



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

杜晓东, 彭光荣, 吴静, 蔡国富, 汪晓萌, 索艳慧, 周洁

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

DU Xiaodong, PENG Guangrong, WU Jing, CAI Guofu, WANG Xiaomeng, SUO Yanhui, and ZHOU Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021071301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021071301

# 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

杜晓东<sup>1</sup>, 彭光荣<sup>1</sup>, 吴静<sup>1</sup>, 蔡国富<sup>1</sup>, 汪晓萌<sup>1</sup>, 索艳慧<sup>2,3</sup>, 周洁<sup>2,3</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司南海东部石油研究院, 深圳 518054
2. 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

**摘要:** 阳江东凹为近年来珠江口盆地取得重要勘探突破的凹陷。为阐明阳江东凹始新统文昌组-恩平组物源区、物源转换等源汇过程,以锆石 U-Pb 定年为主要技术手段,对研究区文昌组和恩平组 7 件砂岩的碎屑锆石形态和年龄进行了分析。结果表明,(1)在文昌组时期,阳江东凹以周缘凸起的中生代岩浆岩为物源区,为珠江口盆地内部(简称“盆内”)近物源输入,且物源输入量小,利于半-深湖相烃源岩的发育。文昌组的优质烃源岩为本地区油气勘探提供了物质基础。(2)在恩平组下段沉积期,凹陷主体的物源来自阳江-一统暗沙断裂带西侧较远区域出露的加里东晚期岩浆岩或其再循环沉积物,局部仍由周缘凸起供源,洼陷由盆内近物源转变为盆内远物源为主;恩平组上段沉积期,洼陷兼具盆内物源和珠江口盆地外部(简称“盆外”)物源的贡献,其中盆外物源来自华南板块,并且从该时期开始,华南板块物源供给增强,并逐渐控制了整个凹陷的沉积充填。整个恩平组时期,物源供给持续增强及控洼断裂活动性减弱造成洼陷被浅水辫状三角洲所主导。

**关键词:** 始新统;源汇过程;碎屑锆石 U-Pb 定年;物源示踪;物源转换;珠江口盆地

中图分类号: P736.21 文献标识码: A

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

DU Xiaodong<sup>1</sup>, PENG Guangrong<sup>1</sup>, WU Jing<sup>1</sup>, CAI Guofu<sup>1</sup>, WANG Xiaomeng<sup>1</sup>, SUO Yanhui<sup>2,3</sup>, ZHOU Jie<sup>2,3</sup>

1. Nanhai East Petroleum Research Institute, Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Shenzhen 518054, China
2. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE and College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

**Abstract:** Important breakthroughs have been achieved in hydrocarbon exploration recently in the Eastern Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin. In order to clarify the provenance of sediments and the process of provenance transition of the Eocene Wenchang-Enping Formation in the Eastern Yangjiang Sag, the detrital zircon morphology and ages of 7 sandstones from the Wenchang Formation and the Enping Formation are analyzed, with zircon U-Pb dating method. The results show that: (1) the sediments of the Wenchang Formation are sourced from some peripheral uplifts consisting of Mesozoic magmatic rocks. They are called in-basin provenances in this paper, which, with limited input, is beneficial to the formation of semi-deep lacustrine source rocks. The sediment source as such founded the material basis for petroleum generation in this area. (2) During the time of Early Enping Period, the provenance of the sag is dominated by Caledonian magmatic rocks or their recycled sediments exposed in the area far to the west of the Yangjiang-Yitong Fault Zone. Even the sediments for some small areas are still supplied by the peripheral uplifts, the basin provenances had changed from near-source to far-source ones. While the upper member of the Enping Formation was deposited, the sag is filled by the materials from both South China plate and peripheral uplifts with the gradually increase of material supply from the South China Plate. Both the enhancement of material supply and the weakening of sag-controlling faults lead to the sag dominated by shallow braided delta during the whole Period of Enping Formation.

**Key words:** Eocene; source-sink process; U-Pb dating of detrital zircon; provenance; provenance transition.; Pearl River Mouth Basin

资助项目: 中海石油(中国)有限公司重大生产科研项目“珠江口盆地(东部)浅水区古近系油气成藏条件及勘探突破方向”(SCKY-2020-SZ-21)

作者简介: 杜晓东(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事珠江口盆地石油地质研究工作, E-mail: duxd5@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021-07-13; 改回日期: 2021-08-25. 文凤英编辑

含油气盆地的物源区变化深刻影响着盆地的沉积充填和烃源岩发育条件。通过古地貌重建、沉积岩碎屑组分、地球化学、重矿物、碎屑锆石 U-Pb 定年等多种分析手段,可以研究盆地不同地质时期的物源区和沉积充填演化过程。其中,沉积岩中的碎屑锆石分布广泛、稳定性强,受风化、剥蚀、搬运及再沉积的影响小,能更好地保存源区信息,并且随着锆石 U-Pb 年龄测试分析技术的发展,其成分、形态、年龄分析等在盆地沉积物源区示踪方面的作用越来越大<sup>[1-4]</sup>。

阳江东凹是珠江口盆地珠三坳陷最东端的次级构造单元,其油气勘探始于 1979 年,但在 2018 年以前的将近 40 年里没有实现商业勘探突破,一直被认为是一个边缘洼陷,油气勘探价值小,因此仅有少数学者在洼陷结构、构造特征和勘探潜力等方面进行了初步研究<sup>[5]</sup>。自 2018 年开始,阳江东凹接连取得 Y20-4、Y20-5 等多个油田的重要勘探发现,累计探明地质储量达 5000 万 m<sup>3</sup>,并且这些油田以中浅层高孔渗的中—轻质油藏为主,具有较高的经济价值,推动了新油田群的规划和建设,使得阳江东凹迅速成为油气勘探的热点地区<sup>[6-18]</sup>。

现有研究表明,在断陷演化阶段,珠江口盆地为隆坳相间的地貌格局,各个凹陷具有弥散性、带状分布的特征,凹陷的沉积物以相邻古隆起的剥蚀物为主;在拗陷演化阶段,盆地发生整体沉降,物源区整体发生由近到远的变化;同时,古近纪晚期开始,整个盆地基本位于海平面之下,物源逐渐转变为以北侧海南陆地物源为主<sup>[19-22]</sup>。阳江东凹位于珠一坳陷和珠三坳陷交界处,被南海北部中—新生代继承性深大断裂——阳江—统暗沙断裂带所分割,且凹陷中—东段处于阳江—统暗沙断裂带影响范围内<sup>[23-26]</sup>。凹陷在构造控制下的古近系物源特征及沉积充填演化过程,有助于理解区域的构造-沉积转换过程,也对油气勘探指导有重要意义。本文选取阳江东凹钻遇始新统文昌组-恩平组的 4 口钻井、7 个砂岩样品进行碎屑锆石 U-Pb 年龄研究,以探讨其潜在物源区及物源-沉积转换等源汇过程。

## 1 区域地质概况

阳江东凹位于珠江口盆地珠三坳陷北东端,整体呈北东-南西走向,南北两侧分别为阳江低凸起、恩平 14 洼及阳春低凸起、恩平 27 洼,东西两侧分别为恩平 15 低凸起和阳江中低凸起,并且根据洼陷结构的差异分为 4 个次洼,自西向东依次为阳

江 24 洼、恩平 19 洼、恩平 20 洼和恩平 21 洼。其中,位于凹陷东段的恩平 20 洼和恩平 21 洼为一组控洼断裂倾向相对的半地堑组合,恩平 21 洼可进一步划分为恩平 21 西洼和恩平 21 东洼<sup>[7]</sup>。本文进行沉积岩样品碎屑锆石 U-Pb 定年的 4 口钻井就位于恩平 20 洼和恩平 21 洼(图 1)。

阳江东凹是在古生界浅变质岩和中生界花岗岩基底上发育的新生代陆缘拉张型断陷,中生代以来受太平洋构造域及特提斯构造域两大汇聚系统的作用,经历了始新世裂陷、渐新世—早中新世拗陷及晚中新世—现今新构造运动 3 个构造阶段,并受阳江—统暗沙断裂带的影响,凹陷破碎且各次洼的结构亦有较大差别,具有复杂的构造背景和演化历史<sup>[6]</sup>。新生代的沉积地层从老到新分别为文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系,其中古近系文昌组可分为文昌组三段、文昌组二段和文昌组一段(分别简称为文三、文二和文一),恩平组可分为恩平组下段和恩平组上段(分别简称为恩下和恩上)。文昌组—恩平组为断陷阶段,控洼断裂活动强烈,在洼陷内产生较大的可容空间;但恩平组中晚期则开始向拗陷阶段过渡,凹陷发生整体沉降,逐渐沉降于水下(图 2)。

## 2 样品与实验方法

对位于阳江东凹恩平 20 洼和恩平 21 洼的 4 口井总计 7 个沉积岩样品进行了碎屑锆石 U-Pb 测年,7 个样品分布于恩平组上段(3 个)、恩平组下段(2 个)、文昌组二段(1 个)和文昌组三段(1 个),每个样品的谐和年龄个数(谐和度 > 90%)均超过了 90 个,具有较强的统计意义。4 口井的位置见图 1,各井钻遇的始新统岩性剖面见图 3,其中 Y20-4 和 Y20-5 井仅钻遇恩平组上段(未钻穿),Y20-7 井钻遇恩平组上段和下段(下段未钻穿),Y21-3 井钻遇恩平组上、下段及文昌组二、三段(文昌组一段缺失)。总的来看,恩平组地层主要为砂泥互层,文昌组地层主要为厚层泥岩。7 个测试样品的取样信息见图 3 和表 1。

