

doi:10.3799/dqkx.2017.127

沙垒田凸起古近纪源—汇系统中有利储层评价与预测

李顺利^{1,2}, 朱筱敏^{1*}, 刘强虎³, 徐长贵⁴, 杜晓峰⁴, 李慧勇⁴

1. 油气资源与工程国家重点实验室, 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

3. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452

摘要: 渤海湾盆地沙垒田凸起与围区凹陷形成了典型的陆相断陷湖盆源—汇系统。基于钻井、地震、岩心及储层分析资料, 刻画了沙垒田凸起及围区源—汇系统要素特征, 并将源—汇系统分为断裂陡坡型、断裂缓坡型、斜坡型及断槽型 4 大类。不同类型源—汇系统的物源供给控制相应的沉积体系发育, 从而影响其储层的成岩作用与物性特征。研究表明, 沙垒田凸起围区凹陷的储层发育受源—汇系统要素耦合与成岩作用的共同控制, 其中断裂缓坡带由于源区高差与汇水面积大, 沿断裂带分布的沉积体系与砂体规模大、范围广, 砂岩成分、结构成熟度较高, 埋深浅、机械压实作用较弱, 次生孔隙发育, 为优质储层发育的有利区, 而断裂陡坡型、斜坡型及断槽源—汇系统次之。

关键词: 源—汇系统类型; 成岩作用; 储层分类; 沙垒田凸起; 石油地质; 沉积。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2017)11-1994-16

收稿日期: 2017-05-17

Evaluation and Prediction of Favorable Reservoirs in Source-to-Sink Systems of the Palaeogene, Shaleitian Uplift

Li Shunli^{1,2}, Zhu Xiaomin^{1*}, Liu Qianghu³, Xu Changgui⁴, Du Xiaofeng⁴, Li Huiyong⁴

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

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

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

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

Abstract: The Shaleitian uplift and its surrounding areas in the Bohai bay basin constitute a typical Source-to-Sink (S2S) system in terrestrial rift basin. Based on the data of drilling, seismic, core, and reservoir analysis, this paper illustrates element characteristics of S2S systems in the Shaleitian uplift and its surrounding areas. The S2S systems are classified into four types, namely, faulted-steep-slope, faulted-gentle-slope, gentle-slope, and faulted-trough. Different S2S systems controlled various depositional systems, and subsequently influenced their reservoir diagenesis and properties. Research results indicate that reservoir development in sags around the Shaleitian uplift was influenced both by element coupling of the S2S systems and diagenesis. The faulted-gentle-slope was characterized by high elevation of source rocks and catchment area, which developed large scale of depositional systems and sandbodies along the fault break zones. The sandstone in this kind of S2S systems was high quality reservoirs with high maturity of component and texture, shallow buried depth, weak mechanical compaction, and abundant secondary porosity. However, other S2S systems including faulted-steep-slope, gentle-slope, and faulted-trough developed less high quality reservoirs.

Key words: source-to-sink system; diagenesis; reservoir classification; Shaleitian uplift; petroleum geology; sedimentary.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41272133); 博士后基金项目(No.2015M581269); 国家科技重大专项(No.2016ZX05024-002-002)。

作者简介: 李顺利(1987—), 男, 讲师, 从事碎屑岩沉积学、储层地质学研究及相关教学工作. ORCID: 0000-0002-5373-2323.

E-mail: lsl@cup.edu.cn

* 通讯作者: 朱筱敏, E-mail: xmzhu@cup.edu.cn

引用格式: 李顺利, 朱筱敏, 刘强虎, 等, 2017. 沙垒田凸起古近纪源—汇系统中有利储层评价与预测. 地球科学, 42(11): 1994—2009.

陆相断陷盆地源—汇系统主要包括3大体系要素,即物源体系(母岩体系)、沉积物搬运通道及沉积体系。物源体系与沉积物搬运通道在时空上相互关联作用,控制盆内沉积体系的类型、规模及演化模式。源—汇系统的概念最初来自现代海洋沉积学研究(Anthony and Julian, 1999),近年引入到古代沉积系统领域的研究中(Allen, 2008),它强调了从剥蚀地貌与沉积地貌的变化、演化来分析地质历史(林畅松等,2015)。近20年来,源—汇系统概念开始在大陆边缘沉积作用的研究中兴起,被认为是沉积体系半定量分析的基础。20世纪90年代末开始在沉积学研究中引入源—汇系统分析的概念和思想(周祖翼,2008;徐长贵,2013),源—汇系统分析已经成为沉积学研究热点之一。近年来,许多重大地球科学的研究计划都设立了关于源—汇系统的长期研究工作,如美国国家自然科学基金会与联合海洋学协会组织的“大陆边缘科学计划(MARGINS Program Science Plans)”,把从造山带的物源区、到冲积平原、浅海陆架,最终到深海盆地的源—汇系统列为近10年的4大重要研究领域之一。欧洲多国结合国际大陆计划(InterMARGINS)和国际大洋发现计划(IODP)发起了“EUROSTRATAFORM计划”,着重了解从“源”到“汇”的沉积系统,理解和模拟地中海和北大西洋边缘由河流经浅海陆架和峡谷到深海的无机和有机颗粒的搬运过程,确定沉积物搬运过程、通道和通量的时空变化特征及其对沉积地层形成的作用和贡献(解习农等,2012)。

渤海湾盆地是中国重要的油气勘探开发区和主要的能源基地。渤海湾盆地古近系发育多套有利的生储盖组合,是油气富集的主要层系之一。经过数十

年的油气勘探工作,地质学家对渤海湾盆地古近纪的构造特征、层序地层及沉积体系等方面开展了系统研究(朱筱敏等,2003;冯有良等,2010;李三忠等,2010;任建业等,2010),且深入研究构造—沉积充填响应关系(林畅松等,2003;徐长贵等,2004;林畅松,2009;夏存银等,2010;徐桂芬等,2016)。其中,林畅松等(2003)探讨了沾化凹陷古近纪同生断裂作用对沉积充填的控制作用;徐长贵等(2004)通过古地貌恢复识别古沟谷与地形坡折,刻画沉积体系的类型并预测有利储集砂体的展布;夏存银等(2010)通过研究歧口凹陷的构造演化、沉积体系展布及沉积旋回,探讨了盆地构造活动和沉积充填之间的控制和响应关系。然而,目前研究多侧重如构造、层序、沉积或者构造—沉积充填响应等方面,而源—汇系统对储层及有利区发育的控制作用研究相对较少。众所周知,储层质量受构造、沉积、成岩作用控制,其中成岩作用为直接控制因素,而构造、沉积作用作为源—汇系统形成的重要因素,对储层发育同样起到重要的间接控制作用。构造样式与沉降速率通常控制沉积物供给与粒度粗细,从而影响储集性能。不同的沉积作用形成的沉积相带类型差异同样导致储层性能的变化(刘国全等,2012)。不同沉积环境,其储层性能差别很大,比如三角洲前缘分流河道沉积,由于其具有较强的水动力环境、碎屑颗粒分选磨圆好且粒度偏粗,其储层的抗压实能力就较强,容易保存原生剩余孔隙,故该种沉积相对应的储层储集性能好,孔隙度高且孔喉连通性好(孟元林等,2006)。

沙垒田凸起区位于渤海湾盆地西部,平面上呈现为近东西向展布(彭文绪等,2012;石文龙等,2013)(图1)。它是渤海海域内古近纪早期出露面积

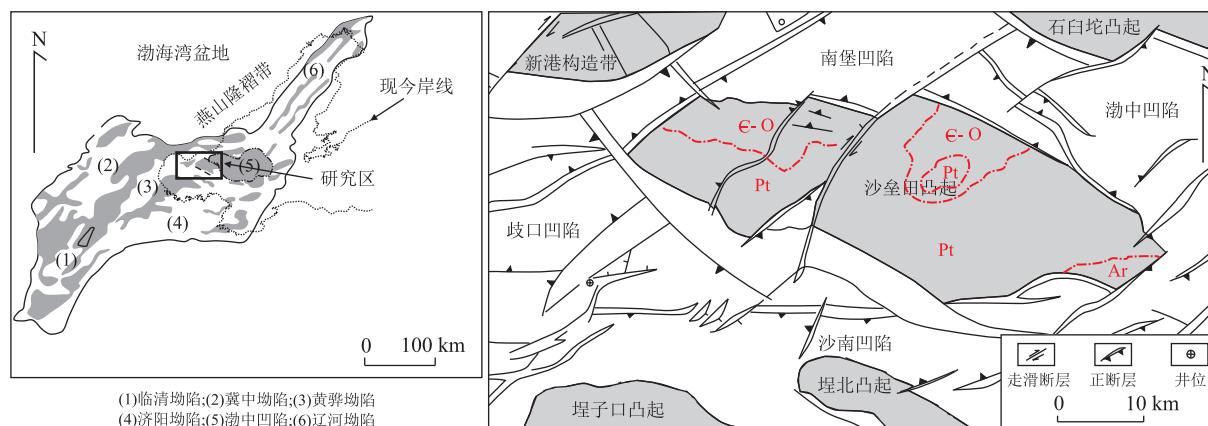


图 1 渤海湾盆地沙垒田凸起及周围地质概况

Fig.1 Geological settings of the Shaleitian uplift and surrounding area in the Bohai bay basin

最大的盆内凸起区(物源区),其中东西长约 80 km,南北宽 20~30 km,总面积 1 978 km²(周心怀等,2010).沙垒田凸起周缘分别发育渤海中凹陷、南堡凹陷、歧口凹陷及沙南凹陷,在古近纪形成典型的源—汇耦合系统.该系统中由沙垒田凸起分别向周缘各凹陷提供物源供给,并形成规模连片的沉积体系.因此,(1)本文充分利用地质与地球物理资料,以沙垒田凸起及其围区凹陷为例(图 1),开展沙垒田凸起与围区凹陷古近系沙河街组源—汇系统分析,包括凸起源区识别、汇水区域划分、沟谷规模刻画、沉积体系展布;(2)分析沙垒田凸起围区凹陷古近系储层成岩作用与储层特征;(3)预测沙垒田凸起围区凹陷有利储层分布,并探讨源—汇系统类型对储层发育的控制作用.

