

珠江口盆地惠州凹陷古近纪源汇过程 及其控储作用



www.
geojournals.cn/georev

李一超^{1, 2)}, 龚承林^{1, 2)}, 邱欣卫³⁾, 祁鹏⁴⁾, 何雁兵³⁾, 余一欣^{1, 2)}

1) 油气资源与工程全国重点实验室中国石油大学(北京), 北京, 102249;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249;

3) 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳, 518054;

4) 中海油研究总院有限责任公司, 北京, 100028

内容提要:源汇系统定量化研究是沉积学领域的前沿,是精细重构源汇过程、指导油气储层预测的重要手段。利用重矿物和锆石 U-Pb 年龄对珠江口盆地惠州凹陷惠州 27 转换带进行物源示踪、定量恢复源区沉积物相对贡献,进而重构古近纪源汇过程,探讨源汇控储作用。研究表明,中始新统文昌组重矿物类型复杂、ZTR 指数(碎屑岩中碎屑锆石(Zircon)、电气石(Tourmaline)、金红石(Rutile)在透明重矿物碎屑中所占的比例)小,上始新统恩平组重矿物类型简单、ZTR 指数大。研究区文昌组—恩平组主要受盆内中生界岩浆岩基底和盆外珠江水系供源。其中文昌组沉积物 98% 来自于盆内中生界岩浆岩基底;下恩平组沉积物 58.4% 来自于盆外珠江东北部支流、36.5% 来自于盆内中生界岩浆岩基底;上恩平组沉积物 73.7% 来自于盆外珠江东北部支流、22.2% 来自于盆内中生界岩浆岩基底。研究认为,恩平组沉积期现代珠江尚未形成,但珠江东北部支流(即古珠江)已独立发育且携带大量华夏地块碎屑物质汇入惠州凹陷,导致了惠州 27 转换带“文昌期盆内近源—恩平期盆外、盆内混源”的源汇转换过程,而非简单的“盆内近源—盆外远源”转换。源汇转换过程改变了恩平组储层的岩石组分,进而改善了储层物性,也使得其储层非均质性变强。本研究定量解析了惠州凹陷古近纪源汇转换过程,为陆相断陷盆地定量源汇及其应用提供了新视角。

关键词:源汇系统;锆石 U-Pb 年龄;重矿物;储层;珠江口盆地

地球表面的地貌单元可以分为造山带或隆起区的剥蚀地貌和盆地区的沉积地貌(林畅松等, 2015)。从剥蚀地貌中剥蚀产生、经搬运体系输送、最终在沉积地貌中沉积下来的完整沉积物剥蚀—搬运—沉积过程,即是源汇系统(Source-to-sink system),也被称为沉积物路径系统(Sediment routing system)(Allen, 2008; Carter et al., 2010; Romans et al., 2016)。自 1998 年美国国家自然科学基金委员会启动“洋陆边缘计划”(Margins Program)、其沉积学与地层学项目组提出“源汇”研究专题以来,经过 20 多年的发展,源汇系统研究对象从大陆边缘盆地扩展成了大陆边缘盆地和陆相湖盆并举;源汇系统研究也逐渐形成了 3 个方面的特色:过程化、机制化和定量化。其中,利用沉积物路径恢复再现剥蚀—搬运—沉积过程是源汇系统研究的首要任务

(Allen, 2008; Breithfeld et al., 2022; Li Yichao et al., 2023; 王策等, 2023),利用关键变革期的源汇转换记录重构区域构造与气候驱动机制是源汇系统研究的新动向(Cawood et al., 2012; Shao Lei et al., 2017; Cao Licheng et al., 2018; Pickerling et al., 2020; Gilmullina et al., 2022; Liu Chang et al., 2022),而利用源汇要素间的定量关系揭示源汇耦合的控砂作用是源汇系统研究的重要突破(Sømme et al., 2009; 朱秀等, 2017; Nyberg et al., 2018; Liu Qianghu et al., 2019; 陈贺贺等, 2023)。

华南板块东南缘自中生代以来一直位于板块交汇地带,构造演化复杂。作为南海北部陆缘最大的沉积盆地,珠江口盆地深时源汇过程一直被认为是揭开区古地理格局、古水系演变神秘面纱的重要突破口,受到诸多地质学者专家的关注(Jin Hualong

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41972100)和中海油科技项目(编号:CCL2020SZPS0168、CCL2021RCPS0169KQN)的成果。

收稿日期:2023-12-04;改回日期:2024-01-24;网络首发:2024-02-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.02.021

作者简介:李一超,男,1994 年生,博士研究生,主要从事断陷盆地沉积与源汇系统研究;Email: yichaolip2p@hotmail.com。通讯作者:龚承林,男,1983 年生,教授,主要从事深水沉积、层序地层与源汇系统教学与研究;Email: chenglingong@cup.edu.cn。

et al., 2022; Liu Chang et al., 2022; Cao Licheng et al., 2023; Wang Guangzeng et al., 2023; Zhang Zengjie et al., 2023)。珠江口盆地也是中国海域油气勘探的重要阵地, 深层储层非均质性强、主控因素多、精细评价与预测面临重大挑战。除成岩作用之外, 沉积物母岩性质、沉积物搬运距离以及沉积相带等源汇要素对储层品质也有重要影响。因此, 有必要将源汇系统研究与储层研究结合, 即把源汇系统中的物源体系、搬运体系、沉积体系与成岩体系纳为一个整体, 以系统化的研究思路综合开展储层预测研究(李顺利等, 2017; 姚光庆和姜平, 2021; 徐长贵和龚承林, 2023)。针对珠江口盆地北部珠一坳陷古近纪源汇系统研究已取得大量成果, 前人利用锆石 U-Pb 年龄、稀土元素和黏土矿物开展了物源示踪分析, 厘定了“盆内—盆外”物源转换过程(Shao Lei et al., 2016, 2019; Wang Wei et al., 2017; 崔宇驰等, 2018; Ma Ming et al., 2019), 明确了珠琼幕式裂陷作用控制下的沉积充填演化特征(王维等, 2015; Zhu Hongtao et al., 2016; 葛家旺等, 2021; Jiang Mengya et al., 2022; 单玄龙等, 2023)。针对珠一坳陷深层储层特征及其主控因素, 前人多聚焦于沉积作用和成岩作用对储层质量的控制(葛家旺等, 2015; 朱筱敏等, 2019; 张向涛等, 2023), 并提出了转换带对储层物性的控制作用(田立新, 2021)。然而, 珠一坳陷古近纪盆内—盆外物源转换的时限一直存在争议, 是在文昌组沉积的中始新世(Wang Wei et al., 2017), 是在恩平组沉积的晚始新世(Li Yichao et al., 2023), 又或是之后的早渐新世(崔宇驰等, 2018; Shao Lei et al., 2019)? 文昌组至恩平组沉积期, 珠一坳陷整体处于裂陷期, 断裂作用形成的断块和低凸起会将不同凹陷或次洼分隔开来, 同时也会对来自盆外物源的沉积物起到阻碍作用(Wang Wei et al., 2017; Tang Xu et al., 2023)。由此来看, 珠一坳陷不同凹陷或次洼的盆内—盆外物源转换时限存在差异, 不同凹陷的物源转换时限不能一概而论。另一方面, 前人关于珠一坳陷的储层研究聚焦于成岩演化过程, 缺少考虑沉积物自源区剥蚀产生、经搬运至盆地沉积下来, 即源汇系统对储层控制作用的系统化分析。

构造转换带往往作为物源注入口, 控制了沉积砂体展布, 同时构造转换带复杂断裂体系对油气成藏具有重要控制作用。因其重要的石油地质意义, 构造转换带受到广泛关注。笔者等以珠江口盆地惠州凹陷惠州 27 转换带为研究目标, 以古近系中始新

统文昌组 and 上始新统恩平组为研究对象, 以古近系重矿物、锆石 U-Pb 年龄及相关储层资料为着手点: ①开展沉积物源示踪分析, 定量恢复潜在物源区的沉积物相对贡献, 重构古近纪源汇过程; ②分析惠州 27 转换带储层发育特征, 明确储层物性差异, 探讨源汇系统对储层发育的控制作用。

1 区域地质概况

1.1 盆地构造—地层演化特征

珠江口盆地是南海北部大陆边缘古生界—中生界复杂基底上发育形成的新生代沉积盆地。珠一坳陷位于珠江口盆地北部, 整体呈 NE 向展布(图 1a)。研究区惠州凹陷位于珠一坳陷中部, 北邻北部隆起带, 南接东沙隆起(图 1b)。在太平洋板块、印度板块与欧亚板块的相互作用控制下, 珠江口盆地新生代主要经历了神狐运动、珠琼运动 I 幕、珠琼运动 II 幕、南海运动以及白云运动等, 整体具有“先断后坳、下陆上海”的双层结构(图 2)(李平鲁, 1993; 庞雄等, 2007; 施和生等, 2009)。古新世—早始新世, 神狐运动控制珠江口盆地发育了河流相的神狐组; 而后中始新世珠琼运动 I 幕启动, 珠江口盆地以湖相沉积为特征, 发育文昌组; 晚始新世, 受控于珠琼运动 II 幕, 盆地沉积了以三角洲、湖泊为特征的恩平组; 在渐新世南海运动之后, 珠江口盆地整体由断陷进入坳陷演化阶段, 发育海陆过渡环境的珠海组以及海相环境的新近系(赵中贤等, 2009; 张丽丽等, 2020; Ge Jiawang et al., 2020)。研究区惠州凹陷内, 神狐组普遍缺失, 研究目的层系文昌组—恩平组直接上覆于前新生界岩浆岩基底(图 2)。

1.2 潜在物源区特征

珠江口盆地北部珠一坳陷古近纪存在多个潜在物源区, 根据构造区划位置可以分为盆内物源区和盆外物源区。前人针对珠江口盆地物源分析认为, 盆内中生界基底与盆外华南板块共同构成了珠一坳陷的潜在物源区(Shao Lei et al., 2016, 2019; Wang Wei et al., 2017; Li Yichao et al., 2023)。笔者等重点介绍珠江口盆地中生界基底和盆地北部华南板块物源区特征。

1.2.1 珠江口盆地中生界基底物源特征

南海北部陆缘盆地基底是华南大陆向海的延伸, 钻遇基底的钻井资料和地球物理资料表明, 以阳江—统暗沙断裂为界, 断裂以西的盆地基底以古生界浅变质岩为主, 断裂以东的盆地基底以中生界岩浆岩和沉积岩为主。位于断裂以东的珠一坳陷基