样品经机械粉碎、电磁分选和重液分选后,在双目镜下挑选出若干锆石,并从中随机选取 250 颗用环氧树脂固定并抛光,使其内部结构剖面充分暴露。然后对锆石靶样进行阴极发光图像采集,观察锆石内部结构,确定适合的激光打点位置。由于本文所有样品所选取的碎屑锆石大部分具有明显的岩浆振荡环带,为岩浆成因,因此一般选取靠近锆

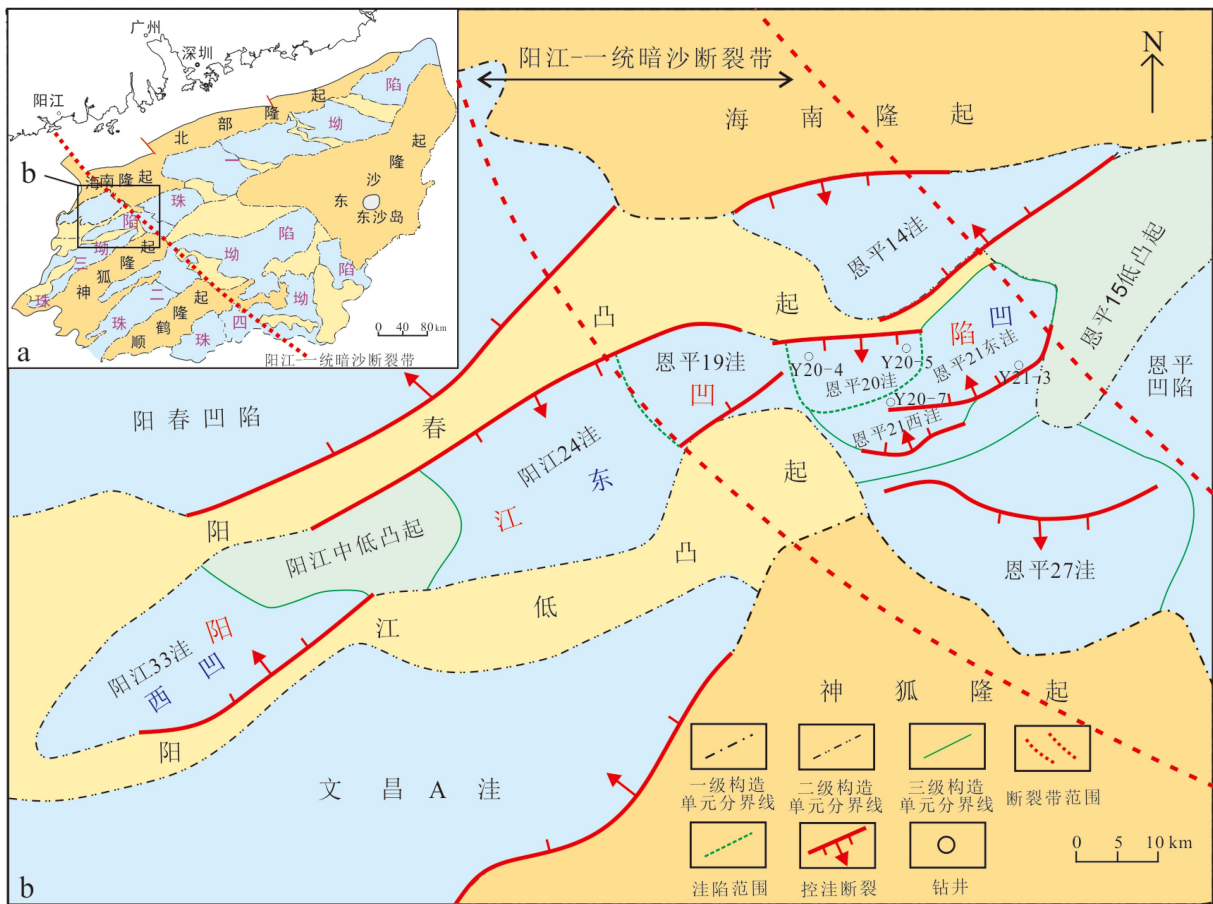


图1 阳江东凹构造单元划分

Fig.1 Tectonic map of the Eastern Yangjiang Sag

石颗粒边部的环带作为测试点,同时避开包裹体、裂隙等不利部位,上述测试点代表了最新的岩浆冷却、锆石结晶的年龄,即物源区锆石所经历的最新一期大规模岩浆活动时间。锆石 U-Pb 同位素测年是在同济大学海洋地质国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成,激光剥蚀系统为 New Wave 213 nm, ICP-MS 型号为 Thermo Elemental X-Series。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。激光斑束大小和剥蚀频率分别选用  $30\ \mu\text{m}$  和  $10\ \text{Hz}$ 。每个样品分析数据包括大约 25 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 ( $1065.4 \pm 0.3\ \text{Ma}$ ) 作外标进行同位素分馏校正,每分析 6 个样品点,分析 2 次 91500。同时,采用锆石标准 Plešovice ( $337.1 \pm 0.4\ \text{Ma}$ ) 来监测分析结果的精确度。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用 ICPMSDataCal 软件。受放射性铅同位素的影响,当年龄  $< 1000\ \text{Ma}$  时采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , 年龄  $> 1000\ \text{Ma}$  时则采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄,并根据 Kernei Density Estimation

(KDE)方法绘制锆石年龄谱图<sup>[27-29]</sup>。

### 3 碎屑锆石年龄及形态特征

测年数据经过预处理,共获得 707 个谐和年龄,其中 630 颗锆石的  $\text{Th}/\text{U} > 0.3$  (为总数的 89%), 只有 4 颗锆石的  $\text{Th}/\text{U} < 0.1$ , 说明这些锆石主要为岩浆成因,部分受变质作用影响,但纯变质成因锆石极少。7 个样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄从新生代到太古代均有分布,其中最年轻年龄为新生代 58.9 Ma (Y20-4 井恩平组上段样品),最古老年龄为新太古代 3004 Ma (Y20-5 井恩平组上段样品)(图 4)。整体来看,文昌组样品的碎屑锆石粒度为  $80 \sim 140\ \mu\text{m}$ , 柱状特征显著,晶型相对更完整,晶体边缘棱角分明,磨圆度差,而恩平组样品的碎屑锆石较文昌组略大,但晶型相对破碎,晶体磨圆度更高,说明恩平组的物源与文昌组有较大差别(图 5)。

#### 3.1 文昌组三段碎屑锆石年龄特征

Y21-3 井位于恩平 21 东洼,该井文昌组三段砂

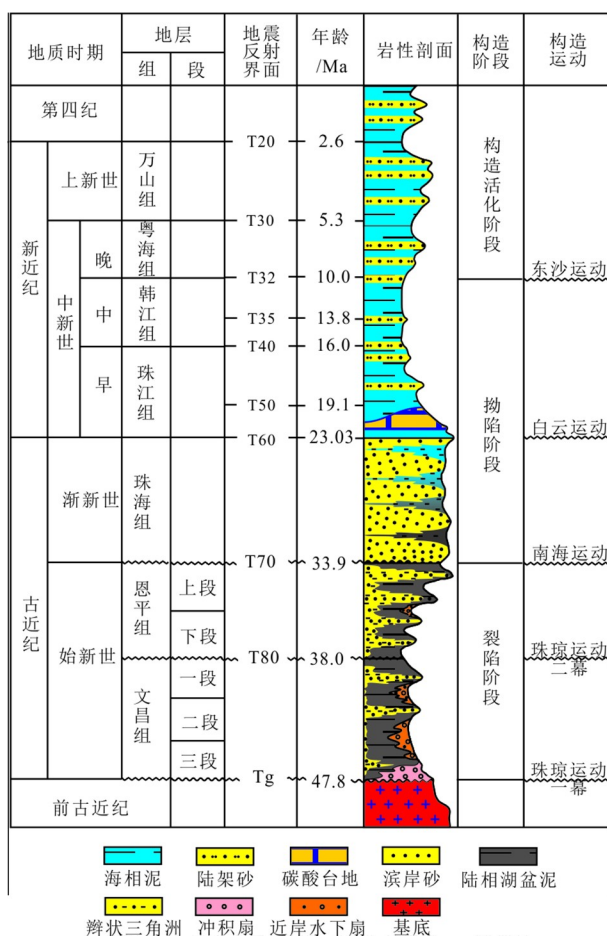


图 2 珠江口盆地阳江东凹综合地层柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the Eastern Yangjiang Sag, the Pearl River Mouth Basin

岩样品共测得 93 个锆石 U-Pb 谐和年龄, 年龄范围为 113~454 Ma, 锆石年龄较集中, 以中生代锆石为主, 占 97%(89 个), 其中侏罗纪占 88%(81 个), 白垩纪占 9%(8 个); 古生代年龄仅占 3%(二叠纪、泥盆纪及奥陶纪各 1 个)(图 6)。该样品的主峰值为 159 Ma, 次要峰值为 122 Ma(图 7)。阴极发光图像显示, 该样品中含有较多岩浆生长振荡环带明显、晶型完好、棱角分明、呈长柱状的锆石, 说明该时期的沉积物搬运距离短, 为近源沉积(图 5d)。

### 3.2 文昌组二段碎屑锆石年龄特征

Y21-3 井文昌组二段砂岩样品共测得 114 个锆石 U-Pb 谐和年龄, 年龄范围为 105~851 Ma, 锆石年龄同样较集中, 以中生代锆石为主, 占 98%(111 个), 其中侏罗纪占 74%(84 个), 较文昌组三段样品占比降低, 白垩纪占 24%(27 个), 较文昌组三段样品占比明显增加, 三叠纪占 1%(1 个); 古生代和元古代年龄仅 2 个(泥盆纪 1 个、新元古代 1 个)(图 6)。该样品的主峰值为 157 Ma, 次要峰值

