉积物分散体系的"骨骼",对于最终的沉积单元展布具有决定性意义.通常情况下,对于陆相断陷盆地或被动陆缘盆地的断陷期沉积,其物源特征常常具有多源性、近源性,整体规律不明显.相比而言,对于陆缘的裂后坳陷期地层来说,其沉积物源通常由远源性的大河提供(例如,对于南海北部陆缘来说就是古珠江),具有很大的稳定性,使得追踪、重建其物源通道的可能性大大增强.

虽然重矿物资料已经给出了古珠江三角洲总体的物源分布情况,但是仍然需要追根溯源,进一步向上游方向探索,进而恢复古珠江三角洲源汇系统的全貌.对于研究区来说,恰好在研究区珠一坳陷北侧的北部隆起带上分布有一条关键的区域二维地震测线(位置见图2),通过精细的地震解释识别出了两个明显的小规模凹槽(图7),本次研究分别命名为西物源入口和东物源入口.随后,利用二维地震测线引层、拉通对比后发现,这两个凹槽上覆的珠江组、韩江组地层厚度明显受到了基底形态的控制,尤其是右侧凹槽上方的韩江组地层向凹槽中心楔状增厚的现象非常明显.分析认为,这两个

物源通道在 T60-T35 目的层沉积时期作为古地貌的低洼处,应是当时珠江口盆地凹陷区的主要沉积物输送通道,沉积物可以通过这两个凹槽顺利穿过北侧的隆起带,进而进入到珠一坳陷.

3.3 高精度地震沉积学分析

中新世古珠江三角洲为典型的大型海相三角 洲,与湖相三角洲相比,海相三角洲具有如下开展 地震沉积学分析的优势:① 沉积相规模较大,通 常情况下分流河道体系的规模要比陆相盆地三角 洲规模大出一个数量级,易于开展地震识别;② 物源方向较为单一和稳定,易于判断砂体展布方 向;③ 沉积相带较为稳定,砂体横向续性好.基于 此,本次研究充分利用三维地震平面信息,从传统 的"点、线、面"研究思路转换为"体、面先行,点、 线验证"的工作思路,即先从全三维地震资料入 手,通过快速获取地震属性和切片(图8和图9), 快速开展沉积单元的识别和编图;随后,充分利用 最后结合测井、岩心资料进行刻度(图8),最终通 过平面组合完成区域成果图件(图10).考虑到古 珠江三角洲覆盖三维地震工区近3万平方公里, 该工作思路使得沉积相解释的效率大大提升.

3.3.1 主河道-远端分流河道体系 分流河道体系 是三角洲关键的骨干相带,是重要的砂体输送通道,其分布范围直接决定了整个三角洲的砂体输运和展布规律.因此,准确刻画分流河道系统对于把握三角洲的整体轮廓具有至关重要的意义.但识别主分流河道的类型需要多方面的证据相互印证.在

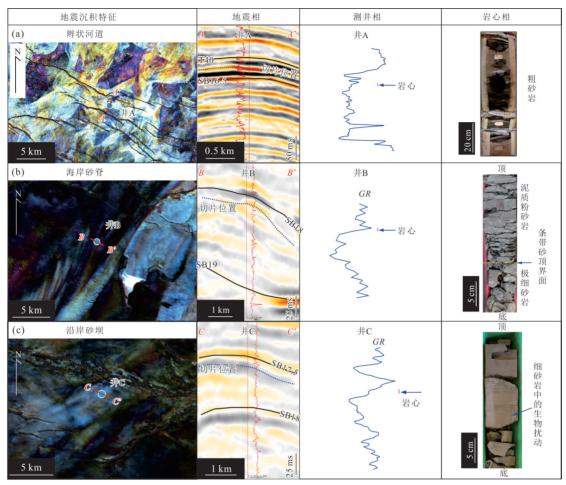


图 8 中新世古珠江三角洲典型地震地貌单元的岩心和测井响应特征

Fig. 8 Core and well log motifs of typical depositional elements of the Miocene Pearl River delta

RGB融合切片上我们可以看到多期大规模的分流河道体系(图 9e 和 9g). 主干分流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. 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. 测井伽马(GR)曲线上显示为厚层(齿化)箱状砂体,从岩心上看,粒度较粗(图 8a),为正韵律细砾岩、含砾粗砂岩、中砂岩、细砂岩等,可见交错层理(图 8a),反映三角洲前缘多期水下分流河道叠置沉积的过程. 因此我们将此种地层切片上显示的大型河道形状沉积体识别为辫状河道(图 9e 和 9g).