1 区域地质概况

大量的区域地质研究表明,渤海湾盆地古近纪属伸展走滑型盆地(戴俊生等,1997;侯贵廷等,2001;李理等,2015).其在新生代演化中具有多旋回叠加和多成因机制复合的特征,整体可划分为 4 个演化阶段(汤良杰等,2008;徐长贵等,2008;Zhu et

al., 2014;朱伟林等,2015):裂陷期阶段(孔店组至沙三段,65~38 Ma)、断坳期阶段(沙二段至东二段,38~24.6 Ma)、坳陷期阶段(东一段至明下段,24.6~5.1 Ma)、新构造影响期阶段(明上段~现今).渤海湾盆地在不同的演化阶段呈现出不同的构造样式与沉积充填响应特征.受渤海湾盆地裂陷幕与区域构造运动的影响,古近纪沙垒田凸起及围区在强烈的裂陷作用下,主要发育多组正断层,同时由于伴随的走滑作用,发育部分走滑断层(彭文绪等,2012).新近纪盆地进入坳陷阶段,裂陷作用不明显,主要是受郯庐断裂的走滑等水平构造应力控制,形成一系列雁列式走滑断裂(黄雷,2015).

渤海湾盆地渤西地区自下而上依次发育基底、古近系及新近系(图 2).渤海湾盆地渤西地区古近系由下至上发育孔店组—沙三段(断陷期)、沙二段—东营组(断坳期).(1)孔店组至沙四段沉积时期(裂陷 I 幕):该时期沉积范围小,洼陷间分隔性强,且以干旱炎热气候为主;(2)沙三段沉积时期(裂陷 II 幕):始新世中晚期开始,凹陷沉降迅速,各凹陷逐渐连通,但仍受盆地内隆起(如沙垒田、埕子口、石臼坨等凸起)的分割影响;(3)沙一二段沉积时期(裂陷 III 幕):沙一段为湖盆扩张期,地形稳定,隆起区范

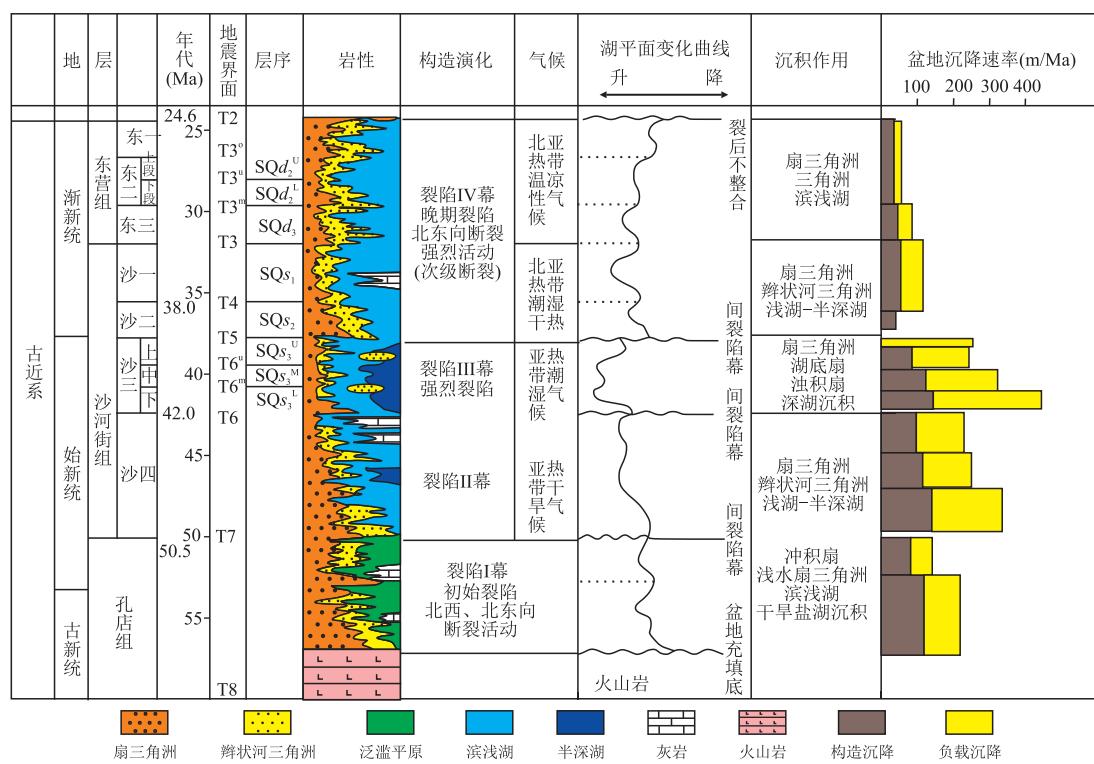


图 2 渤海湾盆地沙垒田凸起及围区古近系综合柱状图

Fig.2 Integrated stratigraphic column of the Paleogene in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin

围渐小,滨浅湖相广泛发育,盆内相对高势区碳酸盐岩台地或滩坝相继承性发育;(4)东营组沉积时期(裂陷 IV 幕):东营组沉积早期(东三段时期),湖侵范围相对扩大,因凸起区遭受持续、长时间剥蚀,地形高差减小,盆内凸起出露范围相应减小,湖区范围明显扩大(徐长贵等,2008).各间裂陷幕(裂陷幕间歇期)的构造运动则形成了相应的不整合界面(图 2).

2 源—汇系统要素分析

2.1 母岩性质与汇水体系

根据研究区钻井岩心、岩屑的观察与镜下鉴定,沙垒田凸起的基岩类型主要为花岗岩、混合花岗岩、灰岩及白云岩.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(张云慧等,2001;刘强虎等,2016).

在凸起区(源)对前古近系基岩组成及古地貌刻画,首先根据分割南北两侧的(I 级)分水岭将沙垒田分为南北两个汇水区域,进而分别依据南北两大汇水区域内的次级(II 级)分水岭将沙垒田凸起自西向东按顺时针方向划分为 20 个汇水区(a~t)(图 3a).沙垒田凸起在古近纪早期受走滑拉张作用影响(彭文绪等,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(刘强虎等,2016).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.汇水区 a~f 位于沙垒田凸起西段,g~s 区位于东段,t 区位于东西段间的断槽内(图 3a).沙河街组沉积时期,沙垒田凸起及围区出露面积大,面积为 2 094 km²,且与围区地形高差大,可作为主要物源区向围区供源.

2.2 搬运通道类型

沙垒田凸起及围区共识别出 3 大类沉积物搬运通道体系,即古沟谷、断沟、变换带搬运通道(图 3b, 3c).其中,古沟谷物源通道主要分布于沙垒田凸起东段;断沟物源通道存在单断、双断及断面输导形式,主要发育于沙垒田凸起西段及东西段衔接区带;变换带物源通道主要发育于沉积区内,此外沙东北与沙东南构造区存在断裂变换调节带控制源区沉积物向汇区输导.

沙垒田凸起东段南侧以太—元古代混合花岗岩基底为主,北侧对应为元古代与寒武—奥陶系混合

基岩,经长期差异分化、剥蚀,在凸起不同汇水区带及同一汇水区不同位置可见不同类型的古沟谷.据古沟谷的几何形态与分布,可分为 V 型、U 型及 W 复合型古沟谷.在源区上游以侵蚀下切作用为主,常发育 V 型古沟谷,其水动力强,水系分支少,携砂能力较强;源区中段水道(沟谷)频繁迁移、摆动,以发育 U 型古沟谷为主,其输导、携砂能力最强;源区下游水道分叉,水动力相对减弱,常可见 W 复合型古沟谷发育,其输导、搬运沉积砂体能力相对减弱(近沉积卸载区)(朱红涛等,2011, 2013).

断沟搬运通道在凸起西段及东西段衔接处极为发育,存在单一断沟、双断沟及断面槽道 3 种类型.因沙西构造区复杂的应力环境,使得沙垒田凸起西段顺断沟或断面供源方向与汇区内系列 NE 向断裂带走向相近,具有断沟物源搬运通道发育的条件.单断沟常与单一断裂体系差异沉降作用相关,在垂直物源通道方向呈现为不对称的箕状结构,内部地震反射对应为楔形杂乱或充填.两组同向断裂体系所形成的双断层,垂直断沟方向地震呈现为近平行的充填结构,因水动力强度差异,在沙垒田凸起西段以中低连续至断续反射为主.断面槽道常与基岩的组成有关,并在空间上与单断沟、双断沟形成对接.

变换带是由正断层伸展位移诱导出的构造变形带(Morley *et al.*, 1990; 漆家福, 2007),变换带搬运通道主要发育在沙西构造区、沙东北构造区、沙东南构造区及沙南构造区.凹陷边部的近同向或对向排列组合的断层叠覆区对源区与汇区内物源方向、通道及沉积体堆积具有显著的约束作用.沙垒田凸起及其围区共发育 3 类 4 种变换带:单线型、同向型(趋近、叠覆)、对向型(叠覆).其中单线型是指单一正断层形成的变换带;同向型是指两条断层倾向一致(趋近指两条断层彼此接近,而叠覆为两条断层彼此部分重叠);对向型是指两条断层倾向相向.沙河街组沉积时期,研究区单线型断面槽道输导为主,沉积体垂直于断层走向展布,范围小、厚度大.

