石油与天然气地质
OIL & GAS GEOLOGY

文章编号:0253－9985(XXXX)XX－0001－18

珠江口盆地开平凹陷古近系文昌组物源体系演化及发育模式

张忠涛[1,2],邱欣卫[1,2],张　琴[3],唐历山[1,2],张益哲[3],江　标[1,2],杨佳颖[1,2],张梦婕[3],马　月[3]
[1. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司,广东 深圳 518054;2. 中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054;
3. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249]

摘要:珠江口盆地开平凹陷古近系文昌组古物源体系特征及发育模式认识不清,致使有利砂体成因与分布不明,制约了下一步的有利目标优选。通过岩屑鉴定、重矿物分析、碎屑锆石U-Pb同位素定年及地震勘探等资料,系统分析了母岩类型、源区特征和物源方向,探讨了物源体系演化及其发育模式,旨在为有利砂体预测提供科学依据。研究表明,开平凹陷文昌组物源主体来自再旋回造山带和火山弧,以上地壳长英质组分为主;锆石测年与重矿物分析等揭示南部、西北部、西南部和东北部存在潜在供源区,同沉积火山活动亦贡献了大量凝灰质成分,整体呈现“多方向、多类型、非稳态”的特征。层段对比显示,文昌组下段受北部神狐隆起、南部顺鹤隆起、东北部云开低凸起及同期内部火山物源共同控制;文昌组上段北部神狐隆起物源作用逐渐增强,同期内部物源作用减弱。构造演化与古地貌控制了文昌组物源体系的发育模式和沉积体系类型:北部转换断坡-断鼻型物源体系主导北部文昌组下段扇三角洲发育,具“近源、小汇”特征;西南部发育近源缓坡断槽型物源体系,该体系控制了西洼缓坡带辫状河三角洲的发育;南部发育远源缓坡古沟谷型物源体系,该体系控制了主洼南部缓坡带辫状河三角洲的发育,具“远源、大汇”特征。

关键词:锆石同位素测年;重矿物组合;古物源方向;源-汇体系;文昌组;开平凹陷;珠江口盆地
中图分类号:TE121.3　　**文献标识码**:A

Evolution and development model of the provenance system of the Paleogene Wenchang Formation in the Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

ZHANG Zhongtao[1,2], QIU Xinwei[1,2], ZHANG Qin[3], TANG Lishan[1,2], ZHANG Yizhe[3], JIANG Biao[1,2], YANG Jiaying[1,2], ZHANG Mengjie[3], MA Yue[3]

[1. *Shenzhen Branch, CNOOC China Limited, Shenzhen, Guangdong* 518054, *China*; 2. *CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen, Guangdong* 518054, *China*; 3. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*]

Abstract: The characteristics and development model of the paleo-provenance system of the Paleogene Wenchang Formation in the Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin, remain poorly understood, resulting in uncertainties regarding the genesis and distribution of favorable sand bodies and hindering the identification of favorable exploration targets. Using data from lithic fragment identification, heavy mineral analysis, detrital zircon U-Pb dating, and seismic surveys, this study systematically analyzed parent rock types, sediment source area characteristics, and provenance directions, investigated the evolution and development model of the provenance system, seeking to provide a scientific basis for predicting favorable sand bodies. As indicated by the research results, the provenance of the Wenchang Formation in the Kaiping Sag was derived predominantly from rejuvenated orogenic belts and volcanic arcs, with the majority being composed of felsic components from the upper crust. Zircon U-Pb dating and heavy mineral analysis reveal potential sediment source areas in the south, northwest, southwest, and northeast parts of the study area. Synsedimentary volcanic activity also contributed abundant tuffaceous material, giving rise to a multi-directional, multi-source, and non-steady provenance system. Stratigraphic comparison indicates that the lower member of the Wenchang Formation was jointly influenced by sediment supply from the Shenhu Uplift to the north, the Shunhe Uplift to the south, the Yunkai

收稿日期:2026-01-13;**修回日期**:2026-07-03。
第一作者简介:张忠涛(1977—),男,高级工程师,海上油气地质。**E-mail**: zhangzht@cnooc.com.cn。
基金项目:“十五五”国家科技部重大专项(2025ZD1402700);中海油有限公司重大项目(SCKY-2024-SZ-01)。

Low Uplift to the northeast, and contemporaneous intra-basin volcanic sources. In the upper member, the contribution from the Shenhu Uplift progressively increased, whereas that from contemporaneous intra-basin sources diminished. Tectonic evolution and paleogeomorphology controlled the development model of the provenance system and the types of sedimentary systems within the Wenchang Formation. A transitional fault slope-fault nose provenance system developed in the north dominated fan-delta development in the lower member of the Wenchang Formation and is characterized by a proximal, small-scale fan system. A proximal, gentle-slope fault-trough provenance system developed in the southwest governed the development of braided-river delta along the gentle-slope zone of the western sub-sag. A distal, gentle-slope paleo-valley provenance system developed in the south controlled braided-river delta development in the gentle-slope zone of the southern main sub-sag and is characterized by a distal, large-scale fan system.

Key words: zircon U-Pb dating, heavy mineral assemblage, provenance analysis, source-to-sink system, Wenchang Formation, Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

引用格式: 张忠涛, 邱欣卫, 张琴等. 珠江口盆地开平凹陷古近系文昌组物源体系演化及发育模式[J]. 石油与天然气地质, DOI: 10.11743/ogg XXXXXX01.

ZHANG Zhongtao, QIU Xinwei, ZHANG Qin, et al. Evolution and development model of the provenance system of the Paleogene Wenchang Formation in the Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, DOI: 10.11743/oggXXXXXX01.

物源分析在沉积盆地的研究中具有至关重要的地位,它能够揭示沉积物的来源、搬运路径及其对沉积过程的控制作用,为油气储层预测和油气勘探提供关键依据[1-4]。物源分析技术经历了从传统岩石矿物学到高精度原位微区分析及定量源-汇系统模拟的重大跨越。多方法物源体系刻画需整合岩石学、地球化学、同位素年代学及定量模拟技术,以克服单一方法的多解性,进而实现从定性判别到动态定量重建的转变[5-8]。传统砂岩碎屑组分分析(Dickinson图解)与重矿物组合[ZTR指数(锆石-电气石-金红石指数)、ATi指数(磷灰石-电气石指数)和GZi指数(石榴子石-锆石指数)]可以判别构造背景、沉积物成熟度及母岩类型[9-11];碎屑锆石U-Pb年代学结合Lu-Hf同位素能精确构建年龄谱系,示踪地壳增生与再造历史,成为现代物源研究的核心手段[12-14]。近年来,研究强调多矿物协同与"源-汇"系统耦合,利用低温热年代学[裂变径迹和(U-Th)/He含量比值]恢复源区剥露速率与古地貌演化,结合古水流与地震地貌学结束搬运路径[15]。在此基础上,通过逆向蒙特卡洛模拟或多元曲线分辨等定量反演方法,计算各潜在源区的贡献比例,最终实现物源体系的多维度精细刻画[10]。因此,多方法物源体系刻画的趋势是从定性描述走向定量解析,从单一矿物走向多矿物协同,从静态源区识别走向动态源-汇耦合。珠江口盆地开平凹陷作为南海北部重要油气富集区,其古近系文昌组近年来勘探取得突破性进展,2024年发现的深水深层大油田——开平南油田探明油气地质储量达1.02×10^8 t油当量,证实了该区巨大的勘探潜力。研究表明,下文昌组半深湖相沉积是优质的烃源岩,而不同类型和厚度的砂体成为主要的勘探目的层,其空间分布直接影响油气资源量评价和勘探目标选择[16-18]。

然而,开平凹陷由于阳江一统隐伏断裂的存在(图1)、变质核杂岩的隆升、多期拆离断层的改造以及古地貌和古环境的影响,导致开平凹陷的物源体系十分复杂。当前开平凹陷文昌组物源系统研究仍存在明显不足,古物源方向、搬运通道、源区性质及母岩类型不清,不同时期的物源体系与搬运通道的动态演化不明确,导致沉积体系类型的展布及物源体系的发育模式不明,制约了有利砂体的预测精度及有利目标的优选[19-22]。针对上述问题,本研究通过薄片鉴定、重矿物分析、元素地球化学、碎屑锆石定年和地震相解释等资料方法分析源区性质及母岩类型,明确潜在的古物源方向,根据地震资料判断搬用通道类型,进一步重建古物源体系演化及发育模式,为精细刻画沉积体系展布及源-汇发育模式提供科学依据,为开平凹陷文昌组储层预测与油气勘探部署提供有利支撑,同时进一步深化复杂陆相断陷盆地"源-汇"系统发育模式的理论认识。

1 区域地质概况

开平凹陷位于珠江口盆地的西南部深水区,是珠Ⅱ坳陷的西部延伸部分。凹陷整体呈NE—NEE走向,面积约为6 200 km^2。其东临云开低凸起与白云凹陷,西、北至神狐隆起,南连顺德凹陷和南部隆起带(图1)[23-24]。开平凹陷是珠江口盆地深水油气勘探的

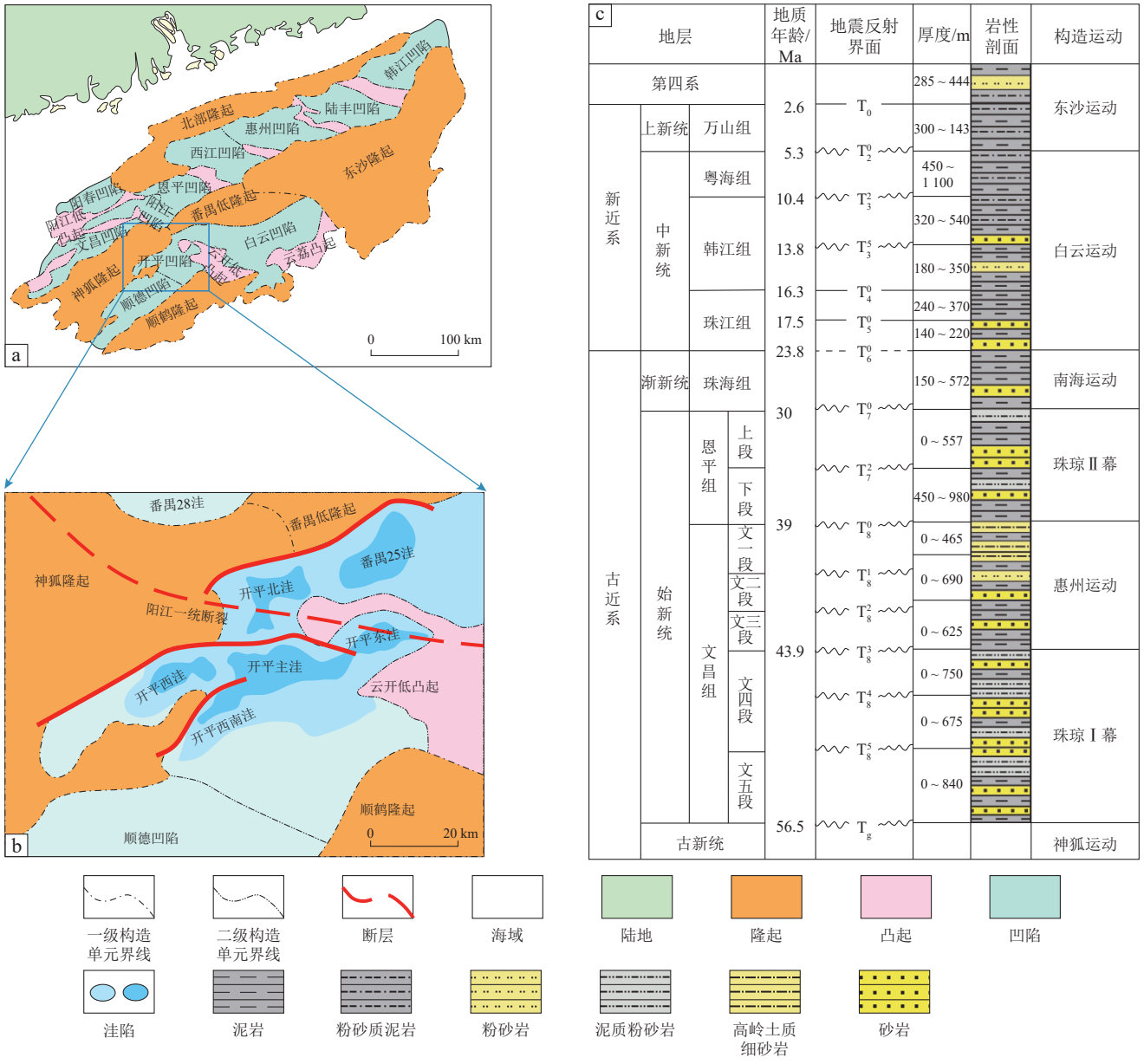


图1 珠江口盆地构造位置(a)、开平凹陷构造纲要(b)及地层综合柱状图(c)[23-24]