3.3.2 条带砂体和砂坝 三角洲外缘-陆架浅海区的条带状砂体在现今海底和古代地层中均多有发现,其形态、规模和时空展布等特征是陆架区复杂水动力、沉积物供给和周缘区气候变化的综合响应,记录了丰富的地质信息(图8和图9).本次研究发现,南海北部早-中中新世陆架条带砂体在地震响应上主要由3种地震相组成,包括头部的异常强

振幅反射、中部的叠瓦状前积反射和尾部的相对弱 振幅反射(图8b).结合条带砂体在钻井和岩心的特 征,认为其沉积相类型主要为海岸砂脊沉积.结合 现代的一些典型海岸砂脊进行分析(Jackson et al., 2010),认为海岸砂脊其总体平行于滨线分布,单个 海岸砂脊宽度约为50 m,长度约为50 km,但多期复 合以后宽度可达数公里,而长度可达到数百公里 (图 9a). 研究发现,海岸砂脊形成通常与波浪作用 有关,因此,海岸砂脊的识别对于判断波浪作用 过程具有重要指示意义.同时,经过精细的层序 地层分析,提出该类型的陆架条带砂体主要发育 于强制海退体系域,是海平面下降到较低阶段的 产物.通过对条带砂体平面展布特征的总结,发 现南海北部早-中中新世陆架条带砂体整体呈 现出由东北向西南发散的特点,推测其形成演 变应该与西南方向的古水流环境密切相关.

3.3.3 古珠江三角洲宏观沉积相带分布特征 图 10以 T40层序为例,较好展示了中新世古珠江三角

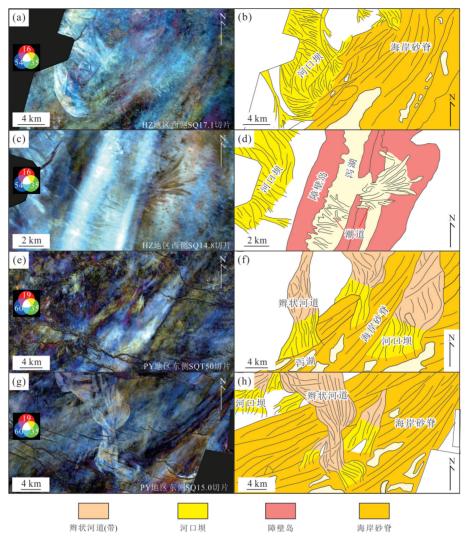


图 9 中新世古珠江三角洲典型地震地貌特征显示出河流-波浪-潮汐的混合动力过程

Fig.9 Representative seismic geomorphology of the Miocene Pearl River delta showing a mixed river-wave-tidal-dominated process

洲的宏观格局.如前所述,在珠一坳陷北部隆起带上存在两个大的物源输入通道,古珠江水系通过两个物源通道后,开始分为两个大的水系分支,进入珠一坳陷后开始分流,形成两个主要的三角洲朵体.西侧分流体系主要流经恩平凹陷,而东侧分流体系则主要流经惠州凹陷和西江凹陷,这与之前重矿物物源分析的结果非常符合.值得注意的是,部分河道在平面上呈现明显的西南向偏转现象,尤其是东侧的部分分流河道(图 10).此外,三角洲外缘的条带砂体也呈现出一定的分布特征,主要表现为前积发散方向主要呈 NE-SW 向,按照海岸砂脊的形成规律,推测其可能受到了西南向古水流的控制作用.

