

基于滨线轨迹分析的层序格架与沉积充填样式研究： 以渤中凹陷东营组为例^{*}

刘志峰¹ 朱文奇¹ 谢爽慧² 赵瑞星² 朱筱敏²

1 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100029

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘 要 相对湖平面变化曲线是经典层序地层学的研究基础, 但由于断陷湖盆相比于海盆沉积背景更为复杂, 且难以刻画相对湖平面升降, 故本研究引入滨线轨迹分析方法, 结合钻井、测井和三维地震资料, 以渤中凹陷西洼古近系东营组二段下亚段(简称“东二下亚段”)(对应为一个三级层序 SQd_2)为研究目的层, 开展层序格架和沉积充填分析。层序 SQd_2 发育 S 形前积反射、斜交型前积反射和小型丘状反射及平行—亚平行反射, 解释为三角洲、湖底扇和湖泊沉积。依据滨线轨迹的运动方向和轨迹形态, 识别出上凸上升前进型、下凹上升前进型、上凸下降前进型和上凸上升后退型 4 类轨迹, 并分别解释为低位体系域、高位体系域、强制湖退体系域和湖侵体系域。层序 SQd_2 晚期发育大规模三角洲, 下凹上升型代表正常湖退过程, 形成“厚顶积层、厚前积层”的大型三角洲, 在重力驱动下, 可形成小型湖底扇; 上凸下降型指示强制湖退过程, 在相对湖平面下降的背景下, 形成“薄顶积层、厚前积层”的大型三角洲, 碎屑物质更易进入深水湖盆形成大型湖底扇。综上, 本研究通过滨线轨迹迁移分析, 将一个完整的层序划分为 4 个体系域, 指出断陷湖盆强制湖退阶段更易形成富砂三角洲, 并在深水湖盆形成相对富砂的湖底扇, 是寻找有利储集相带和发现岩性圈闭的有利位置。

关键词 滨线迁移轨迹 层序地层学 沉积充填过程 渤海湾盆地 古近系 东营组

第一作者简介 刘志峰, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事石油地质研究。E-mail: liuzhf2@cnooc.com.cn。

通讯作者简介 谢爽慧, 女, 1996 年生, 中国石油大学(北京)地球科学学院博士研究生, 主要从事沉积地质学研究。E-mail: xsh_718@163.com。

中图分类号: P534.61 文献标志码: A

Study on sequence stratigraphy and sedimentary filling based on trajectory analysis: a case study from the Dongying Formation in Bozhong sag, Bohai Bay Basin

LIU Zhifeng¹ ZHU Wenqi¹ XIE Shuanghui² ZHAO Ruixing² ZHU Xiaomin²

1 CNOOC Research Institute Ltd, Beijing 100029, China

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

Abstract The relative lake level is fundamental for constructing the sequence stratigraphy. However, considering the difficulty of ensuring the location of the lake level and the complexity of

^{*} 国家自然科学基金项目(编号: 42272110)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42272110)]

收稿日期: 2024-08-01 改回日期: 2025-05-19

lacustrine rift basins, using traditional methods to establish the sequence stratigraphy is quite difficult. Thus, we introduced ‘trajectory analysis’ in this study. We used well logging, lithological association, and seismic data to establish sequence stratigraphy of the lower part of the Second Member of Dongying Formation (corresponding to SQd_2) in the western part of Bozhong sag. Prograding sigmoidal clinoforms, prograding oblique clinoforms, small-scale mouth-shaped reflection, and parallel to sub-parallel reflection developed in SQd_2 of Bozhong sag. We interpreted four types of seismic reflection into three sedimentary systems, including river deltas, sub-lacustrine fans, and lakes. According to the direction of migration and the shape of shorelines, there are four types of shoreline trajectories identified, which are called ascending regression with convex-upward curvature (type-1), ascending regression with concave-upward curvature (type-2), descending regression with convex-upward curvature (type-3) and ascending transgression with concave-upward curvature (type-4), respectively. These four types of shoreline trajectories were related to the lowstand systems tract (LST), highstand systems tract (HST), falling stage systems tract (FSST), and transgressive systems tract (TST). Large-scale deltas developed during the late stage of SQd_2 . The ascending regression with concave-upward curvature reflects the normal regression and large-scale deltas with ‘thick topsets and thick foresets’ developed during this stage. Then, small-scale sub-lacustrine fans may develop due to gravity. The descending regression with convex-upward curvature is related to forced regression. During the stage, large-scale deltas with thin topsets and thick foresets developed. Thus, more sediment was transported into the deep lake, and large-scale sub-lacustrine fans were developed. In conclusion, we introduced ‘trajectory analysis’ to divide an entire third-order sequence into four systems tracts. Then, we highlighted the importance of forced regression and the large-scale, rich sand sediment developed during this stage. Additionally, sub-lacustrine fans with relatively high sand ratios are always associated with rich-sandy deltas. The deltas and sub-lacustrine fans during the FSST are significant for reservoirs and lithologic traps.