为 114 Ma(图 7), 碎屑锆石的阴极发光图像特征亦与文昌组三段样品相似(图 5c), 同样表现为近源沉积的特征。

### 3.3 恩平组下段碎屑锆石年龄特征

恩平组下段有 2 口井进行了碎屑锆石 U-Pb 测年, 每口井 1 个样品, 分别为 Y21-3 和 Y20-7 井。两个样品的锆石年龄特征呈现出较大差异, 前者以中生代锆石为主, 后者则以古生代锆石为主。

Y21-3 井恩平组下段样品为花岗质砂砾岩, 主要由砾石组成, 少部分粗、巨粒, 砾石成分主要为花岗斑岩和流纹岩, 部分石英; 部分岩屑颗粒挤压变形严重, 少量泥质呈细纹状产出; 局部偶见铁方解石交代岩屑颗粒产出; 局部见少量粒间孔。该样品共测得 93 个锆石 U-Pb 谐和年龄, 年龄范围为 116~508 Ma, 同样以中生代锆石为主, 占 96%(88 个), 其中侏罗纪占 89%(82 个), 较文昌组二段样品的占比增加, 白垩纪仅占 3%(3 个), 较文昌组二段样品占比明显降低, 三叠纪占 3%(3 个); 古生代年龄占 4%(奥陶纪 4 个)(图 6)。样品的锆石年龄非常集中, 仅表现出一个峰值, 峰值年龄为 163 Ma(图 7)。锆石阴极发光图像具有棱角分明、磨圆度差的特征。上述特征反映该样品为近源、快速堆积的沉积环境, 物源区面积小。

位于恩平 21 东洼最西侧的 Y20-7 井恩平组下段样品为细砂岩, 该样品共测得 110 个锆石 U-Pb 谐和年龄, 年龄范围为 96~2437 Ma, 以古生代锆石为主, 占 72%(79 个), 其中奥陶纪最多, 占 39%(43 个), 志留纪次之, 占 20%(22 个), 其他时代的年龄较少, 占 1%~6% 不等(1~7 个不等); 中生代和元古代锆石占比接近, 分别占 14%(15 个)和 15%(16 个)(图 6)。该样品的年龄特征明显不同于前文其他 3 个样品, 主要峰值为 443 Ma, 次要峰值有多个, 年龄范围 101~243 Ma(图 7)。阴极发光图像显示, 该样品碎屑锆石的磨圆度明显好于前文其他 3 个样品, 以近似椭圆状为主, 长柱状锆石的数量已非常少, 反映该井附近的沉积物经历了较长距离的搬运或多旋回沉积过程, 且物源区与前文其他 3 个样品有较大差别(图 5b)。

### 3.4 恩平组上段碎屑锆石年龄特征

恩平组上段有 3 口井进行了碎屑锆石 U-Pb 测年, 每口井 1 个样品, 分别为 Y20-4(恩平 20 洼西端)、Y20-5(恩平 20 洼东端)和 Y20-7 井。上述 3 个样品、Y20-4 及 Y20-7 井的锆石年龄特征相似, 以中

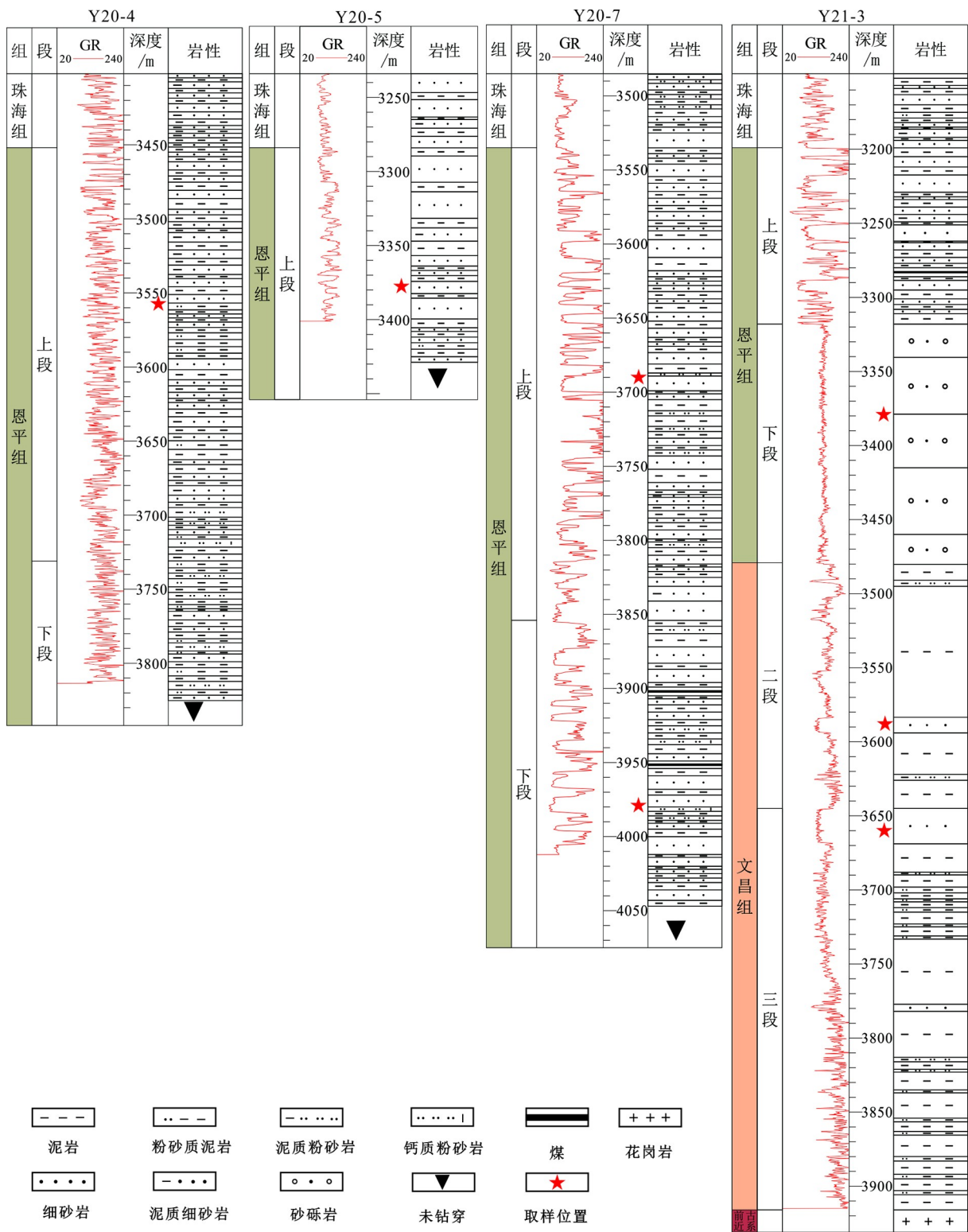


图3 4口钻井始新统地层划分与GR测井曲线剖面对比  
Fig.3 Correlation of Eocene lithological units and their GR logging data from 4 wells

生代锆石为主，而 Y20-5 井样品的碎屑锆石年龄从中生代到太古代均有，呈现出多个峰值(图 6、7)。

Y20-4 井恩平组上段样品共测得 95 个锆石 U-Pb 谐和年龄，年龄范围为 59~2574 Ma，锆石年龄较集中，以中生代锆石为主，占 89%(85 个)，其中侏

罗纪占 84%(80 个)，白垩纪占 4%(4 个)，三叠纪占 1%(1 个)；新生代年龄占 5%(5 个)；古生代、元古代和太古代年龄占 1%~2%(1~2 个)(图 6)。该样品的主峰值为 151 Ma，次要峰值为 60 Ma。该样品与前文其他样品的最大区别是出现少量新生代年

表 1 阳江东凹碎屑锆石 U-Pb 定年测试样品信息  
Table 1 Parameters of detrital zircon U-Pb dating samples of the Eastern Yangjiang Sag

位置	井号	层段	样品类型	取样中深/m	岩性	个数(谐和度>90%)
恩平20注	Y20-4	恩平组上段	岩屑	3 558	细砂岩	95
	Y20-5	恩平组上段	岩屑	3 378	细砂岩	98
恩平21注	Y20-7	恩平组上段	岩屑	3 692	细砂岩	105
		恩平组下段	岩屑	3 979	细砂岩	110
	Y21-3	恩平组下段	岩屑	3 382	砂砾岩	92
		文昌组二段	岩屑	3 588	砂砾岩	114
		文昌组三段	岩屑	3 660	中砂岩	93