Fig. 1 Tectonic location of the Pearl River Mouth Basin (a), structural outline (b) and composite stratigraphic column (c) of the Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB)[23-24]

重要区域,可细分为西洼、北洼、西南洼、主洼和东洼等次级单元[19]。

开平凹陷的构造演化受珠江口盆地整体动力学控制,主要分为裂陷期、断-拗转换期和拗陷期。始新世早期为裂陷期,文昌组早期断陷集中在主洼,伸展作用强烈,形成复式半地堑结构;文昌组晚期扩展到所有次洼,伸展强度减弱,呈现“北断南超”的滚动半地堑特征[20-21]。

开平凹陷新生代地层序列完整,自下而上发育文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组和万山组等多套地层,记录了从陆相断陷湖盆向海相坳陷盆地的过渡(图1)[23-24]。本研究基于地震反射终止关系、测井、录井和岩心资料,对开平凹陷文昌组地层界面进行识别,将其自下而上划分为文(文昌组)五段、文四段、文三段、文二段和文一段5个段,其中下文昌组包括文五段和文四段,上文昌组包括文三段、文二段和文一段。文昌组沉积受断陷作用主导,沉积中心受断裂控制,厚度差异大,地层垂向分异明显,沉积旋回完整,沉积环境包括半深湖-深湖亚相、扇三角洲和辫状河三角洲。岩性上、下部为砂岩、粉砂质泥岩和泥岩,中部以半深湖相暗色泥岩为主(有机质丰富),上部为砂、泥岩互层[19-20]。

2 实验资料及方法

2.1 资料情况

本研究针对文昌组重点层系采用40 km × 40 km网格开展全三维地震解释，完成10口重点井的井-震标定及T_8^0和T_8^4等关键界面的构造-沉积联合解释。对2口岩心井和24口壁心井进行观察及采样，分别进行了薄片鉴定、扫描电镜观察、X射线衍射分析以及重矿物分析等实验，对17口重点井进行锆石同位素测年分析，对13口重点井进行常量和微量元素分析，为物源方向、源区性质及母岩类型分析提供了资料支撑。

2.2 Dickinson三角图、稀土元素含量二元图解和岩屑鉴定分析源区类型及母岩性质

对9口井的砂岩样品进行岩石薄片制备，开展镜下薄片鉴定，定性分析母岩类型及其差异。随后采用Gazzi-Dickinson法统计碎屑骨架成分[25-26]。将样品投点至Dickinson三角图进行砂岩组分来源的图解，以评估物源区构造背景及母岩类型。另外稀土元素(REE)和钍(Th)与非相容性元素的含量比值特征，可有效鉴别碎屑岩中长英质矿物与镁铁质岩源组分的贡献差异。利用La/Th-Hf与La/Yb-ΣREE元素含量二元图解对16口井的样本进行散点投图，分析源区与母岩类型。

2.3 重矿物和锆石同位素测年分析古物源方向

对古近系文昌组14口重点井的砂岩样本进行了重矿物分析测试。每个样品经过浸泡在10%的盐酸溶液中研磨、用水淘洗和干燥等一系列处理后，筛选出粒径63 ~ 250 μm的颗粒作为子样本。为了进行重矿物分离，用密度为2.86 g/cm^{3}的溴仿($CHBr_3$)溶液对这些样本进行了处理。分离出的重矿物随后用环氧树脂固定在2 mm厚的玻璃载玻片上，并使用光学显微镜进行鉴定，最终统计每种重矿物的数量。数据分析过程中去除了菱铁矿和重晶石等自生矿物，选取稳定重矿物如锆石、电气石、白钛石、石榴石和磷灰石，将其数据归一化处理之后进行重矿物分析。

碎屑锆石是指沉积岩中非原位的锆石颗粒，因抗风化能力强，在陆源沉积环境中广泛分布，适合U-Pb同位素定年，通过统计其U-Pb同位素年龄组分可追溯母岩来源，广泛应用于沉积物源研究[27-28]。锆石同位素定年原理基于铀衰变链，通过测定$^{206}Pb/^{238}U$和$^{207}Pb/^{206}Pb$同位素含量比值计算年龄。为避免破碎或蚀变颗粒带来误差，可通过密度或磁性分离富集锆石，用LA-ICP-MS(激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱)技术进行同位素年龄测试，同位素年龄数据分布及峰值分析通过直方图和散点图展示。

3 母岩类型及源区特征

物源体系研究的核心是通过研究沉积物搬运路径，把“源”区剥蚀和“汇”区沉积有机联系起来。源区剥蚀物质的类型与数量变化，受构造活动和气候变化影响，会导致搬运区通道的形态或类型改变，同时也会让沉积区的沉积类型和地层充填方式发生相应变化[29-32]。本研究运用多手段和多参数物源示踪技术，对开平凹陷文昌组进行系统性物源示踪，重点解析源区构造属性、物源方向和母岩类型组合等关键信息，探讨文昌组物源体系特征及其演化。

3.1 区域基岩性质及分布

珠江口盆地位于南海北部陆缘，是华南活动大陆边缘的组成部分，受古太平洋板块俯冲作用的调控，其基底发育于中、古生代复杂褶皱基底之上，前人研究认为基底岩性整体以燕山期花岗岩普遍发育为特征，但区域分异显著，开平凹陷主洼、西洼、西南洼以及顺德凹陷以花岗岩和闪长岩为主，开平东洼、番禺25洼和云开低凸起则以二长花岗岩为主，西北部和北部神狐隆起则分别分布有少量古生代砂岩及流纹岩和凝灰岩[21-22,33-34](图2)。研究区共有9口井钻遇基底，通过基底的岩心观察可识别出花岗片麻岩、花岗斑岩和正长岩等不同的基岩类型(图3)。开平凹陷四周隆起发育的基岩也存在差异，西北部神狐隆起及局部隆起发育时代以晚侏罗世(160 ~ 150 Ma)为主的花岗岩及火山碎屑岩；南部缓坡构造带主要发育燕山期(160 ~ 100 Ma)、印支期(250 ~ 200 Ma)和加里东期(450 ~ 400 Ma)的岩浆岩及变质岩；东北部云开低凸起(隐伏构造带)主要发育时代以早白垩世(120 ~ 100 Ma)为主的花岗岩。

3.2 母岩类型

岩屑组分源于剥蚀区母岩的风化、剥蚀与搬运，最终沉积于盆地，其构成可有效反映母岩类型及结构特征。开平凹陷文昌组岩屑类型以流纹岩、花岗岩和凝灰岩等火成岩为主，同时也包含石英岩和千枚岩等变

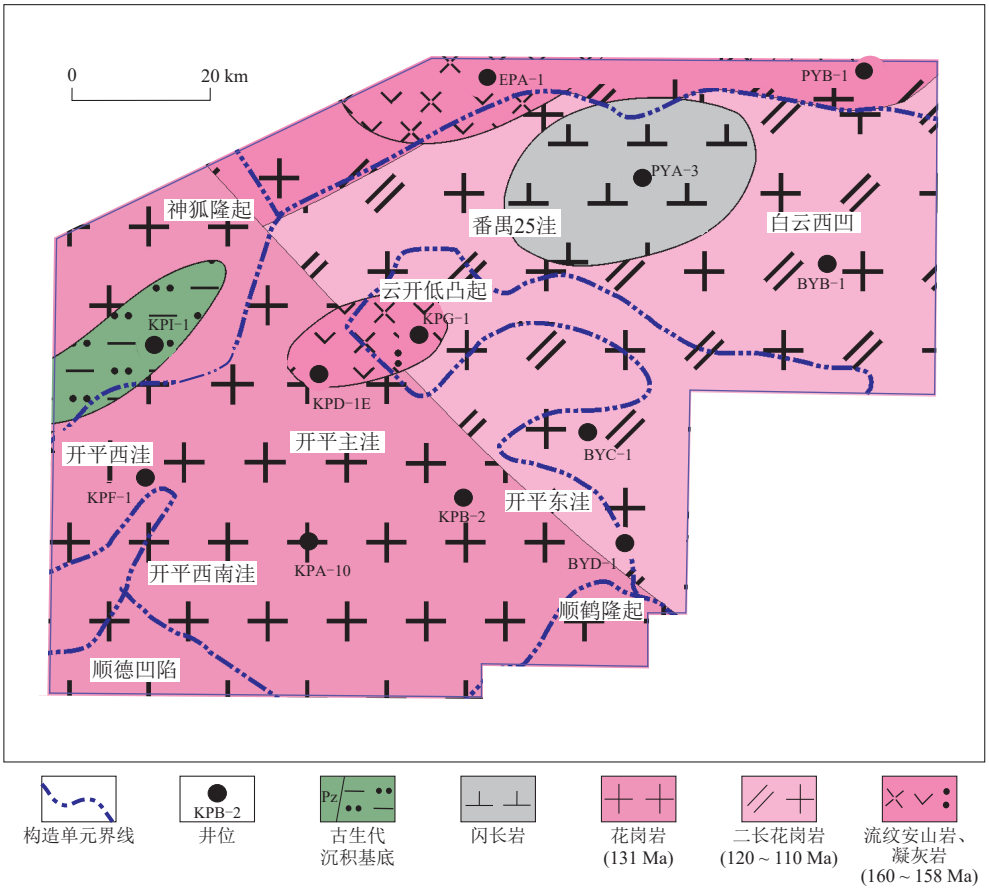


图2 珠江口盆地开平凹陷基底岩性分布

Fig. 2 Basement lithology distribution map of the Kaiping Sag, PRMB

质岩,另含少量沉积岩岩屑(图4)。不同构造部位及层段的砂岩岩屑组成存在显著差异。文五段在主洼南部斜坡带以粗粒凝灰质砂岩(图4a)和火山角砾岩(图4b)为主,发育喷出岩岩屑和花岗岩岩屑。文四段在主洼南部以岩屑长石砂岩为主(图4c),花岗岩岩屑丰富,而在主洼东部,主要为含凝灰质长石岩屑砂岩(图4d),花岗岩岩屑发育,凝灰质呈杂基状产出。文三段在主洼北部主要发育砂砾岩和岩屑砂岩(图4e),砾石成分包括花岗岩、石英岩、流纹岩屑或流纹质火山碎屑岩等;而在主洼中部以中-粗粒岩屑砂岩为主(图4f),凝灰质含量高,酸性喷出岩岩屑和花岗岩岩屑发育。文一段在主洼南部斜坡带主要发育长石岩屑砂岩,岩屑以花岗岩岩屑和酸性喷出岩岩屑为主(图4g);在主洼中部主要发育粗粒岩屑砂岩,岩屑以喷出岩和云母石英片岩岩屑为主(图4h);在主洼北部和东部砂岩中发育喷出岩屑、流纹岩屑或流纹质火山碎屑。综上,开平凹陷文昌组不同层段及洼陷不同位置的砂岩岩屑组成所指示的母岩类型存在明显差异,且与珠江口盆地周缘基底岩性特征具有一致性,为盆地周缘隆起共同供源。

