

渤中凹陷石南陡坡带东段古近系源汇系统分析

徐春强¹ 周 勇^{2,3} 纪友亮^{2,3} 柳永军¹ 王晨杰¹
王 柯^{2,3} 高星星^{2,3} 黎明涛^{2,3} 孙宏博^{2,3}

1 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘 要 源汇系统研究对于断陷盆地砂体分布及岩性圈闭预测具有重要的意义。渤中凹陷石南陡坡带东段古近纪发育多种古地貌, 为多类型源汇系统研究提供了有利的原型盆地背景, 但不同时期源汇系统研究不深入, 尤其缺乏古地貌与沉积砂体的定量关系研究, 严重制约了研究区有利目标的预测。本研究基于三维地震、岩心及测井等资料, 系统地分析了该区古近纪古地貌特征与源汇系统结构, 揭示了不同类型古地貌输砂系统对沉积体系和砂体分布的控制作用, 并建立了不同时期的源汇系统模式及古地貌控砂模式。研究结果表明, 石南陡坡带东段古近纪发育古沟谷、断槽、构造调节带及坡折带 4 类物源通道。沟谷可划分为 U 型、V 型、W 型及复合型, 其中 U 型沟谷输砂能力最强, V 型、W 型沟谷输砂能力相对较弱; 断槽呈现出不对称箕状充填结构; 构造调节带发育受断层活动性强弱影响, 并控制物源入口位置; 坡折带可进一步细分为陡坡断阶型坡折带、缓坡型坡折带、断崖型坡折带及盆内坡折带 4 种类型。根据物源距离及输导体类型, 进一步将源汇系统划分为近源与远源 2 大类共 5 小类。凸起区汇水面积、沟谷长度、展布面积及数量与沉积体规模及延伸距离呈明显正相关。

关键词 同沉积构造活动 构造古地貌 源汇系统 古近系 石南陡坡带

第一作者简介 徐春强, 男, 1984 年生, 高级工程师, 从事石油地质综合研究。E-mail: xuchq2@enooc.com.cn。

中图分类号: P588.21 文献标志码: A

Analysis of the Paleogene source-to-sink system in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag, Bohai Bay Basin

XU Chunqiang¹ ZHOU Yong^{2,3} JI Youliang^{2,3} LIU Yongjun¹ WANG Chenjie¹
WANG Ke^{2,3} GAO Xingxing^{2,3} LI Mingtao^{2,3} SUN Hongbo^{2,3}

1 Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract The study of source-to-sink systems plays a pivotal role in predicting sand-body distribution and lithologic trap configurations within rift basins. During the Paleogene, diverse palaeogeomorphological features developed along the eastern segment of the Shinan steep slope zone in the

Bozhong sag—creating an ideal natural laboratory for investigating multiple source-to-sink system types. Nevertheless, research on temporal evolution of these systems remains limited, particularly due to the scarcity of quantitative analyses linking palaeogeomorphic architecture to sedimentary sand-body characteristics—a gap that significantly hinders the identification and prioritization of prospective exploration targets. Integrating 3D seismic data, core observations, and well-log interpretations, this study conducts a systematic characterization of Paleogene palaeogeomorphology and source-to-sink system architecture in the study area. We elucidate how sediment transport systems govern the spatial organization of depositional systems and establish stage-specific source-to-sink coupling models and palaeogeomorphology-controlled sediment dispersal frameworks. Our analysis identifies four principal sediment transport pathways: paleo-valleys, fault-controlled troughs, structural accommodation zones, and slope-break zones. Paleo-valleys are further classified into U-shaped, V-shaped, W-shaped, and composite morphologies; among these, U-shaped valleys exhibit the highest sediment transport efficiency, whereas V- and W-shaped variants demonstrate comparatively lower capacity. Fault-controlled troughs display asymmetric half-graben fill geometries, while structural accommodation zones develop in response to fault activity intensity—thereby regulating sediment entry points. Slope-break belts are subdivided into four categories: steep fault-terrace, gentle, fault-scarp, and intra-basin slope-break zones. A statistically robust positive correlation is observed between key palaeogeomorphic parameters—including catchment area of uplifted source regions, valley length, total valley distribution area, and valley count—and both the volume and lateral extent of associated sedimentary bodies. Finally, integrating transport distance from source and pathway type, we propose a two-tier (proximal vs. distal) classification scheme comprising five distinct subtypes, each supported by a corresponding source-to-sink coupling model.

Key words syndepositional faulting movement, palaeogeomorphology, source-to-sink system, Paleogene, eastern part of Shinan steep slope zone

About the first author XU Chunqiang, born in 1984, is a senior engineer. He is mainly engaged in comprehensive study of petroleum geology. E-mail: xuchq2@enooc.com.cn.

0 前言

近年来,源汇系统研究已经在地球科学领域中得到了广泛的关注(Allen, 2008; Sømme and Jackson, 2013; 朱红涛等, 2017; 朱筱敏等, 2026)。源汇思想最初应用于大陆边缘沉积中,逐渐在沉积学领域中兴起(Teixeira *et al.*, 2018),成为沉积体系半定量分析的基础和前提(Sømme *et al.*, 2009; Carvajal and Steel, 2012; Sømme and Jackson, 2013; Vakarelov and Ainsworth, 2013; 朱红涛等, 2017; 冯斌等, 2023),其优势是把物源区产生的碎屑沉积物通过搬运进入到沉积区沉积下来的整个过程作为一个系统对象开展研究,指导地质事件的预测(朱红涛等, 2011, 2013; Horner *et al.*, 2019; 杨丽莎等, 2021)。不同构造背景下形成了不同类型的沉积盆地及其丰富的地形地貌,造就了源汇系统的复杂性。源汇系统发育的影响因

素较多,可根据不同的主控因素和发育特征进行分类。Helland-Hansen等(2016)根据地貌的空间结构特征,将源汇系统细分为近源—陡坡—深水、远源—缓坡—深水和远源—缓坡—浅水等3种类型。Bhattacharya等(2016)进一步根据物源区面积与沉积区扇体面积的比值划分了对称哑铃型和非对称哑铃型2种源汇系统。刘强虎(2016)根据源区、搬运体系及其与沉积体系之间的边界样式将沙垒田凸起划分为断裂陡坡型、断裂缓坡型、斜坡型等3种“源—渠—汇”系统。

渤中凹陷石臼坨凸起南部陡坡带(下文称“石南陡坡带”)古近纪发育多级同沉积断裂体系,同沉积构造的活动可形成多种类型古地貌,为多类型源汇系统发育提供了有利的原型盆地背景。前人针对石南陡坡带东段层序地层、沉积体系及源汇系统开展了大量研究,但并未形成统一认识(吴磊

等, 2006; 周士科等, 2006; 周东红等, 2011; 李建平, 2012; 庞小军, 2017)。林畅松等 (2015) 利用三维地震资料追踪不同时期上超点的分布, 确定了不同时期物源区的分布范围, 揭示了与盆内局部凸起有关的源汇系统及其沉积体系的分布; 徐长贵等 (2017) 在源汇时空耦合控砂理论的指导下, 在渤海海域识别并总结出常见的 8 种源汇系统; 周晓光等 (2017) 通过井震联合构造层序解释, 对石臼坨凸起西段南部物源区母岩类型、古沟谷发育规模及沉积体系分布进行了研究。虽然前人研究取得了重要进展, 但从同沉积构造活动及其配置所产生的古地貌对沉积体系和砂体分布控制的角度开展的系统研究还不够深入。尤其是针对“石南陡坡带东段 (石臼坨东部)” 这一具体区域的源汇系统仍存在搬运路径研究不够深入、缺乏古地貌与沉积砂体的定量关系重建等问题。

本研究基于三维地震、钻井岩心、测井等资料, 以层序地层学理论为指导, 从源汇系统研究角度分析渤中凹陷石南陡坡带东段古近系物源及沉积体系, 明确了物源形成与供源作用、古地貌类型与沉积砂体分布的关系, 建立了源汇系统耦合模式。研究成果对于深化断陷湖盆源汇系统理论、指导断陷湖盆砂体分布预测具有重要的理论意义和实际价值。

1 区域地质背景

石南陡坡带位于渤中凹陷以北、秦南凹陷以南, 近东西向展布, 为长期继承性发育的宽缓凸起, 总面积约为 2040 km²。研究区主要位于石南陡坡带东段, 其南部发育多级断裂带, 可进一步划分为凸起主体、南倾末端 427 构造和东倾末端 428 构造 (王启明等, 2016; 代黎明等, 2017; 徐长贵和杜晓峰, 2017) (图 1-a)。

石南陡坡带古近纪构造演化经历了断陷 I 期、断拗 I 期、断陷 II 期、断拗 II 期等 4 个阶段, 不同地质时期的地层发育特征差异明显 (图 1-b)。断陷 I 期 (孔店组—沙三段), 盆地由孔店期多断多凹的构造格局转换为统一整体, 孔店组岩性主要为灰色、紫红色泥岩夹砂砾岩, 沙四段为灰色、红褐色泥岩夹薄层云岩, 沙三段以灰色泥岩为主。断拗 I 期 (沙二段—沙一段), 构造沉降缓慢, 为断拗过渡期, 断层活动性相对沙三段沉积时期明显减弱, 主要发育厚层泥岩夹薄层砂岩。断陷 II 期 (东三段—东二段), 湖平面进一步扩大, 水体加深, 石南陡坡带东段主体周围主要发育辫状河三角洲及扇三角洲沉积, 湖区发育巨厚的湖相泥岩。断拗 II 期 (东一段), 盆地内高凸起被剥蚀夷平, 湖盆逐渐被填平补齐, 岩性主要为灰白色泥质粉砂岩

