



珠江口盆地始新统“源-渠-汇”分析

程昊, 李三忠, 彭光荣, 王光增, 索艳慧, 王鹏程, 刘仲强

Eocene “provenance-channel-sink” analysis of Pearl River Mouth Basin: A case study of eastern Yangjiang Sag and Kaiping Sag

CHENG Haohao, LI Sanzhong, PENG Guangrong, WANG Guangzeng, SUO Yanhui, WANG Pengcheng, and LIU Zhongqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062903>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号，获得更多资讯信息

程昊皞, 李三忠, 彭光荣, 等. 珠江口盆地始新统“源-渠-汇”分析——以阳江东凹和开平凹陷为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 124-136.
CHENG Haohao, LI Sanzhong, PENG Guangrong, et al. Eocene “provenance-channel-sink” analysis of Pearl River Mouth Basin: A case study of eastern Yangjiang Sag and Kaiping Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 124-136.

珠江口盆地始新统“源-渠-汇”分析 ——以阳江东凹和开平凹陷为例

程昊皞^{1,2}, 李三忠^{1,2}, 彭光荣³, 王光增^{1,2}, 索艳慧^{1,2}, 王鹏程^{1,2}, 刘仲强^{1,2}

1. 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
2. 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
3. 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

摘要: 以阳江东凹及开平凹陷为研究对象, 运用碎屑锆石 U-Pb 定年、地震剖面渠汇分析及沉积相分析等手段, 系统分析文昌组 and 恩平组沉积期沉积物来源、输送渠道以及沉积形式, 将“源-渠-汇”耦合的思想运用到珠江口盆地始新统沉积演化中。碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明, 研究区物源在时空上均表现出不均一性, 文昌组阳江东凹碎屑锆石年龄以燕山期为主, 年龄谱图表现为单峰值, 开平凹陷则存在燕山期和印支期两个峰值, 锆石自形程度均较好, 指示盆内近源沉积; 恩平组碎屑锆石年龄谱图均具有多峰值特征, 且古生代和前寒武纪的锆石数量增多, 锆石磨圆度高, 说明开始接受盆外物源, 为盆内和盆外双重供源。基于大量的地震剖面, 在研究区分别识别出断槽、古沟谷及构造转换带等物源运输通道, 阳江-一统暗沙断裂带的走滑作用对研究区始新统沉积物沿上述通道输送起到了重要作用。整体来讲, 文昌组沉积期主要发育滨浅湖相、半深湖相和扇三角洲相, 恩平组沉积期则主要发育辫状河三角洲相和滨浅湖相。本研究对于认识阳江东凹和开平凹陷始新统“源-渠-汇”过程以及阳江-一统暗沙断裂带在始新世的表现形式具有重要意义。

关键词: 阳江东凹; 开平凹陷; 碎屑锆石 U-Pb 定年; 源-渠-汇; 阳江-一统暗沙断裂; 珠江口盆地

中图分类号: P736 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062903

Eocene “provenance-channel-sink” analysis of Pearl River Mouth Basin: A case study of eastern Yangjiang Sag and Kaiping Sag

CHENG Haohao^{1,2}, LI Sanzhong^{1,2}, PENG Guangrong³, WANG Guangzeng^{1,2}, SUO Yanhui^{1,2}, WANG Pengcheng^{1,2}, LIU Zhongqiang^{1,2}

1. *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*
2. *Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*
3. *Nanhai East petroleum Research Institute, Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Shenzhen, 518054, China*

Abstract: Taking the Eastern Yangjiang Sag and the Kaiping Sag as the research objects, we systematically analyzed the provenance, transport channels, and sedimentary facies of the Wenchang and Enping depositional periods by means of detrital zircon U-Pb dating and seismic profiles analysis, and then applies the idea of “provenance-channel-sink” to the Eocene sedimentary evolution of the Pearl River Mouth Basin. The U-Pb dating results of detrital zircons show that the provenance in the study area is heterogeneous in time and space. For the ages of detrital zircons from Wenchang Formation, the ones in the Eastern Yangjiang Sag mainly show a Yanshanian unimodal peak, while those in the Kaiping Sag display Yanshanian and Indosinian bimodal distributions. The zircons have good euhedral morphology, indicating the near-source deposition in the basin. The age spectra of detrital zircons from the Enping Formation show multimodal distributions. The number of older (Paleozoic and Precambrian) zircon grains increased and they are in higher roundness, indicating that the basin provenances had changed from near-source to far-sources. Based on a large number of seismic profiles, the transport channels such as fault trough, ancient gully, and structural transition zone

资助项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费“基于数字孪生的全球深时地貌重塑与资源环境预测”(2022QNLMO5032); 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“台湾岛弧及邻区新生代古地形地貌数值模拟与动态重塑”(91958214); 国家自然科学基金面上项目“走滑派生构造差异演化主控因素的砂箱实验研究: 以郯庐断裂渤海-山东段张扭派生的构造为例”(442072235)

作者简介: 程昊皞(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事海底构造与古地貌研究, E-mail: chhao@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 王光增(1984—), 男, 副教授, 主要从事边缘海盆地构造解析研究, E-mail: wangguangzeng@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-06-29; **改回日期:** 2022-08-18. 文凤英编辑

were identified, which indicated that the strike slip of the Yangjiang-Yitong Fault Zone played an important role in transporting Eocene sediments in the study area. In addition, mainly littoral-shallow lacustrine facies, semi-deep lacustrine facies, and fan delta facies developed in the Wenchang depositional period, while braided river delta facies and littoral-shallow lake facies are more commonly observed during the Enping depositional period. This study is of great significance for understanding the Eocene "Provenance-Channel-Sink" process in the Eastern Yangjiang Sag and the Kaiping Sag, and the manifestations of the Yangjiang-Yitong fault zone in the Eocene.

Key words: Eastern Yangjiang Sag; Kaiping Sag; detrital zircon U-Pb dating; Provenance-Channel-Sink; Yangjiang-Yitong fault zone; Pearl River Mouth Basin

珠江口盆地作为南海北部重要的油气产区之一,其古近系是主要的烃源岩目标层位,因此前人对该套地层开展了物源分析,用以评估珠江口盆地的生油潜力^[1-2]。近年来由于勘探程度的增加,人们普遍认为珠江口盆地阳江东凹和开平凹陷的古近纪地层具有良好的油气勘探前景,因此对这两个区域的古近系“源-渠-汇”特征开展研究对油气资源的精确勘探具有重要意义。

碎屑沉积物物源分析可以揭示区域构造运动、地表隆起和环境演化^[3]。由于锆石具有封闭温度高、抗风化和蚀变能力强、分布广泛等特点,因此碎屑锆石 U-Pb 定年方法是物源分析的重要手段^[4]。前人对珠江口盆地古近系物源特征的研究多集中在珠一坳陷和珠二坳陷的白云凹陷^[4-5],而对位于阳江—统暗沙断裂带以西的珠三坳陷及珠二坳陷西部的古近系物源研究较少,且对于珠江口盆地古近系物源的研究大多数依赖于单一的碎屑锆石 U-Pb 定年、岩石学观察或地震方法^[3],主要是“源-汇”研究,缺少“渠”这一环节。前人揭示珠江口盆地在古近纪整体呈凹隆相间的古地理格局^[6],各盆隆之间的构造转换带或调节带对沉积物的分布具有重要的控制作用^[7]。因此,三维地震资料的分析和解释可以作为沟通“源”和“汇”的中间环节,为目标沉积物的潜在物源(如盆内隆起)、运移路径以及沉积方式提供重要证据^[5]。

本文选取南海北部珠江口盆地阳江东凹和开平凹陷共 3 口探井的 8 组前古近系花岗岩和始新统碎屑岩样品,运用碎屑锆石 U-Pb 定年、地震剖面渠-汇分析、沉积相分析等手段,确定了研究区始新统沉积物源方向、运输通道和汇聚模式,从而建立研究区“源-渠-汇”耦合模式,以期为古近系油气勘探提供一定的思路。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于南海北部大陆边缘(图 1a),是发育在古生代及中生代复杂褶皱基底之上的大型

含油气盆地^[8]。珠江口盆地自北向南划分为北部隆起带、北部坳陷带(珠一坳陷和珠三坳陷)、中央隆起带(神狐隆起、番禺隆起和东沙隆起)、南部坳陷带(珠二坳陷)和南部隆起带(图 1b),新生代经历了神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动和东沙运动等多期构造事件^[9],发育了 NEE、NE、NW 向多期断层,具有“棋盘格式”的构造格局(图 1b)。

