

doi:10.3799/dqkx.2017.133

东营凹陷南缓坡浅水三角洲沉积特征与源—汇过程

秦 祎¹, 朱世发^{1*}, 朱筱敏¹, 贾光华², 唐 东², 陈 涛², 张 维¹, 高子颉¹

1. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

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: 源—汇系统研究是当今地质学研究热点。东营凹陷南缓坡沙二段沉积时期是构造稳定的斜坡带,与其物源区广饶凸起构成完整的源—汇系统。基于岩心、测井、分析化验及三维地震资料,精细刻画研究区古地貌形态及沉积物搬运通道,明确沙二段浅水辫状河三角洲沉积特征;通过地震属性与钻井岩性标定,明确沉积体系分布及时空演化关系,探讨沉积主控因素及源—汇体系配置关系。结果表明,物源区自西向东发育 i~iii 三个汇水单元,及 V₁~V₄ 四个古沟谷,碎屑沉积物通过古沟谷搬运输送,向滨—浅湖沉积环境的缓坡(0.52°~1.29°)沉积区供源,形成平面上河道频繁分叉改道、垂向上多个正韵律叠置、岩性以分选中等、磨圆较好的含砾砂岩为主的浅水辫状河三角洲沉积。自沙二下亚段沉积期到沙二上亚段沉积期,沉积体向前推进,规模增大,沉积体系垂向演化主要受控于古气候变化导致的湖平面升降。平面上, I ~ III 沉积区内朵叶体形态及规模受控于源区汇水单元面积、垂向高差及通道形态与规模,朵叶体面积与垂向高差及汇水单元面积呈正相关。

关键词: 浅水三角洲; 古地貌; 源—汇系统; 地震属性; 沉积; 东营凹陷; 石油地质。

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2017)11-2081-14

收稿日期: 2017-05-15

Shallow Water Delta Sedimentation and Source-to-Sink Process in the South Slope Belt, Dongying Sag

Qin Yi¹, Zhu Shifa^{1*}, Zhu Xiaomin¹, Jia Guanghua², Tang Dong², Chen Tao², Zhang Wei¹, Gao Zijie¹

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

2. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oil Field Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China

Abstract: The study of Source-to-Sink system is a hot topic in geology research. During the sedimentary period of the second member of the Shahejie Formation (Es₂), the structural stable south slope belt in the Dongying sag and its source area Guan-grao uplift constituted a complete Source-to-Sink system. In this study, we analyze the paleogeomorphy, the characteristics of sediment transfer pathways and the braided shallow-water delta depositional system based on cores, logging, analytical experiment data and 3D seismic data. This paper presents in detail the sedimentary system distribution, the spatial and temporal relationship, the dominant factor of sedimentary process and sediment-dispersal patterns of the Source-to-Sink system in study area by the seismic attribute and lithology analysis. The results show there are three (i-iii) catchments, four (V₁-V₄) paleo-valleys from west to east in the source area. The clastic sediments supply to the deposition area, which is shore-shallow lake deposit environment gentle slope (0.52°~1.29°), by the transportation of paleo-valley. This process contributes to a moderate sorted, well rounding pebbly sandstone braided shallow-water delta system that river channel diverges frequently in the plane, several positive rhythm sediments overlay vertically. The sedimentary bodies increase from lower Es₂ to upper Es₂. The vertical evolution of the sedimentary system is mainly controlled by the lake-level fluctuation resulted from the paleoclimatic change. In the plane, the form and scale of the lobes body in I - III sedimentary area are controlled by the geomorphology vertical elevation difference of the source area, the area of the catchments, the form and scale of the pathways. It shows a positive correlation among the area of the lobes body, the vertical elevation difference and the area of the catchment.

基金项目:国家科技重大专项(No.2017ZX05001-002);胜利油田科研项目(No.30200018-16-ZC0613-0005)。

作者简介:秦祎(1993—),女,博士,从事层序地层学和沉积学研究。ORCID: 0000-0002-9556-3716. E-mail: qinyi_qs@163.com

* 通讯作者:朱世发, E-mail: zhushifa_zsf@163.com

引用格式:秦祎,朱世发,朱筱敏,等,2017.东营凹陷南缓坡浅水三角洲沉积特征与源—汇过程.地球科学,42(11): 2081—2094.

Key words: shallow-water delta; paleogeomorphy; Source-to-Sink system; seismic attribute; sedimentation; Dongying sag; petroleum geology.

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; Sømme and Jackson, 2013; 徐长贵, 2013; 林畅松等, 2015),源—汇研究的最终目的是建立完整的沉积动力过程(徐长贵等,2017).国际源—汇研究的焦点在于对沉积盆地古物源区演化的恢复和对源区沉积物剥蚀—搬运—沉积过程关系的耦合(Carter, 2003; Allen, 2005; Sømme *et al.*, 2009).第32届国际沉积学会议指出应用源—汇沉积体系分析方法探讨陆相浅水沉积体系是当今沉积学领域研究的一个热点(朱筱敏等,2016).

近年来国外浅水三角洲的研究逐步深入,主要集中于浅水三角洲发育背景、内部结构及沉积特征等多个方面,指出浅水三角洲常形成于水体较浅、构造相对稳定的陆表海或地形平缓、整体缓慢沉降的大型坳陷盆地或湖盆演化晚期(Hoy and Ridgway, 2003; Lee *et al.*, 2007).目前,国内相关研究主要集中在松辽、渤海湾、鄂尔多斯、塔里木和准噶尔等含油气盆地,主要探讨了浅水三角洲发育的古构造、古地形、古物源和古气候特征(徐长贵等,2002;楼章华等,2004;朱伟林等,2008;邹才能等,2008;朱筱敏等,2012).浅水三角洲不同于吉尔伯特三角洲的独特之处在于,其发育区主要为滨浅湖且构造稳定,物源供给充足,河流作用明显,古气候变化导致的湖平

面变化对沉积特征影响显著.浅水三角洲平面上分流河道分叉、改道频繁,分流河道延伸远、砂体分布范围广,单砂层厚度薄,复合砂体厚度大,河口坝不甚发育(朱筱敏等,2012;阮壮等,2013).

20世纪90年代,胜利油田在东营凹陷北部陡坡带勘探过程中认识到沉积物搬运通道与沉积朵叶体的耦合关系,从而有效地指导了陡坡扇砂砾岩体的勘探(毕义泉,2002),而南部缓坡带沉积体系与物源区及沉积物搬运路径的配置关系研究较为薄弱.南部缓坡带地形坡度缓且构造稳定,碎屑沉积物供应充足且沉积水体浅,有利于浅水三角洲的发育.本文基于东营凹陷南缓坡最新处理的三维地震资料、26口井的钻井资料及11口井的分析化验资料,综合全区地质背景及地震沉积学精细刻画,在源—汇系统过程分析的指导下,刻画源区形态及平面展布,分析沉积物搬运体系类型及规模,明确沉积体系展布及演化规律,探讨从源到汇各单元要素间关系,明确浅水三角洲骨架砂体的展布,为东营凹陷南缓坡沙二段的油气勘探提供地质基础.

1 区域地质概况

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷东南部,是一个具典型北断南超、北陡南缓不对称结构的新生

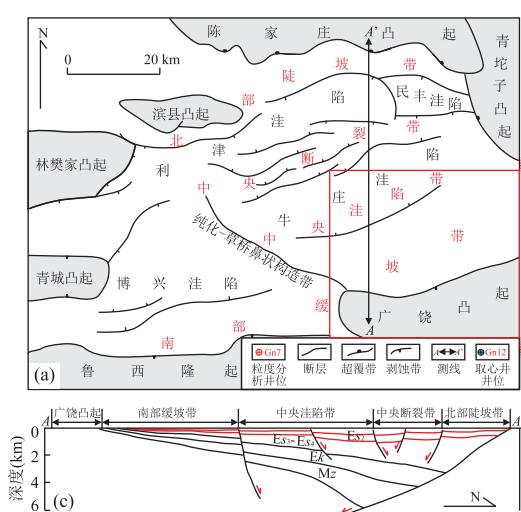
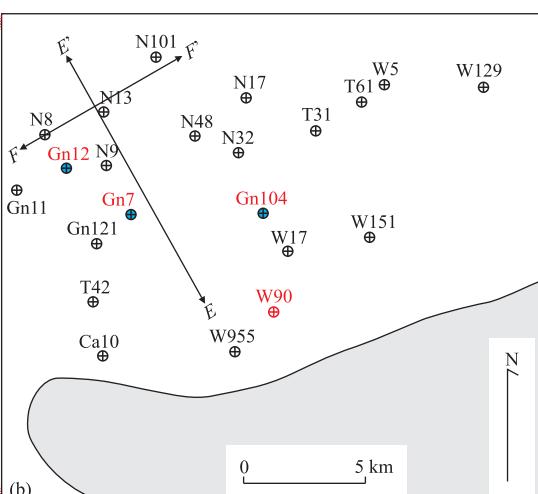


图 1 东营凹陷构造单元和研究区位置

Fig.1 Tectonic unit of Dongying sag and location of study area

a.构造位置;b.井位分布;c.构造剖面



代箕状断陷湖盆(操应长等,2009;贾光华,2013),凹陷自北向南划分为北部陡坡带、中央断裂带、中央洼陷带和南部缓坡带,南部缓坡带构造较为简单,主要表现为鼻状构造和后期发育呈北东—南西走向的次生断裂带,总体向东南方向抬起、向西北方向倾没(王秉海和钱凯,1992;王锐,2007).本次研究的重点区块西侧以利津洼陷西坡为界,南邻广饶凸起、北连牛庄洼陷的东段,面积约 500 km²(图 1a).