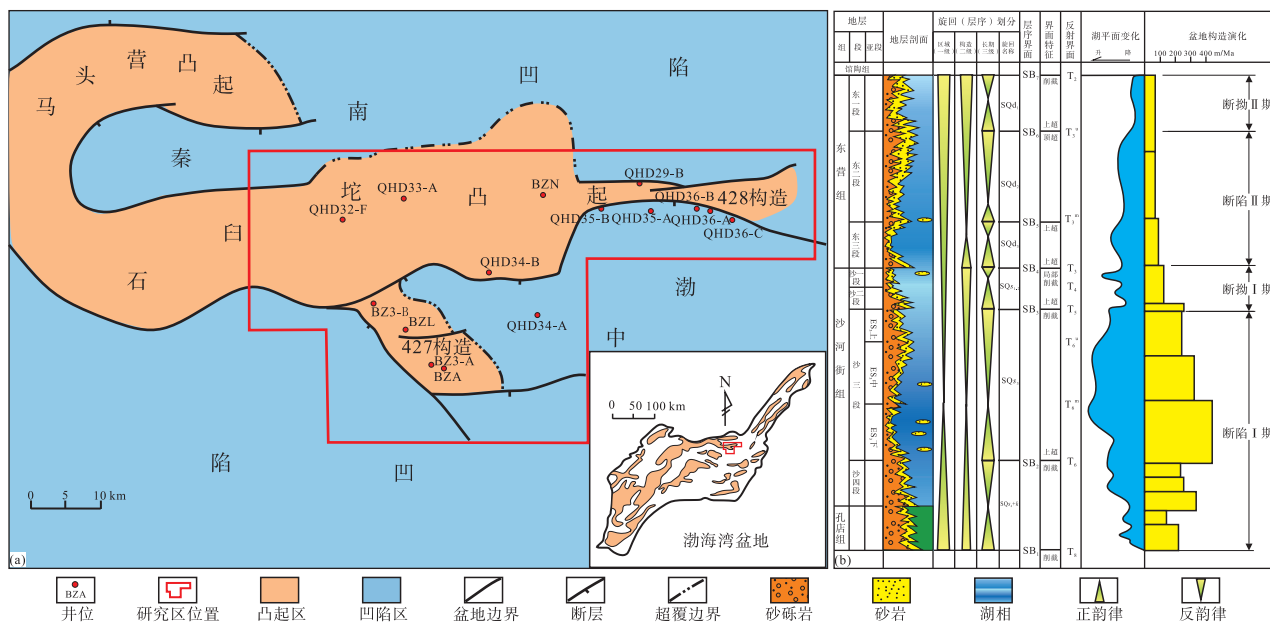


图 1 渤中凹陷石南陡坡带东段位置 (a) 及古近系地层综合柱状图 (b)

Fig. 1 Location of eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag, Bohai Bay Basin (a) and comprehensive stratigraphic column of the Paleogene (b)

以及灰绿色泥岩。

2 层序地层及沉积充填特征

2.1 层序地层特征

以层序地层学理论为指导,通过地震反射终止关系在地震剖面上识别各级层序界面,将孔店组—东一段划分为2个二级层序、6个三级层序和13个体系域(图1-b;图2)。

三级层序 SQ_{s_4+k} 底界面 SB1 (T_8) 与下伏地层呈角度不整合,全区分布,界面之上的超覆现象和界面之下削截特征明显。 SQ_{s_3} 底界面 SB2 (T_6) 为一局部不整合面及其对应的界面,在靠近428凸起局部位置可见上超和下超现象,界面之下可见局部削截现象(图2-b)。 $SQ_{s_{1-2}}$ 底界面 SB3 (T_5) 位于沙二段的底部,在地震剖面上表现为1条振幅强连续性好的地震轴,地震轴之下可见局部的削截现象(图2-b)。 SQ_{d_3} 底界面 SB4 (T_3) 为东三段底界面,亦为局部不整合面,在427缓坡带界面之上可见上超现象(图2-b)。 SQ_{d_2} 底界面 SB5 (T_3^m) 在428凸起附近可见局部的上超现象,界面之下局部削截。 SQ_{d_1} 层序界面 SB7 (T_2) 是东营组与上覆馆陶组的界面, T_2 界面之上是弱振幅平行反射, T_2 界面之下削截现象明显(图2-b)。

2.2 沉积充填特征

石南陡坡带东段古近系主要发育扇三角洲、辫状河三角洲、近岸水下扇、远岸湖底扇和滩坝等5种沉积相类型。

扇三角洲主要发育于沙一二段、东三段沉积期,主要分布在427构造西侧及428构造南侧凸起陡坡带一侧,地震剖面上呈现为楔状前积反射特征,扇体顶底面的反射具有较好的连续性,扇体根部多为杂乱反射,扇体内部多为中弱振幅、低连续反射特征(图2-a,2-b)。

辫状河三角洲主要发育于东一、东二、东三段沉积期,主要分布在石白坨凸起缓坡带一侧(图2-c)。在地震剖面上,辫状河三角洲具有明显的前积反射特征,沉积体内部呈现出中强振幅、中高连续反射特征,可识别出多期叠置的砂体(图2-a,2-b)。

近岸水下扇主要发育于沙三段沉积时期,分布在427构造西侧构造活动强烈的断层周围,和深湖

一半深湖相共同发育,地震剖面上主要表现为弱振幅、低连续的蠕虫状或杂乱反射(图2-a,2-b)。

远岸湖底扇主要发育于东二段低位域沉积期,在多级坡折背景下由于湖平面下降,前期沉积的三角洲砂体在重力等作用的诱导下发生滑动,在三角洲的前方坡折带下方深湖和半深湖区域堆积形成远岸湖底扇(图2-c)。

滩坝砂体主要发育于沙二—东二段沉积期,分布在427构造缓坡一侧以及428构造南侧。427构造缓坡一侧主要发育沿岸滩坝;沙二段沉积期,428构造以南主要发育扇三角洲沉积,经波浪改造后形成滩坝沉积;东二段沉积期,428构造已经完全没入水下,后期经过波浪作用改造,局部形成滨浅湖滩坝沉积(图2-c)。

3 古地貌恢复及古地貌特征

3.1 古地貌恢复

本次研究首先利用层拉平、残余地层厚度法等方法对石南陡坡带东段古近系进行了古地貌恢复,之后再通过差异压实校正及剥蚀厚度恢复得到最终的古地貌形态(加东辉等,2007;姜素华等,2011)。

3.1.1 残余地貌重建

在地质分析的基础上,根据主要地震剖面上的分层数据,在地震覆盖区内确定上下地层关系,顶底面相减得到现今残余地层厚度。

3.1.2 差异压实校正

借助钻测井资料,根据地层的孔隙度—深度曲线拟合孔—深函数,基于地层骨架体积不变的原理对其进行去压实校正,恢复岩层的埋藏压实量。

首先,根据岩石粒度数据计算净砂岩的初始孔隙度(φ_0):

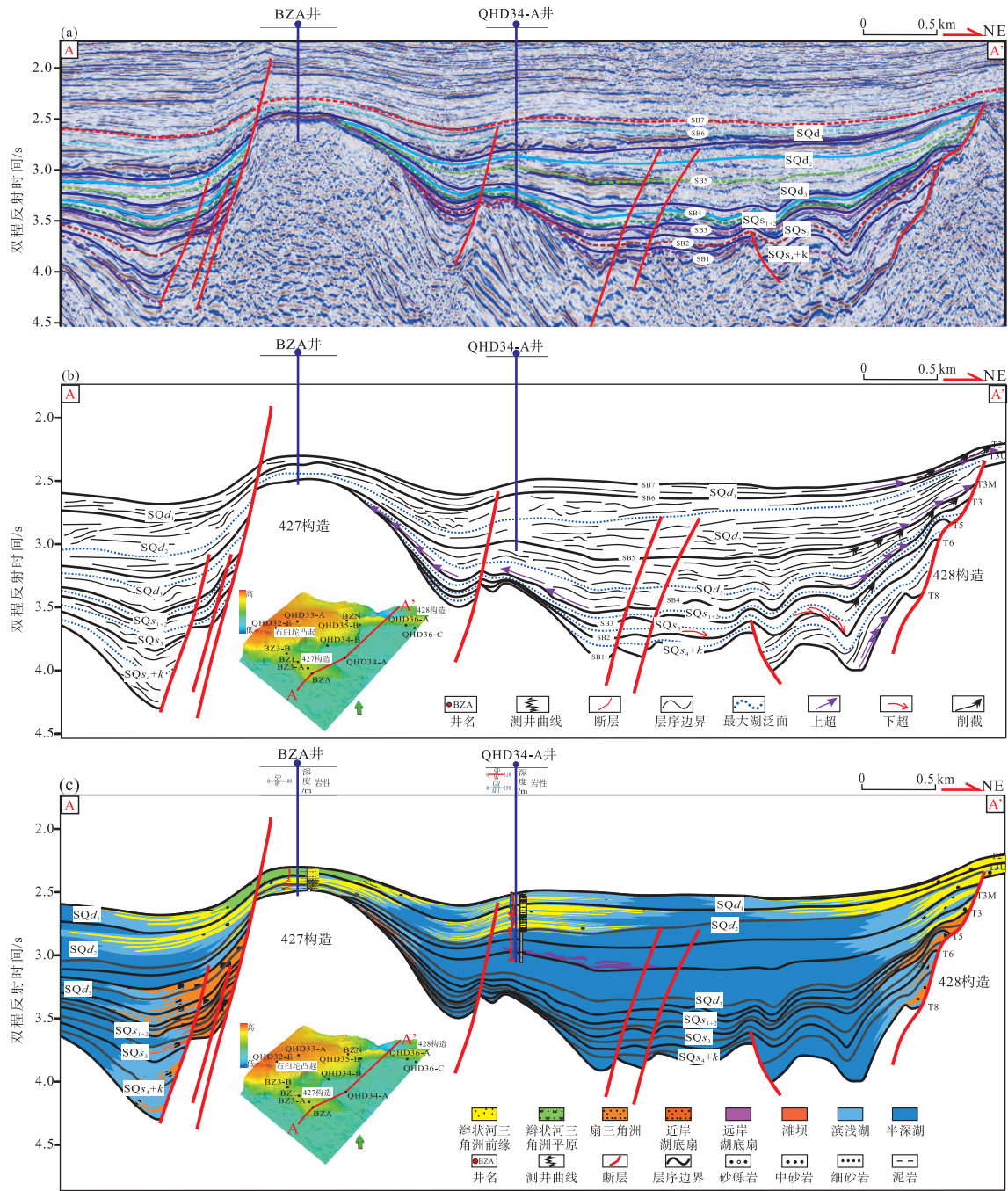
$$\varphi_0 = 20.91 + 22.9/S_0 \quad (1)$$