晚中生代,珠江口盆地位于受古太平洋板块俯冲控制的华南活动大陆边缘的火山弧部位^[11],因此其基底分布大量的燕山期花岗岩(图 1b)。由于钻孔难度大,目前对珠江口盆地基底岩性的认识尚不统一,整体上认为基底岩性以阳江—统暗沙断裂带为界,以东以中生代沉积岩、燕山期花岗岩为主;以西以印支期岩浆岩和古生代砂岩、变质岩为主,在南部隆起带和东沙隆起上分布有较多的新生代玄武岩^[10,12-13](图 1b),造成珠江口盆地基底东西差异的原因可能与阳江—统暗沙断裂带前新生代两侧差异隆升相关。新生代以来,珠江口盆地经历了古新世—始新世断陷期、渐新世断拗转换期和中新世以来的拗陷期 3 个阶段,具有典型的“下断上拗”构造格局^[9]。断陷期,珠江口盆地发育了以陆相湖泊、河流三角洲相为主的神狐组、文昌组和恩平组;断拗转换期,发育了以海陆交互相为主的珠海组;拗陷期,发育了以浅海相为主的珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系(图 2)。

研究区位于 NW 向阳江—统暗沙断裂带以西,北接海南隆起,南到顺鹤隆起,神狐隆起和番禺低凸起贯穿其中(图 1c)。由于中生代末期的神狐运动在珠江口盆地内波及范围有限,研究区未发育神狐组,基底之上直接不整合覆盖始新统。始新世早期(文昌组沉积期)为盆地裂陷高峰期,研究区沉降速率大,湖泊广泛发育,以湖相-暗色泥岩夹砂岩为主;始新世晚期(恩平组沉积期)构造活动减弱,为湖盆萎缩期,主要发育河流-沼泽相和浅湖相沉积^[6],与下伏文昌组地层为平行或角度不整合接触,在局部基底强烈隆升地区,该地层直接超覆于基底之

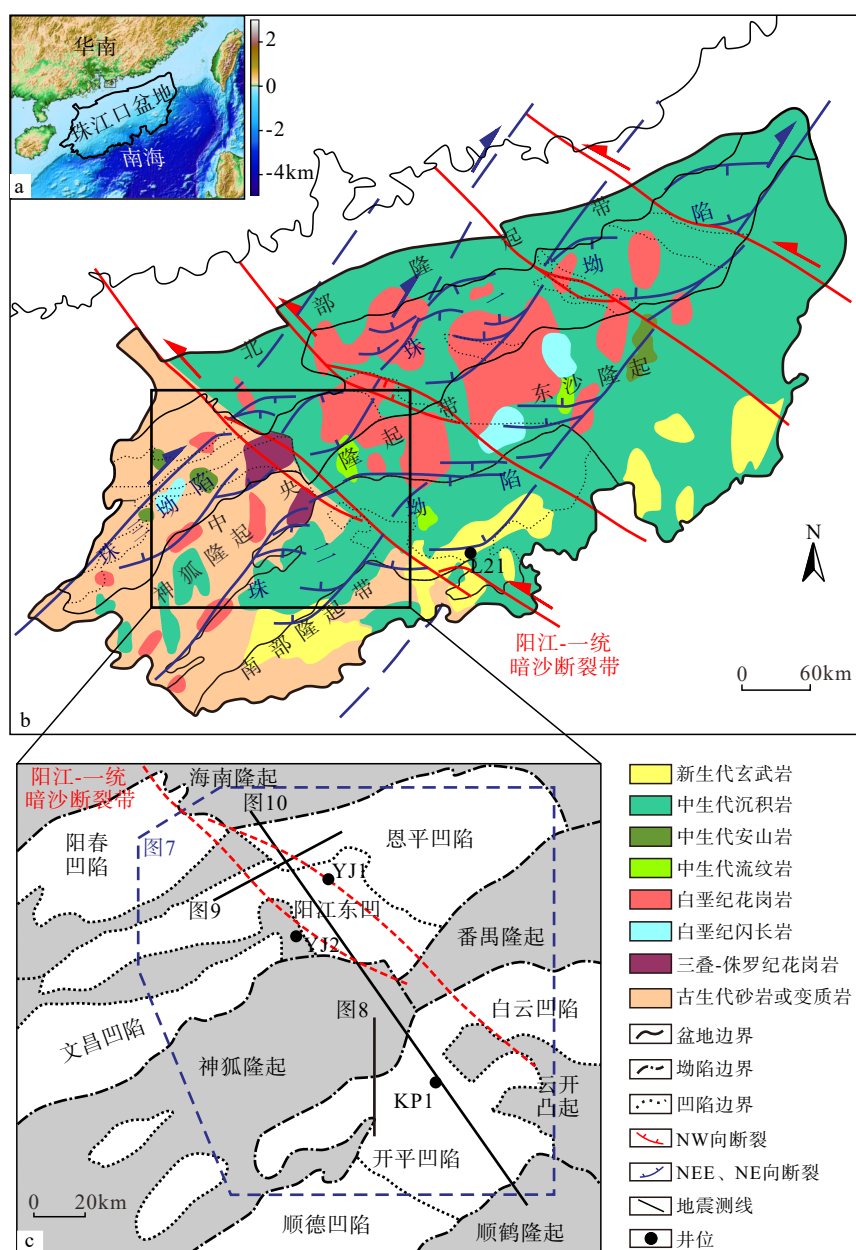


图 1 珠江口盆地构造位置 (a)、基底岩性 (b) 及构造单元划分 (c) [10]

Fig.1 The location (a), basement lithology(b), and tectonic unit division(c) of Pearl River Mouth Basin [10]

上。开平凹陷具有“厚文昌、薄恩平”的特征,始新世早期为陆相地堑、半地堑,恩平组晚期遭受海侵^[15],具有“先陆后海,下断上坳”的结构特征^[16]。

2 样品及实验方法

本文采用的阳江东凹及开平凹陷 3 口探井共 8 个岩屑样品均由中国海洋石油公司提供,样品位置及详细描述见图 2 和表 1。利用中国海洋石油公司提供的测井数据和地层顶底数据确定取样层段,包括前古近系、文昌组和恩平组。锆石制靶工作在河北省区域地质矿产调查研究所完成,挑选清晰、

结晶较好的锆石制成样品靶并进行抛光,对抛光后的样品靶进行阴极发光(CL)分析,从而获得锆石颗粒的内部结构特征和相关成因信息(图 3)。碎屑锆石 U-Pb 定年在 北京 科荟公司完成,共测得谐和度大于 90% 的锆石数量 619 个,数据点数量充足,可以较好地代表各层位特征。其中对年龄小于 1000 Ma 的锆石选取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,对于年龄大于 1000 Ma 的锆石选取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。

3 碎屑锆石形态及年龄特征

阴极发光图像显示,大部分锆石颗粒具有岩浆

地层系统			年龄/Ma	构造事件	构造特征	沉积相
系	统	组				
第四系	更新统					
新近系	上新统	万山组	T20— 2.59Ma	东沙运动	NNW向走滑	浅海-半深湖 沉积
	中新统	粤海组	T30— 5.33Ma		区域热沉降	三角洲-浅海 沉积
		韩江组	T32— 10.0Ma			
		珠江组	T40— 15.97Ma			
古近系	渐新统	珠海组	T60— 23.03Ma	白云运动	区域热沉降	滨岸-三角洲- 浅海沉积
	始新统	恩平组	T70— 33.9Ma	南海运动	NE向走滑	湖沼、 河流-三角洲 平原沉积
		文昌组	T80— 38.0Ma	珠琼运动 Ⅱ幕	NNE-NE向 裂陷	三角洲、 湖相沉积
			T90— 47.8Ma	珠琼运动 Ⅰ幕	NNE-NE向 裂陷	冲积、火山 湖盆沉积
	古新统	神狐组				
前古近系		汕头组	Tg— 65Ma	神狐运动	NNE-NE向 逆冲推覆	
		潮州组	137Ma			

图 2 珠江口盆地地层综合柱状图^[14]

Fig.2 Stratigraphic column of the Pearl River Mouth Basin^[14]