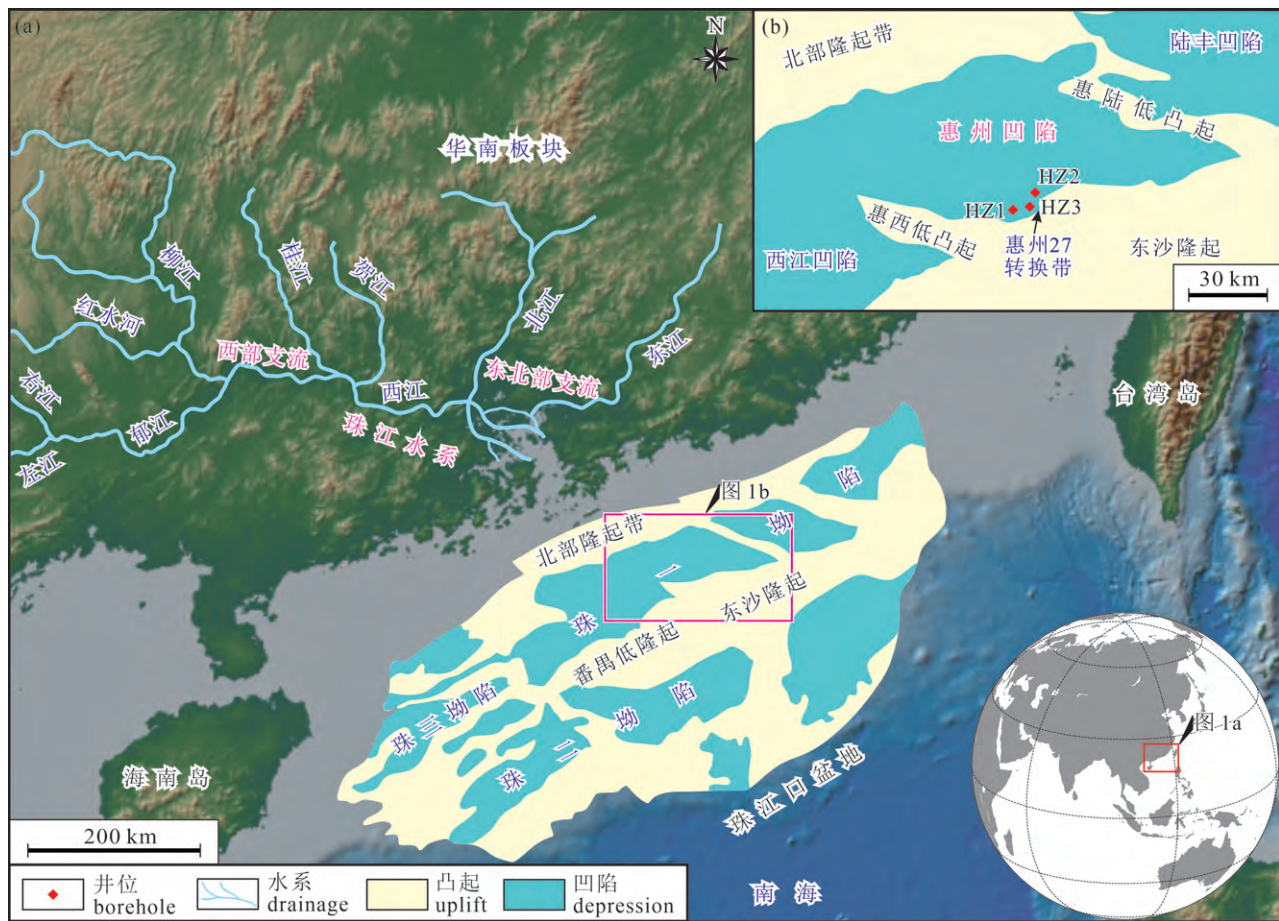


图 1 珠江口盆地及其周围构造区划图

Fig. 1 Tectonic map showing geological units in the Pearl River Mouth Basin and its surrounding areas

底岩浆岩分布最广,在恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷以及陆丰凹陷北部广泛发育,而在陆丰凹陷东南部发育中生界沉积岩基底(鲁宝亮等,2011;孙晓猛等,2014;周凤娟等,2020)。前人针对中生界基底的锆石 U-Pb 定年指示,研究区惠州凹陷盆地基底及其北部隆起带、南部东沙隆起的中生界岩浆岩表现为“燕山期单峰”特征(图 3a)(Li Yichao et al., 2023; 刘杰等,2023),而陆丰凹陷中生界沉积岩锆石 U-Pb 年龄谱表现为“燕山期+加里东期的双峰”特征(周凤娟等,2020)。

1.2.2 华南板块物源特征

华南板块具有复杂的岩性和年代分布。以江山—绍兴断裂沿线为界,华南板块分为扬子地块和华夏地块,其中华夏地块又可分为东华夏地块和西华夏地块,二者以政和—大埔断裂为界(Xu Xisheng et al., 2007)。扬子地块以碳酸盐岩沉积为主,同时发育广泛的新元古代岩浆岩。华夏地块由元古宙基底叠加强烈的岩浆活动演化而来,其中西华夏地

块发育大量的加里东期岩浆活动,而东华夏地块发育大量印支期花岗岩。同时,在中生代太平洋—欧亚板块俯冲作用下,东华夏地块发育了广泛的北东向岩浆弧,形成了大量晚中生代花岗岩和火山岩。整体来看,从扬子地块到东华夏地块,华南板块具有“西老东新”的年代分布特征(Xu Xisheng et al., 2007)。

珠江是古近纪以来华南板块向珠江口盆地供源的最重要通道。现代珠江包括东北部支流(北江、东江)和西部支流(西江、红水河、南盘江、北盘江、左江以及右江等)。由于华南板块不同地块间具有差异年龄分布,不同珠江支流的河流沉积物也具有不同的锆石 U-Pb 年龄特征。珠江河口沉积物则包括了东北部支流和西部支流的所有年龄组分,表现为“燕山期主峰+印支期、加里东期、晋宁期三个次峰”,同时包括中元古代和古元古代年龄组分(图 3b)(Zhong Lifeng et al., 2017)。流经华夏地块的珠江东北部支流沉积物锆石 U-Pb 年龄谱表现为

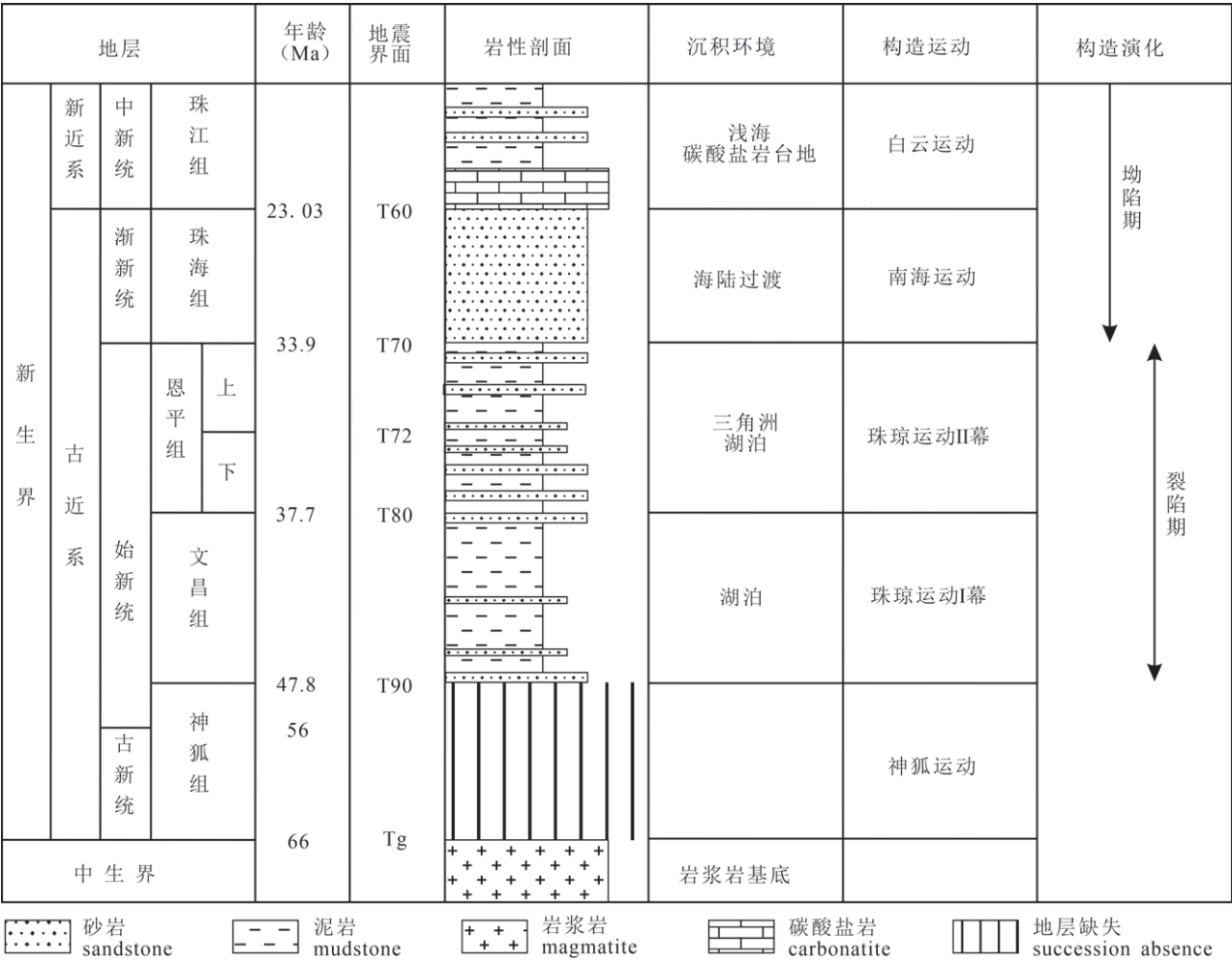


图 2 珠江口盆地惠州凹陷构造—地层演化序列

Fig. 2 Tectono—stratigraphic column of the Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin

“燕山期主峰+印支期、加里东期两个次峰”(图 3c) (Liu Chang et al. , 2017; He Jie et al. , 2020);而流经扬子地块的珠江西部支流沉积物锆石 U-Pb 年龄谱表现为“印支期主峰+加里东期、晋宁期两个次峰”,与东北部支流显著不同的是,西部支流沉积物具有一定组分更古老的中元古代和古元古代年龄,且不具有燕山期的年龄组分(图 3d) (Liu Chang et al. , 2017; He Jie et al. , 2020)。

2 数据与方法

2.1 研究数据

本研究利用珠江口盆地惠州凹陷惠州 27 转换带文昌组—恩平组的 14 个重矿物样品和 3 个锆石样品进行了物源示踪分析。14 个重矿物样品均来自 HZ1 井,其中 8 个样品(EP1~EP8)来自于恩平组,6 个样品(WC1~WC6)来自于文昌组,样品 EP1

~EP8 和 WC1~WC8 的采样深度依次增大。重矿物数据由中海石油(中国)有限公司深圳分公司提供。3 个锆石样品的 U-Pb 年龄数据引用自文献(Li Yichao et al. , 2023),其中 HZ2 井的 HZ2-UEP 样品来自于上恩平组,HZ3 井的 HZ3-LEP 和 HZ3-WC 样品分别来自于下恩平组和文昌组。此外,为了开展基于锆石 U-Pb 年龄的物源示踪,本论文还引用了前人发表的潜在物源区 23 个锆石样品的 U-Pb 年龄数据,包括 5 个珠江口盆地中生界基底样品(Li Yichao et al. , 2023; 刘杰等,2023),4 个珠江河口样品(Zhong Lifeng et al. , 2017),4 个珠江东北部支流样品(Liu Chang et al. , 2017; He Jie et al. , 2020),10 个珠江西部支流样品(Liu Chang et al. , 2017; He Jie et al. , 2020)。具体样品信息见表 1。