Key words shoreline trajectories, sequence stratigraphy, sedimentary filling process, Bohai Bay Basin, Paleogene, Dongying Formation

About the first author LIU Zhifeng, born in 1982, is a senior engineer. He is mainly engaged in petroleum geology. E-mail: liuzhf2@cnoc.com.cn.

About the corresponding author XIE Shuanghui, born in 1996, is a doctoral student of the College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing). She is mainly engaged in sedimentary geology. E-mail: xsh_718@163.com.

滨线迁移轨迹的概念与方法最早由 Helland-Hansen 和 Gjelberg (1994) 提出, 是指陆地与海水的分界线随时间沿物源方向连续变化而形成的运动轨迹, 可有效地反映物源供给、海平面变化和构造沉降等 (Helland-Hansen and Gjelberg, 1994; Helland-Hansen and Martinsen, 1996)。轨迹分析是传统经典层序地层学 (Vail *et al.*, 1977) 研究方法的补充。在经典层序地层学研究中, 发现: (1) 断陷盆地具有构造多阶段、物源体系多、地貌复杂的特点, 相对海 (湖) 平面变化、沉积物的供给、构造的沉降/隆升、气候与盆地的几何形态是层序研

究的关键 (Vail *et al.*, 1977)。由于断块旋转, 可能同时出现上盘发育低位沉积而下盘发育高位沉积的现象 (Gawthorpe *et al.*, 1994); (2) 难以准确测量相对海 (湖) 平面变化和沉积物供给。但通过轨迹分析的方法识别体系域, 不依赖于现存的模型或假设, 而是综合考虑沉积物供给与海 (湖) 平面变化的相对关系。轨迹的形态更为客观地指导体系域的划分与高精度层序地层格架的研究, 从而建立滨线迁移轨迹与沉积体系演化的成因关联, 反演沉积物供给、湖平面变化过程 (Burgess *et al.*, 2006; Hampson *et al.*, 2009; Henriksen *et al.*,

2009; 龚承林等, 2022)。在经典层序地层学理论中, 一个完整的层序可划分为 LST (低位体系域)、TST (海侵体系域) 和 HST (高位体系域) 共 3 个体体系域 (Vail *et al.*, 1977); 或将湖平面下降阶段形成的沉积体系组合称之为强制湖退体系域 (falling stage systems tract, 或下降体系域), 划分出 LST、TST、HST 和 FSST 共 4 个体体系域 (Hunt and Tucker, 1992)。轨迹迁移形态的差异可反映正常湖退、强制湖退与湖侵 3 个过程, 无论是层序三分模式还是四分模式, 均可通过轨迹分析的方式进行体系域的识别 (Catuneanu, 2019; Paumard *et al.*, 2019; 张曼莉等, 2019; 龚承林等, 2022)。如 Zhang 等 (2022) 在珠江口盆地识别出上升、平坦、下降 3 类滨线轨迹样式, 并指出在具有宽陆架、低坡度的被动大陆边缘, 滨线轨迹可反映三级或四级海平面变化和解释陆架边缘三角洲的形成与演化。

断陷湖盆强烈断陷期形成的扇三角洲或三角洲规模有限, 而裂陷晚期, 构造活动减弱, 在缓坡带或长轴方向常形成大面积的曲流河三角洲、辫状河三角洲或浅水三角洲, 将轨迹分析应用于断陷湖盆大规模三角洲沉积体系中, 可有效解释构造沉降、气候、古地貌等多因素控制下的断陷湖盆地体系域类型、准层序组类型与砂体成因 (Xu *et al.*, 2018; 秦春雨等, 2020)。

