

多方法约束的复杂物源示踪 ——以渤海湾盆地东营凹陷古近系孔店组-沙河街组四段下亚段为例

张倩^{1,2}

(1. 胜利石油管理局 博士后科研工作站, 山东 东营 257001; 2. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要:物源分析对于追溯源-汇过程、明确有利储层展布规律具有重要意义。渤海湾盆地东营凹陷孔店组-沙河街组四段(沙四)下亚段是盆地裂陷初期充填的一套红色沉积,受多个物源共同控制,但其物源方向仍存在争议。为明确该时期物源发育特征,系统开展了砂岩碎屑组分统计、重矿物分析、泥岩全岩主量和微量元素地球化学测试以及碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄研究。结果显示:①东营凹陷孔店组-沙四下亚段砂岩主要为岩屑质长石砂岩,成分成熟度较低,岩屑成分以变质岩和岩浆岩为主。②重矿物类型主要有锆石、石榴石、钛铁矿和磷灰石等。③泥岩全岩主量元素具有高硅、高铝和富碱的特征,微量元素中 Li、Cr 和 Cs 元素相对富集,稀土元素表现为轻稀土富集和 Eu 元素负异常的特点。④碎屑锆石 U-Pb 年龄范围为 2 817 ~ 75 Ma,呈现多峰特征,主要年龄区间有 175 ~ 130, 315 ~ 250, 1 900 ~ 1 855 Ma 和大约 2 500 Ma。研究表明,东营凹陷孔店组-沙四下亚段沉积时期具有强烈构造活动背景下的复杂母岩供源条件,母岩主要有太古宇中-酸性岩浆岩和变质岩、古元古界中-基性岩浆岩、下古生界碳酸盐岩以及中生界中-基性岩浆岩,中生界和古生界碎屑岩的再旋回对孔店组-沙四下亚段物源也具有重要贡献。结合区域构造背景和凸起区母岩性质,认为研究区在孔店组-沙四下亚段沉积时期以发育近源沉积体系为特征,主要有滨县-陈家庄体系、广饶体系和鲁西-青城体系等 3 大物源体系。

关键词:重矿物;元素地球化学;碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄;复杂物源体系;孔店组-沙四下亚段;东营凹陷;渤海湾盆地
中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Multi-method-constrained tracing of complex provenance: A case study of the sequence from the Paleogene Kongdian Formation to the lower submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag

ZHANG Qian^{1,2}

(1. Postdoctoral Scientific Research Working Station of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Provenance study holds great significance for tracing the source-to-sink process and clarifying the distribution patterns of favorable reservoirs. The sequence from the Kongdian Formation to the lower submember of the 4th member of the Shahejie Formation (also referred to as the Sequence) in the Dongying Sag represents a suite of red deposits filled in the initial rifting stage of the Bohai Bay Basin under the joint control of multiple provenance. However, there is still controversy regarding their directions. To reveal its provenance characteristics at this stage, we systematically analyze the detrital composition and heavy minerals of sandstones, as well as conduct geochemical tests of major and trace elements of mudstones and detrital zircon U-Pb dating. The results indicate that the sandstones in the Sequence primarily consist of lithic feldspar sandstones, exhibiting low compositional maturity with lithic fragments dominated by metamorphic and igneous rocks. The main heavy minerals in the sandstones include zircon, garnet, ilmenite, and apatite. The whole-rock major element analysis of mudstones in the Sequence reveals high silicon and aluminum contents and rich alkali. The trace element data show that the mudstones are relatively enriched in Li, Cr, and Cs. Regarding rare earth elements (REEs), the mudstones feature enrichment of light REEs (LREEs) and negative Eu

收稿日期:2024-09-23;修回日期:2024-11-10。

作者简介:张倩(1992—),女,博士、助理研究员,油气储层沉积学。E-mail: zq_191class@163.com。

基金项目:胜利石油管理局博士后科研课题(YKB2202)。

anomalies. The U-Pb isotope ages of detrital zircons in the Sequence range from 2 817 Ma to 75 Ma, concentrated in 175 ~ 130 Ma, 315 ~ 250 Ma, 1 900 ~ 1 855 Ma, and around 2 500 Ma. The Sequence is deposited under complex provenance conditions against the background of intense tectonic activities, with primary parental rocks encompassing the Archean intermediate-acid igneous rocks and metamorphic rocks, the Paleoproterozoic intermediate-mafic igneous rocks, the Lower Paleozoic carbonate rocks, and the Mesozoic intermediate-mafic igneous rocks, along with significant contribution from recycled clastics of the Mesozoic and Paleozoic. In all, it is indicative of proximal depositional systems during the Sequence formation, mainly consisting of Binxian-Chenjiazhuang, Guangrao, and Luxi-Qingcheng systems.

Key words: heavy mineral, elemental geochemistry, detrital zircon U-Pb age, complex provenance system, sequence from the Kongdian Formation to the lower submember of the 4th member of the Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Sea Basin

引用格式:张倩. 多方法约束的复杂物源示踪——以渤海湾盆地东营凹陷古近系孔店组-沙河街组四段下亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 599–616. DOI: 10. 11743/ogg20250218.

ZHANG Qian. Multi-method-constrained tracing of complex provenance: A case study of the sequence from the Paleogene Kongdian Formation to the lower submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 599–616. DOI: 10. 11743/ogg20250218.

渤海湾盆地东营凹陷孔店组-沙河街组四段(沙四)下亚段形成于断陷盆地裂陷初期,是干旱炎热气候背景下发育的一套以红色沉积为特色、局部夹灰色沉积和膏盐沉积的河湖相地层,统称为“红层”。近年来的勘探实践表明,该层系具有较大的勘探潜力,是东营凹陷重要的勘探方向和储量接替层系。尽管干热气候条件下发育的红层本身并不具备生油能力,但却有一定的储集能力。厘清物源体系对于追溯源-汇过程、明确有利储层展布规律以及扩大储量规模具有重要意义。

前人对东营凹陷物源体系开展的工作主要集中在孔店组-沙四下亚段的上部层系,研究认为,古近纪早期东营凹陷曾受多个物源共同控制,包括无棣凸起、滨县凸起、陈家庄凸起、青城凸起、鲁西隆起、广饶凸起和鲁东造山带等^[1-11]。但是不同学者的观点也存在一定差异,主要表现在青城凸起是否供源、是否存在无棣远物源体系以及不同凸起区对沉积区的贡献等方面^[5-8]。尽管前人针对孔店组-沙四下亚段物源特征的观点尚不统一,但大多数研究人员均认为该时期东营凹陷受多物源控制^[7,12]。

碎屑岩物源分析的常用方法主要有岩石学、沉积学、重矿物和轻矿物组合、单矿物分析、元素地球化学以及碎屑矿物同位素测年等。另外,数学和统计学方法也越来越多地被应用于定量物源分析中^[13-16]。单一物源分析方法往往只能反应源区的部分信息,如重矿物分析不能反映碳酸盐岩母岩的贡献;元素地球化学方法容易受到其他地质因素的影响,从而造成误判;碎

屑锆石 U-Pb 同位素定年方法因难以剔除再旋回锆石的干扰,只能恢复最终的母岩年龄。因此,采用多方法进行综合分析逐渐成为物源研究的主流手段,特别是对于具有复杂物源背景的情况,综合考虑岩石学、元素地球化学及碎屑锆石年代学等因素已被证明是准确约束古物源的有效方法^[17-20]。

本研究在全面调研前人研究成果和相关分析方法的基础上,针对东营凹陷孔店组-沙四下亚段物源体系认识尚不统一的情况,系统开展了砂岩碎屑组分分析、重矿物组合及特征指数分析、泥岩主量和微量元素地球化学分析和碎屑锆石 U-Pb 同位素定年分析。为了落实是否存在无棣远物源体系,还对惠民凹陷孔店组—沙四下亚段的部分岩心样品进行了相关研究,以期为区域古地理重建和有利储层预测提供可靠依据。

1 区域地质概况

东营凹陷位于渤海湾盆地东南部,是一个具有“北断南超”特征的不对称箕状断陷盆地,面积约为 5 700 km²(图 1a)。凹陷内发育青城凸起、林樊家凸起、滨县凸起、陈家庄凸起、广饶凸起和青坨子凸起 6 个凸起,博兴洼陷、利津洼陷、牛庄洼陷和民丰洼陷 4 个洼陷(图 1b)。东营凹陷在构造上位于华北板块东部,先后经历了太古宙—中元古代的基底形成、形变和固结阶段;新元古代及古生代的稳定盖层发育阶段以及中生代和新生代的裂陷盆地发育阶段^[21]。在山东省地层区划方案中,东营凹陷属于华北平原地层分区,

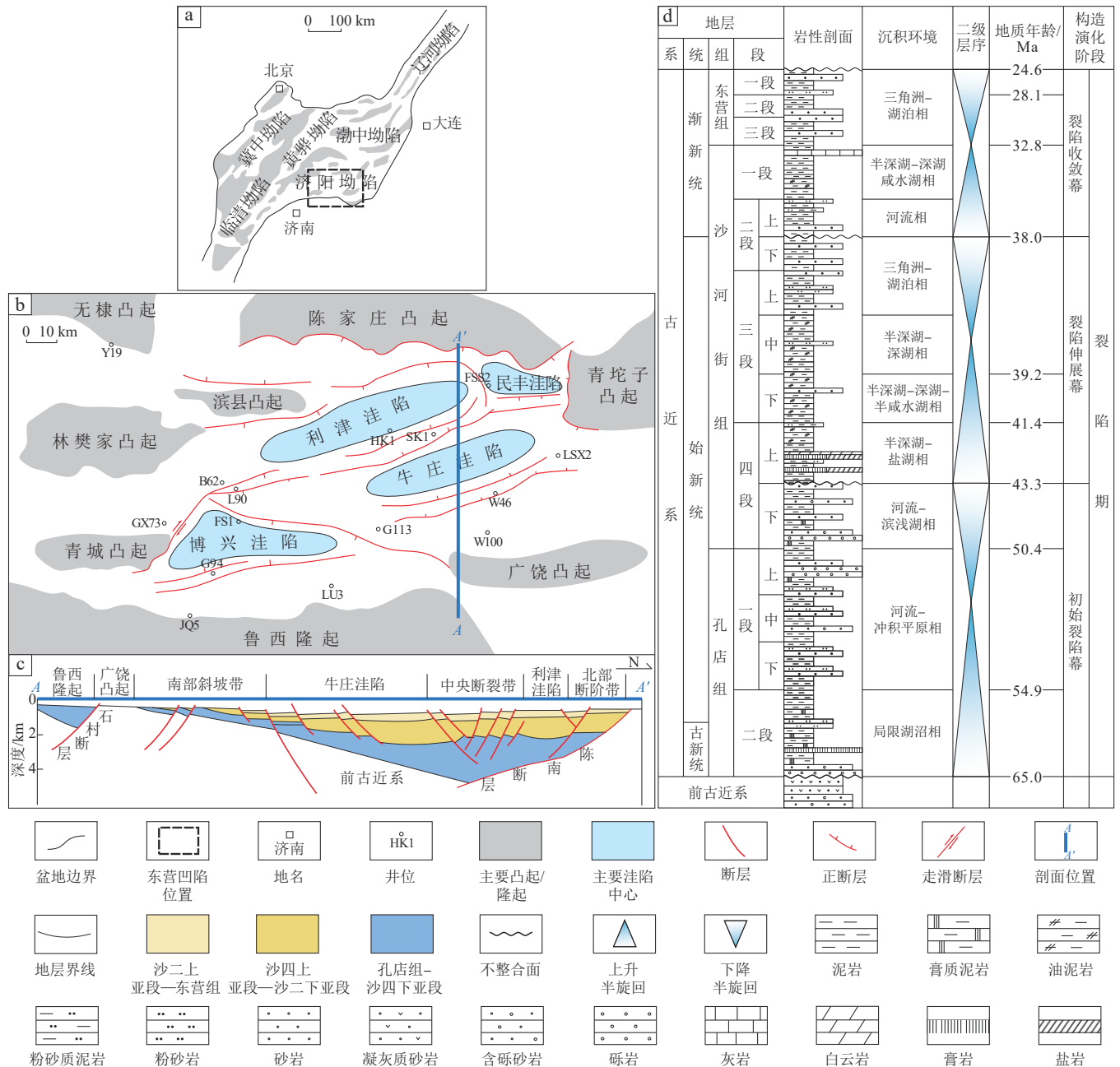


图1 渤海湾盆地东营凹陷构造简图及古近系综合柱状图

Fig. 1 Structural sketch of the Dongying Sag in the Bohai Bay Basin and the composite stratigraphic column of the Paleogene strata in the sag
 a. 渤海湾盆地主要构造单元平面分布(据Liu等^[24]修改); b, c. 分别为东营凹陷主要构造单元平面图与剖面图(据吴靖等^[25]修改); d. 东营凹陷古近系综合柱状图(据宋国奇等^[23]修改,地质年龄来自Shi等^[26])

