

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

王 维^{1,2}, 叶加仁^{1,2}, 杨香华^{1,2*}, 施和生³, 舒 誉³, 吴 静³

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东广州 510240

摘要: 为阐明惠州凹陷古近纪构造活动对物源供给与沉积充填的控制作用, 以 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年为主要技术手段, 对惠州凹陷古近系不同层段的 8 件样品中的锆石形态及年代组成进行分析, 定量研究其物源供给规律. 南部物源, 即盆内基岩凸起与东沙隆起, 以中生代火成岩为主; 北部物源, 即盆外华南褶皱带, 岩性及年代学复杂. 结果显示从下文昌组—上文昌组—恩平组的砂岩样品中, 中生代锆石颗粒含量逐渐降低, 前寒武—古生代锆石颗粒含量逐渐增加, 表明惠州凹陷具有早期南部供源逐渐到晚期北部供源的转换规律. 惠州凹陷构造演化分为 3 幕: 裂陷 I_A、I_B 和 II 幕. 裂陷 I_A 幕, 下文昌组沉积时期, 凹陷南部断层活动强烈, 砂岩中锆石以中生代颗粒为主, 沉积相类型以靠近南部断裂带发育的扇三角洲及中深湖相为主; 裂陷 I_B 幕, 上文昌组沉积时期, 北部边界断裂带活动强度增加, 中生代锆石颗粒含量为 68%, 前寒武—古生代颗粒含量为 32%, 表明该时期南北同时供源, 沉积体系以扇三角洲、辫状河三角洲及中深湖相为特色; 裂陷 II 幕, 恩平组沉积时期, 北部断层持续活动, 前寒武—古生代锆石颗粒含量为 64%, 中生代颗粒含量为 36%, 证实恩平组沉积时期以北部物源为主, 发育了浅水辫状河三角洲、滩坝以及薄煤层.

关键词: 惠州凹陷; 多幕裂陷; 物源转换; 锆石 U-Pb 定年; 沉积物; 地质年代学.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2015)06-1061-11

收稿日期: 2015-01-22

Sediment Provenance and Depositional Response to Multistage Rifting, Paleogene, Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin

Wang Wei^{1,2}, Ye Jiaren^{1,2}, Yang Xianghua^{1,2*}, Shi Hesheng³, Shu Yu³, Wu Jing³

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. CNOOC China Ltd., Shenzhen, Guangzhou 510240, China

Abstract: In order to clarify the controlling effects of tectonic activities on the sediment supply and sedimentary filling, the sediment supply of the Huizhou depression is quantitatively studied by analyzing the changes in the shape and chronology of the detrital zircons of eight samples from different formations, with LA-ICPMS zircon U-Pb dating as the main measuring method. The southern provenance areas, Dongsha Massif and the internal uplifts of the basin, are predominantly composed of Mesozoic igneous rocks, while northern provenance areas, South China folded belt, are characterized by complicated lithology and geochronology. The results show that the content of Mesozoic zircon grains decreases while that of Precambrian-Paleozoic zircon grains increases and then prevails gradually from the Lower Wenchang Formation to the Upper Wenchang Formation and to the Enping Formation, confirming that the area provenance system switched a south provenance in the basin to a north provenance out of the basin gradually. The evolution of Huizhou depression in Paleogene can be divided into three rifted stages: periods I_A, I_B and II. During period I_A (Lower Wenchang Formation), the southern

基金项目: 国家重大油气专项 (Nos. 2011ZX05023-001-015, 2011ZX05023-001-001).

作者简介: 王维 (1988-), 男, 博士在读, 从事储层地质学与层序地层学研究. E-mail: wangweiyicug@163.com

* **通讯作者:** 杨香华, E-mail: xhyang111@vip.sina.com

引用格式: 王维, 叶加仁, 杨香华, 等. 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——中国地质大学学报, 40 (6): 1061-1071.

faults of depression suffered strong activities. All zircon grains are derived from Mesozoic, indicating sediments derived from the southern provenance areas. The related sedimentary facies are characterized by fan delta and middle-deep lake under the conditions of southern steep slope of Huizhou depression. During period I_B, corresponding to Upper Wenchang Formation, the tectonic activities are characterized by high subsidence rates in the northern fault zones. The content of Mesozoic grains is 68%, whereas the content of Precambrian-Paleozoic zircon grains is up to 32%, which indicates that sediments are derived from both northern and southern provenance areas. The related sedimentary facies have the characteristics of fan delta, braided river delta and middle-deep lake. During period II (Enping Formation), the northern faults stayed active. The content of Precambrian-Paleozoic zircon grains increases to 64% while that of Mesozoic grains decreases to 36%, which indicates that northern provenance areas play a dominant role in this stage. In addition, the related sedimentary facies are characterized by shallower braided river delta, beach bar and thin coal seam.

Key words: Huizhou depression; multistage rifting; provenance switching; zircon U-Pb dating; sediments; geochronology.

惠州凹陷是珠—坳陷重要的油气主产区,位于珠—坳陷中部,油气资源丰富,但目前勘探开发主要集中在新近系,古近系勘探程度较低。对古近系开展构造演化、物源分析与砂体展布等方面的基础研究显得十分重要。“十一·五”与“十二·五”的长期追踪研究发现,惠州凹陷多幕裂陷旋回背景下物源体系转换与沉积充填响应特征典型,不同裂陷幕的控凹断裂活动、物源供给方式与沉积体系展布等要素之间密切相关,而我国近海大部分古近纪盆地具有相似的构造背景(Ru and Pigott, 1986;焦养泉和周海民,1996; Li *et al.*, 1998;林畅松等,2004;严德天等,2008;姜华等,2009;施和生等,2009),相关研究深受关注。Li *et al.* (1998)指出幕式裂陷识别中最关键的标志是区域性的不整合面及构造沉降的周期性加速;严德天等(2008)综合研究揭示了中国东部第三纪典型断陷盆地的幕式构造演化过程,强调了其对地层演化的重要作用;姜华等(2009)以区域性角度不整合、超覆、地层剥蚀以及岩浆活动为依据,确定了南堡凹陷幕式裂陷特征,进而阐释了其对沉积充填的控制。为了深化惠州凹陷古近系多幕裂陷盆地动力学背景与沉积充填格局的研究,本次研究在盆地构造、层序地层格架分

析基础上,以锆石形态及年代学研究为主要技术手段,对惠州凹陷的物源供给变化进行半定量一定量示踪分析,探究其幕式裂陷成因机制及不同裂陷幕控凹断裂、物源供给与沉积充填模式之间的成因联系,为不同层序砂体预测与沉积相平面展布编图提供地质依据。同时,作为幕式裂陷识别与研究方式的重要补充,为我国近海含油气盆地多幕裂陷旋回分析提供一些新的信息与研究思路。