4 讨论

4.1 古珠江三角洲"双支主控"的沉积格局

本次研究采用地震沉积学研究手段,通过区域分频RGB融合切片的拼接,精度复现了中中新世古珠江三角洲的精细沉积面貌,精细揭示了古珠江三角洲远端分流河道体系的展布特征.随后,结合重矿物资料,发现主要的远端分流河道体系发源于两个大的河道分支,确定了古珠江三角洲"双支主控"的基本沉积格局.值得注意的是,通过现代珠江流域重矿物组合分析,发现虽然同属珠江水系,但几大支流如西江、北江和东江实际具有明显差异的重矿物组合特征,总体可划分为3个不同的物源区域,包括西江上游源区、西江中下游源区、东江和北江源区等(向绪洪等,2011).

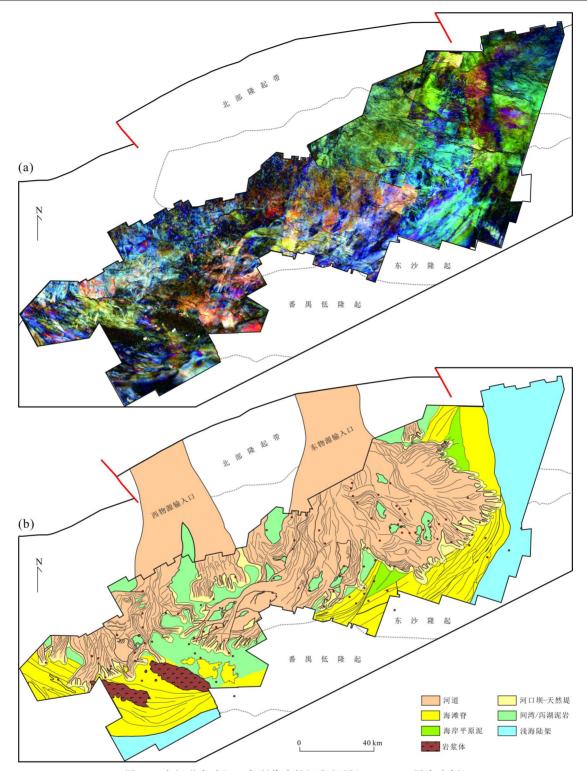


图 10 中新世古珠江三角洲代表性沉积相图(以 SQT 40 层序为例)

Fig. 10 Representative sedimentary facies map of the Miocene Pearl River delta (SQT40)

具体来说,根据重矿物组合对比,珠一坳陷西侧物源分支重矿物组合数据与西江中部区的重矿物组合较为接近(图5),而西江中游支流主要包括柳江、桂江、左江和右江4条河流,其重矿物组合及含量存在较大差异.其中,桂江的重矿物组合为锆

石+白钛石+绿帘石+电气石+金红石+钛铁矿, 特征矿物为锆石(次生矿物白钛石是钛铁矿的高度 蚀变产物,在岩心矿物薄片中有测到).因此,桂江流 域的重矿物组合和研究区西边钻井数据的相似程 度更高,且均表现为锆石相对富集的特征,故推测

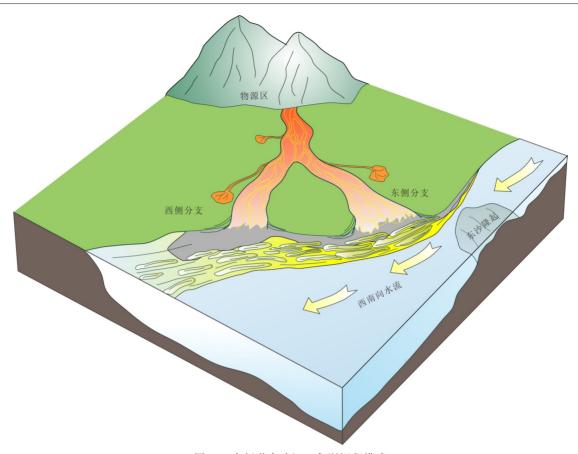


图 11 中新世古珠江三角洲沉积模式

Fig. 11 Depositonal model of the Miocene Pearl River delta

西边沉积物物源主要为西江中下游支流桂江.