东营凹陷古近系沙河街组自下而上发育沙四段、沙三段、沙二段和沙一段,本次研究的目的层段为沙二段(图 2).东营凹陷的构造研究表明,沙三段(裂陷Ⅱ幕)为强烈裂陷阶段,沙三段沉积后伴随抬升剥蚀作用,到沙二段(裂陷Ⅲ幕)沉积时期裂陷作用减弱,北侧边界控盆断层的活动性降低,形态由沙三段时的铲式演化为坡坪式,该时期盆地基底较为平缓(陈中红等,2008;盛文波等,2008).东营凹陷沙二段介形类生物化石分异度研究表明,沙二上亚段主要群落为博兴假玻璃介(*Pseudocandona boxinensis*)和椭圆拱星介(*Camarocypris elliptica*),沙二下亚段为单刺华北介(*Huabeinia unispinata*)和卵形拱星介(*Camarocypris ovata*),反映为滨—浅湖沉积环境(李守军等,2005).从古气候背景上看,

沙二段沉积期属于炎热干旱型气候,其内部发育干旱—湿润—干旱次一级的气候旋回,对应于湖平面整体下降背景下发生的次级下降—上升—下降旋回变化,在炎热—干旱古气候作用下,物源区遭受强烈剥蚀,陆源碎屑沉积物为浅水三角洲的发育提供了充足的物源(张世奇和纪友亮,1998).

2 源区和搬运通道格局

盆地内的局部凸起或高地决定着物源体系的分布格局,古沟谷是沉积物的主要搬运通道,古斜坡与斜坡前的坡折带是沉积物的卸载场所(邓宏文等,2001),研究盆地的构造格局及古地貌,既可以揭示物源区与沉积区的空间分布关系,也可以刻画沉积物的搬运路径,为物源分析和源区与沉积区关系耦合提供宏观方向(郭少斌和孙绍寒,2006;赖维成等,2010).

在建立东营凹陷南缓坡构造层序地层格架的基础上,通过沉降回剥分析技术,经过去压实、沉积物重力均衡沉降校正后,以东营组顶界面(构造稳定界面)为基准面进行回剥,恢复东营凹陷南缓坡沙二段沉积前古地貌.研究区自南向北由广饶凸起过渡为牛庄洼陷,呈缓坡地形.通过精细层位解释及大量地

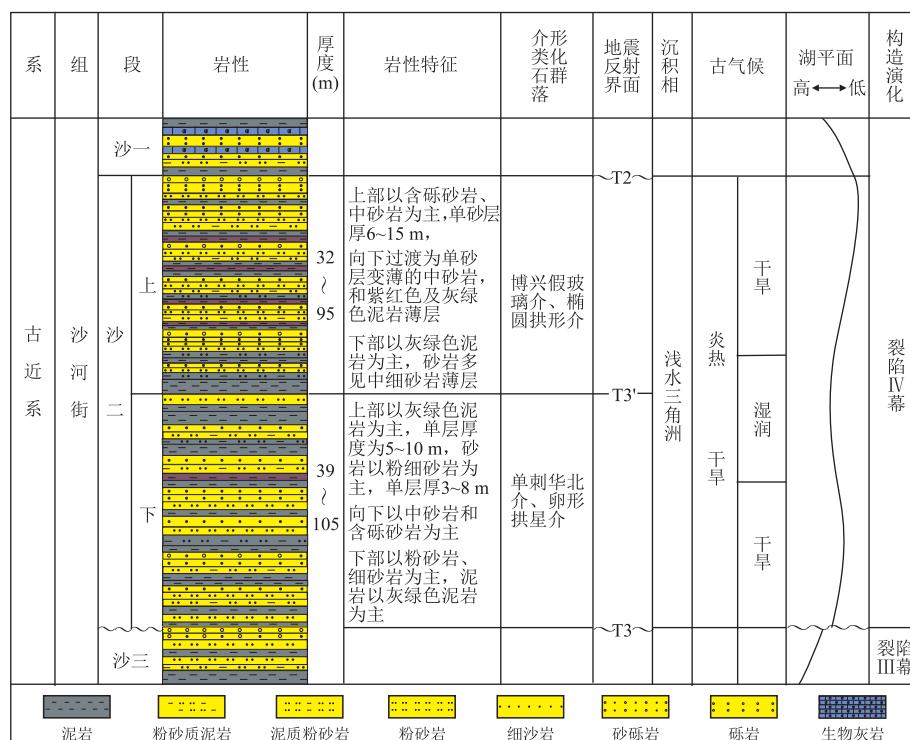


图 2 东营凹陷南缓坡沙二段综合柱状图

Fig.2 Integrated stratigraphic column of Es₂ in south slope belt of Dongying sag

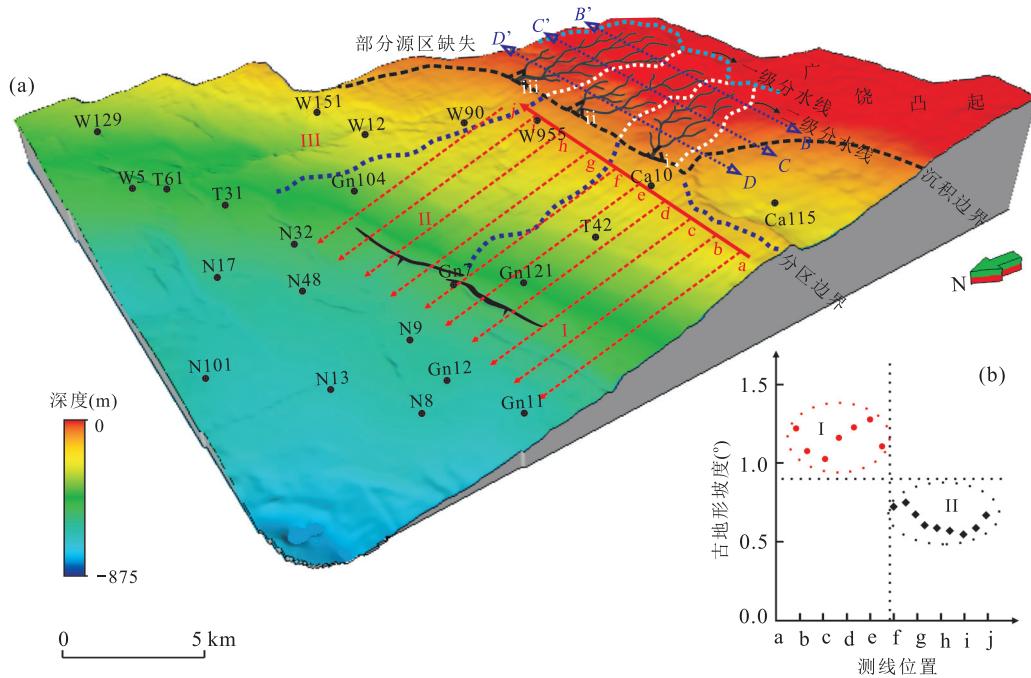


图 3 东营凹陷南缓坡沙二段沉积古地貌(a)及古地形坡度散点图(b)

Fig.3 Paleogeomorphology of depositional period (a) and paleotopography grade scatterplot (b) of Es₂ in south slope belt of Dongying sag

表 1 东营凹陷南缓坡物源通道特征参数统计

Table 1 Characteristic parameters of sediment transfer pathway in south slope belt of Dongying sag

物 源 区	汇水单元编号	i 区			ii 区			iii 区		
		汇水单元形态	地势较平坦, 垂向高差小		局部隆起与侵蚀沟谷构成的山谷地貌, 地形高差大					
	汇水单元面积(km ²)	8.3			9.0			10.2		
	垂向高差(m)	126.8			204.2			325.5		
	古沟谷编号	V ₁		V ₂		V ₃		V ₄		
搬 运 通 道	古沟谷形态	较窄、较浅的复合 W 型		较宽且深		较窄、较浅		宽且深的复合 W 型		
	宽(km)	1.6		2.9		1.4		6.2		
	深(km)	0.9		1.3		0.8		1.3		
	宽/深	1.77		2.23		1.75		4.76		
	截面面积(km ²)	1.2		2.5		0.8		5.6		

