

doi:10.3799/dqkx.2017.126

石臼坨凸起西南陡坡带扇三角洲锆石定年与源汇示踪

赵梦,徐长贵,杜晓峰,王清斌

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459

摘要:为了示踪渤海湾盆地石臼坨凸起西南陡坡带扇三角洲源汇体系,对其东三段层序(Ed_3)的6个砂岩样品进行碎屑锆石U-Pb定年分析。西部扇体(C6-4-4井)富含白垩纪(K)锆石并具有110 Ma峰值,母岩以白垩系义县组火成岩为主;中部(C6-4-3、C6-4-6D井)、东部扇体(C6-4-5D)富含侏罗纪(J)锆石并具有152 Ma或168 Ma峰值,母岩以侏罗系蓝旗组火成岩为主,古生代(Pz)锆石则来自中生界碎屑岩。所有样品都含有太古代(Ar)、元古代(Pt)锆石,母岩为花岗岩基底。研究表明,除古生界碳酸盐岩外,源区的母岩地层均可通过碎屑锆石U-Pb年龄示踪,各扇体物源的差异性是由母岩地层倾向控制的,由于中生界向西北倾斜,白垩系主控西部扇体沉积,侏罗系则是中部、东部扇体的主要物源区。

关键词:物源示踪;碎屑锆石U-Pb年龄;白垩系义县组;侏罗系蓝旗组;石臼坨凸起;沉积;石油地质。

中图分类号:P736.21

文章编号:1000-2383(2017)11-1984-10

收稿日期:2017-02-17

Detrital Zircon U-Pb Geochronology and Provenance Tracing of the Fan Deltas along the Southwestern Slope of the Shijiutuo Uplift

Zhao Meng, Xu Changgui, Du Xiaofeng, Wang Qingbin

Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corporation, Tianjin 300459, China

Abstract: To trace sedimentary Source-to-Sink systems of the southwestern Shijiutuo uplift, Bohai bay basin, 6 sandstone cuttings from 3 fan deltas of the third member of Dongying Formation (Ed_3), along the southwestern slope of Shijiutuo uplift, were systematically sampled for detrital zircon U-Pb dating analysis in this study. It is found that sediments of the western fan delta (C6-4-4) were characterized with abundant Cretaceous zircons and a notable peak at 110 Ma, controlled by volcanic rocks of Cretaceous Yixian Formation. The sediments of the middle fan delta (C6-4-3, C6-4-6D) and the eastern fan delta (C6-4-5D) were characterized by high percentage of Jurassic zircons and a 152 Ma or 168 Ma peak, dominated by volcanic rocks of Jurassic Lanqi Formation, while their Paleozoic zircons derived from the Mesozoic sedimentary rocks. Moreover, all the samples received Archean-Proterozoic zircons from the exposed basement. This study shows that all the source strata can be traced by detrital zircon U-Pb dating except for the Paleozoic carbonate. The diversity of the provenances of the fan deltas was controlled by the inclination of the source strata: as the Mesozoic strata inclined to northwest, the Cretaceous strata dominated the western fan delta while the Jurassic strata controlled the middle and eastern fan deltas.

Key words: provenance; detrital zircon U-Pb age; the Cretaceous Yixian Formation; the Jurassic Lanqi Formation; the Shijiutuo uplift; sedimentary; petroleum geology.

沉积物碎屑锆石U-Pb定年近年来已被广泛应用于物源演化研究,物源区台地及岩浆弧的发育决定了源区的碎屑锆石U-Pb年龄,从而影响着来自这些地区的沉积物中所含碎屑锆石的年龄特征,并

在之后的沉积过程中保持稳定,不受搬运过程、成岩过程的影响(DeGraaff-Surpless *et al.*, 2002; Ca-wood *et al.*, 2003; Clift *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2007; van Hoang *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011;

基金项目:国家“十三五”科技重大专项(No.2016ZX05024003)。

作者简介:赵梦(1987—),女,勘探地质工程师,博士,主要从事沉积学、地质学研究。ORCID: 0000-0002-3762-7013。

E-mail: zhaomeng5@cnooc.com.cn

引用格式:赵梦,徐长贵,杜晓峰,等,2017.石臼坨凸起西南陡坡带扇三角洲锆石定年与源汇示踪.地球科学,42(11): 1984—1993.

Cawood *et al.*, 2012; Nie *et al.*, 2012; He *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2013; Burrett *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014).因此,在盆地物源演化研究中,对盆地物源区沉积物进行系统化碎屑锆石 U-Pb 定年研究,找出其特征年龄谱,再与盆地内不同时期沉积物碎屑锆石 U-Pb 定年研究对比,可以示踪沉积物搬运路径,进一步重建盆地的物源演化过程。在我国边缘海盆地,沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄示踪不但已先后应用于莺歌海盆地、琼东南盆地及珠江口盆地的沉积体系研究之中,研究范围也从盆地沉积区逐渐深入至陆地水系汇集区(Clift *et al.*, 2006, van Hoang *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014, 2015; Cao *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2015; 刘强虎等,2015; 王策等,2015; 王维等,2015; Zhao *et al.*, 2015; 赵梦等,2015; Liu *et al.*, 2016; Shao *et al.*, 2016),具有研究范围从“汇”到“源”拓展、研究深度从“源”到“汇”体系化的趋势。

在渤海湾盆地,碎屑锆石 U-Pb 定年物源示踪研究尚处于起步阶段,仅少量数据发表(李欢等,2015; 刘强虎等,2016),并且研究取样点井位、层位都相对分散,单个样品谐和点数也较少,通常仅作为辅助手段应用于沉积演化研究中。在本研究中,首次

对渤海湾盆地石臼坨凸起西南陡坡带东三段扇三角洲进行了碎屑锆石年代学分析,识别源区不同地层的锆石年龄特征,并据此进一步建立源汇示踪关系,为认识、理解石臼坨凸起西南陡坡带扇三角洲源汇体系提供碎屑锆石年代学证据。