珠江流域中部区重要支流北江的重矿物组合为:锆石+角闪石+电气石+磁铁矿+绿帘石+钛铁矿+白钛石+赤褐铁矿(向绪洪等,2011),而北江中下游沉积物的重矿物组合为褐铁矿+磁铁矿+角闪石+钛铁矿+云母类+电气石+绿帘石+石榴子石+红柱石+锆石(陈耀泰,1994),均与本次研究区东边三口钻井数据的重矿物组合结果相一致,因此,推测东边沉积物物源与现今的北江/东江更为接近.由此可知,在中新世时期,古珠江三角洲已经形成了类似现今的"双支"主控格局(图10和图11).

4.2 古珠江三角洲混合沉积动力过程与西南古水流

经典的三角洲分类是由 Galloway 在 1975 年提出的,按照三角洲主要沉积动力过程划分为河控、浪控和潮控等 3 种三角洲主要类型(Galloway, 1975),每种类型的三角洲在三角洲平面形态及砂体展布均具有较大差异.虽然该分类模型在长期内有效指导了三角洲沉积研究,但近年来研究发现,

三角洲沉积系统内通常很难是单一过程的表现,而 更普遍的现象是具有河流、波浪和潮汐的共同作用 (Ainsworth et al., 2011; Rossi and Steel, 2016;李小平等,2016).同时,由于主导性沉积过程在时空尺度内的频繁变化,导致河流-波浪-潮汐的混合过程极为复杂,而在古代沉积地层中如何准确识别也是近年来沉积学领域研究的热点问题.

考虑到岩性和沉积层理与特定沉积动力环境密切相关,近年来利用岩心资料研究混合动力过程的实例已较多(Rossi and Steel, 2016; Peng et al., 2020),但是针对地震资料研究仍然较少,其中的核心难点是如何从地震资料中有效获取沉积动力过程的信息.考虑到海域较大的井距,本次研究认为从地震平面信息出发,通过精细地貌特征与现代沉积单元的类比进而建立判别指标无疑是重要途径.实际上,地震地貌信息中蕴含了多种判断沉积动力过程的标志(Darmadi et al., 2007; Bourget et al., 2014; Paumard et al., 2020).例如,对于河控三角洲来说,其最重要的标志是分流河道的形成,因此导致其在地震地貌特征上显示出河道数目多、且具有

明显分流特征、河道宽度向末端逐渐变小等特征, 部分地震切片明显的"鸟足状"分叉特征是河控三 角洲最重要的识别标志(Paumard et al., 2020);对 于浪控三角洲来说,分流河道系统不发育,因此较 少出现河道分流或分叉现象,通常仅仅发育有数量 较少的主干河道,而与波浪作用最为相关的沉积单 元是海岸砂脊、海岸砂坝等平行岸线的条带砂体, 因此如果在地震切片上识别出了上述条带状单元 无疑是浪控三角洲和波浪作用过程的有利证据 (图8和图9).前已述及,对于古珠江三角洲来说, 大型河道体系和条带砂体在多个层序内均有出 现,因此河流和波浪的混合应是古珠江三角洲的 主要沉积动力类型(图10和图11),但值得注意的 是,本次研究在部分层序内也揭示出了典型的 潮汐水道特征,表明潮汐作用可以在部分区域 或时段内在古珠江三角洲内留下沉积记录.例 如吴静等(2021)针对阳江凹陷的研究表明该区 域在中新世期间存在较强的潮汐动力过程,并 且形成了大型的潮汐沉积体系.本次研究中在 三维地震资料中揭示出了明显的退潮三角洲, 同样证实了潮汐水动力的存在(图 9c 和 9d).