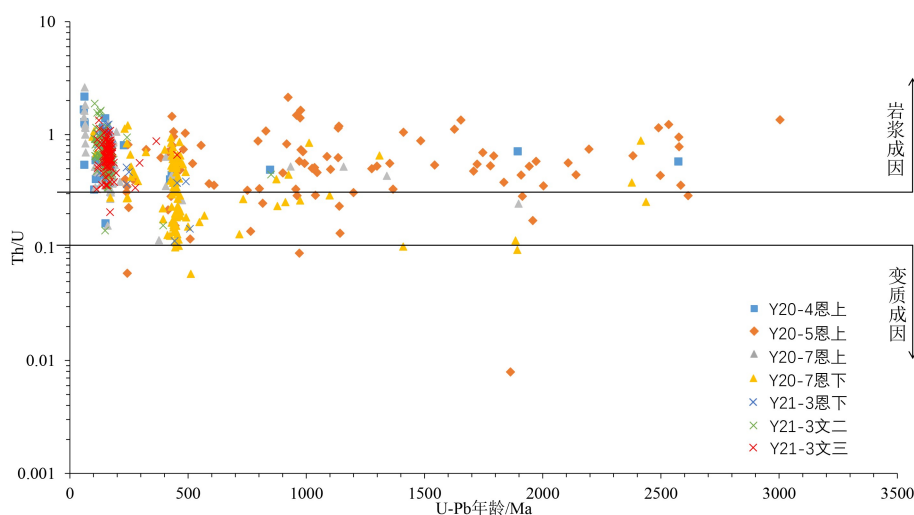


图 4 阳江东凹砂岩碎屑锆石 Th/U 值

Fig.4 Th/U ratio of detrital zircons of sandstones in the Eastern Yangjiang Sag

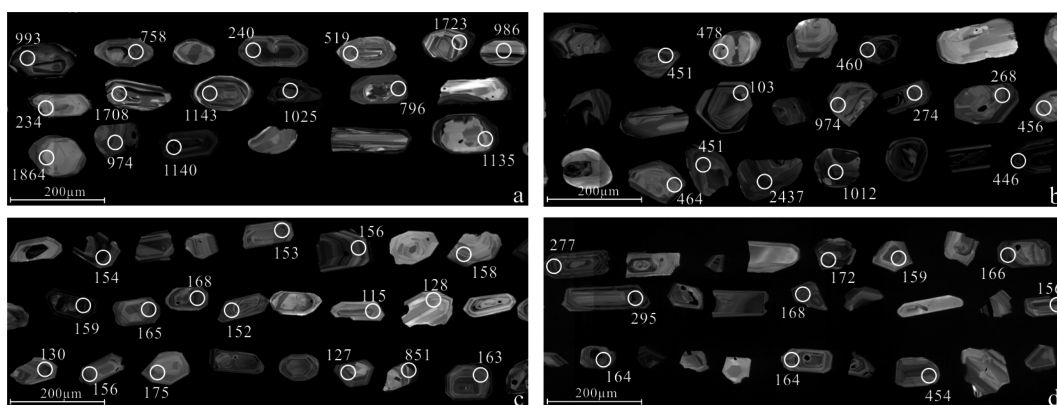


图 5 阳江东凹砂岩碎屑锆石阴极发光图像  
数字为年龄(Ma)。

Fig.5 CL images of detrital zircons of sandstones in the Eastern Yangjiang Sag

龄的碎屑锆石, 年龄范围 59~63 Ma, 属古近纪古新世(图 7)。阴极发光图像显示碎屑锆石磨圆度差, 含有较多的长柱状、晶型完整的锆石。

Y20-7 井恩平组上段样品共测得 105 个锆石 U-

Pb 谐和年龄, 年龄范围为 60~1898 Ma, 同样以中生代锆石为主, 占 82%(86 个), 其中侏罗纪占 70%(74 个); 新生代年龄占 7%(7 个), 与 Y20-4 井样品相似; 古生代和元古代年龄分别占 8%(8 个)

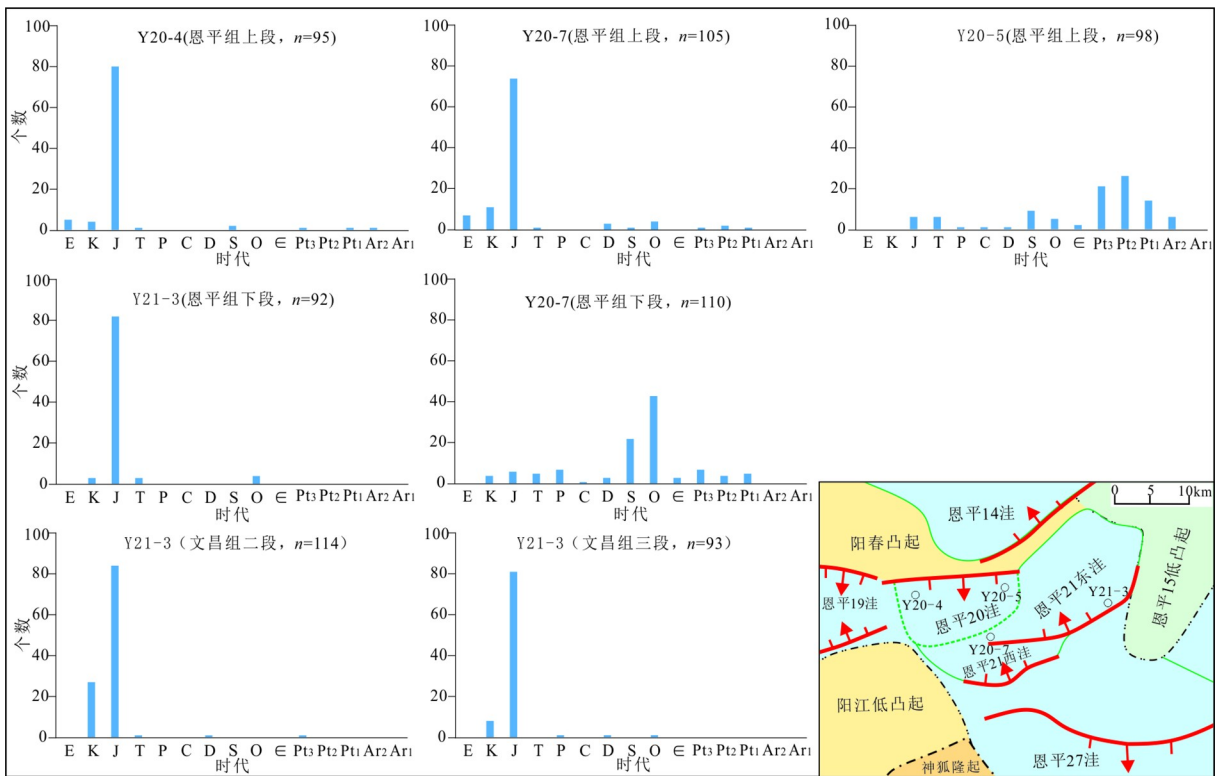


图6 阳江东凹砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

Fig.6 U-Pb age distribution of detrital zircons from sandstones in the Eastern Yangjiang Sag

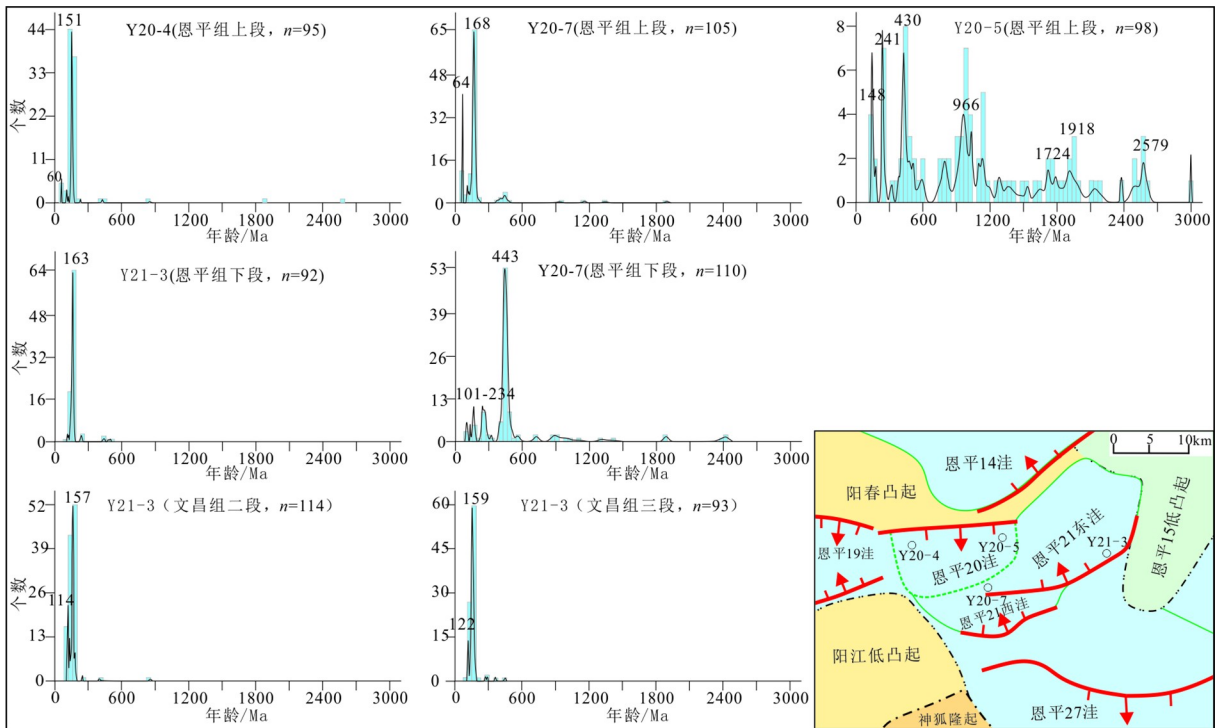


图7 阳江东凹砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄谱

(峰值年龄/Ma)

Fig.7 U-Pb age spectra of detrital zircons from sandstones in the Eastern Yangjiang Sag

和4%(4个),较Y20-4井样品略高,反映有更多的古老沉积物供源(图6、7)。

Y20-5井恩平组上段样品共测得98个锆石U-Pb谱和年龄,年龄范围为148~3004Ma,年龄分布特



征与其他样品的差异非常明显。该样品以元古代锆石为主,占62%(61个),古生代锆石次之,占19%(19个),中生代锆石占12%(12个),太古代锆石占6%(6个)(图6)。从年龄谱来看,该样品具有多峰态分布的特征,有148、241、430和966 Ma 4个主要峰值,另外还有799、1136、1724~1918、2579和3003 Ma 等多个次要峰值或年龄区间(图7)。阴极发光图像显示,该样品的碎屑锆石最破碎,几乎没有完整的长柱状锆石,磨圆度较其他样品为最好(图5a),反映沉积物经历了长距离的搬运或多旋回沉积过程。