3.3 源区性质

Dickinson三角图解是沉积学中用于判别沉积物物源区构造背景的核心方法,该方法通过砂岩碎屑组分的定量统计并对三角图进行散点投影,建立矿物成分与大地构造环境之间的关联模型,以评估物源区构造背景及母岩类型[35-36]。对开平凹陷文昌组样品进行投点分析(图5),结果表明物源主要来自再旋回造山带和火山弧,母岩以混合造山带砂岩及岩屑再旋回成分为主导。

稀土元素(REE)和钍(Th)在流体中迁移性弱,主要赋存于沉积物中,其稳定性使其成为物源判别的可靠指标,通过相容元素(如Th)与不相容元素的比值特征,可有效区分碎屑岩中长英质矿物与镁铁质源岩组分的贡献差异[37-39]。基于上述元素的地球化学行为,利用La/Yb-ΣREE元素含量判别模型能系统解析沉积物源区的母岩属性,揭示不同构造背景下源岩的化学分异规律,为岩石类型识别提供关键地球化学依据。进一步采用La/Th-Hf和La/Yb-ΣREE元素含量二元图解进行散点投图分析,综合分析源区属性与母岩类

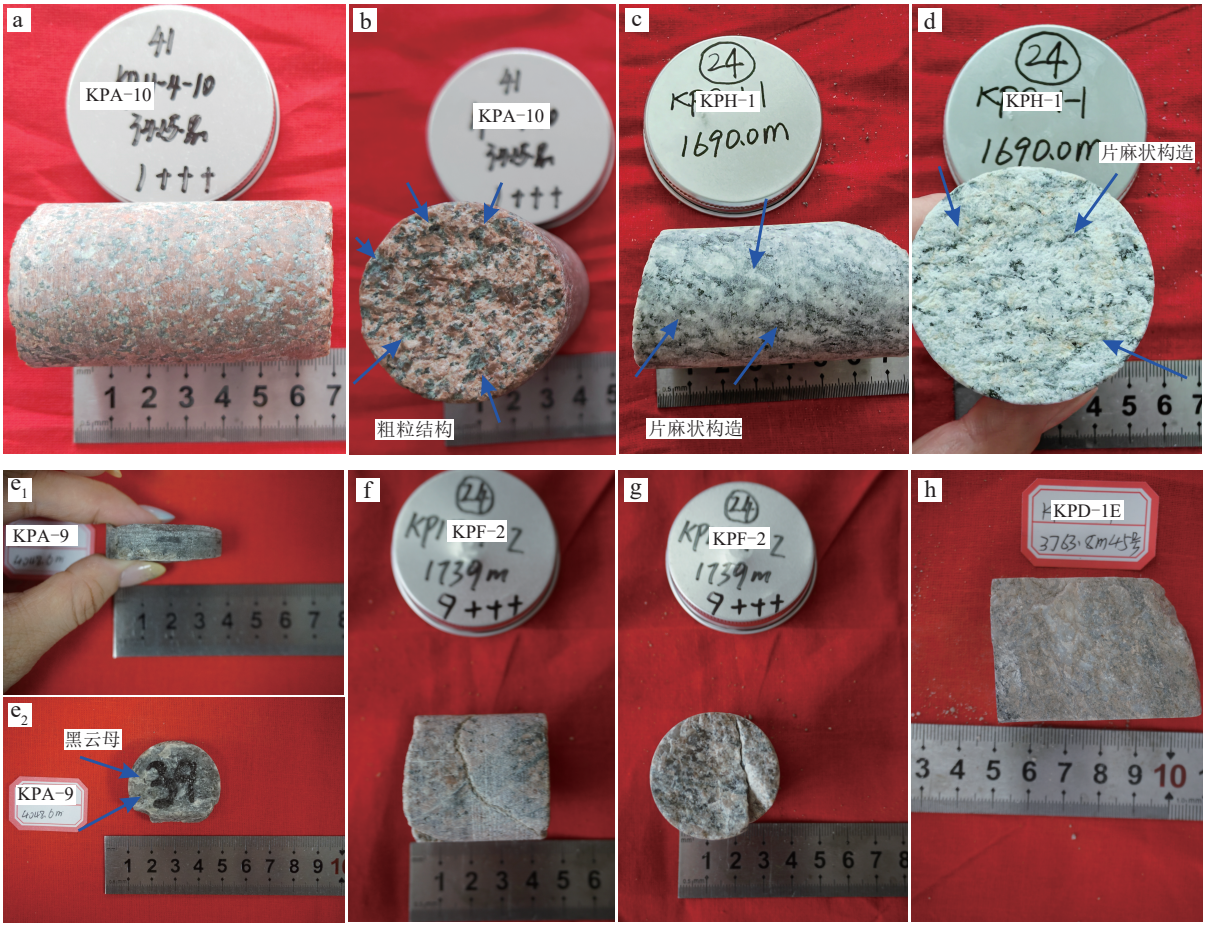


图3 珠江口盆地开平凹陷下文昌组基岩类型岩心照片

Fig. 3 Basement rock types of the lower member of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a,b. KPA-10井,肉红色正长岩,发育粗粒结构和块状构造,埋深3 415.0 m,基底;c,d. KPH-1井,浅肉红色花岗片麻岩,发育片麻状构造,埋深1 690.0 m,基底;e_1,e_2,f. KPA-9井,花岗斑岩,少量黑云母,埋深4 048.6 m,基底;g,h. KPF-2井,肉红色花岗岩,埋深1 739.0 m,基底

型[40-42]。将文昌组样品投点至母岩类型判别图解中,结果表明研究区物源以花岗岩、沉积钙质泥岩及碱性玄武岩的混合为主,该结果与前文基底岩心观察和镜下母岩岩屑分析结论一致(图6)。同时,文昌组样品点部分落入上地壳长英质物源区,指示物源主体为上地壳长英质组分,另有部分样品显示古老沉积物成分增加。

4 多方法物源方向示踪

4.1 重矿物组合物源分析

根据重矿物的耐风化性和物理稳定性,可将其划分为易蚀变型、稳定型和超稳定型3大类[43-44]。不稳定矿物(如辉石和角闪石)的含量随着搬运距离增加呈指数衰减,而稳定矿物(如锆石和金红石)的比例则显著上升。不同矿物组合的共生关系具有明确的母岩指示意义,其空间分布差异可灵敏指示物源体系的演化[45]。因此,重矿物组合分析广泛应用于多物源混合沉积区,可有效示踪不同源区的贡献。不同物源体系所供给的砂体在空间上呈现差异化的矿物分布模式,通过构建重矿物稳定性参数与组合类型交会图,可精确划分各物源对沉积凹陷不同构造单元的控制范围[46-47]。

根据研究区14口重点井的样品分析,开平凹陷文昌组主要重矿物类型包括锆石、电气石、石榴子石、磁铁矿、赤褐铁矿、白钛矿和金红石等,从文五段—文一段,不同沉积时期的重矿物组合在平面分布上具有相似性,都存在几个明显差异的区域(图7)。具体而言,东北部锆石含量高,重矿物组合为“锆石+白钛矿+赤褐铁矿”,对应花岗质母岩类型,物源主要来自东北部云开低凸起基底隐伏断裂所控制的火山岩区;南部重矿物组合为“锆石+白钛矿+赤褐铁矿+电气石”,赤褐铁矿含量较高,以花岗质岩性为主,物源指向南部顺鹤隆起花岗岩及变质岩区;西南部以石榴子

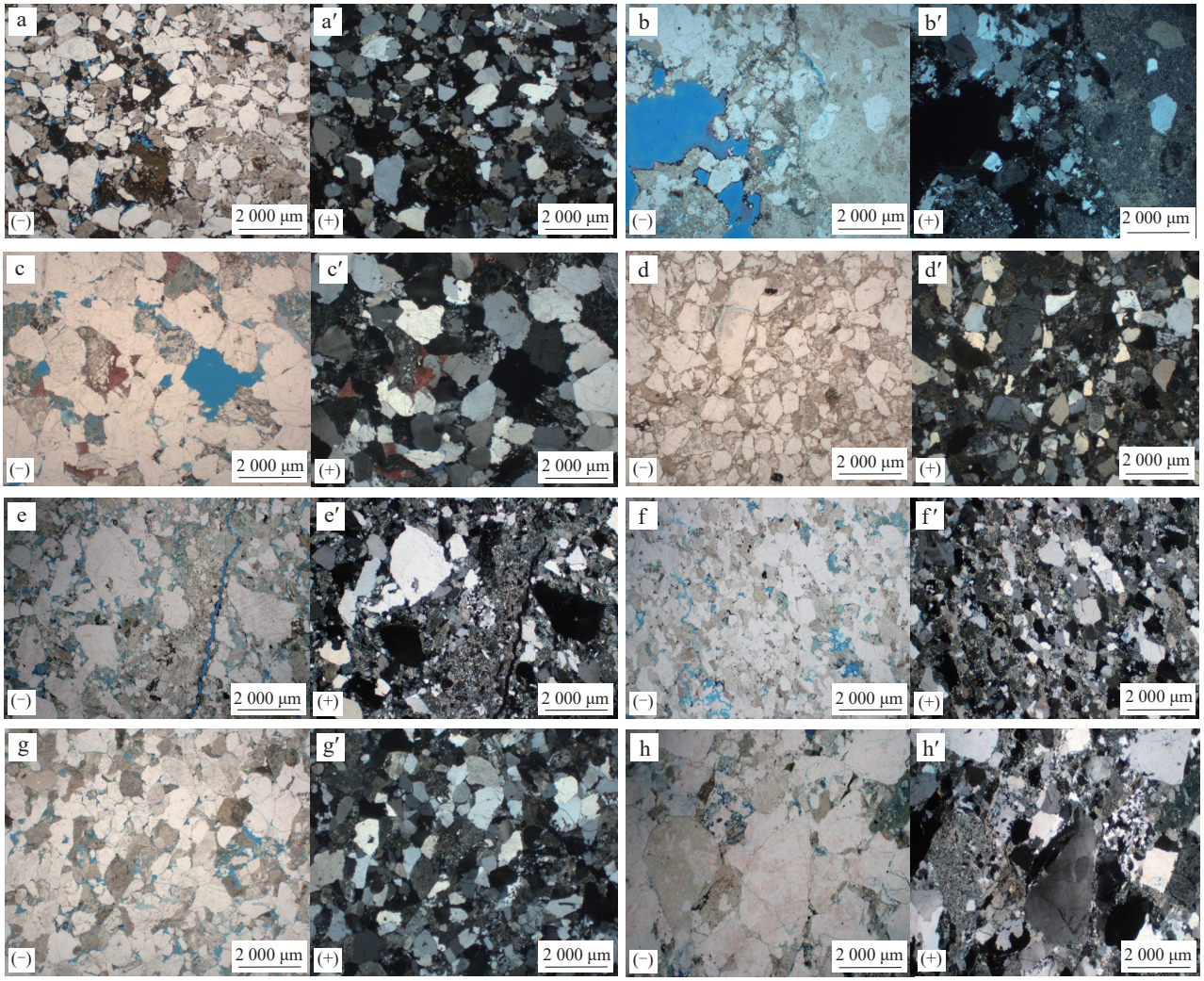


图4 珠江口盆地开平凹陷文昌组各层段岩屑类型镜下照片(铸体薄片)

