

doi:10.3799/dqkx.2016.134

# 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程

刘强虎<sup>1,2</sup>, 朱筱敏<sup>1,2\*</sup>, 李顺利<sup>1,2</sup>, 李慧勇<sup>3</sup>, 石文龙<sup>3</sup>

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

**摘要:** 沙垒田凸起及围区凹陷是一个完整的源—汇系统。基于钻井岩心、三维地震及锆石测年等资料, 刻画了沙垒田凸起前古近系基岩组成及分布并探讨了古近纪早期源—汇体系配置关系。研究表明, 沙垒田凸起自南向北依次发育太古界—元古界混合花岗岩、奥陶—寒武系碳酸盐岩与碎屑岩、中生界火山碎屑岩; 其中, 凸起东段以元古代混合花岗岩为主, 西段以奥陶—寒武系碳酸盐岩为主。结合古地貌可知, 砂岩富集区与源—汇耦合系统相对应, 即基岩组成、汇水区、物源通道及边界样式共同控制沉积砂体组成样式与规模。对比分析凸起东西段、南北侧各控制要素与沉积砂体间关联性, 可知凸起东段南侧混合花岗岩基底、较大的汇水面积与物源通道及斜坡带对应高效源—汇系统。

**关键词:** 基岩; 源—汇体系; 锆石定年; 古地貌; 沙垒田凸起; 沉积学。

中图分类号: P618. 130

文章编号: 1000—2383(2016)11—1935—15

收稿日期: 2016—05—23

## Pre-Palaeogene Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shaleitian Uplift

Liu Qianghu<sup>1,2</sup>, Zhu Xiaomin<sup>1,2\*</sup>, Li Shunli<sup>1,2</sup>, Li Huiyong<sup>3</sup>, Shi Wenlong<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corporation Limited, Tianjin 300452, China

**Abstract:** During the early stage of the Palaeogene, the Shaleitian uplift and its surrounding areas constituted a complete source-to-sink system. In this paper, we analyse the characteristics of Pre-Palaeogene bedrocks and sediment-dispersal patterns of the source-to-sink systems based on detritus, thin section, zircon and integrated seismic-logging data analysis. The results show that the Shaleitian uplift was filled by Archeozoic and Proterozoic metamorphic rock sediments, and Lower Palaeozoic carbonate rocks stacked with southward Mesozoic igneous rocks. The bedrocks mainly consist of Proterozoic metamorphic rocks in the southern part of eastern Shaleitian uplift, while the Lower Palaeozoic carbonate rocks in the northern part of western Shaleitian uplift. Based on the palaeogeomorphology, it is found a sand-rich area corresponds to a complete source-to-sink coupling system in the rift basin, and the stacked style and size of sandbodies in the sink are jointly controlled by the composition of bedrocks, catchment areas, sediment-transport pathways, fracture system and detritus accommodation space. It is concluded that effective source-to-sink systems are mainly located in the southern part of the eastern Shaleitian uplift through comparative analysis of the coupling relationship among the various controls with sandbodies properties in the Shaleitian uplift and surrounding areas.

**Key words:** bedrocks; source-to-sink system; zircon U-Pb ages; Paleogeomorphic; Shaleitian uplift; sedimentology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41272133)。

作者简介: 刘强虎(1988—), 男, 博士研究生, 从事层序地层学及地震沉积学研究。E-mail: lqhchkd@163.com

\* 通讯作者: 朱筱敏, E-mail: xmzhu@cup.edu.cn

引用格式: 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.

## 0 引言

剥蚀地貌和沉积地貌之间被沉积物路径系统联系在一起,共同构成地表的“源—汇”系统(Allen and Hovius, 1998; Allen, 2005, 2008a, 2008b; Sømme *et al.*, 2009, 2013; Sømme and Jackson, 2013; 徐长贵, 2013; 林畅松等, 2015)。作为一个完整的系统,“源”区构造、气候变化所引起的剥蚀物产量、类型等变化,都将在搬运区、下游“汇”区沉积地貌、地层样式等特征中得到反映。其中,源区基岩组成及分布的研究是源—汇系统的重要部分,可指导预测不同区带风化、剥蚀差异及沉积组分特征,作为沉积盆地演化与古环境恢复的重要依据。

渤海湾盆地是我国最重要的一个含油气盆地,研究重点集中于汇区内构造—沉积响应关系与沉积相带的刻画研究(林畅松等, 2003; 徐长贵等, 2004, 2008; 朱红涛等, 2011, 2014; 吕琳等, 2012; Feng *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2014),其中林畅松等(2003)运用钻井与地震资料综合分析了东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制;徐长贵等(2004)利用渤西地区古近系古地貌指示的

古沟谷与构造坡折预测有利储集砂体展布;吕琳等(2012)采用布格重力异常、重矿物、地震反射特征、砂分散体系及岩石地球化学特征分析,综合构建了歧北凹陷沙一段物源与沉积体系配置关系;Zhu *et al.*(2014)基于层序地层学、地震沉积学理论及三维可视化技术,结合3D高分辨率地震资料,对渤中凹陷西斜坡东营组层序进行了高精度三维沉积体系刻画。对于沙垒田凸起前古近系基岩组成、分布特征及凸起与围区间的源汇关系讨论较少,如沙垒田凸起区基岩与围区沉积砂体组分间关联性、凸起区基岩出露面积与围区沉积砂体规模间对应关系、凸起区物源通道规模对围区供给差异性等问题。本文利用最新的钻井岩心、薄片、锆石等测试资料及三维高精度地震资料,开展沙垒田凸起岩性组成、锆石年龄、地震反射结构及古水系分布等分析,旨在揭示研究区前古近系基岩组成及分布规律,并探讨古近纪早期的源—汇配置关系及差异。