2.3 沉积体系类型与砂体展布

古近纪沙垒田凸起围区主要发育扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊(滨浅湖与半深湖)、滩坝及重力流 5 种沉积相类型(图 4).扇三角洲岩性上(CFD8-4-1、CFD18-2-2D、CFD16-3-1)表现为块状或者槽状交错层理砂砾岩,底部多见冲刷面,沉积序列整体为多期叠置的向上变细的正粒序,局部夹薄层的泥岩.在测井曲线上的响应多为厚层高幅锯齿箱状;扇三角洲在地震剖面上表现为中低频、中弱振幅,连续性较

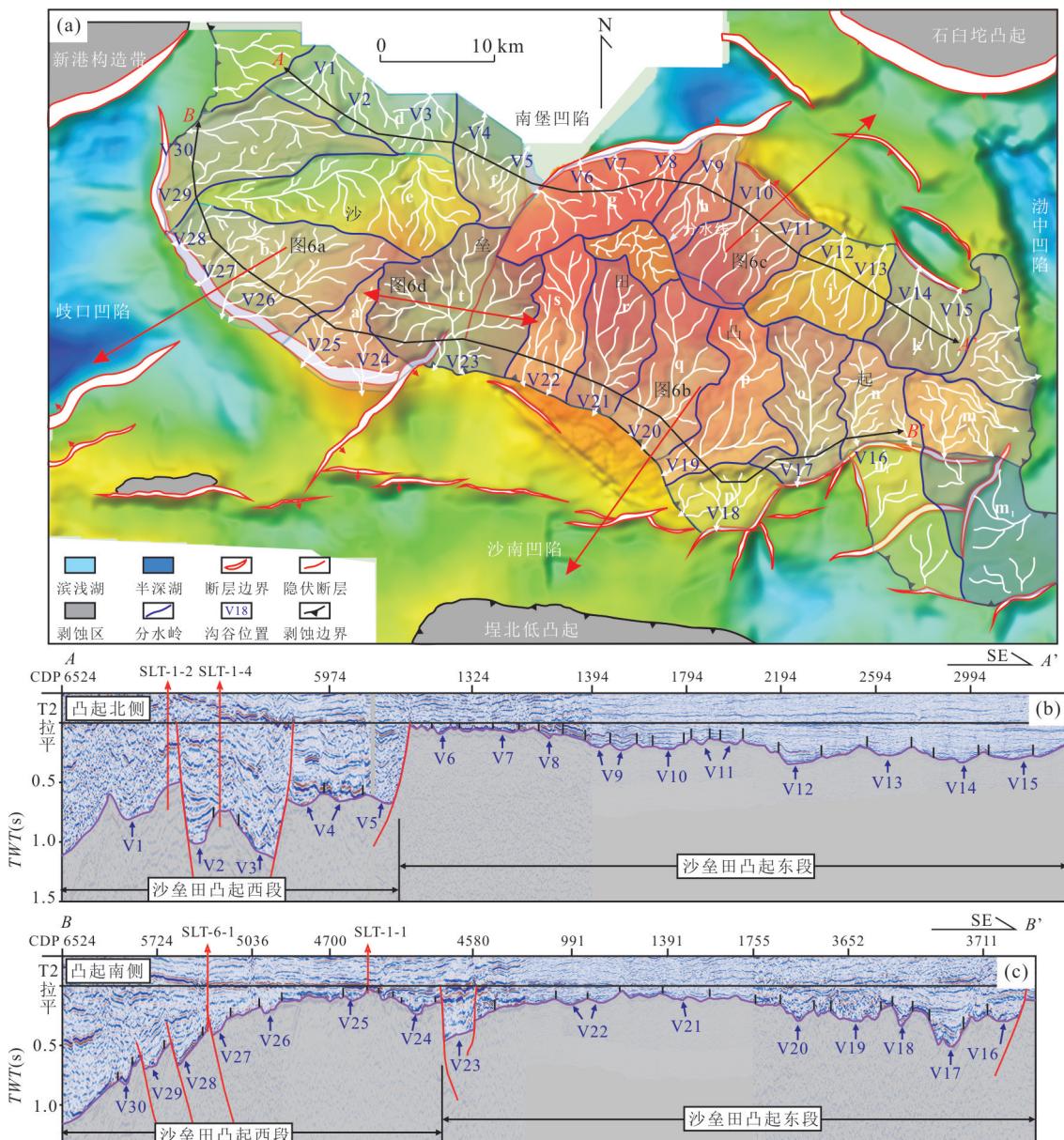


图 3 渤海湾盆地沙垒田凸起古近纪汇水体系与搬运通道分布

Fig.3 Distribution of catchment area and transport pathways in the Paleogene on the Shaleitian uplift, Bohai bay basin

差,多为楔形杂乱反射或者前积反射;辫状河三角洲岩性(CFD11-2-1、CFD18-2E-1D、CFD1-6-1)上多见槽状、板状交错层理砂岩夹泥岩,发育向上变细的正粒序与向上变粗的反粒序,整体多为正反粒序叠置的砂泥互层;在测井曲线上多为多期反旋回的叠置特征;在地震剖面上主要为中低频、中弱振幅、中连续性为特征,常见前积反射结构,浊积体在岩性(CFD16-3-1)上多为中层块状粉细砂岩,粒序不明显,见泥岩撕裂屑,发育变形层理;测井曲线表现为舌形特征;地震反射特征为低频杂乱,多为透镜状结构;滩坝岩性(CFD2-1-2)上表现为中层状中细砂岩,发育楔形或板状交错层理;测井曲线上多为指状

特征;在地震剖面上主要为中低频、中低振幅,中低连续性的透镜状特征。滨浅湖—半深湖岩性(QK18-1-3、QK18-1-2D)上多为块状或水平层理灰色、深灰色泥岩夹薄层粉砂岩;测井曲线则表现为低幅锯齿状;在地震上多为中高频、中高振幅、连续性好的特征(图 4)。

本文根据研究区钻、测井资料以及地震属性特征,对沙垒田凸起及围区的沉积砂体展布进行了精细刻画,受文章篇幅与主旨限制,本文仅展示古近纪优势相砂体的宏观分布规律,具体论证过程详见本团队发表的其他文章(李顺利等,2017)。沙垒田凸起围区以发育系列连片(或裙带状)的近源粗粒扇三角

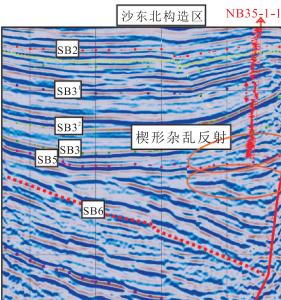
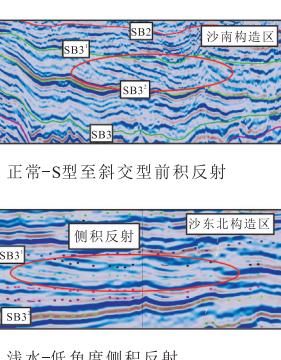
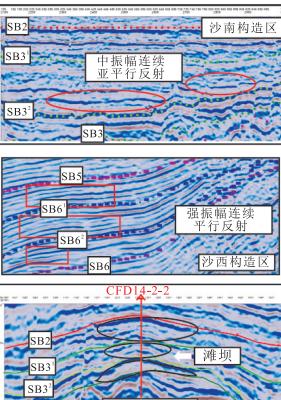
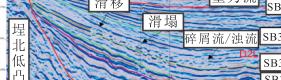
相	亚相	测井/录井相	岩心相	岩心照片	沉积特征	地震响应	发育层位(构造区)
扇三角洲	扇三角洲平原	SQs ₃	CFD8-4-1 深度(m) CFD8-4-1 2 717.0 2 718.0 2 718.3	SQs ₃	中粗砾岩、砾石大小混杂，块状或弱粒序，多期冲刷，测井响应为高幅箱状锯齿形。		SQd ₁ (A/B/D/G区) SQs ₁ (A/B/D/E/G/H区) SQs ₃ (沙垒田凸起围区)
	扇三角洲前缘	SQd ₁	CFD18-2-2D 深度(m) CFD18-2-2D 4 128.5 4 129.0	SQd ₁	中细砾岩、砾石分选中等，发育板状交错层理，块状或弱粒序，测井响应为高幅漏斗锯齿形。		
	SQS ₁₂	CFD16-3-1 深度(m) CFD16-3-1 3 151.0 3 152.0	SQS ₁₂	细砂岩、粉细砂岩为主，滑变层理发育，粒序不明显，测井响应为中幅锯齿形。			
辫状河三角洲	三角洲平原	SQd ₂ ¹	CFD11-2-1 深度(m) CFD11-2-1 2 803.0 2 804.0	SQd ₂ ¹	粗砂岩与中粗砂岩夹紫红色泥岩为主，多期正粒序叠置，测井响应为钟形。		SQd ₂ ¹ /SQd ₂ ² (凸起围区) SQd ₁ (C/E/F区) SQs ₁ (C/E/F区)
	三角洲前缘	SQS ₁₂	QK18-2-E-1D 深度(m) QK18-2-E-1D 2 803.0 2 804.0	SQS ₁₂	中粗、中细砂岩为主，块状层理或者板状交错层理为主，整体为反粒序特征，测井响应为漏斗形。		
	SQd ₂	CFD1-6-1 深度(m) CFD1-6-1 2 779.0 2 780.0	SQd ₂	粉砂质泥岩、泥岩为主，块状层理或水平层理，无明显粒序特征，测井响应为低幅锯齿形。			
湖泊	滨浅湖	SQS ₁₂	QK18-1-3 深度(m) QK18-1-3 2 936.0 2 937.0 2 938.0 2 940.0	SQS ₁₂	粉砂岩与泥岩互层，水平或小型沙纹层理，无明显粒序特征，测井响应为低幅锯齿形。		SQd ₂ ¹ /SQd ₂ ² (凸起围区) SQd ₁ (沙垒田凸起围区) SQs ₁ (沙垒田凸起围区) SQs ₃ (沙垒田凸起围区)
	半深湖	SQS ₁₂	QK18-1-2D 深度(m) QK18-1-2D 3 612.0 3 613.0	SQS ₁₂	泥岩、油页岩为主，发育水平层理，无明显粒序特征，测井响应为低幅平直形。		
	SQS ₁₂	CFD2-1-2 深度(m) CFD2-1-2 3 440.4 3 441.0 3 442.0	SQS ₁₂	中细砾岩、砾石主要为碳酸盐岩碎屑，砾石定向排列，发育大量生物介壳化石。			
滩坝	SQd ₂	CFD14-3-2 深度(m) CFD14-3-2 2 901.72	SQd ₂	中细砂岩，局部含砾，见变形构造与小型断层，泥岩撕裂屑，块状层理为主，测井响应为高幅锯齿形。		SQd ₂ ¹ /SQd ₂ ² (A/C/E/H区) SQd ₁ (A/C区) SQs ₁ (A/C/E/H区) SQs ₃ (A/E/H区)	
重力流	SQd ₃	CFD16-3-1 深度(m) CFD16-3-1 2 901.0	SQd ₃	中细砂岩，局部含砾，见变形构造与小型断层，泥岩撕裂屑，块状层理为主，测井响应为高幅锯齿形。		SQd ₂ ¹ /SQd ₂ ² (G/H区) SQd ₁ (A/B/G/H区) SQs ₁ (A/B/G/H区) SQs ₃ (A/B/H区)	