1 地质概况

石臼坨凸起位于渤海湾盆地西北部,研究表明,石臼坨凸起西部现今分布的残余地层包括太古界—元古界花岗岩、早古生界寒武系—奥陶系碳酸盐岩夹薄层泥岩、中生界侏罗系碎屑岩及白垩系火成岩夹薄层碎屑岩(图 1)。其中,太古界—元古界沿凸起中部断层呈窄条形展布,厚度大于 3 000 m;寒武系—奥陶系分布在凸起西北部,地层向西北倾斜,最大地层厚度为 1 140 m;中生界分布在凸起西南缘,地层向西北倾斜,其中火成岩厚度可达 1 450 m,碎屑岩厚度可达 950 m(庞小军等,2016)。东三段沉积时期(Ed_3),石臼坨凸起西北部高隆,自断层向南过渡为阶地,北部地形高差大,构造活动强烈,在断层以北,凸起西部发育 5 条 V 型沟谷,中部发育 3 条

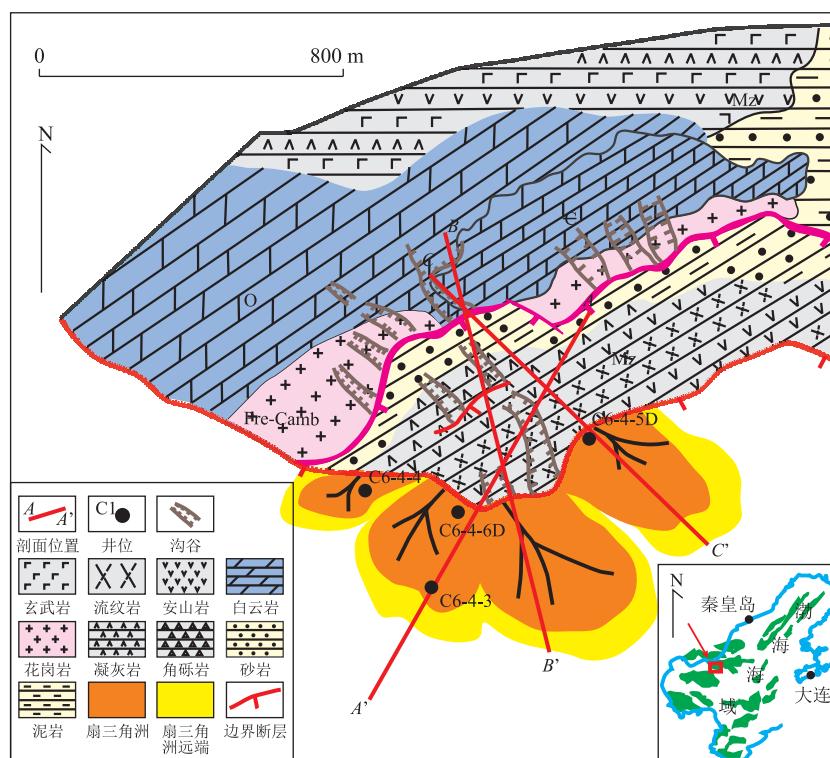


图 1 石臼坨凸起西部残余地层地质图及井位、地震剖面位置

Fig.1 The geology map of the remaining strata on the western Shijiutuo uplift and the location of the wells and the seismic profiles
岩性修改自庞小军等(2016);沟谷修改自王启明等(2016)

V型沟谷,南部发育4条宽缓的U型沟谷,自北向南输送沉积物(王启明等,2016).该时期凸起地表长期遭受剥蚀,沉积物通过古沟谷体系被搬运至陡坡带沉积,在凸起西南缘曹妃甸6-4构造区域发育了多期扇三角洲(徐长贵等,2004;吴磊等,2006;李建平等,2011;代黎明等,2014;李欢等,2015;王启明等,2016),如图1所示.凸起西南缘发育的3个扇三角洲面积自西向东分别为 8.6 km^2 、 57.4 km^2 、 25.7 km^2 (王启明等,2016).

2 材料方法

石臼坨凸起与其西南陡坡带的近源扇三角洲是渤海湾盆地源汇体系研究的热点之一.目前,石臼坨凸起的古地貌重建及残余地层恢复研究已有成果发

表(庞小军等,2016;王启明等,2016),为进行系统的源汇示踪研究提供了有利条件.在本研究中,在石臼坨凸起西南陡坡带曹妃甸6-4构造东三段层序(Ed_3)的3个扇三角洲上,对4口井位(C6-4-4、C6-4-6D、C6-4-3及C6-4-5D井;单井及过井地震剖面位置见图1)采集了6个岩屑样品(取样层位深度如图2所示),进行碎屑锆石U-Pb定年分析.岩屑样品的岩性主要为粉砂岩、细砂岩及砂砾岩.样品的预处理和定年均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,激光剥蚀系统为GeoLas 2005,ICP-MS为Agilent 7500a.

对每颗锆石进行U-Pb定年,最终获得3组年龄: $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.对于封闭体系,U-Pb年龄是谐和的,反映出锆石的结晶年龄.而在实际情况下,由于热液或变质作用的影响,锆石