2.2 研究方法

由于母岩性质不同,不同物源区的碎屑物质经

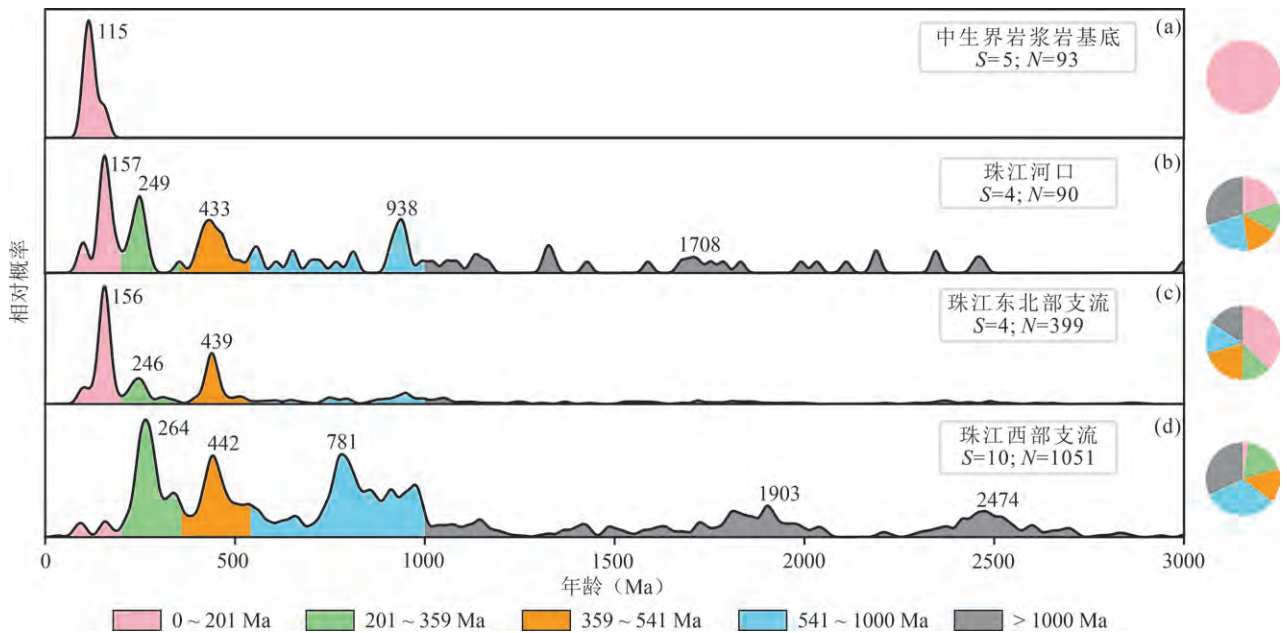


图 3 珠江口盆地潜在物源区锆石 U-Pb 年龄核密度估计(KDE)图(S 为样品数, N 为锆石颗粒数)
(锆石 U-Pb 年龄数据来自于 Liu Chang et al. , 2017; He Jie et al. , 2020; Li Yichao et al. , 2023; 刘杰等,2023)
Fig. 3 Kernel density estimate (KDE) plots of zircon U-Pb ages for potential source areas of the Pearl River Mouth Basin (S : number of analytical samples, N : number of analytical zircon grains) (Zircon data are from Liu Chang et al. , 2017; He Jie et al. , 2020; Li Yichao et al. , 2023; Liu Jie et al. , 2023&)

表 1 用于沉积物源示踪的重矿物和锆石样品信息表							
Table 1 A summary of heavy mineral and zircon samples analyzed for sediment provenance tracing							
	样品位置		地层	深度 (m)	样品名称	样品类型	样品来源
重矿物组分	惠州凹陷 惠州 27 转换带	HZ1 井	恩平组	3090~3093	EP1	岩屑	本研究
				3105~3108	EP2		
				3135~3138	EP3		
				3180~3183	EP4		
				3219~3222	EP5		
				3279~3282	EP6		
				3300~3303	EP7		
				3315~3318	EP8		
		文昌组	3366~3369	WC1			
			3384~3387	WC2			
			3405~3408	WC3			
			3423~3426	WC4			
			3498~3501	WC5			
			3516~3519	WC6			
锆石 U-Pb 年龄	惠州凹陷 惠州 27 转换带	HZ2 井	上恩平组	—	HZ2-UEP	岩屑	Li Yichao et al. , 2023
		HZ3 井	下恩平组	—	HZ3-LEP		
			文昌组	—	HZ3-WC		
	惠州凹陷基底		前新生界	—	B1, B2, B3, B4	岩屑	Li Yichao et al. , 2023
				—	W1	岩芯	刘杰等,2023
	珠江河口		现代	—	2, 3, 4, 5	河流沉积物	Zhong Lifeng et al. , 2017
	珠江东北部支流		现代	—	P1, P4	河流沉积物	Liu Chang et al. , 2017
					S5509, S5513	河流沉积物	He Jie et al. , 2020
	珠江西部支流		现代	—	903, 906, 5, 102, 105, 304	河流沉积物	Liu Chang et al. , 2017
					S5502, S5504, S5497, S5498	河流沉积物	He Jie et al. , 2020

剥蚀—搬运—沉积之后会表现出不同的重矿物组合特征。重矿物组合特征差异对物源分析具有重要意义。本研究在直观的重矿物组合百分含量堆积图分析基础上,进一步通过 Q 型聚类对比文昌组与恩平组重矿物组合差异,采用的聚类方法与度量标准分别为系统聚类组间联接法和欧式距离。另外,本研究还通过重矿物 ZTR 指数进行物源分析。ZTR 指数是碎屑岩中碎屑锆石 (Zircon)、电气石 (Tourmaline) 和金红石 (Rutile) 在透明重矿物碎屑中所占的百分比。它可以指示成熟度和搬运距离。ZTR 指数与成熟度、搬运距离通常呈正比例关系,ZTR 指数越大,指示重矿物成熟度越高,沉积物搬运距离越远 (Hubert, 1962; 徐杰和姜在兴, 2019; 许苗苗等, 2021; Jian Xing et al., 2023)。

由于锆石具有较强的抗风化能力,加上近年来 LA-ICP-MS 技术方法的快速发展,锆石 U-Pb 定年被广泛应用于物源示踪研究中。本研究利用统计学方法对文昌组、恩平组以及潜在物源区锆石 U-Pb 年龄进行定量对比以建立源汇配置关系,包括核密度估计图 (KDE) 对比、Kuiper 检验以及多维定标 (MDS) 分析 (Vermeesch, 2012, 2013; Sharman et al., 2018)。锆石 U-Pb 年龄数据的 KDE 可视化、Kuiper 检验和 MDS 分析均在 DetritalPy 软件平台完

成 (Sharman et al., 2018)。KDE 图上不同颜色充填指示了不同年龄组分, KDE 年龄谱图带宽为 12 Ma; Kuiper 检验得到的 V_{max} 值越小, 指示两个样品间的年龄组分差异越小; 在 MDS 图中, 样品间的距离越小, 指示样品间的年龄组分差异越小。在物源示踪的基础上, 本研究还利用了基于 K—S 检验的 Monte Carlo 模型方法, 建立物源区锆石年龄分布混合模型, 进而定量恢复不同物源区对文昌组、下恩平组和上恩平组的沉积物相对贡献。K—S 检验以及基于 Monte Carlo 模型的源区相对贡献量反演是在 DZmix 软件平台完成 (Sundell and Saylor, 2017)。

3 源汇转换过程

3.1 基于重矿物组合及其特征指数的物源转换厘定

从重矿物组合特征来看, 惠州凹陷惠州 27 转换带的 HZ1 井文昌组至恩平组的 14 个重矿物样品中总体识别了 11 种重矿物。百分含量大于 10% 的重矿物有锆石、绿帘石、磁铁矿和黄铁矿, 百分含量均不大于 10% 的重矿物有电气石、石榴子石、赤褐铁矿、白钛矿、绿泥石、金红石和重晶石 (图 4)。但是, 文昌组和恩平组表现出不同的重矿物组合特征。文昌组以“锆石+石榴子石+绿帘石+磁铁矿+黄铁矿+重晶石”为特征组合; 而恩平组以“锆石+白钛矿+黄

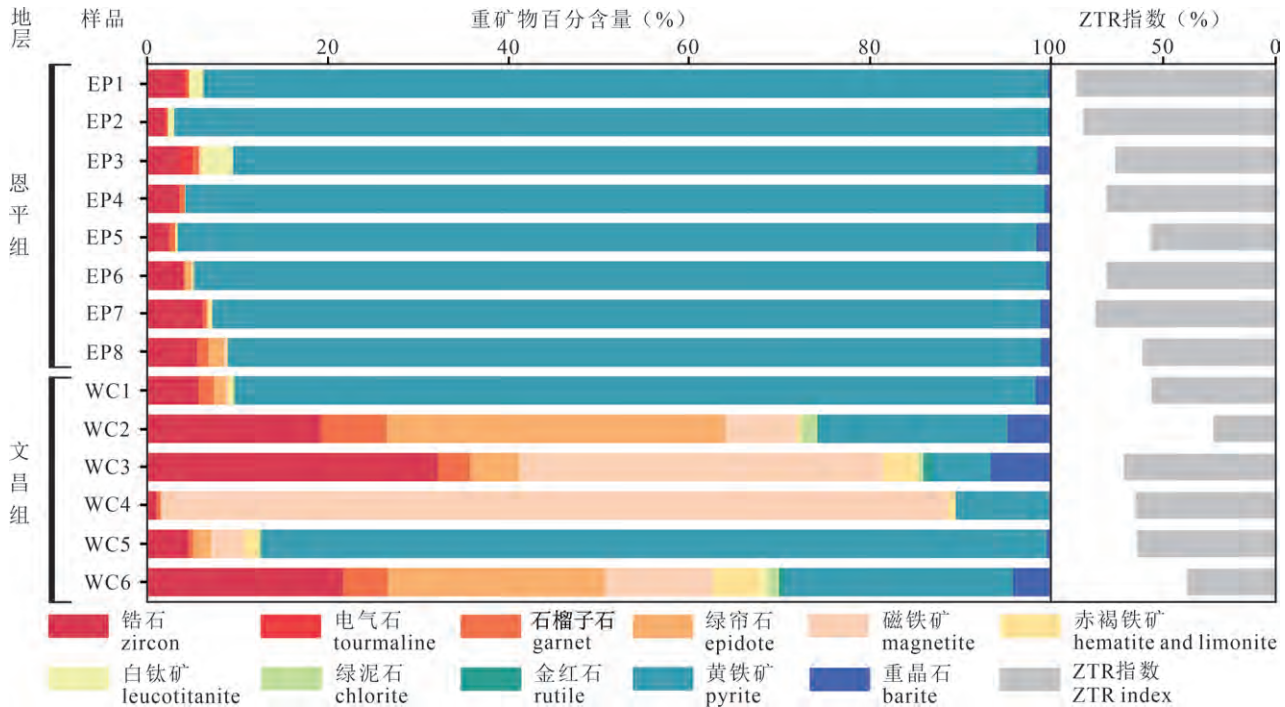


图 4 珠江口盆地惠州凹陷 HZ1 井文昌组至恩平组重矿物组合特征及 ZTR 指数

Fig. 4 Heavy mineral assemblages and their ZTR indexes of the Wenchang Formation and the Enping Formation in the Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

铁矿”为特征组合。对比文昌组与恩平组的重矿物组合特征,发现二者存在如下差异:文昌组重矿物类型复杂,而恩平组重矿物类型较为简单;除了样品 WC1 和 WC5 外,文昌组重矿物中黄铁矿含量相对较低,而恩平组重矿物中黄铁矿含量非常高,均大于 89%,最高可达 96%;文昌组重矿物中几乎不含白钛矿,而恩平组重矿物中可见一定含量的白钛矿;文昌组重矿物中含有一定比例的重晶石,而恩平组重矿物中重晶石含量非常低。针对惠州 27 转换带 HZ1 井文昌组至恩平组的 14 个重矿物样品,对其 11 种重矿物组合进行 Q 型聚类分析,得到不同样品的组合分布(图 5)。其中恩平组的 8 个样品(EP1~EP8)及文昌组的 2 个样品(WC1 和 WC5)具有相似的重矿物组合特征,文昌组剩余的 4 个样品(WC2、WC3、WC4 和 WC6)具有相似的重矿物组合特征。