全区被第四系覆盖。根据钻孔资料,前寒武系主要由花岗质片麻岩和片岩组成;下古生界寒武系和奥陶系主要为海相碳酸盐岩沉积;上古生界石炭系为滨-浅海和海-陆交互的含煤沉积,二叠系为陆相碎屑岩和黏土岩沉积。自中生代以来,受印支运动的影响,全区处于抬升剥蚀状态,导致三叠系沉积几乎完全缺失;侏罗系-新生界主要为断陷盆地的河湖相沉积^[22]。新生界古近系是油气勘探的主要目的层,自下而上依次

发育孔店组、沙河街组和东营组(图1c)。以沙四上亚段与下亚段、沙河街组二段(沙二)上亚段与下亚段为界,可将古近系划分为孔店组-沙四下亚段、沙四上亚段-沙二下亚段和沙二上亚段-东营组3个二级层序^[23]。

古近系孔店组-沙四下亚段因广泛发育红色沉积而被统称为“红层”,主要是在干旱为主导、周期性湿润的气候背景下形成的陆相河湖沉积。受原型盆地、古

2.3 砂岩岩屑组成

岩屑是指示砂岩母岩的直接证据之一。研究区砂岩样品的平均岩屑含量为25.48%,其中岩浆岩岩屑的含量为1.18%~64.23%,平均值为25.68%;变质岩岩屑的含量为29.94%~94.62%,平均值为60.26%;沉积岩岩屑的含量为0~48.08%,平均值为14.06%。从砂岩岩屑组分平面分布来看,3大类岩屑在各个区域均占有一定比例,这反映了研究区的物源体系较为复杂(图3)。

3 重矿物特征

3.1 重矿物组合

重矿物是沉积物源示踪中最有效和最常用的指标之一,尽管它们在沉积物中通常只占1%,但其种类和丰度与源岩密切相关^[15-16,28-30]。对东营凹陷及其邻区孔店组-沙四下亚段的48口取心井的131个砂岩样品进行重矿物分析,结果显示重矿物类型主要有金红石、锆石、电气石、绿帘石、独居石、榍石、石榴石、辉石、磁铁矿、钛铁矿、白钛石、赤褐铁矿、锐钛矿、黄铁矿、磷灰石、重晶石和菱铁矿等。剔除自生矿物和含量极低的重矿物后,对剩余的11种重矿物进行百分化归一处理,分析得出研究区砂岩主要包含7种重矿物组合(图4):富锆石/磷灰石组合(Z/A)、富石榴石组合(G)、富锆石和石榴石组合(Z+G)、富锆石/磷灰石含钛铁矿/石榴石组合(Z/A-T/G)、富石榴石含钛铁矿/锆石组合(G-T/Z)、富钛铁矿含石榴石/锆石组合(T-G/Z)以及富钛铁矿和石榴石组合(T+G)。此外,个别样品中磁铁矿异常富集(图4h),在区域内零星分布,经过薄片观察分析,认为这主要与水动力条件有关,因此不作为物源分析的主要因素。

3.2 重矿物特征指数

重矿物特征指数可以更好地揭示重矿物组合数据中蕴含的潜在信息,常用的重矿物指数包括ZTR, ATi, GZi, RuZi和MZi等^[15-16,31],结合砂岩重矿物特征,选择ZTR, ATi, GZi和RuZi指数进行分析。

ZTR指数为锆石、电气石和金红石在透明重矿物中的质量百分比,由于这3种矿物具有较高的机械和化学稳定性,因此高ZTR指数通常指示较高的矿物成熟度和较远的搬运距离^[32]。研究区砂岩样品的ZTR指数变化范围较大,介于7.39~95.41,平均值为

36.49。在东营凹陷,ZTR指数从盆缘向盆内逐渐增大(图5):滨县凸起—陈家庄凸起南部的重矿物主要为Z/A组合,ZTR值较大,变化范围为40.66~95.41,平均值为69.07,自北向南逐渐增大;广饶凸起周缘区域的重矿物主要为G和T+G组合,ZTR指数向北由12.21逐渐增大至41.45,平均值为23.84;青城凸起和鲁西隆起周缘样品的ZTR值普遍偏小,为7.39~26.11,平均值为13.74,同样由凸起边缘向盆地内部增大。惠民凹陷的重矿物类型非常复杂,不同区域的ZTR值差异较大(图5),Y10井、Y12井和Y19井的平均ZTR值为26.65,PS3井为25.90,MS1井则高达84.90,反映源区母岩类型的快速变化。从重矿物类型和ZTR指数变化规律来看,无棣凸起直接向东营凹陷供源的可能性较小。

ATi指数为磷灰石在磷灰石和电气石组合中的质量百分比,代表母岩为中-酸性岩浆岩的可能性;GZi指数为石榴子石在石榴子石和锆石组合中的质量百分比,反映角闪岩和麻粒岩等变质岩的供源情况;RuZi指数为金红石在金红石和锆石组合中的质量百分比,反映富金红石母岩的供源情况^[33-35]。研究区砂岩样品的ATi, GZi和RuZi指数变化范围较大,分别介于0~100, 0~94.49和0~52.38。ATi-GZi和RuZi-GZi交会图直观地展示了不同类型的重矿物组合之间的异同:Z/A组合(图6实线范围)具有高ATi(59.14~100)、低GZi(0~24.36)和低-中RuZi(18.05~43.62)的特征;G组合(图6单点长画线范围)与Z/A组合完全不重叠,其特征是高GZi(75.68~100)和低RuZi(0~34.62),ATi指数变化范围较大;Z+G组合(图6虚线范围)介于Z/A组合与G组合之间,具有中-高ATi(47.37~96.67)、中GZi(46.63~60.69)和低RuZi(0~23.31)的特征。其余4个重矿物组合均处于以上3种组合的过渡区域,其中Z/A-T/G组合具有中-高ATi(47.71~100)和低GZi(0~37.6)特征,而G-T/Z, T-G/Z和T+G组合均表现为高GZi特点。

4 元素地球化学特征

4.1 主量元素

东营凹陷孔店组-沙四下亚段泥岩主量元素化合物以SiO₂(含量为32.109%~71.015%,平均值为55.859%)和Al₂O₃(含量为8.699%~34.952%,平均值为19.664%)为主,其次为TF_{e2}O₃(含量为3.525%~17.871%,平均值为7.816%),K₂O(含量为1.563%~

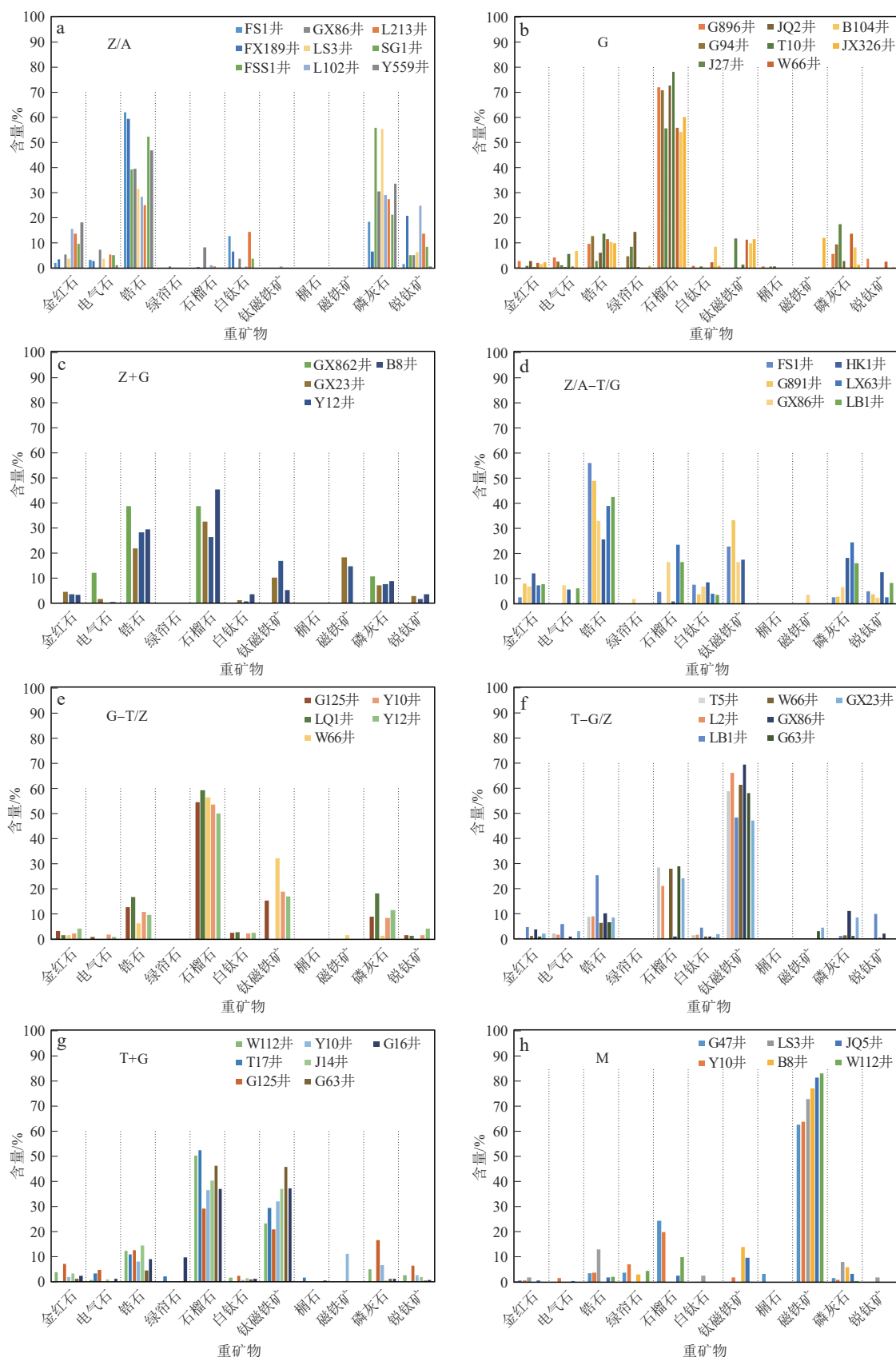


图4 东营凹陷及邻区孔店组-沙四下亚段不同重矿物组合中各重矿物含量柱状图

Fig. 4 Histograms for heavy mineral contents in heavy mineral assemblages in the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation in the Dongying Sag and its adjacent areas

a. 富锆石/磷灰石组合(Z/A); b. 富石榴石组合(G); c. 富锆石和石榴石组合(Z+G); d. 富锆石/磷灰石含钛磁铁矿/石榴石组合(Z/A-T/G); e. 富石榴石含钛磁铁矿/锆石组合(G-T/Z); f. 富钛磁铁矿含石榴石/锆石组合(T-G/Z); g. 富钛磁铁矿和石榴石组合(T+G); h. 富磁铁矿组合(M)