Fig. 4 Lithic fragment types in various intervals of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a,a′. 文五段,样品KPA-8SA,含凝灰质砾质中-粗粒长石岩屑砂岩,喷出岩岩屑含量33.0%,花岗岩岩屑含量6.5%,凝灰质含量10.0%,顺鹤隆起物源和同期火山活动物源,埋深4 712.4 m; b,b′. 文五段,样品KPA-9,火山角砾岩,喷出岩岩屑含量82.0%,花岗岩岩屑含量8.5%,顺鹤隆起物源和同期火山活动物源,埋深4 030.6 m;c,c′. 文四段,样品KPA-8SA,粗粒岩屑长石砂岩,喷出岩岩屑含量7.0%,花岗岩岩屑含量7.0%,顺鹤隆起物源,埋深4 250.1 m; d,d′. 文四段,样品KPB-2,含凝灰质中-粗粒长石岩屑砂岩,喷出岩岩屑含量19.0%,花岗岩岩屑含量8.0%,凝灰质含量20.0%,顺鹤隆起物源和同期火山活动物源,埋深3 924.9 m;e,e′. 文三段,样品KPD-1,含凝灰质含砾粗-巨粒岩屑砂岩,喷出岩岩屑含量26.5%,花岗岩岩屑含量17.0%,凝灰质含量14.5%,神狐隆起物源,埋深3 081.8 m;f,f′. 文三段,样品KPA-5,含凝灰质中-粗粒岩屑砂岩,喷出岩岩屑含量39.0%,花岗岩岩屑含量4.0%,凝灰质含量5.5%,混合物源,埋深4 378.0 m;g,g′. 文一段,样品KPA-8SA,中粒长石岩屑砂岩,喷出岩岩屑含量25.0%,花岗岩岩屑含量4.5%,顺鹤隆起物源,埋深4 087.2 m;h,h′. 文一段,样品KPA-2,粗粒岩屑砂岩,云母石英片岩岩屑,喷出岩岩屑含量25.0%,花岗岩岩屑含量4.5%,混合物源,埋深4 722.2 m

[(−)表示单偏光;(+)表示正交偏光。]

石发育为特征,反映变质岩的物源贡献增加,KP11-4-9d井(埋深4 048.6 m)基底井壁取心中可见变质石英岩岩屑,肉眼及显微镜下观察发现石英含量达95%以上,含少量黑云母,指示物源来自西南部神狐隆起印支期变质岩区;西北部白钛矿和磁铁矿占比增大,重矿物组合为“白钛矿+锆石+磁铁矿”,对应花岗质岩浆岩或变质岩母岩,物源来自西北部神狐隆起,且上文昌组受拆离断层控制的花岗质糜棱岩物源有所增加。总体而言,文昌组沉积时期研究区主要存在4个潜在物源方向,中部区域受多方向物源交汇影响,具有混源的特征。

4.2 碎屑锆石物源分析

4.2.1 碎屑锆石的形态学特征

对锆石进行阴极发光(CL)图像解析与Th/U元素

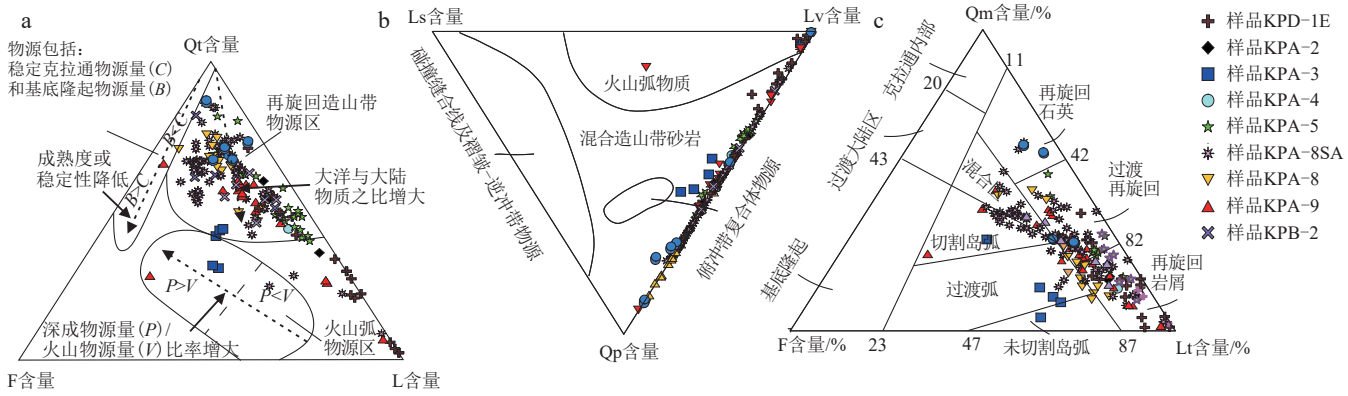


图5 珠江口盆地开平凹陷文昌组砂岩组分Dickinson图解投点图

Fig. 5 Dickinson provenance discrimination diagrams for sandstone compositions of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a. Qt-F-L含量三角图；b. Qp-Lv-Ls含量三角图；c. Qm-F-Lt含量三角图

Qt. 石英(Qt=Qm+Qp)；F. 长石(F=P+K)；L. 岩屑(L=Lv+Ls)；Qm. 单晶石英；Qp. 多晶石英(包括燧石)；Lv. 火山岩岩屑；Ls. 沉积岩岩屑；Lt. 岩屑总量(Lt=L+Qp)

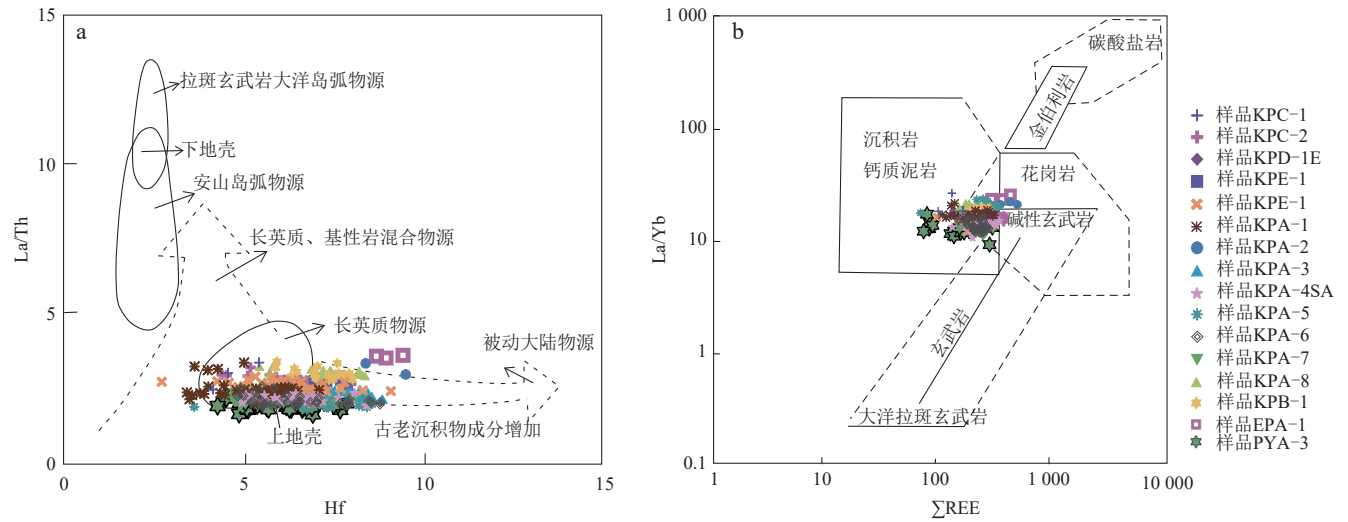


图6 珠江口盆地开平凹陷文昌组稀土元素含量二元图解

Fig. 6 Binary diagrams of rare earth element (REE) in the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a. La/Th-Hf元素含量二元图解；b. La/Yb-ΣREE元素含量二元图解

(元素符号代表该元素含量；REE代表稀土元素。)

含量比值分析，可有效区分源区母岩的岩石类型[48-55]。研究区碎屑锆石多呈自形晶，长/宽比较大，内部发育清晰的振荡环带结构，表明研究区主要的锆石类型为岩浆锆石，整体后期搬运改造作用不明显；阴极发光图像中呈现高亮度响应，U和Pb同位素含量较低。此外，少量锆石晶形破损、形态趋近等轴状，内部环带不发育或仅具模糊分带，为变质成因锆石，其阴极发光响应微弱，对应较高的U和Pb同位素丰度(图8)。

4.2.2 碎屑锆石的年龄特征

不同层段的碎屑锆石年龄均表现出多峰值的特征，但年龄分布区间有所不同。文五段和文四段地质年龄峰值集中在160～150，120～100和50～40 Ma，分别对应晚侏罗世西北部神狐暗沙隆起物源、早白垩世南部顺鹤隆起物源(图9a，b)及始新世同期湖底火山喷发；文三段年龄峰值集中在170～150，120～110和50～40 Ma，少量分布在255～220 Ma，指示锆石分别源于晚侏罗世西北部神狐暗沙隆起、古近纪南部隆起以及始新世同期湖底火山喷发，并记录西南部印支期物源区开始供源(图9c)。文二段以160～150 Ma地质年龄占主导，表明主控物源为西北部神狐暗沙隆起，次要年龄集中于110～100，250和50～40 Ma，指示多方向物源控制(图9d)。文一段年龄峰值较为平均，以180～140，260～237和120～100 Ma为主，主控物源仍



图7 珠江口盆地开平凹陷文昌组各层段重矿物组合分布平面图

Fig. 7 Distribution of heavy mineral assemblages in various intervals of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a. 文五段;b. 文四段;c. 文三段;d. 文二段;e. 文一段

为西北部神狐暗沙隆起,同时南部印支期物源逐渐增强(图9e)。其中,50 ~ 40 Ma的年轻锆石源于同期喷发的凝灰质物质,早文昌期,阳江一统断裂活动导致岩浆沿断裂从湖底喷发,凝灰质物质经湖水搬运混入沉