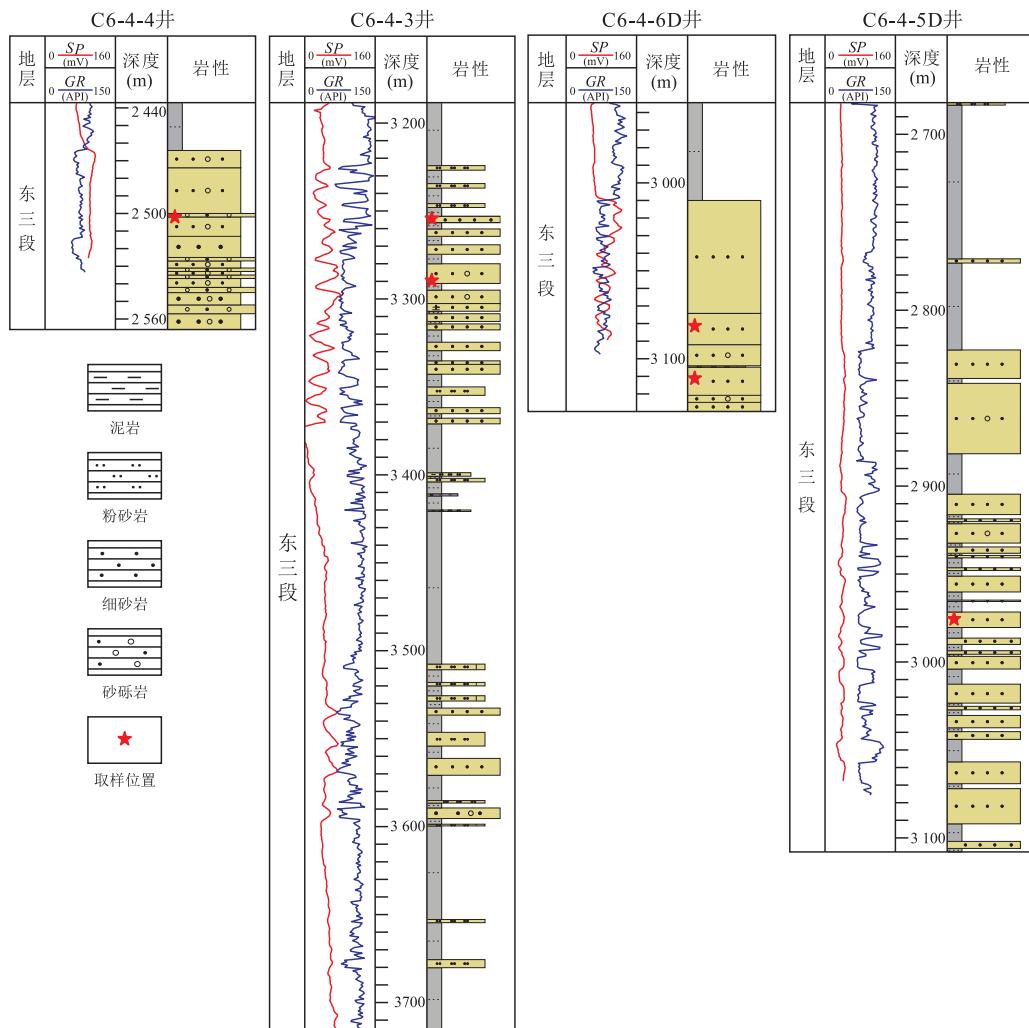


图2 各井位东三段岩性及取样位置示意

Fig.2 The Ed_3 lithology of the wells and their sample depth
红色星号为取样位置

有可能会 Pb 污染或丢失,导致 U-Pb 年龄不谐和。在数据处理中,对²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄小于 1 000 Ma 的锆石选取²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,并以 $100 \times (\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}) / (\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}})$ 计算谐和度;对²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄大于 1 000 Ma 的锆石选取²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄并以 $100 \times (\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}) / (\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}})$ 计算谐和度(Campbell *et al.*, 2005)。结合样品数据情况,选取谐和度大于 85% 的锆石 U-Pb 年龄,并根据 Kernel Density Estimation (KDE) 方法绘制锆石年龄谱图(Sircombe and Hazelton, 2004; Vermeesch, 2005; Vermeesch, 2012)。

3 碎屑锆石 U-Pb 年龄特征

经过预处理,共计获得 291 个谐和年龄,其中 C6-4-3 及 C6-4-5D 井谐和度 $>90\%$,C6-4-4、C6-4-6D 井为保留个别形成早于 2 000 Ma 的锆石,数据谐和度 $>80\%$ 。样品中 96% 的碎屑锆石 U-Pb 年龄 Th/U 比值大于 0.3,以岩浆成因为主,不含 Th/U <0.1 的变质成因锆石(图 3)。样品碎屑锆石年龄从太古代到新生代都有分布(表 1,图 4),最年轻年龄为 95.7 Ma(C6-4-4, 2 500~2 505 m, 东三段 Ed₃),最古老年龄为 2 785 Ma(C6-4-4, 2 500~2 505 m, 东三段 Ed₃)。

C6-4-4 井位于研究区西部扇体(图 1),其东三段砂岩样品共测得 45 个谐和锆石 U-Pb 年龄点。样品富含大量中生代(Mz)锆石,含量为 55.6%。其中白垩纪(K)锆石含量高达 42.2%,是所有样品中含量最高的,侏罗纪(J)锆石仅占 4.4%,三叠纪(T)锆石占

8.9%,石炭纪(C)锆石占 2.2%,中元古代(Pt₂)锆石占 4.4%,古元古代(Pt₁)锆石占 22.2%,并含有 15.6% 的太古代(Ar)锆石,不含二叠纪(P)、泥盆纪(D)、志留纪(S)、奥陶纪(O)、寒武纪(-)或新元古代(Pt₃)锆石(见表 1,图 4)。其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱具有 110 Ma 和 2 570 Ma 双峰值特征(图 5)。

C6-4-3 井与 C6-4-6D 井都位于研究区中部扇体之上,C6-4-3 井位于扇体前缘,而 C6-4-6D 井靠近中部扇体根部(图 1)。C6-4-3 井 2 个东三段砂岩样品共测得 71 个谐和锆石 U-Pb 年龄点。样品中 Mz 锆石含量较 C6-4-4 井有所减少,为 28.2%。K 锆石含量减少至 4.2%,J 锆石含量增加至 19.7%,T 锆石占 4.2%,P 锆石占 9.9%,C 锆石占 7.0%,D 锆石占 1.4%,Pt₃ 锆石占 1.4%,Pt₂ 锆石占 11.3%,Pt₁ 锆石占 23.9%,并含有 16.9% 的 Ar 锆石,不含 S、O、- 锆石(表 1,图 4)。其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱具有 152 Ma、258 Ma、1 768 Ma 和 2 474 Ma 多峰值特征(图 5)。

C6-4-6D 井 2 个东三段砂岩样品共测得 112 个谐和锆石 U-Pb 年龄点。样品中 Mz 锆石亦少于含量为 C6-4-4 井,为 19.6%。K 锆石含量仅为 3.6%,J 锆石占 13.4%,T 锆石占 2.7%,P 锆石占 8.0%,C 锆石占 8.9%,D 锆石占 1.8%,S 锆石占 1.8%,Pt₃ 锆石占 1.8%,Pt₂ 锆石占 11.6%,Pt₁ 锆石占 32.1%,并含有 14.3% 的 Ar 锆石,不含 O、- 锆石(表 1,图 4)。其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱具有 152 Ma、275 Ma、1 776 Ma 和 2 441 Ma 多峰值特征(图 5)。