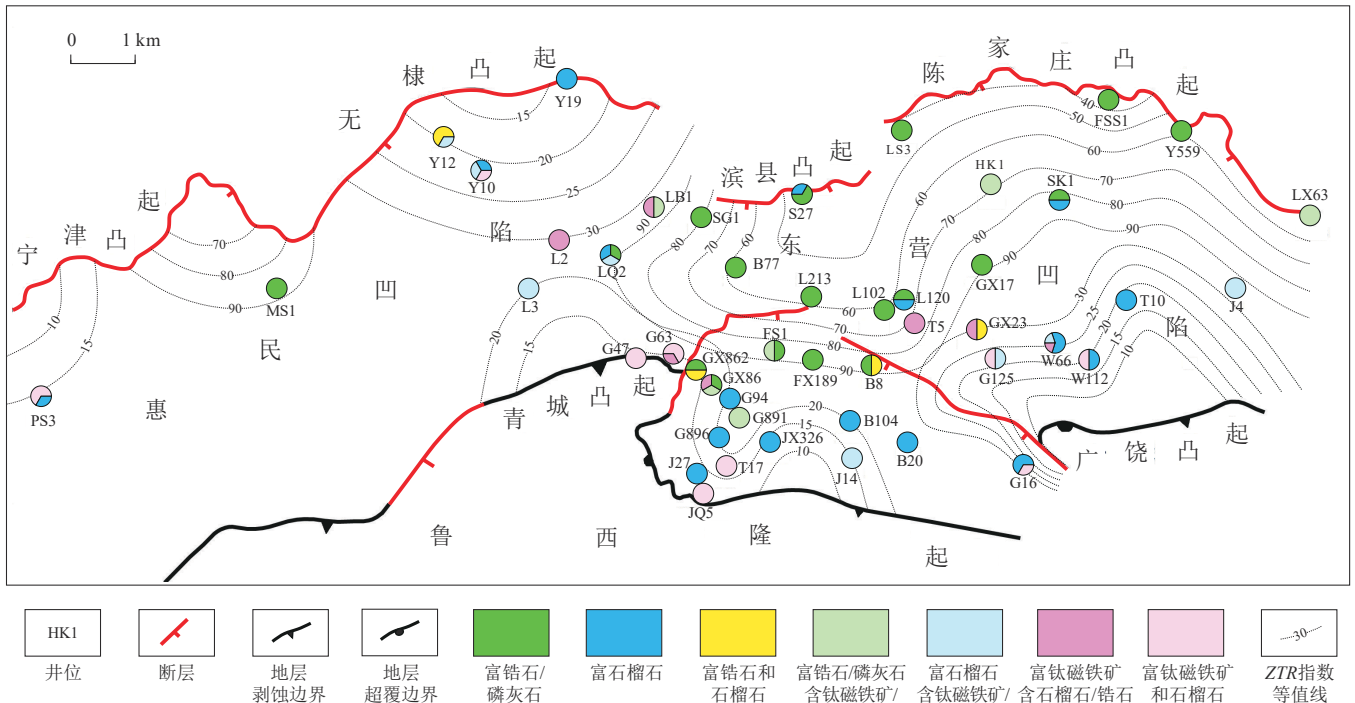
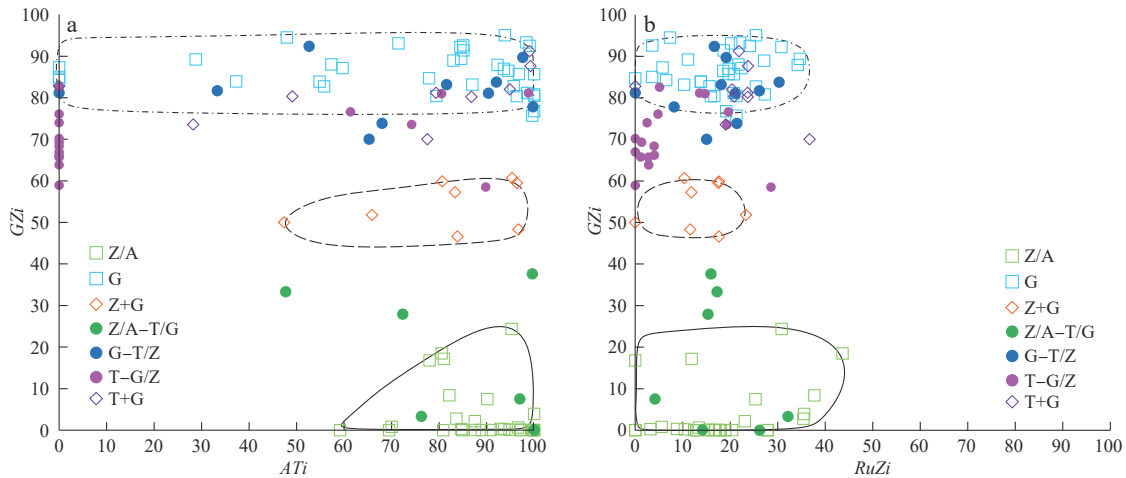


图5 东营凹陷及邻区孔店组-沙四下亚段重矿物组合分布及ZTR指数等值线图

Fig. 5 Contour map showing the zircon-tourmaline-rutile (ZTR) indices of heavy mineral assemblages in the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation in the Dongying Sag and its adjacent areas

图6 东营凹陷及邻区孔店组-沙四下亚段重矿物特征指数 ATi - GZi (a)和 $RuZi$ - GZi (b)交会图Fig. 6 Cross plots of heavy mineral indices ATi vs. GZi (a) and $RuZi$ vs. GZi (b) of the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation in the Dongying Sag and its adjacent areas

Z/A. 富锆石/磷灰石组合; G. 富石榴石组合; Z+G. 富锆石和石榴石组合; Z/A-T/G. 富锆石/磷灰石含钛铁矿/石榴石组合; G-T/Z. 富石榴石含钛铁矿/锆石组合; T-G/Z. 富钛铁矿含石榴石/锆石组合; T+G. 富钛铁矿和石榴石组合

7.777%, 平均值为4.205%), MgO (含量为1.285%~6.579%, 平均值为3.230%), Na_2O (含量为0.748%~3.609%, 平均值为1.775%) 和 TiO_2 (含量为0.446%~1.908%, 平均值为0.918%)。 CaO 含量变化较大(含量为0.458%~45.986%, 平均值为6.249%), P_2O_5 和 MnO 含量较低, 均低于1%。 测试结果表明, 泥岩样品

具有高硅、高铝和富碱的特征。

4.2 微量元素

微量元素如 Th , Sc 和 Co 等, 在天然水体中很难被分解, 更不易受风化、搬运以及沉积作用的影响, 因此能够很好地反映物源区的地球化学性质, 已经被广泛

应用于沉积物源及构造背景研究中^[18,28,36]。在研究区的泥岩样品中,含量超过1 $\mu\text{g/g}$ 的微量元素(不包括稀土元素)主要有Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Cs, Ba, Pb, Th, U, Nb, Zr和Hf。与上陆壳微量元素含量相比,绝大多数井的泥岩样品相对富集Li, Cr和Cs元素,相对亏损Cu, Mo和Ba元素,大多数井的泥岩样品与上陆壳微量元素含量基本一致(图7)。

4.3 稀土元素

稀土元素在水体中溶解度低,滞留时间短,受风化、剥蚀、搬运和固结成岩等地质作用的影响较小,具有稳定的地球化学性质,是物源判识的可靠指标^[28,36,38-39]。研究区泥岩样品的稀土元素总量(ΣREE)为 $(82.98 \sim 397.29) \times 10^{-6}$,平均含量为 219.19×10^{-6} ,绝大多数样品的稀土元素含量高于大陆上地壳(含量 146.37×10^{-6})^[37]和北美页岩(含量 167.41×10^{-6})^[40]。轻稀土元素(LREE)含量为 $(74.08 \sim 378.26) \times 10^{-6}$,平均含量为 199.83×10^{-6} ;重稀土元素(HREE)含量为 $(8.90 \sim 24.83) \times 10^{-6}$,平均含量为 19.37×10^{-6} ; $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 含量比值为8.32 ~ 19.88,平均值为10.24。由于本研究的主要目的为物源分析,因此采用能够代表地球原始物质的球粒陨石^[41]作为标准进行稀土元素含量标准化(用下标N表示)。研究区泥岩的稀土元素标准化曲线明显右倾,显示出轻稀土富集 $(\text{La}/\text{Yb})_N=8.57 \sim 27.77$ (平均值为11.29)和重稀土亏

损 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.44 \sim 2.61$ (平均值为1.98)的特点。Eu元素含量呈“V”型,指示Eu含量负异常, δEu 为0.52 ~ 1.00(平均值为0.70);Ce元素未见明显富集或亏损(图8),符合上地壳稀土元素的配分特点,与青坨子凸起太古宇相似^[42]。

5 碎屑锆石U-Pb年龄分布

碎屑锆石的U-Pb年代学分析能够为沉积物源研究提供关键信息,近年来已经在不同地区和层位中得到广泛应用^[17,43-46]。物源分析主要关注整个样品中锆石的年龄分布,通常需要获取碎屑锆石的U-Pb同位素年龄图谱,并与已知年龄的基岩进行对比分析,以确定源区。或者通过对比盆地流域内一系列样品的年龄图谱,探讨源区的构造演化和地貌演变历史等^[44]。对东营凹陷10口井的10个砂岩样品(井位位置见图1b)进行碎屑锆石U-Pb同位素年代分布特征分析,去除了谐和度小于90%的锆石测年点,最终获得了较为准确的谐和和锆石U-Pb同位素年龄值及相关微量元素含量。按照通常做法,年龄小于1 000 Ma的锆石使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值,而年龄大于1 000 Ma的锆石使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值^[47]。碎屑锆石Th/U元素含量比值小于0.4的样品占72.14%(图9),表明锆石主要为岩浆成因。

研究区砂岩样品的谐和和锆石U-Pb同位素年龄范围为2 817 ~ 75 Ma,呈现多峰特征,主要年龄区间包括侏罗纪—白垩纪(202 ~ 66 Ma)、石炭纪—二叠纪(359 ~ 252 Ma)、古元古代(2 500 ~ 1 600 Ma)和新太古代(2 800 ~ 2 500 Ma)。为了充分揭示各样品之间的差异