渤海海域经历了凸起区潜山勘探、中—浅层 (埋深小于 3500 m) 古近系勘探、浅层新近系勘探以及立体勘探等 4 个阶段, 自 2016 年后从寻找构造圈闭转变为勘探构造—岩性圈闭和岩性圈闭 (薛永安, 2017; 徐长贵等, 2024)。渤中凹陷是渤海海域油气最富集的凹陷, 但目前勘探情况表明, 层序地层格架、大型地震前积反射与三角洲/重力流砂体发育之间并无显著对应关系, 这制约了岩性圈闭高效勘探 (李建平等, 2012; 代黎明等, 2014; 张新涛等, 2021; 龚承林等, 2023; Liu *et al.*, 2024)。因此, 本研究引入滨线迁移轨迹分析方法, 使用四分层序划分方案, 剖析不同前积反射特征的形成机理, 在高精度层序格架约束下, 探究沉积充填过程, 以期油气勘探开发寻找有利储集砂体提供依据。

1 区域地质背景

渤中凹陷位于渤海湾盆地中部, 是在华北地台基底上发育起来的中、新生代沉积凹陷, 呈北东走向, 其西、北、东至南部依次被沙垒田凸起、石臼坨凸起、渤东低凸起与渤南低凸起所限, 其内部具有“四洼一凸”的格局, 分别为西洼、北洼、东洼、南洼和渤中低凸起, 其中西洼夹于沙垒田凸起与石臼坨凸起之间 (图 1) (朱伟林等, 2015; 谢

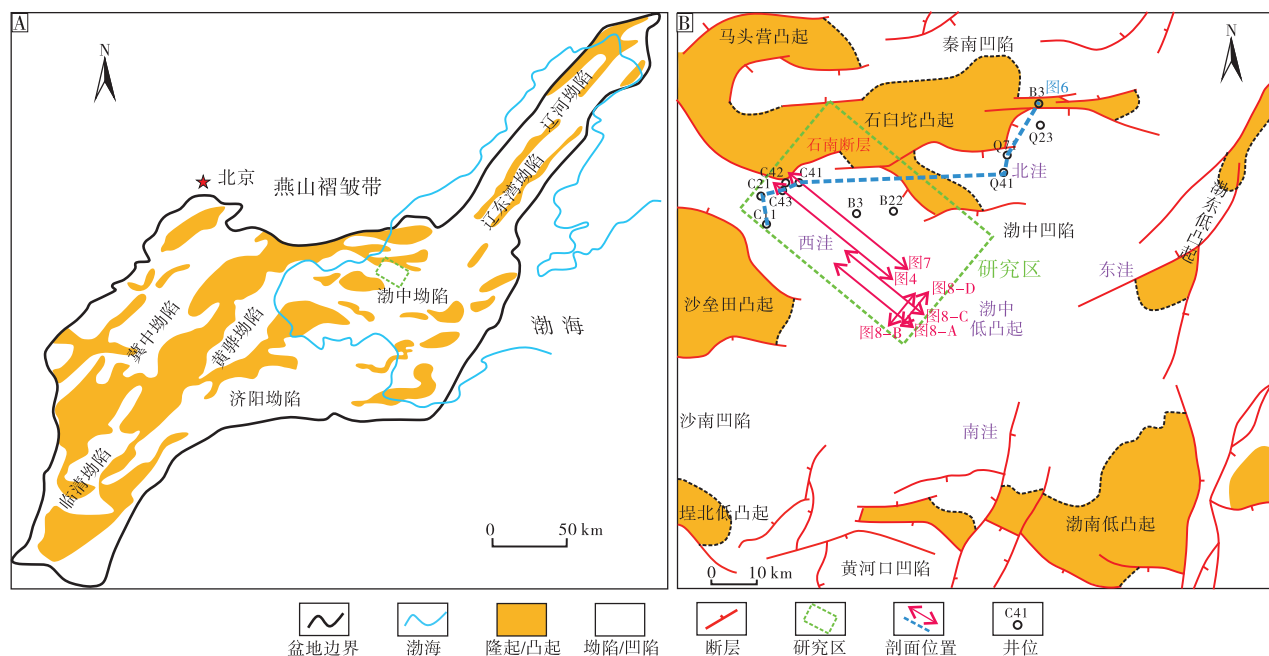


图 1 渤海湾盆地渤中凹陷西部地区位置与井位分布

Fig. 1 Location and well distribution of the western part of Bozhong sag, Bohai Bay Basin