前已述及,古珠江三角洲在宏观尺度上显示 出明显的西南向偏转特征,且条带砂体的展布特 征也显示其可能是受到西南向古水流的影响(图 11). 因此, 西南向古水流系统可能是中新世古珠 江三角洲形成演变过程中另外一个不可忽视的沉 积动力过程(图11).依据与现今南海环流状况的 类比,西南向古水流系统可能包括了沿岸流、广东 沿岸流(冬季)、黑潮南海分支向陆架区的侵入以 及从吕宋海峡生成并向西传播的内波等(图1), 并且这些水流在空间上依次覆盖了内陆架至陆架 边缘区域,组成了覆盖陆架区的西南向流场.虽然 不同时期的陆缘常常受到变化的海平面升降作用 影响,但是相关沉积体系可以随着海平面变化,而 在不同时间和空间范围内受到这些水流的影响. 可以推断,这种西南向流场将深刻的影响古代沉 积记录,并对古珠江三角洲-陆架沉积体系造成明 显的控制作用.值得注意的是,He et al.(2017)通 过对晚中新世古珠江三角洲的层序-沉积解剖, 提出西南向古水流出现的时间大概为13.8 Ma. 本次研究发现,该古水流系统形成的时间可 能更早,在大约23 Ma左右已经开始明显影响 古珠江三角洲的平面形态和砂体展布.

4.3 构造活动对古珠江三角洲的影响

前已述及,针对多个层序的古珠江三角洲分流河道体系的刻画显示出整个河道体系具有明显的西南向偏转特征(图 10 和图 11).除了西南向古水流的贡献外,本次研究认为,构造和陆架地形对河道体系的发育也具有重要的控制作用.陆架区的地形地貌特征,尤其是陆架宽度、陆架坡度等参数,可明显影响后续流经河道体系的形态、弯曲度、宽深比、砂体叠置关系等.Miall(2002)研究认为构造走向将在很大程度上决定主要河道的流向.Maynard(2006)针对中新世墨西哥湾陆架区河道体系的研究发现,随着生长断层活动的增强并导致地形坡度的增加,河道体系弯曲度明显增加以响应于新的河流均衡面的形成.

其中,对古珠江河道系统影响最大的无疑是东沙隆起的逐渐抬升运动(Lüdmann et al., 2001; Zhuo et al., 2015).刘安等(2011)将东沙隆起地区的构造演化分为5个主要的阶段,包括白垩纪挤压阶段、古新世-早渐新世伸展断陷阶段、早渐新世末期抬升剥蚀阶段、晚渐新世-中新世快速的裂后沉降阶段、晚中新世以来断块升降阶段等.针对T60-T35目的层来说,普遍认为在其沉积时期(晚渐新世至中中新世)东沙隆起以沉降作用为主(吴时国等,2004;刘安等,2011),因此推测对古珠江三角洲分流河道体系的贡献应小于西南向古水流.此外,值得注意的是,河道流向向西南方向偏转的现象也可能与北半球科氏力的作用及南海北部陆架环流的方向有关.

5 结论

(1)综合利用重矿物、岩心、钻井和大范围 三维地震数据,采用地震沉积学分析手段精度 复现了中中新世古珠江三角洲的宏观沉积格局 的精细相带展布.重矿物数据分析结果显示,古 珠江远端分流河道体系主要发源于西侧、东侧 两个主要的河道分支,进而确定了古珠江三角 洲"双支主控"的基本格局,且两侧区域的重矿 物组合特征与现代西江、东-北江分别相似.

(2)针对古珠江三角洲分流河道和外缘条带砂体精细的地震地貌分析,显示出其可能受到河流-波浪-潮汐的混合动力过程的影响.此外,通过古珠江分流河道偏转、条带砂展布特征分析,推测西南向古水流对古珠江三角洲的沉积演变具有重要的

- 控制作用,且这种影响可能自大约23 Ma已经开始.
- (3)针对 T60-T35 目的层来说,东沙隆起区域以构造沉降为主,对于三角洲西南向偏转的贡献应小于西南向古水流.