震剖面沉积边界的追踪, 对沙二段沉积边界精确刻画, 在 W955 井及 Ca10 井以南约 2 km 为沉积边界, 沉积边界以南的广饶凸起为本次研究的物源区, 物源区三维地震资料覆盖较全, 其母岩成分主要为花岗岩和变质岩, 含有部分碳酸盐岩(张鑫和张金亮, 2007), 沉积边界以北的牛庄洼陷为本次研究的沉积区(图 3a)。

综合古地貌形态及物源区地震剖面可清晰地识别出物源区高势点之间的古沟谷发育区, 以高势点的连线作为分水线对物源区汇水单元进行划分, 识别出以一级分水线(蓝色点线)为界的一级汇水单元, 面积为 27.5 km². 在一级汇水单元内综合考虑地形坡度、高势点的发育位置及主水系与分支水系的

组合关系, 识别出二级分水线(白色点线), 将物源区自西向东划分为 i~iii 三个二级汇水单元(图 3a). 不同汇水单元的地形与地貌特征存在差异性, 汇水单元面积、垂向高差及古沟谷形态和规模是物源区碎屑沉积物供源能力的表征, 汇水单元面积大小反映古水流量的大小, 而古水流是搬运沉积物的有效载体, 垂向高差决定了沉积物搬运的势能(李顺利等, 2017). 定量刻画各二级汇水单元, 数据显示 i 区面积为 8.3 km², 垂向高差 126.8 m; ii 区面积为 9.0 km², 垂向高差 204.2 m; iii 区面积为 10.2 km², 垂向高差 325.5 m(表 1)。

在风化剥蚀作用下, 物源区产生的碎屑沉积物通过古沟谷的搬运输送作用, 向沉积区供源. 研究区

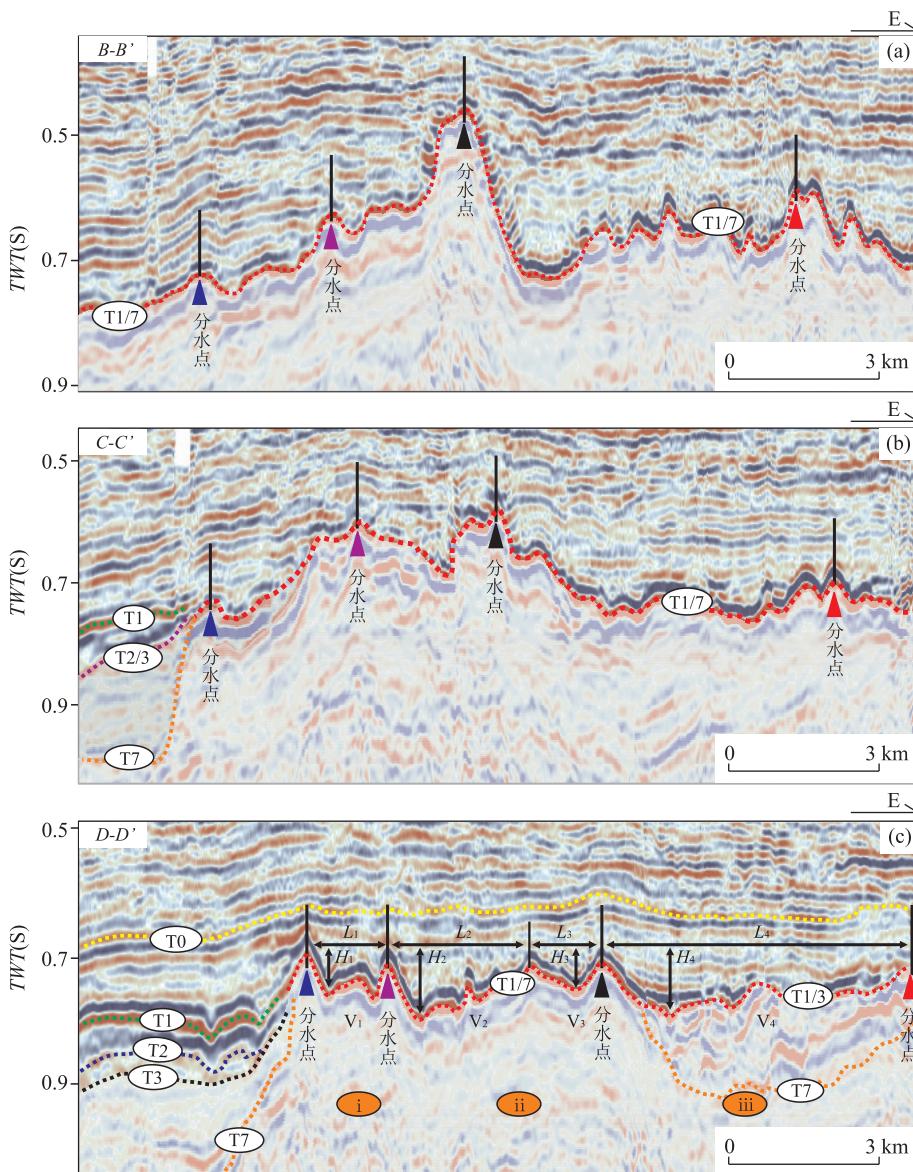


图 4 东营凹陷南缓坡沙二段物源通道指示地震剖面及其解释

Fig.4 Seismic profile and interpretation of sediment transfer pathways of Es_2 in south slope belt of Dongying sag

古沟谷据其几何形态可以分为 V 型、U 型和 W 复合型,垂直古沟谷延伸方向的地震格架剖面显示,在古水系发育初期(B-B'剖面),古沟谷主要为 V 型和 U 型,地震反射充填呈现短轴状或断续反射,向下游方向(C-C'剖面),古水系发生交汇与合并,古沟谷形态向 U 型和 W 复合型转变,在临近沉积物卸载区的广饶凸起与汇区交汇区带(D-D'剖面),古沟谷形态以 W 复合型为主,地震反射充填连续性较好(图 4)。不同汇水单元内,古沟谷的交汇与合并最终在临近沉积物卸载区形成对应的沉积物入口,沉积物入口的位置控制沉积区扇体的发育位置,对沉积物入口处的古沟谷精细刻画,从汇水单元 i~iii 可划分出 W 型古沟谷 V_1 、W 型古沟谷 V_2 、U 型古

沟谷 V_3 和 W 型古沟谷 V_4 。

沉积区西南部纯化—草桥鼻状构造带的发育,使得鼻状构造带两侧的古地貌形态存在明显差异。鼻状构造带以东为缓坡构造背景的沉积区,在缓坡沉积区选取近 S-N 向的地震测线 a~j(图 3a),进行古地形坡度统计,统计数据表明古地形坡度以测线号 f 为界,其东西两侧存在明显差异。测线号 f 以西古地形坡度为 $1.01^\circ \sim 1.29^\circ$,对应沉积 I 区,测线号 f 以东古地形坡度值分布在 $0.52^\circ \sim 0.75^\circ$,为沉积 II 区,沉积 II 区以东发育呈 NE-SW 向的同生断槽,以该断槽为沉积物优势沉积区形成沉积 III 区。

在源—汇耦合理论的指导下建立研究区各汇水单元与沉积分区的对应关系,汇水单元 i 通过古沟

谷 V_1 向沉积 I 区供源, 汇水单元 ii 通过古沟谷 V_2 和 V_3 联合向沉积 II 区供源, 汇水单元 iii 通过古沟谷 V_4 向沉积 III 区供源。古沟谷的宽度、深度及宽深比影响沉积物在进入沉积区之前被搬运的方式, 截面面积则控制了沉积物的输送能力(李顺利等, 2017)。定量统计古沟谷 $V_1 \sim V_4$ 的宽度(L), 深度(H)及古沟谷截面面积, 数据显示向沉积 I 区供源的古沟谷 V_1 相对较窄且较浅, 截面面积为 1.2 km^2 ; 向沉积 II 区供源的古沟谷 V_2 较宽且较深, 宽深比为 2.23, 截面面积为 2.5 km^2 ; V_3 相对较浅且较窄, 截面面积为 0.8 km^2 ; 向沉积 III 区供源的古沟谷 V_4 呈宽浅形态, 宽深比为 4.76, 截面面积为 5.6 km^2 (表 1)。

3 汇区浅水三角洲沉积特征

东营凹陷南缓坡沙二段辫状河浅水三角洲形成于地形平缓、构造稳定、物源供给充足的缓坡地区, 发育的亚相类型以三角洲平原、三角洲内前缘和三角洲外前缘为主, 主要沉积特征是沉积水动力较强, 沉积物粒度粗, 发育冲刷界面和交错层理等强水动力沉积构造, 河流作用明显, 分流河道长距离向前推进形成以分流河道砂为骨架砂体的沉积, 单层砂体薄, 复合砂体厚度大且大面积连片分布, 垂向上多个正韵律叠置, 河口坝发育规模和分布较局限。

3.1 牵引流为主的粗粒沉积

W90 井岩心粒度分析表明, 沙二段以含砾砂岩、粗砂岩及细砂岩为主, 粒度中值介于 0.16 ~ 0.5 mm, 最大粒径可达砾级, 分选系数小于 2, 分选性中等到好, 成分成熟度中等(0.7 左右)。