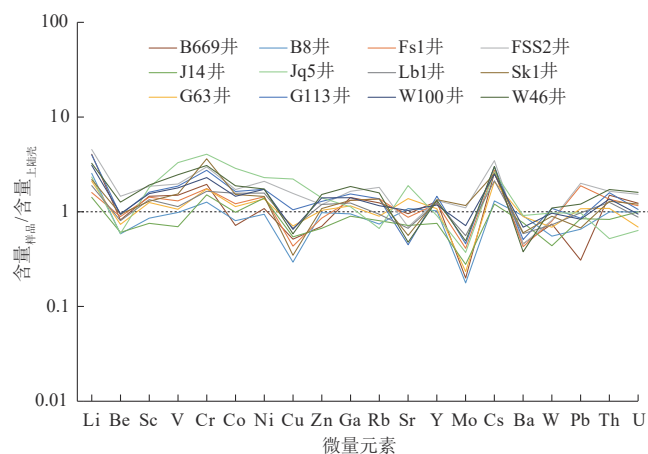


图7 东营凹陷孔店组-沙四下亚段泥岩微量元素含量上陆壳(UCC)标准化蛛网图(上陆壳标准数据来自Taylor和McLennan^[37])

Fig. 7 Upper continental crust (UCC)-normalized spider diagram of trace elements of mudstones in the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag (UCC data from reference [37])

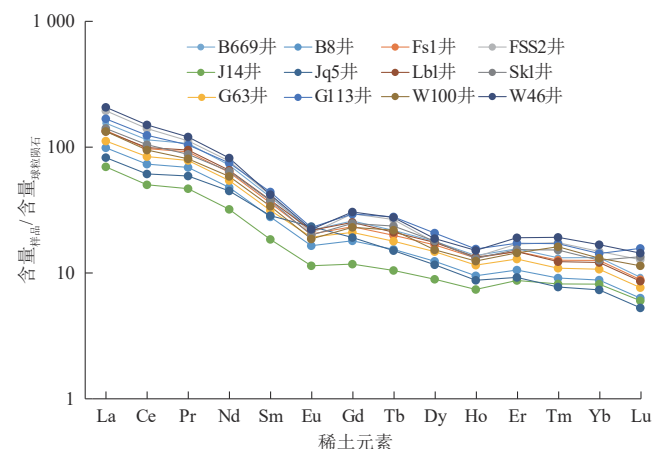


图8 东营凹陷孔店组-沙四下亚段泥岩稀土元素配分模式
Fig. 8 REE distribution patterns of mudstones in the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag

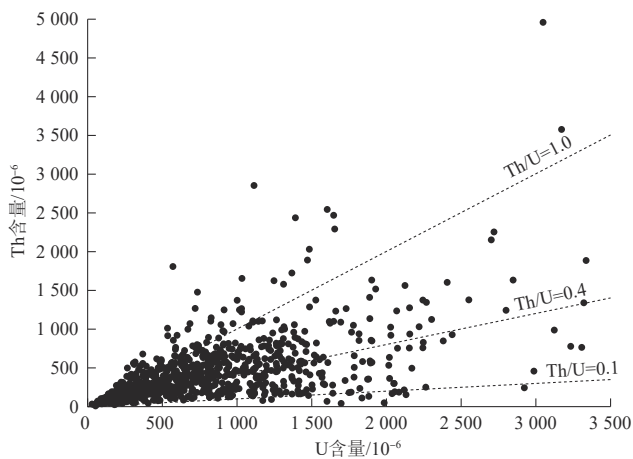


图9 东营凹陷孔店组-沙四下亚段碎屑锆石Th/U值分布特征
Fig. 9 Diagram showing the distribution of Th/U ratios of detrital zircons in the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag

性,采用核密度估计图(KDE)对10件样品的U-Pb年龄数据进行了可视化分析,数据分析和成图利用IsoplotR软件^[48]完成。不同年代的锆石对各个样品的贡献存在明显差异,KDE图显示(图10):中生代锆石年龄主要有约130 Ma(早白垩世)和约170 Ma(中侏罗世)2个峰值,前者在B62井、L90井、GX73井和JQ5井的样品中占比较高,后者则主要出现在L90井、FS1井、LU3井、GX73井和G94井的样品中;晚古生代锆石年龄主要有约250 Ma(晚二叠世)和约300 Ma(晚石炭世)2个峰值,在几乎所有样品中都占有较高比例;早古生代锆石总体数量较少,仅在B62井、W100井、LU3井、GX73井和JQ5井中少量存在,年龄峰值为约440 Ma和约470 Ma(奥陶纪);古元古代锆石在B62井的年龄峰值为约1900 Ma,在W100井和G113井的年龄峰值为约1860 Ma,在其他样品中占比较低且年龄分布较为分散;新太古代锆石的峰值年龄主要为约2520 Ma,在B62井、L90井、FS1井和Y19井中占有一定比例。

由于研究区的物源体系较为复杂且样品量较多,仅通过视觉对比难以得出可靠的解释,因此开展了基于年龄谱的相似性/差异性量化分析(相似度系数)、基于非参数性假设检验的相似性/差异性量化分析(Kuiper检验)和基于多维定标(MDS)的相似性/差异性量化分析。数据分析和成图利用DZstats和DZmds软件^[49-50]完成。相似度系数主要用于衡量样品年龄谱中是否有重叠的组分,或者各年龄组分比例是否相似;Kuiper检验用于验证“2个样品具有相同的年龄分布”的假设是否成立,即其年龄图谱的差异是否在预估的变化范围内;多维定标法则是基于Kuiper检验的V

值,将分析结果以点的形式投射在多维空间中,表示多个样本之间的相对差异^[51]。本研究应用三维定标法(3D-MDS)进行分析,在三维定标图中,样品被分为三组(图11c)。在以FS1井为顶点的“角”中,FS1井、B62井和L90井样品的相似度系数分别为0.91,0.90和0.89,V值分别为0.19,0.19和0.14。在以LU3井为顶点的“角”中,LU3井、W100井和G113井样品的相似度系数分别为0.92,0.93和0.86,V值分别为0.25,0.15和0.25。在以GX73井为顶点的“四面体”中,GX73井、G94井、JQ5井和Y19井样品的相似度系数分别为0.96,0.88,0.90,0.89,0.88和0.81,V值分别为0.17,0.19,0.19,0.22,0.25和0.31。另外,L90井和GX73井也连接在一起,表明二者的年龄图谱也非常相似,相似度系数和V值分别为0.92和0.14。

6 讨论

6.1 物源区构造背景及母岩性质

砂岩碎屑成分可以反映其物源区的构造属性。Dickinson等人建立了砂岩碎屑矿物成分与不同成因类型的物源区地块之间的系统关系^[52-54],这一方法被广泛应用于沉积盆地的物源分析研究中^[18,31,55-56]。Q-F-L(Q,F,L分别代表石英、长石和岩屑含量,%)含量三角图显示,孔店组-沙四下亚段物源区主要为切割岛弧,其次为再旋回造山带(图12a)。泥岩中稳定微量元素也能够指示物源区的构造环境,绝大多数样品在Th-Co-Zr/10判别图版中落在活动大陆边缘和大陆岛弧范围内(图12b),在La-Th-Sc判别图版中则主要集中在大陆岛弧区域(图12c),La/Th-Hf判别图版也揭示了同样的物源性质,即酸性岛弧物源占绝对优势(图12d)。

重矿物种类及组合是母岩性质的良好示踪剂。在研究区砂岩样品中,最普遍的重矿物主要有锆石、磷灰石、石榴石和钛铁矿等。其中,锆石和磷灰石常见于中-酸性岩浆岩,石榴石可用于指示高级变质岩,钛铁矿则常出现于中-基性岩浆岩^[58]。根据7种重矿物组合的重矿物类型,结合ATi、GZi和RuZi指数特征,可推测Z/A和Z/A-T/G组合的母岩主要为中-酸性岩浆岩;G和G-T/Z组合的母岩主要为高级变质岩;T-G/Z组合的母岩以中-基性岩浆岩为主,同时含有高级变质岩和中-酸性岩浆岩;Z+G和T+G组合具有混合母岩特征。进一步利用元素地球化学方法来判识母岩性质:TiO₂-SiO₂判别图版反映母岩以岩浆岩为主,沉积岩也有少量贡献(图13a);TiO₂-Al₂O₃判别图版表明母岩具有中-酸性岩浆岩的性

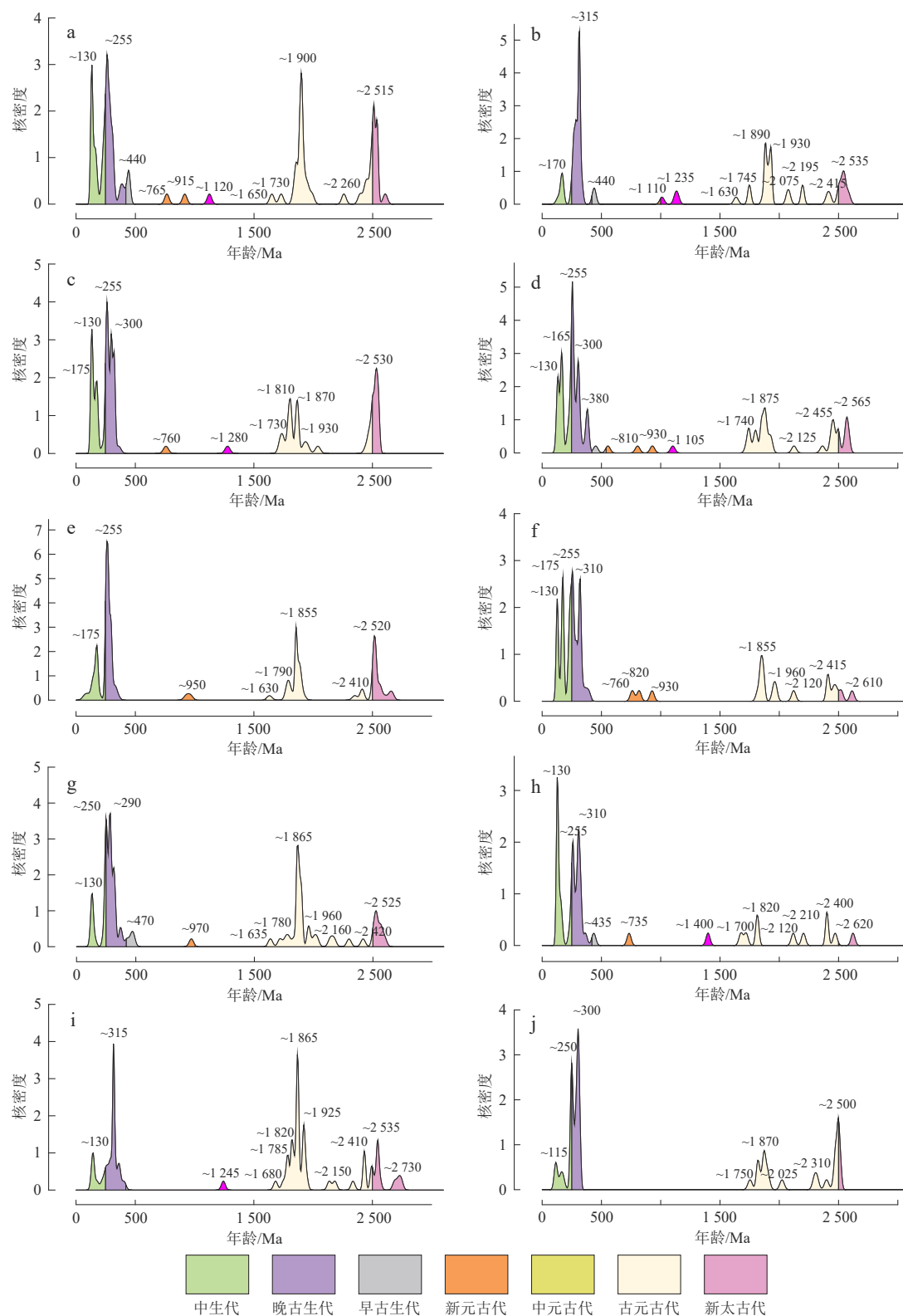


图10 东营凹陷孔店组-沙四下亚段碎屑锆石U-Pb同位素年龄核密度概率估计(KDE)