致谢:感谢期刊编辑和两位审稿人对稿件 提出的宝贵修改意见!

References

- Ainsworth, R.B., Vakarelov, B.K., Nanson, R.A., 2011. Dynamic Spatial and Temporal Prediction of Changes in Depositional Processes on Clastic Shorelines: Toward Improved Subsurface Uncertainty Reduction and Management. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 95: 267–297. https://doi.org/10.1306/06301010036
- Bourget, J., Ainsworth, R. B., Thompson, S., 2014. Seismic Stratigraphy and Geomorphology of a Tide or Wave Dominated Shelf-Edge Delta (NW Australia): Process-Based Classification from 3D Seismic Attributes and Implications for the Prediction of Deep-Water Sands. *Marine and Petroleum Geology*, 57:359—384. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.05.021
- Catuneanu, O., 2006. Principles of Sequence Stratigraphy. Elsevier, Amsterdam, 375.
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., et al., 2009.

 Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy.

 Earth Science Review, 92: 1—33. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.003
- Chen, H., Xie, X. N., Mao, K. N., et al., 2020. Depositional Characteristics and Formation Mechanisms of Deep-Water Canyon Systems along the Northern South China Sea Margin. *Journal of Earth Science*, 31(4): 808—819. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1284-z
- Chen, Y. T., 1994. Character of the Heavy Mineral in the Surface Sediment of Lingding Yang in the Pearl River Mouth and Their Reflection to the Invasion of Shelf's Water. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 33 (4):103—110 (in Chinese with English abstract).
- Darmadi, Y., Willis, B. J., Dorobek, S. L., 2007. Three Dimensional Seismic Architecture of Fluvial Sequences on the Low-Gradient Sunda Shelf, Offshore Indonesia. *Journal of Sedimentary Research*, 77(3): 225—238. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.05.005
- Galloway, W.E., 1975. Process Framework for Describing the Morphologic and Stratigraphic Evolution of Deltaic Depositional Systems. Houston Geological Society, Houston, 87—98.

- Gao, Y.D., Zhang, X.T., Li, Z.G., et al., 2021. Variability in Sequence Stratigraphic Architecture of Lower-Middle Miocene Pearl River Delta, Northern Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: Implications for Lithological Trap Development. *Earth Science*, 46(5):1758-1770 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Z.S., Li, S.T., 1997. Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Continental Margin Basin of the South China Sea. Science Press, Beijing, 532 (in Chinese).
- He, M., Zhuo, H., Chen, W., et al., 2017. Sequence Stratigraphy and Depositional Architecture of the Pearl River Delta System, Northern South China Sea: An Interactive Response to Sea Level, Tectonics and Paleoceanography. *Marine and Petroleum Geology*, 84:76—101.
- Jackson, C. A. L., Grunhagen, H., Howell, J. A., et al., 2010.3D Imaging of Lower Delta-Plain Beach Ridge: Lower Brent Group, Northern North Sea. *Journal of the Geological Society London*, 167:1225—1236. https://doi.org/10.1144/0016-76492010-053
- Jiao, P., Guo, J.H., Wang, X.K., et al., 2018. Detrital Zircon Genesis and Provenance Tracing for Reservoirs in the Lower Zhujiang Formation in Hanjiang-Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(2): 239-253 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.P., Liu, B. J., Ding, L., et al., 2016. Depositional Elements Definition of Marine Delta and Significance to Sand Body Correlation in Petroleum Exploration: From Hydrodynamic Analysis on Modern Pearl River Delta. Acta Sedimentologica Sinica, 34(3): 555-562 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.G., Ding, L., Li, X.P., et al., 2022. Sedimentary Characteristics and Controlling Factors of the Western Zhu I Depression during the Early-Middle Miocene, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Palaeogeogra*phy, 24(1):99-111 (in Chinese with English abstract).
- Liang, W., Li, X.P., 2020. Lithological Exploration and Potential in Mixed Siliciclastic-Carbonate Depositional Area of Eastern Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 45(10):3870—3884 (in Chinese with English abstract).
- Liu, A., Wu, S.M., Cheng, W.H., et al., 2011. Tectonic Subsidence History and Dynamic Mechanism of the Dongsha Rise in the Zhujiang River Mouth Basin. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(6):117—124 (in Chinese with English abstract).
- Luan, X.W., Peng, X.C., Wang, Y.M., et al., 2010.Characteristics of Sand Waves on the Northern South China Sea Shelf and Its Formation. *Acta Geologica Sinica*, 84 (2):209-245 (in Chinese with English abstract).