粒度概率累积曲线表明, 沉积区主要发育跳跃

次和悬浮次两个粒度次构成的两段式, 两个跳跃次和一个悬浮次总体构成的三段式两种类型(图 5)。其中两段式普遍发育, 跳跃次总体斜率高(62°), 分选好, 为主要搬运方式; 悬浮次总体发育局限(20%), 悬浮总体与跳跃总体的细切点 φ 值较大(2.5φ 左右), 反映较强水动力环境下, 较粗粒的浅水辫状河三角洲河道沉积(Gn104 井, 1 755 m 处中砂岩, 楔状交错层理)(图 5a)。三段式粒度累积曲线在沉积 I 区和沉积 II 区的斜坡带及靠近中央洼陷带的局部地区发育, 第一段跳跃次总体斜率高(53°), 第二段跳跃次斜率中等(34°), 分选均较好, 跳跃次含量较高(72%), 悬浮次含量次之, 为粗粒沉积物在较强水动力环境中遭受双向水流改造作用形成的沉积类型, 推测为反韵律的河口坝沉积(Gn7 井, 2 087 m 处细砂岩, 槽状交错层理)(加东辉等, 2005; 赵伟等, 2011)(图 5b)。

分析研究区 C-M 图发现样品点数据主要分布在 PQ 段, 不同于以 QR 段为主的浊流沉积(加东辉等, 2005), 反映较强水动力环境中牵引流作用下浅水三角洲特征(图 5c)。

3.2 垂向多个间断性正韵律叠置

三角洲平原亚相分流河道以含砾砂岩为主, 单层砂体较厚(8~14 m), 测井响应多见箱形和齿化箱形(Ca10 井, 1 108~1 129 m), 分流河道之间发育薄层泛滥平原泥岩或细粉砂岩的天然堤(2~3 m)。内前缘水下分流河道砂体以含砾砂岩和粗砂岩为主, 单层砂体厚度减小(5~8 m), 泥岩夹层变厚(5~8 m), 垂向上见多个间断性正韵律叠置(Gn7 井, 2 010~2 034 m)。外前缘河道砂体主要为残留河道的中—细砂岩, 单层砂体薄(<2 m)(W5 井,

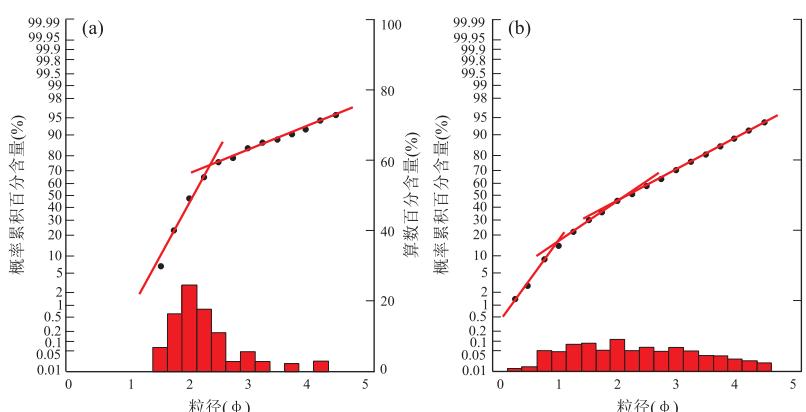
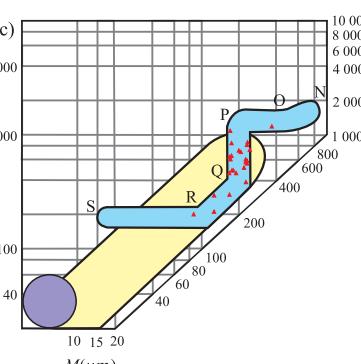


图 5 东营凹陷南缓坡沙二段浅水三角洲砂岩粒度分析

Fig.5 Grain size analysis of the shallow-water delta of Es_2 in south slope belt of Dongying sag

a.Gn104 井概率累积曲线, 1 755 m; b.Gn7 井概率累积曲线, 2 087 m; c.W90 井 C-M 图



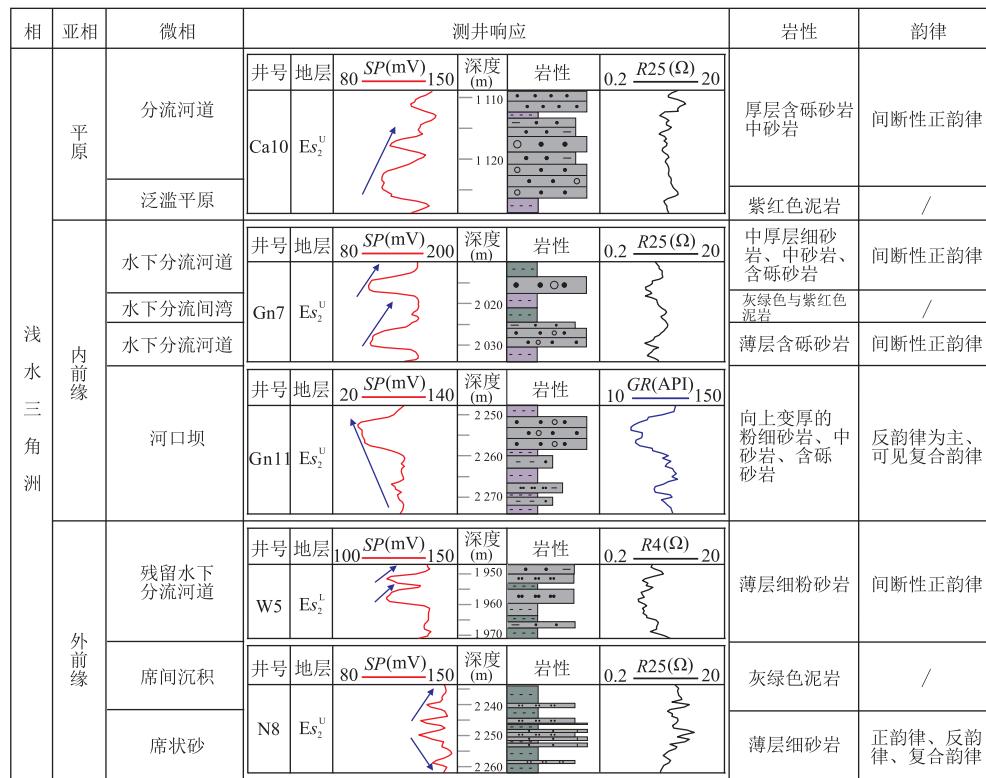


图 6 东营凹陷南缓坡沙二段浅水三角洲沉积构造及测井响应特征

Fig.6 Characteristics of sedimentary structure and well logging response of the shallow-water delta of Es₂ in south slope belt of Dongying sag

1 948~1 971 m)(图 6).可见从近物源区向湖盆中央方向,河道砂岩粒度减小(从含砾砂岩到细砂岩),间断性正韵律规模减小(从 15 m 到 8 m),泥岩夹层厚度增大(从 3 m 到 8 m),反映缓坡沉积区较强水动力作用下河道不断迁移、冲刷,及向盆地中央方向推进水动力减弱的沉积过程.

3.3 水下分流河道砂为骨架砂体

研究区沉积物供给充足,在缓坡沉积区的强河流作用下,河道长距离向前推进(12.30~18.83 km),于三角洲内前缘大量分叉,河道砂体单层较薄(5~8 m),由于连片分布的河道在平面上相互切割、叠置,形成单砂体薄但复合砂体厚的水下分流河道骨架砂体,复合砂体厚度可达 16~20 m(图 6).沙二段砂岩中发育平行层理、板状交错层理、楔状交错层理、槽状交错层理及冲刷面等多种强水动力环境下具牵引流成因的沉积构造.斜坡带沉积Ⅱ区的 Gn104 井于沙二上亚段 1 755 m 处发育一套 5 m 厚粗砂岩,见中型楔状交错层理(图 7a),于沙二下亚段 1 849 m 处发育一套中一粗砂岩,平行层理清晰可见(图 7b).斜坡带沉积Ⅰ区与Ⅱ区交界处的 Gn7 井于沙二下亚段 2 103.1 m 处发育一套 2 m 厚

的分流间湾泥岩,灰色泥岩中见植物茎叶碎片(图 7c).沉积Ⅲ区靠近中央洼陷带的 Gn12 井于沙二下亚段 2 380.1~2 080.3 m 处发育具板状交错层理和槽状交错层理的中砂岩,于 2 384.7 m 处见粗砂岩与下部泥岩冲刷接触(图 7f).由于分流河道的高度发育及河道的迅速向前推进,在河道入湖区形成的河口坝易被改造破坏,较难保存,分布和规模均较局限,研究区另一处河口坝发育区位于沉积Ⅰ区靠近中央洼陷带的 Gn11 井沙二上亚段(2 250~2 263 m),岩性组合为向上变厚的粉细砂岩及含砾砂岩,测井响应呈漏斗型,具反韵律特征(图 6).