玉洪等, 2018)。沙垒田凸起与石臼坨凸起及燕山褶皱带为西洼供应碎屑物质 (庞小军等, 2016; 赵梦等, 2021)。研究区位于渤中凹陷西洼东部, 即靠近石臼坨凸起的位置, 北部边界为石南断层, 主要接受来自石臼坨凸起与燕山褶皱带的碎屑物质 (徐长贵等, 2009; Xu *et al.*, 2020)。

新生代渤海海域的构造演化具有多幕式裂陷、多旋回叠加和多成因机制复合的特征, 是欧亚大陆板块与太平洋板块、印度洋板块发生运动学调整的结果。渤海海域古近纪的构造演化对应 4 期裂陷幕, 沙二段至东营组对应于裂陷 IV 幕 (32.8—24.6 Ma), 此时由断陷阶段向坳陷阶段转换 (夏庆龙等, 2012; Zhu *et al.*, 2014; 朱伟林等, 2015)。

渤中凹陷古近系发育三角洲—湖泊沉积体系, 自下而上充填沙河街组、东营组, 其中东营组可分为东三段、东二段 (可分为东二下亚段、东二上亚段) 和东一段。东三段 (底界面为 T₃、顶界面为 T₃M) 发育厚层湖相沉积, 以暗色泥岩为主, 是重要的烃源岩层系, 东二下亚段 (底界面为 T₃M、顶界面为 T₃U) 为灰色泥岩夹薄层砂岩, 此时裂陷活动减弱, 大河水系携带盆外物源进入盆

地, 形成大规模三角洲—湖底扇沉积体系 (雷鸣等, 2017; 牛成民等, 2022), 东二上亚段 (底界面为 T₃U) 与东一段 (顶界面为 T₂) 的岩性组合相似, 为频繁互层的砂岩与泥岩, 或大段砂岩夹泥岩 (吴磊等, 2006; Zhu *et al.*, 2014)。结合构造演化背景, 以地震反射终止关系为依据, 东营组可识别出 4 个三级层序界面 (对应于地震反射界面 T₃、T₃M、T₃U 和 T₂)。地震剖面上界面 T₃、T₃M 之上均可见上超反射, 界面 T₃U 之下可见削截反射, 界面 T₂ 之下可见顶超反射, 在识别地震层序界面的基础上, 结合钻井、测井等资料, 将渤中凹陷东营组划分为 3 个三级层序, 分别对应于东三段 (底界面对应 T₃ 反射界面, 顶界面为 T₃M, SQd₃ 层序)、东二下亚段 (底顶界面分别为 T₃M、T₃U, SQd₂ 层序)、东二上亚段和东一段 (底顶界面分别为 T₃U 和 T₂, SQd₁ 层序) (图 2)。层序 SQd₂ 内部发育多套大规模前积, 利于进行滨线迁移轨迹分析 (Patrino and Helland-Hansen, 2018; 牛成民等, 2022)。故本次将聚焦于层序 SQd₂, 探究在断陷湖盆中滨线轨迹类型及其与高精度层序格架及沉积充填过程的关系, 预测有利砂体发育的位置。