表 1 碎屑锆石 U-Pb 定年测试样品信息

Table 1 Specifications of detrital zircon U-Pb dating samples

井号	位置	样品号	取样深度/m	层位	岩性	锆石数量
YJ1	阳江东凹	YJ1-1	3 010~3 045	恩平组	砂岩	95
		YJ1-2	3 100~3 135	恩平组	砂岩	100
		YJ1-3	3 164~3 190	前古近系	花岗岩	35
YJ1	阳江东凹	YJ2-1	3 324~3 350	文昌组	细砂岩	99
		YJ2-2	3 398~3 441	前古近系	花岗岩	26
KP1	开平凹陷	KP1-1	2 785~2 810	恩平组	细砂岩、泥岩	107
		KP1-2	3 318~3 330	恩平组	中砂岩	112
		KP1-3	3 570~3 582	文昌组	细砂岩	45

振荡环带结构, 前古近系和文昌组锆石样品大多呈长柱状, 自形程度好, 地层越年轻, 自形程度越差(图 3)。此外, Th/U 比值也可以指示锆石成因^[17], 研究样品显示, 大多数锆石 Th/U>0.3, 指示以岩浆成因为主, 较少的变质成因锆石(Th/U<0.1)集中在研究区恩平组(图 4)。

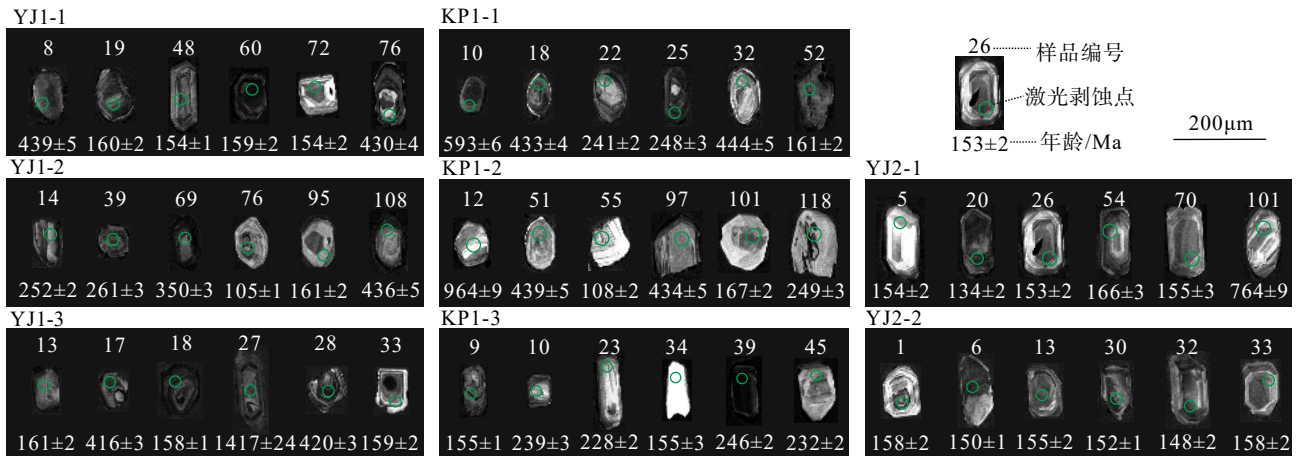


图3 研究区样品部分碎屑锆石 CL 图像

Fig.3 CL images of selected detrital zircons from sandstone samples

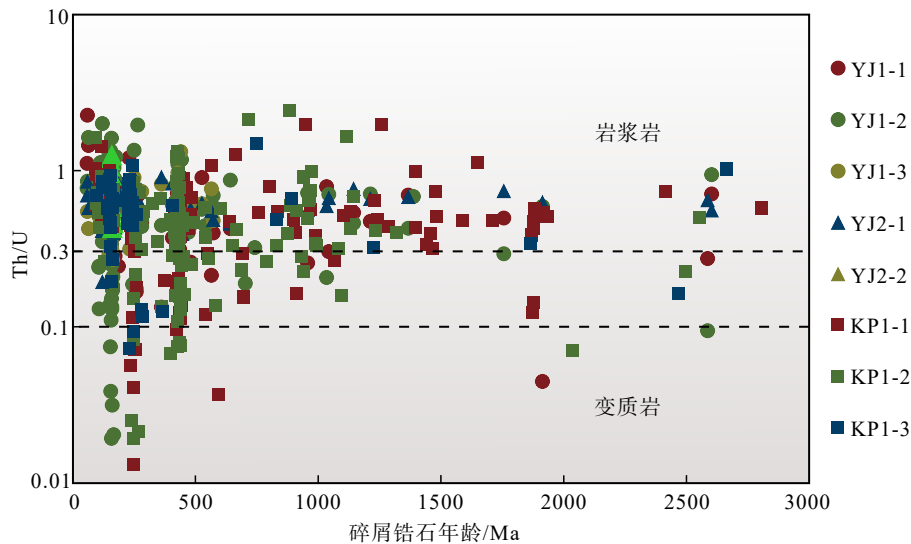


图4 研究区样品 Th/U 值和 U-Pb 年龄图

Fig.4 Th/U ratios and U-Pb ages of detrital zircons

YJ1 井位于阳江东凹南侧, 神狐隆起北侧, 阳江—统暗沙断裂带西缘(图1), 分别在前古近系、恩下段和恩上段层位取得样品 YJ1-3、YJ1-2、YJ1-1(表1)。YJ1-3 样品为前古近系花岗岩, 年龄频谱图存在一个主峰值 159 Ma 和次峰值 420 Ma, 以侏罗纪锆石为主, 早古生代和元古代锆石次之(图5)。YJ1-2 样品为恩平组下段砂岩, 锆石年龄频谱图存在 434、257、103 Ma 等多个峰值(图5)。YJ1-1 样品为恩平组上段砂岩, 碎屑锆石年龄谱图存在主峰值 157 Ma 和次峰值 429 Ma, 中生代锆石含量占比相比同一井位 YJ1-2 样品明显增多, 而古生代和前寒武系锆石相对减少。阴极发光图像显示, 该井 3 组样品锆石均具有较明显的岩浆振荡环带结构, 但自形程度均较差, Th/U 值判别法指示, 仅恩下段 YJ1-2 样品存在少量变质成因锆石, 其余均为岩浆

成因(图4)。

YJ2 井位于阳江东凹东北侧, 恩平凹陷西缘(图1), 分别在前古近系花岗岩和文昌组细砂岩层位取得样品 YJ2-2、YJ2-1(表1)。YJ2-2 样品锆石年龄集中, 均为侏罗纪锆石(145~164 Ma), 年龄频谱图存在单峰值 154 Ma(图5)。YJ2-1 样品锆石年龄频谱图与 YJ2-2 样品十分相似, 仍以侏罗纪锆石为主(图5)。阴极发光图像显示, YJ2 井两个样品锆石形态相似, 锆石自形程度均较好, 呈长柱状、棱角分明, 且大多含有岩浆生长振荡环带(图3)。Th/U 值判别法指示样品均为岩浆成因锆石(图4)。

KP1 井位于珠二坳陷开平凹陷, 分别在文昌组、恩下段和恩上段层位取得样品 KP1-3、KP1-2、KP1-1(表1)。KP1-3 样品以细砂岩为主, 年龄范围较同一层位 YJ2-1 样品宽, 年龄谱图存在对称的