其中 S_0 是 Trask 分选系数, $S_0 = P25/P75$, 其中 P25 和 P75 分别是指概率累积曲线上 25% 和 75% 所对应的颗粒直径。

通常认为碎屑岩在压实作用下,随着埋深的增大,孔隙度呈现出指数减小或线性减小的趋势,孔隙度与埋深之间的关系为:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-cz} \quad (2)$$

式中: φ 为现今孔隙度,%; φ_0 为初始孔隙度,%; z



a—AA'方向地震剖面层序地层格架解释；b—AA'方向井震结合层序地层格架剖面；c—AA'方向构造沉积剖面

图 2 渤中凹陷石南陡坡带东段井震结合层序地层格架及构造沉积剖面图

Fig. 2 Well-seismic integrated sequence stratigraphic framework and structural-sedimentary cross-section diagram of eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

为岩层埋深，m；c 为压实系数。

将上述孔隙度—深度关系方程代入去压实校正公式：

$$\int_{z_1}^{z_2} [1 - \varphi(z)] dz = \int_0^h [1 - \varphi_0] dz \quad (3)$$

式中：z1, z2 分别为某一地层顶、底界面深度，m；h 为恢复后的原始地层厚度，m。

针对每个砂质或泥质小段，分别代入对应的砂岩或泥岩孔隙度—深度关系方程进行计算，求得各小段的原始厚度 h，并对其求和，即可得到该井点

砂质或泥质层段的原始总厚度。

3.1.3 剥蚀厚度恢复

本次研究主要采用地层延伸趋势法, 根据未被剥蚀的地层发育特点以及延伸趋势, 可以实现对被剥蚀前地层分布的恢复。

3.1.4 古地貌三维可视化

在完成剥蚀厚度恢复的基础上, 通过压实校正将剥蚀区被剥蚀总量与现今残余地层厚度相加; 在三维地质软件中进行三维可视化处理, 得到相应时期古地貌形态。

研究区孔店组至沙三段沉积时期, 构造活动强烈, 427 构造的东部和西部、428 构造南部为该时期地势最低的区域, 与凸起区的高差较大, 从 428 构造向西逐渐过渡到 427 构造南部, 地势逐渐升高(图 3-a)。沙二段至沙一段沉积时期裂陷作用减弱, 盆地整体起伏不大, 428 构造南部、427 构造周围局部发育高地(图 3-b)。东三段沉积时

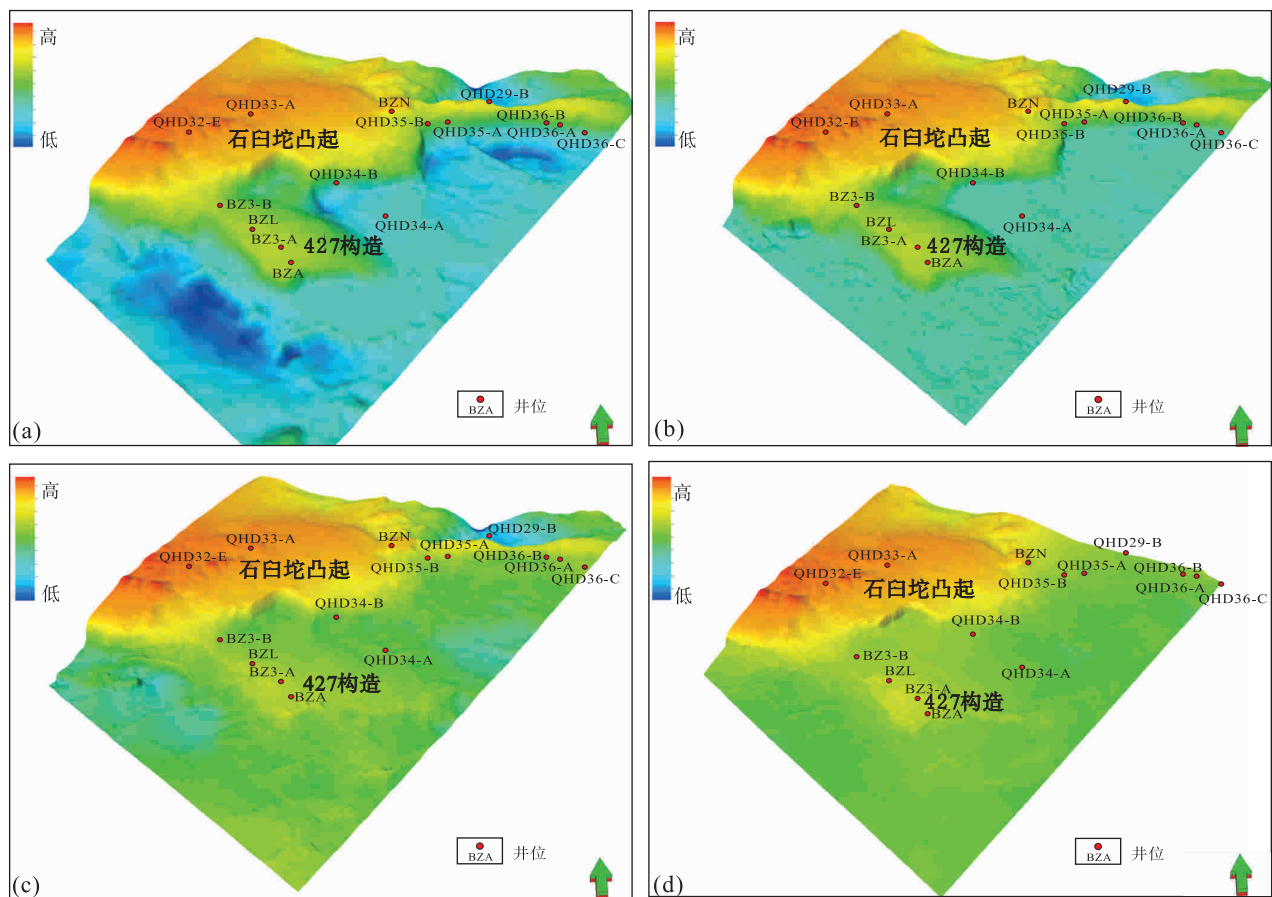
期, 427 构造部分已经没入水下, 其西侧由于多期次强烈的构造活动而地势降低。石南陡坡带东段、428 构造与沉积区高差进一步减小, 凸起周围地势较高, 向南地势逐渐降低(图 3-c)。东二段沉积时期, 盆地整体起伏不大, 此时 428 构造已经完全没入水下, 成为水下隆起, 物源区面积减小, 前期断裂陡坡带均逐渐转化为较为平缓的斜坡(图 3-d)。东一段沉积时期, 石南陡坡带东段整体被沉积物覆盖, 凸起不再提供物源。

3.2 古地貌类型及特征

石南陡坡带东段主要发育沟谷、断槽、构造调节带和坡折带等 4 种古地貌类型。

3.2.1 沟谷

沟谷作为物源进入盆地的入口, 沉积物会顺着坡折散开, 在沟谷的下部发育三角洲。根据古沟谷的几何形态特征, 可进一步划分为 V 型、U 型、W



a—沙四段—沙三段沉积期古地貌; b—沙二段—沙一段沉积期古地貌; c—东三段沉积期古地貌; d—东二段沉积期古地貌

图 3 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系不同层序沉积期古地貌图

Fig. 3 Palaeogeomorphic map during sedimentation of different sequences of the Paleogene in eastern segment of Shinnan steep slope zone, Bozhong sag

型和复合型。

研究区沟谷主要分布在石南陡坡带东段 428 构造和 427 构造，剖面形态有 V 字型、U 字型和 W 型，共发育 21 条沟谷，编号为 V1-V21 (图 4)。427 构造可以识别出 5 个沟谷体系，编号为 V1-V5 (图 5-a)，大部分表现为 V 型特征，均为东西走向的小规模古沟谷，碎屑物质经过短程水系搬运，沿着古沟谷输导，进入洼陷沉积(图 5-a)。东段主体部分可识别出 8 个沟谷体系，编号为 V6-V13 (图 5-b)，以 U 型、W 型为主，发育于古水系后期，水道分叉，水动力相对减弱，输导、搬运、沉积砂体能力相对减弱。沟谷在东三段沉积时期之前持续为盆地提供和搬运物源，沟谷规模较大，为盆地中最主要的物源搬运入口。东二段时期基准面上升，逐渐向沉积沟谷转换(图 5-b)。428 构造可识别 8 个沟谷体系，编号为 V14-V21 (图 5-c)，以 U 型特征为主，均为东西走向的小规模古沟谷。东二段沉积时期，基准面上升，428 构造不再提供物源(图 5-c)。

3.2.2 断槽

在断陷湖盆内部受多期构造运动影响和改造，在盆地边缘部位往往会形成一系列由断裂活动形成的槽道，为沉积区内重要的搬运通道之一。研究区断槽发育在石南陡坡带东段主体东部和 427 构造西侧，石南陡坡带东段主体东部断槽由南掉断层形成，427 构造西侧断槽由垂直于 427 构造走向的东

南掉的断层形成，断槽呈东西向延伸(图 4)。断槽不只是物源重要的搬运通道也可以作为沉积物卸载区。在物源供应量充足的条件下，大量的碎屑物质会顺断槽的长轴方向搬运到洼陷区形成规模较大、延伸较远的三角洲扇体。