1 区域地质背景

珠—坳陷位于珠江口盆地中部,走向为北东方向。其西北部与北部断阶带相邻,以一系列雁行状的南掉正断层为界;南部与番禺低隆起和东沙隆起相接,以一系列雁行状的北掉正断层为界;东部通过惠陆低凸起与陆丰凹陷相接;西部与珠三坳陷相邻。

惠州凹陷主要发育了北东向早期控洼断裂和北西向晚期改造断裂系统,在它们的共同控制下,惠州凹陷展现出隆凹相间的构造格局。凹陷主体可划分为多个小洼,主要沿控洼断裂展布(图1)。惠州凹陷古近

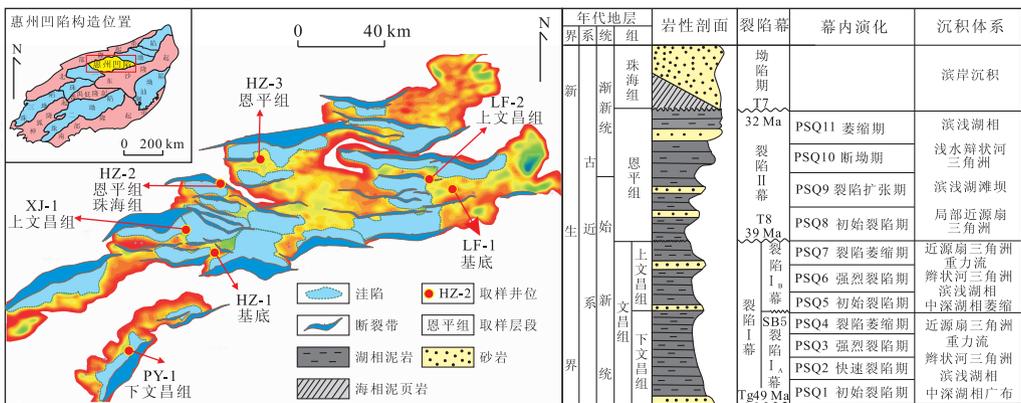


图 1 惠州凹陷及其邻近区域洼陷、地层及取样点分布

Fig. 1 Distribution of sub-depressions, stratigraphy and sampling locations of the Huizhou depression

系主要发育了文昌组、恩平组和珠海组地层,钻井揭示文昌组底部岩性为砂岩夹薄层泥岩,向上过渡到以深灰色泥岩为主,为浅湖—中深湖相沉积。恩平组底部岩性为大套砂岩夹泥岩,向上渐变为灰色砂岩夹黑灰色泥岩与薄煤层,属滨浅湖与湖沼相沉积。而珠海组地层发育于珠江口盆地断拗转换期,属海陆过渡相地层(朱红涛等,2012;李松峰等,2013)。

2 锆石 U-Pb 定年物源示踪

2.1 南部物源区与北部物源区划分

珠一坳陷北侧华南褶皱带与珠一坳陷基底、东沙隆起的母岩类型、地质年代明显不同。珠一坳陷北侧华南褶皱带岩性及年代分布复杂,变质岩分布广泛且时间跨度大。广东省区域变质岩和混合岩、混合花岗岩出露面积占全省陆地总面积的三分之一以上,变质作用自元古代持续至中生代(杨超群等,1988)。近年来,同位素定年证实了华南曾经存在过一个古老基底,前寒武纪变质岩出露(刘建雄和庄文明,2003;舒良树,2006;沈渭洲,2006;于津海等,2006; Yu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2008)。刘建雄和庄文明(2003)通过对粤中地区变质岩样品中锆石定年,证实其主要生成于中元古代;于津海等通过同位素定年证明粤东北基底年代主要为新太古代和中元古代,粤北南雄地区存在新太古代和 Grenville 期(0.9~1.1 Ga)的碎屑物质(于津海等,2006; Yu *et al.*, 2006); Wang *et al.* (2008)总结了前寒武纪地层分布,并通过对粤中增城和赣南鹤仔变质岩的地球化学和碎屑锆石年代学研究,推测东南沿海可能存在或靠近 Grenville 期的造山带。此外,岩浆活动是华南褶皱带显著特征,特别是燕山期岩浆岩大量发育(杨超群等,1988;周新民和李武显,2000;徐夕生,2008)。总之,珠一坳陷北侧华南褶皱带岩性及年代学复杂,前寒武—中生代变质岩、岩浆岩广泛发育。相对而言,珠一凹陷基底及东沙隆起岩性及年代相对简单,珠江口盆地早期勘探研究中钻遇古近纪基岩的 50 多口钻井揭示,燕山期中酸性岩浆岩占 90% 左右(刘安和吴世敏,2011);李平鲁等(1998)对 20 口井基岩样品采用 K-Ar 法和 Rb-Sr 等时线法测得绝对年龄在 70.5~153 Ma 之间;Shi *et al.* (2011)也指出珠江口盆地基底主要为中生代花岗岩,珠江口盆地基底样品 U-Pb 同位素定年显示年龄区间为 100.4~163.8 Ma。本次研究通过统计珠江口盆地钻遇基底的近百口钻井岩性及同位素定年

资料,对珠江口盆地基底的岩性及年代进行了厘定,发现变质岩基底主要分布于珠三坳陷与神狐暗沙隆起(图 2)。珠一坳陷基底及东沙隆起区以中生代岩浆岛弧为主,发育中生代花岗岩、玄武岩、安山岩与流纹岩,仅揭示少量低级变质的砂岩与板岩(图 2)。

以南澎—香港岩石圈断裂为界,珠一坳陷北部华南褶皱带出露前寒武纪—中生代变质岩、岩浆岩;珠一坳陷基底、东沙隆起以中生代岩浆岛弧为主。上述前第三纪基底构成了珠一坳陷古近纪南北两大物源体系。本文把珠一坳陷北侧华南褶皱带称之为北部物源体系,珠一坳陷中生代火成岩基底隆起及东沙隆起称之为南部物源体系。两大物源体系在母岩性质、地质年代上存在较大差异,这为锆石 U-Pb 定年物源示踪分析提供了有利条件。

2.2 样品及分析方法

盆地沉积物中的锆石分布较广泛,且稳定性强,因而能保存大量的源区信息。碎屑锆石 CL 图像能够清晰地揭示内部环带、变质增生等方面的信息,有利于母岩成因分析;同时结合锆石 U-Pb 年龄,能够准确指示母岩的地质年代,提高对比精度。随着锆石 U-Pb 年龄谱分析等新测试技术的发展,锆石的形态、成分组成及年龄分析已成为盆地沉积物源区示踪的重要探针(闫义等,2003; Li *et al.*, 2005; 侯可军等,2009; 徐建强等,2012)。同一物源所供给的砂体中锆石的年龄组合必定相同,不同物源供给的砂体中锆石的年龄组合存在着明显的差异。通过对研究区重点井的古近系碎屑锆石的 U-Pb 年龄分析,明确母岩的年龄;结合锆石 CL 图像分析,确定锆石成因;与物源体系对比,可以明确沉积物的物质来源。此次研究选取各层段沉积厚度较大,笔者分别钻遇基底、下文昌组、上文昌组、恩平组、珠海组共 8 件样品来(图 1,表 1)进行锆石分析和物源示踪。