Fig. 10 Kernel density estimates (KDE) for the detrital zircon U-Pb age of the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag

a. B62井; b. LU3井; c. L90井; d. GX73井; e. FS1井; f. G94井; g. W100井; h. JQ5井; i. G113井; j. Y19井

质(图13b);从主量元素F1-F2判别图版上可以看出,中性和酸性岩浆岩为主要源岩,其次是沉积岩(图13c);稀

土元素REE-La/Yb判别图版进一步说明,研究区碎屑岩主要来源于花岗岩和沉积岩/钙质泥岩(图13d)。

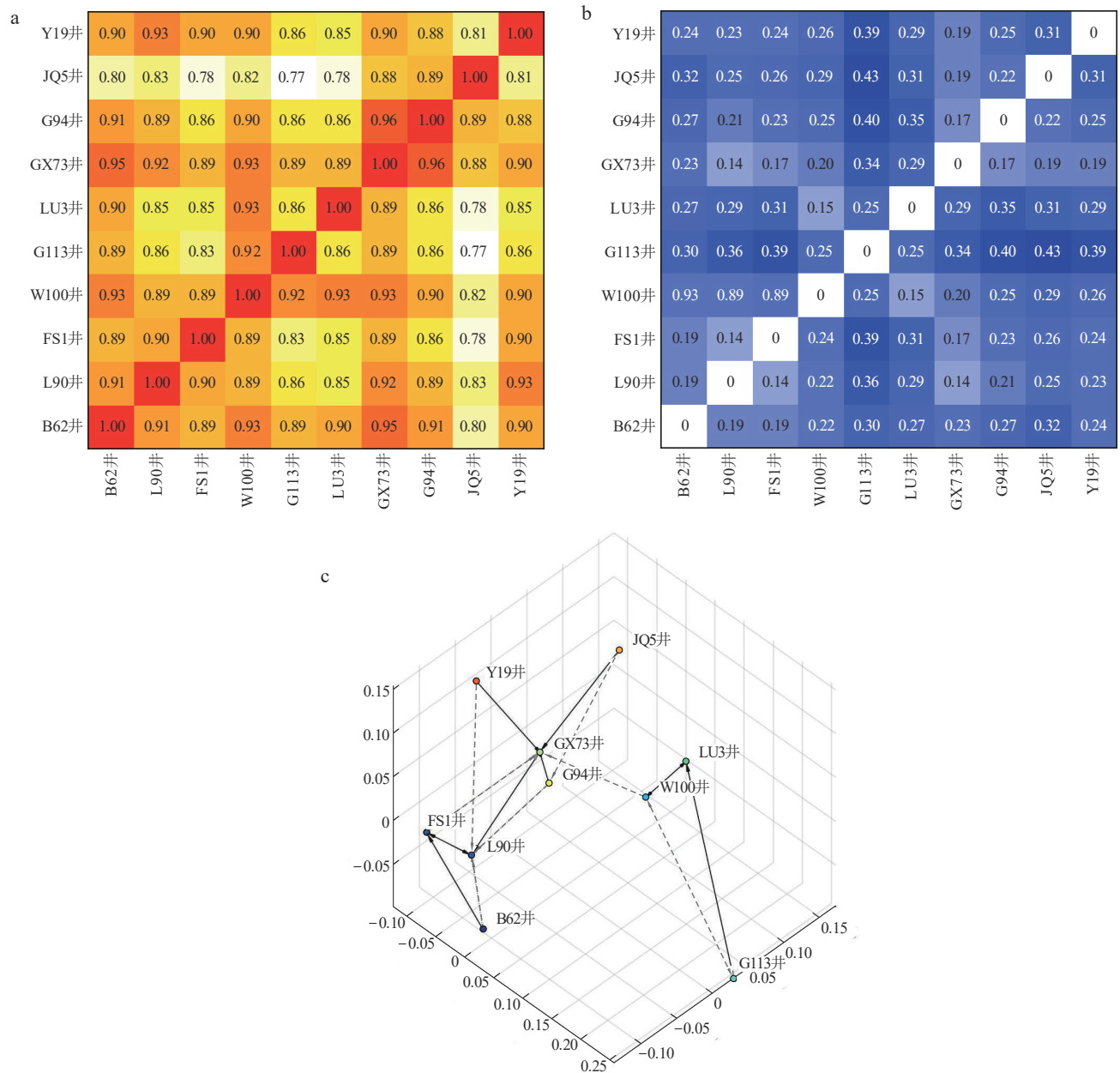


图 11 东营凹陷孔店组-沙四下亚段碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄组成相似性(差异性)分析

Fig. 11 Similarity (difference) analysis of the detrital zircon U-Pb age composition in the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag

a. 相似度系数矩阵图, 相似度系数越大, 颜色越深, 表明样本之间相似程度越高; b. Kuiper 检验 V 值矩阵图, 用来描述样本之间的差异性, V 值越小, 颜色越浅, 表明样本之间的差异性越小, 即相似程度越高; c. 三维定标结果, 点之间的相对距离代表样本之间的相对差异, 实线和虚线分别连接最相似和次相似的样本

总的来说, 砂岩碎屑组分、重矿物组成以及泥岩的元素地球化学特征揭示了一种强烈构造活动背景下的复杂母岩供源条件, 源区与大陆岛弧相关的活动大陆边缘有关, 主要母岩类型有中-酸性岩浆岩、高级变质岩和中-基性岩浆岩, 沉积岩也有一定的贡献。

6.2 物源体系综合分析

本研究采用碎屑岩岩石学、元素地球化学及碎屑

锆石年代学分析等多种方法, 对东营凹陷孔店组-沙四下亚段沉积时期的复杂物源体系进行了综合分析。根据岩屑和重矿物类型、成分成熟度、ZTR 指数变化规律以及碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄组成, 并结合边缘沉积相特征、区域构造背景和凸起区母岩性质, 认为东营凹陷孔店组-沙四下亚段沉积时期, 以近源沉积为主, 可识别出 3 大物源体系(图 14): 滨县-陈家庄体系、广饶体系和鲁西-青城体系。

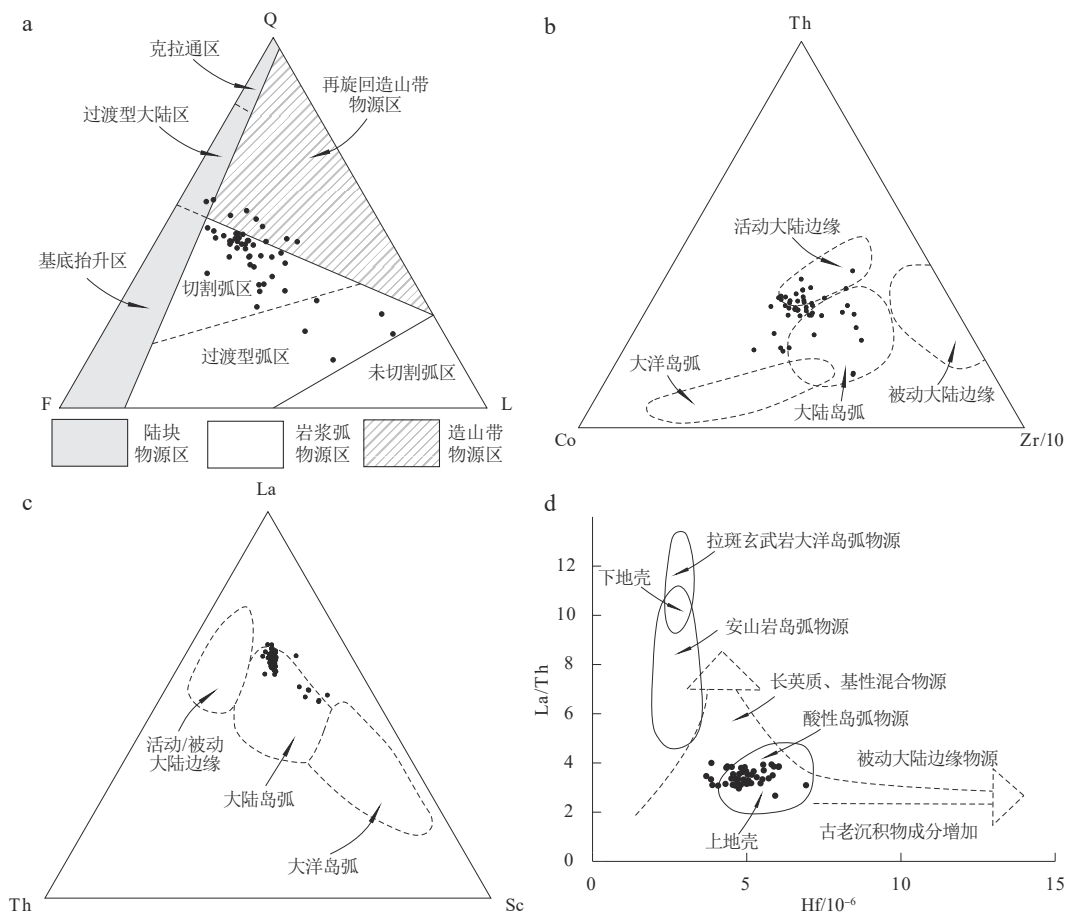


图 12 东营凹陷孔店组-沙四下亚段物源区构造背景判别图版

Fig. 12 Discriminant diagrams illustrating the tectonic settings of the sequence provenance from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag

a. 砂岩 Dickinson 物源判别模式图版(底图据 Dickinson 等^[53]); b. Th-Co-Zr/10 构造背景判别图版(底图据 Bhatia 和 Crook^[38]); c. La-Th-Sc 构造背景判别图版(底图据 Bhatia 和 Crook^[38]); d. Hf-La/Th 物源判别图版(底图据 Taylor 和 McLennan^[57])
(Q, F, L 分别代表石英、长石和岩屑含量, %; 元素符号代表元素含量, 10^{-6} 。)

6.2.1 滨县-陈家庄体系

滨县凸起和陈家庄凸起南部沿断裂带发育近岸水下扇沉积,进一步分为扇根、扇中和扇端亚相,岩性以深灰色砾岩和含砾砂岩为主,向凹陷内部过渡为半深湖—深湖相泥岩。该区砂岩成熟度为 0.15 ~ 1.28; 岩屑组分主要为变质岩, SG1 井、LS3 井和 FSS1 井等沉积岩岩屑含量较高; 重矿物以 Z/A 组合为主, 反映中-酸性岩浆岩为优势源岩。滨县-陈家庄凸起主体由 2 500 Ma 前形成的太古宇构成^[62], 岩性以花岗岩类为主, 闪长岩和变质岩次之。古元古代与中生代中-基性岩浆的侵入使太古宙基岩发生不同程度的碎裂^[63-64]。此外, 凸起局部还残留有少量下古生界碳酸盐岩^[42], B686 井和 FSS1 井的砾石成分也指示灰岩和白云岩为重要的母岩类型。因此, 滨县-陈家庄凸起可以提供中-酸性岩浆岩、中-基性岩浆岩、变质岩和