- Lüdmann, T., Wong, H.K., Wang, P., et al., 2001. Plio-Quaternary Sedimentation Processes and Neotectonics of the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Marine Geology*, 172: 331—358. https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00129-8
- Maynard, J.R., 2006. Fluvial Response to Active Extension: Evidence from 3D Seismic Data from the Frio Formation (Oligo Miocene) of the Texas Gulf of Mexico Coast, USA. *Sedimentology*, 53:515—536. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00782.x
- Mi, L.J., Zhang, X.T., Ding, L., et al., 2018. Distribution Characteristics and Exploration Strategy of Middle -Shallow Lithologic Reservoirs in Offshore Mature Exploration Areas: A Case Study on Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin. *China Petroleum Exploration*, 23 (6): 10-19 (in Chinese with English abstract).
- Miall, A.D., 2002. Architecture and Sequence Stratigraphy of Pleistocene Fluvial Systems in the Malay Basin, Based on Seismic Time-Slice Analysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 86: 1201—1216. https://doi.org/10.1306/61EEDC56 173E 11D7 8645000102C1865D
- Paumard, V., Bourget, J., Payenberg, T., et al., 2020.Controls on Deep-Water Sand Delivery beyond the Shelf Edge: Accommodation, Sediment Supply, and Deltaic Process Regime. *Journal of Sedimentary Research*, 90 (1):104-130. https://doi.org/10.2110/jsr.2020.2
- Peng, Y., Olariu, C., Steel, R.J., 2020.Recognizing Tideand Wave-Dominated Compound Deltaic Clinothems in the Rock Record. *Geology*, 48(12):1149—1153. https:// doi.org/10.1111/sed.12240
- Posamentier, H. W., Allen, G. P., 1999. Siliciclastic Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications. SEPM Concepts Sedimentology Paleontology, 7:210. https://doi.org/10.2110/csp.99.07
- Rossi, V.M., Steel, R.J., 2016. The Role of Tidal, Wave and River Currents in the Evolution of Mixed-Energy Deltas: Example from the Lajas Formation (Argentina). Sedimentology, 63(4): 824-864. https://doi.org/10.1111/sed.12240
- Shao, L., Cui, Y.C., Qiao, P.J., et al., 2019. Implications on the Early Cenozoic Palaeogeographical Reconstruction of SE Eurasian Margin Based on Northern South China Sea Palaeo-Drainage System Evolution. *Journal of Paleogeography*, 21(2): 216-239 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Pang, X., Qiao, P.J., et al., 2008.Sedimentary Filling of the Pearl River Mouth Basin and Its