从重矿物 ZTR 特征指数来看,恩平组 8 个样品中,ZTR 指数最小值为 55%,最大值为 89%,平均值为 74%;而文昌组 6 个样品中,ZTR 指数最小值为 28%,最大值为 67%,平均值为 52%(图 4)。从文昌组到恩平组,重矿物 ZTR 指数显著变大,反映了矿物成熟度明显增大。综合文昌组、恩平组重矿物组合特征差异和文昌组、恩平组重矿物 ZTR 指数差异,分析认为惠州 27 转换带在恩平组沉积期发生了由近源向远源的物源转换。文昌组沉积期,近源供给作用下,重矿物类型复杂,矿物成熟度低、ZTR 指数小;恩平组沉积期,研究区发生近源—远源的物源

转换,远源供给作用下,重矿物类型相对简单,矿物成熟度高、ZTR 指数大。至于文昌组和恩平组沉积期的具体物源区则有待进一步研究。

3.2 基于锆石 U-Pb 年龄的源汇配置关系建立

从锆石 U-Pb 年龄 KDE 图来看,惠州 27 转换带文昌组呈现出 116 Ma 的燕山期单峰特征,年龄组分较为简单,几乎没有比燕山期更老年龄组分(图 6c);下恩平组呈现出 148 Ma 的燕山期主峰,同时,年龄谱中可见印支期、加里东期和少量晋宁期、中元古代及古元古代的年龄组分(图 6b);上恩平组锆石年龄谱与下恩平组锆石年龄谱类似,除了 154 Ma 的燕山期主峰外,上恩平组锆石年龄谱中还可可见印支期和加里东期的两个次峰,以及少量晋宁期、中元古代和古元古代的年龄组分(图 6a)。整体来说,文昌组锆石年龄分布较为单一,而恩平组锆石年龄分布复杂。并且,从下恩平组至上恩平组,锆石年龄谱中印支期与加里东期年龄组分的比例显著增加。

直观对比潜在物源区锆石 U-Pb 年龄谱(图 3)与惠州 27 转换带沉积区锆石 U-Pb 年龄谱(图 6),可以一定程度上分析不同样品间的差异性与相似性,进而进行物源示踪、建立源汇配置关系。惠州 27 转换带文昌组至恩平组三个样品的锆石年龄谱均表现出较年轻的燕山期年龄组分比例高、而较老的>1000 Ma 的年龄组分比例少(图 6)的特征,这与珠江西部支流沉积物较年轻的燕山期年龄组分比例少、而较老的>1000 Ma 的年龄组分比例高(图 3d)的特征差异明显,由此排除了珠江西部支流对惠州 27 转换带的供源影响。其中,惠州 27 转换带文昌组锆石年龄谱(图 6c)与盆地中生界岩浆岩基底年龄谱(图 3a)具有相似的“燕山期单峰”特征,指示了文昌组沉积期,惠州 27 转换带主要接受盆内中生界岩浆岩基底供源作用。上恩平组、下恩平组锆石年龄谱(图 6a 和 b)与珠江东北部支流沉积物锆石年龄谱(图 3c)具有相似的“燕山期主峰+印支期、加里东期次峰”特征,指示了珠江东北部支流对惠州 27 转换带的供源影响。

除了上述直观对比锆石 U-Pb 年龄 KDE 图,本研究还通过 Kuiper 检验以及 MDS 方法定量估算沉积区与潜在物源区锆石 U-Pb 年龄的差异性。Kuiper 检验的 $V_{\max}$ 值可以指示样品间锆石 U-Pb 年龄的差异性。 $V_{\max}$ 值越大,表示两样品间的差异性越大,反之亦然。从 3 个潜在物源区与 3 个沉积区锆石样品间基于 Kuiper 检验的 $V_{\max}$ 值矩阵来看(图 7a),文昌组与潜在物源区中的中生界岩浆岩基

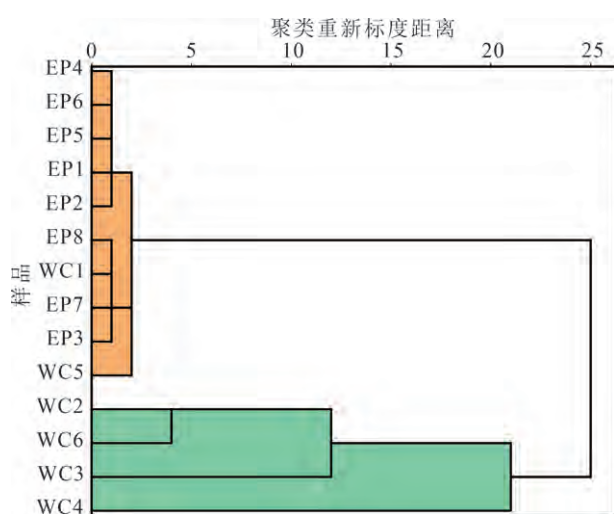


图 5 惠州 27 转换带 HZ1 井文昌组至恩平组重矿物组合 Q 型聚类分析

Fig. 5 Q-type cluster spectrum of heavy mineral assemblages of the Wenchang and Enping Formations in the borehole HZ1, Huizhou-27 transfer zone

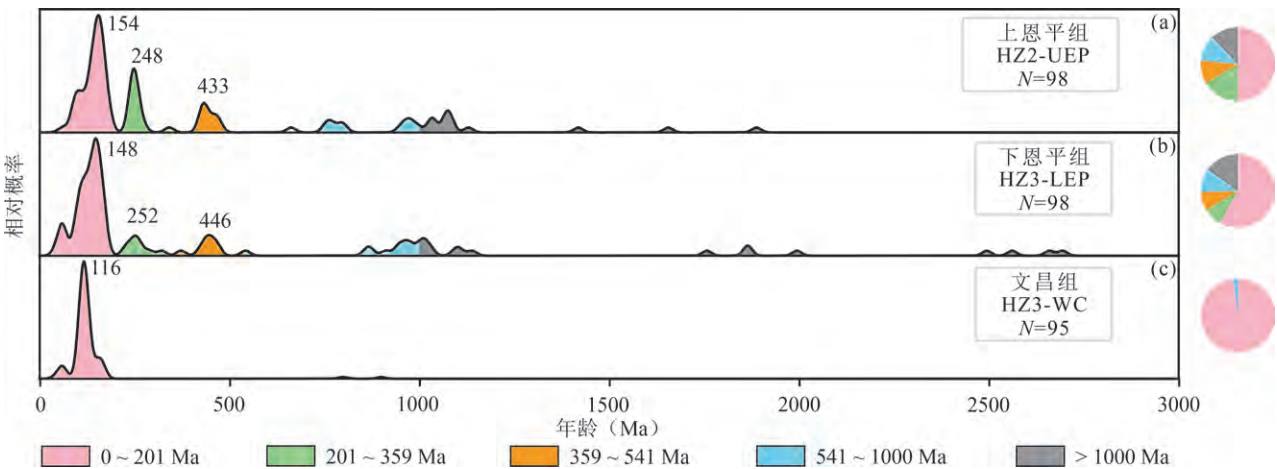


图 6 惠州 27 转换带文昌组至恩平组锆石 U-Pb 年龄核密度估计 (KDE) 图 (N 为锆石颗粒数)
(锆石 U-Pb 年龄数据来自于 Li Yichao et al., 2023)

Fig. 6 Kernel density estimate (KDE) plots of zircon U-Pb ages of the Wenchang Formation and the Enping Formation in Huizhou-27 transfer zone (N : number of analytical zircon grains) (Zircon data are from Li Yichao et al., 2023)

底的 $V_{\max}$ 值最小,为 0.22,表明了其锆石 U-Pb 年龄分布最为相似,文昌组主要接受盆地中生界基底供源。下恩平组、上恩平组均与潜在物源区中的珠江东北部支流的 $V_{\max}$ 值最小,分别为 0.35 和 0.19,表明了下恩平组、上恩平组与潜在物源区中的珠江东北部支流的锆石 U-Pb 年龄分布最为相似,且上恩平组与珠江东北部支流的相似程度更高。该 $V_{\max}$ 值特征指示了下恩平组、上恩平组主要接受珠江东北部支流供源,且在上恩平组沉积期,珠江东北

部支流供源作用显著增强。

将基于 Kuiper 检验的 $V_{\max}$ 值结果,通过一定的算法、以点的形式投射在多维空间,即可得到本研究中锆石 U-Pb 年龄的 MDS 图,以指示不同样品间的差异。MDS 图中样品间的距离越小,表明其锆石 U-Pb 年龄分布的差异越小。从 3 个潜在物源区和 3 个沉积区样品的锆石 U-Pb 年龄 MDS 图来看 (图 7b),文昌组与中生界岩浆岩基底距离最近,指示了中生界岩浆岩基底对文昌组的供源作用;下恩平组

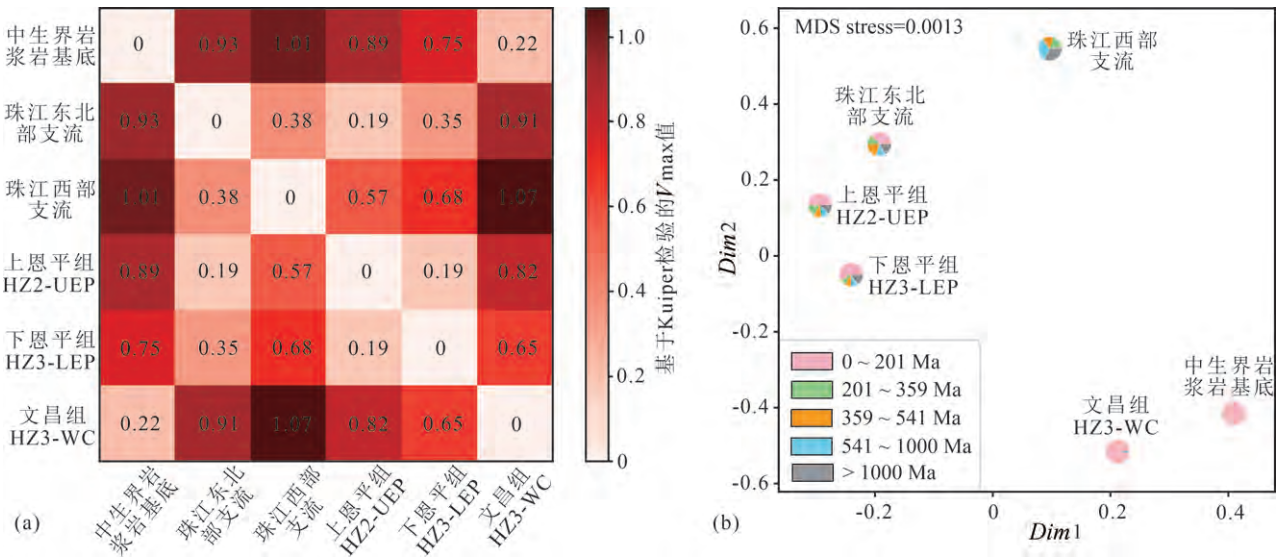


图 7 惠州 27 转换带及其潜在物源区锆石 U-Pb 年龄基于 Kuiper 检验的差异性定量对比(a)
及其多维定标 (MDS) 分析(b) (锆石 U-Pb 年龄数据同图 3 和图 6)