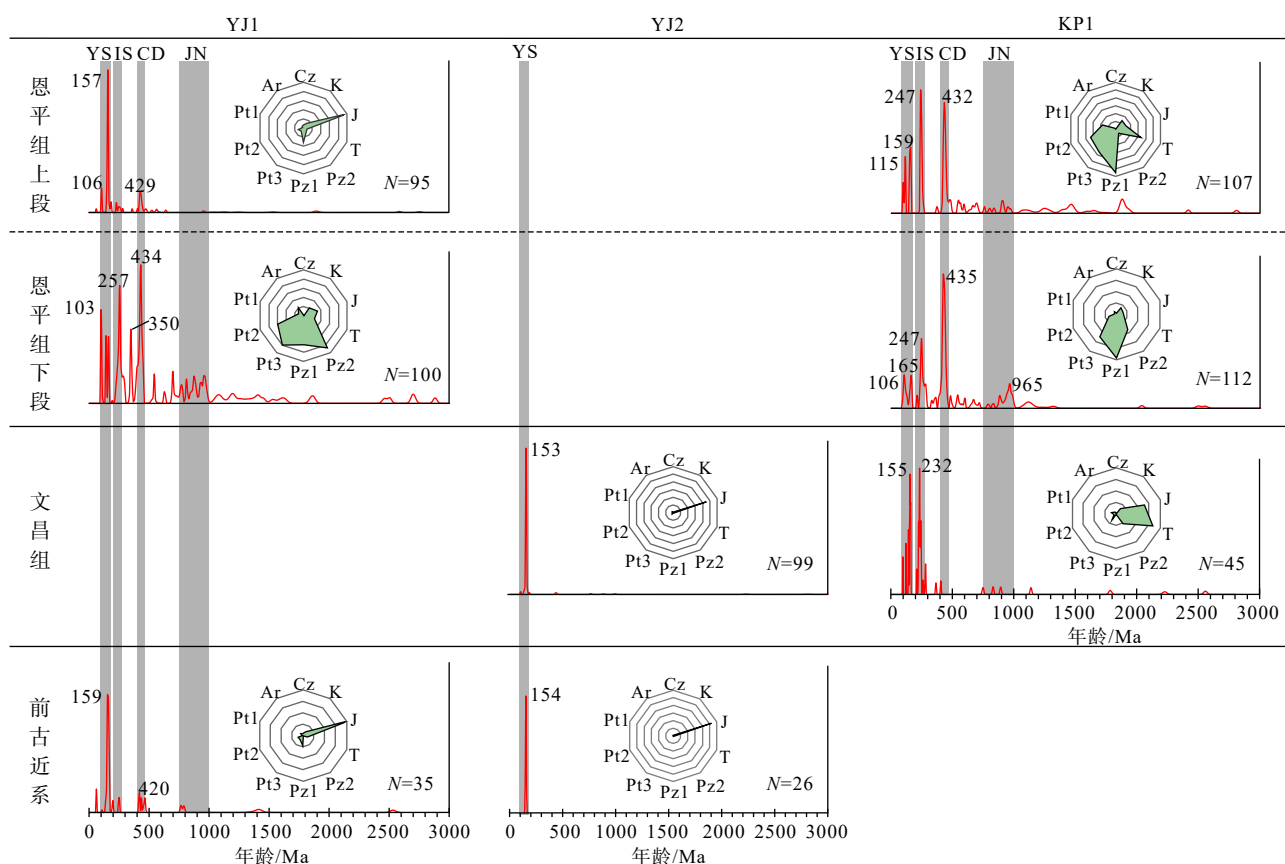


图 5 研究区前古近系-恩平组锆石 U-Pb 年龄分布

YS-燕山期, IS-印支期, CD-加里东期, JN-晋宁期。

Fig.5 U-Pb age spectra of detrital zircons from pre-Cenozoic to Enping Formation

YS: Yanshanian orogeny; IS: Indosinian orogeny; CD: Caledonian orogeny; JN: Jinninggian orogeny.

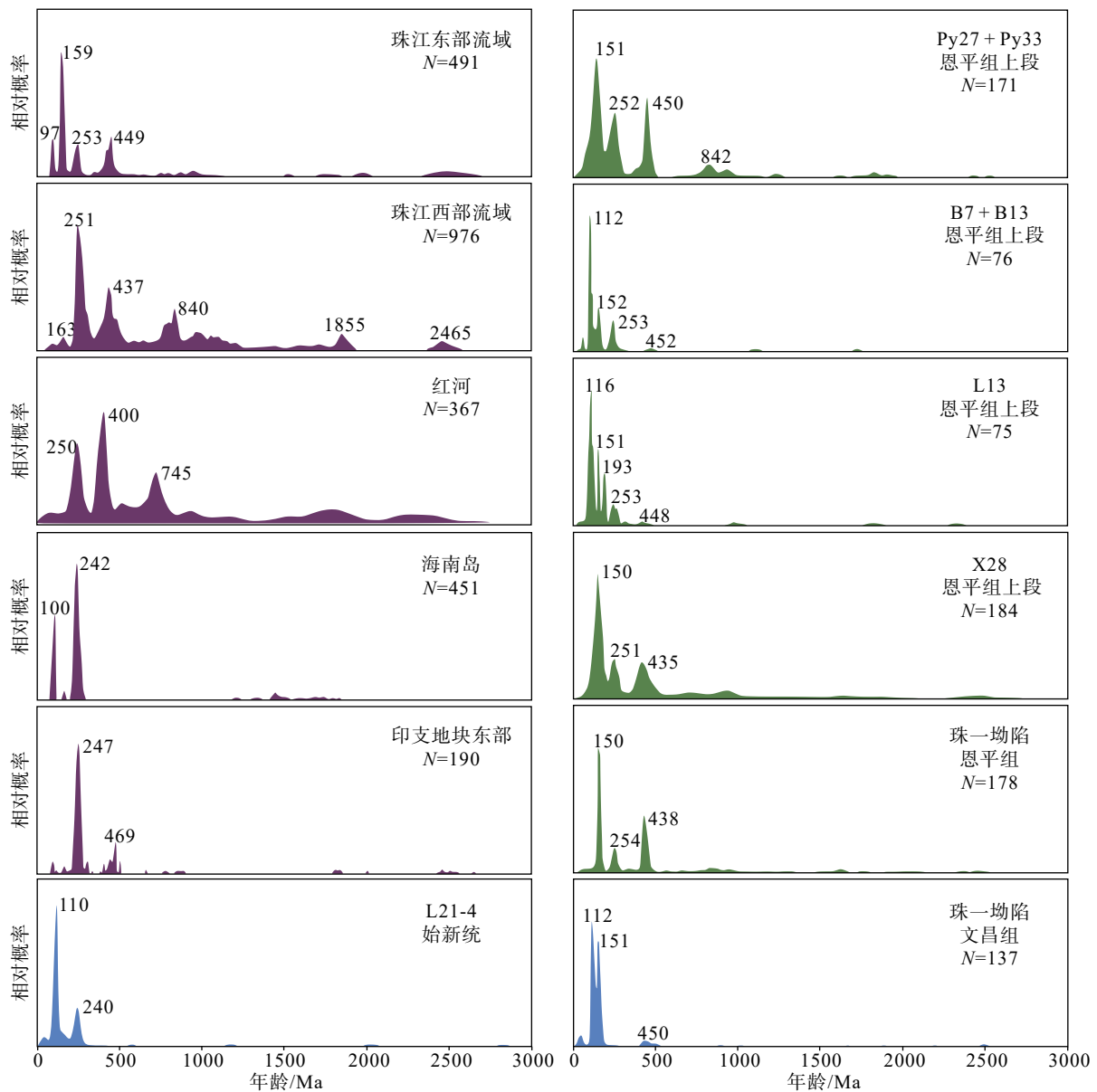
155 Ma 和 232 Ma 两个峰值, 指示锆石年龄以侏罗纪和三叠纪为主(图 5)。该样品与阳江东凹同一层位 YJ2-1 样品相比, 最大的差异是存在较多的三叠纪锆石。KP1-2 样品位于恩下段, 岩性以中砂岩为主, 锆石年龄范围广, 年龄频谱图存在主峰值 435 Ma 和次峰值 247 Ma。KP1-1 样品以细砂岩、泥岩为主, 锆石年龄特征与 KP1-2 样品相似, 年龄频谱图存在 247、432 Ma 两个主峰值和 115、159 Ma 两个次峰值。锆石阴极发光图像显示, 该井位除 KP1-3 样品存在部分自行程度较好的锆石外, 其余样品自形程度均较差, 磨圆度较高(图 3)。Th/U 值判别法指示, 仅 KP1-1 和 KP1-2 样品存在少量变质成因锆石, 其余均为岩浆成因(图 4)。

4 物源分析

对珠江口盆地始新统物源的分析主要包括盆内物源和盆外物源的分析, 由于研究区始新统直接覆盖在基底之上, 因此对盆内物源(盆内古隆起)分

析的关键是盆地内部基底的差异性。研究区位于阳江—统暗沙断裂带内, 基底岩性复杂, 研究区及邻区基底以燕山期岩浆岩、印支期岩浆岩、古生代砂岩、变质岩和中生代沉积岩为主(图 1)。此外, 本次研究在阳江东凹取得两组前古近系样品, 均以侏罗纪花岗岩为主, 其次为早古生代和元古代。

前人对珠江口盆地古近纪潜在盆外物源区进行了总结^[17-19], 主要有: (1) 印支地块东部, 锆石年龄频谱图具有不对称的双峰值特征, 峰值年龄分别为 247 和 469 Ma, 以印支期为主; (2) 海南岛, 具有 100 和 242 Ma 较对称的双峰值, 以燕山期和印支期锆石为主, 锆石年龄较印支地块东部年轻; (3) 红河流域, 分布有古元古代到新生代的多峰值年龄, 主要来自华夏地块西部和长江供源; (4) 珠江西部流域, 与红河流域锆石年龄特征类似, 年龄频谱图宽, 存在多个峰值, 以印支期和加里东期锆石为主, 包括华南出露的前寒武系基底; (5) 珠江东部流域, 年龄频谱图较珠江西部流域简单, 以古生代—中生代锆石为主, 存在明显的燕山期峰值(图 6)。