图 4 渤海湾盆地沙垒田凸起及围区古近系沉积体系类型

Fig.4 Types of depositional systems of the Paleogene in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin

SP 单位为 mV; GR 单位为 API; RS、RT、LLD、RILM、RMSFL 单位均为 $\Omega \cdot m$; 深度单位为 m

洲砂体为主，沉积体垂直于断裂走向或顺古沟谷物源通道入湖；在沙南构造带扇三角洲前端断裂调节区发育滩坝—浊积扇组合沉积；凹陷深洼带通常发育湖相沉积(图 5)。在断槽与古沟谷搬运通道的控制下，来自沙垒田凸起母岩风化的产物垂直断裂入湖，形成近源堆积，其扇体规模通常与对应汇水区面积及断槽规模密切相关。而在沙南构造带，由于断块的

差异沉降或掀斜作用，形成局部的构造隆起区，水体较浅且能量较高，易形成滩坝体系。而在断层的下降盘，通常由于滑塌作用而形成浊积体(图 5)。总的来说，该时期富砂型扇三角洲体系普遍发育，扇体范围最小为 6.3 km^2 ，最大可达 62.9 km^2 ，钻遇砂体厚度为 42~150 m。

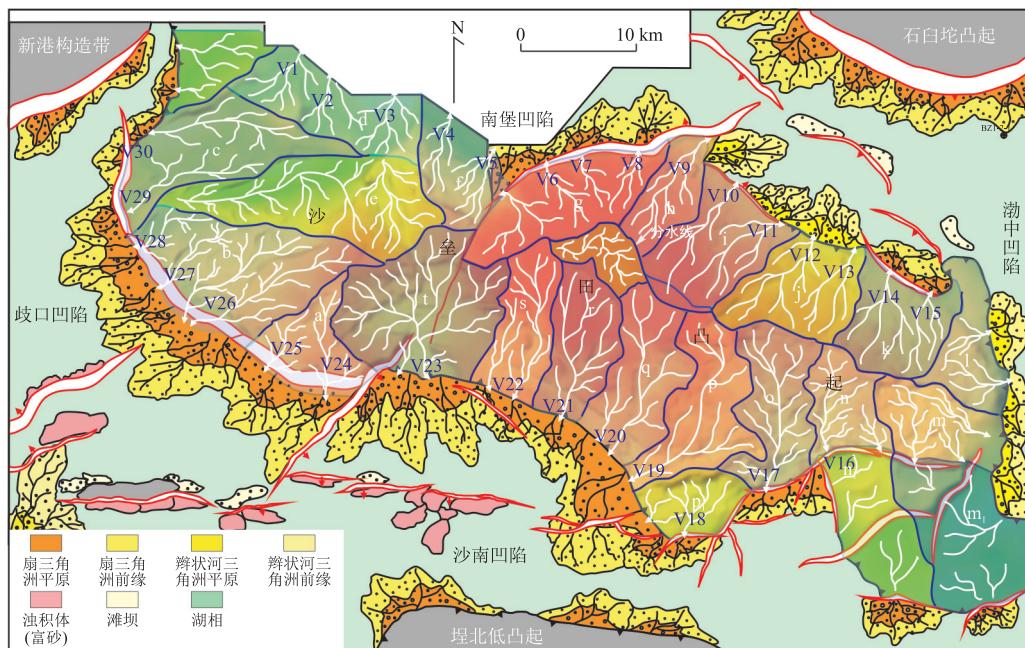


图 5 渤海湾盆地沙垒田凸起及围区古近系沉积砂体类型与展布特征

Fig.5 Types and distribution of Paleogene sedimentary sandbodies in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin

3 沙垒田凸起古近纪源—汇系统类型

本文依据源区性质、汇水体系、搬运通道及边界样式特征,将沙垒田凸起古近纪源—汇系统划分为断裂陡坡型、断裂缓坡型、斜坡型及断槽型 4 大类。其中,汇水体系 a,b,c,g 属于断裂陡坡型;d,i,k,s,r,o,n 属于断裂缓坡型;e,h,j,l,m,p,q 属于斜坡型;f,t 属于断槽型(图 3)。

断裂陡坡型源—汇系统主要发育在沙西南构造区、沙西构造区及沙北构造区内(图 3),其边界断裂倾角大($>15^\circ$),对构造样式与沉积充填控制作用明显。断裂陡坡型源—汇系统源区高差大,最大可达 1 487 m,汇水面积最大可达 70.7 km²。沉积物搬运通道类型以断沟或 V 型沟谷为主,平均宽度约为 1 400 m,深度约 52 m。整体来说,在断裂陡坡型源—汇系统内,源区(混合花岗岩)汇水区风化剥蚀物质顺断沟与沟谷等物源通道经垂向断面向断裂下降盘堆积,形成连片分布或呈裙带状展布的近源粗粒扇三角洲—滑塌(浊积扇)沉积体系(图 6a),其汇水区面积、垂向高差、物源通道规模与汇区内扇体面积、厚度在同一时间段内平行对比呈正相关关系。在一定时期内,该类型的源—汇系统的要素配置关系保持稳定,即形成稳定的物源(混合花岗岩汇水区及垂向高差)—搬运通道(断沟/沟谷)—近源粗粒扇三角洲(重力流)—湖泊体系耦合模式。

断裂缓坡型源—汇系统主要发育于沙东北构造区与沙南构造区(图 3),以单一断裂或多级断裂缓坡型边界为特征(图 6b)。断裂缓坡型源—汇系统源区高差中等,最大可达 1 210 m,源区汇水面积最大可达 103.9 km²。沉积物搬运通道以变换带与相对窄浅型沟谷为主(V 或 U 型),同时经近平直或弧形的断面调节控制,在凹陷边缘形成中小型的近源粗粒扇三角洲体系,上部通常叠覆晚期的辫状河三角洲体系。受(多级)断阶的控制,该类型源—汇系统通常发育较为稳定的母岩—变换带—扇三角洲/辫状河三角洲—湖泊体系。

斜坡型源—汇系统主要发育在沙垒田凸起东段,无明显的边界断裂控制,是较为普遍的一种源—汇耦合模式。该系统主要是源区(南侧混合花岗岩与北侧碳酸盐岩)碎屑沉积沿着继承性(宽浅型)古沟谷物源通道在地形坡折处卸载堆积而成,地形坡度通常较缓,坡度约为 $1^\circ\sim3^\circ$ (图 6c)。母岩区的风化产物通常沿 U 型或 W 复合型沟谷向低势区搬运,在凹陷内发育受坡折带调节控制的辫状河三角洲体系。断槽型源—汇体系主要发育在沙垒田凸起中部,受区域走滑断层控制,在凸起中部形成了以边界断层对向控制的断槽(图 6d)。沙垒田凸起东西两侧的母岩风化之后经源区的沟谷体系搬运至断槽内,从而分布向沙南与沙北搬运并沉积,形成规模较大的扇三角洲或辫状河三角洲体系。

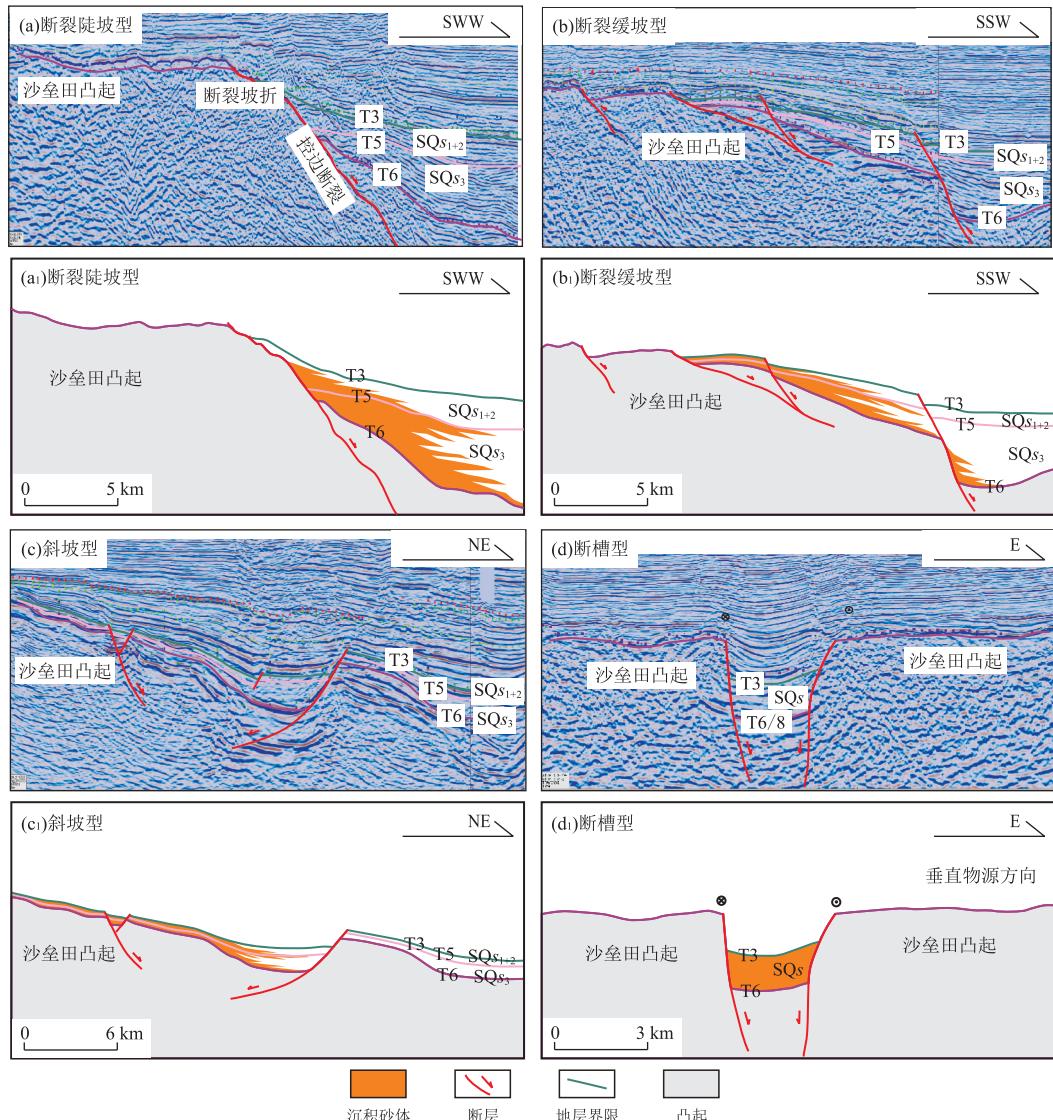


图 6 渤海湾盆地沙垒田凸起及围区源—汇系统类型

Fig.6 Types of Source-to-Sink systems in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin

$$\text{地震剖面时深关系 } y = 0.0002x^2 + 0.6975x + 105.4, R^2 = 0.9995$$

4 古近系储层成岩作用与分类

4.1 储层特征

岩石学特征:对沙垒田凸起周缘凹陷中沙河街组 14 口井 75 块岩石样品进行分析与统计可知,岩屑质长石砂岩占 59.6%;长石岩屑质石英砂岩占 28.5%;岩屑质长石砂岩、长石质岩屑砂岩和长石砂岩含量很少,含量均低于 10%。研究区储层的碎屑成分中石英的含量在 25%~55%,平均值 41%,峰值为 35%~45%;岩屑的含量在 17%~31%,平均值 24%,峰值为 20%~25%;长石的含量为 22%~34%,平均值 32%,峰值为 28%~33%。因此,整体上研究区沙河街组储层岩性以岩屑质长石砂岩为主,

发育少量长石岩屑质石英砂岩、长石质岩屑砂岩和长石砂岩(图 7a)。其中岩屑质长石砂岩主要分布在沙垒田凸起南侧(断裂陡坡型、断裂缓坡型源—汇系统),而凸起北侧则以长石岩屑质砂岩、长石砂岩为主(斜坡型源—汇系统)。

物性特征:研究区储层孔隙度为 0.5%~27.0%,均值 17.2%;渗透率为 0.02~190 mD,均值 86.7 mD,属于物性较为一般的砂岩储层。研究区储层孔隙类型包括原生孔隙与次生孔隙。其中,原生孔隙包括原生粒间孔隙和原生晶间孔隙;次生孔隙包括次生粒间溶蚀孔隙、次生粒内溶蚀孔隙和填隙物溶蚀孔隙。整体上,沙河街组储层的孔隙类型以次生粒间溶蚀孔隙为主,其含量占孔隙总量的 39.6%;其

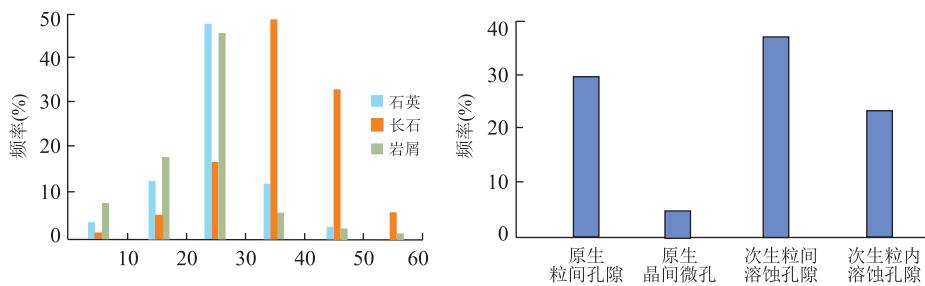


图 7 沙垒田凸起围区沙河街组储层岩石学与物性特征

Fig.7 Petrology and physical property of Paleogene reservoir in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin
a.碎屑组分相对含量;b.储层孔隙类型及频率

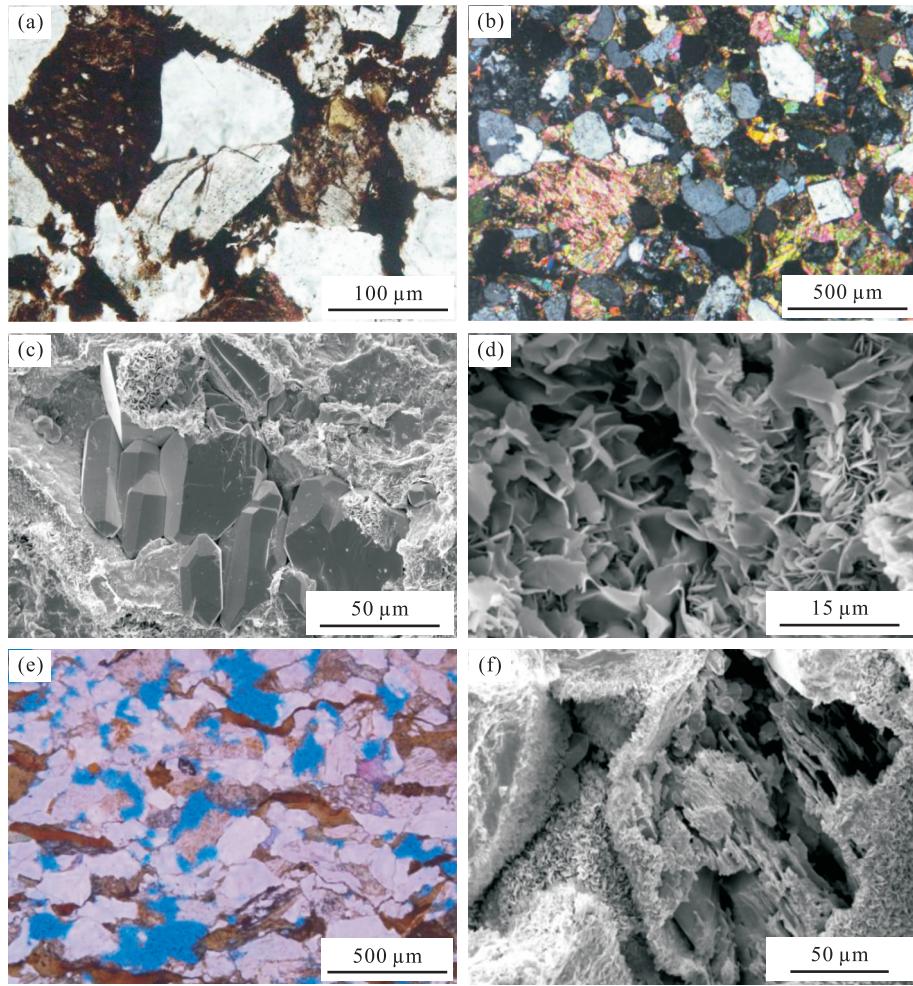


图 8 沙垒田凸起围区沙河街组储层成岩作用特征

Fig.8 Reservoir diagenetic characteristics of the Shahejie Formation in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin
a.颗粒受机械压实作用呈线接触;SLT-3-1 井,3 830.54 m;b.嵌晶状方解石胶结;SLT-2-1 井,3 165.80 m;c.自生石英晶粒,SLT-2-1,3 281.30 m;d.绿泥石及伊利蒙混层粘土,SLT-3-1 井,3 787.00 m;e.粒间溶孔,SLT-1-4D 井,3 991.20 m;f.粒内溶蚀孔隙,SLT-1-1,3 673.80 m

次为原生粒间孔隙,其含量约占 28.4%;次生粒内溶孔含量约为 24.5%,原生晶间微孔含量最少,仅为 8.0%(图 7b).沙垒田凸起南侧(断裂陡坡型、断裂缓坡型源—汇系统)的储层孔隙类型以次生溶蚀孔隙为主,而北侧(斜坡型源—汇系统)次生孔隙度

相对较低.

储层物性特征与源区母岩类型及供源能力密切相关,其中源区基岩组成直接决定汇区内物质组成,沙垒田凸起西段北侧的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,而沙垒田凸

起西段南侧与东段的(混合)花岗岩母岩形成的碎屑颗粒较粗,抗压能力较强,故研究区内钻井揭示东段南侧砂体规模较北侧大且物性好(刘强虎等,2016).同时沙垒田凸起南侧的源区高差大,物源供给速率高,沉积物粒度粗,储层物性好,而沙垒田凸起北侧由于源—汇高差相对小,碳酸盐岩风化剥蚀速率低,沉积物粒度相对偏细,导致储层物性相比南侧较差.

4.2 成岩作用类型与成岩序列

沙垒田凸起围区沙河街组储层的成岩作用主要包括机械压实作用、碳酸盐岩胶结(交代)作用、石英的自生加大作用、自生粘土矿物充填作用、溶蚀作用.研究区内机械压实作用主要发生在埋深为2 800~3 900 m 的阶段,主要使砂岩颗粒的接触关系发生改变,由点接触变为线接触、凹凸接触甚至缝合线接触(图 8a).沙河街组碳酸盐胶结物以方解石为主(图 8b),随深度的增加方解石胶结强度有所减弱,3 800~3 900 m 处达到最低,随后方解石的胶结强度开始增强;白云石的胶结程度随深度增加逐渐增强,浅层的白云石胶结程度普遍偏低.沙河街组储层中见较为普遍的石英自生加大现象(图 8c),石英加大边宽窄不一,宽度一般为 0.1 mm 左右,局部可见到两期或两期以上的石英加大现象,次生加大石英的含量一般小于 3%,因此石英加大对研究区沙河街组储层性能的影响并不大.