锆石的分选在廊坊区域地质调查所完成,在镜下随机挑选干净清晰、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。

LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用 He 作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、

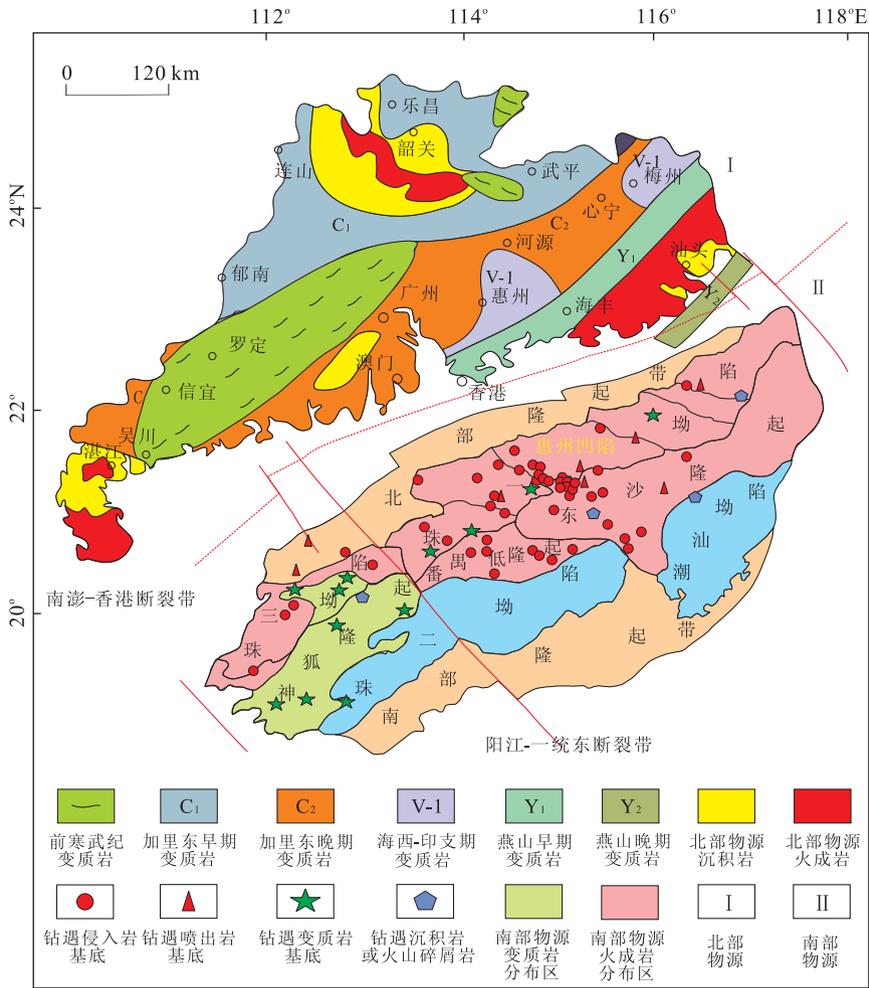


图 2 两大物源区基底岩性及分布特征

Fig. 2 Presence of basement lithology and distribution showing the two provenance systems
据杨超群,1988;舒良树,2006 及广东省地质图修改

表 1 惠州凹陷碎屑锆石样品统计

Table 1 Statistics of zircons from sampling rocks in the Huizhou depression

井位	层段	深度(m)	样品类型	打点个数	谐和年龄个数	实验室编号
HZ-1	基底	3 223.9	花岗岩	27	22	SEP04V
LF-1	基底	3 943.0	花岗岩	25	16	SEP04U
PY-1	下文昌组	3 925.0	砂岩	21	14	SEP04Y
LF-2	上文昌组	3 223.9	砂岩	15	10	SEP04R
XJ-1	上文昌组	4 050.0	砂岩	21	15	SEP04Z
HZ-3	恩平组	3 458.0	砂岩	25	19	SEP04P
HZ-2	恩平组	4 590.0	砂岩	31	22	SEP04X
HZ-2	珠海组	3 575.0	砂岩	33	26	SEP04W

降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008). 每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号. 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、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010a)

完成. 详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Hu *et al.* (2008)以及 Liu *et al.* (2008, 2010a, 2010b).