碳酸盐岩母岩, 与沉积区的岩石学特征相吻合。B62 井、L90 井和 FS1 井的碎屑锆石具有 130 ~ 175 Ma, 约 1 800 Ma 和约 2 500 Ma 的峰值年龄, 分别对应中生代和古元古代的构造岩浆活动及新太古代结晶基底的形成^[65-66]。另外, 这 3 口井还存在晚古生代(245 ~ 300 Ma) 的年龄峰值记录, 但现今渤海湾盆地缺少石炭纪—二叠纪的岩浆活动和变质作用^[67], 因此该年龄的碎屑锆石应当来源于海西期火山活动产物经构造抬升剥蚀形成的再旋回碎屑^[68]。

6.2.2 广饶体系

广饶凸起周缘发育冲积扇相, 以泥石流沉积为特色, 如 G16 井、CG3 井和 W112 等井的岩心上可见紫红色杂基支撑砾岩, 泥岩、砂岩和砾岩混杂堆积, 向凹陷内逐渐过渡为河流沉积。该区砂岩成熟度为 0.25 ~ 1.26; 各井岩屑组分差异较大, 主要为变

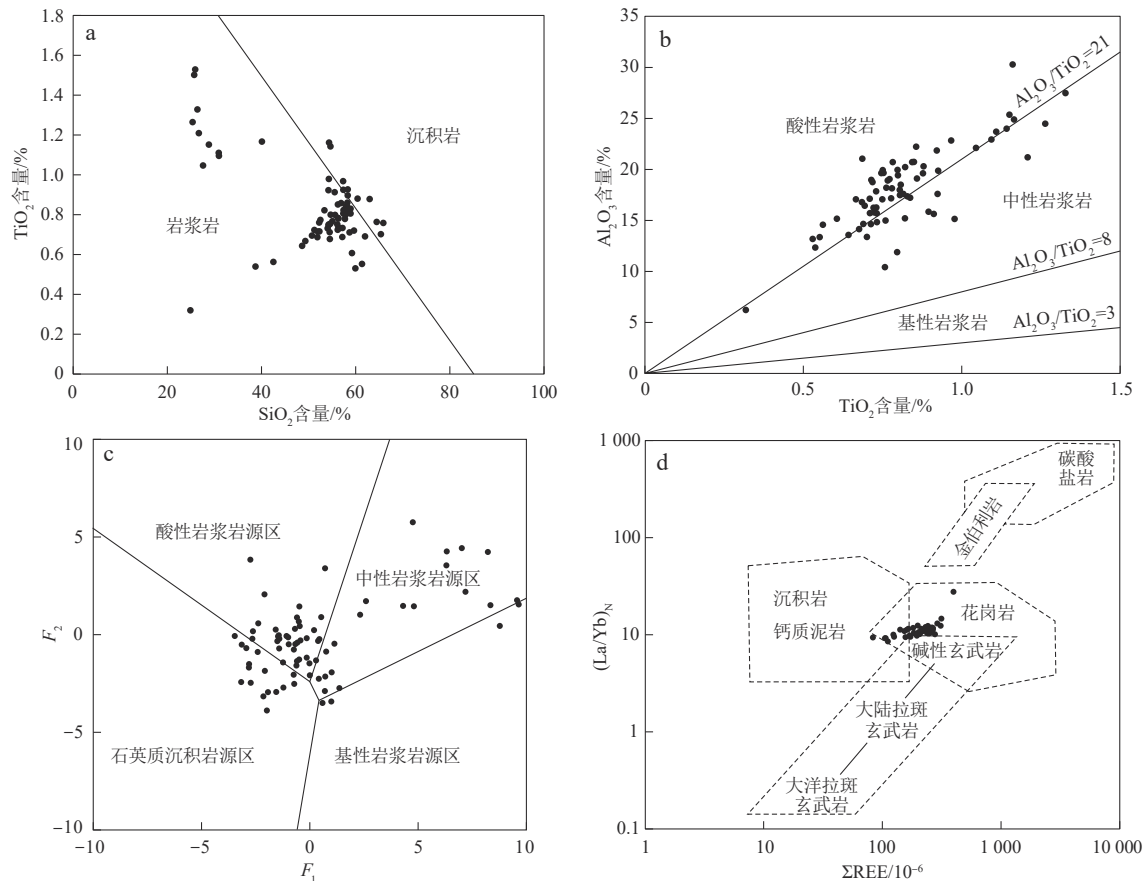


图13 东营凹陷孔店组-沙四下亚段母岩类型判别图版

Fig. 13 Discriminant diagrams showing the parental rock types of the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag

a. SiO₂-TiO₂母岩判别图版(底图据 Roser 和 Korsch^[59]); b. TiO₂-Al₂O₃母岩判别图版(底图据 Hayashi 等^[60]); c. F₁-F₂物源判别图版(底图据 Roser 和 Korsch^[59]); d. ΣREE-La/Yb_N母岩判别图版(底图据 Allègre 和 Minster^[61])

($F_1 = -1.773\text{TiO}_2 + 0.607\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.760\text{Fe}_2\text{O}_{3T} - 1.500\text{MgO} + 0.616\text{CaO} + 0.509\text{Na}_2\text{O} - 1.224\text{K}_2\text{O} - 9.09$; $F_2 = 0.445\text{TiO}_2 + 0.070\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.250\text{Fe}_2\text{O}_{3T} - 1.142\text{MgO} + 0.438\text{CaO} + 1.475\text{Na}_2\text{O} + 1.426\text{K}_2\text{O} - 6.861$; 其中氧化物分子式代表氧化物含量, %。ΣREE 为稀土元素总量; (La/Yb)_N 为球粒陨石标准化元素含量比值。)

质岩岩屑和岩浆岩岩屑, 沉积岩岩屑也占有一定比例; 重矿物主要为 G 组合, 靠近石村断层的 T5 井和 GX23 等井的样品中 T+G 组合和 T-G/Z 组合占比提高, 反映中-基性岩浆岩母岩贡献的增加。钻井揭示广饶凸起前古近系主要有下古生界碳酸盐岩、上古生界碎屑岩以及中生界碎屑岩和中-基性岩浆岩, W112 井和 CG3 井岩心中可见大量安山岩砾石, 凸起区总体缺少古老变质岩。前人研究发现, 济阳拗陷石炭系-二叠系和侏罗系的物源主要源自华北克拉通北缘^[69-70], 也有观点认为侏罗系物源主要来自对晚古生代地层的剥蚀, 并且古近系与中生界也存在物源关系^[71], 因此该区记录的变质岩母岩信号很可能来自古生界和中生界碎屑岩。从碎屑锆石年龄分布情况来看, W100 井、G113 井和 LU3 井的优势年龄为 245 ~ 315 Ma, 其次为 1 800 Ma, 同样支持再旋回成因的观点。

6.2.3 鲁西-青城体系

鲁西隆起和青城凸起周缘发育泥石流和砾质河道沉积, 如 G896 井和 JQ5 井岩心上可见浅红色、杂色基质支撑的砾岩和层状颗粒支撑砾岩, 砾石为棱角状-次棱角状, 具有典型的近物源沉积特征。该区砂岩成分成熟度为 0.41 ~ 0.79; 岩屑组分以变质岩占绝对优势, 其次为岩浆岩; 重矿物特征与广饶体系基本一致, 仍然以 G 组合为主, 靠近高青断层的 G63 井和 GX86 等井的重矿物组合指示中-基性岩浆岩母岩供源更强, 这与前人报道的早白垩世中-基性岩浆岩沿高青断层分布的特征相吻合^[72]。鲁西隆起与青城凸起在新生界沉积前的整体挤压背景下快速抬升^[73-76], 三维地震资料揭示鲁西隆起和青城凸起周缘孔店组-沙四下亚段层超覆于中生界不整合面之上, 并且在青城凸起北

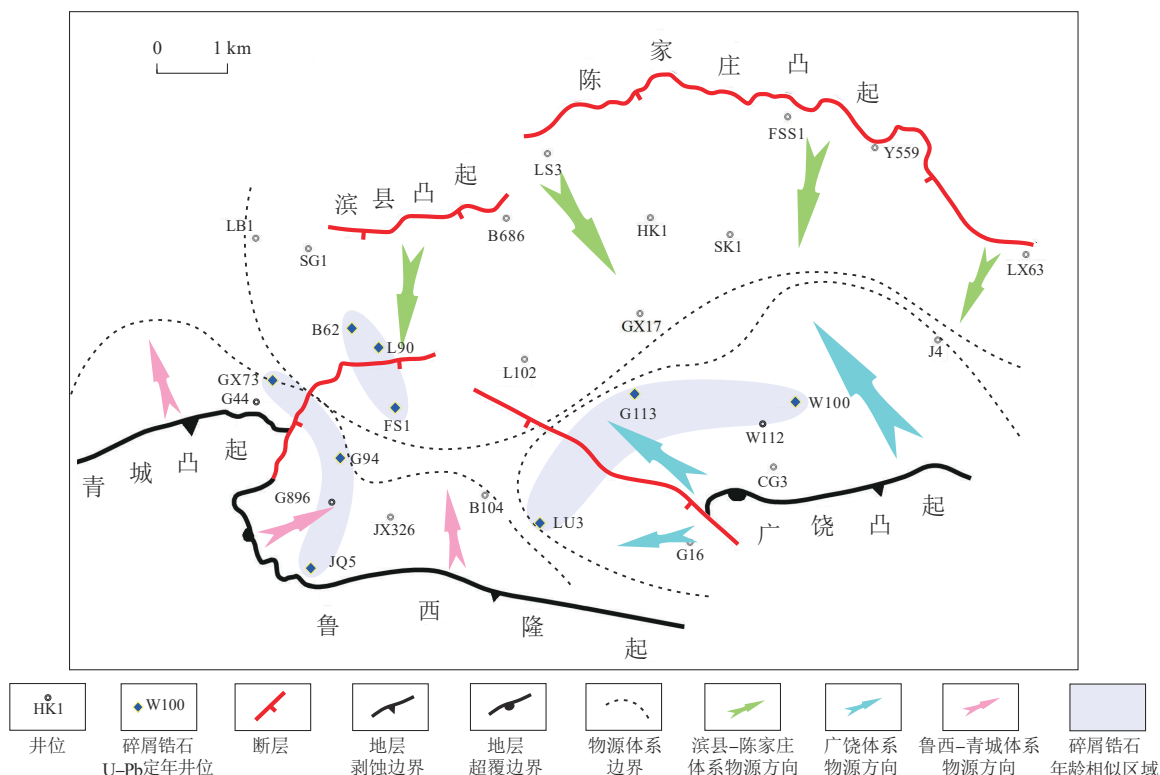


图14 东营凹陷孔店组-沙四下亚段多物源体系示意图

Fig 14 Schematic diagram showing the complex provenance system of the sequence from the Kongdian Formation to the lower 4th member of Shahejie Formation, Dongying Sag

部的G44等井钻遇了厚层含砾砂岩,由此推测孔店组-沙四下亚段沉积时期鲁西隆起和青城凸起可能为同一山脉,具备提供物源的古地貌条件。鲁西隆起与青城凸起前古近系主要为石炭系-二叠系和侏罗系-白垩系^[62],岩性以碎屑岩和中-基性岩浆岩为主^[22,77-78],G896井和JQ5井的砾石成分也主要为中-基性岩浆岩,以安山岩和玄武岩等为代表。可见,鲁西隆起和青城凸起主要提供碎屑岩和中-基性岩浆岩。GX73井、G94井和JQ5井记录的年龄为约130 Ma和约170 Ma的碎屑锆石应属于燕山运动早期和中期岩浆活动^[79]的产物;峰值年龄为约250 Ma和约310 Ma的晚古生代碎屑锆石则应来自于中生界和古生界碎屑岩。