## 4 物源示踪及源汇过程

### 4.1 潜在物源区特征

前人研究表明,包括珠江口盆地在内的南海北部新生代盆地是华南大陆向海域的自然延伸<sup>[22]</sup>。在陆内,华南板块为元古界、古生界及中生界所组成的复杂褶皱,并大量出露印支期及燕山期岩浆岩,地层年龄跨度很大<sup>[30]</sup>;在海域,南海北部以阳江—统暗沙断裂带为界,断裂带以东主要为中生代花岗岩及沉积岩基底,断裂带以西则主要为古生界浅变质岩及前寒武纪变质岩基底<sup>[31-34]</sup>。阳江东凹位于阳江—统暗沙断裂带之上,东侧为珠一坳陷,西侧为珠三坳陷,北侧靠近华南陆内,上述3个区域均有可能为阳江东凹的物源区。同时,3个区域的地层组合差别较大,所供物源的锆石年龄谱特征亦有较大差异。

(1) 阳江—统暗沙断裂带东侧物源区:该潜在物源区主要包括珠一坳陷及周缘隆起,以中生代岩浆岩为主体。区域内多口钻遇前古近系的钻井显示,中生代岩浆岩在珠江口盆地东部广泛发育,并以花岗岩为主。前人研究表明,珠江口盆地花岗岩锆石年龄有两个峰值,表现为100~130 Ma和145~165 Ma两个区间(图8b-I),分别属白垩纪和侏罗纪,表明本区主要受到晚侏罗世和早白垩世两期岩浆活动的影响。地球化学特征表明,这两期花岗岩具有火山弧、板内花岗岩的特征,属于太平洋板块俯冲背景下大陆边缘活动带中晚期的产物<sup>[33]</sup>。另外,在东沙隆起之上的潮汕坳陷则残留了较大面积的中生界海相沉积地层<sup>[35-37]</sup>。

(2) 阳江—统暗沙断裂带西侧物源区:该潜在物源区包括珠江口盆地西部、琼东南盆地、北部湾盆地及海南岛等。现有研究认为,上述新生代盆地

的基底主要由下古生界(震旦系-志留系)变质岩组成,包括变质程度不同的千枚岩、片麻岩及混合岩等,是华南加里东-海西期褶皱向海域的延伸,中生界呈零星分布<sup>[23-24,31-32]</sup>;但珠江口盆地西部(神狐隆起、珠三坳陷)及琼东南盆地多口钻遇基底探井的碎屑锆石年龄谱表现为145 Ma主峰值和240 Ma次要峰值(图8b-II、III),反映了燕山期岩浆岩在阳江—统暗沙断裂带西侧仍有较大范围展布<sup>[21-22]</sup>。海南岛大面积出露燕山期和印支期酸性岩浆岩,锆石年龄谱具明显的100 Ma和235 Ma双峰特征(图8b-IV)<sup>[38]</sup>。

(3) 华南板块(包括华夏地块和扬子地块):华南板块由北西侧的扬子地块和南东侧的华夏地块组成,两地块均有一定数量>2500 Ma的碎屑锆石数据,暗示两者都可能存在太古宙地壳基底<sup>[39-42]</sup>。新元古代,华夏地块和扬子地块沿着江山-绍兴缝合带(江绍断裂带)发生拼接,之后经历了加里东期、印支期、燕山期等多期构造-岩浆活动,碎屑锆石年龄谱具有从元古代—中生代的多个峰值<sup>[43-46]</sup>。而向珠江口盆地运输沉积物的珠江流域各支流和干流的碎屑锆石年龄谱呈现出170、260、445、840、950、1855、2495 Ma等多个峰值或区间,锆石年龄组合相比前两个潜在物源区最为复杂。而且,珠江流域东西两侧的支流也有较大差异,西部支流(西江及其上游河流)的锆石年龄跨度大,主要包括新元古代、早古生代和中生代锆石,还含有一定数量的新太古代—古元古代的锆石(图8b-V);而东部支流(北江及东江)的锆石年龄跨度相对较小,主要为早古生代和中生代锆石,少量新元古代锆石,更老的锆石数量更少(图8b-VI)<sup>[47-48]</sup>。

### 4.2 始新世源汇过程

#### 4.2.1 文昌期

新生代初期的珠琼运动一幕使珠江口盆地进入断陷演化阶段,发育了一系列NE-NEE走向的凹陷,各个凹陷具有弥散性、带状分布的特征,并以相邻古隆起的剥蚀物为主要物源<sup>[19,21-22]</sup>。位于恩平21东注的Y21-3井文昌组三段样品碎屑锆石年龄谱的主峰值为159 Ma,次要峰值为122 Ma,文昌组二段样品碎屑锆石的主峰值为157 Ma,次要峰值为114 Ma,两者年龄谱特征相似(图7),与南海北部中生代两期岩浆活动的时间(140~165 Ma和100~130 Ma)相匹配,表明阳江东凹在文昌组沉积期母岩类型单一,主要为凹陷周缘隆起的中生代岩浆岩。根据阳江东凹周缘基底花岗岩锆石U-Pb测年

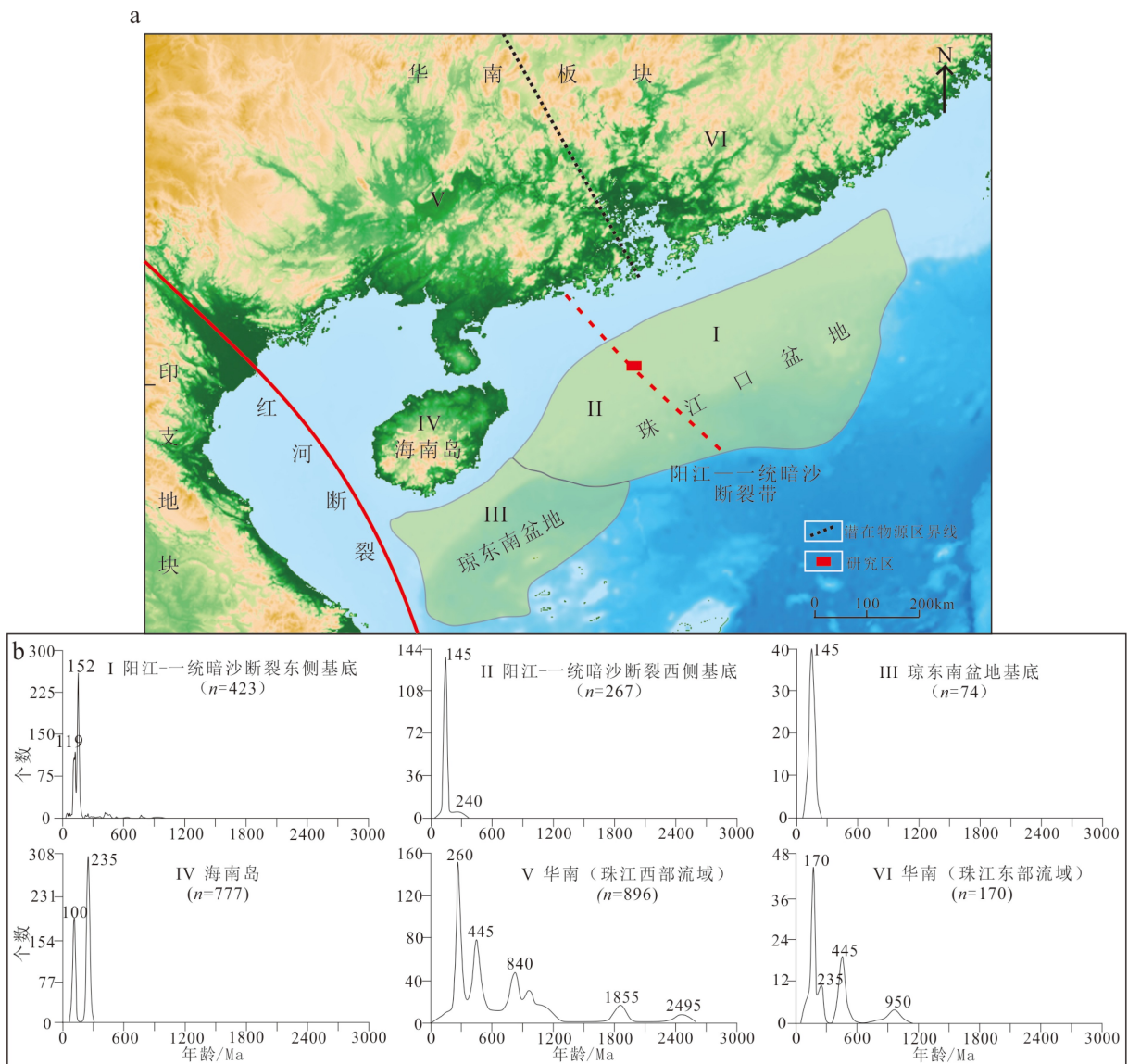


图8 潜在物源区 (a) 及相应的碎屑锆石年龄谱图 (b)

b图中, I 据本项目未发表数据, II-VI 据参考文献 [22]。

Fig.8 Potential provenances (a) and their corresponding detrital zircon age spectra (b)

结果(课题组未发表数据), 凹陷北东侧的恩平15低凸起及西南侧阳江低凸起的峰值年龄为155 Ma, 而凹陷北侧阳春凸起的峰值年龄则为110 Ma。周边花岗岩基底的锆石U-Pb年龄进一步证实了文昌组沉积期的物源主要为周缘低凸起的晚侏罗世和早白垩世岩浆岩, 为珠江口盆地内部近物源体系(简称“盆内近物源体系”), 属上文所述阳江—统暗沙断裂带东侧物源区(图9)。

文昌组为珠琼运动—幕裂陷期内形成的地层, 曾发生区域性抬升、剥蚀、岩浆活动等<sup>[16]</sup>。根据区域地质背景及控洼断层活动性, 文昌组三段为裂陷初始期, 二段为裂陷强烈期, 一段为裂陷萎缩期<sup>[13]</sup>。结合该时期古地貌, 整个文昌组时期, 恩平20洼和