2.3 碎屑锆石 U-Pb 年龄

去除测试过程中因数据采集量太低而导致不可用的数据,以不谐和度 10% 为标准遴选谐和 U-Pb 年龄,共获得同位素年龄 144 个. 对于锆石年龄大于

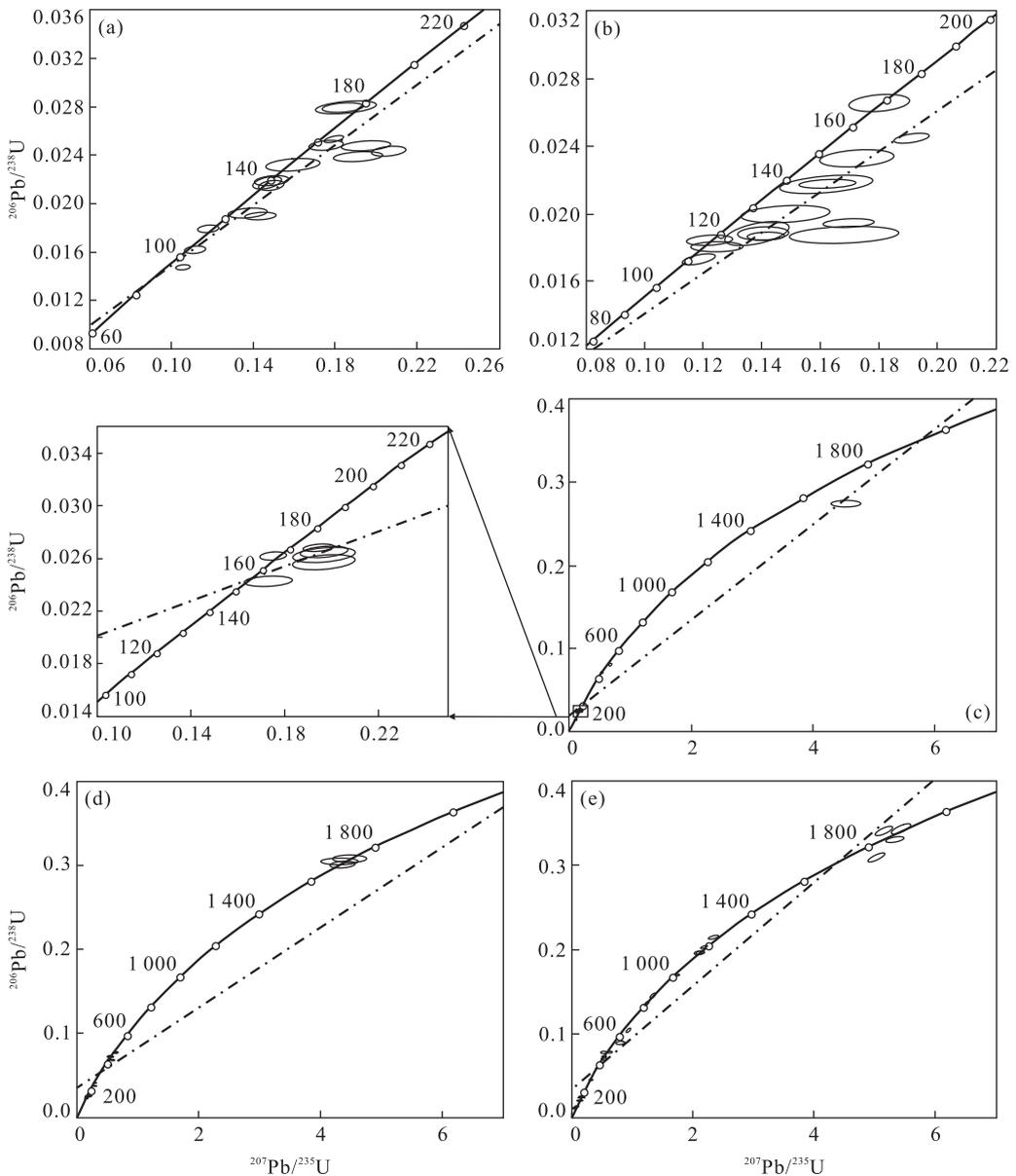


图 3 惠州凹陷碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia age diagrams of detrital zircon in the Huizhou depression

1 000 Ma 的颗粒, 由于大量放射性成因 Pb 的存在而采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄; 对于小于 1 000 Ma 的颗粒, 由于可用于测量的放射性成因 Pb 含量较低和普通 Pb 校正的不确定性, 因而采用更为可靠的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 (Sircombe, 1999). 钻遇花岗岩基底的 HZ-1、LF-1 井两个样品阴极发光形态多为柱状, 晶面简单, 多数呈现岩浆成因特征的岩浆震荡环带. LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年共获得同位素年龄 38 个, 具有很好的谐和性, 基本都落在谐和线上或者附近, 年龄变化于 94~178 Ma (图 3a), 主要为燕山期岩浆成因锆石, 进一步证实了惠州凹陷基底岩性及年代学特征.

番禺 4 洼的 PY-1 井下文昌组砂岩样品锆石形态及年代学与基底揭示基本一致, 锆石颗粒边缘平直, 显示物源单一, 搬运距离较近, 近源快速堆积特点. 碎屑锆石的 14 个谐和年龄分布集中, 变化于 111~169 Ma (图 3b, 图 4a), 证实南部物源, 即盆地内基岩凸起及东沙隆起物源供给占绝对优势.

对上文昌组地层揭示较为全面的是 LF-2 与 XJ-1 井, 两个样品共获得谐和年龄 25 个, 其年龄分布特征类似, 显示相似的物质来源, 呈现中生代锆石为主, 少量早古生代及前寒武纪锆石特点 (图 3c, 图 4b 和 4c). 其中含中生代锆石 17 颗, 大部分集中在 123~187 Ma, 反映了燕山期广泛的岩浆活动; 含早

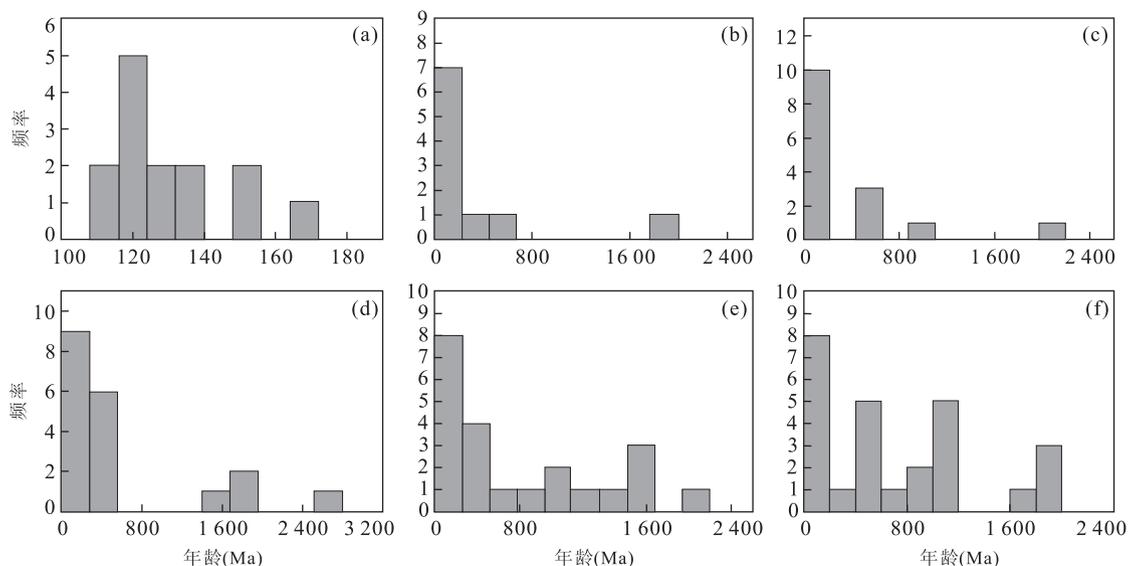


图 4 惠州凹陷砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

Fig. 4 Age distribution of detrital zircons in different formations, Huizhou depression

古生代锆石 5 颗, 年龄变化于 439~517 Ma, 推测为加里东运动产物. 另外含前寒武纪锆石 3 颗, 且年龄跨度大, 分别为 880 Ma、1 967 Ma、2 031 Ma (图 3c, 图 4b 和 4c), 来源于前寒武纪变质岩基底. 从锆石形态上看, 中生代锆石大部分震荡环带较为明显, 边缘平直, 部分边缘不规则; 早古生代及前寒武纪锆石阴极发光图像比较模糊, 环带不明显, 晶面复杂且有溶蚀现象, 整体呈短柱状, 晶棱圆滑, 一定程度上反映了其搬运距离较远, 这些复杂的形态和内部结构说明锆石成因的多样性, 也显示了沉积物源区成分的复杂.

HZ-3、HZ-2 井恩平组样品锆石年龄跨度大, 从前寒武到中生代均有分布, 但略有不同, HZ-3 井样品 19 颗锆石存在 2 个峰值, 中生代 150~170 Ma 有 7 颗, 加里东末期 427~475 Ma 有 7 颗, 此外晚古生代、元古代、太古代锆石均有分布, 年龄分散 (图 3d, 图 4d). 而 HZ-2 井恩平组样品 22 颗锆石年龄更为分散, 6 颗锆石集中在中生代 126~164 Ma. 早晚古生代锆石均有分布, 而前寒武纪锆石增加到 10 颗, 所占比重更大, 变化于 727~2 454 Ma, 无明显峰值 (图 4e). 不同年龄锆石形态与上文昌组锆石相似. 碎屑锆石复杂的年龄组成与华南褶皱带复杂地质构造运动相符合.