Fig. 7 Quantitative comparison of zircon U-Pb ages between Huizhou-27 transfer zone and potential source areas based on Kuiper test (a) and their multidimensional scaling (MDS) analyses (b) (Zircon U-Pb ages are the same as in Fig. 3 and Fig. 6)

与潜在物源区中的珠江东北部支流最近,上恩平组同样如此,但是较下恩平组距离珠江东北部支流更近,指示了珠江东北部支流对下恩平组和上恩平组的供源作用,且对上恩平组的供源作用更强。

综合锆石 U-Pb 年龄 KDE 图对比、基于 Kuiper 检验 $V_{\max}$ 值矩阵和 MDS 图分析,认为惠州 27 转换带文昌组沉积期主要受到盆内中生界花岗岩基底供源,致使文昌组与潜在物源区中的中生界花岗岩基底在 KDE 图上具有相似的“燕山期单峰”特征、在基于 Kuiper 检验的 $V_{\max}$ 值矩阵中 $V_{\max}$ 值最小、在 MDS 图中距离最近。惠州 27 转换带下恩平组沉积期主要受到盆外珠江东北部支流供源,导致下恩平组与潜在物源区中的珠江东北部支流在 KDE 图上具有相似的“燕山期主峰+印支期、加里东期次峰”特征、在基于 Kuiper 检验的 $V_{\max}$ 值矩阵中 $V_{\max}$ 值最小、在 MDS 图中距离最近。与下恩平组沉积期类似,惠州 27 转换带上恩平组沉积期还是主要受盆外珠江东北部支流供源,且供源作用更强,使得上恩平组锆石 U-Pb 年龄谱中印支期、加里东期组分比例显著增加,且较下恩平组在基于 Kuiper 检验的 $V_{\max}$ 值矩阵中 $V_{\max}$ 值更小、在 MDS 图中距离更近。由此可知,文昌组至恩平组沉积期,惠州 27 转换带的盆内—盆外物源转换过程并非简单的“盆内物源—盆外物源”变化,而是存在一个渐进式的转换过程。针对物源转换过程中各个潜在物源区对惠州 27 转换带的沉积物贡献量将开展进一步分析。

3.3 基于沉积物相对贡献量的源汇过程重建

从文昌组、下恩平组和上恩平组锆石 U-Pb 年

龄 KDE 图及不同年龄组分相对百分含量饼状图(图 6)所指示的物源转换过程来看,惠州 27 转换带在文昌组沉积期主要受盆内中生界岩浆岩基底供源,在恩平组沉积期主要受盆外珠江东北部支流供源,但是并非完全受盆外物源供源。另外,恩平组沉积期,惠州凹陷还处于珠江 II 幕裂陷阶段,惠州 27 转换带南侧的东沙隆起仍处于暴露状态,具备一定的供源能力。为了定量厘定惠州 27 转换带盆内—盆外物源转换过程,本研究利用基于 K-S 检验的 Monte Carlo 模型方法建立物源区锆石 U-Pb 年龄分布混合模型,反演不同物源区在物源转换过程中的沉积物相对贡献量(Sundell and Saylor, 2017)。本研究中反演 3 个潜在物源区分别对文昌组、下恩平组和上恩平组的沉积物相对贡献量共得到九组结果(图 8),其中沉积物相对贡献量标准差值范围为 0.9%~4.5%,分析认为物源区沉积物相对贡献量恢复结果整体可靠。

从基于锆石 U-Pb 年龄混合模型反演的源区相对贡献量恢复来看,文昌组沉积期,惠州 27 转换带 98% 沉积物来自于盆内中生界岩浆岩基底,而盆外物源,如珠江东北部支流和西部支流,对研究区的沉积物相对贡献量微乎其微(图 8a)。下恩平组沉积期,惠州 27 转换带开始接受盆外物源的供源作用,其中珠江东北部支流对研究区的沉积物相对贡献量最大、为 58.4%,珠江西部支流的沉积物贡献量非常少、为 5.1%。该时期研究区尽管主要接受盆外物源供源,但盆内中生界岩浆岩基底仍有重要供源作用,沉积物相对贡献量为 36.5%(图 8b)。上恩平

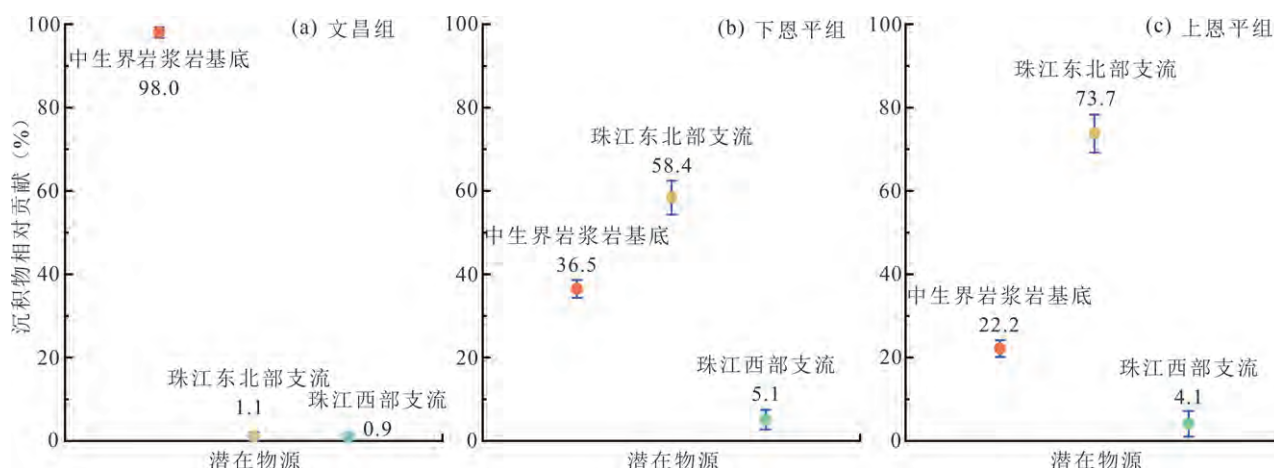


图 8 潜在物源对惠州 27 转换带文昌组(a)、下恩平组(b)和上恩平组(c)的沉积物相对贡献量
(计算模型依据文献 Sundell and Saylor, 2017)

Fig. 8 Relative contributions of potential source areas to the Wenchang Formation (a), the lower Enping Formation (b) and the upper Enping Formation (c) in the Huizhou-27 transfer zone (Unmixing modeling is from Sundell and Saylor, 2017)

组沉积期,盆外物源的沉积物相对贡献量显著增加,其中珠江东北部支流的沉积物相对贡献量增至 73.7%,珠江西部支流的沉积物贡献量仍非常少、为 4.1%。盆内中生界岩浆岩基底的沉积物相对贡献量则减少至 22.2%(图 8c)。

前人研究表明,受青藏高原隆升控制,包括东北部支流和西部支流的现代珠江形成于早中新世(Cao Licheng et al., 2018; Liu Chang et al., 2022)。本研究中基于重矿物组合与锆石 U-Pb 年龄的物源分析明确了惠州 27 转换带下恩平组沉积期的物源转换,锆石 U-Pb 年龄谱对比分析与沉积物相对贡献量恢复认为恩平组沉积期盆外物源来自于珠江东北部支流,而西部支流几乎没有贡献。另外,惠州 27 转换带恩平组锆石 U-Pb 年龄谱中元古代、古元古代年龄组分少,而现代珠江河口沉积物锆石 U-Pb 年龄谱中元古代、古元古代年龄组分多。笔者等分析认为,在恩平组沉积的晚始新世,珠江东北部支流就已经独立形成,其与现代珠江的流域面积和分布范围均存在显著差异。文中在此将早中新世之前、独立发育的珠江东北部支流称为古珠江。文昌组沉积期,惠州 27 转换带主要受盆内近源东沙隆起等供源;恩平组沉积期,惠州 27 转换带以盆外古珠江物源为主导,但盆内物源仍有一定供源作用且逐渐减弱。综合分析认为,珠江口盆地惠州凹陷恩平组沉积期,即晚始新世,惠州 27 转换带“盆内近源—盆外、盆内混源”的渐进式源汇转换过程是盆地裂陷减弱和珠江流域演化的综合响应。一方面,珠江流域是华南板块向珠江口盆地供源的最重要通道。恩平组沉积期,古珠江的发育演化使得华夏地块碎屑物质可以被长距离向东南方向搬运入湖,而关于珠江流域的发育演化历史,前人基于锆石年代学分析,认为珠江的起源最早可追溯至白垩纪(He Jie et al., 2020)。另一方面,珠江口盆地北部文昌组沉积期为盆地珠琼裂陷 I 幕强烈断陷期,主控断裂活动性剧烈,洼间分隔性强,湖盆分布局限;而后恩平组沉积期为盆地珠琼裂陷 II 幕断陷期,主控断裂活动性显著减弱,洼间连通性好,湖盆分布广泛(Wang Pengcheng et al., 2020; Tang Xu et al., 2023)。盆地裂陷作用形成的盆内低凸起、翘倾断块会对盆外物源起屏蔽作用。而随着裂陷作用逐渐减弱,盆外古珠江沉积物相对贡献也逐渐增加。此外,惠州凹陷正对珠江河口,当盆地裂陷作用减弱,惠州凹陷能够相对于珠江口盆地南部、西部凹陷更早地记录盆外物源信号,这也使得本文得出的物源转换时间比

盆地南部白云凹陷(崔宇驰等,2018;Shao Lei et al., 2019; Zeng Zhiwei et al., 2019)和西部阳江凹陷(杜晓东等,2021)物源转换时间更早。

4 源汇控储作用

4.1 储层发育特征

惠州 27 转换带岩石薄片鉴定表明,文昌组与恩平组砂岩类型存在差异。文昌组砂岩为长石岩屑砂岩;恩平组砂岩包括岩屑砂岩、长石石英砂岩、长石砂岩和长石岩屑砂岩(图 9a)。文昌组与恩平组砂岩岩屑组分也存在明显差异,文昌组砂岩岩屑组分主要为岩浆岩,而恩平组岩屑组分除了岩浆岩,还包括变质岩和沉积岩(图 9b)。

惠州 27 转换带文昌组和恩平组的储层物性数据表明,文昌组与恩平组储层孔隙度和渗透率存在明显差异。文昌组储层孔隙度分布较为集中,主要分布于 5%~10%之间,其次分布于 10%~15%之间;而恩平组储层孔隙度分布较为分散,在 0~5%,15%~20%之间均有分布,但主要分布于 10%~15%之间(图 10a)。文昌组储层渗透率分布相对集中,主要分布于 $(0 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间;而恩平组储层渗透率分布相对分散,主要分布于 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间(图 10b)。总体来看,恩平组储层物性较文昌组更优,但储层非均质性更强。

4.2 源汇控储作用

成岩作用是珠江口盆地深层砂岩储层品质的直接控制因素(葛家旺等,2015;朱筱敏等,2019),而母岩类型、搬运距离等作为源汇系统的重要元素,对优质储层的发育同样起着重要控制作用。笔者等在定量解析惠州凹陷源汇过程的基础上,从源汇系统的角度探讨物源转换对储层的控制作用。物源区作为储层的物质来源,其母岩成分决定了储层的岩石学组分和原始物性,影响了后期的成岩演化过程,对储层发育具有重要控制作用。从物源条件来看,研究区文昌组受盆内物源供源作用,而恩平组受盆外和盆内物源混合供源作用;从储层特征来看,文昌组储层物性相对差但均质程度好,恩平组储层物性好但非均质性强。