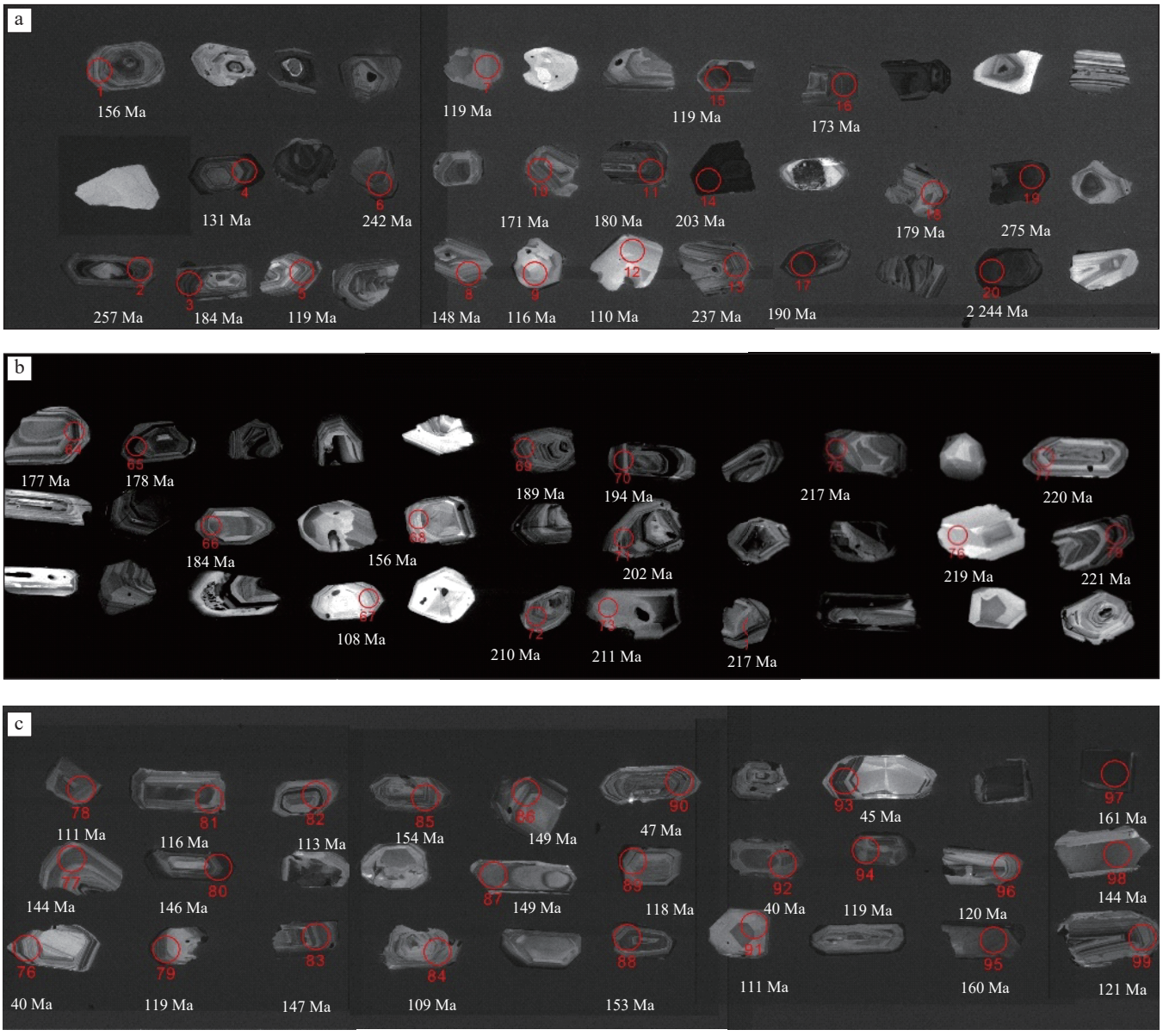


图8 珠江口盆地开平凹陷文昌组碎屑锆石阴极发光特征照片

Fig. 8 Cathodoluminescence (CL) characteristics of detrital zircons from the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a. 样品KPA-9,埋深3 557 ~ 3 678 m,岩浆锆石为主,西南物源(280 ~ 200 Ma)与南部物源(120 ~ 110 Ma)为主;b. 样品KPA-2,埋深3 557 ~ 3 678 m,岩浆锆石为主,混合物源;c. 样品KPB-2,变质锆石为主,南部物源(110 ~ 30 Ma)为主

(红色数字为编号;白色数字为地质年龄。)

积物中,镜下可见火山角砾岩、凝灰岩以及凝灰质杂基等证据(图10)。

4.3 地震相响应

地震前积反射记录了沉积物向盆地方向的阶段性迁移过程,其几何构型可有效揭示碎屑物质的输运方向。前人将前积体归纳为5种典型类型:S型、切线斜交型、平行斜交型、S-斜交复合型及叠瓦状结构[56-57]。通过对研究区三维地震资料的系统追踪,发现文昌组在缓坡带多处出现前积反射响应。文五段在主洼南部斜坡带发育由南向北的强振幅、中连续的叠瓦状前积结构,指示南部顺鹤隆起物源的方向,对应120 ~ 100 Ma的锆石和"锆石+白钛矿+赤褐铁矿"的重矿物组合(图11)。文四段在西南洼斜坡区发育中-强振幅、中连续的发散前积地震相,指示西南部神狐隆起物源的方向,对应260 ~ 240 Ma的锆石和"锆石+白钛矿+赤褐铁矿+电气石"的重矿物组合(图12)。文二段在主洼南部斜坡带发育由南向北的中-弱振幅、低连续的叠瓦状前积结构,指示南部顺鹤隆起物源的方向(图11);在西南洼斜坡区发育倾角小且延伸近的中-

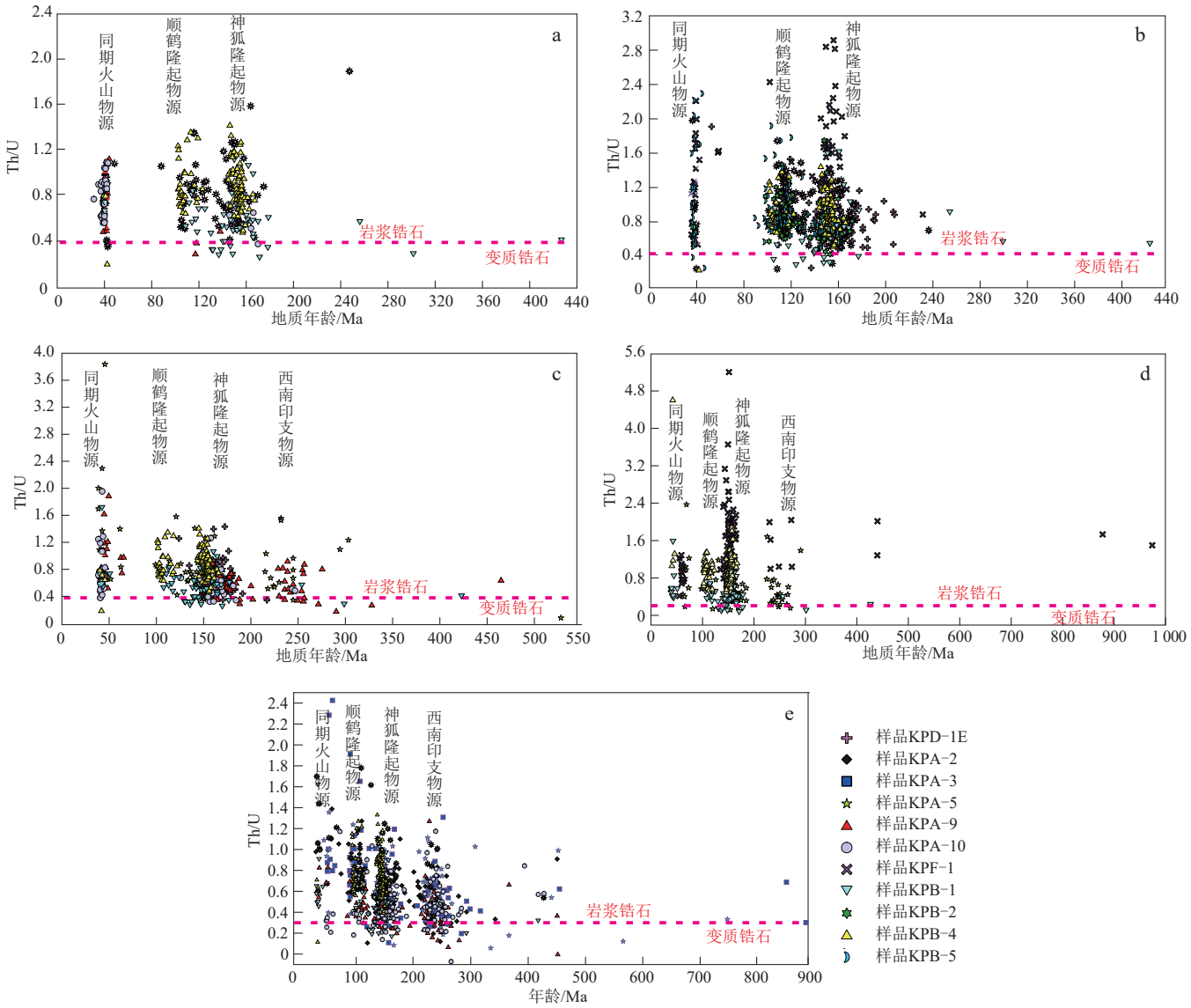


图9 珠江口盆地开平凹陷文昌组各层段碎屑锆石U-Pb同位素年龄与Th/U元素含量比值分布

Fig. 9 Distribution of detrital zircon U-Pb ages and Th/U ratios in various intervals of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a. 文五段;b. 文四段;c. 文三段;d. 文二段;e. 文一段

强振幅、中连续的发散前积地震相,指示西南部神狐隆起物源的方向(图12)。文一段在主洼南部斜坡带发育由南向北的低振幅、低连续的S型前积结构,地震前积反射显示反射结构总体呈SW-NE向,即由西南向东北前积,表明古水流方向由西南向东北叠加推进(图11)。

5 物源体系演化及发育模式

5.1 不同时期物源体系演化

从文昌组各层段锆石年龄峰值分布图(图13)来看,文昌组自下往上锆石年龄峰次由3个主峰变为3个主峰和1个次峰,主导峰值也发生改变,表明物源方向与主次关系均发生改变。下文昌组(文五段-文四段)锆石年龄整体以160 ~ 150,120 ~ 100和50 ~ 40 Ma 3个峰次为主,下文昌组沉积时期沉积物来自西北部、南部、东北部物源区及同期火山物质。其中,文五段沉积时期同期火山物质作用较强,文五段50 ~ 40 Ma锆石年龄占比较大,文四段160 ~ 150 Ma和120 ~ 100 Ma两个峰次锆石年龄增加,表明北部和东北部物源的贡献增大,而同期火山作用的影响相对减弱。

上文昌组(文三段—文一段)锆石年龄逐渐发展为3个主峰和1个次峰,上文昌组沉积时期同期内部物源的作用逐渐减弱,北部神狐隆起物源(150 ~ 160 Ma)的作用相对增强。文三段沉积时期,开始出现240 ~

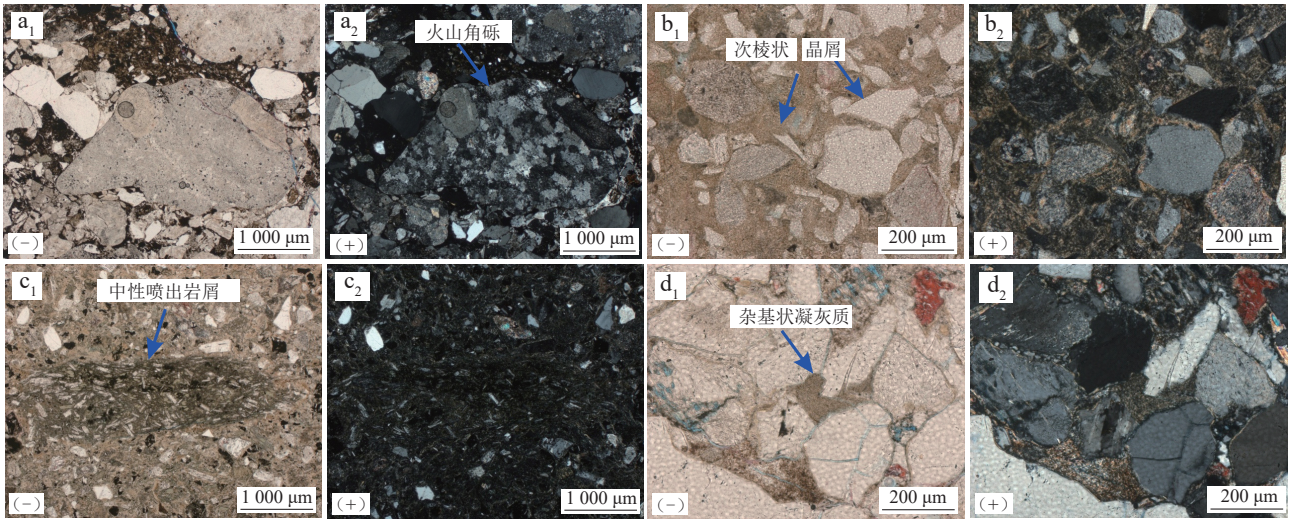


图10 珠江口盆地开平凹陷文昌组火山碎屑或凝灰质发育特征镜下照片(样品KPA-8SA,普通薄片)