3.2.3 构造调节带

构造调节带是指伸展区为保持区域伸展应变守恒而产生的伸展变形构造。在伸展断陷中，构造调节带的形成与断层的位移沿走向的变化密切相关。受沿断层走向差异沉降作用影响，断层强烈活动段上盘沉降量大，下盘均衡抬升量也大。因此，断层下盘为地形的相对高点，断层上盘为地势相对低点，在断层上盘断距小的位置形成横向凸起来调节断层沿走向上断距的变化(图 6-a)。古水系会通过断层上盘的相对高点向地势低点移动，碎屑物质随水系向地势低点推进，调节带处成为物源入口，形成厚度较大的冲积扇、扇三角洲体系(图 6-a)(吴磊等，2006；祝彦贺等，2011；林畅松等，2015；王星星等，2016；庞小军等，2017；周勇等，2022)。石南陡坡带 428 构造 QHD35-A 井周围发育鼻状横向凸起调节带，平行物源方向的地震剖面显示多期前积结构(图 6-b)，垂直物源方向的地震剖面呈透镜状(图 6-c)。

结合地震剖面，在沿边界断裂走向方向上选取一系列的观测点(图 7-a)，计算古近纪不同沉积时期断层活动速率。结果表明，石南陡坡带东段不

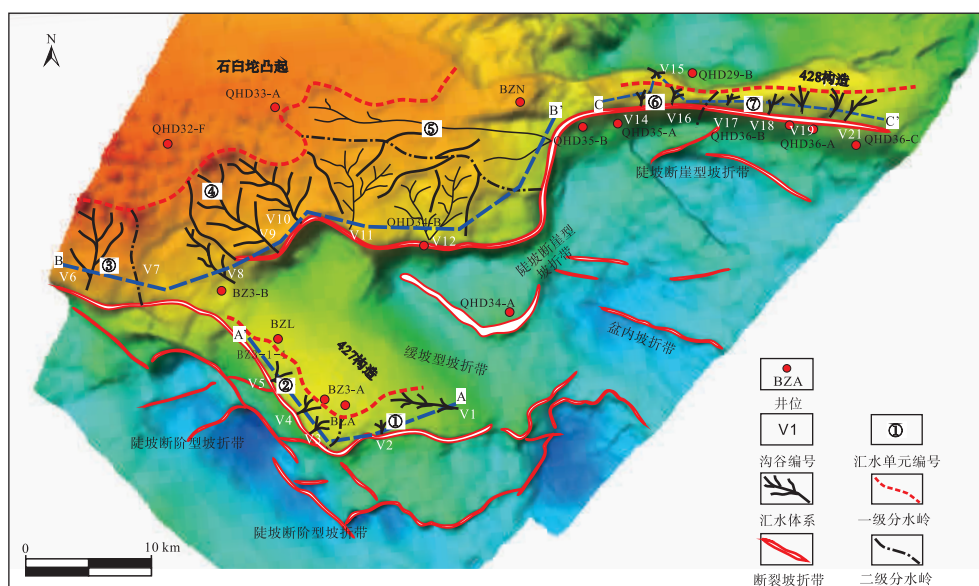
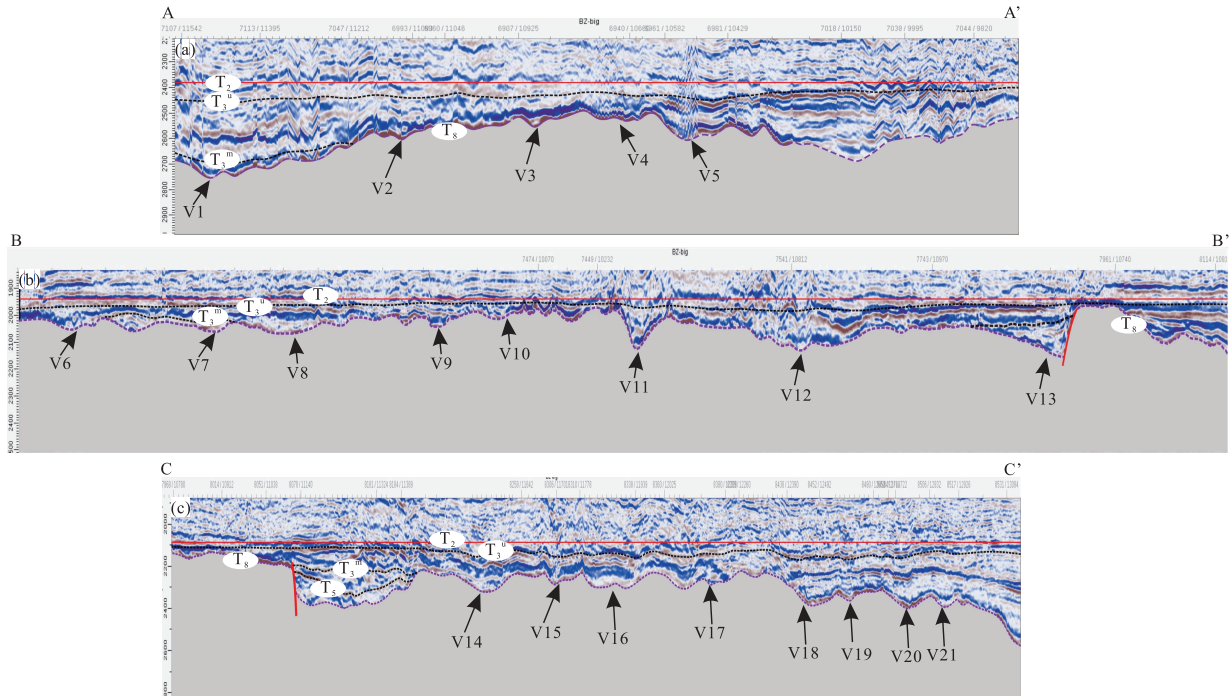


图 4 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系古地貌类型示意图

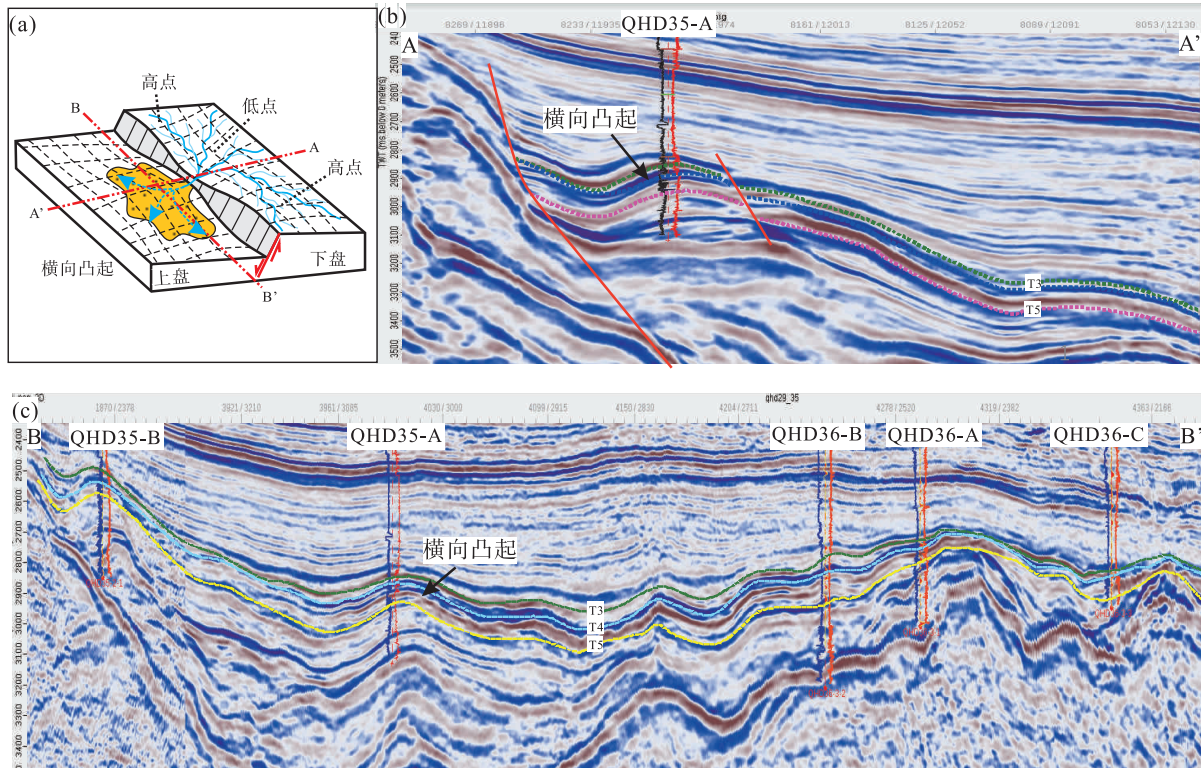
Fig. 4 Schematic diagram of paleogeomorphological types in eastern segment of the Shinan steep slope zone, Bozhong sag



a—古沟谷地震反射特征 AA' 剖面；b—古沟谷地震反射特征 BB' 剖面；c—古沟谷地震反射特征 CC' 剖面

图 5 渤中凹陷石南陡坡带东段古沟谷地震反射特征剖面

Fig. 5 Profile of seismic reflection characteristics of paleo-channel in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag



a—构造调节带模式图；b—顺物源方向剖面；c—垂直物源方向剖面

图 6 渤中凹陷石南陡坡带东段横向凸起构造调节带地震相特征 (剖面位置见图 7-a)

Fig. 6 Seismic facies characteristics of the transverse uplift structural accommodation zone in the eastern segment of the Shinan steep slope zone, Bozhong sag