恩平21洼由周缘的恩平15低凸起、阳春凸起、阳江低凸起等供源, 在控洼断裂附近发育小规模扇三角洲, 在恩平21东洼缓坡带发育范围较局限的辫状河三角洲; 同时, 洼陷周缘的低凸起供源面积小, 物源输入量有限, 利于洼陷内部形成欠补偿的沉积环境, 该时期洼陷的半—深湖相最为发育, 其中文昌组二段为裂陷高峰期, 洼陷沉积速率最大, 欠补偿的沉积环境使洼陷大面积发育半—深湖相烃源岩(图9)。Y21-3井钻遇的文昌组二段和三段地层总厚度为437 m(文昌组一段缺失, 未钻遇), 以泥岩为主, 局部夹薄层砂(图3); 泥岩的有机质丰度高(TOC平均值为2.43%)、成熟度较高( $R_o$ 为0.77%~1.2%)、以II<sub>1</sub>—I型为主, 属优质烃源岩; 生

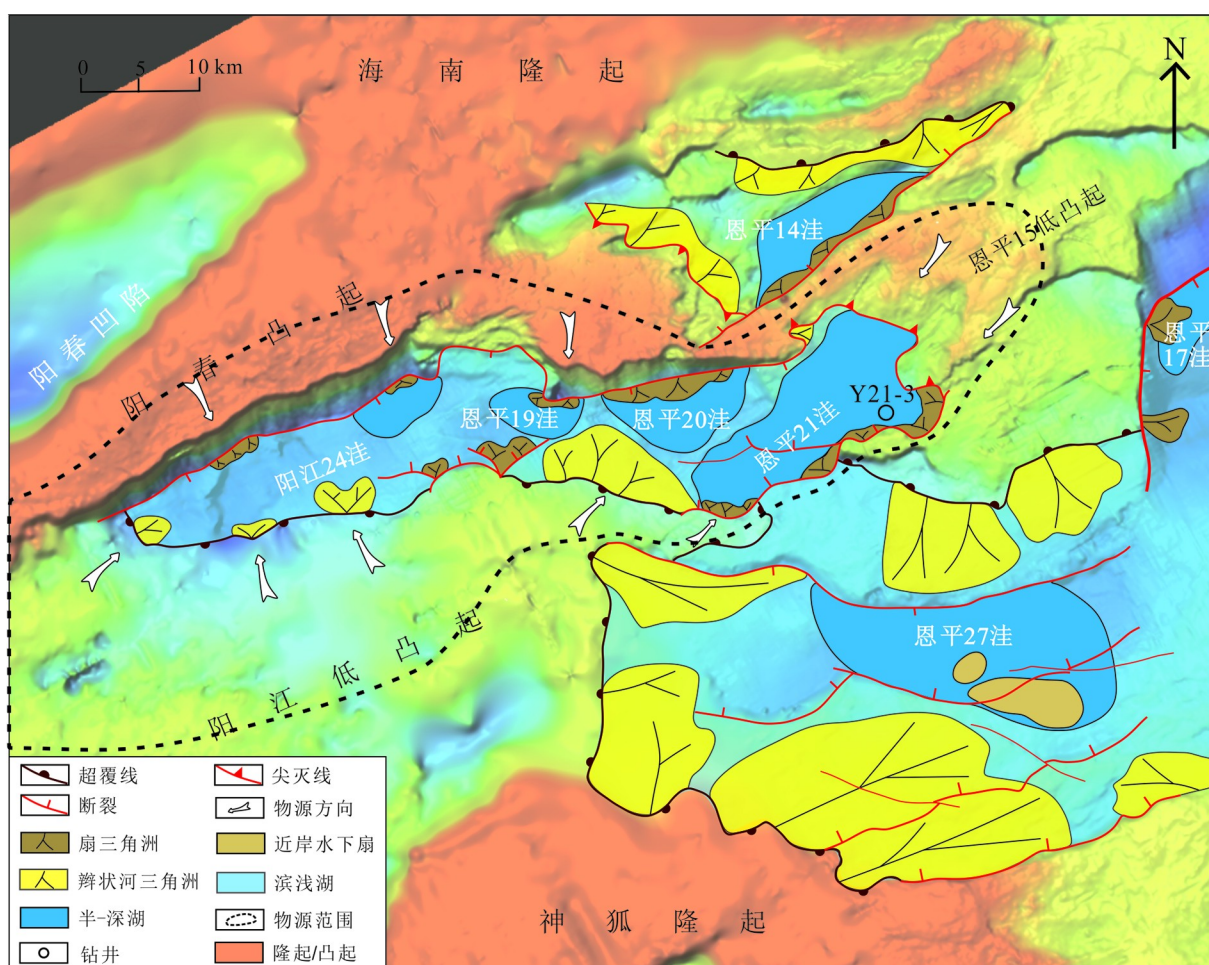


图9 阳江东凹文昌组二段盆内近物源体系源汇模式图

Fig.9 Near in-basin provenances and source-sink pattern of the Wenchang-2 Member in the Eastern Yangjiang Sag

物标志化合物特征表现为高  $C_{30}$  4-甲基甾烷, Ts 含量远高于 Tm, 高 OL 和 T 化合物含量, 具有藻类及高等植物贡献较高的特征, 整体为浅湖—半深湖相沉积环境<sup>[16]</sup>。文昌组是本区的主要烃源岩发育层段, 为本区油气勘探提供了物质基础。

#### 4.2.2 恩平期

珠琼运动二幕之后, 盆地开始由断陷向拗陷演变, 控洼断裂活动性较文昌组时期减弱, 同时盆地发生整体沉降, 湖盆面积扩大, 但水体逐渐变浅, 除较高的隆起或凸起外, 其他区域沉积了厚度不等的恩平组地层, 为“填平补齐”式沉积, 与下伏地层呈平行不整合或角度不整合接触。

恩平组下段, 恩平 21 东洼的 Y21-3 井碎屑锆石年龄谱仅有 163 Ma 这一个峰值, 并且其岩性为花岗质砂砾岩, 分选磨圆差, 与恩平 15 低凸起基底锆石年龄 155 Ma 接近, 说明该井周缘继承了文昌组沉积期的恩平 15 低凸起近距离物源供给, 但其为快速堆积的沉积环境。而位于恩平 21 东洼西段的 Y20-7 井碎屑锆石年龄谱的主要峰值为 443 Ma、次

要峰值为 101~243 Ma, 还有少量 874~2437 Ma 的年龄, 表现出与 Y21-3 井及周缘凸起截然不同的年龄谱特征(图 7)。前文述及, 洼陷周缘凸起基底花岗岩的锆石 U-Pb 测年结果为 110 Ma 和 155 Ma, 神狐隆起近洼位置的锆石年龄为 145 Ma 和 240 Ma, 说明该时期主要物源区已非阳江东凹周缘。阳江—统暗沙断裂带西侧为华南加里东-海西期褶皱向海域的延伸, Y20-7 井 443 Ma 主峰值则说明洼陷主要物源为加里东晚期岩浆岩或以其为母岩的沉积岩, 暗示了神狐隆起或珠三拗陷基底仍残存加里东期岩浆岩或以其为母岩的沉积岩, 但范围较中生代岩浆岩要局限得多。结合该时期古地貌, 阳江东凹主要物源区离洼陷距离有所增加, 为局部残留的加里东期岩浆岩或以其为母岩的沉积岩, 但仍属盆内物源。

恩平组上段, 位于恩平 20 洼西段的 Y20-4 井和靠近恩平 21 西洼的 Y20-7 井的碎屑锆石年龄谱呈现出相似的峰值特征(主要峰值 151~168 Ma, 次要峰值 60~64 Ma), 而距离这两口井约 9 km、位于恩

平 20 洼东段的 Y20-5 井的碎屑锆石年龄谱具有 4 个主要峰值、多个次要峰值的多峰态分布特征, 太古代—中生代锆石年龄均有一定的数量, 并且没有中生代末—新生代初的年龄, 呈现出与 Y20-4 井和 Y20-7 井完全不同的年龄谱特征(图 7), 说明洼陷西段和东段的物源区不同。结合前文所述潜在物源区特征, Y20-5 井的多个峰值区间说明其所在洼陷北东部分应以华南板块物源为主, 为盆外物源体系(图 10b), 并且较多的太古代—元古代年龄反映珠江流域西部支流有较大的贡献; 而 Y20-4 和 Y20-7 井所处洼陷西段以阳春凸起、神狐隆起为物源区, 为盆内物源体系, 但物源供给较恩平组上段明显减弱。因此, 恩平组上段沉积期, 洼陷具有盆内和盆外双物源区供源的特点(图 10)。

恩平组沉积期, 洼陷从文昌组沉积期以“窄盆深湖”为特征的断陷湖盆, 转变为“广盆浅湖”的坳陷湖盆沉积环境, 来自西南和北东两侧的浅水辫状河三角洲推进到恩平 20 洼和恩平 21 洼湖盆中部, 沉积了砂泥互层为主的岩性组合, 含砂率为 44%~

56%(图 3)。其中, 在恩平组下段沉积期, 神狐隆起供源面积广, 西南侧的辫状河三角洲主导沉积, 并且在湖盆沉积中心可见叠瓦状前积反射, 也证实辫状河三角洲已推进到 Y20-7 井区; 在恩平组上段沉积期, 洼陷内仍主要为辫状河三角洲沉积相带, 但与恩平组下段相比, 神狐隆起供源的西南侧辫状三角洲逐渐萎缩, 而北东侧的辫状河三角洲转换为洼陷的主体沉积, 使洼陷主要接受来自华南板块的盆外物源供给(图 10)。