## 1 区域地质概况

沙垒田凸起位于渤海海域西部,凸起为东西走

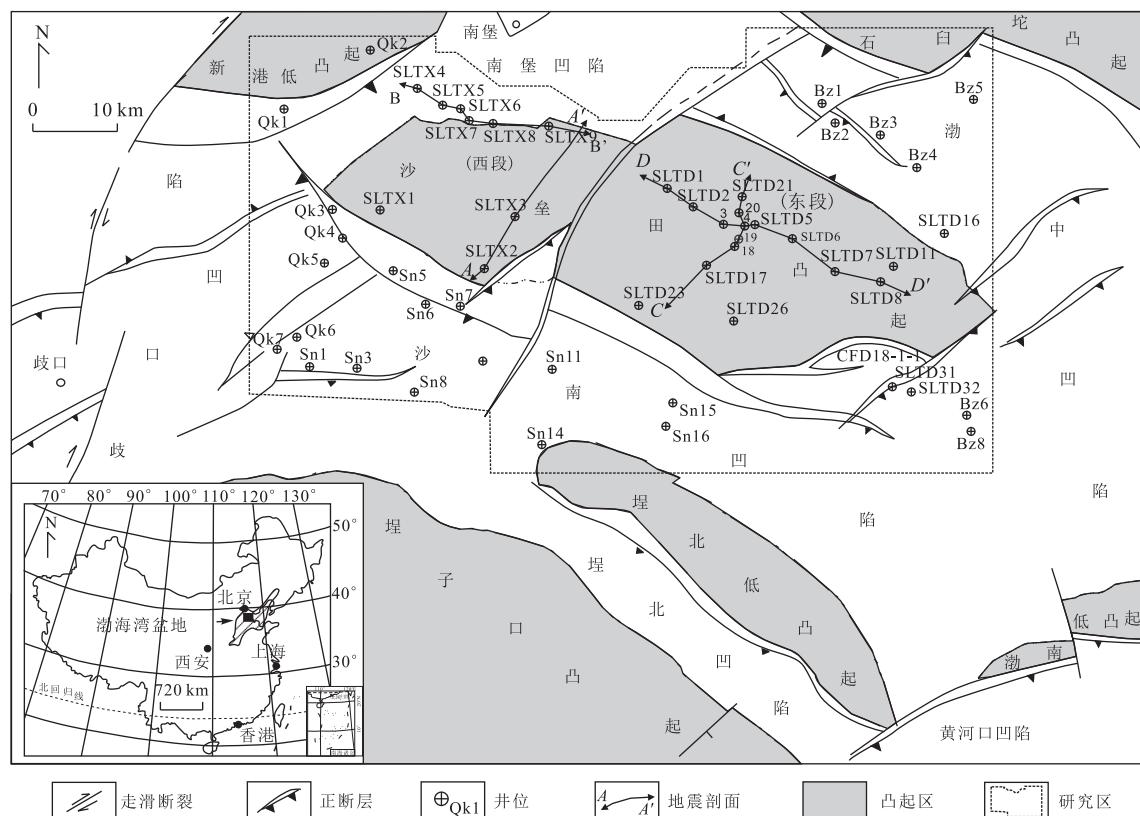


图 1 渤海湾盆地沙垒田凸起区域构造位置

Fig.1 Tectonic location map of Shaleitian uplift in Bohai bay basin

向,东西分别倾没于渤海中凹陷和歧口凹陷,南北以沙南断裂和沙北断裂分别与沙南凹陷和南堡凹陷相接

(彭文绪等,2012).该凸起是渤海海域潜山面积最大的凸起,东西长约 80 km,南北宽 20~30 km,面积

界	系	统	年龄 (Ma)	岩性	厚度 (m)	岩性、相及生物组合		
中生界 Mz	白垩系 K	下统 K <sub>1</sub>	65.0					
						上部为湖相深灰色泥岩为主夹钙质泥岩及砂岩;中部为三角洲相浅灰色砂岩、砂砾岩与泥岩互层;下部为红褐色泥岩、砂砾岩及砾岩,为冲积扇相.		
					0~1000	孢粉: 无突肋纹孢—希指蕨孢—克拉梭粉—蛟河粉组合;被子植物:棒纹单沟粉和星粉.		
			139.4			火山岩相,以紫红色、灰绿色安山岩、凝灰岩及黑灰色玄武岩为主,中上部夹湖相灰色泥岩及泥灰岩.		
						孢粉: 克拉梭粉—希指蕨孢组合,其中无突肋纹孢及抄椤孢有一定含量.		
	侏罗系 J	上统 J <sub>3</sub>	139.4					
					0~800	上部为灰白色、紫红色凝灰岩为主夹灰绿色泥岩及凝灰质砂岩夹杂色凝灰岩、泥岩、白云质砂岩,属火山沉积相.		
			150.0			孢粉: 克拉梭粉—苏铁粉组合.		
					0~600	灰白色凝灰质砂岩,含砾砂岩为主,夹泥岩及薄煤层属河流沼泽相.		
						孢粉: 抄椤孢属—里白属—紫箕孢属组合;植物花粉有克拉梭粉、单双束松粉、罗汉松、宽沟粉等.		
古生界 Pz	上古生界	二叠系 P	208.0			浅灰色河流相砂岩为主夹泥岩及煤层.		
					0~200	孢粉: 圆形光面孢、光面三缝孢、一头沉孢、芦木孢、厚角孢、费氏粉等组合.		
			290.0					
					0~300	上部为深灰色泥岩夹粉砂岩、灰岩及煤层;下部为泥岩夹灰岩及少量煤层,铝土泥岩或铝土岩.		
						潮坪、泻湖及沼泽相(有孔虫类).		
	下古生界	奥陶系 O	322.8					
					0~680	上部为浅灰色白云质灰岩与灰岩及泥灰岩;下部为棕灰色粉晶白云岩、灰质白云岩,底部夹燧石带及泥质条带.		
						陆表海台地相—台地相—潮坪相(牙形石组合带).		
			510.0					
					0~270	上部为厚层灰白色粉晶白云岩泥岩;下部为棕灰色粉晶灰岩与灰色细晶白云质灰岩互层.		
	寒武系 E	上统 E <sub>3</sub>	510.0			浅海台地相—潮坪相(牙形石组合带).		
			523.0					
					0~170	灰绿色、紫红色泥岩夹灰岩或鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩及砂岩.		
		中统 E <sub>2</sub>	523.0			潮坪相—台坪相(顶部含牙形石).		
					0~140	紫红色泥晶白云岩或灰白色、浅灰色厚层白云岩夹灰绿色泥岩.		
	元古—太古界 Pt-Ar	下统 E <sub>1</sub>	570.0			潮坪相—台地相.		
						褐红色、灰白色混合花岗岩、混合岩、片麻岩及角闪片麻岩.		
混合花岗岩    白云岩    灰岩    砂岩    砾岩    泥岩    凝灰岩    玄武岩								

图 2 渤海湾盆地前古近系基底地层综合图

Fig.2 Generalised stratigraphic column of the Pre-Palaeogene basement in Bohai bay basin  
据徐长贵(2007)修改

约  $1978 \text{ km}^2$  (周心怀等, 2010). 研究区包括沙垒田凸起(源)与 4 个富生油凹陷(汇), 即渤中凹陷、沙南凹陷、南堡凹陷及歧口凹陷, 具有相对完整的源—汇体系, 面积约  $5800 \text{ km}^2$ , 累计石油勘探储量超过  $3.5 \times 10^8 \text{ t}$ (图 1).

华北地台的前古近系构成了渤海湾盆地古近系的基底, 也为渤海湾盆地古近系的发育提供物质基础(徐长贵, 2007). 基底自下而上依次发育太古界—元古界、下古生界、上古生界与中生界(图 2). 其中, (1) 太古界—元古界(Pt+Ar)属变质岩系褶皱基底, 岩性均为变质程度较深的花岗岩化、混合岩化作用强烈的混合岩, 如碎裂混合岩、眼球混合岩、黑云母花岗片麻岩等。(2) 下古生界为稳定型海相沉积, 包括寒武系(E)和奥陶系(O). 寒武系下部为海侵初期的砂砾岩, 紫色页岩和碳酸盐岩; 中部以海侵高峰期的浅滩鲕状灰岩为主; 上部以海退期的灰岩、泥质条带灰岩和泥质灰岩沉积为主。奥陶系主要为正常浅海灰岩、白云岩。(3) 上古生界为海陆交互相沉积, 包括石炭系(C)与二叠系(P). 石炭系(上统)发育潮坪、泻湖、沼泽相沉积的深灰色泥岩夹粉砂岩、灰岩及少量煤层。二叠系(下统)主要岩性为浅灰色河流相砂岩夹泥岩及煤层。(4) 中生界(Mz)时期海域分布广, 厚度大, 普遍钻遇, 渤西地区主要为一套杂色碎屑岩夹煤层, 局部火山岩系发育, 含丰富的植物化石。古近系不整合在中生界之上, 以陆相沉积为主。

## 2 基岩组成及年龄特征

### 2.1 岩石学特征

根据钻井岩心、岩屑的观察与镜下鉴定(图 3), 发现沙垒田凸起基岩的主要岩石类型为花岗岩、混合花岗岩、灰岩及白云岩。花岗岩及混合花岗岩在凸起区分布较广, 其中西段南侧的 SLTX1 井 2914.08 m 处花岗岩(图 3b)可见多种蚀变现象, 主要包括黑云母的绿泥石化、斜长石的绢云母化等; 2838.2 m 处混合花岗岩(图 3a)保留一定数量的暗色矿物较集中的斑点、条痕或团块, 以微晶石英为主, 分布不均匀, 具有交代结构。SLTX2 井 1890 m 处混合岩(图 3c)中存在后期热液侵入, 长石呈针状或板状结构, 1956 m 处混合花岗岩(图 3d)中斜长石存在明显交代作用, 指示后期热变质或混合岩化作用的影响。此外, 沙垒田凸起围区的砂岩中岩屑组分具相对稳定性, 可较好反映源区基岩特性(Wanders *et al.*, 2004; 方世虎等, 2006)。其中凸起西南部

近源侧 Qk3 井 4392 m 处砾岩与 Sn6 井 2718 m 处砂砾岩的薄片经过分析, 主要成分为正长石, 含少量石英及黑云母, 具花岗变晶、交代净边结构, 指示沙垒田凸起西段南侧物源区基岩组成以混合花岗岩为主(图 3e~3h).

沙垒田凸起西北部 SLTX6 井在 3441.4 m 处为含砾生物灰岩, 镜下岩屑骨架颗粒以腹足或介壳类生物灰岩岩屑为主, 含量约占 65% (图 3i, 3j). 镜下岩屑分选、磨圆差, 指示基岩处于高能碳酸盐岩沉积环境。此外, 沙垒田凸起东段北侧 SLTD19 井基底灰岩地层(1416~1437 m)中瓶状微化石和高肌虫、微古植物化石的发现, 证实该地区钻遇的灰岩地层属古生界下寒武统(张云慧等, 2001).

### 2.2 年代学特征

锆石定年是现今年代地层学研究中精度较高的技术方法, 通过测定盆地内单颗粒锆石的 U-Pb 年龄谱, 能有效指示物源区的背景、性质(Yuan *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2010; 刘强虎等, 2015; Liu *et al.*, 2016; 朱民等, 2016). 本次锆石 U-Pb 同位素在国土资源部天津地质矿产研究所采用激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)系统分析。激光束斑直径为  $35 \mu\text{m}$ , 以 He 作为剥蚀物质的载气。

基于沙垒田凸起东段基岩混合花岗岩样品的锆石测试分析, 年龄计算以 TEMORA(Black *et al.*, 2004) 作为外部锆石年龄标准, 元素含量以 NIST612(Andersen, 2002) 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。为追踪凸起区基岩年龄, 笔者分别从凸起北侧 SLTD1 井、SLTD11 井、SLTD19 井及南侧 SLTD31 井与 SLTD32 井中选取混合花岗岩样品, 获取对应深度段锆石年龄数据并制作谐和图, 年龄值分布范围宽( $1836 \pm 5 \text{ Ma} \sim 2956 \pm 2 \text{ Ma}$ )(图 4).