Fig. 10 Characteristics of pyroclastic or tuffaceous material in the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a_1,a_2. 火山角砾岩,颗粒间为凝灰质,文五段,埋深4 719.5 m;b_1,b_2. 凝灰岩,凝灰结构,晶屑多次棱状,文五段,埋深4 739.5 m;c_1,c_2. 凝灰岩,凝灰结构,发育中性喷出岩屑,文四段,埋深4 658.0 m;d_1,d_2. 含凝灰质中-粗粒长石岩屑砂岩,凝灰质杂基发育,文四段,埋深4 562.0 m

[(−)表示单偏光;(+)表示正交偏光。]

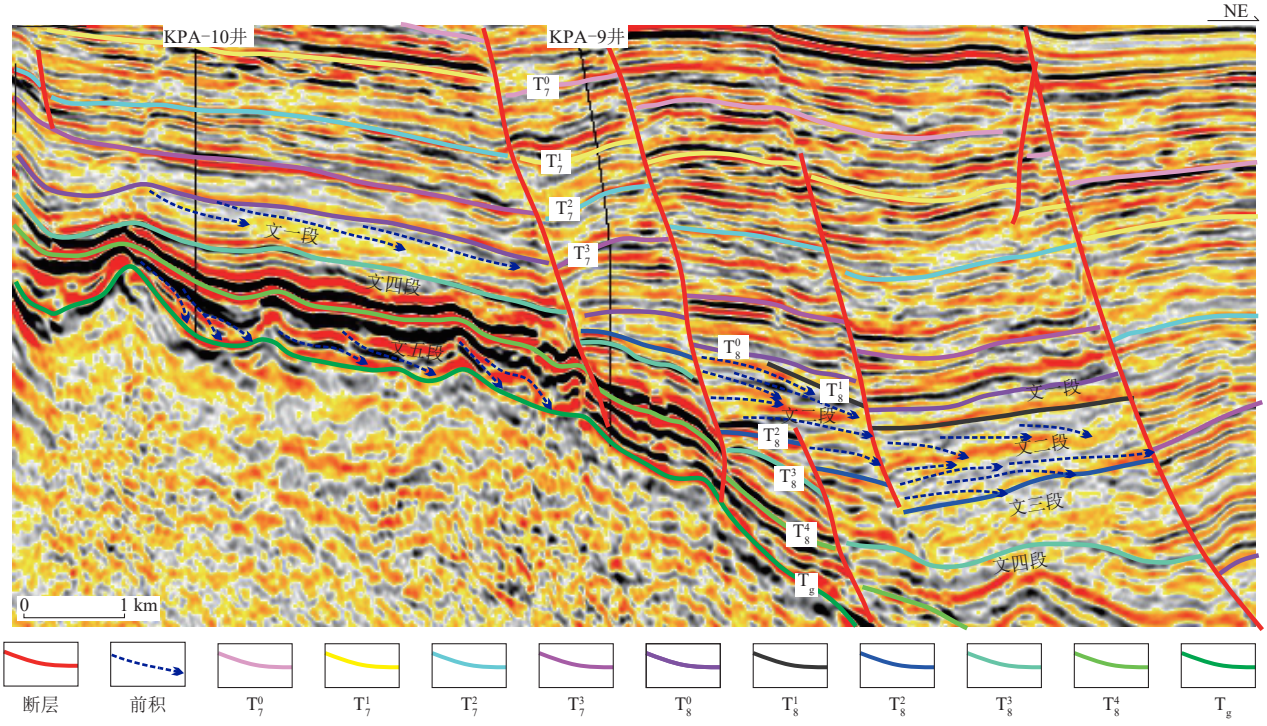


图11 珠江口盆地开平凹陷文五段、文二段和文一段辫状河三角洲前积地震相剖面

Fig. 11 Seismic facies showing progradational reflections of braided-river deltas in the 5th, 2nd, and 1st members of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

T_g. 基底,文五段底;T_8^4. 文四段底;T_8^3. 文三段底;T_8^2. 文二段底;T_8^1. 文一段底

250 Ma的西南部印支期物源。文二段沉积时期同期火山作用减弱,文一段沉积时期南部印支期物源的作用增强。综合来看,自下往上各层段中的年轻锆石占比逐渐降低,表明同期湖底火山喷发对沉积作用的影响逐渐降低。

5.2 物源体系发育模式

构造演化控制着边界断层的发育和古地貌,并直

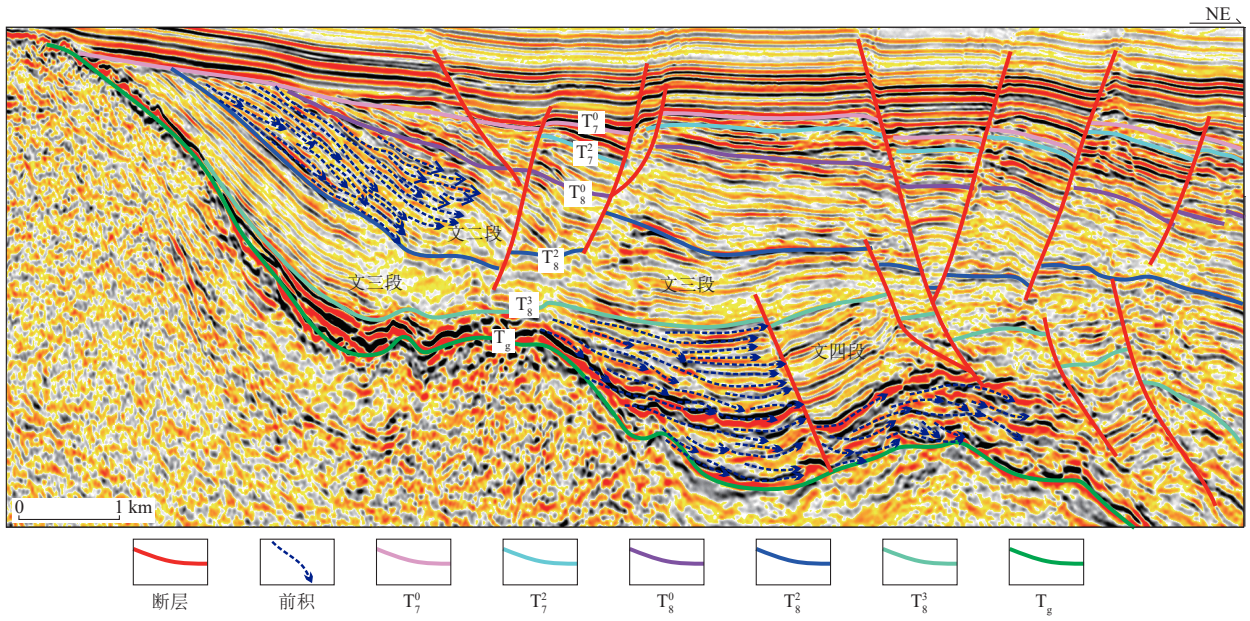


图12 珠江口盆地开平凹陷文四段和文二段辫状河三角洲前积地震相剖面

Fig. 12 Seismic facies showing progradational reflections of braided river deltas in the 4th and 2nd members of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

T_g. 基底,文五段底;T_8^4. 文四段底;T_8^3. 文三段底;T_8^2. 文二段底;T_8^1. 文一段底

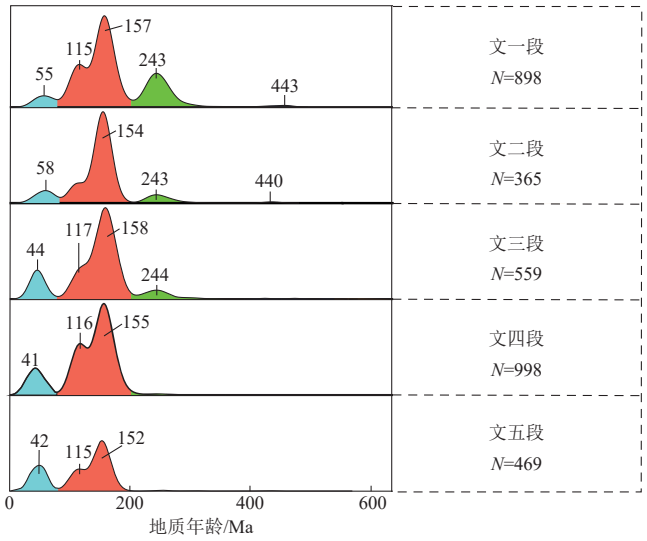


图13 珠江口盆地开平凹陷文昌组各层段锆石同位素年龄峰值分布

Fig. 13 Distribution of detrital zircon U-Pb age peaks in various intervals of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

(*N*为样品个数。)

接控制着古物源方向和搬运通道的类型,从而决定了物源体系的发育模式和沉积体系类型。研究区内断裂活动频繁,文昌组物源体系和沉积体系受断裂控制明显,根据文昌组沉积时期开平凹陷的构造演化,结合地震相特征、物源配置和沉积体系,将研究区内的物源体系和搬运通道类型细分为3种:①转换断坡-断鼻型物源体系,主要分布在洼陷北部陡坡带,受北部断层影响形成转换断坡型和断鼻型的输砂通道,以发育扇三角洲沉积体系为主(图14a);②近源缓坡断槽型物源体系,主要分布在西洼缓坡带,形成断槽型输砂通道,以发育辫状河三角洲沉积体系为主(图14b);③远源缓坡古沟谷型物源体系,主要分布在主洼南部缓坡带,形成古沟谷型输砂通道,也发育辫状河三角洲沉积体系(图14c)。

下文昌组(文五段-文四段)沉积时期为断陷起始期,开平北洼不发育,各洼相对独立,构造上在主洼形成复式半地堑结构,开平主洼湖盆水体较深,主要发育西南部神狐隆起近源缓坡断槽型物源体系(图14b)和南部顺鹤隆起远源缓坡古沟谷型物源体系,发育多个辫状河三角洲,具"远源大汇"特征(图14c);西北部物源供给较弱,神狐隆起近源转换断坡-断鼻型物源体系仅提供少量物源,发育零星扇三角洲沉积,具"短源小汇"特征(图14a);东北部云开低凸起向西南方向微弱供源,形成扇三角洲,同时受少量同期岩浆喷发所携带的凝灰质物源影响。

上文昌组沉积时期为拆离断陷强烈发育阶段,开平北洼受强烈的拆离断陷作用沉降形成湖盆,开始接受沉积,各洼陷逐渐扩展连通,呈现"北断南超"的滚动半地堑特征。南部缓坡带辫状河三角洲规模变大,继承了下文昌组沉积时期的西南部神狐隆起近源缓坡断槽型物源体系(图14b)和南部顺鹤隆起远源缓坡古沟谷型物源体系(图14c),"远源大汇"特征更加明显;北