3.4 地震相多为典型叠瓦状前积或丘状地震反射

通过对研究区三维地震数据体大量地震测线的拾取,对比分析地震剖面的外部形态和内部结构,发现沉积Ⅰ区和Ⅱ区的中央洼陷带内(测线位置见图 1b)叠瓦状前积地震相和丘状地震相十分发育.

3.4.1 前积地震相 选取过沉积Ⅱ区中央洼陷带 N13 井的顺物源典型前积地震剖面 E-E' 研究分析(测线位置见图 1b).E-E' 地震剖面中前积反射呈 NE-SW 向,倾向 NW,指示物源来自东南方向,向西北方向的湖盆中央前积,前积层在水平方向上延伸

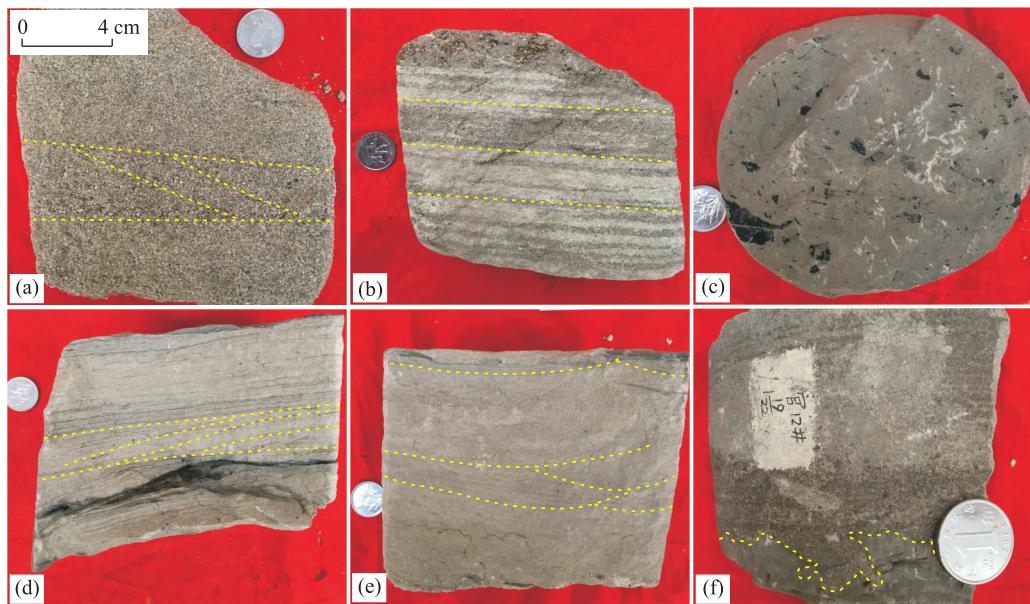


图 7 东营凹陷南缓坡沙二段浅水三角洲典型沉积构造

Fig.7 Typical sedimentary structures of the shallow-water delta of Es_2 in the south slope belt of Dongying sag

a.Gn104 井, 1 755 m, 粗砂岩, 楔状交错层理; b.Gn104 井, 1 849 m, 中—粗砂岩, 平行层理; c.Gn7 井, 2 103.1 m, 泥岩, 植物碎片; d.Gn12 井, 2 380.1 m, 细—中砂岩, 板状交错层理; e.Gn12 井, 2 380.3 m, 中砂岩, 槽状交错层理; f.Gn12 井, 2 384.7 m, 粗砂岩与泥岩, 冲刷面

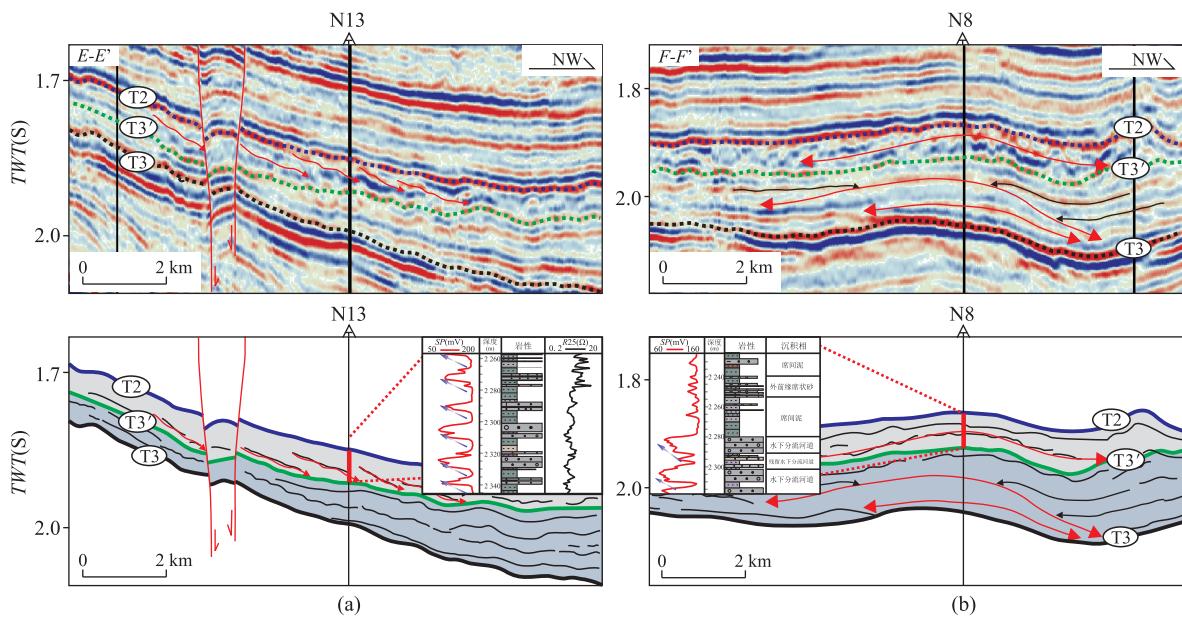


图 8 东营凹陷南缓坡沙二段浅水三角洲顺物源方向前积地震相(a)及垂直物源方向丘状地震相(b)

Fig.8 Progradational seismic facies in parallel source direction (a) and mounded seismic facies in vertical source direction (b) of the shallow-water delta of Es_2 in south slope belt of Dongying sag

测线位置见图 1b

距离达 7.2 km。剖面中叠瓦状前积由一组倾角十分平缓的同相轴构成, 前积层倾角约 3.1° , 单一前积层延伸距离约 1.47 km, 该倾斜同相轴的上倾端和下倾端分别与上覆层和下覆层具顶超和下超接触关系, 与 S 型前积的显著区别在于仅发育前积层而缺

少顶积层和底积层(图 8a)。与该组中强振幅、弱连续性的前积反射对应的 N13 井沙二上亚段, 发育多套单砂层 3~7 m 厚的河道砂岩及残留河道砂岩, 砂岩粒度以中—细粒为主, 测井响应为齿化箱型和指状, 反映近源沉积的特征及强水动力的沉积环境。中厚

层的灰绿色泥岩与河道砂岩在垂向上组成多个反韵律,为前积层在垂向井段的响应。研究区的叠瓦状前积联合钻井标定,反映沉积Ⅱ区较强的水动力环境及近源浅水的沉积特征。

3.4.2 丘状地震相 垂直物源方向(NE-SW)拾取过沉积Ⅰ区和Ⅱ区中央洼陷带N8井的地震剖面F-F',研究分析(测线位置见图1b),发现F-F'地震剖面中沙二上亚段发育中频、中等振幅和中等连续性的丘状反射,其外部形态呈对称结构,丘状反射在平面上展布约5 km宽,而沙二下亚段为内部见双向上超结构的不对称丘状反射,平面展布宽约6 km。与沙二上亚段丘状地震相对应的N8井2 224~2 318 m井段,发育多套以含砾砂岩为主的水下分流河道微相,测井响应为齿化箱型,垂向上见反韵律叠置(图8b)。通过同顺物源方向的叠瓦状前积反射(图8a)交互标定,对称的丘状反射指示为浅水沉积朵叶体横剖面,而不对称的丘状反射对应为朵叶斜切面。

以上研究综合表明,东营凹陷南缓坡沙二段为近源粗粒的浅水辫状河三角洲沉积,岩性以含砾砂岩及粗砂岩为主,斜坡带的三角洲内前缘见互层紫红色泥岩与灰绿色泥岩,垂向上多个间断性正韵律叠置;沉积构造多见强水动力的中型槽状交错层理、楔状交错层理及底部滞留的砾石冲刷沉积;叠瓦状前积地震相反映高能浅水环境,沉积物供给较快和盆地沉降相对缓慢共同作用下的沉积特征。