沙垒田凸起北侧 3 口井锆石年龄呈现为单峰特征, 即元古代(Pt,  $1836 \sim 2477 \text{ Ma}$ ), 该阶段以变质岩成因锆石为主, 变质岩锆石在 CL 图像中呈现为不同程度的溶蚀, 边缘具有明亮的加大边。其中 SLTD1 井( $N=5$ )第 1、2、3、4 号锆石测定数据拟合成的直线, 与谐和线上交点的年龄为  $2483 \pm 11 \text{ Ma}$ (图 4a); SLTD11 井( $N=6$ )锆石测定数据拟合直线与谐和线上交点的年龄为  $2471 \pm 49 \text{ Ma}$ (图 4b); SLTD19 井( $N=4$ )第 1、2、3 号锆石测定数据( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ )拟合成的直线与谐和线上交点的年龄为  $2047 \pm 11 \text{ Ma}$ (图 4c), 代表凸起北侧

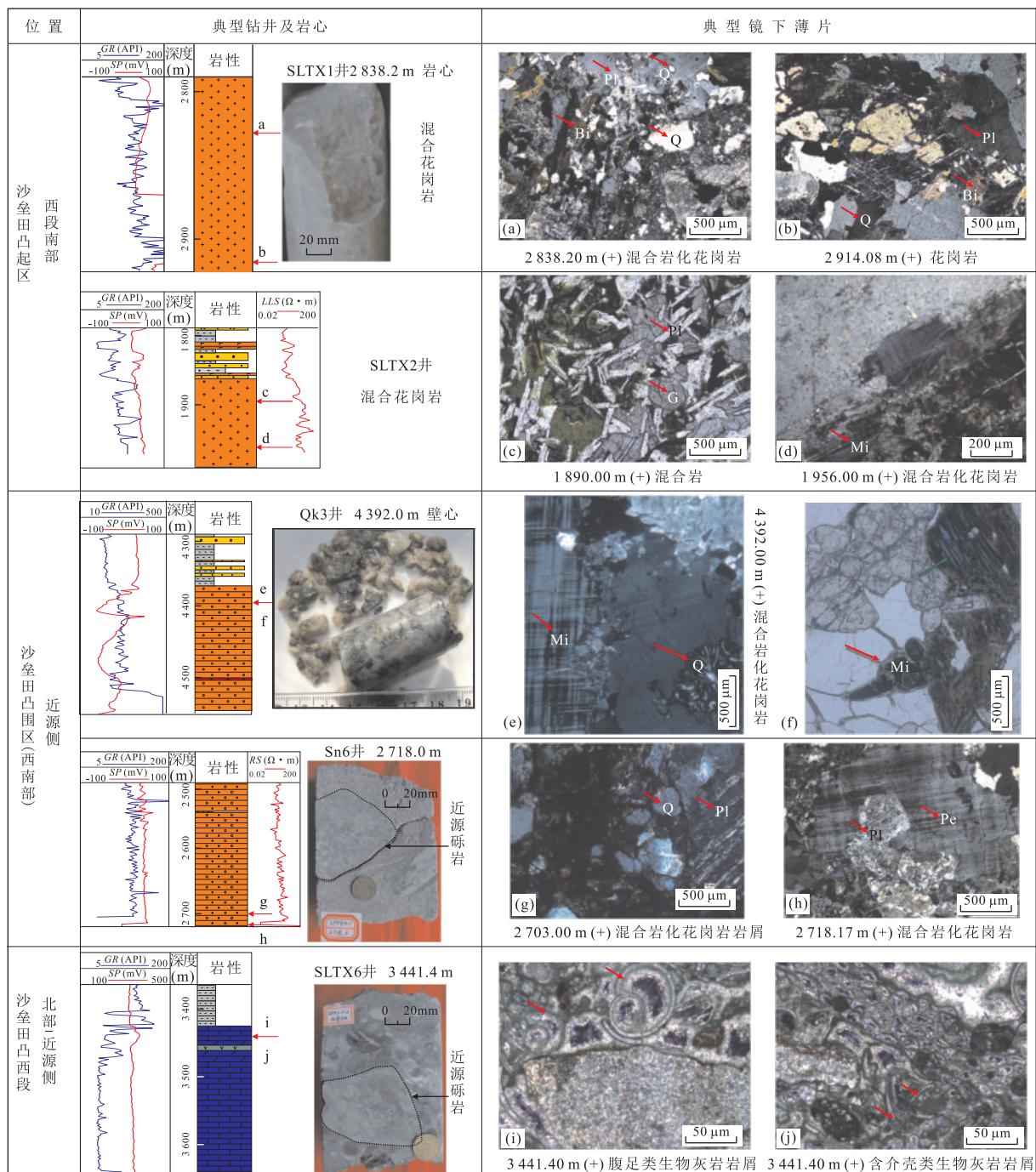


图 3 渤海湾盆地沙垒田凸起区基岩岩性及其微观组成特征

Fig.3 Bedrock lithologic and its micro characteristics in the Shaleitian uplift, Bohai bay basin

Pl.斜长石; Bi.黑云母; Q.石英; Mi.微斜长石; Pe.条纹长石

混合花岗岩生成年龄属古元古代( $Pt_1$ )。

沙垒田凸起南侧两口井锆石年龄也表现为单峰特征,即太古代( $Ar_{2671\sim2956}$  Ma),该阶段以变质岩成因锆石为绝对主体,CL 图像可识别出变质成因的核部和后期重结晶的边部,锆石边缘不规则,晶面复杂且伴随有碎裂、溶蚀现象。其中 SLTD31 井( $N=5$ )锆石测定数据拟合直线与谐和线上交点的年龄为  $2825\pm11$  Ma(图 4d); SLTD32 井( $N=4$ )第 1、2、3 号锆石测定数据拟合成的直线与谐和线上交点的年龄为  $2822\pm30$  Ma(图 4e),表征测定凸起南侧混合花岗岩生成年龄为新太古代( $Ar_3$ )。此外,混合花岗岩中存在较多捕获的晶锆石或残留的锆石,推测混合花岗岩曾发生过重熔或混杂有时代较老的岩石。

年龄为  $2825\pm11$  Ma(图 4d); SLTD32 井( $N=4$ )第 1、2、3 号锆石测定数据拟合成的直线与谐和线上交点的年龄为  $2822\pm30$  Ma(图 4e),表征测定凸起南侧混合花岗岩生成年龄为新太古代( $Ar_3$ )。此外,混合花岗岩中存在较多捕获的晶锆石或残留的锆石,推测混合花岗岩曾发生过重熔或混杂有时代较老的岩石。

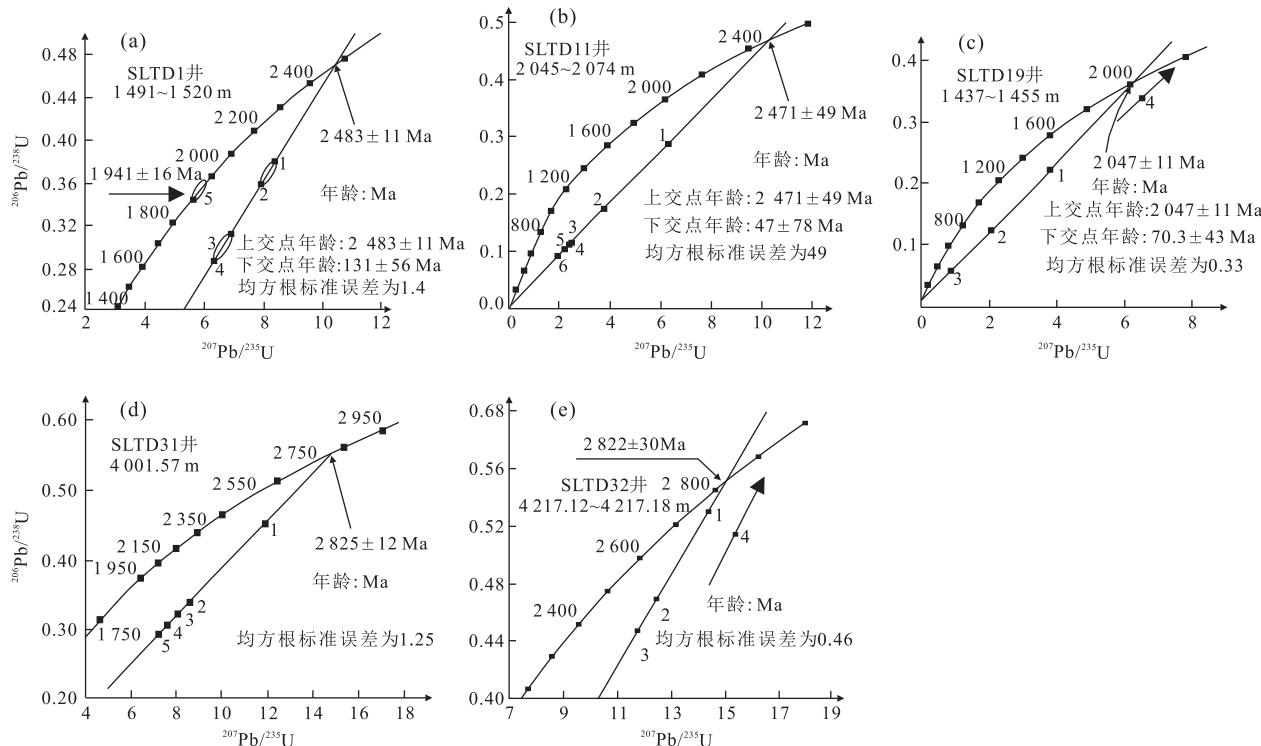


图 4 渤海湾盆地沙垒田凸起区前古近系基岩锆石 U-Pb 年龄分布特征

Fig.4 Zircon U-Pb ages distribution from the Pre-Palaeogene bedrocks in the Shaleitian uplift, Bohai bay basin