C6-4-5D 井位于研究区东部扇体(图 1),其东三段砂岩样品共测得 63 个谐和锆石 U-Pb 年龄点。样品中 Mz 锆石含量为 39.7%。K 锆石含量为 3.2%,J 锆石含量是所有样品中最多的,为 25.4%,T 锆石占 11.1%,P 锆石占 4.8%,C 锆石占 6.3%,D 锆石占 3.2%,S 锆石占 1.6%,O 锆石占 1.6%,Pt₂ 锆石占 9.5%,Pt₁ 锆石占 17.5%,并含有 15.9% 的 Ar 锆石,不含 -、Pt₃ 锆石(表 1,图 4)。其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱以 168 Ma、1 793 Ma 和 2 523 Ma 3 组峰值为特征(图 5)。

依据样品碎屑锆石 U-Pb 年龄含量分布及年龄谱特征,可以推断研究区有 3 组不同的物源:C6-4-4 井东三段砂岩样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谱以 110 Ma 和 2 570 Ma 双峰为特征,K 锆石含量高达 42%,Mz 锆石占样品一半以上,代表一组物源类型;C6-4-3、C6-4-6D 井东三段砂岩样品碎屑锆石 U-Pb 年龄含量分布相似,J 锆石含量较多,分别为 19.7% 和 13.4%,

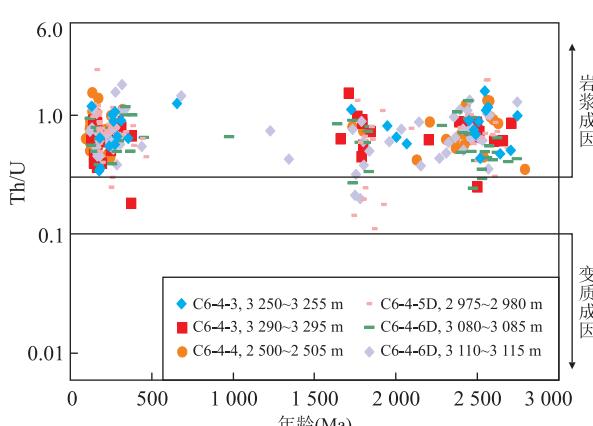


图 3 曹妃甸 6-4 构造东三段砂岩碎屑锆石 Th/U 比值
Fig.3 The Th/U ratio of the detrital zircons of the Ed₃ sandstone, CFD6-4

表 1 曹妃甸 6-4 构造东三段砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄含量统计(%)

Table 1 The U-Pb age composition of the detrital zircons of the Ed_3 sandstone, CFD6-4

井名	年龄(Ma)	<140	<208	<250	<290	<362	<409	<439	<510	<570	<1000	<1800	<2500	Mz	Pz ₂	Pz ₁	
	点数	K	J	T	P	C	D	S	O	ε	Pt ₃	Pt ₂	Pt ₁	Ar			
C6-4-4	45	42.2	4.4	8.9	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	22.2	15.6	55.6	2.2	0.0	
C6-4-3	71	4.2	19.7	4.2	9.9	7.0	1.4	0.0	0.0	0.0	1.4	11.3	23.9	16.9	28.2	18.3	0.0
C6-4-6D	112	3.6	13.4	2.7	8.0	8.9	1.8	1.8	0.0	0.0	1.8	11.6	32.1	14.3	19.6	18.8	1.8
C6-4-5D	63	3.2	25.4	11.1	4.8	6.3	3.2	1.6	1.6	0.0	0.0	9.5	17.5	15.9	39.7	14.3	3.2

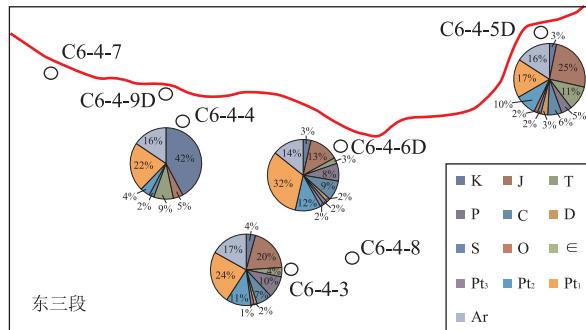


图 4 曹妃甸 6-4 构造东三段砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄含量分布

Fig.4 The U-Pb age composition distribution of the detrital zircons of the Ed_3 sandstone, CFD6-4

年龄谱特征也保持一致,均具有 4 组峰,其峰值年龄分别为 2 550~2 400 Ma、1 800~1 700 Ma、280~250 Ma 和 152 Ma,可见 C6-4-6D、C6-4-3 井在东三沉积期母岩类型一致,受控于同一物源;C6-4-5D 井东三段砂岩样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谱具有 168 Ma、1 793 Ma 及 2 523 Ma 三组峰值,J 锆石含量高达 25.4%,与上述物源类型不同,代表第三组物源类型。

总体上,研究区东三段发育的 3 个扇三角洲为别受控于 3 组不同的物源体系:西侧扇体(C6-4-4 井)具有一套单独物源体系,母岩以 110 Ma 峰值年龄为特征,富含 K 锆石;中部扇体(C6-4-6D、C6-4-3 井)为一套物源体系,母岩以 152 Ma 及 280~250 Ma 峰值年龄为特征,富含 J 锆石;东部扇体(C6-4-5D 井)为另一单独的物源体系,母岩以 168 Ma 峰值年龄为特征,J 锆石含量高达 25.4%,Pz 锆石含量虽与中部扇体相当,但 Pz₂ 锆石含量相对略低,不具有~250 Ma 峰值年龄。

4 源汇示踪及源区地层恢复

石臼坨凸起表面现今残余了大面积太古界—元古界花岗岩、古生界碳酸盐岩、中生界火山岩和碎屑

岩,但由于凸起在东三沉积期之后仍然作为物源区遭受剥蚀,因此这些凸起表面残余岩层并不能完全代表东三沉积时期的物源区岩性,凸起上残余沟谷分布也不能完全代表东三沉积时期的沟谷分布,本研究的目的之一就是对该时期的物源区母岩特征进行定性约束。