为了厘清物源体系问题, 获得精确的、可对比的定量示踪数据, 在代表性较强的 HZ-2 井的珠海组 3 575 m 深度段取得砂岩岩屑样品, 并成功获得 26 个锆石谐和年龄数据. 测年结果与 HZ-2 井恩平组

锆石年龄分布类似, 但中生代锆石相对含量进一步降低, 前寒武纪锆石相对含量继续增加. 其中含 8 颗中生代锆石, 年龄变化于 95.8~172.0 Ma. 而前寒武纪锆石达到 12 颗 (图 3e, 图 4f). 在锆石形态上, 中生代锆石与其他层段相似; 前寒武纪锆石阴极发光图像中可清晰地识别出变质成因的核部和后期重结晶的边部, 具有多个期次的发育特征, 锆石边缘不规则, 晶面复杂且有碎裂、溶蚀现象, 为典型变质成因锆石.

2.4 碎屑锆石 U-Pb 年龄分析

结合物源体系分析, 珠一坳陷基底及东沙隆起以中生代火成岩为主, 华南褶皱带为多时期岩浆运动及变质作用叠加, 岩性及年代学复杂, 使得中生代锆石的相对含量在一定程度上可以用来衡量两大物源区供源变化. 锆石 U-Pb 定年结果表明, 惠州凹陷下文昌组锆石谐和年龄与盆地基底锆石协和年龄基本一致, 全部为中生代岩浆成因锆石 (图 4a, 图 5), 表明下文昌组沉积时期, 母岩类型单一, 北部物源, 即华南褶皱带并未向惠州凹陷供源或供源极弱, 惠州凹陷物源区主要为南部物源, 即珠一坳陷内部中生代火成岩基岩低凸起与东沙隆起; 上文昌组样品内中生代锆石含量仍可以达到 68%, 少量加里东期及前寒武纪变质成因锆石开始出现 (图 4b 和 4c, 图 5), 证实华南褶皱带开始向惠州凹陷供源, 说明上文昌组沉积时期, 两大物源区同时供源, 但仍以南部物源为主; 恩平组样品内锆石年龄逐渐分散, 中生代锆石含量逐渐降低, 以北部物源区供源为主. 结合地质

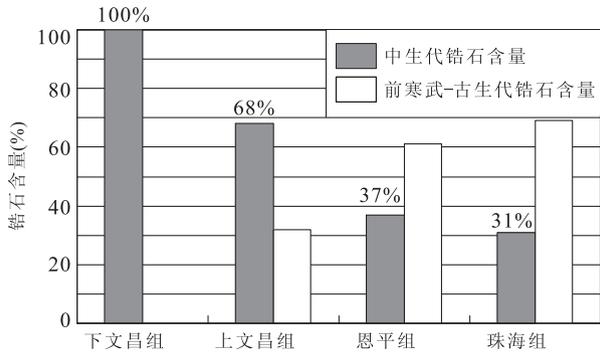


图 5 惠州凹陷各层段碎屑锆石年龄组成分布

Fig. 5 Relative content of Mesozoic and Precambrian-Paleozoic detrital zircon grains in different formations, Huizhou depression

背景推测,惠州凹陷古近纪早期,边界断裂活动强度大,在沉积区隆凹相间背景下,以短程近源水系为主,盆内基底及低隆起为主要物源;古近纪晚期,由于断裂活动强度减弱及风化剥蚀的影响,沉积区发生准平原化,古地貌较为平缓,有利于远程水系的发育,区域沉降背景下盆外长距离搬运的辫状水流较为活跃。这些认识对指导古近系沉积体系编图具有重要意义。

3 沉积充填响应特征

以物源转换规律为切入点,通过对惠州凹陷地震相、单井相及典型地震剖面沉积相综合分析,阐明其沉积充填响应特征,进一步对其砂体类型与展布特征进行刻画。

惠州凹陷古近系物源转换规律为以南部物源供给为主转换为南北两大物源同时供给,再转换为以北部物源供给为主,不同期次的物源体系的沉积充填响应特征各具特色。

下文昌组地层沉积时期,主要发育近源扇三角洲、重力流、辫状河三角洲、滨浅湖相和中深湖相。沉积中心深湖区靠近南部的边界断裂,较大型扇三角洲扇体及辫状河三角洲主要分布在不同洼陷之间的构造转换带上,控洼断裂下降盘多发育小规模扇三角洲砂体,洼陷中心则发育滑塌重力流与洪水重力流砂体(图 6a)。

上文昌组地层沉积时期,东沙隆起与盆地内部凸起仍是各洼陷的重要物源,但同时叠加了华南褶皱带的物源。沉积中心与沉降中心迁移到凹陷北部,沉积厚度呈北厚南薄特征。珠一坳陷内部各大凸起分布与