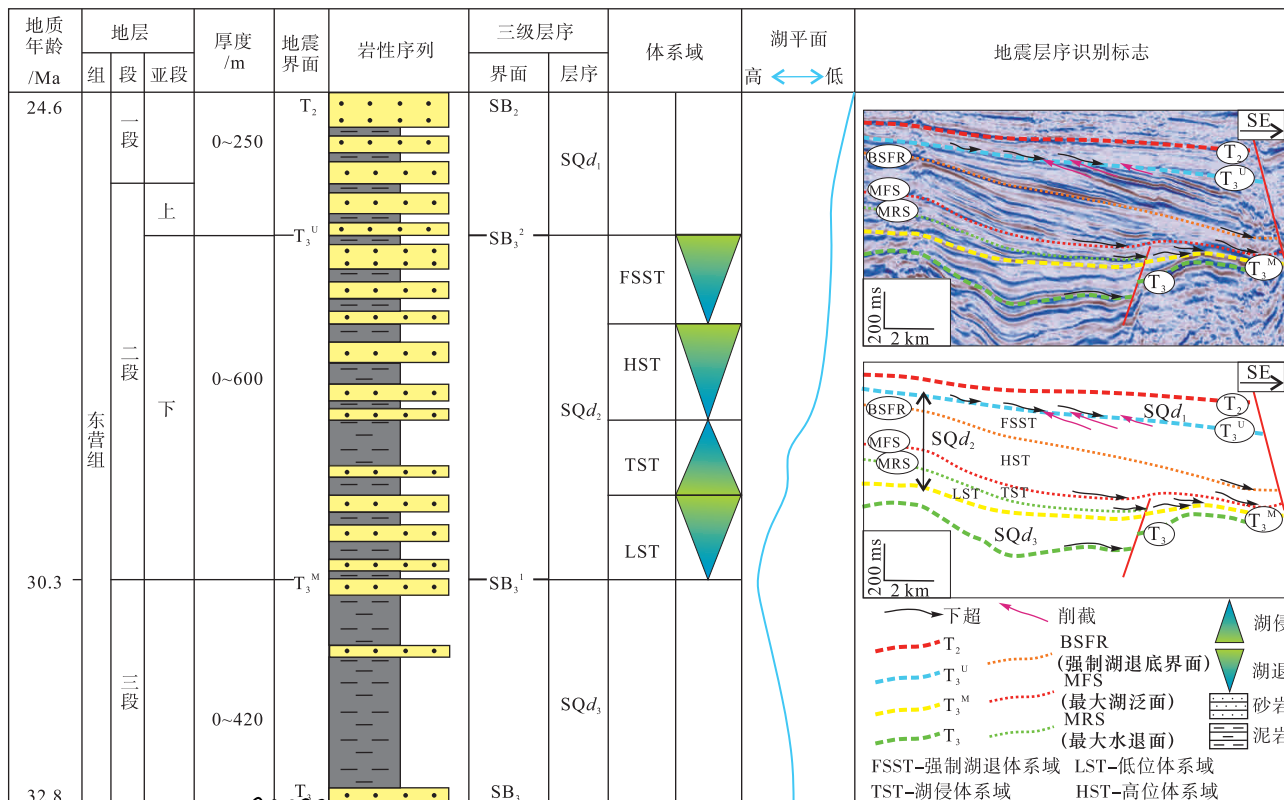


图 2 渤中凹陷古近系东营组地层综合柱状图及层序/体系域划分方案

Fig. 2 Generalized stratigraphic column and sequence stratigraphy of the Paleogene Dongying Formation of Bozhong sag

2 滨线迁移轨迹识别与分类

滨线是陆地与湖泊的分界线。滨线轨迹识别的关键包含 3 个 (Hampson *et al.*, 2009): (1) 水体深度的突变, (2) 沉积相带的转变, (3) 侵蚀面的发育。Helland-Hansen 和 Martinsen (1996) 根据剖面上轨迹运动学特征的差异, 即向盆地或向陆地、向上或向下, 将滨线轨迹分为 3 类, 分别为正常湖退型 (轨迹以向上、向盆地方向)、强制湖退型 (轨迹向下、向盆地方向) 与湖侵型 (轨迹向上、向陆地方向)。此外, 本研究同时考虑轨迹形态, 综合识别出 4 类滨线轨迹样式 (图 3)。

1) 类型 1: 上升上凸前进型, 在顺物源的剖面上表现为上凸的形式向上并向湖盆中央推进。这类轨迹代表正常湖退过程, 始终伴随着加积作用, 前期轨迹角度大, 后期轨迹角度减小, 角度具有较大的变化范围 (图 3, 对应较大的扇形), 具有“厚顶积层, 薄前积层”的特点。

2) 类型 2: 上升下凹前进型, 在顺物源的剖

面上表现为下凹的形式向上并向湖盆中央推进。该类轨迹同样指示正常湖退过程, 但与类型 1 不同, 其轨迹前期角度小, 后期具有增加的趋势, 角度变化范围小 (图 3, 对应较小的扇形), 其顶积层与前积层厚度差异小。