4 浅水三角洲沉积体系刻画及源—汇定量关系

4.1 浅水三角洲沉积体系分布

综合钻井、岩心及分析化验资料,明确了沙二段单井沉积相发育特征,但钻井标定对沉积相带边界的约束能力有限,因此通过地震沉积学方法提取三维地震数据体中可以反映岩相和沉积体系总体延伸的均方根振幅属性,进行地震属性与钻井联合标定来精细刻画沉积相带展布特征。

分别提取沙二上亚段和沙二下亚段层间均方根振幅属性,不同层位的均方根振幅属性平面图均显示在靠近广饶凸起的近物源区发育块状弱振幅体,近物源区的弱振幅体横向在Ca10井与W955井之间广泛分布,W955井以东区域振幅属性显著增强,靠近源区的块状强振幅体与沉积物入口对应关系

较好,推测为三角洲平原分流河道砂体,由近凸起区向中央洼陷带方向振幅属性强度持续增强,沙二下亚段强振幅体主要分布在斜坡带,到沙二上亚段强振幅体向中央洼陷带方向延伸,展布面积扩大(图9a, 9c)。

统计研究区22口井含砂率、灰质含量及砂泥岩组合关系,并分析其与均方根振幅属性间配置关系,明确了目的层段内地震属性与钻测井信息的对应关系。近物源区Ca10井沙二上亚段为巨厚层含砾砂岩夹薄层泥岩,含砂率高(>0.6),对应中一弱振幅区,在属性平面图中呈绿色;当目的层段含灰岩且灰质含量较高时,灰质会对振幅属性产生干扰,如Ca10井以北的Gn121井,厚层含砾砂岩中夹有薄层灰岩,灰质含量为15.63%,其振幅属性由于灰岩而显示为强振幅,表现为红色;斜坡带Gnx15井沙二下亚段为中薄层含砾砂岩与中薄层泥岩互层,含砂率为0.47,对应强振幅区,振幅属性表现为红色;斜坡带Gn1井沙二下亚段为厚层泥岩夹薄层砂岩,含砂率为0.25,对应弱振幅区,在属性图中呈蓝色(表2,图9a, 9c)。将沙二上亚段及沙二下亚段有限的含砂率数据与均方根振幅属性平面图进行点对点的标定与校验,数据显示地震振幅属性与单井岩性特征吻合程度较高,沙二上亚段有三口井不吻合,吻合率为85.7%,沙二下亚段两口井不吻合,吻合率为90.5%。

综合物源区i~iii汇水单元内古水系与古沟谷的精细刻画,沉积区地震属性与钻井岩性的标定,在砂地比等值线图的约束下,明确了沉积边界位置及沉积Ⅰ区~沉积Ⅲ区沉积物入口的位置,与沉积区钻井岩性标定下的地震属性平面图相论证,在近沉积边界的区域,块状弱振幅体解释为三角洲平原亚相,平原亚相中Ca10井、W955井、W90井及W12井等井段发育厚层含砾砂岩,解释为平原亚相中分流河道发育区;向凹陷中央方向,砂地比值呈降低趋势,岩性组合为中厚层含砾砂岩与薄层泥岩互层,Gnx15井、Gn7井、Gn101井、N32井等井段发育中薄层含砾砂岩与中薄层泥岩互层,并可见灰绿色泥岩与紫红色泥岩突变接触,振幅属性较强且连片性较好,解释为三角洲内前缘亚相;靠近中央洼陷带的井位泥岩厚度增大,砂岩厚度减小,砂地比值降低到0.3以下,振幅属性减弱,连片性变差,解释为以外前缘沉积为主(图9b, 9d)。

沙二段辫状河浅水三角洲是在缓坡、浅水及沉积物供应充足的背景下形成的,河流作用较强,河道呈指状向湖盆中央推进,沉积物分布范围广,受波浪作用影响较弱,三角洲外部形态呈朵叶状。沙二下亚

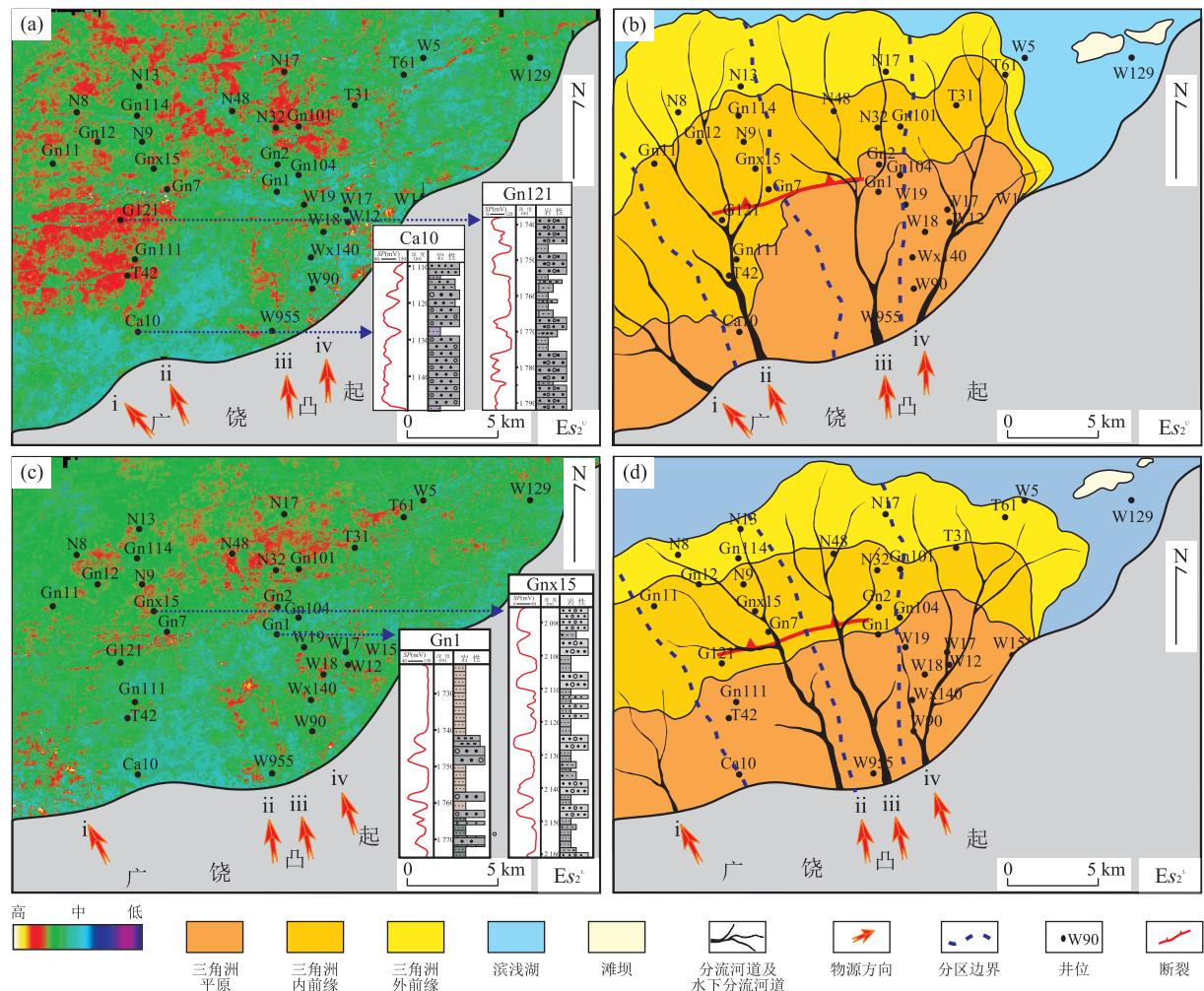


图 9 东营凹陷南缓坡沙二段均方根振幅属性特征及沉积相解释

Fig.9 The RMS amplitude attribute and interpreted sedimentary facies of E_{S_2} in south slope belt of Dongying sag

表 2 东营凹陷南缓坡沙二段岩性组合特征与地震属性关系

Table 2 Relationship between lithologic association and RMS amplitude attribute of E_{S_2} in south slope belt of Dongying sag

井号	层位	含砂率	砂泥岩组合关系	灰质含量(%)	均方根振幅属性强度	属性颜色
Ca10	$E_{S_2}^U$	>0.6	巨厚层含砾砂岩夹薄层泥岩	0	中—弱振幅体	绿色
Gn121	$E_{S_2}^U$	>0.6	厚层含砾砂岩与薄层泥岩互层	15.63	强振幅体	红色
Gnx15	$E_{S_2}^L$	0.3~0.6	中薄层含砾砂岩与中薄层泥岩互层	0	强振幅体	红色
Gn1	$E_{S_2}^L$	<0.3	厚层泥岩夹薄层砂岩	0	弱振幅体	蓝色

段沉积体展布面积 317.31 km^2 , 平原面积 155.56 km^2 , 河流作用明显, 向湖盆中央长距离推进, 最远推进距离 15.33 km . 沙二上亚段沉积体展布面积 350.02 km^2 , 平原面积 160.08 km^2 , 自沙二下亚段沉积期到沙二上亚段沉积期, 三角洲朵叶持续向前推进, 朵叶体面积进一步扩大, 分流河道最远推进距离达 18.83 km (图 9b, 9d).