研究区内沙河街组自生粘土矿物种类众多,包括结晶高岭石、伊利石、伊利石/蒙皂石混层合和绿泥石膜等(图 8d),整体上,随深度的增加和成岩作用的深入,高岭石含量有所减少,伊利石含量有所增

加,绿泥石含量变化不大,伊蒙混层由无序向有序转变.溶蚀作用在研究区沙河街组砂岩内普遍发育,主要形成粒间溶孔与粒内溶孔(图 8e, 8f).

本文根据研究区沙河街组储层成岩作用、自生粘土矿物及物性特征,依据中国石油天然气总公司(2003)《中华人民共和国石油天然气行业标准:碎屑岩成岩阶段划分》的标准划分出研究区成岩序列与演化阶段,本文选取的具有代表性的沙南凹陷成岩序列,表明研究区沙河街组储层成岩阶段整体上处于早成岩 B 期到中成岩阶段 B 期(图 9).早成岩阶段 B 期主要发育在 2 400~3 350 m 的深度,原生孔隙占大多数,平均孔隙度为 20.34%,2 850~3 140 m 深度段和 3 200~3 300 m 深度段是两个次生溶蚀孔隙发育带,次生孔隙发育带的孔隙度可达 25%~30%.中成岩阶段 A 期发生于 3 350~4 300 m 的深度,该段储层储集空间以次生孔隙为主,平均孔隙度为 15.93%,3 420~3 800 m 深度段和 3 850~4 300 m 是两个次生溶蚀孔隙发育带,次生孔隙发育带的储层孔隙度可达 17%~23%.中成岩阶段 B 期发生于 4 300~4 600 m 的深度,该段储层储集空间同样以次生孔隙为主,平均孔隙度为 10.21%,4 350~4 400 m 深度段是次生溶蚀孔隙发育带,次生孔隙发育带的储层孔隙度可达 15.0%~18.5%.

4.3 储层类型与评价

本文根据沉积物粒度、微相类型、物性特征、成岩相类型、及孔隙结构等参数,将研究区储层分为 4 类:I、II、III、IV 类储层.其中,中、粗砂岩与中细砂岩通常物性较好,为 I、II 类储层,细砂岩与粉砂岩次之;从沉积微相来看,辫状河与扇三角洲前缘及滨

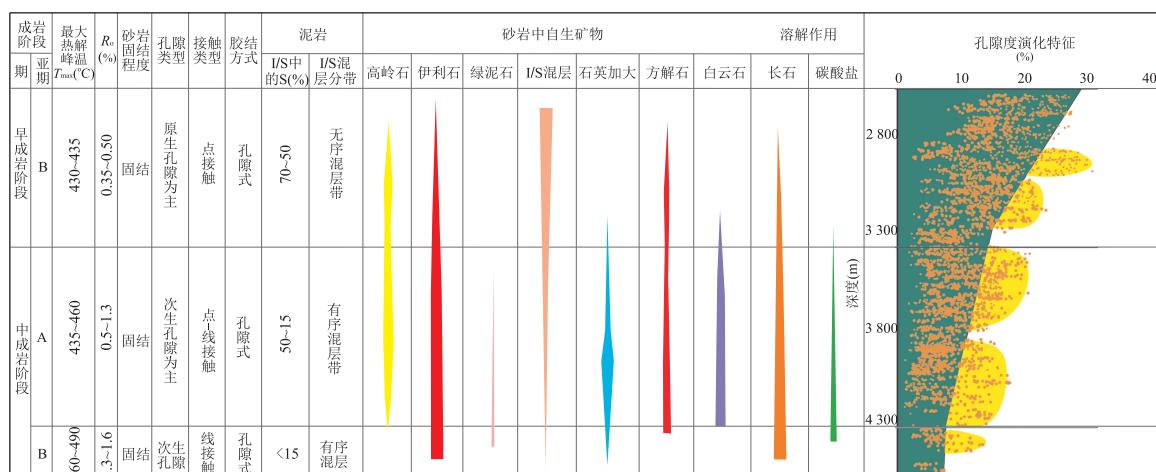


图 9 渤海湾盆地沙南凹陷沙河街组储层成岩序列

表 1 渤海湾盆地沙垒田凸起围区沙河街组储层分类评价参数标准

Table 1 Reservoir classification and evaluation parameters of the Shahejie Formation in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin

分类参数		物源位置			
		I	II	III	IV
沉积特征	粒度(mm)	粗砂岩、中砂岩、细砂岩		细砂岩粉细砂岩	细粉砂岩
	沉积微相	辫状河三角洲内前缘 扇三角洲前缘 滨岸滩坝		三角洲外前缘	前三角洲 滨浅湖
物性特征	ϕ (%)	>20	10~20	6~10	<6
	K(mD)	>100	1~100	0.1~1.0	<0.1
成岩相		长石溶蚀相 剩余粒间孔相	长石溶蚀相 碳酸盐胶结物溶蚀相	碳酸盐胶结相	机械压实相 碳酸盐胶结相
孔隙结构	排驱压力(MPa)	<0.1	0.1~0.5	0.5~1.5	>1.5
	孔隙结构类型	大孔粗喉型	中孔中喉型	小孔微喉型	小孔微喉型
	平均喉道半径(μm)	>5.5	1.0~5.5	0.6~1.0	<0.6
	退汞效率(%)	>40	45~40	40~35	<35
储层评价		好	较好	一般	差

岸滩坝为Ⅰ、Ⅱ类储层,三角洲外前缘、前三角洲及滨浅湖储层性能较差,为Ⅲ、Ⅳ类储层。在储层物性方面,孔隙度大于20%、渗透率大于100 mD为Ⅰ类储层,孔隙度10%~20%、渗透率大于1~100 mD为Ⅱ类储层,孔隙度6%~10%、渗透率大于0.1~1.0 mD为Ⅲ类储层,孔隙度小于6%、渗透率大于0.1 mD为Ⅳ类储层。成岩相中长石溶蚀相与剩余粒间孔相为Ⅰ类储层,其碳酸盐胶结物溶蚀相与机械压实相次之。对于孔隙结构,大孔粗喉型(平均喉道半径大于5.5 μm)为Ⅰ类储层,中孔中喉型(平均喉道半径大于1.0~5.5 μm)为Ⅱ类储层,小孔微喉型(平均喉道半径大于0.6~1.0 μm)为Ⅲ类储层,小孔微喉型(平均喉道半径小于0.6 μm)为Ⅳ类储层(表1)。

通过物性资料、沉积相以及成岩相的结合,综合考虑孔隙动态演化特征,本文对沙南凹陷西南部沙河街组储层类型的垂向分布进行了统计(图10)。由图10可知,Ⅰ类储层为有利储层,主要分布于研究区沙一及沙二段,埋深从2 800~4 000 m,岩性以中粗砂为主,沉积相类型主要为扇三角洲与辫状河三角洲前缘的分流水道、河口坝及部分滩坝,其分布规律与长石溶蚀相以及剩余粒间孔相的分布规律相吻合,各井区Ⅰ类储层的厚度较薄,介于5~30 m;Ⅱ类储层发育较多,岩性粒度以中细砂岩为主,埋深分布范围广,沉积相类型仍以扇三角洲/辫状河三角洲前缘为主,其分布规律主要与碳酸盐胶结物溶蚀相以及长石溶蚀相的分布一致,相比于Ⅰ类储层,Ⅱ类

储层的厚度普遍较厚,位于15~100 m。Ⅲ、Ⅳ类储层有广泛的分布,多为扇三角洲/辫状河三角洲平原及外前缘,粒度不等,通常胶结程度较高,次生孔隙不发育,成岩相以碳酸盐胶结物溶蚀相、碳酸盐胶结相及部分长石溶蚀相为主。

5 讨论

依据储层类型特征,结合钻井与地震资料,本文对沙垒田凸起及围区的储层类型的平面展布进行了刻画,有利储层(Ⅰ类储层)主要分布在沙垒田凸起围区的边界断裂附近或斜坡带(表2,图10),但不同区域有利储层的类型与分布特征差异较大,拟从源—汇系统要素与成岩作用两个方面来探讨其对储层发育的共同控制作用。

断裂陡坡型源—汇系统主要发育在沙垒田凸起西南部与北部,受深大断裂控制,物源区与沉积区高差大,源区汇水面积较小,母岩岩性以花岗岩或混合花岗岩为主,易被剥蚀搬运至沉积区。因此,周缘凹陷沉积速率高,形成了连片厚层的近源粗粒扇三角洲体系,其沉积物粒度粗,结构与成分成熟度偏低,扇三角洲前缘亚相发育的分流水道与河口坝,可以形成较好的潜在储层。但由于该地区构造活动强烈,断层沉降速率大,在同沉积时期生长指数高(可达2以上),沉积物被迅速埋藏,影响沉积物的压实作用,同时在后续埋藏过程中,由于断裂的持续性活动,会加剧储层的埋藏与压实作用(图10),加之严重的胶

表 2 源—汇系统类型与储层差异对比
Table 2 Type of Source-to-Sink systems and their reservoir difference

源—汇系统	断裂活动	沉积体系	成岩作用	储层类型
断裂陡坡型	强烈 (生长指数>2)	扇三角洲	压实作用与胶结作用强烈, 少量次生孔隙	Ⅱ、Ⅲ类储层为主
断裂缓坡型	中等 (生长指数<2)	扇三角洲/ 辫状河三角洲	压实作用中等, 次生孔隙发育	I类储层为主, 同时发育Ⅱ、Ⅲ类储层
斜坡型	无	辫状河三角洲	胶结作用强烈, 次生孔隙较少	Ⅱ、Ⅲ类储层为主, 少量Ⅳ类储层
断槽型	走滑	扇三角洲	成岩作用差异较大, 次生孔隙较为发育	I类储层较少, Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类储层较多