7 结论

1) 东营凹陷孔店组-沙四下亚段砂岩类型以岩屑质长石砂岩为主,成分成熟度普遍较低。岩屑类型主要为变质岩屑(平均含量为60.26%)和岩浆岩屑(平均含量为25.68%),沉积岩屑较少(平均含量为14.06%);重矿物类型主要有锆石、磷灰石、石榴石和钛铁矿等,可分为7种重矿物组合,每种组合分别代表不同的母岩类型。

2) 东营凹陷孔店组-沙四下亚段泥岩全岩主量元素具有高硅、高铝和富碱的特征。微量元素中Li,Cr和Cs元素相对富集。绝大多数样品的稀土元素含量高于大陆上地壳,显示出轻稀土富集和Eu元素含量负异常的特征,符合上陆壳稀土元素的配分模式。

3) 东营凹陷孔店组-沙四下亚段锆石和锆石U-Pb同位素年龄范围为2 817~75 Ma,呈现多峰特征。主要年龄区间为201.5~66.0,359~252,2 500~1 600和2 800~2 500 Ma。进一步对年龄谱进行相似性/差异性量化分析,可将样品分为3组,同组中的样品年龄谱相似程度高,说明母岩年龄组成相近,不同组样品间年龄谱差异性较大,母岩年龄组成不同。

4) 砂岩碎屑组分、重矿物组成、泥岩主量和微量元素地球化学特征及碎屑锆石U-Pb同位素年龄分布表明,东营凹陷孔店组-沙四下亚段具有强烈构造活动背景下的复杂母岩供源条件,母岩主要有太古宇中-酸性岩浆岩和变质岩、古元古界中-基性岩浆岩、下古生界碳酸盐岩以及中生界中-基性岩浆岩,中生界和古生界碎屑岩的再旋回对孔店组-沙四下亚段物源也具有重要贡献。

5) 孔店组-沙四下亚段沉积时期,东营凹陷以发育近源沉积体系为特征,主要由盆地周缘的滨县-陈

家庄凸起、广饶凸起和鲁西隆起-青城凸起提供物源, 距离较远的无棣凸起和宁津凸起等向东营凹陷直接供源的可能性较小。

参 考 文 献

- [1] 杨勇强, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 东营凹陷沙四上亚段滩坝物源体系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 46-53.
YANG Yongqiang, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. Beach bar-provenance system on the upper part of fourth member of Shahejie Formation in Dongying Sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 46-53.
- [2] 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.
- [3] 邓世彪, 关平, 张鹏飞. 东营凹陷青南地区沙四上亚段物源沉积体系与滩坝分布[J]. 沉积学报, 2017, 35(3): 561-576.
DENG Shibiao, GUAN Ping, ZHANG Pengfei. Provenance, sedimentary system and beach bar distribution of the upper Es⁴ in Qingnan area, Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(3): 561-576.
- [4] 刘惠民. 东营凹陷滨南-利津地区古近系沙四上亚段物源分析与沉积特征[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 321-328.
LIU Huimin. Source provenance and depositional characteristics of the upper part of the forth member of Shahejie Formation in Binnan-Lijin area, Dongying Depression [J]. Geoscience, 2010, 24(2): 321-328.
- [5] 刘成龙, 王艳忠, 杨怀宇, 等. 高精度层序约束下三角洲-滩坝沉积体系精细刻画与岩性圈闭分布规律——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1121-1141.
LIU Chenglong, WANG Yanzhong, YANG Huaiyu, et al. Fine characterization and lithologic trap distribution patterns of delta-beach bar sedimentary system under high-precision sequence constraints: A case study of the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the eastern segment of the southern gentle slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1121-1141.
- [6] 石永红, 李忠, 卜香萍, 等. 博兴洼陷新生代砂岩碎屑石榴石的物源示踪及对鲁西隆起的指示[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 967-975.
SHI Yonghong, LI Zhong, BU Xiangping, et al. Detrital garnets from Cenozoic sandstones across boxing sag for provenance indicator and its implication for the Luxi uplift [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 967-975.
- [7] 许承武, 李忠, 韩登林. 鲁西隆起北侧博兴洼陷新生界碎屑重矿物的物源示踪分析[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2737-2744.
XU Chengwu, LI Zhong, HAN Denglin. The geological implications of the Cenozoic heavy minerals in Boxing Sag, north of the west Shandong rise [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2737-2744.
- [8] 侯宇安, 武法东, 史晓颖. 山东博兴洼陷沙河街组高青砂体的物源及其成因[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 55-58.
HOU Yuan, WU Fadong, SHI Xiaoying. Sand sources and origin of Gaoqing sandbody from Shahejie Formation in Boxing Basin of Shandong Province [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 24(4): 55-58.
- [9] 毛振强. 博兴洼陷沙四段沉积物源特征分析[J]. 矿物岩石, 2011, 31(4): 94-99.
MAO Zhenqiang. Characteristic analysis of sedimentary source in Sha-4 Formation of Boxing Depression [J]. Mineralogy and Petrology, 2011, 31(4): 94-99.
- [10] 安洁. 胜坨北带沙河街组砂砾岩体物源分析[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2020, 34(3): 5-10.
AN Jie. Provenance analysis of glutenite body of Shahejie Formation in the northern region of Shengtuo area [J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2020, 34(3): 5-10.
- [11] 雷文智, 陈冬霞, 王永诗, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷东部深层砂砾岩多类型油气藏成藏机理及模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 113-129.
LEI Wenzhi, CHEN Dongxia, WANG Yongshi, et al. Accumulation mechanism and model of multi-type deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 113-129.
- [12] 贾海波, 季汉成, 吴智平, 等. 东营凹陷西部红层沉积期沉积体系及物源方向研究[J]. 现代地质, 2013, 27(5): 1058-1069.
JIA Haibo, JI Hancheng, WU Zhiping, et al. Sedimentary system and provenance orientation of the red-bed sedimentary period in Dongying sag [J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1058-1069.
- [13] 马收先, 孟庆任, 曲永强. 轻矿物物源分析研究进展[J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 597-608.
MA Shouxian, MENG Qingren, QU Yongqiang. Development on provenance analysis of light minerals [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 597-608.
- [14] 王平, 陈玺赞, 朱龙辰, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年代学定量物源分析的基本原理与影响因素——以现代河流砂为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1599-1614.
WANG Ping, CHEN Xiyan, ZHU Longchen, et al. Principles and biases of quantitative provenance analysis using detrital zircon U-Pb geochronology: Insight from modern river sands [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1599-1614.
- [15] 许苗苗, 魏晓椿, 杨蓉, 等. 重矿物分析物源示踪方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(2): 154-171.
XU Miaomiao, WEI Xiaochun, YANG Rong, et al. Research progress of provenance tracing method for heavy mineral analysis [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(2): 154-171.
- [16] 徐杰, 姜在兴. 碎屑岩物源研究进展与展望[J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 379-396.
XU Jie, JIANG Zaixing. Provenance analysis of clastic rocks: Current research status and prospect [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(3): 379-396.
- [17] 杨棵, 朱筱敏, 杨怀宇, 等. 古物源体系多方法表征——以渤海湾盆地沾化渤南洼陷沙四下亚段为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1542-1560.
YANG Ke, ZHU Xiaomin, YANG Huaiyu, et al. Multi method characterization of a paleo-provenance system: A case study from

- the lower 4th member of the Shahejie Formation from the Bonan sag in Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(6): 1542–1560.
- [18] 霍宁, 郭谦谦, 陈艺超, 等. 北山中部古铜井群物源区性质与构造意义[J]. *岩石学报*, 2022, 38(4): 1253–1279.
- HUO Ning, GUO Qianqian, CHEN Yichao, et al. Provenance and tectonic setting of the Gudongjing Group in Beishan Orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(4): 1253–1279.
- [19] 于景强, 张云银, 孙志峰, 等. 东营凹陷盐家地区陡坡带砂砾岩特征及分布[J]. *断块油气田*, 2023, 30(4): 632–638, 647.
- YU Jingqiang, ZHANG Yunyin, SUN Zhifeng, et al. Study on characteristics and distribution of glutenite in steep slope zone of Yanjia area in Dongying Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(4): 632–638, 647.
- [20] ZHOU Tianqi, WU Chaodong, YUAN Bo, et al. New insights into multiple provenances evolution of the Jurassic from heavy minerals characteristics in southern Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 67–81.
- [21] 孟凡超, 邱隆伟, 刘魁元, 等. 济阳拗陷埕东凸起基底岩石组合、原岩恢复及地质意义[J]. *地质科学*, 2013, 48(3): 707–720.
- MENG Fanchao, QIU Longwei, LIU Kuiyuan, et al. Rock association, protolith restoration of basement rocks in Chengdong salient, Jiyang Depression and its geological significance [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(3): 707–720.
- [22] 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1–526.
- Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Shandong Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1–526.
- [23] 宋国奇, 王永诗, 程付启, 等. 济阳拗陷古近系二级层序界面厘定及其石油地质意义[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(5): 1–7.
- SONG Guoqi, WANG Yongshi, CHENG Fuqi, et al. Ascertaining secondary-order sequence of Palaeogene in Jiyang Depression and its petroleum geological significance [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(5): 1–7.
- [24] LIU Zhanhong, HUANG Chunju, ALGEO T J, et al. High-resolution astrochronological record for the Paleocene-Oligocene (66–23 Ma) from the rapidly subsiding Bohai Bay Basin, northeastern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 510: 78–92.
- [25] 吴靖, 姜在兴, 梁超. 东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系[J]. *石油学报*, 2017, 38(10): 1110–1122.
- WU Jing, JIANG Zaixing, LIANG Chao. Lithofacies characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the upper submember of member 4 of Shahejie Formation, Dongying Sag and their relationship with sedimentary environment [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 38(10): 1110–1122.
- [26] SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Terrestrial sedimentary responses to astronomically forced climate changes during the Early Paleogene in the Bohai Bay Basin, eastern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 502: 1–12.
- [27] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1–478.
- ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1–478.
- [28] 吴晨晓, 姚宗全, 德勒恰提·加娜塔依, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷西斜坡二叠系佳木河组物源区构造背景分析[J]. *古地理学报*, 2022, 24(6): 1149–1161.
- WU Chenxiao, YAO Zongquan, JIANATAYI Deleqati, et al. Tectonic setting analysis of provenance area of the Permian Jiamuhe Formation on western slope of Shawan sag, Junggar Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2022, 24(6): 1149–1161.
- [29] 李严, 吴朝东, 张学才, 等. 准噶尔盆地车排子凸起新近系沙湾组重矿物、U-Pb年代学特征及物源分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(6): 1058–1070.
- LI Yan, WU Chaodong, ZHANG Xuecai, et al. Heavy minerals characteristics, U-Pb geochronology and provenance analysis of Neogene Shawan Formation in Chepaizi uplift, Junggar Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(6): 1058–1070.
- [30] 易珍丽, 石放, 尹太举, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘—哈得地区中生界物源转换及沉积充填响应[J]. *岩性油气藏*, 2024, 36(5): 56–66.
- YI Zhenli, SHI Fang, YIN Taiju, et al. Provenance transformation and sedimentary filling response of Mesozoic in Halahatang–Hade area, Tarim Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(5): 56–66.
- [31] 张瀚之, 鹿化煜, 周亚利, 等. 渭河流域沉积矿物组合定量分析及示踪[J]. *沉积学报*, 2022, 40(4): 944–956.
- ZHANG Hanzhi, LU Huayu, ZHOU Yali, et al. Quantitative analysis of the clastic mineral composition in sediments from the Weihe River Basin by scanning electron microscope and its implication for provenance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(4): 944–956.
- [32] HUBERT J F. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1962, 32(3): 440–450.
- [33] 闫淑玉, 张进江, 宋岩, 等. 西昆仑上新世隆升的砂岩重矿物特征及金红石地球化学记录[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6): 1009–1016.
- YAN Shuyu, ZHANG Jinjiang, SONG Yan, et al. Rapid Pliocene uplift of western Kunlun: Evidenced by the heavy mineral assemblages and detrital rutile geochemistry [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(6): 1009–1016.
- [34] MORTON A C, HALLSWORTH C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 241–256.
- [35] MORTON A, MCGILL P. Correlation of hydrocarbon reservoir sandstones using heavy mineral provenance signatures: Examples from the North Sea and adjacent areas [J]. *Minerals*, 2018, 8(12): 564.
- [36] 施辉, 李宗星, 彭博, 等. 柴东欧南凹陷上石炭统克鲁克组构造背景、物质来源及沉积环境——来自细粒沉积岩元素地球化学的证据[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(10): 1554–1570.
- SHI Hui, LI Zongxing, PENG Bo, et al. The tectonic setting, material source and paleoenvironment of the Upper Carboniferous