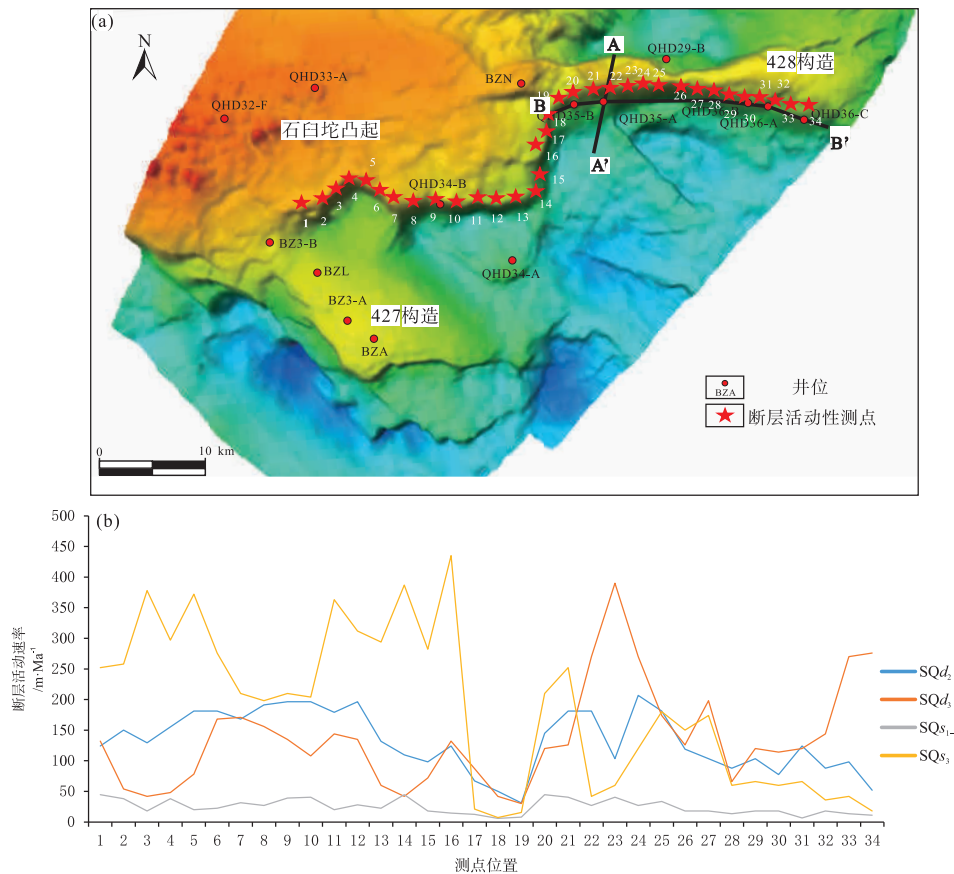


图 7 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系边界断层活动性测量点分布 (a) 及活动性统计 (b)

Fig. 7 Distribution of measuring points (a) and activity statistics (b) for the Paleogene boundary fault activity in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

同时期边界断裂活动速率存在明显差异,从沙三段至东二段整体表现为“强—弱—强—弱”的构造强度变化规律。沙三段沉积时期为盆地强裂陷期,此时边界断裂构造活动强烈,断裂活动速率大;沙一、二段沉积时期进入断拗期,断裂活动速率减小;东三段构造活动强度再次加强,之后进入东二段沉积时期,构造活动逐渐稳定,断裂活动速率逐渐减小。同一时期不同构造位置边界断裂活动速率也存在较大差异(图 7-b),在 SQ_{s_3} (沙三段)、 $SQ_{s_{1-2}}$ (沙一、二段)、 SQ_{d_3} (东三段) 时期,测点 3, 测点 17、19, 测点 23, 测点 27、28、29 处断层活动强度弱,是构造调节带的位置,控制着输砂体系的位置。

3.2.4 坡折带

研究区识别出 4 种坡折带类型:(1) 陡坡断阶型坡折带,由 1~3 个断阶组成,主要分布在 427 构造的西侧;(2) 缓坡型坡折带,为一简单缓坡,

主要分布在 427 构造的东侧;(3) 断崖型坡折带,形态为陡崖,主要分布在 428 构造的南侧和石臼坨主体的南侧;(4) 盆内坡折带,盆地内部的断阶,主要分布在凹陷内部(图 4)。

4 源汇系统耦合分析

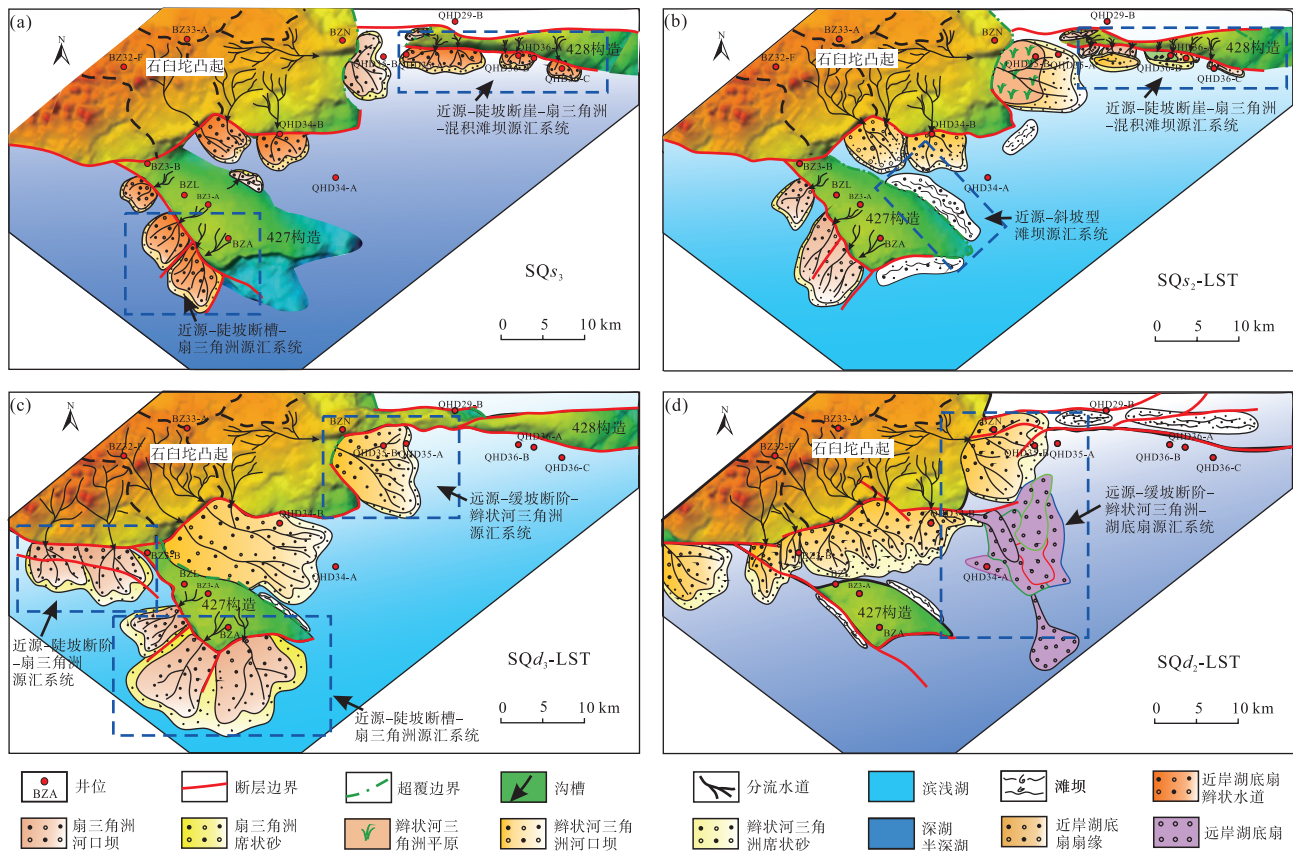
4.1 源汇系统类型划分

结合物源距离、古地貌特征、输导体系类型和沉积体系分布特征,将石南陡坡带东段古近系源汇系统划分为近源型源汇系统、远源型源汇系统,其中近源型源汇系统可进一步划分为 4 种类型(图 8)。

4.1.1 近源型源汇系统

(1) 近源—陡坡断槽—扇三角洲源汇系统

该类型源汇系统主要发育在沙三段—东三段沉积期 427 构造西侧,发育 2 个近源汇水区域,规模均较小,供源能力弱。427 构造西侧沉积体系主要



a—SQs₃ 沉积时期; b—SQs₁₋₂ 沉积时期; c—SQd₃ 沉积时期; d—SQd₂ 沉积时期

图 8 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系不同层序沉积期源汇系统分布

Fig. 8 Distribution of source-to-sink systems of different sequence stratigraphic units in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

受物源及古沟谷、断槽等物源通道控制, 该区域断层活动强烈, 断裂带之间形成不同期次的垂直于岸线的断槽物源通道, 物源区的碎屑物质, 经过古沟谷短暂搬运后进入湖盆, 顺着盆内断槽物源通道延伸方向继续向盆内推进形成扇三角洲沉积, 单个沟谷对应单个扇体沉积, 扇体之间独立分布(图 8-a, 8-b, 8-c)。

(2) 近源—陡坡断崖—扇三角洲/混积滩坝源汇系统

该类型源汇系统主要发育于沙二段—沙一段沉积时期 428 构造附近。在物源区规模较小的背景下, 碎屑物质顺着古沟谷物源通道搬运直接进入盆地, 在断层下降盘一侧形成连片分布或裙带状展布的近源粗粒扇三角洲沉积。由于物源区面积较小, 供源能力较弱, 该时期扇三角洲延伸距离较近, 均分布在断层周围, 扇体厚度整体较小, 后期由于波浪作用对扇三角洲砂体的改造, 形成大面积分布的

碎屑岩滩坝和碳酸盐滩坝沉积(图 8-b)。

(3) 近源—陡坡断阶—扇三角洲源汇系统

该类型源汇系统主要发育在东三段沉积期石臼坨凸起主体西南侧, 发育 2 个汇水区和 3 个沟谷物源通道, 供源能力强。该时期石臼坨主体西南侧沉积体系主要受物源及古沟谷、陡坡断阶控制, 物源区的碎屑物质, 经过古沟谷短暂搬运后进入湖盆陡坡断阶带, 形成扇三角洲沉积, 单个沟谷对应单个扇体沉积, 扇体之间独立分布(图 8-c)。