4.2 沙二段浅水三角洲主控因素与源—汇过程探讨

本次研究从东营凹陷南缓坡沙二段沉积期的构

造背景、古气候特征、古地形—地貌特征及沉积物供给 4 个方面, 分析了沙二下亚段到沙二上亚段沉积体系的垂向演化及不同沉积区带沉积特征的差异性.

(1) 古地理背景: 研究区沙二段沉积期断裂活动微弱, 为缓坡构造背景下的稳定缓慢沉降, $0.52^\circ \sim 1.29^\circ$ 的缓坡沉积背景和稳定沉降的构造背景是浅水三角洲发育的有利条件. 在稳定沉降的缓坡地带, 湖平面升降主要受控于气候变化, 研究区沙二段沉积期整体属于炎热—干旱的气候环境, 炎热—干旱的古气候加剧母岩区的物理风化作用, 产生丰富的

表 3 东营凹陷南缓坡沙二段主要源—汇配置关系

Table 3 Sediment-dispersal patterns of Source-to-Sink systems of Es₂ in south slope belt of Dongying sag

	分区编号	i 区-I 区	ii 区-II 区	iii 区-III 区
物源区	汇水单元面积(km ²)	8.3	9.0	10.2
	垂向高差(m)	126.8	204.2	325.5
搬运区	源汇交界处沟谷截面面积(km ²)	1.2	3.3	5.6
	沙二上沉积朵叶体面积(km ²)	111.92	128.87	109.23
沉积区	沙二下沉积朵叶体面积(km ²)	108.65	98.54	110.12

碎屑物质为浅水三角洲的发育提供充足的物源。

(2) 沉积物供给:沙二下亚段沉积期古气候干旱,湖平面相对较低,水体浅,物源供给充足,沉积物沿水下分流河道迅速向前推进,分流河道长距离延伸,形成进积型辫状河浅水三角洲(图 9b);在炎热—干旱背景下,伴随垂向演化短时期内古气候变得相对潮湿,湖平面相对较高,到沙二上亚段沉积期,古气候由潮湿再次变干旱,湖平面相对下降,水体变浅,碎屑沉积物向湖盆中央进积,三角洲朵叶体规模增大(图 9d)。

(3) 不同源—汇系统内单元配置关系:在 i~iii 不同汇水单元的供源作用下,沉积区朵叶体的沉积过程和形态规模差异显著。其中,向沉积 I 区供源的 i 号汇水单元面积较小,约 8 km²,古地貌垂向高差较小,约 126.8 m,汇水单元内古沟谷发育,碎屑沉积物经古沟谷输送搬运,于地形坡度较大(1.01°~1.29°)的沉积 I 区卸载,较快速沉积形成的朵叶体垂向厚度大,平面展布面积小(111.92 km²);向沉积 II 区和沉积 III 区供源的物源区为局部隆起与不断侵蚀产生的沟谷共存的山谷地貌,汇水单元 ii 和汇水单元 iii 的古水系及古沟谷发育程度较高,古沟谷成为沉积物搬运的主要通道,且物源区垂向高差较大,介于 185.0~325.5 m,隆起区在干旱环境中遭受剥蚀,产生大量碎屑沉积物。沉积 II 区古地形坡度小(0.52°~0.75°),沉积物入口处古沟谷截面面积约 3.3 km²,于沉积 II 区形成大面积展布的三角洲朵叶体,约 128.87 km²,沉积 III 区发育的槽道对沉积物的输送及汇聚能力强,形成顺槽道延伸方向狭长状展布的朵叶体,垂向厚度大,平面展布面积较小,约 109.23 km²(表 3)。

从沙二下亚段到沙二上亚段沉积演化规律和目的层段内不同沉积区带朵叶体形态与规模的差异性可以看出,稳定的缓坡构造背景和充足的物源供给是浅水三角洲发育的有利因素;气候变化导致的湖平面升降是浅水三角洲沉积相带迁移的主控因素;物源区古地貌形态、垂向高差、汇水面积、古沟谷发

育程度及沉积区地貌特征是沉积朵叶体发育形态和规模的主要影响因素。

5 结论

(1) 广饶凸起作为物源区与东营凹陷南缓坡构成完整的源—汇系统。根据物源区分水点的组合关系及古水系的分叉合并,将物源区自西向东划分为 i~iii 三个汇水单元,识别出向沉积区供源的 4 个古沟谷 V₁~V₄。物源区汇水单元面积、垂向高差与构造古地貌特征的综合可以反映源区向沉积区供源能力的强弱。物源区西部 i 号汇水单元面积小(8.3 km²),垂向高差较小(126.8 m),地势较平坦,沉积物剥蚀量有限;物源区东部 ii 号及 iii 号汇水单元面积大(9.0~10.2 km²),局部隆起与侵蚀沟谷构成的山谷地貌地形高差大(204.2~325.5 m),碎屑沉积物大量剥蚀搬运,向沉积区供源能力强。

(2) 搬运通道对碎屑沉积物输送和汇聚能力的强弱取决于古沟谷形态和规模。古沟谷 V₁~V₄ 从古水系发育初期下切能力较强的 V 型,逐渐交汇、合并演化到搬运及汇聚能力较强的 U 型古沟谷,到邻近沉积物卸载区的复合 W 型古沟谷,宽浅且延伸不远的 W 型古沟谷对沉积物输送和汇聚能力有限,碎屑沉积物在沉积区快速卸载,形成大面积展布、垂向较薄的朵叶体,宽且深、并长距离延伸的古沟谷对沉积物的输送能力强,沉积物于沉积 III 区沿断槽发育方向推进,形成狭长状朵叶体。

(3) 沉积区沙二段沉积期为构造稳定、地形坡度缓(0.52°~1.29°)的滨—浅湖沉积背景,气候炎热—干旱,碎屑沉积物供应充足,形成大面积展布的浅水辫状河三角洲沉积体。沉积区 I~III 沉积体系规模及形态有所差异,但不同沉积区的三角洲朵叶体岩性均以分选中等(分选系数<2)、磨圆较好的含砾砂岩及粗砂岩为主,砂岩中发育楔状交错层理、槽状交错层理及冲刷面等指示强水动力环境的沉积构造,分流河道频繁分叉改道,长距离向湖盆中央推进

(12.3~18.83 km), 垂向上单砂体薄(5~8 m), 复合砂体厚(16~20 m), 平面上砂体连片展布。

(4) 研究区源—汇耦合关系表明, 沉积区沉积体系的发育规模与源区的汇水单元面积、垂向高差及古沟谷形态与规模密切相关, 源区汇水单元面积大、垂向高差大、古沟谷搬运汇聚能力强, 形成的沉积体系规模大, 反之则沉积体规模小; 沉积体系展布形态与沉积区地形坡度有关, 坡度小易于形成平面展布面积大、垂向厚度薄的沉积体, 反之坡度大易于形成平面展布面积小、垂向厚度大的沉积体。