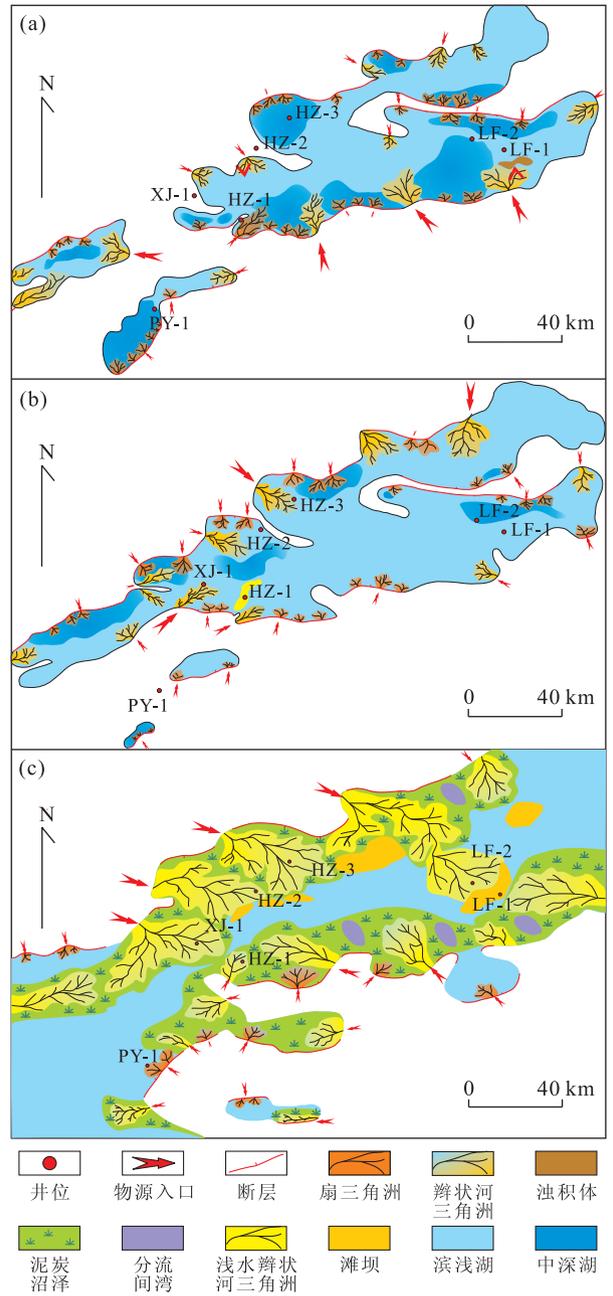


图 6 惠州凹陷古近系下文昌组(a)、上文昌组(b)、恩平组(c)层序沉积物源体系

Fig. 6 Sedimentary provenance systems of Lower (a), Upper Wenchang Formation (b), and Enping Formation (c), Palaeogene, Huizhou depression

下文昌沉积时期相同,陡坡带扇三角洲、构造转换带辫状河三角洲与中深湖泥岩均较发育(图 6b)。

惠州凹陷恩平组地层沉积时期,伴随北部物源的充足供给,沉积厚度依然呈现北厚南薄特征。尽管湖水范围扩大,但水体较浅,泥碳沼泽发育,在惠州凹陷堆积了巨厚的浅水碎屑岩沉积组合,发育了滨浅湖相、浅水辫状河三角洲、滨浅湖滩坝和局部的近

源扇三角洲(图 6c).

4 沉积物源转换机制

物源体系与沉积充填格局的变化受控于构造活动(刘俊等,2006;梁富康等,2011),惠州凹陷物源区的南北转换及其沉积体系演变与不同阶段断层活动密不可分.结合区域地质背景,对惠州凹陷及其邻区物源转换及沉积体系演变机制进行深入探讨.

4.1 多幕裂陷旋回的构造格局

裂谷盆地的形成具有幕式进行的特点已经被国内外大量研究所证实.施和生等(2009)通过对区域性角度不整合等研究指出惠州凹陷古近系存在两幕裂陷,分别控制文昌、恩平组沉积.依据层序格架与物源对比分析,在文昌组内部识别出局部不整合界面 SB5,即为上文昌组与下文昌组界限.上下文昌组均由裂陷初期、裂陷高峰期和萎缩期组成,构成两个完整的沉积充填演化序列.本文在两幕裂陷的基础

上将裂陷 I 幕划分为裂陷 I_A 幕与裂陷 I_B 幕两期,与裂陷 II 幕构成 3 个裂陷旋回.

在盆地幕式裂陷控制下,盆地的物源体系也相应发生规律变化:断陷期,盆地基底差异沉降明显,盆地内部的凸起、低凸起都是凹陷的物源供给区,南部物源效应明显,沉积作用具有近源、快速堆积的特点;断拗转换期,盆地低凸起较为稳定,或被水体覆盖,其物源效应明显减弱,这时物源区主要位于盆地边界外的造山带或褶皱带,以北部物源供给为主.幕式裂陷控制下,北部物源与南部物源供源强度变化明显,互为消长.惠州凹陷古近系物源沉积体系的变化正是盆地幕式裂陷的响应.

4.2 多幕裂陷旋回下沉积物源响应机制

惠州凹陷古近纪的盆地构造演化非常复杂,整体上表现为多成因机制复合,多旋回叠加的多幕裂陷特征.不同时期、不同裂陷幕(下文昌裂陷 I_A 幕、上文昌裂陷 I_B 幕、恩平组的裂陷 II 幕)的断裂活动位置及活动强度差异较大,致使盆地沉积充填过程中的物源体系、充填特征、沉积相的平面展布各不相同(图 7).

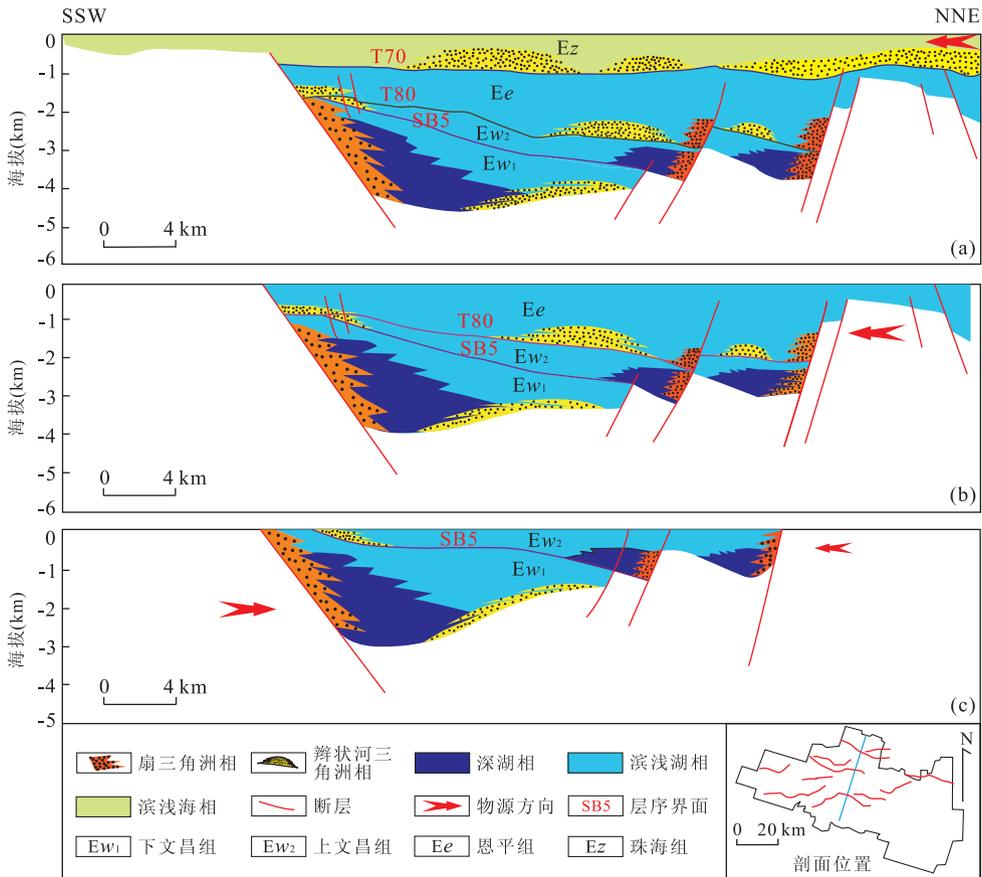


图 7 古近系断裂活动、物源转换与沉积体系变化剖面

Fig. 7 Faulting, provenance switching and deposition center migration profiles in the Paleogene