4.1 源区地层年龄特征

曹妃甸 6-4 构造井位沉积物砾石成分分析表明,研究区东三段沉积时期沉积物砾石成分主要为流纹岩、安山岩、凝灰岩及玄武岩等火成岩岩屑,其次为石英岩、变质花岗岩等变质岩岩屑,此外还含有少量砂岩和碳酸盐岩砾石(庞小军等,2016),总体上,研究区母岩以火成岩和碎屑岩为主,碳酸盐岩含量很少。可见尽管凸起西北部的古生界碳酸盐岩风化产物可以通过古沟谷体系抵达陡坡带沉积,但影响很小。这些沉积物砾石成分还原了沉积物的母岩岩屑成分,当母岩为火成岩或变质岩时,其岩屑的最小锆石 U-Pb 年龄即为地层的真实年龄,当母岩为沉积岩时,其沉积年龄应小于该母岩岩屑的最小锆石 U-Pb 年龄(Cawood *et al.*, 2012)。在本研究中,除了碳酸盐岩无法用碎屑锆石 U-Pb 年龄示踪之外,其余的火成岩、变质岩岩屑均成分均保留了母岩的锆石年龄、地层年龄信息。

扇三角洲东三段沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱中出现了 2 550~2 400 Ma、1 800~1 700 Ma、280~250 Ma、168~152 Ma 及 110 Ma 5 组峰值年龄(图 5),这些峰值年龄均有自己对应的母岩地层。2 550~2 400 Ma 和 1 800~1 700 Ma 峰值代表的 Ar、Pt 锆石来自凸起的太古界—元古界基岩,即凸起上沿断层分布的花岗岩基底(如图 1 所示),西侧基岩被 3 条 V 型沟谷切割,Ar、Pt 锆石可以通过此 V 型沟谷自北向南被搬运至陡坡带沉积。168~152 Ma 峰值代表的 J 锆石来自中生界侏罗系火成岩,110 Ma 峰值代表的 K 锆石来自中生界白垩系义县组火成岩,二者分布在凸起中部断层以南,K、J 锆石经 4 条 U 型沟谷被搬运至陡坡带沉积。值得注意的是,尽管部

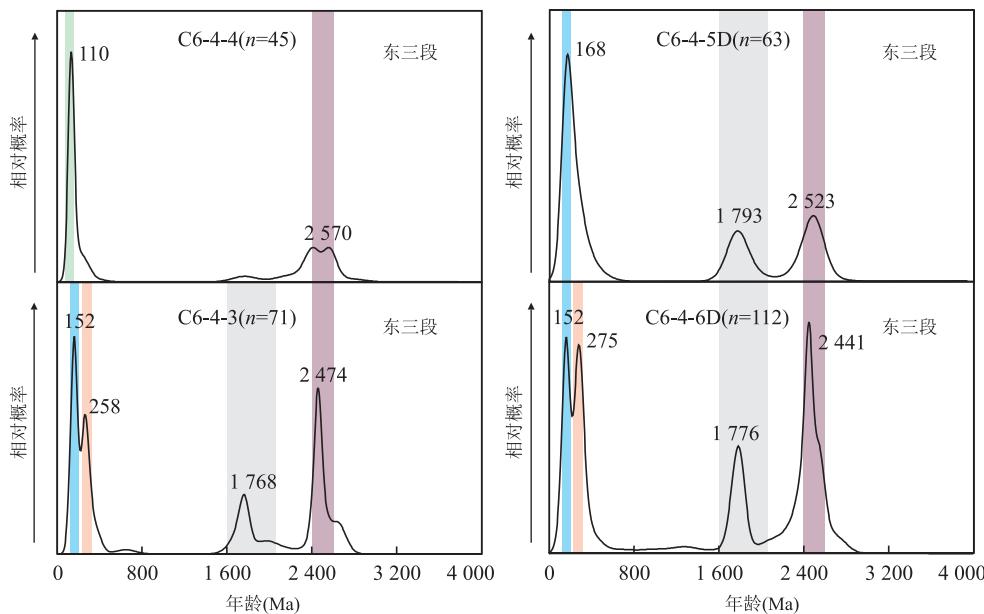


图 5 曹妃甸 6-4 构造东三段砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图

Fig.5 The U-Pb age spectra of the detrital zircons of the Ed_3 sandstone, CFD6-4 n 为年龄点个数

分井位沉积物中含有较多的 Pz 锆石,并具有 280~250 Ma 峰值,但古生界以碳酸盐岩为主,其中的泥岩夹层也均为灰质(庞小军等,2016),不能提供碎屑锆石,无法以锆石年龄示踪,故推测这些 Pz 锆石来自中生界碎屑岩,沿凸起中部断层南侧分布,与中生界火成岩一起经 U 型沟谷被搬运至陡坡带沉积。

刘健(2006)对燕山褶皱带白垩系义县组(张家口组、东岭台组)火山岩底部进行了锆石 U-Pb 定年分析,结果测出其年龄为早白垩世 134 ± 2 Ma,代表义县组的底界年龄;并测得以安山岩为主的蓝旗组(髫髻山组)底部锆石 U-Pb 年龄为 158 ± 1 Ma。刘强虎等(2016)对渤海湾盆地沙垒田凸起基岩定年,测得花岗岩基岩年龄为太古代。以上数据均与本研究中推断的母岩地层年龄吻合。

4.2 源汇示踪及源区地层恢复

由于中生界白垩系义县组和侏罗系蓝旗组的母岩类型均为火成岩及碎屑岩,以岩矿类分析手段无法有效区分,因此往往被作为一套地层讨论(图 1)。在本研究中,由于火成岩地层的最小碎屑锆石 U-Pb 年龄即为地层年龄,可据此有效区别、示踪这两套地层,并进一步恢复二者的分布范围。

在本研究中,C6-4-4 井东三段沉积物 K 锆石含量高达 42%(表 1,图 4),其次为 Ar、Pt 锆石,Pz 锆石含量少,因此,认为石臼坨凸起西侧扇三角洲沉积物的母岩以白垩系义县组火成岩为主,受太古界一