图6 珠江口盆地及邻区始新统碎屑锆石 U-Pb 年龄^[5,17-20]Fig.6 Detrital zircon U-Pb ages of the Eocene strata in the Pearl River Mouth Basin and its adjacent areas^[5,17-20]

结合前人对珠江口盆地始新统样品锆石 U-Pb 定年的证据(图6),基本排除了始新世珠江口盆地物源来自印支地块东部、海南岛和红河的可能^[5,17-20],认为盆外物源主要来自华南地块中的华夏地块。但也有学者认为,新生代早期南海北部存在一条源自南海西部古隆起的自西向东的“昆-莺-琼”河流系统,该系统自始新世开始向包括珠二坳陷在内的南海北部南侧地区输送了大量沉积物,并认为始新世珠二坳陷存在南海西部古隆起(西沙-中沙隆起带、印支地块东部)供源的可能^[21]。

4.1 文昌期

始新世早期,珠三坳陷整体为一南断北超的箕

状断陷^[6],阳江东凹各次洼相对独立,开平凹陷为一系列 NE-NEE 向断层控制的半地堑和地堑,研究区整体呈凹陷相间的古地理格局(图7)。神狐隆起位于阳江东凹南部、开平凹陷西北部,其前古近系基底面埋深比相邻凹陷高出 2 000 余米,被认为是开平凹陷周边规模最大的碎屑物质供应区^[22]。

文昌组沉积期,阳江东凹与开平凹陷锆石年龄频谱图存在明显差异,阳江东凹 YJ2-1 样品锆石年龄与同一井位基底锆石年龄基本一致,以侏罗纪(153 Ma)锆石为主,且锆石自形程度高,磨圆度低,说明该时期阳江东凹主要接受盆内周边隆起快速供源,基本不接受盆外较古老物源供给。开平凹陷 KP1-3 样品以侏罗纪(155 Ma)和三叠纪(232 Ma)锆

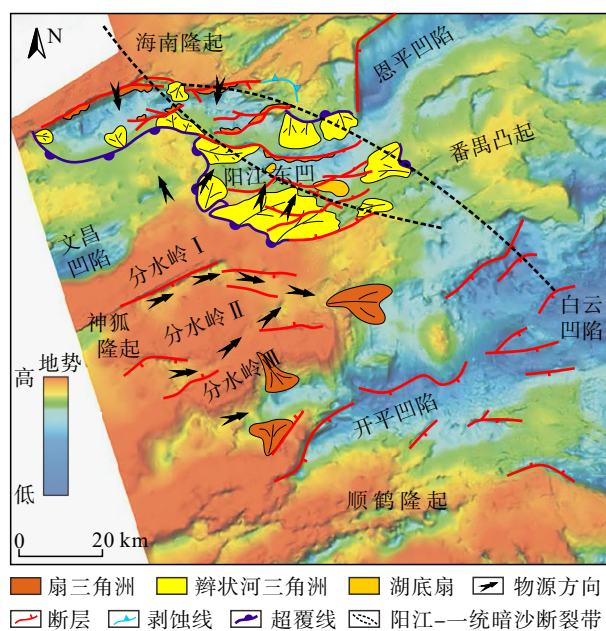


图 7 文昌期沉积相及物源方向

位置见图 1c, 修改自文献 [23]。

Fig. 7 Sedimentary facies and provenance direction during the Wenchang depositional period

See location in Fig. 1c, modified from reference [23].

石为主, 年龄谱图呈燕山期及印支期近对称的双峰状(图 5), 除与阳江东凹 YJ2-1 样品相似的燕山期物源外, 还存在大量印支期物源。此外, 该时期开平凹陷锆石自形程度较差, 说明碎屑物质搬运时间较长。推测该时期开平凹陷除受相邻盆内隆起(如神狐隆起)供源外, 还接受西部古隆起供源, 这与人认为的新生代早期南海北部存在源自南海西部古隆起的自西向东的“昆-莺-琼”河流系统向珠二坳陷输运碎屑物质相一致^[21]。

研究区文昌组锆石年龄特征与前人对白云凹陷南部 L21 钻孔始新统样品的研究不同, L21 钻孔始新统锆石年龄谱主要由燕山期组成, 主峰值为 110 Ma, 次峰值为 240 Ma(图 6), 被认为是东沙隆起在始新世为南海北部提供了大量早白垩世物源^[19]。但研究区内文昌组时期白垩纪锆石极少, 说明始新世东沙隆起的供源范围有限, 并没有影响到阳江—统暗沙断裂带以西的开平凹陷和珠三坳陷。

4.2 恩平组早期

恩平组早期研究区锆石年龄谱图跨度大, 中生代锆石含量相对降低, 古生代、前寒武系锆石含量增加(图 5), 且锆石自形程度变差, 以椭圆状为主, 长柱状锆石的数量已非常少(图 3), 反映了该时期两个凹陷的物源均经历了较长距离的搬运, 供源区

与文昌期存在较大差别。

该时期阳江东凹锆石年龄以印支期为主, 其次为燕山期和晋宁期, 锆石年龄频谱图与珠江西部流域年龄谱图相似(图 5、6), 说明该时期可能开始受到华夏地块西部的影响。开平凹陷锆石以加里东期为主, 其次是印支期和燕山期, 前寒武纪的锆石相对较少, 说明该时期开平凹陷也开始受华南地块影响, 但华南地块的影响能力有限。

4.3 恩平组晚期

恩平组晚期, 阳江东凹锆石年龄特征与开平凹陷差异明显。开平凹陷锆石年龄特征较恩平组早期变化不大, 以加里东期和印支期锆石为主, 燕山期锆石次之, 锆石磨圆度高(图 3), 说明仍接受西部古隆起和华夏地块双重供源。阳江东凹锆石年龄特征较同一井位恩平组早期变化大, 燕山期锆石数量明显增多, 而印支期和加里东期锆石减少, 说明该时期阳江东凹以盆内近源隆起供源为主, 接受的近源沉积较开平凹陷更多, 两个凹陷在该时期存在不同的供源区或者各供源区供源能力不同。

5 渠-汇分析

5.1 物源通道

盆地结构和断裂形态对沉积物源输送具有重要影响, 同时也会控制储集砂体及烃源岩的分布^[24]。盆地中的构造高点既可能为沉积区提供物源, 也可能成为沉积物输送的屏障, 构造低点则可以起到沉积物输送通道的作用^[17]。研究区位于阳江—统暗沙断裂带内, 发育 NW、NE、NEE 向多组走滑断层和正断层。走滑断层的压扭作用形成凸起, 可以为沉积区提供剥蚀物源; 张扭释压则有利于形成沟谷低地, 为物源的输送起渠道的作用^[25]。此外, 正断层活动速率较大的部位通常形成陡崖, 有利于沉积物搬运; 盆地内部盆隆之间与地堑之间存在的各种构造变换带往往是河流进出盆地的位置, 对沉积扇、三角洲的发育具有明显的控制作用, 并影响物源体系的分布^[6,26]。基于大量的地震剖面, 在研究区分别识别出断槽、古沟谷和转换带三大类物源通道体系(图 8、9)。

断槽在陆相断陷盆地中较为常见, 一般发育在盆地或凹陷边缘部位, 可以由两组相邻的断裂体系相交而发育地势相对低的槽道或断面沟道, 也可以由一组同盆缘断裂斜交的断裂共同组成地堑, 即中

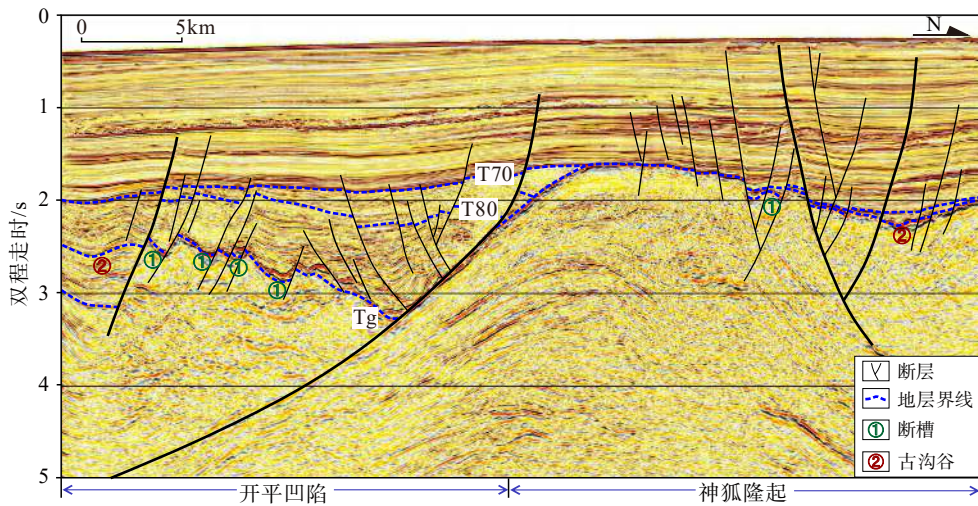


图 8 开平凹陷西北侧断裂特征
位置见图 1c。

Fig.8 Characteristics of faults in the northwestern Kaiping Sag

See location in Fig. 1c.