References

- Allen, P. A., 2005. Concept Striking a Chord. *Nature*, 434 (7036): 961–961.doi:10.1038/434961a
- Allen, P.A., 2008a. From Landscapes into Geological History. *Nature*, 451 (7176): 274 – 276. doi: 10. 1038/nature 06586
- 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/ SP 296.2
- Allen, P. A., Hovius, N., 1998. Sediment Supply from Landslide-Dominated Catchments: Implications for Basin-Margin Fans. *Basin Research*, 10 (1): 19 – 35. doi: 10. 1046/j.1365-2117.1998.00060.x
- Bi, Y.Q., 2002. Sandbody Formation Models and Pool-Forming Regulations in the Southern Slope of Binxian Prominence of Dongying Sag. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 26(4):12–15 (in Chinese with English abstract).
- Cao, Y. C., Wang, J., Liu, H. M., et al., 2009. Sedimentary Characteristics and Models of Beach-Bar Sandbodies in the Upper Part of the Fourth Member of Paleogene in the South Slope of Dongying Depression. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 33(6):5–10 (in Chinese with English abstract).
- Carter, D.C., 2003. 3-D Seismic Geomorphology: Insights into Fluvial Reservoir Deposition and Performance, Widuri Field, Java Sea. *AAPG Bulletin*, 87 (6): 909 – 934. doi: 10.1306/01300300183
- Chen, Z.H., Zha, M., Liu, T.X., 2008. Response and Evolution of Formation Water Chemical Fields of the Paleogene in Dongying Sag. *Journal of Lake Sciences*, 20 (6): 705 – 714 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. W., Wang, H. L., Wang, D. Z., 2001. Control of Paleo-Morphology to Stratigraphic Sequence in Continental Rift Basins: Take Lower Tertiary of Western Slope in Bohai Bay as Example. *Oil & Gas Geology*, 22 (4): 293 – 296 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S.B., Sun, S. H., 2006. Rebuilding Paleogeomorphology of Pre-Jurassic and Oil-Gas Accumulation Regulation in Zhoujiawan Area. *Earth Science*, 31 (3): 372 – 377 (in Chinese with English abstract).
- Hoy, R. G., Ridgway, K. D., 2003. Sedimentology and Sequence Stratigraphy of Fan-Delta and River-Delta Deposystems, Pennsylvanian Minturn Formation, Colorado. *AAPG Bulletin*, 87(7): 1169 – 1191.dio:10.1306/03110300127
- Jia, D.H., Wu, X. H., Zhao, L. C., et al., 2005. The Grain Size Analysis for the Shallow-Water Delta Microfacies: An Example from One Well in the Bohai 25-1 Southern Oil Field. *Sedimentary Geology & Tethyan Geology*, 25 (4): 87 – 94 (in Chinese with English abstract).
- Jia, G.H., 2013. Reservoir Characteristic and Control Factors of Paleogene Red Sandstones in Southern Slope of Dongying Sag. *Journal of Northeast Petroleum University*, 37(3):48 – 58 (in Chinese with English abstract).
- Lai, W.C., Song, Z.Q., Zhou, X.H., et al., 2010. Model of Dynamic Source Controlling Sand. *Petroleum Exploration & Development*, 37 (6): 763 – 768 (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 Shahejie Formation between the Shahejie Uplift and Shanan Sag, Bohai Sea. *China Offshore Oil & Gas*, 4(29): 39 – 50 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.J., Zheng, D.S., Jiang, Z.X., et al., 2005. Water Depth of Palaeo-Lacustrine Basin Recovered by Dominance Diversity of Ostracoda: An Example from Sedimentary Period of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 7 (3): 399 – 404 (in Chinese with English abstract).
- Lee, K., McMechan, G.A., Gani, M.R., et al., 2007. 3-D Architecture and Sequence Stratigraphic Evolution of a Forced Regressive Top-Truncated Mixed-Influenced Delta, Cretaceous Wall Creek Sandstone, Wyoming, U.S.A.. *Journal of Sedimentary Research*, 77(4): 303 – 323.dio:10.2110/jsr.2007.031
- 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).
- Lou, Z. H., Yuan, D., Jin, A. M., 2004. Types, Characteristics

- of Sandbodies in Shallow-Water Deltafront and Sedimentary Models in Northern Songliao Basin, China. *Journal of Zhejiang University*, 31(2):211—215 (in Chinese with English abstract).
- Ruan, Z., Tan, G. H., Yu, B. S., et al., 2013. Sand Bodies in a Shallow Lake Basin: The PI Oil Bed in the Lasaxing Area, Songliao Basin. *Journal of Stratigraphy*, 37(3): 321—330 (in Chinese with English abstract).
- Sheng, W. B., Cao, Y. C., Liu, H., et al., 2008. Evolutionary Characteristics of the Palaeogene Basin-Controlling Boundary Faults and Types of Basin Architectures in the Dongying Sag. *Oil & Gas Geology*, 29(3):290—296 (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, 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
- Wang, B. H., Qian, K., 1992. Geological Research and Exploration Practice in Shengli Oil Field. Petroleum University Publishing House, Dongying (in Chinese).
- Wang, R., 2007. Formation and Occurrence of Stratigraphy Oil-Pools in the Jiyang Super-Depression (Dissertation). China University of Petroleum, Dongying (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Jiang, P. H., Wu, F. D., et al., 2002. Discovery and Sedimentary Characteristics of the Neogene Delta in Bozhong Depression and Its Significance for Oil and Gas Exploration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 588—594 (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 & Gas*, 25(4):1—11 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Du, X. F., Xu, W., et al., 2017. New Advances of the “Source-to-Sink” System Research in Sedimentary Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(1):1—11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Ji, Y. L., 1998. The Control of the Sequence Development by the Paleogene Ancient Climate Change in Dongying Sag. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 6(22):26—30 (in Chinese).
- Zhang, X., Zhang, J. L., 2007. Sedimento-Geochemical Features of Sandstones from the Fourth Member, Shahejie Formation in the Southern Slope of Dongying Sag. *Chinese Journal of Geology*, 42(2):303—318 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W., Qiu, L. W., Jiang, Z. X., et al., 2011. Depositional Evolution and Model of Shallow Water Delta in the Rifting Lacustrine Basins during the Shrinking Stage: A Case Study of the Third Member and Second Member of Paleogene Shahejie Formation in the Niuzhuang Sub-sag Dongying Sag. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 1019—1027 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Li, J. P., Zhou, X. H., et al., 2008. Neogene Shallow Water Deltaic System and Large Hydrocarbon Accumulations in Bohai Bay, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(4):575—582 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Liu, Y., Fang, Q., et al., 2012. Formation and Sedimentary Model of Shallow Delta in Large-Scale Lake. Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 19(1):89—99 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Li, S. L., Pan, R., et al., 2016. Current Hot Topics and Advances of Sedimentology: A Summary from 32nd IAS Meeting of Sedimentology. *Journal of Palaeogeography*, 18(5):699—716 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, W. Z., Zhang, X. Y., et al., 2008. Formation and Distribution of Shallow-Water Deltas and Central-Basin Sandbodies in Large Open Depression Lake Basins. *Acta Geologica Sinica*, 82(6):813—825 (in Chinese with English abstract).
- ## 附中文参考文献
- 毕义泉, 2002. 东营凹陷滨县凸起南坡砂砾岩体成因模式与成藏规律. 中国石油大学学报: 自然科学版, 26(4): 12—15.
- 操应长, 王健, 刘惠民, 等, 2009. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式. 中国石油大学学报: 自然科学版, 33(6): 5—10.
- 陈中红, 查明, 刘太勋, 2008. 东营凹陷古近系古湖盆演化与水化学场响应. 湖泊科学, 20(6): 705—714.
- 邓宏文, 王红亮, 王敦则, 2001. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制——以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例. 石油与天然气地质, 22(4): 293—296.
- 郭少斌, 孙绍寒, 2006. 周家湾地区前侏罗纪古地貌恢复及油气富集规律. 地球科学, 31(3):372—377.
- 加东辉, 吴小红, 赵利昌, 等, 2005. 渤中 25-1 南油田浅水三角

- 洲各微相粒度特征分析.沉积与特提斯地质,25(4): 87—94.
- 贾光华,2013.东营凹陷南坡古近系红层砂体储层特征及控制因素.东北石油大学学报,37(3): 48—58.
- 赖维成,宋章强,周心怀,等,2010.“动态物源”控砂模式.石油勘探与开发,37(6): 763—768.
- 李顺利,朱筱敏,李慧勇,等,2017.源汇系统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,4(29): 39—50.
- 李守军,郑德顺,姜在兴,等,2005.用介形类优势分异度恢复古湖盆的水深——以山东东营凹陷古近系沙河街组沙三段湖盆为例.古地理学报,7(3): 399—404.
- 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.
- 楼章华,袁笛,金爱民,2004.松辽盆地北部浅水三角洲前缘砂体类型、特征与沉积动力学过程分析.浙江大学学报理学版,31(2): 211—215.
- 阮壮,谭广辉,于炳松,等,2013.浅水湖盆内砂体类型及其控制因素分析——以松辽盆地喇萨杏地区 PI 油层为例.地层学杂志,37(3): 321—330.
- 盛文波,操应长,刘晖,等,2008.东营凹陷古近纪控盆断层演化特征及盆地结构类型.石油与天然气地质,29(3): 290—296.
- 王秉海,钱凯,1992.胜利油气地质研究与勘探实践.东营:石油大学出版社.
- 王锐,2007.胜利探区地层油藏富集规律与勘探技术研究(博士学位论文).东营:中国石油大学.
- 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.
- 徐长贵,杜晓峰,徐伟,等,2017.沉积盆地“源—汇”系统研究新进展.石油与天然气地质,38(1): 1—11.
- 徐长贵,姜培海,武法东,等,2002.渤中坳陷上第三系三角洲的发现、沉积特征及其油气勘探意义.沉积学报,20(4): 588—594.
- 张世奇,纪友亮,1998.东营凹陷早第三纪古气候变化对层序发育的控制.中国石油大学学报:自然科学版,6(22): 26—30.
- 张鑫,张金亮,2007.东营凹陷南坡沙河街组四段砂岩地球化学特征.地质科学,42(2): 303—318.
- 赵伟,邱隆伟,姜在兴,等,2011.断陷湖盆萎缩期浅水三角洲沉积演化与沉积模式——以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙三段上亚段和沙二段为例.地质学报,85(6): 1019—1027.
- 朱伟林,李建平,周心怀,等,2008.渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探.沉积学报,26(4): 575—582.
- 朱筱敏,刘媛,方庆,等,2012.大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例.地学前缘,19(1): 89—99.
- 朱筱敏,李顺利,潘荣,等,2016.沉积学研究热点与进展:第32届国际沉积学会议综述.古地理学报,18(5): 699—716.
- 邹才能,赵文智,张兴阳,等,2008.大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布.地质学报,82(6): 813—825.