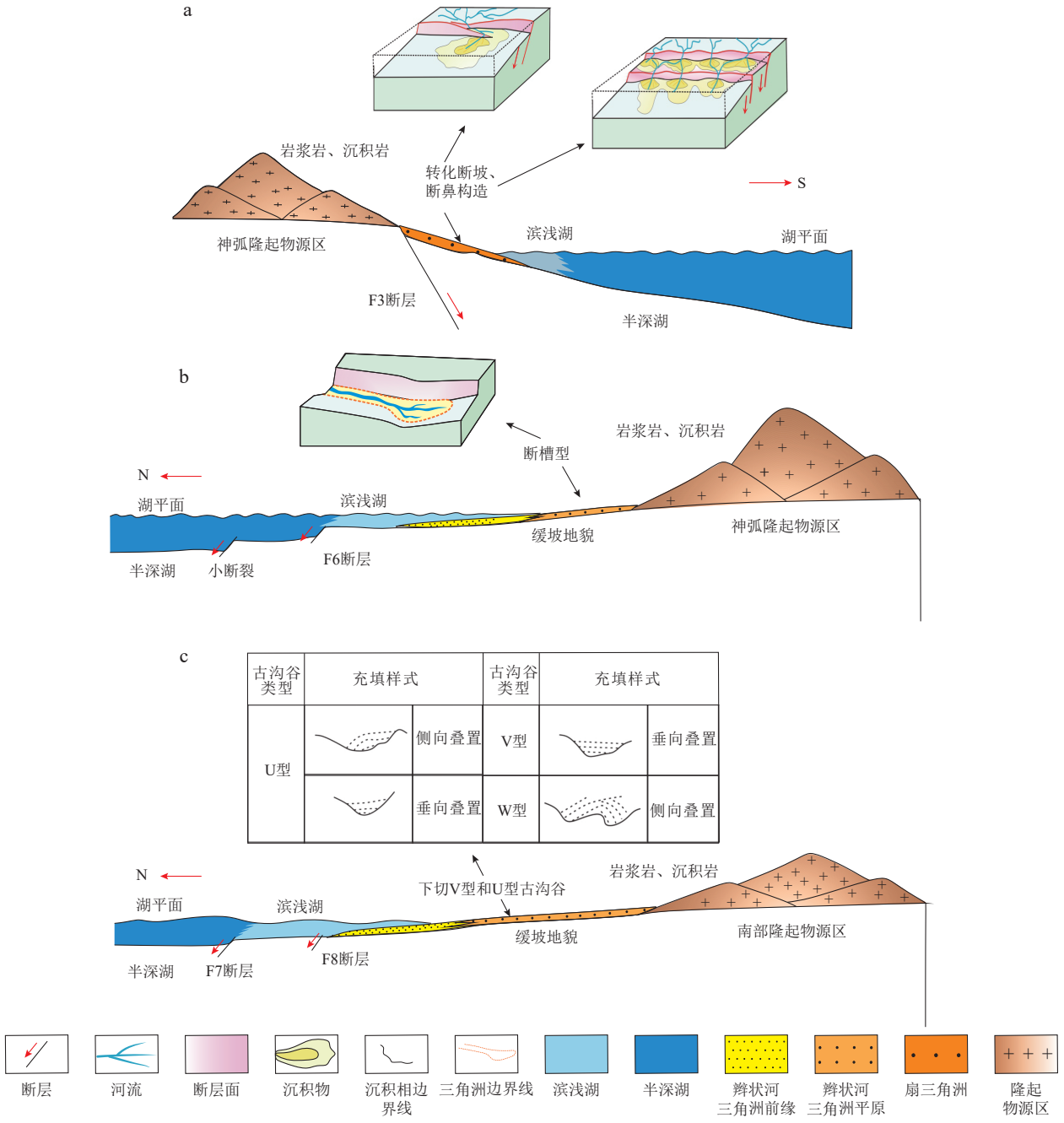


图14 珠江口盆地开平凹陷文昌组物源体系发育模式示意图

Fig. 14 Development model of the provenance system of the Wenchang Formation, Kaiping Sag, PRMB

a. 北部转换断坡-断鼻型物源体系;b. 西南部近源缓坡断槽型物源体系;c. 南部远源缓坡古沟谷型物源体系

部地形坡度减小,物源区距离增大,北部神弧隆起物源转变为远源转换断坡-断鼻型物源体系,供源作用增强,沉积类型由扇三角洲演化为辫状河三角洲;云开低凸起依然向西南供源形成扇三角洲,但同期湖盆内部岩浆喷发物源影响减弱。

综上所述,开平凹陷文昌组沉积时期湖盆接收多方向物源供给,西北部、西南部、南部及东北部4个方向物源共存。盆地边缘不同位置存在多种搬运通道类型,即受断裂或拆离断层活动和古地貌的控制形成了近源缓坡断槽型、远源缓坡古沟谷型和近源转换断坡-断鼻型3种主要搬运通道类型。古构造和古地貌的差异也导致上文昌组和下文昌组源-汇体系类型的差异,下文昌组沉积时期北部主要为近源转换断坡-断鼻型扇三角洲源-汇体系;上文昌组沉积时期,由于开平北洼受强烈的拆离断陷作用逐渐沉降成盆,西北部坡度变缓,转变为远源转换断坡-断鼻型辫状河三角洲源-汇体系。因此,

文昌组的源-汇体系具有“多方向、多类型、非稳态”的分布和演化特征。

6 结论

1) 研究区文昌组基岩和母岩类型复杂,Dickinson三角图解和稀土元素分析表明,物源区属再旋回造山带和火山弧背景,母岩以混合造山带砂岩及岩屑再旋回成分为主,物源主体为上地壳长英质组分。

2) 文昌组沉积时期主要发育神狐隆起、顺鹤隆起和云开低凸起3大物源体系,同时同沉积火山活动提供了一定量的凝灰质物质。下文昌组锆石年龄存在3个主峰,对应3大物源区;上文昌组逐渐发展为3个主峰和1个弱峰,神狐隆起物源的作用逐渐增强,而同期内部物源的作用减弱。自下向上,年轻锆石占比逐渐降低,表明同期湖底火山喷发对沉积作用的影响逐渐降低。

3) 根据物源方向和搬运通道类型,建立了文昌组3种物源体系发育模式:转换断坡-断鼻型物源体系控制了下文昌组北部扇三角洲的发育,具“短源小汇”特征;近源缓坡断槽型物源体系控制了西洼缓坡带辫状河三角洲的发育;远源缓坡古沟谷型物源体系控制了主洼南部缓坡带辫状河三角洲的发育,具“远源大汇”特征。

4) 开平凹陷文昌组物源体系呈现“多方向、多类型、非稳态”的分布和演化特征。古构造条件、搬运通道类型及古地貌差异共同控制了3种主要物源体系类型的发育。其中,西北部自下文昌组向上文昌组发育由近源扇三角洲向远源辫状河三角洲演化的转换断坡-断鼻型非稳态物源体系。

参 考 文 献

[1] 聂银兰, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 陆相断陷盆地源—汇系统要素表征及研究展望[J]. 地质论评, 2022, 68(5): 1881-1896.
Nie Yinlan, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, et al. Characterization and research prospect of source-to-sink system elements in continental rift basin[J]. Geological Review, 2022, 68(5): 1881-1896.

[2] 朱淑玥. 鄂尔多斯盆地西缘晚石炭世羊虎沟组源汇充填过程与古地理演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
Zhu Shuyue. Source-to-sink filling process and paleogeographic evolution from the late carboniferous Yanghugou Formation in western margin of the Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.

[3] 高翔, 刘培, 宋朋霖, 等. 珠江口盆地惠州凹陷西江30洼陡坡型源汇体系特征及扇-辫转换机制[J]. 石油科学通报, 2023, 8(2): 141-151.
Gao Xiang, Liu Pei, Song Penglin, et al. Characteristics of a steep slope source-to-sink system and a fan-braid transition mechanism in the Xijiang30 sub-sag, Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8 (2): 141-151.

[4] 邱欣卫, 阙晓铭, 张威, 等. 断陷湖盆源汇体系及其沉积主控因素研究——以珠江口盆地海丰33洼陷上文昌组为例[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1853-1864.
Qiu Xinwei, Que Xiaoming, Zhang Wei, et al. Study on source sink system and its main controlling factors of sedimentation in faulted lake basin: a case study of the upper Wenchang Formation in Haifeng 33 sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(4): 1853-1864.

[5] 刘强虎, 彭光荣, 刘培, 等. 中国南海东沙隆起北缘晚始新世构造裂点迁移及其源-汇效应[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 846-859.
Liu Qianghu, Peng Guangrong, Liu Pei, et al. Migration of the Late Eocene knickpoints and their source-to-sink system along the northern margin of the Dongsha uplift, South China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 846-859.

[6] 朱筱敏, 刘强虎, 谈明轩, 等. 源汇系统: 研究关注热点和发展趋势[J]. 古地理学报, 2026, 28(1): 25-43.
Zhu Xiaomin, Liu Qianghu, Tan Mingxuan, et al. Research frontier and development of source-to-sink systems[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2026, 28(1): 25-43.

[7] 朱红涛, 徐长贵, 杜晓峰, 等. 陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 539-552.
Zhu Hongtao, Xu Changgui, Du Xiaofeng, et al. Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 539-552.

[8] 刘强虎, 李志垚, 陈贺贺, 等. 陆相裂陷盆地深时源-汇系统关键地质问题及革新方向[J]. 地球科学, 2023, 48(12): 4586-4612.
Liu Qianghu, Li Zhiyao, Chen Hehe, et al. Key geological issues and innovation directions in deep-time source-to-sink system of continental rift basins[J]. Earth Science, 2023, 48(12): 4586-4612.

[9] Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [M]//Zuffa W R. Provenance of Arenites. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985: 333-361.

[10] Weltje G J, Von eynatten H. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook [J]. Sedimentary Geology, 2004, 171(1): 1-11.

[11] Garzanti E, Andò S. Heavy minerals for Junior geoarchaeologists [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 154-174.

[12] Gehrels G. Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics

[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2014, 42: 127-149.

[13] Vervoort J D, Kemp A I S. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust-mantle evolution[J]. Chemical Geology, 2016, 425: 65-75.

[14] Saylor J E, Sundell K E. Quantifying comparison of detrital zircon age distributions[J]. Geosphere, 2016, 12(4): 1205-1223.

[15] Reiners P W, Brandon M T. Using thermochronology to understand orogenic erosion[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2006, 34: 419-466.

[16] 王辉, 徐靖琦, 朱虹浩, 等. 珠江口盆地惠州北凹文昌组沉积特征及有效烃源岩展布[J]. 上海国土资源, 2024, 45(4): 161-165, 170.
Wang Hui, Xu Jingqi, Zhu Honghao, et al. Sedimentary characteristics and distribution of effective source rocks of Wenchang formation in Huizhou northern sag, the Pearl River Mouth Basin[J]. Shanghai Land & Resources, 2024, 45(4): 161-165, 170.

[17] 石创, 彭光荣, 龙祖烈, 等. 珠江口盆地恩平17洼深层烃源岩特征及有效烃源灶分布预测[J]. 地球科学, 2025, 50(12): 4604-4616.
Shi Chuang, Peng Guangrong, Long Zulie, et al. Characteristics of deep hydrocarbon source rocks and prediction of effective source kitchen distribution in Enping 17 sub-sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2025, 50(12): 4604-4616.