文昌组物源为研究区南部的东沙隆起,母岩类型以花岗岩为主。近源条件下,碎屑物质搬运距离短,岩石分选磨圆差,但岩石组分中石英含量相对较高,抗压实能力强,成岩演化中受压实作用影响小,导致了文昌组储层物性差,孔隙度主要分布于 5%~10%、渗透率主要分布于 $(0 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(0.1$

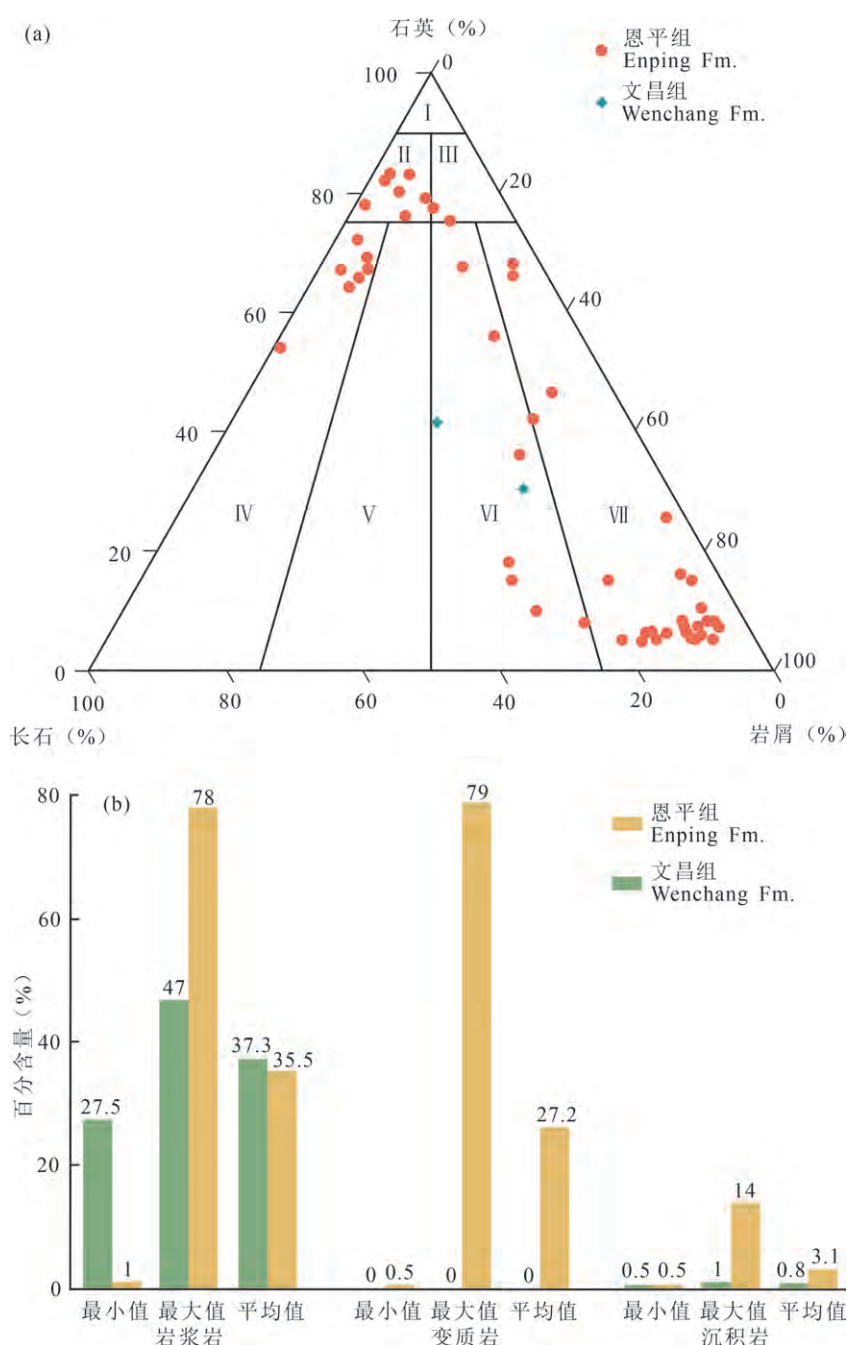


图9 珠江口盆地惠州27转换带文昌组至恩平组砂岩岩石类型(a)

及岩屑类型(b)(数据来自于田立新,2021)

Fig.9 Sandstone types (a) and their rock fragment compositions (b) of the Wenchang Formation and the Enping Formation in the Huizhou-27 transfer zone in Pearl River Mouth Basin (Data are from Tian Lixin, 2021&)

I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—岩屑石英砂岩; IV—长石砂岩;

V—岩屑长石砂岩; VI—长石岩屑砂岩; VII—岩屑砂岩

I—quartzose sandstone; II—feldspar quartz sandstone; III—lithic quartz sandstone; IV—feldspathic sandstone; V—lithic feldspar sandstone; VI—feldspar lithic sandstone; VII—lithic sandstone

$\sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,但储层均质程度好,孔隙度、渗透率分布较为集中(图10)。恩平组物源以盆外华

南古珠江为主,同时包括盆内东沙隆起,表现为盆外、盆内物源混合供源的特征。岩石组分也表现出截然不同的特征,一部分以高石英、低长石、低岩屑为特征,一部分则表现为高岩屑、低石英、低长石的特征。以高石英、低长石、低岩屑为特征的岩石刚性颗粒含量高、抗压实能力强、易于形成优质储层,而以高岩屑、低石英、低长石的岩石刚性颗粒含量低、抗压实能力差。另一方面,受混合物源供源作用,恩平组岩屑类型更为复杂,除了火山岩岩屑外,还包括大量的变质岩岩屑和沉积岩岩屑(图9),在刚性颗粒含量高的岩石中,岩屑溶蚀增孔可以改善储层物性,恩平组储层孔隙度主要分布于10%~15%之间、渗透率主要分布于 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间;而在刚性颗粒含量低的岩石中,强压实作用下岩屑易塑性变形或溶蚀充填孔隙,导致储层致密化和非均质性,整体上孔隙度和渗透率分布较为分散(图10)。总的来看,“盆内近源—盆外、盆内混源”的源汇转换过程导致了文昌组与恩平组储层的岩石组分差异,一方面改善了恩平组储层物性,另一方面也导致了其储层非均质性变强。

5 结论

(1) 珠江口盆地惠州凹陷惠州27转换带文昌组重矿物类型复杂、ZTR指数小,恩平组重矿物类型简单、ZTR指数大,二者重矿物特征差异明显,指示了上始新统恩平组沉积期发生了物源转换。基于锆石U-Pb年龄的定量源汇分析表明,中始新统文昌组沉积期98%沉积物来自于盆内中生界岩浆岩基底;下恩平组沉积期,盆地裂陷作用逐渐减弱、华夏地块古珠江汇入盆地,导致了“盆内近源—盆外、盆内混源”的源汇转换,古珠江的沉积物相对贡献量为58.4%,盆内中生界岩浆

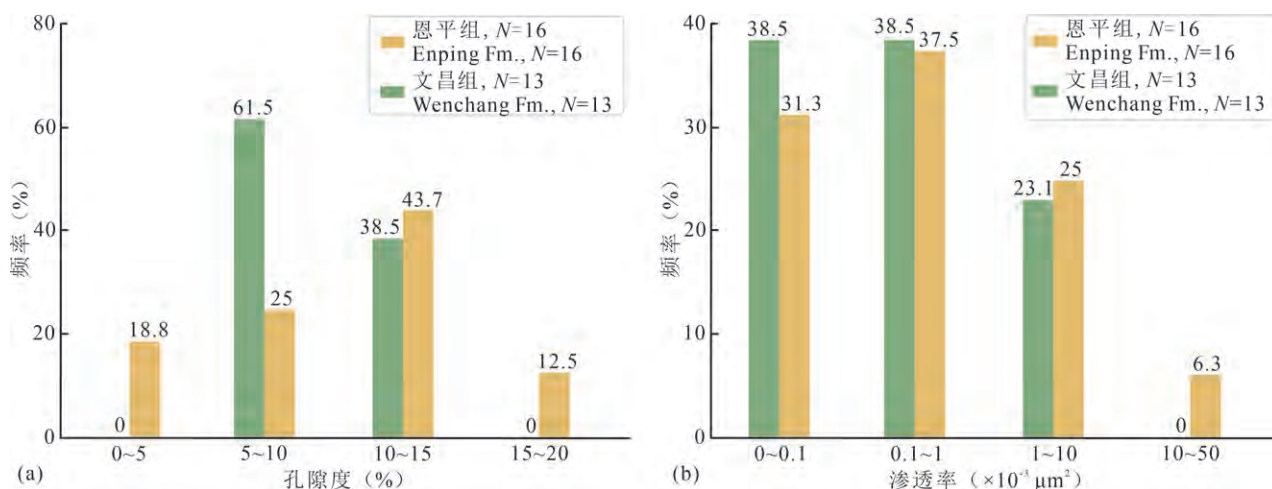


图 10 珠江口盆地惠州 27 转换带文昌组至恩平组储层孔隙度(a)及渗透率(b) (数据来自于田立新, 2021)

Fig. 10 Porosity (a) and permeability (b) of the reservoirs in the Wenchang Formation and the Enping Formation in the Huizhou- 27 transfer zone, Pearl River Mouth Basin (Data are from Tian Lixin, 2021&)

岩基底的沉积物相对贡献量为 36.5%;上恩平组沉积期,古珠江供源作用增强,其沉积物相对贡献量达 73.7%,盆内中生界岩浆岩基底的沉积物相对贡献量为 22.2%。

(2)在盆内物源供给条件下,文昌组沉积物搬运距离短,储层岩石类型简单、岩石分选磨圆差,但岩石组分表现为高石英、低长石的特征,抗压实能力强,储层物性相对较差但均质性好。在盆内物源、盆外物源混合供给条件下,恩平组岩石组分及其抗压实能力分异明显,同时岩屑组分类型复杂多样。刚性岩石颗粒中的岩屑溶蚀可改善储层物性,而塑性岩石颗粒中的岩屑压实或溶蚀则会导致储层致密化。“盆内近源—盆外、盆内混源”的源汇转换过程导致了文昌组与恩平组储层的岩石组分差异,改善了恩平组储层物性,也导致了其非均质性变强。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈贺贺, 朱筱敏, 施瑞生, 张自力, 李琪, 朱珍君, 阎泽昊. 2023. 断陷盆地缓坡带物源转换与沉积响应——以渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系源—汇系统为例. 石油与天然气地质, 44 (3): 689~706.
- 崔宇驰, 曹立成, 乔培军, 陈淑慧, 庞雄, 邵磊. 2018. 南海北部古近纪沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及物源演化. 地球科学, 43 (11): 4169~4179.
- 单玄龙, 热西提·亚力坤, 刘培, 陶文芳, 张琴, 郝国丽, 李克成, 姚佳利. 2023. 珠江口盆地西江主洼珠琼运动的沉积响应及构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 53(2): 329~342.