综上所述,根据锆石 U-Pb 同位素地质年龄测定结果,笔者认为沙垒田凸起东段北侧 SLTD1 井、SLTD11 井与 SLTD19 井混合花岗岩的成岩年龄为 2 047~2 483 Ma, 属古元古代吕梁造山早期的产物; 沙垒田凸起东段南侧 SLTD31 井与 SLTD32 井混合花岗岩的成岩年龄为 2 822~2 825 Ma, 属新太古代五台运动造山早期的产物。沙垒田凸起东段南北侧基岩年龄对比表明, 凸起南侧基岩地层较北侧形成时间早。与此同时, 沙垒田凸起西段钻井岩心及薄片指示南侧(SLTX1 井与 SLTX2 井)以花岗岩或混合花岗岩为主, 属元古界变质岩系基底; 北侧(SLTX3 井与 SLTX6 井)以生物灰岩或白云岩为主, 属下古生界海相—海陆相基底。沙垒田凸起岩石学特征与年代学特征分析表明, 古近系之前沙垒田凸起南侧基岩较北侧形成时间早, 且凸起东段基岩较西段形成时间早, 指示凸起东段南侧遭受相对较强的剥蚀作用。

### 3 基岩分布特征

#### 3.1 井—震标定

地震反射剖面具有很好的横向分辨率,结合钻

井标定可有效开展大范围的横向对比研究。因沙垒田凸起基底岩性及组成差异(图 3), 地震资料上表现出不同的波组反射特征。将钻遇基底的钻井同三维地震数据进行标定, 综合识别凸起区不同带内元古—太古界、下古生界及中生界对应的地震相类型(图 5)。

(1) 元古—太古界(Pt+Ar): 钻井岩心及薄片指示为混合花岗岩, 厚度大, 呈块状。沙垒田凸起东段南侧 SLTD32 井钻遇新太古代( $Ar_3$ )基底, 对应地震剖面呈现为中弱振幅、杂乱反射结构, 与上覆古近系充填反射呈突变接触(图 5a); 凸起东段北侧 SLTD1 井钻遇古元古代( $Pt_1$ )基底, 对应为中弱振幅、中低连续席状反射, 其底部过渡为大套中弱振幅、杂乱反射( $Ar_3$ ), SB8 界面(古近系地层底界面)之上与新近系充填反射呈突变接触(图 5b)。沙垒田凸起西段南侧 SLTX1 井钻遇中元古代( $Pt_2$ )基底, 约 197 m, 对应为中等振幅、杂乱反射, 与上覆古近系上超充填反射突变接触(图 5c)。

(2) 奥陶—寒武系(O+Є): 钻井岩心及薄片指示为生物碎屑灰岩或白云岩, 局部夹泥岩或泥质条带, 地层厚度 80~600 m, 呈北厚南薄。沙垒田凸起西段南侧 SLTX3 井钻遇奥陶—寒武系地层, 以灰岩夹薄层灰色泥岩为主, 后期存在玄武岩溢流或喷

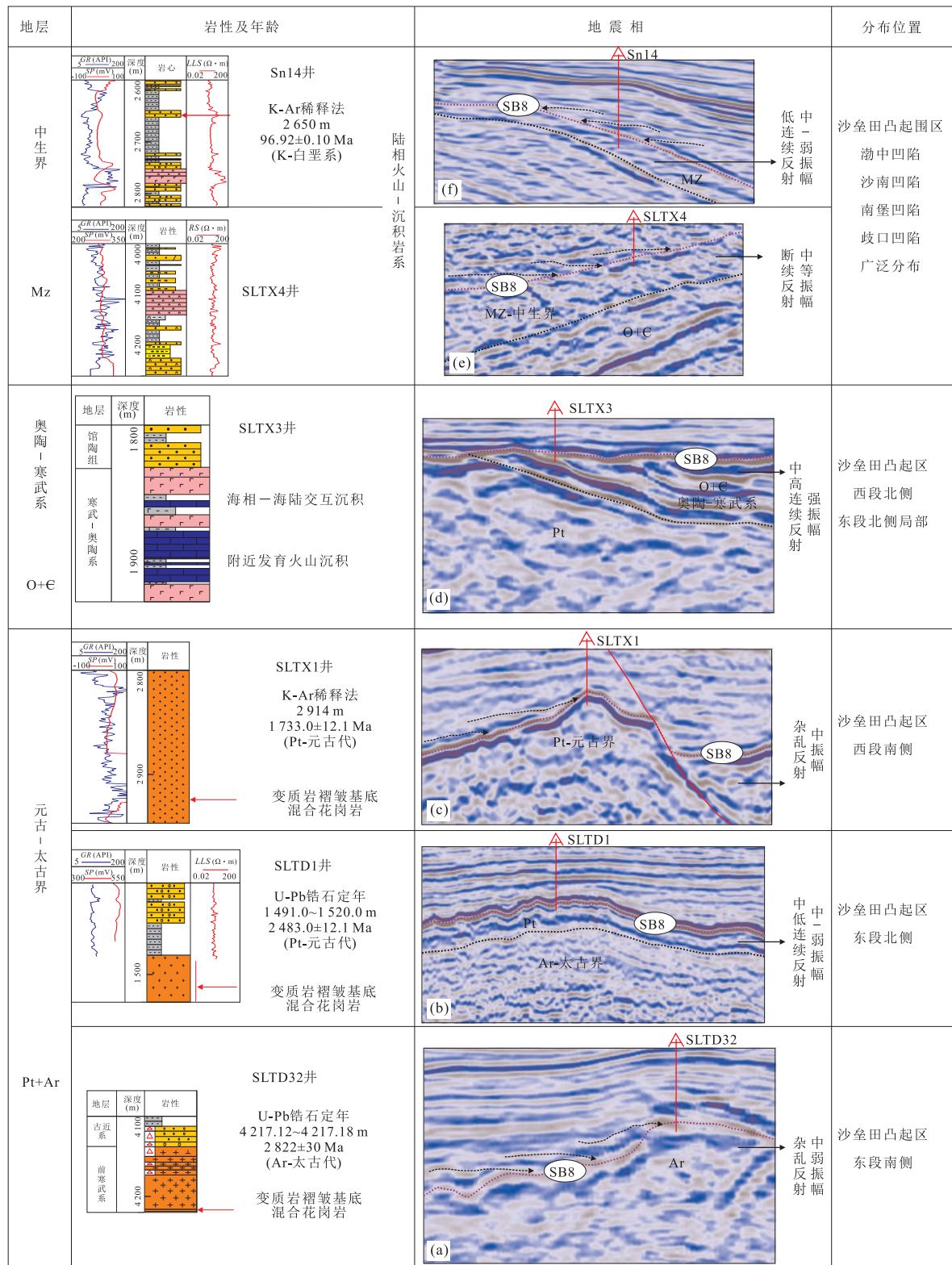


图 5 渤海湾盆地沙垒田凸起区前古近系基岩地震相类型及分布

Fig.5 Seismic facies types of the Pre-Palaeogene bedrocks and its distribution in the Shaleitian uplift, Bohai bay basin  
Ar.太古界; Mz.中生界; O+E.奥陶-寒武系; Pt.元古界

发,在地震剖面上表现为强振幅、中高连续反射,SB8界面处存在角度不整合削截终止特征(图 5d).

此外,奥陶-寒武系地层之下突变为中振幅、杂乱反射,对应中元古代(Pt<sub>2</sub>)基底.