通过多个层段、多口井的碎屑锆石 U-Pb 年龄分析, 阳江东凹始新世文昌组-恩平组物源存在多次转换。文昌组沉积期, 物源以洼陷周缘凸起的中生代岩浆岩为主, 为盆内近物源体系; 恩平组下段则转换为主要由阳江—统暗沙断裂带西侧较远(神狐隆起或更西)的加里东期岩浆岩(或其再循环沉积物)供源, 但整体由盆内近物源体系转变为盆内远物源体系; 恩平组上段沉积期物源再次发生转换, 洼陷西段主要由近凹的神狐隆起中生代岩浆岩供源, 洼陷东段则以华南板块为主物源区, 研究区兼

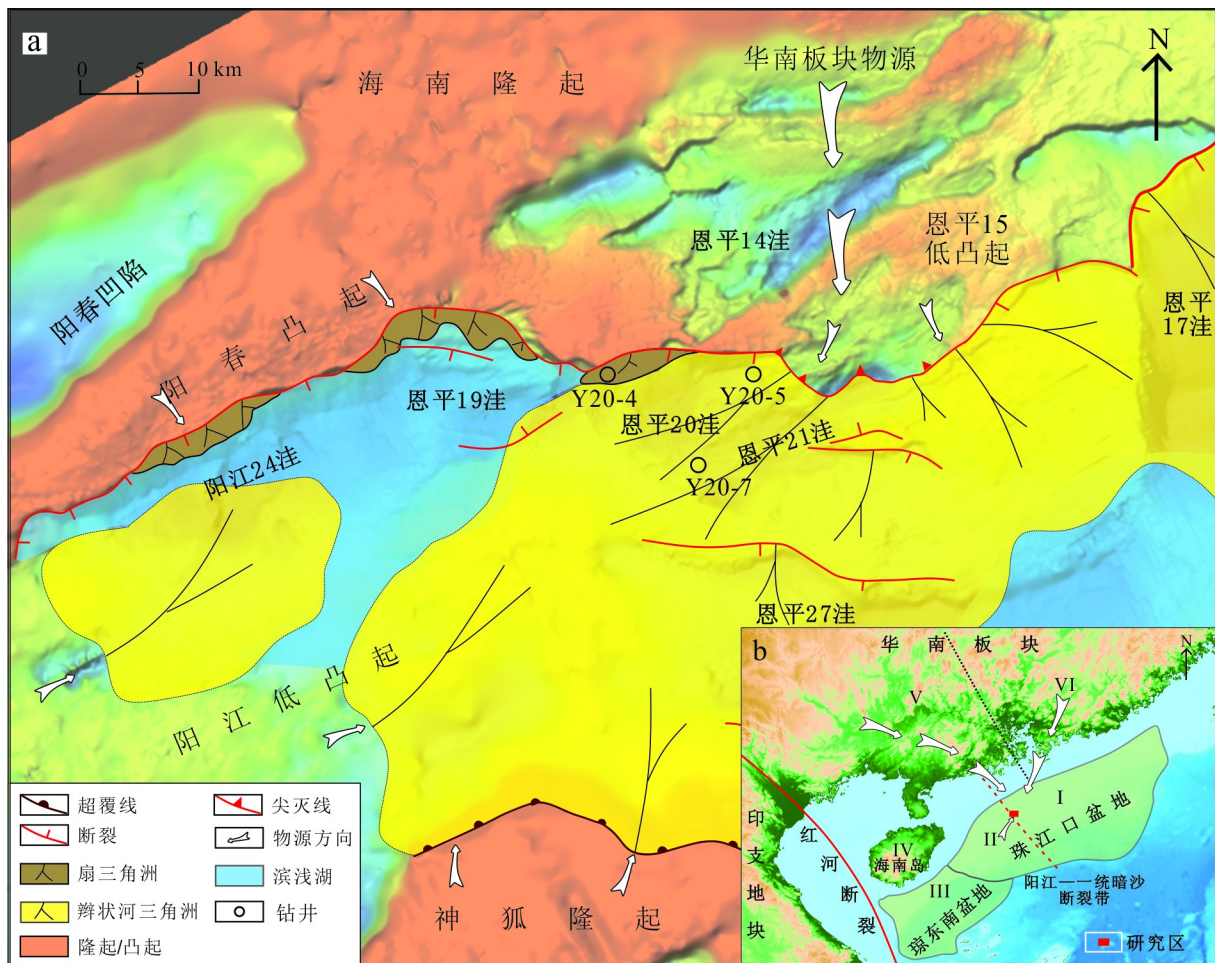


图 10 阳江东凹恩平组上段盆内-盆外双物源体系源汇模式

Fig.10 In-basin and out-basin provenances and source-sink pattern of the Upper Enping Member in the Eastern Yangjiang Sag

具盆内物源和盆外物源的贡献,且从该时期开始华南板块供源能力逐渐增强。

## 5 结论

(1)阳江东凹文昌组沉积岩的碎屑锆石年龄谱表现为157~159 Ma和114~122 Ma两个峰值区间,表明该时期凹陷以恩平15低凸起、阳春凸起及阳江低凸起等周缘凸起的中生代岩浆岩为主,为盆内近物源体系,且物源输入量小。凹陷在该断陷阶段形成了以半—深湖相为主的沉积环境,为本区主要烃源岩发育层段。

(2)恩平组下段沉积岩的碎屑锆石年龄谱表现为443 Ma主峰值和101~243 Ma次要峰值区间,表明凹陷主体的物源来自阳江—统暗沙断裂带西侧较远的加里东晚期岩浆岩或其再循环沉积物,凹陷转变为以盆内远物源体系为主(局部仍由周缘隆起供源),主要发育浅水辫状河三角洲沉积。

(3)恩平组上段时期,凹陷主体依然被辫状河三角洲所覆盖,但Y20-4和Y20-7井的沉积岩碎屑锆石年龄谱表现为151~168 Ma主峰值及60~64 Ma次要峰值,与Y20-5井的年龄谱有很大差异(4个主要峰值、多个次要峰值的多峰态分布),表明凹陷西段以周缘隆起/凸起为物源区,东段则以华南板块为物源区,研究区为两个物源区的交汇部位,盆内物源和盆外物源均有一定贡献,并且从该时期开始华南板块逐渐发展为主要供源区。

**致谢:** 中国海洋大学李三忠教授对本文写作提出了宝贵的修改意见,谨致诚挚谢意!

## 参考文献 (References)

- [1] 闫义,林舸,李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(2): 184-190. [YAN Yi, LIN Ge, LI Zian, et al. Provenance tracing of sediments by means of synthetic study of shape, composition and chronology of zircon [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(2): 184-190.]
- [2] Belousova E A, Griffin W L, O'reilly S Y. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf Isotope Composition as a tool for petrogenetic modelling: examples from eastern Australian granitoids [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(2): 329-353.
- [3] 雷玮琰,施光海,刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. *地质前缘*, 2013, 20(4): 273-284. [LEI Weiyan, SHI Guanghai, LIU Yingxin. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 273-284.]
- [4] 焦鹏,郭建华,王玺凯,等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 239-253. [JIAO Peng, GUO Jianhua, WANG Xikai, et al. Detrital zircon genesis and provenance tracing for reservoirs in the Lower Zhujiang Formation in Hanjiang-Lufeng Sag, Pearl river Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 239-253.]
- [5] 杨海长,徐建永,武爱俊,等. 珠三坳陷阳江凹陷构造特征及其对油气成藏的影响[J]. *海洋石油*, 2011, 31(2): 20-24. [YANG Haizhang, XU Jianyong, WU Aijun, et al. Structural features and impact on hydrocarbon accumulation in Yangjiang Sag of Zhu III depression [J]. *Offshore Oil*, 2011, 31(2): 20-24.]
- [6] 彭光荣,张向涛,许新明,等. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(3): 267-279. [PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, XU Xinming, et al. Important discoveries and understandings of oil and gas exploration in Yangjiang sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(3): 267-279.]
- [7] 杜晓东,彭光荣,吴静,等. 珠江口盆地阳江东凹断层特征及其对油气成藏的影响[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(4): 414-421. [DU Xiaodong, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Faults and its impacts on petroleum accumulation in eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(4): 414-421.]
- [8] 刘欣颖,吴静,朱定伟,等. 珠江口盆地多期走滑构造与叠合型拉分盆地:以阳江东凹为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 6-19. [LIU Xinying, WU Jing, ZHU Dingwei, et al. Superimposition of strike-slip faults and pull-apart basins in the Pearl River Mouth Basin: a case study from the Eastern Yangjiang Sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 6-19.]
- [9] 占华旺,蔡国富,张志伟,等. 南海北缘古近纪断裂活动规律及控盆特征:以阳江东凹为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 20-39. [ZHAN Huawang, CAI Guofu, ZHANG Zhiwei, et al. Paleogene fault activity and basin controlling characteristics in the northern South China Sea Margin: a case study of the Eastern Yangjiang Sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 20-39.]
- [10] 于海洋,索艳慧,杜晓东,等. 珠江口盆地渐-中新世古气候及物源特征:以阳江东凹为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 53-63. [YU Haiyang, SUO Yanhui, DU Xiaodong, et al. Oligocene-Miocene provenance and paleoclimate of the Pearl River Mouth Basin: a case study of the Eastern Yangjiang Sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 53-63.]
- [11] 马晓倩,刘军,朱定伟,等. 多期走滑拉分盆地的沉积响应:以南海北部珠江口盆地为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 64-78. [MA Xiaolian, LIU Jun, ZHU Dingwei, et al. Sedimentary response of multi-stage pull-apart basin: insights from the Pearl River Mouth Basin in the northern South China Sea Margin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 64-78.]
- [12] 杨悦,彭光荣,朱定伟,等. 珠江口盆地阳江东凹裂陷期沉积环境及其构造控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 79-89. [YANG Yue, PENG Guangrong, ZHU Dingwei, et al. Syn-rifting sedimentary environment and its tectonic control in the Eastern Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021,