- Keluke Formation in the Ounan Depression of the eastern Qaidam Basin: Evidence from element geochemistry of fine-grained sedimentary rocks[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(10): 1554–1570.
- [37] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Review of Geophysics*, 1995, 33(2): 241–265.
- [38] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181–193.
- [39] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [40] GROMET L P, HASKIN L A, KOROTEV R L, et al. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(12): 2469–2482.
- [41] WAKITA H, REY P, SCHMITT R A. Abundances of the 14 rare-earth elements and 12 other trace elements in Apollo 12 samples: Five igneous and one breccia rocks and four soils[C]//LEVINSON A A. *Proceedings of the Second Lunar Science Conference*, Houston, 1971. Cambridge, MA: the M. I. T. Press, 1971: 1319–1329.
- [42] 刘宁, 樊德华, 郝运轻, 等. 稀土元素分析方法研究及应用——以渤海湾盆地东营凹陷永安地区物源分析为例[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(4): 427–432.
- LIU Ning, FAN Dehua, HAO Yunqing, et al. REE analysis method and application-taking source rocks in Yongan region of the Dongying sag, the Bohai Bay Basin as example[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2009, 31(4): 427–432.
- [43] 苑东洋, 石威, 刘德民, 等. 鄂北耿集-板桥地区新元古代变火山岩系地层归属——来自锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素的证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(2): 516–530.
- YUAN Dongyang, SHI Wei, LIU Demin, et al. Attribution of Neoproterozoic meta-volcanic series in Gengji Banqiao area, northern Hubei Province: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopes [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(2): 516–530.
- [44] FAN Majie, MANKIN A, CHAMBERLAIN K. Provenance and depositional ages of Late Paleogene fluvial sedimentary rocks in the central rocky mountains, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(11): 1416–1430.
- [45] 贾莹刚, 赵军, 关力伟, 等. 新疆温泉早泥盆世花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(4): 1132–1148.
- JIA Yinggang, ZHAO Jun, GUAN Liwei, et al. Zircon U-Pb-Hf isotopic compositions and their geological significance of Early Devonian granites in Wenquan, Xinjiang [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(4): 1132–1148.
- [46] TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, LIU Wei, et al. Sediment routing systems in the second member of the Eocene Shahejie Formation in the Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin: A synthesis from tectono-sedimentary and detrital zircon geochronological constraints [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 94: 95–113.
- [47] 宋彪. 用 SHRIMP 测定锆石 U-Pb 年龄的工作方法[J]. *地质通报*, 2015, 34(10): 1777–1788.
- SONG Biao. SHRIMP zircon U-Pb age measurement: Sample preparation, measurement, data processing and explanation [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(10): 1777–1788.
- [48] VERMEESCH P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(5): 1479–1493.
- [49] SAYLOR J E, JORDAN J C, SUNDELL K E, et al. Topographic growth of the Jishi Shan and its impact on basin and hydrology evolution, NE Tibetan Plateau [J]. *Basin Research*, 2018, 30(3): 544–563.
- [50] SAYLOR J E, SUNDELL K E. Quantifying comparison of large detrital geochronology data sets [J]. *Geosphere*, 2016, 12(1): 203–220.
- [51] 张凌, 王平, 陈玺赞, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年代学数据获取、分析与比较[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(4): 414–430.
- ZHANG Ling, WANG Ping, CHEN Xiyun, et al. Review in detrital zircon U-Pb geochronology: Data acquisition, analysis and comparison [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(4): 414–430.
- [52] DICKINSON W R, SUCZEK C A. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(12): 2164–2182.
- [53] DICKINSON W R, BEARD L S, BRAKENRIDGE G R, et al. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. *GSA Bulletin*, 1983, 94(2): 222–235.
- [54] DICKINSON W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [M]//ZUFFA G G. *Provenance of Arenites*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985: 333–361.
- [55] 张新毅, 魏玉帅, 王成善, 等. 藏南仲巴地区早白垩世日朗组物源分析及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 273–283.
- ZHANG Xinyi, WEI Yushuai, WANG Chengshan, et al. Provenance analysis and its tectonic significance of Early Cretaceous Rilang Formation in Zhongba area, southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 273–283.
- [56] ZIMMERMANN S, HALL R. Provenance of Triassic and Jurassic sandstones in the Banda arc: Petrography, heavy minerals and zircon geochronology[J]. *Gondwana Research*, 2016, 37: 1–19.
- [57] GIBBS A K. The continental crust: Its composition and evolution. Stuart Ross Taylor, Scott M. McLennan [J]. *The Journal of Geology*, 1985, 94(4): 632–633.
- [58] 佩蒂庄. 沉积岩 [M]. 李汉瑜, 徐怀大, 胡伯良, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1981: 1–642.
- PETTIJOHN F J. *Sedimentary rocks* [M]. LI Hanyu, XU Huaida, HU Boliang, et al, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 1981: 1–642.
- [59] ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. *Chemical Geology*, 1988, 67(1/2): 119–139.
- [60] HAYASHI K I, FUJISAWA H, HOLLAND H D, et al. Geochemistry of approximately 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4115–4137.
- [61] ALLÈGRE C J, MINSTER J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38(1): 1–25.

- [62] 漆家福, 杨桥, 陆克政, 等. 渤海湾盆地基岩地质图及其所包含的构造运动信息[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 299-307.
QI Jiafu, YANG Qiao, LU Kezheng, et al. Geologic map of sub-outcrop and its implied information of tectogenesis in Bohai Bay Basin province [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 299-307.
- [63] 季哲. 东营凹陷太古界基岩储层成因研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
JI Zhe. Study on the formation of the Archeozoic basement reservoir in Dongying Depression [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [64] 李晓珂. 东营凹陷滨县凸起基岩储层分布特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
LI Xiaoke. Research on distribution characteristics of bedrock reservoir in Binxian Uplift of Dongying Depression [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [65] 张波. 济阳坳陷孤西潜山带构造演化及其对油气差异富集的控制[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(2): 29-38.
ZHANG Bo. Tectonic evolution and its control on differential hydrocarbon enrichment of Guxi buried hill, Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(2): 29-38.
- [66] 耿元生, 沈其韩, 任留东. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 1945-1966.
GENG Yuansheng, SHEN Qihan, REN Liudong. Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(7): 1945-1966.
- [67] 李理, 钟大赉. 渤海湾盆地济阳坳陷碎屑锆石裂变径迹年龄记录的构造抬升事件[J]. 岩石学报, 2018, 34(2): 483-494.
LI Li, ZHONG Dalai. Tectonic uplift recorded by detrital zircon fission track age in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(2): 483-494.
- [68] 张开均. 华北板块东缘晚古生代火山活动及其大地构造含义[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(3): 10-11, 20.
ZHANG Kaijun. Late andesitic volcanism of Late Paleozoic era along the eastern margin of north china plate and its tectonic implications [J]. Coal Geology of China, 1998, 10(3): 10-11, 20.
- [69] 李军, 桑树勋, 林会喜, 等. 渤海湾盆地石炭二叠系稀土元素特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 589-596.
LI Jun, SANG Shuxun, LIN Huixi, et al. REE characteristics and its geological significance of the Permo-Carboniferous in Bohaiwan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 589-596.
- [70] 徐建强, 李忠, 石永红. 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[J]. 地质科学, 2012, 47(4): 1099-1115.
XU Jianqiang, LI Zhong, SHI Yonghong. Major provenance of Jurassic sediments in Luxi uplift, eastern North China, derived from the northern North China Block: Evidences from detrital zircon U-Pb and Hf isotopic geochronology [J]. Chinese Journal of Geology, 2012, 47(4): 1099-1115.
- [71] 陈庆春, 吴智平, 李伟. 济阳坳陷稀土元素特征及其在物源对比中的应用[J]. 地质评论, 2003, 49(6): 622-629.
CHEN Qingchun, WU Zhiping, LI Wei. Geochemistry of rare earth elements and its application in the source identification in the Jiyang Depression [J]. Geological Review, 2003, 49(6): 622-629.
- [72] 孔凡仙, 郑和荣. 东营凹陷中生代火山岩地球化学特征及其形成的大地构造环境[J]. 复式油气田, 1994, 5(2): 26-31.
KONG Fanxian, ZHENG Herong. Geochemical characteristics and tectonic environment of Mesozoic volcanic rocks in the Dongying Depression [J]. Complex Oil Field, 1994, 5(2): 26-31.
- [73] 韩登林, 李忠, 李双应, 等. 鲁西隆起北侧博兴洼陷古近系泥岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 2007, 42(4): 678-689.
HAN Denglin, LI Zhong, LI Shuangying, et al. Geochemical characteristics of Paleogene mudstones in the Boxing Sag north of the west Shandong rise and their tectonic implications [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(4): 678-689.
- [74] 唐智博, 李理, 时秀朋, 等. 鲁西隆起蒙山晚白垩世-新生代抬升的裂变径迹证据[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(2): 127-133.
TANG Zhibo, LI Li, SHI Xiupeng, et al. Fission track thermochronology of late Cretaceous-Cenozoic uplifting events of the Mengshan Mountain in the western Shandong rise, China [J]. Acta scientiarum naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50(2): 127-133.
- [75] 李理, 钟大赉, 杨长春, 等. 鲁西隆起晚白垩世-新生代差异抬升的裂变径迹证据[J]. 地质科学, 2017, 52(4): 1026-1037.
LI Li, ZHONG Dalai, YANG Changchun, et al. Fission track evidence of Late Cretaceous-Cenozoic differential uplifting of the Luxi uplift [J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(4): 1026-1037.
- [76] 李伟, 幽鹏飞, 张飞鹏, 等. 济阳坳陷青城凸起的形成与演化[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(5): 1062-1077.
LI Wei, YOU Pengfei, ZHANG Feipeng, et al. Formation and evolution of Qingcheng uplift in Jiyang Depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(5): 1062-1077.
- [77] 徐振中, 陈世悦, 姚军, 等. 济阳坳陷中生代构造活动与沉积作用的时空关系[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(3): 317-325.
XU Zhenzhong, CHEN Shiyue, YAO Jun, et al. Space-time relationship between tectonics and sedimentation during the Mesozoic in Jiyang Depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(3): 317-325.
- [78] 宋明春. 山东省大地构造格局和地质构造演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
SONG Mingchun. Tectonic framework and tectonic evolution of the Shandong Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [79] 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(6): 913-938.
DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LI Hailong, et al. The Yanshan orogeny and Late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia—commemorating 90th years of the “Yanshan orogeny” [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(6): 913-938.

(编辑 刘格云)