(3) 中生界(Mz): 钻井岩心指示为杂色碎屑岩夹凝灰岩或玄武岩, 沉积厚度大, 围区广泛分布。沙垒田凸起西北部边缘区(歧口凹陷)SLTX4 井钻遇中生代基底, 厚约 253 m, 对应为中等振幅、断续楔状或发散状地震反射特征, 且 SB8 界面之上为稳定上超终止反射; 中生代地层与下伏奥陶—寒武系(O+C)地震波组间存在明显差异, 呈平行不整合接触(图 5e)。沙南凹陷南部边缘区 Sn14 井钻遇中生代白垩系基底, 厚度约 299 m, 对应为中弱振幅、低连续至空白发散状

地震反射, SB8 界面之上发育系列上超终止反射; 中生代地层之下发育一组中振幅、中低连续亚平行反射波组(图 5f), 可能对应上古生界。

总之, 沙垒田凸起区新太古代(Ar<sub>3</sub>)中弱振幅、杂乱席状反射近全区分布, 并出露于凸起东南侧; 古元古代(Pt<sub>1</sub>)中弱振幅、中低连续席状反射与中元古代(Pt<sub>2</sub>)中等振幅、杂乱反射地层水平叠覆于太古代基底之上, 广泛分布于沙垒田凸起东段及西段南侧; 奥陶—寒武系(O+C)中强振幅、中高连续亚平行反

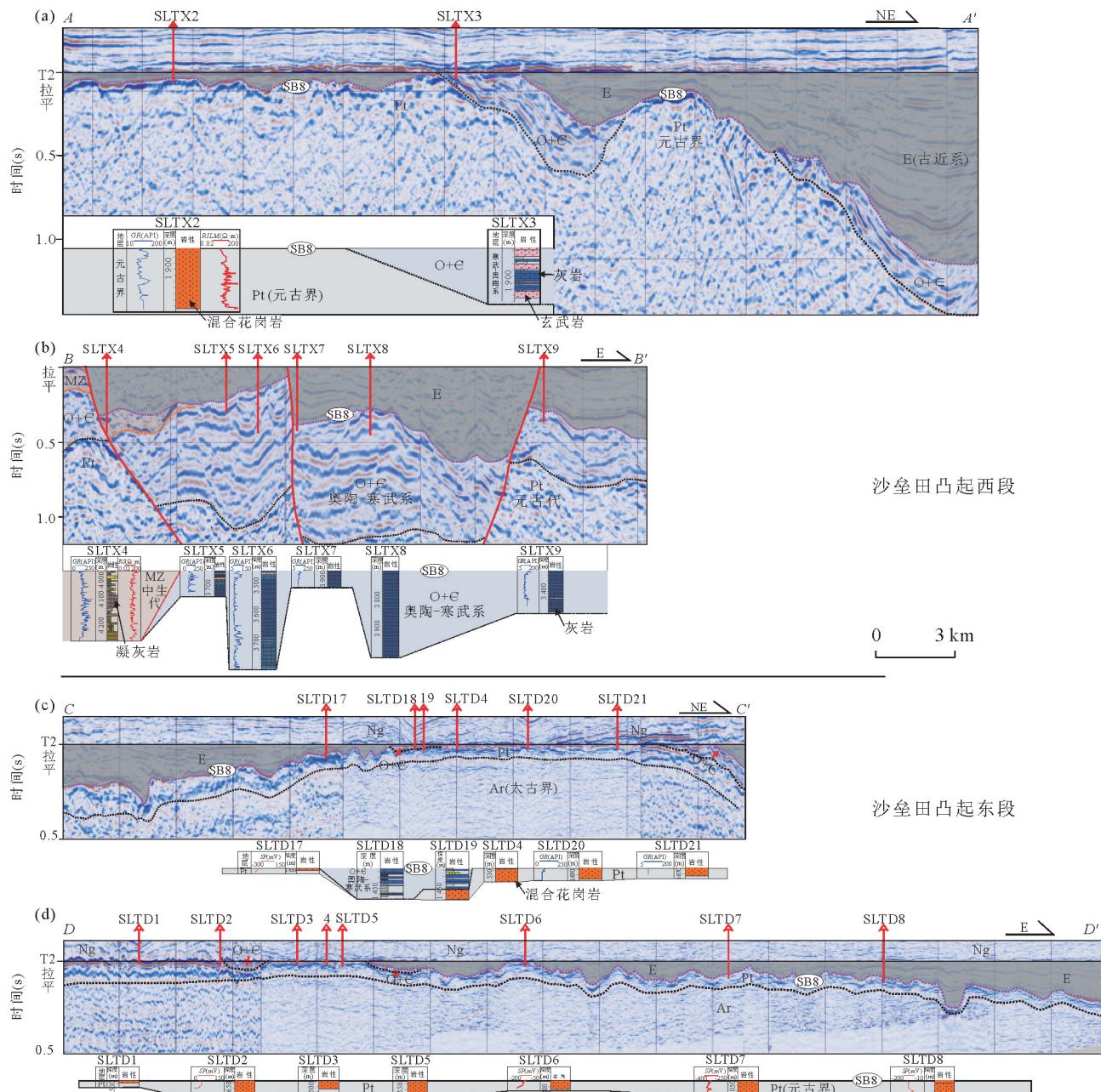


图 6 渤海湾盆地沙垒田凸起区前古近系连井—地震相特征

Fig.6 Connecting-well section and seismic facies characteristics of the Pre-Palaeogene bedrocks in the Shaleitian uplift, Bohai bay basin  
地震剖面位置见图 1

射地层叠置于元古代地层之上,分布于沙垒田凸起东段北侧局部及凸起西段北侧。中生代(Mz)中弱振幅、低连续至空白发散状反射地层广泛分布于沙垒田凸起围区同古近系呈不整合接触。

### 3.2 过井地震格架特征

据沙垒田凸起区钻遇前古近系基岩的 44 口钻井岩心资料、最新的三维地震资料及井震标定图版

(图 5),笔者分别选取沙垒田凸起西段与东段顺凸起走向(W-E)与垂直凸起走向(SW-NE)的典型过井地震格架剖面(图 6),分析凸起区前古近系基岩地层分布特征。

沙垒田凸起西段格架剖面 AA'(图 6a)垂直凸起走向并过 SLTX2 井与 SLTX3 井,自南向北,基岩地层由元古界(Pt)递变为奥陶—寒武系(O+€),

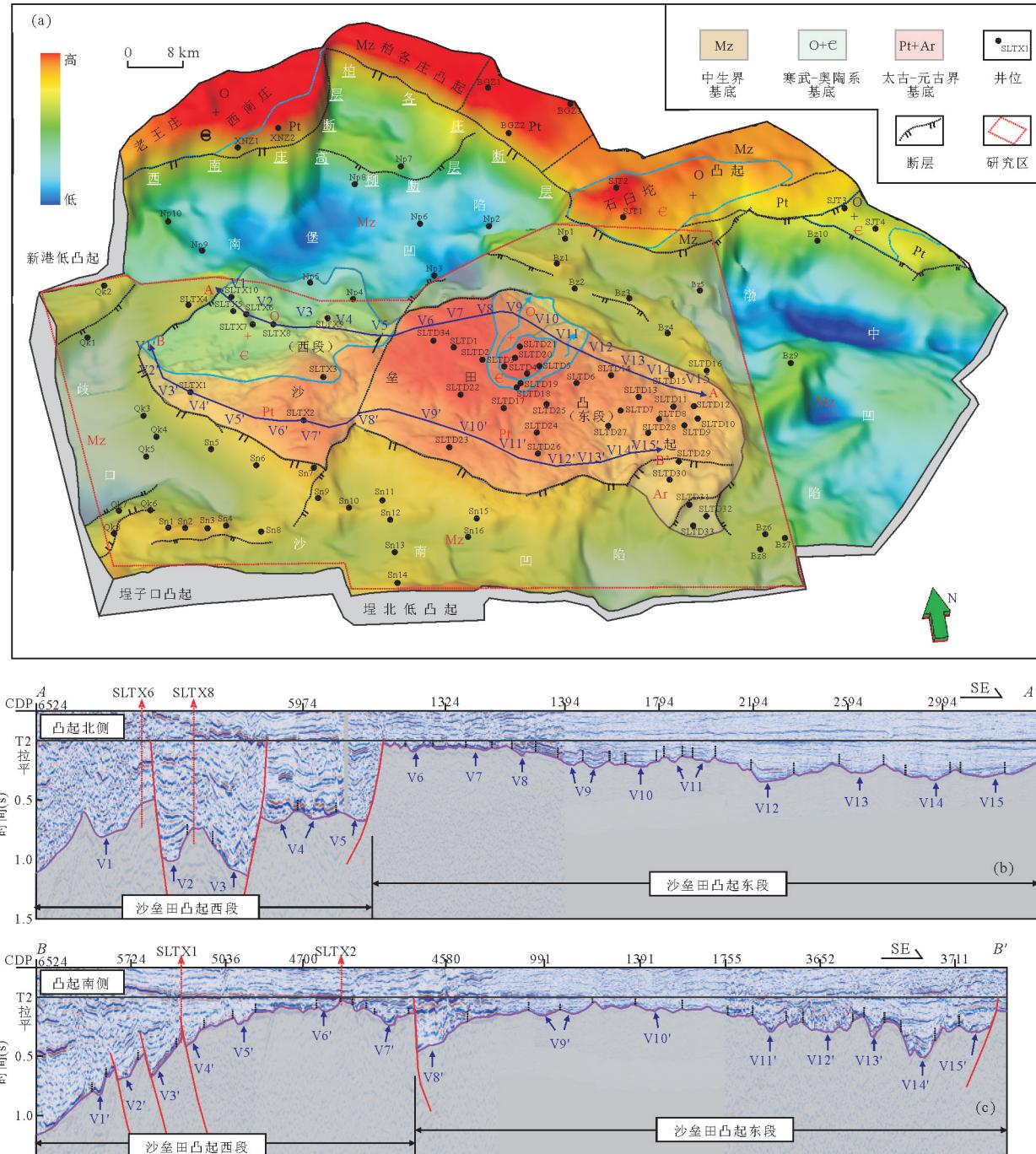


图 7 渤海湾盆地沙垒田凸起前古近系基岩分布(a)及南北侧(b,c)输导体系分布

Fig.7 Paleogeomorphology showing bedrock distribution characteristics of Pre-Palaeogene (a) and sediment-transport pathways (b, c) in the early stage of Paleogene, Shaleitian uplift, Bohai bay basin