- Response to the Evolution of the Pearl River. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(2): 179—185 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Ding, L., Zhang, X.Z., et al., 2022. Key Technologies of Lithologic Trap Exploration in Marine Delta of Enping Sag in Pearl River Mouth Basin. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 19(1): 44-53 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Zhang, X.Z., Bai, H.J., et al., 2021. Miocene Tidal Control System and Its Lithologic Trap Exploration Significance in Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 46(10): 3673—3689 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S.G., Liu, Z., Wang, W.Y., et al., 2004.Late Cenozoic Neotectonics in the Dongsha Islands Region and Its Responses to Collision between Chinese Continental Margin and Luzon. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 35(6):481-490 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, X.H., Shao, L., Qiao, P.J., et al., 2011. Characteristics of Heavy Minerals in Pearl River Sediments and Their Implications for Provenance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(6): 27—35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.T., Li, X.P., Xuan, C.J., et al., 2021. Exploration Practice and Direction of Lithologic Reservoirs in Non-Source Rock Strata in Shallow Water Areas of the Eastern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 42(6): 695—707 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Shao, L., Qiao, P.J., et al., 2015. Characteristics of Detrital Zircon U-Pb Geochronology of the Pearl River Sands and Its Implication on Provenances. *Journal of Tongji University* (*Natural Science*), 43(6):915—923 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M.Z., Graham, S., Pang, X., et al., 2010.Characteristics of Migrating Submarine Canyons from the Middle Miocene to Present: Implications for Paleoceanographic Circulation, Northern South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 27(1): 307-319. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.05.005
- Zhuo, H.T., Wang, Y.M., Shi, H.S., et al., 2015. Contrasting Fluvial Styles across the Mid-Pleistocene Climate Transition in the Northern Shelf of the South China Sea: Evidence from 3D Seismic Data. Quaternary Science Reviews, 129: 128-146. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.10.012

附中文参考文献

陈耀泰,1994.珠江口伶仃洋表层沉积物的重矿物特征及其

- 对陆架水入侵的反映.中山大学学报(自然科学版),33 (4):103-110.
- 高阳东,张向涛,李智高,等,2021.珠江口盆地恩平凹陷北带下-中中新统层序构型及其差异性分析:对岩性圈闭发育的启示.地球科学,46(5):1758-1770.
- 龚再升,李思田,1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集,北京:科学出版社,532.
- 焦鹏,郭建华,王玺凯,等,2018.珠江口盆地韩江-陆丰凹陷珠江组下段碎屑锆石来源与储层物源示踪.石油与天然气地质,39(2):239-253.
- 李小平,柳保军,丁琳,等,2016.海相三角洲沉积单元划分及 其对勘探砂体对比的意义——基于现代珠江三角洲沉 积水动力综合研究.沉积学报,34(3):555-562.
- 李智高,丁琳,李小平,等,2022.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.古地理学报,24(1): 99-111
- 梁卫,李小平,2020.珠江口盆地东部碎屑岩-碳酸盐混合沉积区岩性油气藏形成地质条件与潜力.地球科学,45 (10):3870-3884.
- 刘安,吴世敏,程卫华,等,2011.珠江口盆地东沙隆起的沉降 史及其动力机制.海洋学报,33(6):117-124.
- 栾锡武,彭学超,王英民,等,2010. 南海北部陆架海底沙波基本特征及属性. 地质学报,84(2):209-245.
- 米立军,张向涛,丁琳,等,2018.海上成熟探区中浅层岩性

- 油气藏分布特点与勘探策略.中国石油勘探,23(6):10-19
- 邵磊,崔宇驰,乔培军,等,2019.南海北部古河流演变对欧亚大陆东南缘早新生代古地理再造的启示.古地理学报,21(2):216-239.
- 邵磊, 庞雄, 乔培军, 等, 2008. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变, 沉积学报, 26(2): 179-185.
- 吴静,丁琳,张晓钊,等,2022.珠江口盆地恩平凹陷海相三角 洲岩性圈闭勘探的关键技术.长江大学学报(自然科学版),19(1):44-53.
- 吴静,张晓钊,白海军,等,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.
- 吴时国,刘展,王万银,等,2004.东沙群岛海区晚新生代构造特征及其对弧-陆碰撞的响应.海洋与湖沼,35(6):481-490.
- 向绪洪, 邵磊, 乔培军, 等, 2011. 珠江流域沉积物重矿物特征 及其示踪意义. 海洋地质与第四纪地质, 31(6): 27-35.
- 张向涛,李小平,玄昌姬,等,2021.南海东部浅水区非烃源岩层系岩性油藏勘探实践与方向.石油学报,42(6):695-707.
- 赵梦, 邵磊, 乔培军, 等, 2015. 珠江沉积物碎屑锆石 U-Pb年龄特征及其物源示踪意义. 同济大学学报(自然科学版), 43(6): 915-923.