元古界基岩和中生界碎屑岩影响较小。

与 C6-4-4 井不同,C6-4-3、C6-4-6D 及 C6-4-5D 三口井的 K 锆石含量均不足 5%(表 1,图 4),其碎屑锆石年龄谱中也不具有白垩纪峰值(图 5),白垩系火成岩并未构成其主要母岩。通过进一步分析发现,这三口井的 J 锆石含量分别为 19.7%、13.4% 和 25.4%(表 1,图 4),并且具有 $168 \sim 152$ Ma 侏罗纪峰值年龄(图 5),并含有较多的 Ar、Pt 及 Pz 锆石,故认为这三口井沉积物母岩主要为凸起上的侏罗系蓝旗组安山岩,同时太古界—元古界基岩和中生界碎屑岩也对扇体有沉积贡献。需要注意的是,东部扇体 C6-4-5D 虽然含有 Pz 锆石,但年龄频谱中缺失晚古生代 280~250 Ma 峰值,并且其 J 锆石含量是所有样品中最高的,说明东部扇体受中生界碎屑岩影响要小于中部扇体,而受侏罗系火成岩影响最大。

整体上,研究区东三段沉积物碎屑锆石不同年龄组份在区域上呈分带性,自西向东,K 锆石含量大幅度减少,由 42.2% 减至 3.2%,J 锆石含量则从 4.4% 增加至 25.4%(图 4),反映出研究区西部扇体的母岩以白垩系火成岩为主,而中部及东部扇体的母岩以侏罗系火成岩为主。

4.3 源区地层恢复

地震剖面显示(图 6),石臼坨凸起西南陡坡带的新生界向南倾斜,而作为其主要供源区的凸起上的中生界则向西北方向倾斜。尽管这套中生界以白

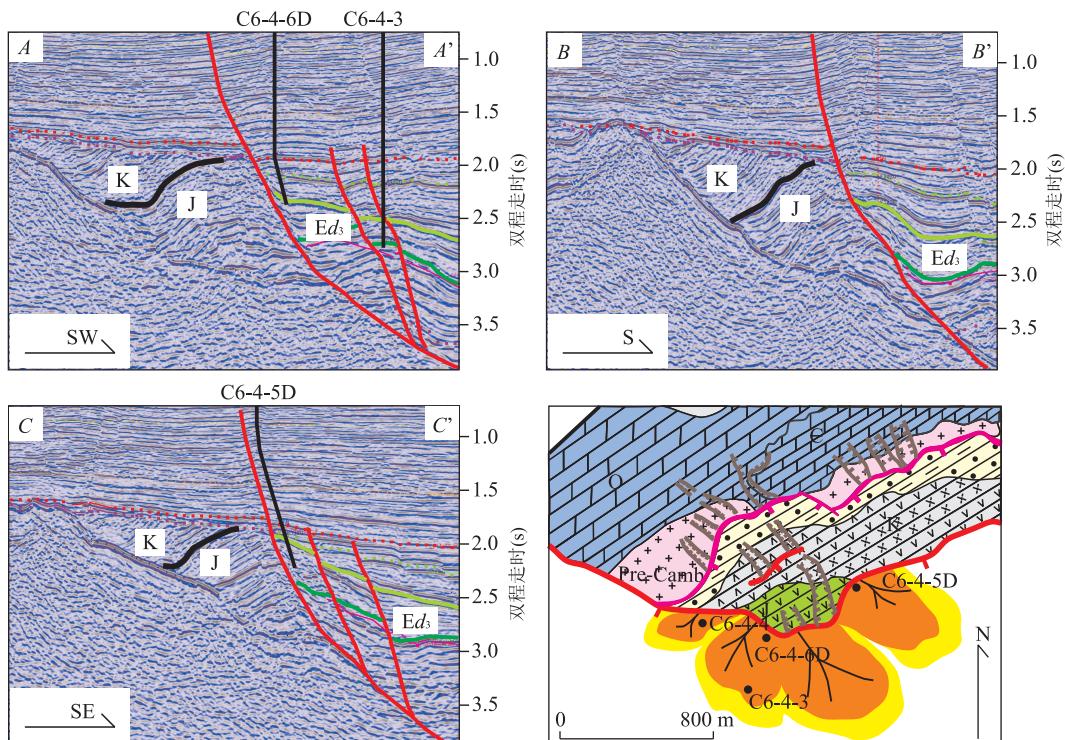


图 6 曹妃甸 6-4 构造过井地震剖面与残余侏罗系

Fig.6 The cross-well seismic profiles, CFD6-4 and the recovered Jurassic
剖面位置及图例见图 1

垩系为主(庞小军等,2016),但受地层倾向控制,在凸起西南缘极有可能出露白垩系下界,从而使得沿凸起边缘出露侏罗系成为可能。

如图 6 所示,在凸起西南部的地震剖面上可以看出,西北倾向的中生界内部发育有一个明显的不整合界面,认为是白垩系与侏罗系的界面。通过地震解释恢复了不整合面的分布,发现该界面并没有完全被白垩系覆盖,而是在陡坡带边缘出露,曝露出其下部的侏罗系,证实了侏罗系在凸起表面出露,并集中分布在石白坨凸起西南陡坡带边缘。如图 6 所示,在石白坨凸起表面,侏罗系沿陡坡带东西向出露的最大长度为 7.8 km,南北向出露的最大宽度为 2.5 km,出露的总面积为 10.4 km²,被两条 U 型沟谷切割。侏罗系虽然整体上出露面积较小,分布较局限,但却能在陡坡带纵向上沿断面大面积暴露,为 C6-4-3、C6-4-6D 及 C6-4-5D 井提供大量沉积物,成为扇三角洲的主要物源区之一,与碎屑锆石年龄组分揭示的侏罗系分布特征相互一致。

故东三段沉积期,石白坨凸起西南部中生界向西北方向倾斜,并且北部地层新,南部地层老,侏罗系的局部出露导致了不同扇体的物源差异性;北部白垩系义县组火成岩是 C6-4-4 井所在西部扇三角

洲的主要物源,南部侏罗系蓝旗组火成岩是 C6-4-6D、C6-4-3 井所在的中部扇三角洲及 C6-4-5D 井所在的东部扇三角洲的主要物源。太古界—元古界花岗岩基底为所有扇体供源,中生界碎屑岩主要影响中部扇体,对西部扇体和东部扇体的影响较小。