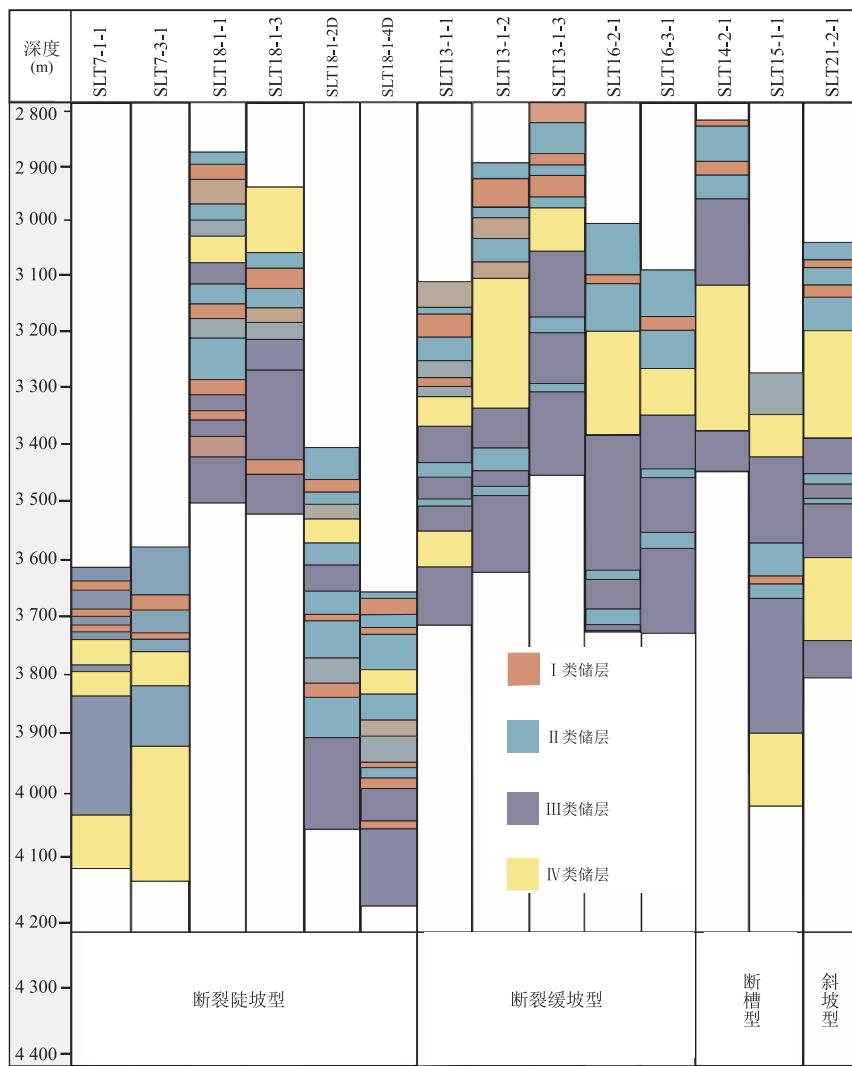


Fig.10 Distribution of reservoir type in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin
颜色区域为沙河街组发育深度

结作用,局部地区储层的储集空间消失殆尽,有利储层不发育,如沙垒田北部的断裂陡坡型源—汇系统,埋深超过 4 500 m,有利储层基本不发育。所以,整体上,断裂陡坡型源—汇系统中储层受沉积相带与埋深控制明显,I类储层(有利储层)分布范围较为局

限,主要分布与边界断裂附近的扇三角洲前缘,该源—汇系统中其他区域以Ⅱ、Ⅲ类储层为主,在凹陷中部主要为Ⅳ类储层。

断裂缓坡型源—汇系统主要发育在沙垒田凸起南部,毗邻沙南凹陷。该区域边界仍以断裂为主,局

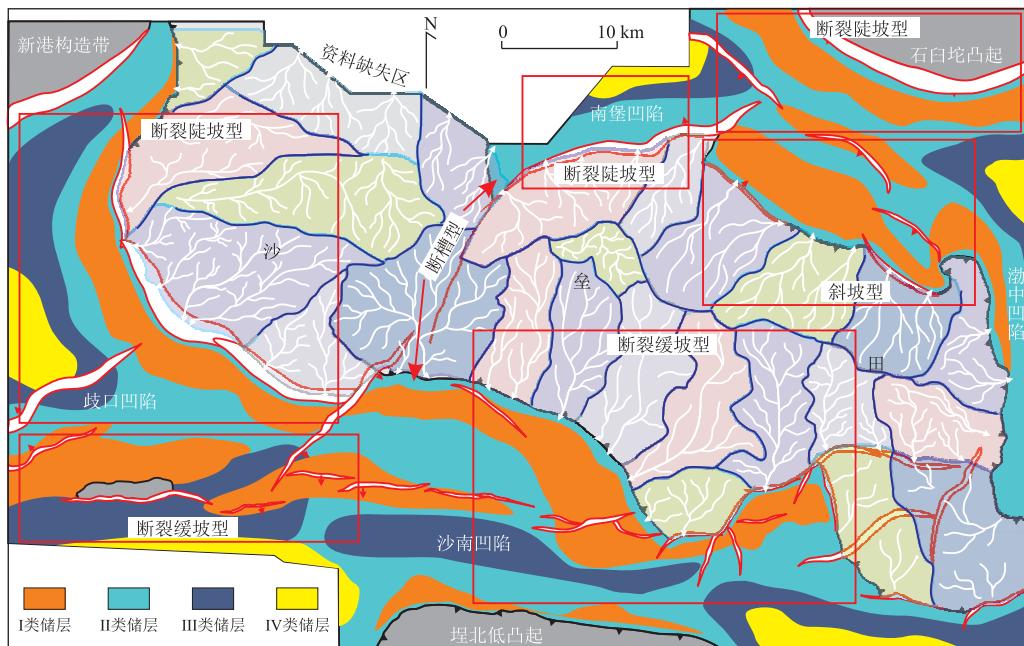


图 11 渤海湾盆地沙垒田凸起及围区沙河街组有利储层分布

Fig.11 Distribution of the favorable reservoirs in the Shaleitian uplift and surrounding area, Bohai bay basin

部地区形成多级断阶,形成多个构造坡折。沙垒田凸起东部高度最大,物源区与沉积区高差大,母岩类型仍以花岗岩为主,且源区汇水面积大,因此断裂缓坡源—汇系统物源供给速率高,沉积物供给量大。相对于断裂陡坡型源—汇系统,断裂缓坡型源—汇系统地形坡度较缓,沉积物被搬运距离较远,分布范围相对较广,沿构造坡折带形成厚层的扇三角洲/辫状河三角洲沉积体系,其三角洲前缘分布范围广泛。该源—汇系统中形成的沉积体系岩性以中粗砂岩、中细砂岩为主,沉积物成分与结构成熟度相对较高,加之埋藏深度多在 3 100~3 700 m,机械压实作用中等,同时次生孔隙带发育,孔、渗等储层物性好,有利储层发育(图 11)。断裂缓坡型源—汇系统中 I 类储层分布范围较广,主要沿凹陷边界的断裂坡折带与凹陷中局部凸起分布;II、III 类储层主要分布在沙南凹陷中三角洲前缘外侧、前三角洲及滨浅湖相带。

斜坡型源—汇系统主要发育在沙垒田凸起西北部、东北部,以宽缓斜坡边界为特征,凹陷边界断裂不发育,仅有少量小型断裂,局部发育构造变换带,是沉积物主要的搬运通道。该源—汇系统中源区与沉积区高差中等,源区汇水面积中等,岩性以古生界碳酸盐岩为主,剥蚀速率相对花岗岩低,沉积物供给速率相对偏低。沉积物搬运距离相对较远,粒度较细,以中细砂岩为主,沉积类型主要以辫状河三角洲体系为主,沉积物成分与结构成熟度较高,但砂体厚

度较薄。砂岩埋深在 2 900~3 900 m,机械压实作用中等,但自生粘土矿物与碳酸盐矿物胶结程度较高,次生孔隙发育较少。该源—汇系统 I 类储层多分布在斜坡带辫状河三角洲前缘,分布范围局限,厚度较薄,主要以 II、III 类储层为主,IV 类储层主要发育在凹陷的深洼带。

断槽型源—汇系统发育在沙垒田凸起中部的南北两侧,受中央走滑断裂控制,在凸起南北两侧分别形成了由边界断层限制的局部低势区,沉积物可来自凸起两侧的母岩剥蚀。该源—汇系统北侧源区的汇水面积较小,与沉积区的高差较小,因此沉积物的供给速率与供给量均较低;而南侧源区汇水面积较大,沉积物供给充足,在沙南凹陷形成了规模较大的扇三角洲体系。该源—汇系统中储层埋深较大,深度分布范围为 2 800~4 100 m,成岩作用强度较高,但不同区域差异较大。I 类储层主要分布在断槽出口位置的三角洲前缘,同时在凹陷内受断块掀斜作用形成的局部凸起上也有发育;II、III、IV 类储层分布较广。

6 结论

(1) 沙垒田凸起及围区凹陷形成的源—汇系统中,源区母岩岩性主要为花岗岩、混合花岗岩、灰岩及白云岩,共发育 20 个汇水区;发育古沟谷、断沟、

变换带搬运通道 3 大类沉积物搬运通道体系;沉积体系类型主要为扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊(滨浅湖与半深湖)、滩坝及重力流等。

(2)根据源区性质、汇水体系、搬运通道及边界样式特征,将沙垒田凸起古近纪源—汇系统划分为断裂陡坡型、断裂缓坡型、斜坡型及断槽型 4 大类。其中,断裂陡坡型源—汇系统主要发育在沙西南构造区、沙西构造区及沙北构造区内,以凹陷边界发育深大断裂为特征;断裂缓坡型源—汇系统主要发育于沙东北构造区与沙南构造区,以单一断裂或多级断裂缓坡型边界为特征;斜坡型源—汇系统主要发育在沙垒田凸起东段,无明显的边界断裂控制;断槽型源—汇体系主要发育在沙垒田凸起中部,受区域走滑断层控制,在凸起中部形成了以边界断层对向控制的断槽。

(3)沙垒田凸起围区凹陷内沙河街组储层岩性以岩屑质长石砂岩为主,储集空间以次生粒间溶蚀孔隙为主,成岩作用主要为机械压实作用、碳酸盐岩胶结(交代)作用、石英的自生加大作用、自生粘土矿物充填作用、溶蚀作用,整体上处于早成岩 B 期到中成岩阶段 B 期,发育 5 个的次生孔隙带。

(4)沙垒田凸起围区凹陷的储层类型共分 4 类(I、II、III、IV),其中有利储层类型与分布特征差异较大,受到源—汇系统要素与成岩作用的共同控制。其中断裂缓坡带由于源区高差与汇水面积大,沿断裂坡折带分布的沉积体系与砂体规模大、范围广,砂岩成分、结构成熟度较高,埋深浅、机械压实作用较弱,次生孔隙发育,为 I 类储层发育的有利区,断裂陡坡型、斜坡型及断槽源—汇系统次之。

致谢:真诚感谢审稿专家与编委给予的指导、建议!