其中南侧 SLTX2 井至 SLTX3 井间以发育中等振幅、杂乱地震反射为主,元古界混合花岗岩地层广泛出露,并遭受剥蚀,SB8 界面处指示多期沟谷发育。SLTX3 井对应为元古界(Pt)与奥陶—寒武系(O+Є)分界点,该井北侧基岩地层以中强振幅、中连续亚平行反射为主,并伴随明显的构造抬升与旋转,SB8 界面之下存在高角度削截终止反射,同时相对高势区的奥陶—寒武系(O+Є)受强烈剥蚀,无残余,出露元古界。凸起西段近东西向展布剖面 BB'(图 6b)过 SLTX4 井至 SLTX9 井等 6 口井,揭示西段北侧基底以大段稳定白云岩或灰岩地层为主,对应为中强振幅、中连续亚平行反射,受控于东西两侧断裂作用,奥陶—寒武系(O+Є)呈中部厚两侧薄分布特征。此外,剖面西侧凸起边缘处,可见小范围的中弱振幅、低连续充填反射,钻井标定为中生界陆相火山碎屑地层。

沙垒田凸起东段地层分布较为稳定,无明显同生断裂发育。南西至北东向格架剖面 CC'(图 6c)过 SLTD17 井至 SLTD21 井等 6 口井,自南向北,基岩地层由元古界(Pt)递变为奥陶—寒武系(O+Є),其中 SLTD4 井至 SLTD21 井间地层因持续抬升、剥蚀(削截终止),以元古界(Pt)混合花岗岩为主,对应为中弱振幅、中低连续席状反射,无奥陶—寒武系(O+Є)残留。中部 SLTD18 井与 SLTD19 井间相对地势较低,钻井指示残存薄层(36~60 m)奥陶—寒武系(O+Є)生物灰岩夹薄层泥岩沉积。SLTD21 井北侧发育稳定的中强振幅、中连续亚平行反射,并伴随高角度削截终止,指示为奥陶—寒武系(O+Є)地层。凸起东段近东西向展布剖面 DD'(图 6d)过 SLTD1 井至 SLTD8 井等 8 口井,自西向东,基岩以元古界(Pt)混合花岗岩为主,对应为中弱振幅、中低连续席状反射,其中西侧高势区 SLTD2 井与 SLTD3 井间与 SLTD5 井与 SLTD6 井间残余小范围内强振幅、中连续反射区,与格架剖面 CC' 相对应,呈环带状分布。即东段北侧相对高势区伴随强烈抬升、剥蚀作用,以元古界(Pt)为主,高势区四周相对地势较低处残留环带状的薄层奥陶—寒武系(O+Є)。此外,格架剖面指示凸起区呈现为沟谷化地貌,约束古近系展布。

### 3.3 古地貌指示的基岩展布特征及规律

古地貌是受研究区构造变形、沉积充填、差异压实、风化剥蚀等作用综合影响的结果,基于高分辨率三维地震数据体可视化显示,可以直观地观察、分析源区与汇区内各沉积要素(或单元)独特的形态及展

布特征(Posamentier and Kolla, 2003; Zeng *et al.*, 2011)。

通过沉降回剥分析技术,笔者恢复了沙垒田凸起区古近系古地理格局(图 7a)。图 7a 中沙垒田凸起受中部断裂分隔为东西两段,其中凸起西段面积约 720 km<sup>2</sup>,呈现出东南高西北低的格局;凸起东段面积约 1 600 km<sup>2</sup>,格局与西段相反,呈西北高东南低,且东段西北部较西段东南部高,总体格局与前古近系沙垒田凸起东西段构造演化吻合(石文龙等,2013)。综合测录井、岩心薄片、锆石定年、典型过井地震剖面及古地理格局分析,笔者明确了沙垒田凸起区前古近系基岩组成及分布。

沙垒田凸起基岩自南向北依次发育新太古—古元古界(Pt+Ar)混合花岗岩、下古生界(O+Є)碳酸盐岩与碎屑岩、中生界(Mz)火成岩与火山碎屑岩,其中中生代火成岩与火山碎屑岩广泛分布于沙垒田凸起围区,构造位置较低。沙垒田凸起东段基底以古元古界(Pt<sub>1</sub>)混合花岗岩为主,广泛分布,面积约 1 320 km<sup>2</sup>;新太古界(Ar<sub>3</sub>)主要分布于东南侧,面积约 200 km<sup>2</sup>;奥陶—寒武系(O+Є)仅发育于凸起东段北侧局部,呈环带展布(NE 向)并与古近系古地貌中相对低地势区(沟槽)吻合,且北部地层厚,向南侧逐步尖灭,面积约 80 km<sup>2</sup>。沙垒田凸起西段基底以奥陶—寒武系(O+Є)为主,分布于西段北侧,由北向南逐步超覆尖灭,面积约 420 km<sup>2</sup>;中元古界(Pt<sub>2</sub>)混合花岗岩与花岗岩地层分布于西段相对高势区,面积约 300 km<sup>2</sup>。

## 4 源—汇过程探讨

沙垒田凸起在古近纪早期主走滑作用的影响下(彭绪文等,2011,2012;石文龙等,2013),顺走滑断层发生相对滑动,产生破裂并遭受差异化剥蚀,在凸起上形成了多条沟道,同时发育多个高势点。在风化剥蚀作用下,凸起区(源)顺沟道或槽道为围区低洼地带(汇)提供物源供给。在凸起区(源)前古近系基岩组成及展布分析基础上(图 7a),笔者结合古地貌与地震剖面刻画古近系早期(沙河街组)物源通道(渠)分布与规模(图 7b,7c),并进一步根据古地貌指示的地形变化及边界样式(断裂体系)刻画古水系与汇水区(图 8a)。笔者结合汇区内古近纪早期重点区带典型地层切片(图 8b)与重点井镜下薄片(图 8c)刻画了沉积区(汇)扇体范围、平均砂体厚度及岩屑组成,综合构建了沙垒田凸起南北侧中深层储层

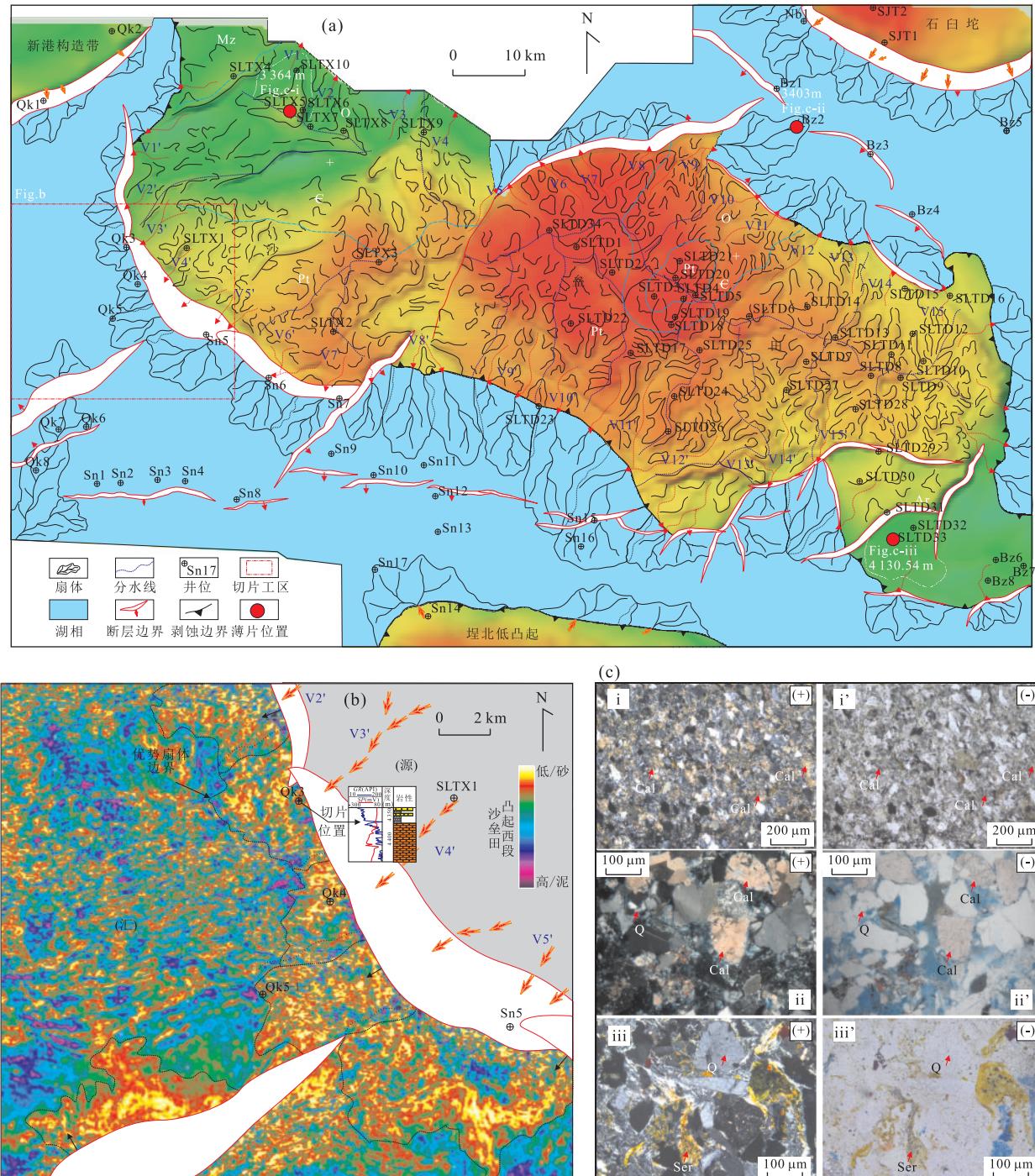


图 8 渤海湾盆地沙垒田凸起区古近纪早期源汇配置关系(a)及汇区典型地层切片(b)与镜下薄片分析(c)