a. 珠海组沉积后; b. 恩平组沉积后; c. 文昌组沉积后

裂陷 I_A 幕,凹陷南部控凹断裂活动强度大,洼陷分割性强,水深坡陡,东沙隆起与盆内低凸起为凹陷提供物源,在控洼深大断裂的影响下凹陷沉降加速,地层沉积厚度呈南厚北薄特征.沉积中心靠近南部边界断层.下文昌组裂陷 I_A 幕发育PSQ1、PSQ2、PSQ3和PSQ4共4个三级层序,它们构成一个完整的裂陷旋回,从湖盆范围迅速扩大,到高峰期覆盖几乎所有洼陷,之后湖盆范围逐渐缩小,直至该裂陷旋回的结束.相应地,洼陷边缘粗碎屑沉积也发生有规律的变化:裂陷初期仅在控洼断裂陡坡带发育小规模扇三角洲砂体;而裂陷高峰期除控洼断裂陡坡带发育小规模扇三角洲砂体外,在构造转换带还发育大规模扇三角洲砂体与辫状河三角洲砂体;裂陷萎缩期仅在控洼断裂陡坡带发育小规模扇三角洲砂体.

在裂陷 I_B 幕,凹陷断裂活动同样强烈,继承了 I_A 幕的隆洼格局,但北部断裂活动开始加强,凹陷北部快速沉降,以北断南超洼陷为主,沉积中心与沉降中心迁移到珠一坳陷北部,珠一坳陷内部凸起向相邻洼陷区提供物源同时,北部华南褶皱带开始供源.大型辫状河三角洲与扇三角洲扇体主要分布在不同洼陷之间的构造转换带上,控洼断裂下降盘多发育小规模的扇三角洲砂体,洼陷中心则发育滑塌重力流与洪水重力流砂体.PSQ5、PSQ6、PSQ7共3个层序构成一个完整的裂陷旋回,湖盆范围迅速扩大,到鼎盛期覆盖几乎所有洼陷,之后湖盆范围逐渐缩小,直至该裂陷旋回的结束.

在经历了文昌组沉积末期大规模的区域抬升以后,裂陷作用再次发生.进入裂陷 II 幕,惠州凹陷内部隆起带变得相对稳定或被湖水覆盖,对洼陷的物源效应明显减弱,代之而起的是华南物源区的充足供源.由于准平原化,古地貌平缓,具备了大型水系发育条件.水体较浅,泥碳沼泽发育.该裂陷旋回发育了滨浅湖相、浅水辫状河三角洲、滨浅湖滩坝和局部的近源扇三角洲.

通过砂岩中碎屑锆石同位素年龄示踪下的物源定量一半定量分析,构建了隆起区、凹陷边界断裂活动、物源供给及沉积体系展布之间的联系,不同方面的研究成果相辅相成、相互印证,极大地确保了研究结果的可信性,为少井条件下盆地深部古近系沉积学编图提供了强有力的指导.同时物源转换规律对砂体展布、储层评价与烃源岩沉积背景分析具有指导意义.研究成果表明裂陷早期以南部物源,即盆地内部中生代火成岩物源供给为主,近源快速堆积的扇三角洲砂体分选磨圆差,储层物性一般;裂陷晚期

以北部物源,即盆外多类型母岩供给为主,经过长距离搬运沉积的砂体,成分成熟度与结构成熟度较高,储层物性较好.因此,对于古近系勘探来说,北部物源供给的储集砂体是下一步优质储层预测评价和勘探的主要目标.同时,裂陷初期以盆内凸起为主的火成岩物源体系富含大量金属离子与营养元素,为盆内藻类繁盛提供了充足的营养,与盆内火成岩母岩供给为主的相关层序是烃源岩发育的有利层系,这为无井、少井区深部烃源岩的沉积背景分析与资源评价工作提供了新的线索.HZ25构造油气重大突破与下文昌组优质烃源岩的发现很好地印证了物源转换规律在指导油气勘探中的有效性.

5 结论

(1)惠州凹陷古近系幕式裂陷背景下,珠一坳陷基底、东沙隆起与珠一坳陷北侧华南褶皱带两大物源体系转换特征非常典型,锆石U-Pb定年物源示踪显示惠州凹陷下文昌组发育时期,物源以珠一坳陷内部低凸起与隆起带供给为主;上文昌一恩平组沉积时期,华南褶皱带物源供给强度不断增强,至恩平组、珠海组沉积时期华南母岩物源供给占绝对优势.

(2)断裂活动、物源转换与沉积体系展布之间密切相关:下文昌组裂陷 I_A 幕,南部断层活动强烈,珠一坳陷基底、东沙隆起物源区供源为主,沉积体系以洼陷中心重力流、边界断裂下降盘扇三角洲、构造转换带辫状河三角洲为特色;上文昌组裂陷 I_B 幕,北部断裂活动加强,两大物源区同时供源,沉积体系以构造转换带辫状河三角洲与隆起区的湖泊滩坝为特色;恩平组裂陷 II 幕,北部断裂强烈,华南物源区供给充足,沉积体系以构造转换带的浅水辫状河三角洲、湖泊滩坝和薄煤层为特色.

References

- Hou, K. J., Li, Y. H., Tian, Y. R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481-492 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. C., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093-1101. doi: 10.1039/b804760j