(4) 近源—斜坡型—滩坝源汇系统

该类型源汇系统主要发育于沙二段—东二段沉积时期 427 构造东侧, 该区斜坡型边界发育, 来自凸起汇水区的碎屑物质沿多条沟谷向沉积区低势区搬运, 汇区发育了受斜坡带控制的辫状河三角洲, 由于波浪作用对辫状河三角洲砂体的改造, 形成了大面积的薄层滩坝沉积(图 8-b)。

4.1.2 远源型源汇系统

东二段沉积时期石白坨凸起主体东侧以缓坡断阶型边界为主。物源区的碎屑物质经 U 型或者 W 型物源通道远距离搬运后进入湖盆，发育辫状河三角洲沉积体系。在辫状河三角洲前方发育盆内坡折，在盆内坡折带附近发育多期滑塌扇沉积，在平面上叠合连片分布(图 8-d)。

4.2 源汇系统要素与沉积体系定量关系

通过对石南陡坡带东段源汇系统中汇水面积、古沟谷、断层活动速率等各项参数的统计，建立起源汇系统要素与沉积体系之间的半定量关系，进一步明确源汇系统特征。

4.2.1 汇水面积与沉积体系的耦合关系

物源区不同时期分水岭一直发生变化，对应不同区域的汇水面积既存在差异，也存在继承性。本研究利用沉积前地貌中分水岭最高点的连线，对物源区汇水面积进行划分，建立源汇要素之间的半定量关系。

首先根据东西向分水岭将石南陡坡带东段划分为南北 2 个区域，研究区主要位于凸起南侧，之后再根据次级分水岭进一步将石南陡坡带东段南侧由西向东划分为 3 个汇水单元，427 构造根据分水岭将其划分为 2 个汇水单元，428 构造划分为南北 2

个汇水单元(图 4)。在汇水单元划分的基础上，通过 Landmark 软件内置面积统计模块对不同时期汇水面积进行了统计。结果表明，随着汇水区面积的增大，沉积体的面积也会随之增大，呈现出明显的正相关关系。物源是形成沉积体系最重要的因素之一，汇水面积越大，物源区可提供的物源就越多，越容易形成大规模的沉积体系(图 9)。同时根据汇水面积与沉积体延伸距离之间的统计关系可得出，随着汇水面积的增大，沉积体系的延伸距离也随之增加，形成的沉积体系规模就越大(图 10)。

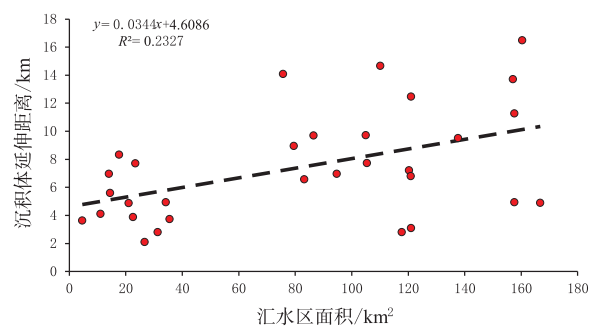
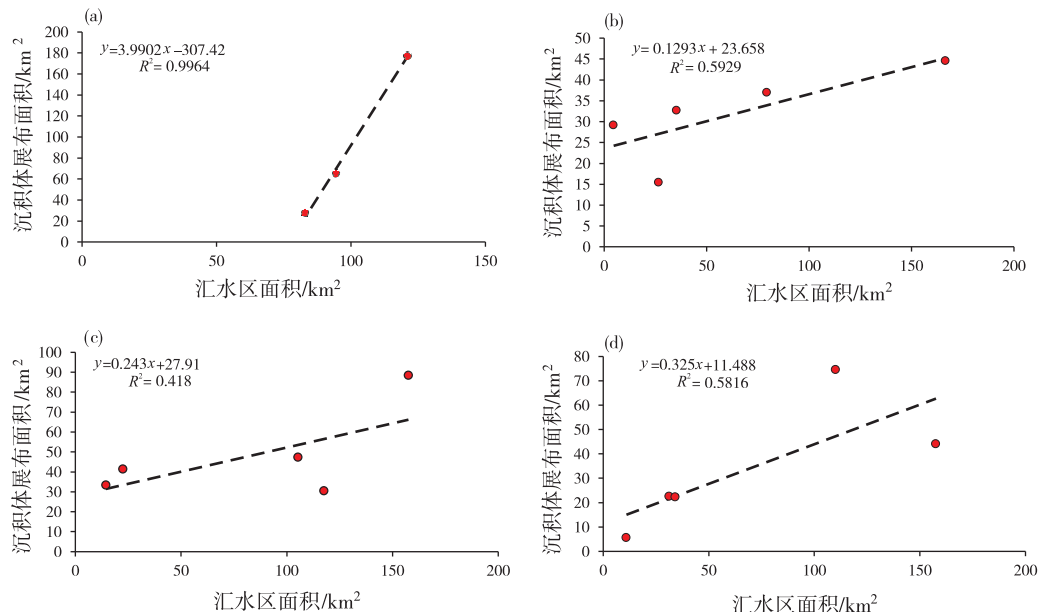


图 10 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系汇水面积与沉积体延伸距离关系

Fig. 10 Relationship between the Paleogene catchment area and sedimentary body extension in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag



a—东二段 TST 沉积体展布面积与汇水区面积交会图；b—沙三段沉积体展布面积与汇水区面积交会图；c—东三段 TST 沉积体展布面积与汇水区面积交会图；d—沙二段—沙一段沉积体展布面积与汇水区面积交会图

图 9 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系汇水面积与沉积体展布面积的关系

Fig. 9 Relationship between the Paleogene catchment area and distribution area of sedimentary bodies in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

4.2.2 沟谷发育特征与沉积体系的耦合关系

基于古地貌恢复, 在地震剖面上精细刻画古沟谷的各项物理参数, 包括长度、宽度、宽深比、沟谷的展布面积等参数(表 1)。其中 V1-V5 发育于 427 构造, V6-V13 分布于石臼坨凸起主体, V14-V20 分布于 428 构造。V13 为研究区古沟谷中规模最大、输砂能力最强的物源通道, 更容易发育大规模扇体。

统计汇水区上古沟谷的延伸长度、宽度、深

度、宽深比、展布面积及其对应沉积体系的展布面积及延伸长度, 建立了两者之间的量化关系。结果表明, 古沟谷的延伸长度、展布面积与沉积体的展布面积、延伸距离呈正相关关系, 古沟谷长度越长, 沉积体的展布面积越大、延伸长度越远。古沟谷的展布面积增大, 沉积体的展布面积与延伸长度也随之增加(图 11)。

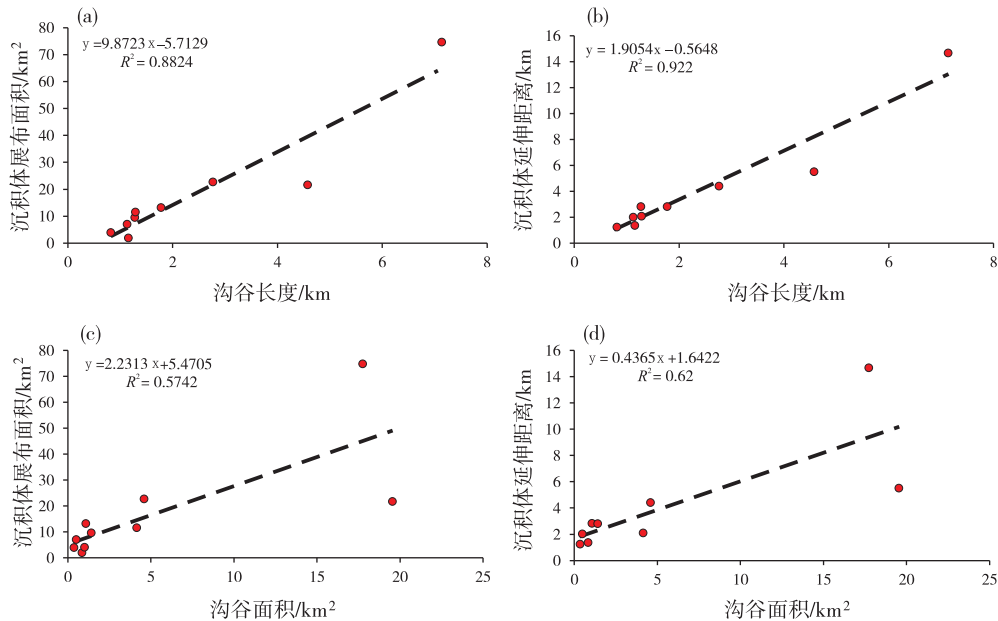
4.2.3 断层活动性与沉积体系的耦合关系

在统计目的层段边界断裂活动速率和沉积体的

表 1 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系沟谷物理参数统计

Table 1 Physical parameters of the Paleogene paleo-channel in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

沟谷编号	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
长/km	1.68	1.78	1.28	2.39	3.33	2.26	2.93	4.84	5.36	3.80
宽/km	1.31	0.71	1.07	1.91	1.79	1.98	2.56	2.56	3.03	2.24
深度/m	60.0	79.5	52.5	166.5	51.0	52.5	60.0	58.5	49.5	214.5
宽深比	21	9	20	11	33	37	42	43	61	10
沟谷面积/km ²	1.78	1.08	1.42	2.73	3.02	5.66	8.39	11.20	12.45	7.11
沟谷编号	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20
长/km	2.77	7.14	1.16	0.82	1.13	0.73	1.11	1.69	1.62	1.78
宽/km	1.60	3.60	0.69	0.30	0.49	0.72	0.88	0.86	1.02	0.75
深度/m	111.0	292.5	117.0	63.0	75.0	73.5	90.0	48.0	118.5	58.5
宽深比	14	13	6	5	6	10	10	18	9	13
沟谷面积/km ²	4.60	17.76	0.85	0.37	0.51	1.20	0.91	0.93	1.12	1.02



a—沙二段—沙一段沉积体展布面积与沟谷长度交会图; b—沙二段—沙一段沉积体延伸距离与沟谷长度交会图; c—沙二段—沙一段沉积体展布面积与沟谷面积交会图; d—沙二段—沙一段沉积体延伸距离与沟谷面积交会图