Fig.8 Sediment-dispersal patterns of source-to-sink systems (a), representative strata slice (b) and thin sections analysis (c) in the early stage of Paleogene, Shaleitian uplift, Bohai bay basin

Cal. 方解石; Q. 石英; Ser. 钨云母; (+). 正交光; (-). 单偏光

的源—渠—汇配置关系(图 8a, 图 9),并探讨了沙垒田凸起南北侧不同汇水区的源—汇体系差异。

古近纪早期(沙河街组)源区沙垒田凸起区出露面积大,约 2 320 km<sup>2</sup>,作为主要物源区向围区供源(图 8a).其中,(1)沙垒田凸起西段北侧以奥陶—寒

武系灰岩供给为主,东段北侧以元古界混合花岗岩与奥陶—寒武系灰岩分区带供给,凸起南侧以元古界混合花岗岩供源为主;(2)沙垒田凸起西段北侧汇水面积大于南侧,凸起东段南侧汇水面积大于北侧(图 8a 中近东西向分水线指示);(3)沙垒田凸起西

源 汇	北部	奥陶-寒武系基岩			元古界基岩		奥陶-寒武系基岩		元古界基岩	
	汇水面积 (km <sup>2</sup> )	310	142		106	72	125	102	95	
渠	编号	V1 V2 V3	V4 V5	V6 V7 V8	V9	V10 V11	V12 V13	V14 V15		
	宽度(m)	4129 3024 4138	2365 3092	1510 1422 1599	3251	2620 2420	3853 4063	4122 4248		
	深度(m)	119 165 195	60 65	50 30 46	51	37 44	93 61	75 46		
	宽深比	35 18 21	39 48	30 48 35	63	70 55	41 66	55 92		
	长度(km)	11.5 10.2 20.3	17.6 14.8	7.5 8.6 10.2	18.4	16.7 17.2	15.4 13.2	13.0 14.7		
北 侧 汇 区	边界 样式	断裂缓坡 (3.6°)		断槽	断裂陡坡 (48°)		斜坡	断裂缓坡 (4.5°)	斜坡 (6.0°)	断裂缓坡 (6.8°)
	扇体面积 (km <sup>2</sup> )	/		>36.0	58.5		56.0	40.4	46.6	40.8
	地厚/砂厚 (m)	/		320/	500/		180/30	260/	220/	350/
	南部	元 古 界 基 岩								
渠	汇水面积 (km <sup>2</sup> )	104	116		64	108	74	80	170	152
	编号	V1' V2'	V3' V4' V5'	V6' V7'	V8'	V9'	V10'	V11' V12'	V13' V14' V15'	
	宽度(m)	595 1681	2227 1321 1454	1553 1280	3589	1419	1759	2544 2833	1504 3882 2451	
	深度(m)	32 69	97 67 56	42 63	162	31	52	65 62	92 178 45	
	宽深比	19 24	23 16 39	37 20	22	45	34	39 45.7	16 22 54	
南 侧 汇 区	长度(km)	13.0 5.8	8.2 10.7 9.8	10.9 9.6	21.4	20.5	23.8	24.9 21.6	14.5 18.6 15.8	
	边界 样式	断裂陡坡 (35°)	断裂陡坡 (32°)		断裂陡坡 (26°)	断槽	断裂缓坡 (3.2°)		斜坡 (3.8°)	断裂缓坡 (5.0°)
	扇体面积 (km <sup>2</sup> )	30.4	68.7		62.0	73.0	46.2 52.0	90.0		80.5
	地厚/砂厚 (m)	500/	600/120		700/100	360/	200/		260/145	300/

图 9 渤海湾盆地沙垒田凸起及围区古近纪早期源—渠—汇配置关系

Fig.9 Sediment-dispersal patterns of source-to-sink systems for the early stage of Paleogene in the Shaleitian uplift and surrounding areas, Bohai bay basin

段北侧输导体系规模大于南侧, 凸起东段南侧输导体系规模大于北侧(图 7b, 7c); (4)钻井及典型地层切片揭示沙垒田凸起东段南侧扇体规模(面积与厚度)大于北侧;(5)汇区古近系砂(砾)岩的镜下薄片指示沙垒田凸起西段北侧(SLTX5 井)对应砂岩的岩屑以碳酸盐岩屑(直径 60~80 μm)为主(图 8c-i, 8c-i'), 凸起东段北侧(Bz2 井)对应砂(砾)岩的岩屑以碳酸盐岩屑及变质岩岩屑(直径 10~120 μm)为主(图 8c-ii, 8c-ii'), 凸起东段东南侧(SLTD33 井)对应砂岩的岩屑以变质岩岩屑(直径 110~140 μm)为主(图 8c-iii, 8c-iii')。

半定量统计源区基岩组成、汇水面积、物源通道规模、汇区边界样式及扇体大小、性质间的源—汇配置关系(图 9)表明,(1)源区基岩组成直接决定汇区内物质组成, 因不同基岩类型砂体发育的质量和规模存在差异, 即碳酸盐岩基岩形成的碎屑颗粒较细且颗粒间碳酸盐胶结现象严重(图 8c-i); 而(混合)花岗岩母岩形成的碎屑颗粒较粗, 抗压实能力较强(图 8c-iii). 区内钻井揭示东段南侧砂体规模较北侧大且物性好。(2)源区内汇水面积大小决定供源量大小, 即基岩组成、通道规模及边界样式相近情况下, 汇水区面积越大, 源区风化、剥蚀区带越大, 物源供

给量越大;反之,供源量小,区内地层切片指示 V5' 对应扇体规模较 V4' 与 V3' 大(图 8b),此外东段南侧 V11' 与 V12' 交汇区对应扇体规模亦较 V9' 与 V10' 大。(3) 输导体系类型与规模决定源区向汇区搬运总量,即大型沟谷规模大,长期侵蚀,沟谷出口处沉积体系继承性发育,对应大型扇体;小型沟谷侵蚀时间短,对应小型扇体。钻井揭示东段南侧 V10' 与 V11' 对应扇体规模较北侧 V10 与 V11 大,且东段南侧 V12' 对应扇体规模明显较西段南侧 V1' 至 V5' 大。(4) 汇区内边界样式与可容空间控制砂体展布及范围,即断裂陡坡带(坡度大,盆缘断裂)控制下扇体呈现为面积小、厚度大(粒度粗)特征,而断裂缓坡带(坡度小,盆内断裂)控制下扇体呈现为面积大、厚度薄(粒度细)特征。钻井揭示凸起西段南侧 V3' 与 V4' 对应扇体面积较东段南侧 V11' 与 V12' 小,厚度大,但含砂率相对低;凸起东段北侧 V9 对应扇体面积明显较 V10 与 V11 大,厚度薄,而含砂率相对高。综合基岩组成、汇水面积、输导体系规模及汇区内边界条件推断可知,沙垒田凸起东段南侧储集砂体(V11' 与 V12' 交汇区)发育条件最优,西段北侧砂体(V3 区)发育条件次之,东段北侧砂体(V9 区)发育条件再次之,西段南侧储集砂体(V2'~V4' 区)发育条件最差。通过沙垒田凸起古近纪早期源—汇配置关系研究,可有效预测汇区内有利储集砂体分布规律与物质组成,系统指导沙垒田凸起围区中深部油气勘探。

致谢:感谢审稿专家及编委给予的指导、建议!