5 讨论和结论

在石白坨凸起西南陡坡带扇三角洲源汇体系中,东三沉积时期的沉积物来自凸起上的太古界—元古界花岗岩、古生界碳酸盐岩、中生界火山岩和碎屑岩。其中,中生界白垩系义县组与侏罗系蓝旗组都是陡坡带扇三角洲的重要物源区,二者岩性都以火成岩为主,用常规的岩石组份以及矿物学方法无法区分,但可以通过碎屑锆石 U-Pb 定年手段进行沉积物特征标记,并在此基础上进一步结合地震剖面约束母岩地层的分布范围,做到从“汇”到“源”的恢复,因此我们认为:

(1) 在东三段沉积期,研究区源区中生界整体向西北方向倾斜,使得侏罗系在凸起西南缘小面积出露。白垩系与侏罗系母岩具有不同的碎屑锆石 U-Pb 年龄特征,二者的分布范围决定了不同扇体的物

源差异性。

(2) 西部扇体(C6-4-4 井)以白垩系义县组火成岩为主要物源区,沉积物中富含白垩纪(K)锆石,其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱具有突出的 110 Ma 白垩纪峰值。

(3) 中部扇体(C6-4-6D、C6-4-3 井)及东部扇体(C6-4-5D 井)以侏罗系蓝旗组火成岩为主要物源区,沉积物中富含侏罗纪(J)锆石,其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱具有 152 Ma 或 168 Ma 侏罗纪峰值。同时,沉积物中出现较多的古生代(Pz)锆石,来自中生界碎屑岩,但中生界碎屑岩对中部扇体的影响大于东部扇体。

(4) 太古界—元古界花岗岩基底为所有扇体供源,所有样品中均含有太古代(Ar)、元古代(Pt)锆石。

本研究利用沉积物碎屑锆石 U-Pb 定年法,示踪不同母岩地层对陡坡带扇三角洲源—汇体系的沉积贡献,不但实现了对源区母岩的定性示踪,证实了凸起上侏罗系蓝旗组物源区的存在,并进一步恢复其分布范围,为研究石臼沱凸起西南陡坡带扇三角洲源汇体系提出了新的证据和认识。

References

- Burrett,C.,Zaw,K.,Meffre,S.,et al.,2014.The Configuration of Greater Gondwana—Evidence from LA-ICPMS, U-Pb Geochronology of Detrital Zircons from the Palaeozoic and Mesozoic of Southeast Asia and China.*Gondwana Research*, 26 (1): 31 — 51. doi: 10.1016/j.gr.2013.05.020
- Cao,L.C.,Jiang,T.,Wang,Z.F.,et al.,2015.Provenance of Upper Miocene Sediments in the Yinggehai and Qiongdongnan Basins, Northwestern South China Sea: Evidence from REE, Heavy Minerals and Zircon U-Pb Ages.*Marine Geology*, 361: 136 — 146. doi: 10.1016/j.margeo.2015.01.007
- Cawood,P.A.,Hawkesworth,C.J.,Dhuime,B.,2012.Detrital Zircon Record and Tectonic Setting.*Geology*, 40 (10): 875—878.doi:10.1130/g32945.1
- Cawood,P. A., Nemchin, A. A., Freeman, M., et al., 2003. Linking Source and Sedimentary Basin: Detrital Zircon Record of Sediment Flux along a Modern River System and Implications for Provenance Studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1—2): 259 — 268. doi: 10.1016/s0012-821x(03)00122-5
- Clift,P. D., Blusztajn,J., Nguyen,A. D., 2006. Large-Scale Drainage Capture and Surface Uplift in Eastern Tibet-SW China before 24 Ma Inferred from Sediments of the Hanoi Basin, Vietnam. *Geophysical Research Letters*, 33:L19403.doi:10.1029/2006gl027772
- Dai,L. M., Yang, B., Liu, X. J., et al., 2014. Sequence Stratigraphy Characteristics and Sedimentary System Evolution of Dongying Formation, Western Subsag in Bohai Sag. *Petroleum Geology and Engineering*, 28 (4): 7—10 (in Chinese with English abstract).
- DeGraaff-Surpless,K., Graham, S. A., Wooden, J. L., et al., 2002. Detrital Zircon Provenance Analysis of the Great Valley Group, California: Evolution of an Arc-Forearc System. *Geological Society of America Bulletin*, 114 (12): 1564—1580.doi: 10.1130/0016-7606(2002)114<1564:dzpaot>2.0.co;2
- He,M.Y.,Zheng,H.B.,Clift,P.D.,2013.Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotope Data from the Yangtze River Sands: Implications for Major Magmatic Events and Crustal Evolution in Central China. *Chemical Geology*, 360 — 361: 186—203.doi:10.1016/j.chemgeo.2013.10.020
- Jiang,T., Cao, L. C., Xie, X. N., et al., 2015. Insights from Heavy Minerals and Zircon U-Pb Ages into the Middle Miocene-Pliocene Provenance Evolution of the Yinggehai Basin, Northwestern South China Sea. *Sedimentary Geology*, 327: 32—42.doi:10.1016/j.sedgeo.2015.07.011
- Li,H., Yang, X. H., Zhu, H. T., et al., 2015. The Provenance Transformation and Sedimentary Filling Response of Paleogene Dongying Formation in Western Slope of Bohai Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (1): 36—48 (in Chinese with English abstract).
- Li,J.P., Zhou, X. H., Lv, D. Y., 2011. Distribution and Evolution of Paleogene Delta Systems in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 23 (5): 293 — 298 (in Chinese with English abstract).
- Liu,J., 2006. Yanshanian Tectonic Evolution of the Chengde Basin and the Adjacent Area in the Eastern Segment of the Yanshan Fold-and-Thrust Belt (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu,Q. H., Zhu, H. T., Shu, Y., et al., 2015. Provenance Systems and Their Control on the Beach-Bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(3): 286—299 (in Chinese with English abstract).
- Liu,Q. H., Zhu, H. T., Shu, Y., et al., 2016. Provenance Identification and Sedimentary Analysis of the Beach and Bar Systems in the Palaeogene of the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 70: 251—272. doi:10.1016/j.marpetgeo.2015.12.002