- Jiang, H., Wang, H., Lin, Z. L., et al., 2009. Periodic Rifting Activity and Its Controlling on Sedimentary Filling of Paleogene Period in Nanpu Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 976—982 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Zhou, H. M., Liu, S. F., et al., 1996. Multistage Episodic Rifting and Its Controls on Filling in Rift Basin: Taking the Eocene Nanpu Rift Basin as an Example. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(6): 633—636 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. F., Xu, S. H., Shi, H. S., et al., 2013. Characteristics of Paleogene Source Rocks and Prediction of Petroleum Resources in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 112—120 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2013.011
- Li, R. W., Wan, Y. S., Chen, Z. Y., et al., 2005. The Dabie Orogen as the Early Jurassic Sedimentary Provenance: Constraints from the Detrital Zircon SHRIMP U-Pb Dating. *Science in China (Ser. D)*, 48(2): 145—155. doi:10.1360/03yd0216
- Li, P. L., Liang, H. X., Dai, Y. D., 1998. Exploration Perspective of Basement Hydrocarbon Accumulations in the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 12(6): 361—369 (in Chinese with English abstract).
- Liang, F. K., Yu, X. H., Li, X. P., et al., 2011. Growth Faults in Shenxian Depression and Their Control over the Sedimentation. *Geology in China*, 38(2): 263—270 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Zhang, Y. M., Li, S. T., et al., 2004. Episodic Rifting Dynamic Process and Quantitative Model of Mesozoic-Cenozoic Faulted Basins in Eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 583—588 (in Chinese with English abstract).
- Liu, A., Wu, S. M., 2011. A Discussion on the Formation of Granite in the Pearl River Mouth Basin and Its Implication to Hydrocarbon Resource. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 141—148 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Yang, H., Shen, H., et al., 2006. The Research on Control Action of Sedimentary System by Tectonism. *China Mining Magazine*, 15(11): 98—101 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. X., Zhang, W. M., 2003. Zircon Pb-Pb Ages of Pre-Sinian Basement in Central Guangdong Province and Their Geological Significance. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 52—57 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010a. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010b. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535—1546. doi:10.1007/s11434—010—3052—4
- Ru, K., Pigott, J. D., 1986. Episodic Rifting and Subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 70(9): 1136—1155.
- Shen, W. Z., 2006. Comment on the Isotopic Age Data of Basement Metamorphic Rocks in Cathaysia Block. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 475—482 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Yu, S. M., Mei, L. F., et al., 2009. Features of Paleogene Episodic Rifting in Huizhou Fault Depression in the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 29(1): 35—37, 40 (in Chinese with English abstract). doi:10.3787/j.issn.1000—0976.2009.01.008
- Shi, H. S., Xu, C. H., Zhou, Z. Y., et al., 2011. Zircon U-Pb Dating on Granitoids from the Northern South China Sea and its Geotectonic Relevance. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 85(6): 1359—1372. doi:10.1111/j.1755—6724.2011.00592.X
- Sirombe, K. N., 1999. Tracing Provenance through the Isotope Ages of Littoral and Sedimentary Detrital Zircon Eastern Australia. *Sedimentary Geology*, 124(1—4): 47—67. doi:10.1016/S0037—0738(98)00120—1
- Shu, L. S., 2006. Predevonian Tectonic Evolution of South China from Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418—431 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. J., Yu, J. H., Sun, T., et al., 2008. Grenvillian Orogeny in the Southern Cathaysia Block: Constraints from U-Pb Ages and Lu-Hf Isotopes in Zircon from Metamorphic Basement. *Chinese Science Bulletin*, 53(19): 3037—3050. doi:10.1007/s11434—008—0262—0
- Xu, J. Q., Li, Z., Shi, Y. H., 2012. Major Provenance of Jurassic Sediments in Luxi Uplift, Eastern North China. Derived from the Northern North China Block; Evi-

- dences from Detrital Zircon U-Pb and Hf Isotopic Geochronology. *Chinese Journal of Geology*, 47(4): 1099—1115 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. S., 2008. Several Problems Worthy to be Noticed in the Research of Granites and Volcanic Rocks in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 283—294 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. T., Wang, H., Wang, Q. C., 2008. Episodic Tectonic Cycles and Sequence Pattern of the Tertiary Rifted Basins of East China. *Acta Petrolei Sinica*, 29(2): 185—190 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y., Lin, G., Li, Z. A., 2003. Provenance Tracing of Sediments by Means of Synthetic Study of Shape, Composition and Chronology of Zircon. *Ceotectonica et Metallogenia*, 27(2): 184—190 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. Q., He, T. X., Weng, S. J., et al., 1988. Regional Geology of Guangdong Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yu, J. H., O'Reilly, Y. S., Wang, L. J., et al., 2006. Finding of Ancient Materials in Cathaysia and Implication for the Formation of Precambrian Crust. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 13—22. doi: 10. 1007/s11434—007—0008—4
- Yu, J. H., Wang, L. J., Zhou, X. M., et al., 2006. Compositions and Formation History of the Basement Metamorphic Rocks in Northeastern Guangdong Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 38—48 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Liu, K. Y., Yang, X. H., et al., 2012. The Sequence Stratigraphic Architecture of Continental Lake Basin and Its Significance on Lithofacies Prediction: Taking Huizhou Sag in Zhujiangkou Basin as an Example. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 32—39 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Late Mesozoic Volcanic Genesis in SE-China: A Model Combining Lithosphere Subduction with Basaltic Magma Underplating. *Progress in Natural Science*, 10(3): 240—247 (in Chinese).
- 地球科学——中国地质大学学报, 21(6): 633—636.
- 李松峰, 徐思煌, 施和生, 等, 2013. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测. 地球科学——中国地质大学学报, 38(1): 112—120.
- 李平鲁, 梁慧娟, 戴一丁, 1998. 珠江口盆地基岩油气藏远景探讨. 中国海上油气(地质), 12(6): 361—369.
- 梁富康, 于兴河, 李先平, 等, 2011. 冀中拗陷深县凹陷的生长断层特点及其对沉积的控制作用. 中国地质, 38(2): 263—270.
- 林畅松, 张燕梅, 李思田, 等, 2004. 中国东部中生代断陷盆地幕式裂陷过程的动力学响应和模拟模型. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5): 583—588.
- 刘安, 吴世敏, 2011. 珠江口盆地花岗岩成因探讨及其对油气资源指示意义. 地学前缘, 18(1): 141—148.
- 刘建雄, 庄文明, 2003. 粤中前震旦纪基底锆石 Pb-Pb 蒸发年龄及其地质意义. 华南地质与矿产, (2): 52—57.
- 刘俊, 杨洪, 沈华, 等, 2006. 构造对沉积的控制作用. 中国矿业, 15(11): 98—101.
- 沈渭洲, 2006. 华夏地块基底变质岩同位素年龄数据评述. 高校地质学报, 12(4): 475—482.
- 施和生, 于水明, 梅廉夫, 等, 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.
- 舒良树, 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12(4): 418—431.
- 徐建强, 李忠, 石永红, 2012. 鲁西隆起侏罗系碎屑主物源来自华北北缘: 锆石 U-Pb 和 Hf 同位素年代学证据. 地质科学, 47(4): 1099—1115.
- 徐夕生, 2008. 华南花岗岩—火山岩成因研究的几个问题. 高校地质学报, 14(3): 283—294.
- 严德天, 王华, 王清晨, 2008. 中国东部第三系典型断陷盆地幕式构造旋回及层序地层特征. 石油学报, 29(2): 185—190.
- 闫义, 林舸, 李自安, 2003. 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. 大地构造与成矿学, 27(2): 184—190.
- 杨超群, 贺同兴, 翁世劫, 等, 1988. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 于津海, 王丽娟, 周新民, 等, 2006. 粤东北基底变质岩的组成和形成时代. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 38—48.
- 朱红涛, Keyu Liu, 杨香华, 等, 2012. 陆相湖盆层序构型及其岩性预测意义: 以珠江口盆地惠州凹陷为例. 地学前缘, 19(1): 32—39.
- 周新民, 李武显, 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式. 自然科学进展, 10(3): 240—247.

附中文参考文献

- 侯可军, 李延河, 田有荣, 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481—492.
- 姜华, 王华, 林正良, 等, 2009. 南堡凹陷古近纪幕式裂陷作用及其对沉积充填的控制. 沉积学报, 27(5): 976—982.
- 焦养泉, 周海民, 刘少峰, 等, 1996. 断陷盆地多层次幕式裂陷作用与沉积充填响应: 以南堡老第三纪断陷盆地为例.