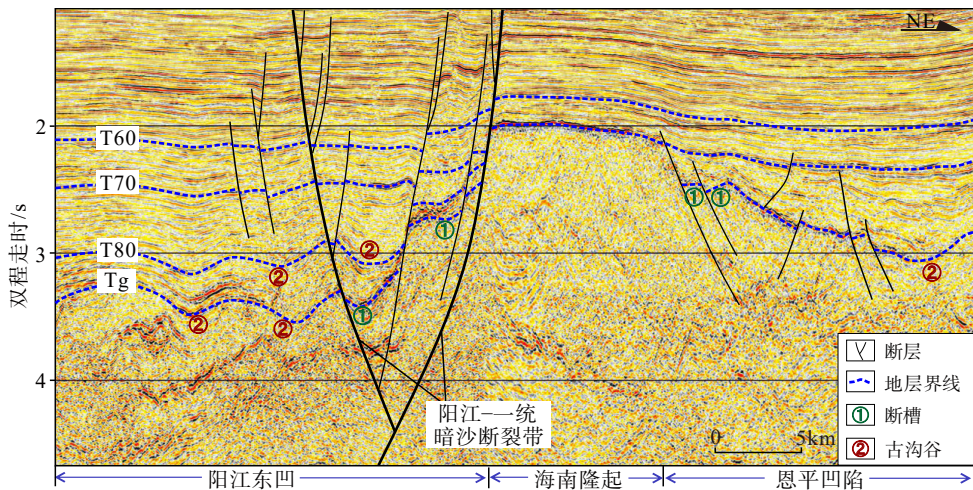


图 9 阳江东凹北部断裂特征
位置见图 1c。

Fig.9 Characteristics of faults in the northern part of the Eastern Yangjiang sag

See location in Fig. 1c.

央槽道^[27]。研究区内断槽物源通道主要发育在开平凹陷西侧和阳江东凹北侧的文昌组地层。选取垂直于物源搬运方向的地震剖面,断槽呈现为不对称的箕状结构,内部地震反射为楔形杂乱或充填结构(图 8)。研究区内文昌期断槽多为丘状反射或杂乱反射,指示近源快速堆积体,部分呈中低连续反射、近平行的反射结构,指示水动力较强,可能为较好的储集砂体^[28]。

古沟谷物源通道主要分布在阳江东凹,多呈“U”型、次“V”型,文昌组和恩平组均有发育,文昌组以连续—半断续反射为主,恩平组以孤立短轴状

反射为主,反映河流搬运、携砂能力由弱变强。该物源体系多集中在远离凹陷边界的断裂不发育部位(图 9),受断裂影响较少。

构造转换带是指在主断裂带附近地形高差变化较小的部位,是碎屑物质进入裂陷盆地的重要入口^[26]。构造转换带在剖面上较难识别,但通过前人制作的断裂平面图,可以在阳江东凹北部和内部识别出 NWW 向的构造转换带,对 NEE-NE 向主干断裂起调节作用,可能是阳江—统暗沙隐伏断裂带的一部分。

综上,研究区位于阳江—统暗沙断裂带影响范

围内,以发育张扭断裂为主,地震剖面上负花状构造明显(图 9),但该断裂始新世早期平面展布特征不明显,主要以转换带的形式,调节 NEE-NE 向伸展构造的差异变形,并形成一系列 NW 向沟谷。始新世晚期(恩平组时期)研究区 NW 向断裂增多,阳江—统暗沙断裂开始左行走滑,逐渐形成左行左阶拉分断裂体系^[9]。断槽、古沟谷和构造转换带多集中在阳江—统暗沙断裂带内或断裂带两侧,其发育演化必然会对物源输送产生重要影响。此外,阳江东凹 NEE-NE 向控洼断裂具有由南向北迁移的特征,文昌组沉积期南部断裂活动强,北部边界断裂活动相对较弱;恩平组沉积期北部断裂继续活动,而南部断裂活动减弱,断裂活动性迁移的特征有利于解释物源由盆内向北部盆外迁移的特征。

5.2 沉积相分析

研究区始新世整体上处于陆缘断陷湖盆环境,主要发育湖相、河流三角洲相。文昌组时期,受右行右阶走滑拉分作用的影响^[9],阳江东凹北部控洼断裂(阳江—统暗沙断裂带)活动较强,形成陡崖,在陡坡带主要发育了扇三角洲相(图 10),可作为较好的储集砂体^[29];向南的凹陷中心以半深湖、滨浅湖沉积为主,是烃源岩发育的重要区域^[30];靠近神

狐隆起的缓坡带广泛发育辫状河三角洲沉积,也可以作为较好的储层或输导层。该时期开平凹陷北部边界断层活动速率大且持续时间长,湖盆范围由小变大,发育了半深湖、滨浅湖相沉积,扇三角洲主要分布在凹陷北部控凹断层的下降盘。恩平组时期,研究区断裂活动整体减弱,各洼陷逐渐连成一个整体,准平原化作用使文昌组时期以来的隆凹相间的地貌不再明显,宽缓的地形为恩平组辫状河三角洲提供了良好的古地理环境(图 10)。

6 讨论

珠江口盆地始新统物源发生了巨大改变,但各个坳陷的物源时空转换并不一致。时间上,由于珠江口盆地中部隆起带的作用,珠一坳陷物源变化的时间要早于白云凹陷^[31],但珠三坳陷和开平凹陷物源转变的时间可能与珠一坳陷同步,早于白云凹陷。空间上,珠一坳陷和白云凹陷文昌组时期存在明显的 100~110 Ma 的峰值,认为是始新世早期东沙隆起对珠江口盆地的供源作用^[18]。但研究区内文昌组时期缺少 100~110 Ma 的锆石,说明始新世早期东沙隆起对珠江口盆地的供源能力有限,并未影响到阳江—统暗沙断裂带西侧的珠三坳陷和开

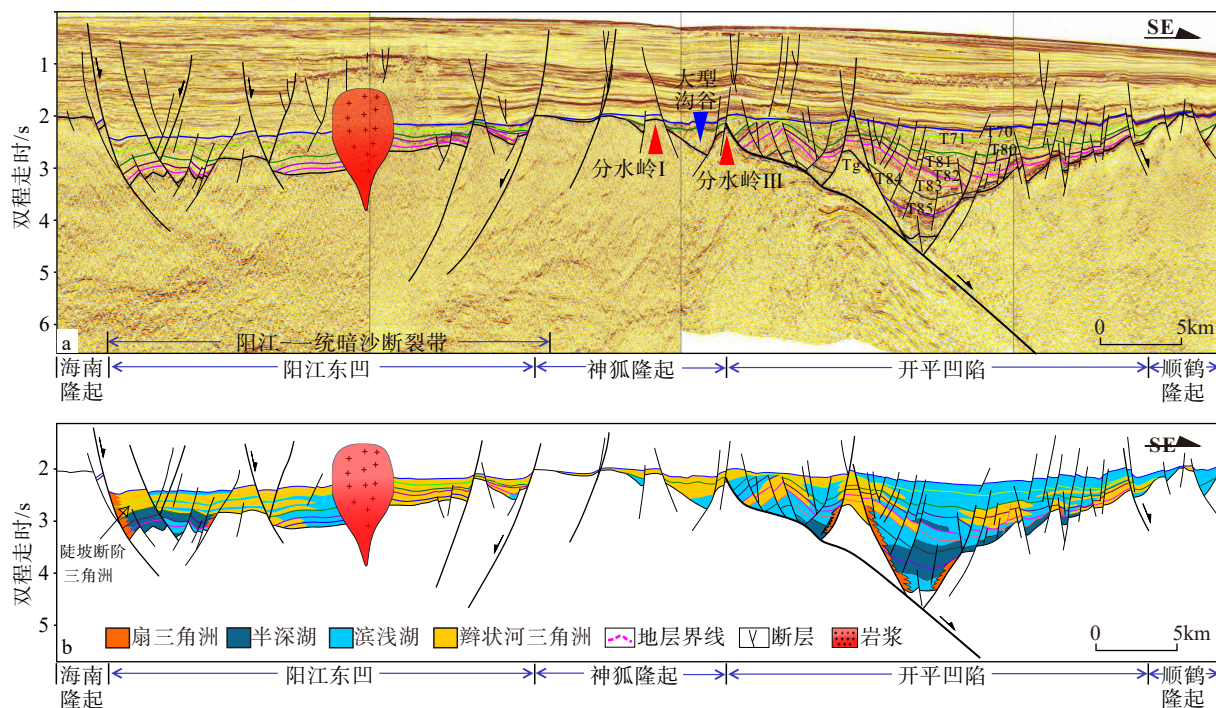


图 10 研究区始新统沉积充填特征

位置见图 1c。

Fig.10 Eocene sedimentary facies in the study area

See location in Fig.1c.