- Liu, Q. H., Zhu, X. M., Li, S. L., et al., 2016. Pre-Paleogene Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 41(11): 1935—1949 (in Chinese with English abstract).
- Nie, J. S., Horton, B. K., Saylor, J. E., et al., 2012. Integrated Provenance Analysis of a Convergent Retroarc Foreland System: U-Pb Ages, Heavy Minerals, Nd Isotopes, and Sandstone Compositions of the Middle Magdalena Valley Basin, Northern Andes, Colombia. *Earth-Science Reviews*, 110(1—4): 111—126. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.11.002
- Pang, X. J., Wang, Q. B., Du, X. F., et al., 2016. Provenance Evolution and Its Effect on Reservoir during Palaeogene in Northwest of Bozhong Sag. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 35(5): 34—41 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Cao, L. C., Pang, X., et al., 2016. Detrital Zircon Provenance of the Paleogene Synrift Sediments in the Northern South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 255—269. doi: 10.1002/2015GC006113
- Sirccombe, K. N., Hazelton, M. L., 2004. Comparison of Detrital Zircon Age Distributions by Kernel Functional Estimation. *Sedimentary Geology*, 171(1—4): 91—111. doi: 10.1016/j.sedgeo.2004.05.012
- van Hoang, L., Wu, F. Y., Clift, P. D., et al., 2009. Evaluating the Evolution of the Red River System Based on in Situ U-Pb Dating and Hf Isotope Analysis of Zircons. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10: Q11008. doi: 10.1029/2009GC002819
- Vermeesch, P., 2005. Statistical Uncertainty Associated with Histograms in the Earth Sciences. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110: B02211. doi: 10.1029/2004JB003479
- Vermeesch, P., 2012. On the Visualisation of Detrital Age Distributions. *Chemical Geology*, 312—313: 190—194. doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.04.021
- Wang, C., Liang, X. Q., Xie, Y. H., et al., 2014. Provenance of Upper Miocene to Quaternary Sediments in the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Ages. *Marine Geology*, 355: 202—217. doi: 10.1016/j.margeo.2014.06.004
- Wang, C., Liang, X. Q., Xie, Y. H., et al., 2015. Late Miocene Provenance Change on the Eastern Margin of the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Evidence from U-Pb Dating and Hf Isotope Analyses of Detrital Zircons. *Marine and Petroleum Geology*, 61: 123—139. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2014.12.004
- Wang, C., Liang, X. Q., Zhou, Y., et al., 2015. Construction of Age Frequencies of Provenances on the Eastern Side of the Yinggehai Basin: Studies on LA-ICP-MS U-Pb Ages of Detrital Zircons from Six Modern Rivers, Western Hainan, China. *Earth Science Frontiers*, 22(4): 277—289 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. M., Li, J., Zhou, X. G., et al., 2016. Characteristics of Paleo-Geomorphic and Its Controlling Effect on Deposition of Ed_3 in Steep Slope Zone of West Southern Shijituo Uplift. *Journal of Northeast Petroleum University*, 40(6): 53—61 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Ye, J. R., Yang, X. H., et al., 2015. Sediment Provenance and Depositional Response to Multistage Rifting, Paleogene, Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 40(6): 1061—1071 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L., Xu, H. M., Ji, H. C., 2006. Evolution of Sedimentary System and Analysis of Sedimentary Source in Paleogene of Bozhong Sag, Bohai Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(1): 81—88 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Lai, W. C., Xue, Y. A., et al., 2004. Paleo-Geomorphology Analysis for the Paleogene Reservoir Prediction in Bohai Sea Area. *Petroleum Exploration and Development*, 31(5): 53—56 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. S., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2007. The Crust of Cathaysia: Age, Assembly and Reworking of Two Terranes. *Precambrian Research*, 158(1—2): 51—78. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.010
- Yan, Y., Carter, A., Palk, C., et al., 2011. Understanding Sedimentation in the Song Hong-Yinggehai Basin, South China Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12: Q06014. doi: 10.1029/2011gc003533
- Zhao, M., Shao, L., Liang, J. S., et al., 2015. No Red River Capture since the Late Oligocene: Geochemical Evidence from the Northwestern South China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 122: 185—194. doi: 10.1016/j.dsr2.2015.02.029
- Zhao, M., Shao, L., Qiao, P. J., 2015. Characteristics of Detrital Zircon U-Pb Geochronology of the Pearl River Sands and Its Implication on Provenances. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 43(6): 915—923 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H., Clift, P. D., Wang, P., et al., 2013. Pre-Miocene Birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(19): 7556—7561. doi: 10.1073/pnas.1216241110

附中文参考文献

- 代黎明,杨波,刘晓健,等,2014.渤海中西次洼东营组层序地层特征与沉积体系演化.石油地质与工程,28(4): 7—10.
- 李欢,杨香华,朱红涛,等,2015.渤海中西环古近系东营组物源转换与沉积充填响应.沉积学报,33(1): 36—48.
- 李建平,周心怀,吕丁友,2011.渤海海域古近系三角洲沉积体系分布与演化规律.中国海上油气,23(5): 293—298.
- 刘健,2006.燕山褶皱带东段承德盆地及邻区燕山期构造演化(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 刘强虎,朱红涛,舒誉,等,2015.珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制.石油学报,36(3): 286—299.
- 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等,2016.沙垒田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程.地球科学,41(11): 1935—1949.
- 庞小军,王清斌,杜晓峰,等,2016.渤海西北缘古近系物源演化及其对储层的影响.大庆石油地质与开发,35(5): 34—41.
- 王策,梁新权,周云,等,2015.莺歌海盆地东侧物源年龄标志的建立:来自琼西 6 条主要河流碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的研究.地学前缘,22(4): 277—289.
- 王启明,李瑾,周晓光,等,2016.石臼坨凸起西南缘陡坡带东三段古地貌对沉积的控制.东北石油大学学报,40(6): 53—61.
- 王维,叶加仁,杨香华,等,2015.珠江口盆地惠州凹陷古近系多幕裂陷旋回的沉积物源响应.地球科学,40(6): 1061—1071.
- 吴磊,徐怀民,季汉成,2006.渤海湾盆地渤海古近系沉积体系演化及物源分析.海洋地质与第四纪地质,26(1): 81—88.
- 徐长贵,赖维成,薛永安,等,2004.古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用.石油勘探与开发,31(5): 53—56.
- 赵梦,邵磊,乔培军,2015.珠江沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄特征及其物源示踪意义.同济大学学报(自然科学版),43(6): 915—923.