图 11 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系沟谷与沉积体量化参数的关系

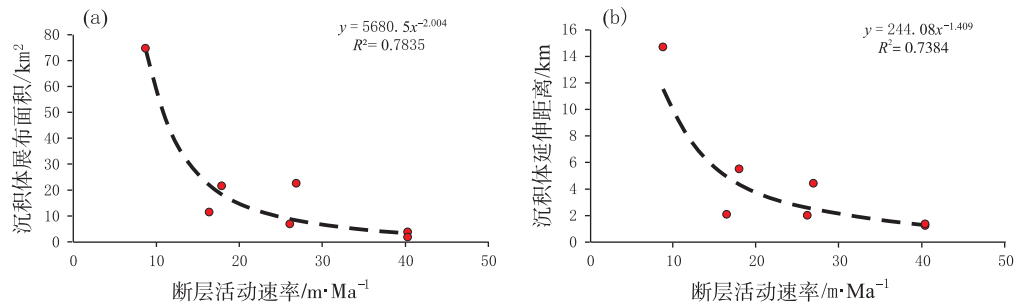
Fig. 11 Quantitative parameter relationship between paleo-channel and sand bodies in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

展布面积及延伸距离并进行拟合后发现，断层活动速率较小时，断层下降盘沉积体面积较大，延伸距离较远；断层活动速率较大时，断层下降盘所沉积的沉积体面积较小，延伸距离较短(图 12)。断层活动速率的差异主要体现在盆地可容空间的变化上，当边界断裂活动速率较大时，盆地可容空间增长速率大于物源供给速率，此时碎屑物质主要沉积于断层根部，规模较小，延伸距离短。当边界断裂活动速率较小时，盆地可容空间增长速率小于物源供给速率，此时碎屑物质经搬运通道进入盆地，断裂活动速率较小的地方为盆地相对高势区，物源优先通过此处向盆内推进，易于形成面积大、延伸远的沉积体。

4.3 源汇系统耦合模式

在综合分析层序地层格架、构造古地貌和沉积体系的基础上，建立起石南陡坡带古近系源汇系统耦合模式(图 13)。

来自石臼坨凸起、427 构造和 428 构造的碎屑物质沿横向凸起型调节带及盆缘沟谷形成的物源通道进入凹陷，持续发育扇三角洲或近岸水下扇沉积。沉积物入湖后，构造坡折带和断槽等地貌控制着沉积体系和砂体的展布特征。石臼坨凸起主体西南侧主要发育近源—陡坡断阶—扇三角洲源汇系统，沉积体系主要受物源及古沟谷、陡坡断阶控制，物源区的碎屑物质，经过古沟谷短暂搬运



a—沙二段—沙一段沉积体展布面积与断层活动速率交会图；b—沙二段—沙一段沉积体延伸距离与断层活动速率交会图

图 12 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系断层活动速率与沉积体量化参数的关系

Fig. 12 Relationship between fault activity rate and quantitative parameters of sedimentary body in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

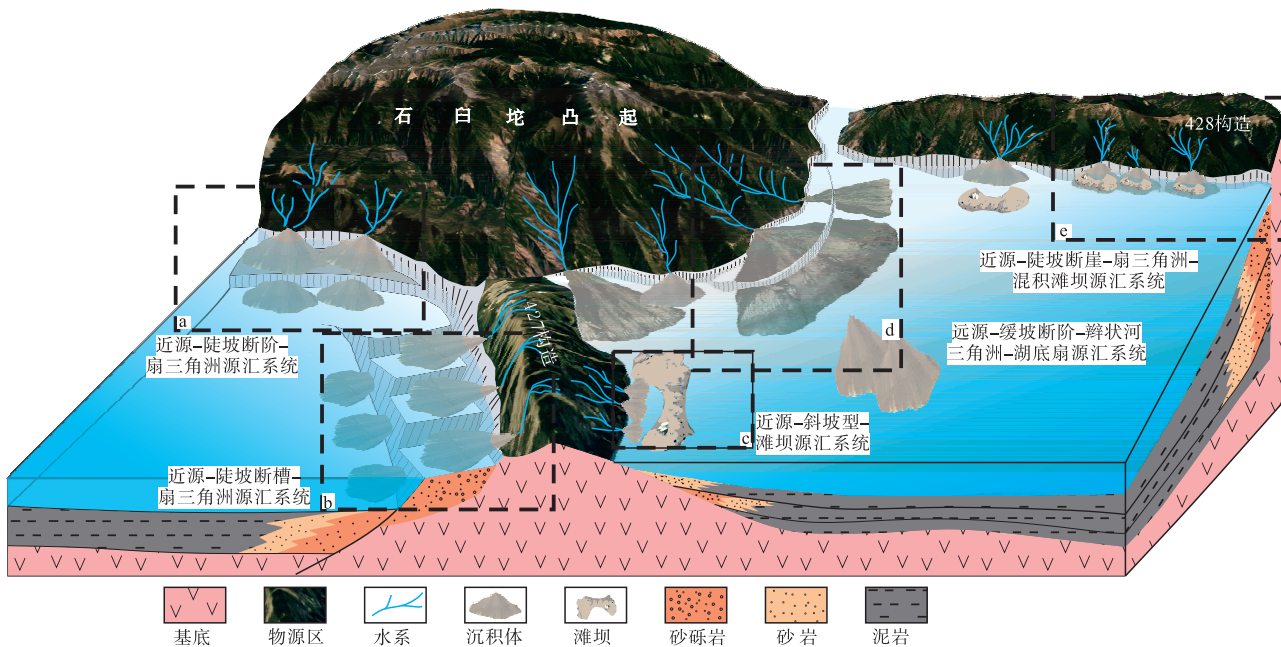


图 13 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系源汇系统类型

Fig. 13 Types of source-to-sink system in the Paleogene in eastern segment of Shinan steep slope zone, Bozhong sag

后进入湖盆陡坡断阶带,形成扇三角洲沉积(图 13-a)。427 构造西侧主要发育近源—陡坡断槽—扇三角洲源汇系统,沉积体系主要受物源及古沟谷、断槽物源通道控制,物源区的碎屑物质,经过古沟谷短暂搬运后进入湖盆,顺着盆内断槽物源通道延伸方向继续向盆内推进形成扇三角洲沉积(图 13-b)。427 构造东侧主要发育近源—斜坡型—滩坝源汇系统,来自凸起区的碎屑物质沿沟谷向沉积区搬运,由于波浪作用对辫状河三角洲砂体的改造,形成了大面积的薄层滩坝沉积(图 13-c)。石臼坨凸起主体东侧主要发育远源—缓坡断阶—辫状河三角洲/湖底扇源汇系统,物源区的碎屑物质经沟谷物源通道远距离搬运后进入湖盆,发育辫状河三角洲沉积体系。在盆内坡折带附近发育多期滑塌扇沉积,在平面上叠合连片分布(图 13-d)。428 构造南部主要发育近源—陡坡断崖—扇三角洲/混积滩坝源汇系统,碎屑物质沿古沟谷物源通道搬运直接进入凹陷,在断层下降盘一侧形成近源粗粒扇三角洲沉积。后期由于波浪作用对扇三角洲砂体的改造,形成大面积分布的碎屑岩滩坝和碳酸盐滩坝沉积(图 13-e)。

5 结论

1) 渤中凹陷石南陡坡带东段古近系可划分为 2 个二级层序、6 个三级层序和 13 个体系域,发育扇三角洲、辫状河三角洲、近岸水下扇、远岸湖底扇和滩坝 5 种沉积相类型。

2) 石南陡坡带东段主要发育古沟谷、断槽、构造调节带及坡折带 4 类物源通道,其中,沟谷可划分为 U 型、V 型、W 型及复合型,其中 U 型沟谷输砂能力最强,V、W 型沟谷输砂能力相对较弱;断槽呈现出不对称箕状充填结构,构造调节带发育受断层活动性强弱影响,并控制物源入口位置;坡折带可进一步细分为陡坡断阶型坡折带、缓坡型坡折带、断崖型坡折带及盆内坡折带 4 种类型。

3) 根据物源距离及输导体系类型,将源汇系统划分为近源与远源 2 大类共 5 小类。凸起区汇水面积、沟谷长度、展布面积及数量与沉积体规模及延伸距离呈明显正相关关系,断层活动速率与沉积体的面积与延伸距离呈明显的负相关关系。

参考文献 (References)