- 杜晓东, 彭光荣, 吴静, 蔡国富, 汪晓萌, 索艳慧, 周洁. 2021. 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. 海洋地质与第四纪地质, 41(6): 124~137.
- 葛家旺, 朱筱敏, 雷永昌, 于福生. 2021. 多幕裂陷盆地构造—沉积响应及陆丰凹陷实例分析. 地学前缘, 28(1): 77~89.
- 葛家旺, 朱筱敏, 潘荣, 雷永昌, 张昕, 陈淑慧. 2015. 珠江口盆地惠州凹陷文昌组砂岩孔隙度定量演化模式——以 HZ-A 地区辫状河三角洲储层为例. 沉积学报, 33(1): 183~193.
- 李平鲁. 1993. 珠江口盆地新生代构造运动. 中国海上油气, 5(6): 11~17.
- 李顺利, 朱筱敏, 刘强虎, 徐长贵, 杜晓峰, 李慧勇. 2017. 沙垒田凸起古近纪源—汇系统中有利储层评价与预测. 地球科学, 42 (11): 1994~2009.
- 林杨松, 夏庆龙, 施和生, 周心怀. 2015. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析. 地学前缘, 22(1): 9~20.
- 刘杰, 侯明才, 王菲, 牛胜利, 梁杰, 熊富浩, 陈安清, 钟灵, 冷杰. 2023. 珠江口盆地晚侏罗世中基性火山岩的岩石成因与构造意义:来自年代学和地球化学的约束. 地质学报, 97(2): 364~375.
- 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 张斌, 孙晓猛, 李伍志, 郎元强. 2011. 南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义. 石油学报, 32 (4): 580~587.
- 庞雄, 陈长民, 邵磊, 王成善, 朱明, 何敏, 申俊, 连世勇, 吴湘杰. 2007. 白云运动: 南海北部渐新统—中新统重大地质事件及其意义. 地质论评, 53(2): 145~151.
- 施和生, 于水明, 梅廉夫, 舒誉, 吴建耀. 2009. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪幕式裂陷特征. 天然气工业, 29(1): 35~37+40+133.
- 孙晓猛, 张旭庆, 张功成, 鲁宝亮, 岳军培, 张斌. 2014. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性. 中国科学: 地球科学, 44 (6): 1312~1323.
- 田立新. 2021. 珠江口盆地惠州凹陷转换体控沉—控储特性及其油气地质意义. 地球科学, 46(11): 4043~4056.
- 王策, 崔贺旗, 曾乐田, 苏明. 2023. 马尼拉海沟北部沉积物物源示踪:来自碎屑锆石年代学的评估. 中国科学: 地球科学, 53 (1): 41~54.
- 王维, 叶加仁, 杨香华, 施和生, 舒誉, 吴静. 2015. 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. 地球科学, 40(6): 1061~1071.
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理学报, 21(3): 379~396.
- 徐长贵, 龚承林. 2023. 从层序地层走向源—汇系统的储层预测之路. 石油与天然气地质, 44(3): 521~538.
- 许苗苗, 魏晓椿, 杨蓉, 王平, 程晓敢. 2021. 重矿物分析物源示踪方法研究进展. 地球科学进展, 36(2): 154~171.
- 姚光庆, 姜平. 2021. 储层“源—径—汇—岩”系统分析的思路方法与应用. 地球科学, 46(8): 2934~2943.
- 张丽丽, 舒梁锋, 冯轩, 于飒, 吴婷婷. 2020. 再论珠江口盆地恩平组时代归属. 中国海上油气, 32(5): 9~18.
- 张向涛, 崔航, 牛胜利, 杨祎, 邱欣卫, 朱世发. 2023. 不同规模辫状河三角洲前缘砂岩储层特征及差异研究——以惠州凹陷HZ25与XJ30转换带文昌组为例. 中国海上油气, 35(1): 14~26.
- 赵中贤, 周蒂, 廖杰. 2009. 珠江口盆地第三纪古地理及沉积演化. 热带海洋学报, 28(6): 52~60.
- 周凤娟, 丁琳, 马永坤, 李晓艳, 张月霞, 赵梦, 阙晓铭. 2020. 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. 中国海上油气, 32(4): 46~55.
- 朱筱敏, 葛家旺, 吴陈冰洁, 张向涛, 汪旭东, 李晓燕, 黎明. 2019. 珠江口盆地陆丰凹陷深层砂岩储层特征及主控因素. 石油学报, 40(S1): 69~80.
- 朱秀, 朱红涛, 曾洪流, 杨香华. 2017. 云南洱海现代湖盆源—汇系统划分、特征及差异. 地球科学, 42(11): 2010~2024.
- Allen P A. 2008. From landscapes into geological history. Nature, 451: 274~276.
- Breitfeld H T, Hennig-Breitfeld J, BouDagher-Fadel M, Schmidt W J, Meyer K, Reinprecht J, Lukie T, Cuong T X, Hall R, Kollert N, Gough A, Ismail R. 2022. Provenance of Oligocene—Miocene sedimentary rocks in the Cuu Long and Nam Con Son Basins, Vietnam and early history of the Mekong River. International Journal of Earth Sciences, 111(6): 1773~1804.
- Cao Licheng, Shao Lei, Qiao Peijun, Zhao Zhigang, van Hinsbergen D J J. 2018. Early Miocene birth of modern Pearl River recorded low-relief, high-elevation surface formation of SE Tibetan Plateau. Earth and Planetary Science Letters, 496: 120~131.
- Cao Licheng, Shao Lei, van Hinsbergen D J J, Jiang Tao, Xu Di, Cui Yuchi. 2023. Provenance and evolution of East Asian large rivers recorded in the East and South China Seas: A review. Geological Society of America Bulletin, 135: 2723~2752.
- Carter L, Orpin A R, Kuehl S A. 2010. From mountain source to ocean sink—The passage of sediment across an active margin, Waipaoa Sedimentary System, New Zealand. Marine Geology, 270(1~4): 1~10.
- Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. Geology, 40(10): 875~878.
- Chen Hehe, Zhu Xiaomin, Shi Ruisheng, Zhang Zili, Li Qi, Zhu Zhenjun, Yan Zehao. 2023. Provenance transformation and sedimentary response of ramp facies in downfaulted basins: A case study on the Paleogene source-to-sink system in Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. Oil & Gas Geology, 44(3): 689~706.
- Cui Yuchi, Cao Licheng, Qiao Peijun, Chen Shuhui, Pang Xiong, Shao Lei. 2018. Provenance evolution of Paleogene sequence(northern South China Sea) based on detrital zircon U-Pb dating analysis. Earth Science, 43(11): 4169~4179.
- Du Xiaodong, Peng Guangrong, Wu Jing, Cai Guofu, Wang Xiaomeng, Suo Yanhui, Zhou Jie. 2021. Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum. Marine Geology & Quaternary Geology, 41(6): 124~137.
- Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Lei Yongchang, Yu Fusheng. 2021. Tectono—sedimentary development of multiphase rift basins: An example of the Lufeng Depression. Earth Science Frontiers, 28(1): 77~89.
- Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Pan Rong, Lei Yongchang, Zhang Xin, Chen Shuhui. 2015. A Quantitative Porosity Evolution Model of Sandstone for Wenchang Formation in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin: A case study for braided fluvial delta reservoir of HZ-A area. Acta Sedimentologica Sinica, 33(1): 183~193.
- Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Zhao Xiaoming, Liao Jijia, Ma Bingshan, Jones B G. 2020. Tectono—sedimentary signature of the second rift phase in multiphase rifts: A case study in the Lufeng Depression (38~33.9 Ma), Pearl River Mouth Basin, South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 114: 104218.
- Gilmullina A, Klausen T G, Doré A G, Rossi V M, Suslova A, Eide C H. 2022. Linking sediment supply variations and tectonic evolution in deep time, source-to-sink systems—The Triassic Greater Barents Sea Basin. Geological Society of America Bulletin, 134(7~8): 1760~1780.
- He Jie, Garzanti E, Cao Licheng, Wang Hua. 2020. The zircon story of the Pearl River (China) from Cretaceous to present. Earth-Science Reviews, 201: 103078.
- Hubert J F. 1962. A zircon—tourmaline—rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. SEPM Journal of Sedimentary Research, 32: 440~450.
- Jian Xing, Fu Ling, Wang Ping, Guan Ping, Zhang Wei, Fu Hanjing, Mei Haowei. 2023. Sediment provenance of the Lulehe Formation in the Qaidam Basin: Insight to initial Cenozoic deposition and deformation in northern Tibetan Plateau. Basin Research, 35(1): 271~294.
- Jiang Mengya, Chen Dongxia, Chang Xiaofei, Shu Liangfeng, Wang Fuwei. 2022. Controlling effect of tectonic—paleogeomorphology on deposition in the south of Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin. Advances in Geo-Energy Research, 6(5): 363~374.
- Jin Hualong, Wan Shiming, Clift P D, Liu Chang, Huang Jie, Jiang Shijun, Li Mengjun, Qin Lin, Shi Xuefa, Li Anchun. 2022. Birth of the Pearl River at 30 Ma: Evidence from sedimentary records in the northern South China Sea. Earth and Planetary Science Letters, 600: 117872.
- Li Pinglu. 1993. Cenozoic tectonic movement in the Pearl River mouth basin. China Offshore Oil and Gas, 5(6): 11~17.
- Li Shunli, Zhu Xiaomin, Liu Qianghu, Xu Changgui, Du Xiaofeng, Li Huiyong. 2017. Evaluation and prediction of favorable reservoirs in source-to-sink systems of the palaeogene, Shaleitian uplift. Earth Science, 42(11): 1994~2009.
- Li Yichao, Gong Chenglin, Peng Guangrong, Qiu Xinwei, Steel R J, Xiao Zhangbo, He Yanbing, Qi Kun, Yu Yixin. 2023. Detrital zircon signals of the late Eocene provenance change of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. Sedimentary Geology, 451: 106409.
- Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, Zhou Xinhui. 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin

- analysis. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 9~20.
- Liu Chang, Clift P D, Carter A, Böning P, Hu Zhaochu, Sun Zhen, Pahnke K. 2017. Controls on modern erosion and the development of the Pearl River drainage in the late Paleogene. *Marine Geology*, 394: 52~68.
- Liu Chang, Stockli D F, Clift P D, Wan Shiming, Stockli L D, Höfig T W, Schindlbeck-Belo J C. 2022. Geochronological and geochemical characterization of paleo-rivers deposits during rifting of the South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 584: 117427.
- Liu Jie, Hou Mingcai, Wang Fei, Niu Shengli, Liang Jie, Xiong Fuhao, Chen Anqing, Zhong Ling, Leng Jie. 2023. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Jurassic intermediate—mafic volcanic rocks in the Zhujiangkou Basin: Constraints from geochronology and geochemistry. *Acta Geologica Sinica*, 97(2): 364~375.
- Liu Qianghu, Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, Li Shunli. 2019. Source-to-sink analysis in an Eocene rifted lacustrine basin margin of western Shaleitian Uplift area, offshore Bohai Bay Basin, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 107: 41~58.
- Lu Baoliang, Wang Pujun, Zhang Gongcheng, Zhang Bin, Sun Xiaomeng, Li Wuzhi, Lang Yuanqiang. 2011. Basement structures of an epicontinental basin in the northern South China Sea and their significance in petroleum prospect. *Acta Petrolei Sinica*, 32(4): 580~587.
- Ma Ming, Chen Guojun, Lyu Chengfu, Zhang Gongcheng, Li Chao, Yan Yingkai, Ma Zunqing. 2019. The formation and evolution of the paleo-Pearl River and its influence on the source of the northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 106: 171~189.
- Nyberg B, Helland-Hansen W, Gawthorpe R L, Sandbakken P, Eide C H, Sømme T, Hadler-Jacobsen F, Leiknes S. 2018. Revisiting morphological relationships of modern source-to-sink segments as a first-order approach to scale ancient sedimentary systems. *Sedimentary Geology*, 373: 111~133.
- Pang Xiong, Chen Changmin, Shao Lei, Wang Chengshan, Zhu Ming, He Min, Shen Jun, Lian Shiyong, Wu Xiangjie. 2007. Baiyun movement, a great tectonic event on the Oligocene—Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications. *Geological Review*, 53(2): 145~151.
- Pickerling K T, Carter A, Andò S, Garzanti E, Limonta M, Vezzoli G, Milliken K L. 2020. Deciphering relationships between the Nicobar and Bengal submarine fans, Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 544: 116329.
- Romans B W, Castelltort S, Covault J A, Fildani A, Walsh J P. 2016. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales. *Earth-Science Reviews*, 153: 7~29.
- Shan Xuanlong, Yalikun · Rexiti, Liu Pei, Tao Wenfang, Zhang Qin, Hao Guoli, Li Kecheng, Yao Jiali. 2023. Sedimentary response and tectonic significance of Zhuqiong movement in Xijiang main sag, Pearl River mouth basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 53(2): 329~342.
- Shao Lei, Cao Licheng, Pang Xiong, Jiang Tao, Qiao Peijun, Zhao Meng. 2016. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn-rift sediments in the northern South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 255~269.
- Shao Lei, Cao Licheng, Qiao Peijun, Zhang Xiangtao, Li Qianyu, van Hinsbergen D J J. 2017. Cretaceous—Eocene provenance connections between the Palawan Continental Terrane and the northern South China Sea margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 477: 97~107.
- Shao Lei, Cui Yuchi, Stattegger K, Zhu Weilin, Qiao Peijun, Zhao Zhigang. 2019. Drainage control of Eocene to Miocene sedimentary records in the southeastern margin of Eurasian Plate. *Geological Society of America Bulletin*, 131(3~4): 461~478.
- Sharman G R, Sharman J P, Sylvester Z. 2018. detritalPy: A Python-based toolset for visualizing and analysing detrital geochronologic data. *The Depositional Record*, 4(2): 202~215.
- Shi Hesheng, Yu Shuiming, Mei Lianfu, Shu Yu, Wu Jianyao. 2009. Features of Paleogene episodic rifting in Huizhou fault depression in the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 29(1): 35~37+40+133.
- Sømme T O, Helland-Hansen W, Martinsen O J, Thurmond J B. 2009. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: A basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems. *Basin Research*, 21(4): 361~387.
- Sun Xiaomeng, Zhang Xuqing, Zhang Gongcheng, Lu Baoliang, Yue Junpei, Zhang Bin. 2014. Texture and tectonic attribute of Cenozoic Basin basement in the northern South China Sea. *Science China Earth Sciences*, 44(6): 1312~1323.
- Sundell K E, Saylor J E. 2017. Unmixing detrital geochronology age distributions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(8): 2872~2886.
- Tang Xu, Yu Yixin, Zhang Xiangtao, Peng Guangrong, Niu Shengli, Qiu Xinwei, Lu Mingsong, He Yanbing. 2023. Multiphase faults activation in the southwest Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin: Insights from 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 152: 106257.
- Tian Lixin. 2021. Sedimentary-reservoir characteristics under control of transfer model and implications for hydrocarbon exploration in Huizhou depression, Pearl River mouth basin. *Earth Science*, 46(11): 4043~4056.
- Vermeech P. 2012. On the visualisation of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 312~313: 190~194.
- Vermeech P. 2013. Multi-sample comparison of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 341: 140~146.
- Wang Ce, Cui Heqi, Zeng Letian, Su Ming. 2023. Provenance of sediments in the northern Manila Trench: An assessment from detrital zircon geochronology. *Science China Earth Sciences*, 53(1): 41~54.
- Wang Guangzeng, Li Sanzhong, Suo Yanhui, Peng Guangrong, Wang Pengcheng, Cheng Haohao, Liu Ze, Liu Yongjiang, Bukhari S W H, Liu Zhongqiang, Diao Yixiao, Zhan Huawang, Zhu Mengjia. 2023. Cenozoic source-to-sink driven by tectono—geomorphic evolution: A systematic detrital zircon U-Pb analysis in the central northern South China Sea. *Earth-Science Reviews*, 239: 104365.
- Wang Pengcheng, Li Sanzhong, Suo Yanhui, Guo Lingli, Wang Guangzeng, Hui Gege, Santosh M, Somerville I D, Cao Xianzhi, Li Yang. 2020. Plate tectonic control on the formation and tectonic migration of Cenozoic Basins in northern margin of the South China Sea. *Geoscience Frontiers*, 11(4): 1231~1251.
- Wang Wei, Ye Jiaren, Bidgoli T, Yang Xianghua, Shi Hesheng, Shu Yu. 2017. 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. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11): 3976~3999.

- Wang Wei, Ye Jiaren, Yang Xianghua, Shi Hesheng, Shu Yu, Wu Jing. 2015&. Sediment provenance and depositional response to multistage rifting, Paleogene, Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 40(6): 1061~1071.
- Xu Changgui, Gong Chenglin. 2023&. Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 521~538.
- Xu Jie, Jiang Zaixing. 2019&. Provenance analysis of clastic rocks: Current research status and prospect. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(3): 379~396.
- Xu Miaomiao, Wei Xiaochun, Yang Rong, Wang Ping, Cheng Xiaogan. 2021&. Research progress of provenance tracing method for heavy mineral analysis. *Advances in Earth Science*, 36(2): 154~171.
- Xu Xisheng, O'Reilly S Y, Griffin W L, Wang Xiaolei, Pearson N J, He Zhenyu. 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes. *Precambrian Research*, 158(1~2): 51~78.
- Yao Guangqing, Jiang Ping. 2021&. Method and application of reservoir "source-route-sink-rock" system analysis. *Earth Science*, 46(8): 2934~2943.
- Zeng Zhiwei, Zhu Hongtao, Yang Xianghua, Zeng Hongliu, Xia Chenchen, Chen Ying. 2019. 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 paleo-Pearl River drainage evolution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 177: 663~680.
- Zhang Lili, Shu Liangfeng, Feng Xuan, Yu Sa, Wu Tingting. 2020&. Further discussion on the age assignment of Enping Formation in the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 32(5): 9~18.
- Zhang Xiangtao, Cui Hang, Niu Shengli, Yang Yi, Qiu Xinwei, Zhu Shifa. 2023. Study of characteristics and differences of sandstone reservoirs in the front of braided river delta of different scales: An example from Wenchang Formation of HZ25 and XJ30 transfer zones in Huizhou Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 35(1): 14~26.
- Zhang Zengjie, Daly J S, Tian Yuntao, Lei Chao, Sun Xilin, Badenszki E, Qin Yonghui, Hu Jie. 2023. Late Oligocene formation of the Pearl River triggered by the opening of the South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 50(8): e2023GL103049.
- Zhao Zhongxian, Zhou Di, Liao Jie. 2009&. Tertiary paleogeography and depositional evolution in the Pearl River Mouth Basin of the northern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 28(6): 52~60.
- Zhong Lifeng, Li Gang, Yan Wen, Xia Bin, Feng Yuexing, Miao Li, Zhao Jianxin. 2017. Using zircon U-Pb ages to constrain the provenance and transport of heavy minerals within the northwestern shelf of the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 176~190.
- Zhou Fengjuan, Ding Lin, Ma Yongkun, Li Xiaoyan, Zhang Yuexia, Zhao Meng, Que Xiaoming. 2020&. Detrital zircon U-Pb age characteristics of Wenchang Formation in Lufeng 13 eastern sag and its significance for provenance tracing. *China Offshore Oil and Gas*, 32(4): 46~55.
- Zhu Hongtao, Li Sen, Shu Yu, Yang Xianghua, Mei Lianfu. 2016. Applying seismic geomorphology to delineate switched sequence stratigraphic architecture in lacustrine rift basins: An example from the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 78: 785~796.
- Zhu Xiaomin, Ge Jiawang, Wu Chenbingjie, Zhang Xiangtao, Wang Xudong, Li Xiaoyan, Li Ming. 2019&. Characteristics and main controlling factors of deep sandstone reservoirs in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 69~80.
- Zhu Xiu, Zhu Hongtao, Zeng Hongliu, Yang Xianghua. 2017&. Subdivision, characteristics, and varieties of the source-to-sink systems of the modern Lake Erhai Basin, Yunnan Province. *Earth Science*, 42(11): 2010~2024.

Source-to-sink processes and their controls on the reservoirs of the Paleogene Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin

LI Yichao^{1, 2)}, GONG Chenglin^{1, 2)}, QIU Xinwei³⁾, QI Peng⁴⁾, HE Yanbing³⁾, YU Yixin^{1, 2)}

1) National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249;

2) College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249;

3) Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd, Shenzhen, Guangdong, 518054;

4) Research Institute of China National Offshore Oil Corporation, Beijing, 100028

Objectives: Quantitative analysis of the source-to-sink system is the leading edge of the field of sedimentology, and is of great significance for accurate reconstruction of source-to-sink process and prediction of hydrocarbon reservoirs.

Methods: We use the heavy mineral assemblages and zircon U-Pb ages to trace the provenance of the Huizhou-27 transfer zone in the Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin, and quantitatively reconstruct the sediment contribution of potential source areas. In addition, we reveal the source-to-sink process and discuss the control of source-to-sink system on the hydrocarbon reservoir.

Results: The results show that the heavy mineral assemblages of the middle Eocene Wenchang Formation are

complex with low ZTR values (the ZTR index is the percentage of detrital zircon, tourmaline and rutile in the transparent heavy mineral detritus of a clastic rock), while the heavy mineral assemblages of the upper Eocene Enping Formation are relatively simple with high ZTR values. This study further confirms that the Wenchang Formation to the Enping Formation were mainly fed by intrabasinal Mesozoic magmatic basement and extrabasinal Pearl River system. For the Wenchang Formation, ca. 98% sediments were derived from the intrabasinal Mesozoic magmatic basement; for the lower Enping Formation, ca. 58.4% sediments were derived from the northeastern tributaries of the Pearl River, while ca. 36.5% sediments were derived from the intrabasinal Mesozoic magmatic basement; for the upper Enping Formation, ca. 73.7% sediments originated from the northeastern tributaries of the Pearl River, while ca. 22.2% sediments originated from the intrabasinal Mesozoic magmatic basement.

Conclusions: We infer that the modern Pearl River system, including the northeastern and western tributaries, was not yet formed during the depositing of the Enping Formation, but the northeastern tributaries (i. e., the paleo-Pearl River) had developed independently. Rather than a simple provenance transition from intrabasinal to extrabasinal, the paleo-Pearl River transported abundant sediments from the Cathaysia Block into the Huizhou Sag, resulting in the transition of the source-to-sink system from “the Wenchang Formation with intrabasinal provenance” to “the Enping Formation with mixed provenance”. This transition of source-to-sink system changes the rock composition of reservoir in the Enping Formation, which improves the reservoir physical properties but enhances the reservoir heterogeneity. This study presents a quantitative analysis of the transition of the source-to-sink system in the Paleogene Huizhou Sag, and provides insights into the quantitative source-to-sink process and its applications in continental rift basins.

Keywords: source-to-sink system; zircon U-Pb age; heavy mineral; reservoir; Pearl River Mouth Basin

Acknowledgements: This research was funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41972100) and the China National Offshore Oil Corporation (Nos. CCL2020SZPS0168, CCL2021RCPS0169KQN)

First author: LI Yichao, male, born in 1994, Ph. D. student, is mainly engaged in sedimentology and source-to-sink system in continental rift basin; Email: yichaolip2p@hotmail.com

Corresponding author: GONG Chenglin, male, born in 1983, professor, is mainly engaged in teaching and research on deep water deposition, sequence stratigraphy and source-to-sink system; Email: chenglingong@cup.edu.cn

Manuscript received on: 2023-12-04; Accepted on: 2024-01-24; Published online on: 2024-02-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.02.021

Edited by: LIU Zhiqiang