References

- Allen, P.A., 2008. From Landscapes into Geological History. *Nature*, 451 (7176) : 274 — 276. doi: 10. 1038/nature06586
- Anthony, E. J., Julian, M., 1999. Source-to-Sink Sediment Transfer, Environmental Engineering and Hazard Mitigation in the Steeo Var River Catchment, French Riviera, Southeastern France. *Geomorphology*, 31(1):337—354. doi:10.1016/S0169-555X(99)00088-4
- Dai, J.S., Lu, K.Z., Li, L., et al., 1997. Tectonic Control over the Distribution of Oil and Gas Pools in Bohai Bay Basin. *Petroleum Explorationist*, 2(4):5—8 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. L., Zhou, H. M., Ren, J. Y., et al., 2010. Paleogene Sequence Stratigraphy and Its Response to Tectonic Activity in the East of Bohai Bay Basin. *Science China: Earth Sciences*, 40(10):1356—1376.
- Hou, G.T., Qian, X.L., Cai, D.S., et al., 2001. The Tectonic Evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37(6): 845—851 (in Chinese with English abstract).
- Huang, L., 2015. The Control of Hydrocarbon Accumulation by Strike-Slip Motion Within the Bohai Sea Rise: A Case Study from Shaleitian Uplift. *Earth Science Frontiers*, 22 (3):68—76 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Zhao, L., Liu, H.J., et al., 2015. Late Mesozoic to Cenozoic Extension and Strike Slip Structures and Deep Background of Bohai Bay Basin. *Chinese Journal of Geology*, 50(2): 446—472 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Zhu, X.M., Li, H.Y., et al., 2017. Quantitative Characterization of Elements and Coupling Mode in Source-to-Sink System: A Case Study of the Shahejie Formation between the Shaleitian Uplift and Shanan Sag, Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 29(4):39—50 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Suo, Y. H., Dai, L. M., et al., 2010. Development of the Bohai Bay Basin and Destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4):64—89 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., 2009. Sequence and Depositional Architecture of Sedimentary Basin and Process Responses. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27 (5): 849 — 862 (in Chinese with English abstract).
- 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. Controlling of Palaeogene Syn-Sedimentary Faulting on Sedimentation in the Dongying and Zhanhua Sags in Bohai Bay Basin. *Science China: Earth Sciences*, 33(11):1025—1036 (in Chinese).
- Liu, G.Q., Liu, Z.C., Wu, X.S., et al., 2012. Practice and Recognition of Lithologic Reservoir Exploration in Qikou Sag Slope Zone. *China Petroleum Exploration*, 17 (3): 12—18 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. H., Zhu, X. M., Li, S. L., et al., 2016. Pre-Palaeogene Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 41 (11): 1935—1949 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y.L., Gao, J.J., Niu, J. Y., et al., 2006. Controls of the Fan Delta Sedimentary Microfacies on the Diageneses in

- the South of Western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(1): 36—39 (in Chinese with English abstract).
- Morley, C.K., Nelson, R.A., Patton, T.L., et al., 1990. Transfer Zones in the East African Rift System and Their Relevance to Hydrocarbon Exploration in Rifts. *AAPG Bulletin*, 74(8):1234—1253.
- Peng, W.X., Zhang, R.C., Fan, J.H., et al., 2011. Large Scale En Echelon Faults on the West Uplift in Bohai Gulf. *Oil Geophysica 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).
- Qi, J.F., 2007. Structural Transfer Zones and Significance for Hydrocarbon Accumulation in Rifting Basins. *Marine Petroleum Geology*, 12(4):43—50 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Liao, Q. J., Lu, G. C., et al., 2010. Deformation Framework and Evolution of the Huanghua Depression, Bohai Gulf. *Geotectonica et Metallogenesis*, 34(4): 461—472 (in Chinese with English abstract).
- Shi, W.L., Zhang, Z.Q., Peng, W.X., et al., 2013. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation in the East Part of Shaleitian Saitent, Western Bohai Sea. *Oil and Gas Geology*, 34(2):242—247 (in Chinese with English abstract).
- Tang, L.J., Wan, G.M., Zhou, X.H., et al., 2008. Cenozoic Geotectonic Evolution of the Bohai Basin. *Geological Journal of China Universities*, 14(2):191—198 (in Chinese with English abstract).
- Xia, C. Y., Liao, Y. T., Huang, C. Y., et al., 2010. Tertiary Structure Characteristics and Their Depositional Response Analysis in the Qikou Sag in Bohai Bay Basin Features the Self-Similarity and Sedimentary Response Analysis. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32(1): 165—169 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X.N., Ren, J. Y., Lei, C., et al., 2012. Reviews and Prospects of Depositional Basin Dynamics. *Geological Science and Technology Information*, 31(5):80—88 (in Chinese with English abstract).
- 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 (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, 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).
- Xu, G. F., Lin, C. S., Liu, Y. F., et al., 2016. Evolution of Palaeo-Uplift and Its Controlling on Sedimentation of Kapushaliang Group of Early Cretaceous in Western Tabei Uplift. *Earth Science*, 41(4):619—632 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. H., Liu, F. P., Jing, F. H., et al., 2001. Pretertiary Stratigraphy of Shaleitian and Miaozi Uplifts. *China Offshore Oil and Gas*, 15(6):381—387 (in Chinese with English abstract).
- 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*, 22(5): 285—289 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.Y., 2008. Continental Margin Tectonics and Geodynamics. Science Press, Beijing, 2—54 (in Chinese).
- 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., 2013. Sediment Transport Pathway Characteristics of Continental Lacustrine Basins Based on 3-D Seismic Data: An Example from Dongying Formation of Western Slope of Bozhong Sag. *Earth Science*, 38(1):121—129 (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 & Petroleum Geology*, 51(2):20—33.
- Zhu, W. L., Wu, J. F., Zhang, G. C., et al., 2015. Discrepancy Tectonic Evolution and Petroleum Exploration in China Offshore Cenozoic Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1):88—101 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Kang, A., Wang, G. W., et al., 2003. Sequence Stratigraphic Models of Depression and Faulted-down Lake Basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 283—287 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴俊生,陆克政,李理,等,1997.渤海湾盆地构造对油气藏分布的控制作用.中国石油勘探,2(4): 5—8.
- 冯有良,周海民,任建业,等,2010.渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应.中国科学:地球科学,40(10): 1356—1376.
- 侯贵廷,钱祥麟,蔡东升,等,2001.渤海湾盆地中、新生代构造演化研究.北京大学学报(自然科学版),37(6): 845—851.
- 黄雷,2015.走滑作用对渤海凸起区油气聚集的控制作用:以沙垒田凸起为例.地学前缘,22(3): 68—76.
- 李理,赵利,刘海剑,等,2015.渤海湾盆地晚中生代—新生代伸展和走滑构造及深部背景.地质科学,50(2): 446—472.
- 李三忠,索艳慧,戴黎明,等,2010.渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏.地学前缘,17(4): 64—89.
- 李顺利,朱筱敏,李慧勇,等,2017.源—汇系统要素定量表征及耦合模式——以沙垒田凸起与沙南凹陷沙河街组为例.中国海上油气,29(4): 39—50.
- 林畅松,2009.沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应.沉积学报,27(5): 849—862.
- 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:地球科学,33(11): 1025—1036.
- 刘国全,刘子藏,吴雪松,等,2012.歧口凹陷斜坡区岩性油气藏勘探实践与认识.中国石油勘探,17(03): 12—18.
- 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.
- 孟元林,高建军,牛嘉玉,等,2006.扇三角洲体系沉积微相对成岩的控制作用——以辽河坳陷西部凹陷南段扇三角洲沉积体系为例.石油勘探与开发,33(1): 36—39.
- 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.
- 漆家福,2007.裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义.海相油气地质,12(4): 43—50.
- 任建业,廖前进,卢刚臣,等,2010.黄骅坳陷构造变形格局与演化过程分析.大地构造与成矿学,34(4): 461—472.
- 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): 242—247.
- 汤良杰,万桂梅,周心怀,等,2008.渤海盆地新生代构造演化特征.高校地质学报,14(2): 191—198.
- 夏存银,廖远涛,黄传炎,等,2010.渤海湾盆地歧口凹陷第三纪构造特征的自相似性及其沉积响应特征分析.石油天然气学报,32(1): 165—169.
- 解习农,任建业,雷超,等,2012.盆地动力学研究综述及展望.地质科技情报,31(5): 80—88.
- 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.
- 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.
- 徐桂芬,林畅松,刘永福,等,2016.塔北西部早白垩世卡普沙良群沉积期古隆起演化及其对沉积的控制作用.地球科学,41(4): 619—632.
- 张云慧,刘福平,金芳红,等,2001.沙垒田、庙西凸起前第三纪地层研究.中国海上油气,15(6): 381—387.
- 周心怀,余一欣,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,22(5): 285—289.
- 周祖翼,2008.大陆边缘构造与地球动力学.北京:科学出版社,2—54.
- 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.
- 朱红涛,杨香华,周心怀,等,2013.基于地震资料的陆相湖盆物源通道特征分析:以渤中凹陷西斜坡东营组为例.地球科学,38(1): 121—129.
- 朱伟林,吴景富,张功成,等,2015.中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向.地学前缘,22(1): 88—101.
- 朱筱敏,康安,王贵文,等,2003.陆相坳陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨.沉积学报,21(2): 283—287.