## References

- Allen, P.A., 2005. Striking a Chord. *Nature*, 434(7036): 961. doi:10.1038/434961a
- Allen, P.A., 2008a. From Landscapes into Geological History. *Nature*, 451: 274—276. doi:10.1038/nature06586
- Allen, P.A., 2008b. Time Scales of Tectonic Landscapes and Their Sediment Routing Systems. *Geological Society London Special Publications*, 296(1): 7—28. doi: 10.1144/SP296.2
- Allen, P.A., Hovius, N., 1998. Sediment Supply from Landslide-Dominated Catchments: Implications for Basin-Margin Fans. *Basin Research*, 10: 19—35. doi:10.1046/j.1365-2117.1998.00060.x
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1—2): 59—79. doi:10.1016/s0009-2541(02)00195-x
- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen, C.M., et al., 2004. Improved  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  Microprobe Geochronology by the Monitoring of a Trace-Element-Related Matrix Effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and Oxygen Isotope Documentation for a Series of Zircon Standards. *Chemical Geology*, 205(1—2): 115—140. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.01.003
- Fang, S.H., Guo, Z.J., Wu, C.D., et al., 2006. Jurassic Clastic Composition in the Southern Junggar Basin, Northwest China: Implication for Basin-Range Pattern and Tectonic Attributes. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 196—209 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y.L., Li, S.T., Lu, Y.C., 2013. Sequence Stratigraphy and Architectural Variability in Late Eocene Lacustrine Strata of the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Sedimentary Geology*, 295: 1—26. doi: 10.1016/j.sedgeo.2013.07.004
- Lin, C.S., Xia, Q.L., Shi, H.S., et al., 2015. Geomorphological Evolution, Source to Sink System and Basin Analysis. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 9—20 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C.S., Zheng, H.R., Ren, J.Y., et al., 2003. The Control of Syndepositional Faulting on the Eogene Sedimentary Basin Fills of the Dongying and Zhanhua Sags, Bohai Bay Rift Basin. *Science in China (Series D)*, 33(11): 1025—1036 (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
- Lu, L., Jiao, Y.Q., Wu, L.Q., et al., 2012. Reconstruction of Provenance-Sedimentary System of the First Member of the Paleogene Shahejie Formation in the Qikou Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(4): 629—638 (in Chinese with English abstract).
- Miller, E.L., Gehrels, G.E., Pease, V., et al., 2010. Stratigraphy and U-Pb Detrital Zircon Geochronology of Wrangel Island, Russia: Implications for Arctic Paleogeography. *AAPG Bulletin*, 94(5): 665—692. doi: 10.1306/10200909036
- Peng, W.X., Zhang, R.C., Fan, J.H., et al., 2011. Large Scale an Echelon Faults on the West Uplift in Bohai Gulf,

- China. *Oil Geophysical Prospecting*, 46(5): 795—801 (in Chinese with English abstract).
- Peng, W.X., Zhang, Z.Q., Jiang, L.Q., et al., 2012. Evolution of Strike-Slip Faults in the Shaleitian Bulge of the Western Bohai Offshore and Their Control on Hydrocarbons. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2): 204—212 (in Chinese with English abstract).
- Posamentier, H.W., Kolla, V., 2003. Seismic Geomorphology and Stratigraphy of Depositional Elements in Deep-Water Settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3): 367—388. doi: 10.1306/111302730367
- Shi, W.L., Zhang, Z.Q., Peng, W.X., et al., 2013. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation in the East Part of Shaleitian Sailent, Western Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 34(2): 242—247 (in Chinese with English abstract).
- Sømme, T.O., Helland-Hansen, W., Martinsen, O.J., et al., 2009. Relationships between Morphological and Sedimentological Parameters in Source-To-Sink Systems: A Basis for Predicting Semi-Quantitative Characteristics in Subsurface Systems. *Basin Research*, 21(4): 361—387. doi: 10.1111/j.1365-2117.2009.00397.x
- Sømme, T.O., Jackson, C.A.L., 2013. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the Møre-Trøndelag Area of Southern Norway: Part 2—Sediment Dispersal and Forcing Mechanisms. *Basin Research*, 25(5): 512—531. doi: 10.1111/bre.12014
- Sømme, T.O., Jackson, C. A. L., Vaksdal, M., 2013. Source-To-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the Møre-Trøndelag Area of Southern Norway: Part 1—Depositional Setting and Fan Evolution. *Basin Research*, 25(5): 489—511. doi: 10.1111/bre.12013
- Wandres, A. M., Bradshaw, J. D., Weaver, S., et al., 2004. Provenance Analysis Using Conglomerate Clast Lithologies: A Case Study from the Pahau Terrane of New Zealand. *Sedimentary Geology*, 167(1—2): 57—89. doi: 10.1016/j.sedgeo.2004.02.002
- Xu, C.G., 2007. Lithologic Trap Prediction of Paleogene under the Exploration Degree Area of Bohai Sea. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese).
- Xu, C. G., 2013. Controlling Sand Principle of Source-Sink Coupling in Time and Space in Continental Rift Basins: Basic Idea, Conceptual Systems and Controlling Sand Models. *China Offshore Oil and Gas*, 25(4): 1—11, 21 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C.G., Lai, W.C., Xue, Y.A., et al., 2004. Palaeo-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, C.G., Yu, S., Lin, C.S., et al., 2008. Structural Styles of the Paleogene Lacustrine Basin Margin and Their Control on Sedimentary Sequences in Bohai Sea Area. *Journal of Palaeogeography*, 10(6): 627—635 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. doi: 10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x
- Zeng, H. L., Loucks, R., Janson, X., et al., 2011. Three-Dimensional Seismic Geomorphology and Analysis of the Ordovician Paleokarst Drainage System in the Central Tabei Uplift, Northern Tarim Basin, Western China. *AAPG Bulletin*, 95(12): 2061—2083. doi: 10.1306/0311110136
- Zhang, Y. H., Liu, F. P., Jin, F. H., 2001. Pretertiary Stratigraphy of Shaleitian and Miaoxi Uplifts. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(6): 381—387 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Liu, Y. M., Wang, Y. L., et al., 2014. Volcanic Eruption Phases and 3-D Characterization of Volcanic Rocks in BZ34-9 Block of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 39(9): 1309—1316 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Yang, X. H., Zhou, X. H., et al., 2011. High Resolution Three-Dimensional Facies Architecture Delineation Using Sequence Stratigraphy, Seismic Sedimentology: Example from Dongying Formation in BZ3-1 Block of Western Slope of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 36(6): 1073—1084 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Yang, X. H., Zhou, X. H., et al., 2014. Three-Dimensional Facies Architecture Analysis Using Sequence Stratigraphy and Seismic Sedimentology: Example from the Paleogene Dongying Formation in the BZ3-1 Block of the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 51: 20—33. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2013.11.014
- Zhu, M., Chen, H. L., Zhou, J., et al., 2016. Provenance of Early Triassic in Yanyuan Basin, Upper Yangtze and Its Implication for the Tectonic Evolution. *Earth Science*, 41(8): 1309—1321.
- Zhou, X.H., Yu, Y.X., Tang, L.J., et al., 2010. Cenozoic Offshore Basin Architecture and Division of Structural Elements in

Bohai Sea, China Offshore Oil and Gas (Geology), 22(5):  
285—289 (in Chinese with English abstract).

242—247.

徐长贵, 2007. 渤海海域低勘探程度区古近系岩性圈闭预测.

北京:中国地质大学.

徐长贵, 2013. 陆相断陷盆地源—汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式. 中国海上油气, 25(4): 1—11, 21.

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.

徐长贵, 于水, 林畅松, 等, 2008. 渤海海域古近系湖盆边缘构造样式及其对沉积层序的控制作用. 古地理学报, 10(6): 627—635.

张云慧, 刘福平, 金芳红, 2001. 沙垒田、庙西凸起前第三纪地层研究. 中国海上油气(地质), 15(6): 381—387.

朱红涛, 刘依梦, 王永利, 等, 2014. 渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34-9 区带火山岩三维刻画及火山喷发期次. 地球科学, 39(9): 1309—1316.

朱红涛, 杨香华, 周心怀, 等, 2011. 基于层序地层学和地震沉积学的高精度三维沉积体系——以渤中凹陷西斜坡 BZ3-1 区块东营组为例. 地球科学, 36(6): 1073—1084.

朱民, 陈汉林, 周静, 等, 2016. 上扬子西南盐源盆地早三叠世物源体系及构造意义. 地球科学, 41(8): 1309—1321.

周心怀, 于一欣, 汤良杰, 等, 2010. 渤海海域新生代盆地结构与构造单元划分. 中国海上油气(地质), 22(5): 285—289.

## 附中文参考文献

方世虎, 郭召杰, 吴朝东, 等, 2006. 准噶尔盆地南缘侏罗系碎屑成分特征及其对构造属性、盆地格局的指示意义. 地质学报, 80(2): 196—209.

林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等, 2015. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析. 地学前缘, 22(1): 9—20.

林畅松, 郑和荣, 任建业, 等, 2003. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制. 中国科学(D辑), 33(11): 1025—1036.

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.

吕琳, 焦养泉, 吴立群, 等, 2012. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沙一段物源—沉积体系重建. 沉积学报, 30(4): 629—638.

彭文绪, 张如才, 樊建华, 等, 2011. 渤海海域西部凸起区大型雁列断层特征. 石油地球物理勘探, 46(5): 795—801.

彭文绪, 张志强, 姜利群, 等, 2012. 渤海西部沙垒田凸起区走滑断层演化及其对油气的控制作用. 石油学报, 33(2): 204—212.

石文龙, 张志强, 彭文绪, 等, 2013. 渤海西部沙垒田凸起东段构造演化特征与油气成藏. 石油与天然气地质, 34(2):