平凹陷,研究区盆内主要以阳江—统暗沙断裂带西侧的古隆起供源为主。

文昌组沉积期是珠江口盆地裂陷活动高峰期,研究区内凹陷边界断裂(如阳江—统暗沙断裂)活动强度大,各个洼陷相对独立,在凹陷相间的古地理背景下,沉积区主要通过短程近源水系输送盆内基底或低隆起的物源(图 11a),发育一系列湖相、河流三角洲相沉积(图 10)。该时期研究区北部的海南隆起不仅起到提供物源的作用,而且阻挡了北部盆外物源;文昌组时期开平凹陷北部边界断层活动速率大^[31],为凹陷北部神狐隆起和南海西部古隆起供源提供了有利的构造环境,而南侧的顺鹤隆起发

育一系列南倾的断层(图 10),阻挡了南部隆起的供源。研究区内神狐隆起发育多条沟谷及分水岭(图 7),这种大型沟谷及分水岭可能是研究区两凹陷文昌组锆石年龄特征不同的原因。

恩平组沉积期,阳江—统暗沙断裂带活动性减弱及盆地准平原化作用加剧,研究区古地貌趋于平缓,在区域沉降的背景下有利于远程水系的发育以及盆外远源物质的搬运,研究区发育河流三角洲相沉积。恩平组沉积早期,研究区内前中生代锆石数量增多,且锆石自形程度较差,锆石年龄频谱图与华夏地块具有很好的对比性(图 5、6),推测该时期研究区接受了较多华夏地块物源(图 11c)。恩平组

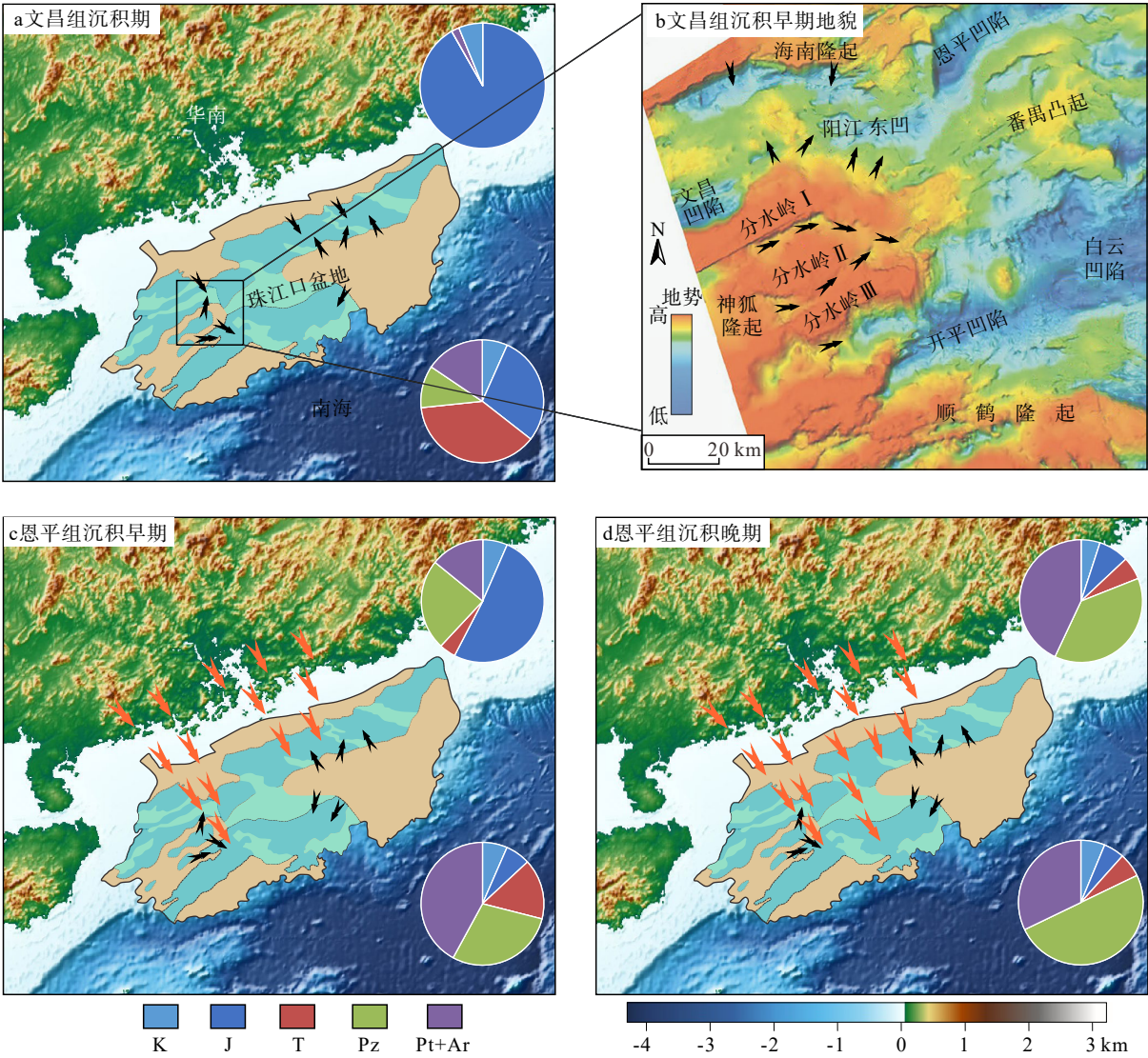


图 11 珠江口盆地始新统物源演化模式图

各小图上圆代表阳江东凹锆石年龄组成,下圆代表开平凹陷锆石年龄组成,黑色箭头表示盆内物源,橙色箭头表示盆外物源。

Fig.11 Eocene provenance evolution model diagram of the Pearl River Mouth Basin

The upper circle represents the age composition of zircons in the eastern Yangjiang Sag, the lower circle represents the age composition of zircons in the Kaiping Sag, the black arrow represents the intrabasinal provenance, and the orange arrow represents the extrabasinal provenance.

沉积晚期,由于研究区构造抬升,整个研究区沉积量较少,盆外供源能力减弱(图11d)。总体而言,恩平组时期是研究区盆内物源向盆内、盆外多物源转变的过渡时期,该时期阳江—统暗沙断裂带的左行走滑作用逐渐加强,发育一系列NW向沟谷,为北部华南陆缘的物质运输提供了良好的通道(图8、9)。

7 结论

(1)碎屑锆石 U-Pb 定年和三维地震资料相结合,为确定研究区始新统沉积物源演化提供了较好的方法。

(2)文昌组沉积期,阳江东凹碎屑锆石年龄谱以单峰(153 Ma)为特征,开平凹陷则以 155 和 232 Ma 双峰为主,指示两凹陷物源存在差异,两者均接受盆内隆起供源,但后者还受西部古隆起影响。两凹陷沉积环境均以半深湖、滨浅湖为主。

(3)恩平组沉积早期,阳江东凹和开平凹陷碎屑锆石年龄谱均存在主峰值 ± 434 Ma 以及 103~350 Ma 次要峰值区间,说明两凹陷物源类似,为盆内和盆外华南板块双重供源,同时沉积环境以辫状河三角洲为主,其次为滨浅湖。