- 45(1): 79-89.]
- [13] 姜衍, 张向涛, 龙祖烈, 等. 南海北部珠江口盆地烃源岩成因: 阳江凹陷的资源潜力[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 90-107. [JIANG Yan, ZHANG Xiangtao, LONG Zulie, et al. Formation of source rocks in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea: resource potential of the Yangjiang Sag [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 90-107.]
- [14] 陆蕾蕾, 姜素华, 索艳慧, 等. 南海珠江口盆地走滑构造与油气成藏机制[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 108-122. [LU Leilei, JIANG Suhua, SUO Yanhui, et al. Relationship between strike-slip structure and hydrocarbon accumulation in the Pearl River Mouth Basin in the northern South China Sea [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 108-122.]
- [15] 刘军, 彭光荣, 朱定伟, 等. 珠江口盆地阳江凹陷东部地区断控成藏条件[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 123-130. [LIU Jun, PENG Guangrong, ZHU Dingwei, et al. Fault-controlled hydrocarbon accumulation in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 123-130.]
- [16] 汪晓萌, 彭光荣, 吴静, 等. 珠江口盆地恩平21洼文昌组沉积期原型盆地及其对优质烃源岩的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 158-167. [WANG Xiaomeng, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Prototype basin and its control on high-quality source rocks during the depositional period of Wenchang Formation in Enping 21 Sub-sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 158-167.]
- [17] 梁卫, 彭光荣, 朱定伟, 等. 珠江口盆地阳江东凹古近系构造特征与勘探潜力[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 168-178. [LIANG Wei, PENG Guangrong, ZHU Dingwei, et al. Paleogene structures and exploration potential in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 168-178.]
- [18] 彭光荣, 朱定伟, 吴静, 等. 珠江口盆地阳江凹陷油气重大发现与成藏启示[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 179-187. [PENG Guangrong, ZHU Dingwei, WU Jing, et al. Discoveries of hydrocarbon accumulation in the Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin and implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 179-187.]
- [19] 王维, 叶加仁, 杨香华, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪多幕裂陷旋回的沉积物源响应[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(6): 1061-1071. [WANG Wei, YE Jiaren, YANG Xianghua, et al. Sediment provenance and depositional response to multistage rifting, paleogene, Huizhou Depression, pearl river mouth basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(6): 1061-1071.]
- [20] Shao L, Cao L C, Pang X, et al. Detrital zircon provenance of the Paleogene SYN-rift sediments in the northern South China Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17(2): 255-269.
- [21] 崔宇驰, 曹立成, 乔培军, 等. 南海北部古近纪沉积物碎屑锆石U-Pb年龄及物源演化[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4169-4179. [CUI Yuchi, CAO Licheng, QIAO Peijun, et al. Provenance evolution of Paleogene sequence (Northern South China Sea) based on detrital zircon U-Pb dating analysis [J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4169-4179.]
- [22] 邵磊, 崔宇驰, 乔培军, 等. 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[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 216-231. [SHAO Lei, CUI Yuchi, QIAO Peijun, et al. Implications on the Early Cenozoic palaeogeographical reconstruction of SE Eurasian margin based on northern South China Sea palaeo-drainage system evolution [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 216-231.]
- [23] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 等. 南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 580-587. [LU Baoliang, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, et al. Basement structures of an epicontinental basin in the northern South China Sea and their significance in petroleum Prospect [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 580-587.]
- [24] 孙晓猛, 张旭庆, 张功成, 等. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 57(6): 1199-1211. [SUN Xiaomeng, ZHANG Xuqing, ZHANG Gongcheng, et al. Texture and tectonic attribute of Cenozoic basin basement in the northern South China Sea [J]. *Science China:Earth Sciences*, 2014, 57(6): 1199-1211.]
- [25] Li Y H, Zhu R W, Liu H L, et al. The cenozoic activities of Yangjiang-Yitongdong Fault: insights from analysis of the tectonic characteristics and evolution processes in western Zhujiang (Pearl) River Mouth Basin [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(9): 87-101.
- [26] 蔡国富, 张向涛, 彭光荣, 等. 南海北部阳江—统暗沙断裂带与新近纪岩浆活动[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 40-52. [CAI Guofu, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Neogene volcanism and tectonics along the Yangjing-Yitong'ansha Fault Zone in the northern South China Sea margin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 40-52.]
- [27] Sircombe K N, Hazelton M L. Comparison of detrital zircon age distributions by kernel functional estimation [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171(1-4): 91-111.
- [28] Vermeesch P. Statistical uncertainty associated with histograms in the Earth sciences [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2005, 110(B2): B02211.
- [29] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1-2): 34-43.
- [30] Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, et al. Tectonic setting of the South China Block in the Early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology [J]. *Tectonics*, 2010, 29(6): TC6020.
- [31] 王家林, 张新兵, 吴健生, 等. 珠江口盆地基底结构的综合地球物理研究[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 13-22. [WANG Jialin, ZHANG Xinbing, WU Jiansheng, et al. Integrated geophysical researches on base texture of Zhujiang River Mouth Basin [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, 21(2): 13-22.]
- [32] 谢锦龙, 余和中, 唐良民, 等. 南海新生代沉积基底性质和盆地类型[J]. 海相油气地质, 2010, 15(4): 35-47. [XIE Jinlong, YU Hezhong, TANG Liangmin, et al. The basement features and basin types of Cenozoic sediments in South China Sea [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(4): 35-47.]
- [33] Shi H S, Xu C H, Zhou Z Y, et al. Zircon U - Pb Dating on granitoids

- from the Northern South China Sea and its geotectonic relevance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85 (6): 1359-1372.
- [34] 张功成, 贾庆军, 王万银, 等. 南海构造格局及其演化[J]. *地球物理学报*, 2018, 61 (10): 4194-4215. [ZHANG Gongcheng, JIA Qingjun, WANG Wanyin, et al. On tectonic framework and evolution of the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61 (10): 4194-4215.]
- [35] 邵磊, 尤洪庆, 郝沪军, 等. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J]. *地质论评*, 2007, 53 (2): 164-169. [SHAO Lei, YOU Hongqing, HAO Hujun, et al. Petrology and depositional environments of Mesozoic strata in the Northeastern South China Sea [J]. *Geological Review*, 2007, 53 (2): 164-169.]
- [36] 吴国瑄, 王汝建, 郝沪军, 等. 南海北部海相中生界发育的微体化石证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27 (1): 79-85. [WU Guoxuan, WANG Rujian, HAO Hujun, et al. Microfossil evidence for development of marine Mesozoic in the north of South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27 (1): 79-85.]
- [37] 郝沪军, 施和生, 张向涛, 等. 潮汕坳陷中生界及其石油地质条件: 基于LF35-1-1探索井钻探结果的讨论[J]. *中国海上油气*, 2009, 21 (3): 151-156. [HAO Hujun, SHI Hesheng, ZHANG Xiangtao, et al. Mesozoic sediments and their petroleum geology conditions in Chaoshan sag: a discussion based on drilling results from the exploratory well LF35-1-1 [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21 (3): 151-156.]
- [38] 葛小月. 海南岛中生代岩浆作用及其构造意义: 年代学、地球化学及Sr-Nd同位素证据[D]. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文, 2003: 15-41. [GE Xiaoyue. Mesozoic magmatism in Hainan Island (SE China) and its tectonic significance: geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotope evidences[D]. Doctor Dissertation of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2003: 15-41.]
- [39] 于津海, O'Reilly Y S, 王丽娟, 等. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成[J]. *科学通报*, 2007, 52 (1): 13-22. [YU Jinhai, O'Reilly Y S, WANG Lijuan, et al. Finding of ancient materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (1): 13-22.]
- [40] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与Rodinia超大陆聚合-裂解: 观察、解释与检验[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31 (6): 543-559. [LI Xianhua, LI Wuxian, HE Bin. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31 (6): 543-559.]
- [41] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31 (7): 1035-1053. [SHU Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31 (7): 1035-1053.]
- [42] 邹和平, 杜晓东, 劳妙姬, 等. 广西大明山地块寒武系碎屑锆石U-Pb年龄及其构造意义[J]. *地质学报*, 2014, 88 (10): 1800-1819. [ZOU Heping, DU Xiaodong, LAO Miaoji, et al. Detrital zircon U-Pb geochronology of Cambrian sandstones in Damingshan, central Guangxi and its tectonic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88 (10): 1800-1819.]
- [43] 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究[J]. *地质通报*, 2008, 27 (10): 1581-1593. [SHU Liangshu, YU Jinhai, JIA Dong, et al. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (10): 1581-1593.]
- [44] Li X H, Li W X, Li Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and cathaysia blocks in south China: constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks [J]. *Precambrian Research*, 2009, 174 (1-2): 117-128.
- [45] Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23 (4): 1273-1305.
- [46] Ding R X, Zou H P, Min K, et al. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of Sinian-Cambrian Strata in the Eastern Guangxi Area, China [J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28 (2): 295-304.
- [47] 赵梦, 邵磊, 乔培军. 珠江沉积物碎屑锆石U-Pb年龄特征及其物源示踪意义[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2015, 43 (6): 915-923. [ZHAO Meng, SHAO Lei, QIAO Peijun. Characteristics of detrital zircon U-Pb geochronology of the Pearl River sands and its implication on provenances [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2015, 43 (6): 915-923.]
- [48] 侯元立, 邵磊, 乔培军, 等. 珠江口盆地白云凹陷始新世—中新世沉积物物源研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (2): 19-28. [HOU Yuanli, SHAO Lei, QIAO Peijun, et al. Provenance of the Eocene-Miocene sediments in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (2): 19-28.]