[18] 刘军, 颜晖, 柳保军, 等. 基于构造因素的小洼陷烃源潜力差异分析——以白云凹陷番禺29洼为例[J]. 海洋石油, 2025, 45(1): 8-12.
Liu Jun, Yan Hui, Liu Baojun, et al. Difference analysis of hydrocarbon source potential in small subsags based on structural factors: a case study of Panyu 29 sub-sag in Baiyun Sag[J]. Offshore Oil, 2025, 45(1): 8-12.

[19] 朱经飞. 开平凹陷古近系地震层序地层分析及其发育特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
Zhu Jingfei. The study of Palaeogene seismic sequence stratigraphy analysis and development characteristics in Kaiping Sag[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 张宇琦, 彭光荣, 姜福杰, 等. 全油气系统成藏理论在低勘探程度区的应用及其地质意义——以珠江口盆地开平凹陷为例[J/OL]. 地学前缘, 2025-01-09. https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.11.4.
Zhang Yuqi, Peng Guangrong, Jiang Fujie, et al. Applying whole petroleum system analysis in low exploration degree areas: a case study of the Kaiping Depression of the Pearl River Mouth Basin[J/OL]. Earth Science Frontiers, 2025-01-09. https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.11.4.

[23] 蔡嵩, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 106-118.
Cai Song, Peng Guangrong, Chen Zhaoming, et al. Paleogene tectonic evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 106-118.

[24] 高阳东, 彭光荣, 陈兆明, 等. 珠江口盆地开平凹陷油气地质新认识与勘探突破[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 1-13.
Gao Yangdong, Peng Guangrong, Chen Zhaoming, et al. New understanding and exploration breakthrough of petroleum geology in Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 1-13.

[25] 陈震. 东昆仑共和盆地南部三叠系砂岩物源、古流向特征及其大地构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
Chen Zhen. Provenance analysis of sandstone, character of paleocurrent direction and geotectonic significance of Triassic in south of Gonghe Basin in east Kunlun[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.

[26] 罗凯. 西藏白垩纪中期到古近纪早期日喀则弧前盆地物源区分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
Luo Kai. From Middle Cretaceous to Early Paleogene, the provenance analysis of Xigaze forearc basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.

[27] 侯松林, 史冬岩, 孙景贵. 大兴安岭北段二道坎银矿区泥鳅河组形成时代、物源区示踪: 碎屑锆石U-Pb定年、Hf同位素特征[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025-05-23. https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20240279.
Hou Songlin, Shi Dongyan, Sun Jinggui. Age and provenance tracing of the Niqiuhe Formation in the Erdaokan silver deposit, northern Great Khingan Range: evidence from detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope characteristics[J/OL]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025-05-23. https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20240279.

[28] 谢鸿森, 王平, 陈玺赟, 等. 碎屑锆石最大沉积年龄限定地层年代: 原理、方法与应用[J]. 地层学杂志, 2025, 49(1): 103-122.
Xie Hongsen, Wang Ping, Chen Xiyun, et al. Constraining stratigraphic ages using maximum depositional age of detrital zircon: principles, methods, and applications[J]. Journal of

Stratigraphy, 2025, 49(1): 103-122.

[29] 曾智伟. 南海北部珠江口盆地古近纪源-汇系统耦合研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
Zeng Zhiwei. Source-to-sink (S2S) system analysis of the Paleogene in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020.

[30] 王俊辉. 东营凹陷始新统风场—物源—盆地系统沉积动力学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
Wang Junhui. Sedimentary dynamics of a wind-source-basin system in the Eocene Dongying Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

[31] 王潇. 东昆仑东段阿拉克湖地区石炭系-下二叠统形成构造环境与物源分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.
Wang Xiao. Provenance and tectonic background of Carboniferous to Early Permian sedimentary rocks in the East Kunlun Orogen[D]. Xi'an: Xi'an University, 2023.

[32] 赵彦璞. 珠江流域新生代风化、侵蚀和物源示踪研究——基于水文地球化学和矿物热年代学的指示[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
Zhao Yanpu. Hydrogeochemistry and mineral thermochronology constraints on weathering, erosion and provenance in the Pearl River Basin since Cenozoic[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.

[33] 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 and Gas Field, 2016, 23(4): 414-418.

[34] 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.

[35] 吴龙. 青藏高原东北缘祁连山三叠系砂岩碎屑锆石U-Pb定年及其物源分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Wu Long. The detrital-zircon U-Pb dating and provenance analysis for the Triassic sandstone in Qilian Shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.

[36] 郑霖. 四川广元利州地区上三叠统须家河组碎屑组分特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
Zheng Lin. Characterization of detrital components of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Lizhou area, Guangyuan, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.

[37] 周玲, 陈秀玲, 李越, 等. 福建三都澳近岸表层沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. 应用海洋学学报, 2025, 44(2): 320-331.
Zhou Ling, Chen Xiuling, Li Yue, et al. Composition and provenance discrimination of rare earth elements in surface sediments of coastal Sandu'ao, Fujian Province[J]. Journal of Applied Oceanography, 2025, 44(2): 320-331.

[38] 王宁, 许锋, 王喆, 等. 上扬子地台北缘下寒武统牛蹄塘组页岩稀土元素特征及其地质意义[J]. 地质找矿论丛, 2024, 39(2): 232-239.
Wang Ning, Xu Feng, Wang Zhe, et al. REE characteristics of shale in upper Cambrian Niutitang Formation at North margin of Upper Yangtze platform and the geological significance[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2024, 39(2): 232-239.

[39] 蒋喆, 韩效忠, 胡航, 等. 内蒙古苏尼特左旗恩格日音铀矿床Th地球化学特征及其对沉积环境的指示[J]. 地质通报, 2024, 43(6): 926-937.
Jiang Zhe, Han Xiaozhong, Hu Hang, et al. Geochemical characteristics of Thorium and their sedimentary environment indication of Engeriyin uranium deposit in Sunid Left Banner, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(6): 926-937.

[40] 周月. 准噶尔盆地南缘侏罗系砂岩岩石地球化学特征对物源和古环境的约束[D]. 成都: 成都理工大学, 2022.
Zhou Yue. Constraints of petrogeochemical characteristics of Jurassic sandstone on provenance and Paleoenvironment in the southern margin of Junggar Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022.

[41] 朱森, 曹高社, 石小虎, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区下二叠统太原组和山西组的物源区转变: 中央古隆起消失的响应[J]. 地质学报, 2025, 99(7): 2251-2270.
Zhu Sen, Cao Gaoshe, Shi Xiaohu, et al. Provenance transformation of Lower Permian Taiyuan Formation and Shanxi Formation in Longdong area of Ordos Basin: response to disappearance of Central paleo-uplift[J]. Acta Geologica Sinica, 2025, 99(7): 2251-2270.

[42] 赵竺栩, 熊伟, 王忠蕾, 等. 渤海海峡表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 151-160.
Zhao Zhuxu, Xiong Wei, Wang Zhonglei, et al. Distribution and origination of rare earth elements in surface sediments of the Bohai Strait[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 151-160.

[43] 朱心怡, 黄湘通, 杨守业, 等. 中国东南沿海现代主要沉积体系重矿物组成特征与砂矿成矿潜力探讨[J]. 华东地质, 2026, 47(2): 221-237.
Zhu Xinyi, Huang Xiangtong, Yang Shouye, et al. Characteristics of heavy mineral composition in the modern sedimentary systems and the potential for placer mineralization

along southeast coast of China [J]. Resources Survey & Environment, 2026, 47(2): 221-237.

[44] 杨国军, 伍坤宇, 张博策, 等. 柴达木盆地西缘古近系源-汇系统U-Pb定年和重矿物分析[J]. 海相油气地质, 2024, 29(3): 269-279.
Yang Guojun, Wu Kunyu, Zhang Boce, et al. Application of U-Pb isotopic dating and heavy mineral assemblage to source-sink system analysis of the Paleogene in western margin of Qaidam Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2024, 29(3): 269-279.

[45] Waters C N, Morton A, Frei D. Interplay of southern, western, and northern sources during deposition of North Wales Carboniferous sandstones, determined from heavy minerals, mineral chemistry, and detrital zircon ages [J]. Geological Journal, 2021, 56(5): 2699-2719.

[46] 王文义, 程宏岗, 徐淑娟, 等. 东海盆地西湖凹陷中西部花港组物源方向判别与源区性质分析[J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 33-43.
Wang Wenyi, Cheng Honggang, Xu Shujuan, et al. Provenance indication and source characteristics of Huagang Formation in the central and western Xihu Sag of the East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 33-43.

[47] 张恩泽, 张立强, 严一鸣, 等. 库车坳陷东部下侏罗统阿合组重矿物特征及物源分析[J]. 中国科技论文, 2023, 18(9): 1021-1027, 1040.
Zhang Enze, Zhang Liqiang, Yan Yiming, et al. Heavy mineral characteristics and provenance analysis of Lower Jurassic Ahe Formation in eastern Kuqa Depression [J]. China Sciencepaper, 2023, 18(9): 1021-1027, 1040.

[48] Lan Zhongwu, Zhang Shujing, Li Xianhua, et al. Towards resolving the 'jigsaw puzzle' and age-fossil inconsistency within East Gondwana[J]. Precambrian Research, 2020, 345: 105775.

[49] Chen Nan, Li Dunpeng, Huang Yanna, et al. Zircon U-Pb dating, geochemistry, Lu-Hf isotope characteristics, and geological significance of volcanic rocks in Zhenghe Fozi Mountain National Geopark, Fujian, China[J]. Minerals, 2024, 14(6): 616.

[50] Millett J M, Jolley D W, Hole M J, et al. High-precision U-Pb zircon dating of explosive volcanism in an early bi-modal volcano-sedimentary sequence from the Isle of Mull, North Atlantic Igneous Province[J]. Lithos, 2024, 482/483: 107729.

[51] Morag N, Avigad D, Gerdes A, et al. Detrital zircon and rutile U-Pb, Hf isotopes and heavy mineral assemblages of Israeli Miocene sands: fingerprinting the Arabian provenance of the Levant[J]. Basin Research, 2021, 33(3): 1967-1984.

[52] Saki S, Shabani A A T, Zhai Mingguo, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages, geochemical, and Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Middle Eocene calc-alkaline andesitic rocks: implications for continental arc magmatism and slab break-off in NE Iran[J]. Journal of Earth Science, 2024, 35(6): 1832-1848.

[53] Hao Shefeng, Cheng Yu, Gao Bingfei, et al. Provenance changes of the Yangtze River Delta sediments since ~ 3.6 Ma: evidence from heavy mineral assemblages and detrital zircon U-Pb ages spectra[J]. Quaternary International, 2023, 671: 33-43.

[54] Zou Hao, Li Hongkui, Li Zhongquan, et al. Integrated detrital rutile and detrital zircon ages: a new perspective on the tectonic evolution of South China[J]. National Science Review, 2024, 11(12): nwae356.

[55] 游龙彪, 张建国, 吴炳伟, 等. 辽河坳陷中生界物源分析: 基于碎屑岩锆石U-Pb测年[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(28): 11898-11911.
You Longbiao, Zhang Jianguo, Wu Bingwei, et al. Analysis of Mesozoic provenance in Liaohe Depression: zircon U-Pb dating of detrital rocks[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(28): 11898-11911.

[56] 张宗伟. 陈官庄地区沙四下亚段地震沉积学研究及其应用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
Zhang Zongwei. Research and application of seismic sedimentology of Lower Es4 in the Chenguanzhuang area [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.

[57] 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.

(编辑 刘格云)