(4)恩平组沉积晚期,阳江东凹碎屑锆石年龄谱发育单峰(157 Ma),开平凹陷则存在 247 和 432 Ma 两个主峰值以及 115 和 159 Ma 两个次峰值,指示两凹陷物源结构不同,可能与阳江—统断裂的差异性活动有关。此时,阳江东凹主要发育辫状河三角洲相沉积,开平凹陷以滨浅湖相沉积为主。

(5)盆地结构显著影响物源输送渠道和沉积相发育,与阳江—统暗沙断裂带有关的断槽、古沟谷和构造转换带对物源输送具有积极意义。

参考文献 (References)

- [1] 韩银学, 陈莹, 杨海长, 等. 白云凹陷恩平组“源—汇”体系及其对油气勘探的影响[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(2): 25-34. [HAN Yinxue, CHEN Ying, YANG Haichang, et al. "Source to sink" of Enping Formation and its effects on oil and gas exploration in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(2): 25-34.]
- [2] 郭帅, 杨海长, 曾清波, 等. 白云凹陷恩平组南部物源研究及其油气地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(6): 56-63. [GUO Shuai, YANG Haizhang, ZENG Qingbo, et al. Provenance of Enping formation in the southern Baiyun Sag, pearl river mouth basin and its implications for petroleum geology [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(6): 56-63.]
- [3] Tang X Y, Yang S C, Hu S B. Provenance of the Paleogene sediments in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea: insights from zircon U-Pb and fission track double dating [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 200: 104494.
- [4] Wang W, Ye J R, Bidgoli T, et al. Using detrital zircon geochronology to constrain Paleogene provenance and its relationship to rifting in the Zhu 1 Depression, Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(11): 3976-3999.
- [5] Zeng Z W, Zhu H T, Yang X H, et al. Using seismic geomorphology and detrital zircon geochronology to constrain provenance evolution and its response of Paleogene Enping Formation in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China sea: implications for Paleogene Pearl River drainage evolution [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 663-680.
- [6] 姜华, 王华, 肖军, 等. 古地貌对边缘海盆地沉积充填特征的控制: 以南海珠江口盆地珠三坳陷为例[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(1): 10-15. [JIANG Hua, WANG Hua, XIAO Jun, et al. Control of paleomorphology to sedimentary filling in marginal sea basin: by taking Zhu III depression for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(1): 10-15.]
- [7] 王瑞菊, 邓宏文, 郭建宇. 珠一坳陷古近系典型凹陷类分析[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(21): 108-112. [WANG Ruiju, DENG Hongwen, GUO Jianyu. Analogical analysis of typical depressions of Paleogene in Zhuyi Depression [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2008, 34(21): 108-112.]
- [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] 李庶波, 王岳军, 吴世敏. 珠江口盆地中: 新生代热隆升格局的磷灰石和锆石裂变径迹反演[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 95-107. [LI Shubo, WANG Yuejun, WU Shimin, et al. Meso-cenozoic tectono-thermal pattern of the Pearl River Mouth Basin: constraints from zircon and apatite fission track data [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(1): 95-107.]
- [11] Li C F, Zhou Z Y, Ge H P, et al. Rifting process of the Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. *Tectonophysics*, 2009, 472(1-4): 135-147.
- [12] 鲁宝亮, 孙晓猛, 张功成, 等. 南海北部盆地基底岩性地震-重磁响应特征与识别[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 563-572. [LU Baoliang, SUN Xiaomeng, ZHANG Gongcheng, et al. Seismic-potential field response characteristics and identification of basement lithology of the northern South China Sea Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(2): 563-572.]
- [13] 周凤娟, 丁琳, 马永坤, 等. 陆丰13东洼文昌组碎屑锆石U-Pb年龄特

- 征及其物源示踪意义[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 46-55. [ZHOU Fengjuan, DING Lin, MA Yongkun, et al. Detrital zircon U-Pb age characteristics of Wenchang Formation in Lufeng 13 eastern sag and its significance for provenance tracing [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 46-55.]
- [14] 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 Xiaoqian, 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.]
- [15] 王升兰, 刘晖. 珠江口盆地开平凹陷恩平组地震反射特征与沉积体系展布[J]. 科技导报, 2014, 32(28-29): 64-69. [WANG Shenglan, LIU Hui. Seismic reflection and depositional system of the Enping formation in the Kaiping depression of the Zhujiangkou Basin [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(28-29): 64-69.]
- [16] 聂国权, 何登发, 李小盼, 等. 珠江口盆地开平凹陷构造—地层层序与盆地演化[J]. 地质科学, 2020, 55(1): 145-162. [NIE Guoquan, HE Dengfa, LI Xiaopan, et al. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution of Kaiping Sag in the Pearl River Mouth Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(1): 145-162.]
- [17] Wang C, Wen S N, Liang X Q, et al. Detrital zircon provenance record of the Oligocene Zhuhai Formation in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 448-461.
- [18] 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.
- [19] Wang W, Yang X H, Bidgoli T S, et al. Detrital zircon geochronology reveals source-to-sink relationships in the Pearl River Mouth Basin, China [J]. Sedimentary Geology, 2019, 388: 81-98.
- [20] 杜晓东, 彭光荣, 吴静, 等. 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(6): 124-137. [DU Xiaodong, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(6): 124-137.]
- [21] 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.]
- [22] 魏山力. 基于地震资料的陆相湖盆“源-渠-汇”沉积体系分析: 以珠江口盆地开平凹陷文昌组长轴沉积体系为例[J]. 断块油气田, 2016, 23(4): 414-418. [WEI Shanli. "Source-Transportation-Sink" analysis method and application in continental lacustrine basin sedimentary system based on 2D seismic data: an example from Wenchang Formation of long axis direction, Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 414-418.]
- [23] 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'an-sha fault zone in the northern South China Sea margin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 40-52.]
- [24] 王秀玲. 板桥—北大港构造带构造特征及其对油气成藏的控制作用[D]. 中国石油大学硕士学位论文, 2008. [WANG Xiuling. The regional tectonic characteristic of Banqiao-Beidagang structural zone and its constraints on oil and gas reservoir[D]. Master Dissertation of China University of Petroleum, 2008.]
- [25] 徐长贵, 加东辉, 宛良伟. 渤海走滑断裂对古近系源—汇体系的控制作用[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1871-1882. [XU Changgui, JIA Donghui, WAN Liangwei. Control of the strike-slip fault to the source-to-sink system of the Paleogene in Bohai Sea area [J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1871-1882.]
- [26] 漆家福. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义[J]. 海相油气地质, 2007, 12(4): 43-50. [QI Jiafu. Structural transfer zones and significance for hydrocarbon accumulation in rift basins [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(4): 43-50.]
- [27] 刘强虎. 渤海湾盆地沙垒田凸起古近系“源—渠—汇”系统耦合研究[D]. 中国石油大学(北京)博士学位论文, 2016. [LIU Qianghu. "Source-to-sink" system coupling analysis of the paleogene, shalaitian uplift, Bohai Bay Basin, China[D]. Doctor Dissertation of China University of Petroleum, Beijing, 2016.]
- [28] 田景春, 吴琦, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地地下石盒子组盒8段储集砂体发育控制因素及沉积模式研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2403-2412. [TIAN Jingchun, WU Qi, WANG Feng, et al. Research on development factors and the deposition Model of large area reservoir sandstones of He8 section of Xiashihezi Formation of Permian in Ordos basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2403-2412.]
- [29] 魏巍, 朱筱敏, 谈明轩, 等. 查干凹陷下白垩统扇三角洲相储层特征及物性影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 447-455. [WEI Wei, ZHU Xiaomin, TAN Mingxuan, et al. Reservoir characteristics and influences on poroperm characteristics of the Lower Cretaceous fan-delta facies in Chagan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 447-455.]
- [30] 余力蓓. 东濮凹陷沙四上亚段烃源岩生排烃特征研究[D]. 中国石油大学(北京)硕士学位论文, 2018, doi:10.27643/d.cnki.gsybu.2018.001311. [YU Libei. Study on the hydrocarbon generation of hydrocarbon source rocks in the upper subsection of Dongpu depression[D]. Master Dissertation of China University of Petroleum, Beijing, 2018, doi:10.27643/d.cnki.gsybu.2018.001311.]
- [31] 吕彩丽, 张功成, 杨东升. 珠江口盆地珠二坳陷文昌组构造差异性与动力学成因机制[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 333-341. [LÜ Caili, ZHANG Gongcheng, YANG Dongsheng. Differential structure and dynamic mechanism of Wenchang Formation in the Zhu II Depression of the Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 333-341.]