- 代黎明,徐长贵,王清斌,庞小军. 2017. 石臼坨凸起西部陡坡带古物源差异演化模式及其对储层的控制作用. 中国海上油气, 29(4): 51-59. [Dai L M, Xu C G, Wang Q B, Pang X J. 2017. Difference of provenance evolution mode and its impact on reservoir in the western steep slope zone of Shijiutuo uplift, Bohai Sea. China Offshore Oil and Gas, 29(4): 51-59]
- 冯斌,李华,何幼斌,李涛,杜晓峰,黄晓波,周晓光,何瑞武. 2023. 陆相湖盆“源-汇”系统要素定量关系:以渤海湾盆地庙西北地区为例. 地球科学与环境学报, 45(3): 680-695. [Feng B, Li H, He Y B, Li T, Du X F, Huang X B, Zhou X G, He R W. 2023. Quantitative relationships among source-to-sink system parameters in a lacustrine basin: taking Miaoxibe area in Bohai Bay Basin, China as an example. Journal of Earth Sciences and Environment, 45(3): 680-695]
- 加东辉,徐长贵,杨波,杨香华,吴小红,周心怀,滕玉波,赖维成. 2007. 辽东湾辽东带中南部古近纪古地貌恢复和演化及其对沉积体系的控制. 古地理学报, 9(2): 155-166. [Jia D H, Xu C G, Yang B, Yang X H, Wu X H, Zhou X H, Teng Y B, Lai W C. 2007. Paleogene palaeogeomorphology reconstruction and evolution and its control on sedimentary systems in central-southern Liaodong Zone, Liaodongwan Bay. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 9(2): 155-166]
- 姜素华,李金山,夏冬明,王鹏,周海廷. 2011. 剥蚀厚度恢复法在渤海湾盆地济阳拗陷孔店组应用. 中国海洋大学学报(自然科学版), 41(4): 97-102. [Jiang S H, Li J S, Xia D M, Wang P, Zhou H T. 2011. The recovering denudation method and its application in Kongdian Formation of Jiyang depression, Bohai Bay Basin. Periodical of Ocean University of China, 41(4): 97-102]
- 李建平,杨波,周心怀,庞小军,王冠民. 2012. 渤中凹陷东营组层序地层及其沉积相分析. 东北石油大学学报, 36(4): 1-10. [Li J P, Yang B, Zhou X H, Pang X J, Wang G M. 2012. Analysis of sedimentary facies of Dongying Formation in the Bozhong sag. Journal of Northeast Petroleum University, 36(4): 1-10]
- 林畅松,夏庆龙,施和生,周心怀. 2015. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析. 地学前缘, 22(1): 9-20. [Lin C S, Xia Q L, Shi H S, Zhou X H. 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis. Earth Science Frontiers, 22(1): 9-20]
- 刘强虎. 2016. 渤海湾盆地沙垒田凸起古近系“源—渠—汇”系统耦合研究. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Liu Q H. 2016. Coupling research on Paleogene “source-channel-sink” system in Shaleitian uplift, Bohai Bay Basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (Beijing)]
- 庞小军. 2017. 渤中凹陷西北缘古近系构造活动对储层的控制. 西南石油大学学报(自然科学版), 39(3): 1-12. [Pang X J. 2017. Control of Paleogene reservoir by tectonic activity in north-western

- margin of Bozhong sag. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 39(3): 1-12]
- 庞小军, 杜晓峰, 马正武, 宋章强. 2017. 石白坨凸起东段沙一、二段沉积时期物源剥蚀量与砂砾岩沉积量关系. *中国海上油气*, 29(4): 68-75. [Pang X J, Du X F, Ma Z W, Song Z Q. 2017. Study on the relationship between provenance denudation quantity and sandy conglomerate volume of the Paleogene Es₁₋₂ in eastern Shijiutuo uplift, Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 29(4): 68-75]
- 王启明, 李瑾, 周晓光, 刘睿, 王改卫. 2016. 石白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, 7-8. [Wang Q M, Li J, Zhou X G, Liu R, Wang G W. 2016. Characteristics of paleo-geomorphic and its controlling effect on deposition of Ed₃ in steep slope zone of west southern Shijiutuo uplift. *Journal of Northeast Petroleum University*, 40(6): 53-61, 7-8]
- 王星星, 朱筱敏, 宋爽, 吴陈冰洁, 贺敬聪, 曹刚. 2016. 渤海湾盆地车西洼陷陡坡带古近系沙河街组沙三下段“源-汇”系统. *古地理学报*, 18(1): 65-79. [Wang X X, Zhu X M, Song S, Wu C, He J C, Cao G. 2016. “Source-to-sink” system of the Lower Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in steep slope zone of Western Chechen sub-sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(1): 65-79]
- 吴磊, 徐怀民, 季汉成. 2006. 渤海湾盆地渤中凹陷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. [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]
- 徐长贵, 杜晓峰. 2017. 陆相断陷盆地源-汇理论工业化应用初探: 以渤海海域为例. *中国海上油气*, 29(4): 9-18. [Xu C G, Du X F. 2017. Industrial application of source-to-sink theory in continental rift basin: A case study of Bohai Sea area. *China Offshore Oil and Gas*, 29(4): 9-18]
- 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 赵梦. 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. [Xu C G, Du X F, Xu W, Zhao M. 2017. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 1-11]
- 杨丽莎, 陈彬滔, 马轮, 史忠生, 薛罗, 王磊, 史江龙, 赵艳军. 2021. 陆相湖盆拗陷期源-汇系统的要素特征及耦合关系: 以南苏丹 Melut 盆地北部拗陷新近系 Jimidi 组为例. *岩性油气藏*, 33(3): 27-38. [Yang L S, Chen B T, Ma L, Shi Z S, Xue L, Wang L, Shi J L, Zhao Y J. 2021. Element feature and coupling model of source-to-sink system in depression lacustrine basin: a case study of Neogene Jimidi Formation in Melut Basin, South Sudan. *Lithologic Reservoirs*, 33(3): 27-38]
- 周东红, 庞小军, 王冠民, 张雪芳. 2011. 渤中凹陷古近系断层活动性对砂体分布的控制: 以石南断层为例. *石油天然气学报*, 33(11): 14-18, 4. [Zhou D H, Pang X J, Wang G M, Zhang X F. 2011. The controlling of Paleogene fault activity on sandbody distribution in Bozhong depression: by taking Shinan fault zone for example. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33(11): 14-18, 4]
- 周士科, 魏泽典, 邓宏文, 王洪亮, 谢武仁, 杨孝. 2006. 渤中凹陷古近系构造层序研究. *中国海上油气*, 18(4): 236-240, 254. [Zhou S K, Wei Z D, Deng H W, Wang H L, Xie W R, Yang X. 2006. A study on Paleogene tectonic sequences in Bozhong sag. *China Offshore Oil and Gas*, 18(4): 236-240, 254]
- 周晓光, 黄晓波, 宋章强, 李瑾, 刘睿, 王启明. 2017. 环渤中凹陷西次洼东三段物源要素表征及其对砂体差异富集的控制. *东北石油大学学报*, 41(6): 9-14, 35, 120-121. [Zhou X G, Huang X B, Song Z Q, Li J, Liu R, Wang Q M. 2017. Provenance element control over the differential sedimentation of sand body in Ed₃ of west sag around Bozhong depression. *Journal of Northeast Petroleum University*, 41(6): 9-14, 35, 120-121]
- 周勇, 纪友亮, 蒙启安, 万宏峰, 张革, 任钰涛, 严可欣, 梁涛, 陈富瑜, 强志成. 2022. 蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷早白垩世构造古地貌控砂机制. *古地理学报*, 24(3): 493-511. [Zhou Y, Ji Y L, Meng Q A, Wan H F, Zhang G, Ren Y T, Yan K X, Liang T, Chen F Y, Qiang Z C. 2022. Control mechanisms of tectonic paleogeomorphology on the Early Cretaceous sedimentary basin fills in Tanan sag, Tamsag Basin, Mongolia. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(3): 493-511]
- 朱红涛, 杨香华, 周心怀, 李建平, 王德英, 李敏. 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. [Zhu H T, Yang X H, Zhou X H, Li J P, Wang D Y, Li M. 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]
- 朱红涛, 杨香华, 周心怀, 李建平, 王德英, 李敏. 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. [Zhu H T, Yang X H, Zhou X H, Li J P, Wang D Y, Li M. 2013. Sediment transport pathway characteristics of continental lacustrine basins based on 3D seismic data: an example from Dongying Formation of western slope of Bozhong sag. *Earth Science*, 38(1): 121-129]
- 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 曾洪流, 姜在兴, 刘可禹. 2017. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展. *地球科学*, 42(11): 1851-1870. [Zhu H T, Xu C G, Zhu X M, Zeng H L, Jiang Z X, Liu K Y. 2017. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin. *Earth Science*, 42(11): 1851-1870]
- 朱筱敏, 刘强强, 谈明轩, 陈贺贺. 2026. 源汇系统: 研究关注热点和发展趋势. *古地理学报*, 28(1): 25-43. [Zhu X M, Liu Q H, Tan M X, Chen H H. 2026. Research frontier and development of source-to-sink systems. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 28(1): 25-43]
- 祝彦贺, 朱伟林, 徐强, 吴景富. 2011. 珠江口盆地 13.8 Ma 陆架边缘

- 三角洲与陆坡深水扇的“源-汇”关系. 中南大学学报(自然科学版), 42(12): 3827-3834. [Zhu Y H, Zhu W L, Xu Q, Wu J F. 2011. Sedimentary response to shelf-edge delta and slope deep-water fan in 13.8 Ma of Miocene epoch in Pearl River Mouth Basin. *Journal of Central South University*, 42(12): 3827-3834]
- Allen P A. 2008. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems. Geological Society, London, Special Publications, 296: 7-28.
- Bhattacharya J P, Copeland P, Lawton T F, Holbrook J. 2016. Estimation of source area, river paleo-discharge, paleoslope, and sediment budgets of linked deep-time depositional systems and implications for hydrocarbon potential. *Earth-Science Reviews*, 153: 77-110.
- Carvajal C., Steel R J. 2012. Source-to-sink sediment volumes within a tectono-stratigraphic model for a Laramide shelf-to-deep-water basin; methods and results. *Geological Society of America Bulletin*, 124(7-8): 1264-1279.
- Helland-Hansen W, Sømme T O, Martinsen O J, Lunt I, Thurmond J. 2016. Deciphering earth's natural hourglasses; perspectives on source-to-sink analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 86: 1008-1033.
- Horner S C, Hubbard S M, Martin H K, Hagstrom C A. 2019. Reconstructing basin-scale drainage dynamics with regional subsurface mapping and channel-bar scaling, Aptian, Western Canada Foreland Basin. *Sedimentary Geology*, 385: 26-44.
- Sømme T O, Jackson C A. 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: 512-531.
- Sømme T O, Helland-Hansen W, Martinsen O J, Thurmond J B. 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: 361-387.
- Teixeira B M N, Astini R A, Gomez F J, Morales N, Pimentel M M. 2018. Source-to-sink analysis of continental rift sedimentation: Triassic Cuyo Basin, Precordillera Argentina. *Sedimentary Geology*, 376: 164-184.
- Vakarelov B K, Ainsworth R B. 2013. A hierarchical approach to architectural classification in marginal-marine systems: bridging the gap between sedimentology and sequence stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 97: 1121-1161.

(责任编辑 李新坡)