3) 类型 3: 下降上凸前进型, 在顺物源的剖面上表现为低角度或近似平行向湖盆中央推进, 曲线形态呈上凸, 其早期表现为近似平行—平行上升, 晚期为近似平行—平行下降 (图 3, 对应较小的扇形)。这一类轨迹指示强制湖退过程, 即由相对湖平面下降造成, 与沉积物的供给无关, 顶积层较薄或不发育 (Posamentier *et al.*, 1992; Plint and Nummedal, 2000; Catuneanu, 2019)。

4) 类型 4: 上升上凸后退型, 在顺物源的剖面上表现为上凸的形式向上并向陆地方向移动。这类轨迹代表湖侵过程, 滨线向陆地方向迁移, 其轨迹角度变化范围广 (图 3, 较大的扇形) (Helland-Hansen and Martinsen, 1996)。

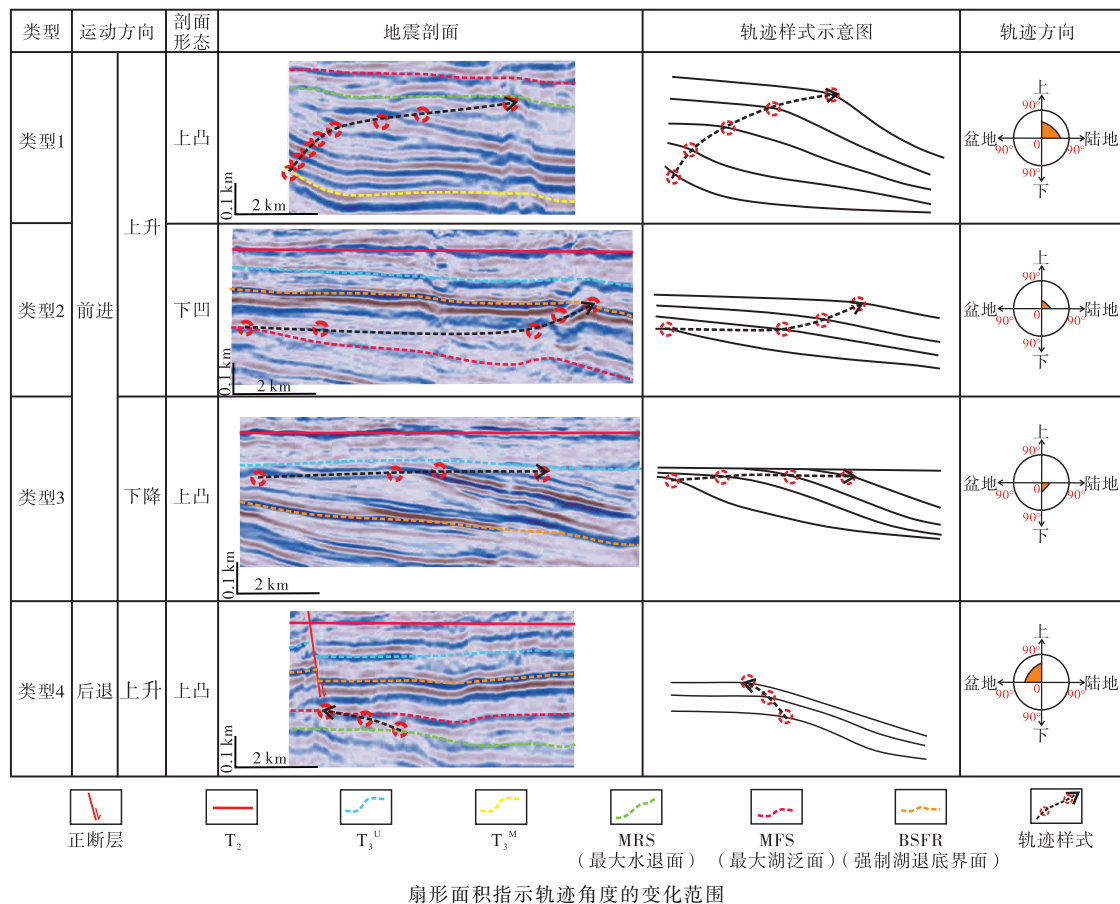


图 3 渤中凹陷古近系层序 SQ_{d2} 滨线迁移轨迹类型

Fig. 3 Classification of shoreline trajectories of sequence SQ_{d2} in Bozhong sag

3 滨线迁移轨迹与高精度层序格架

基于滨线迁移轨迹的样式可进行体系域的划分，本次所识别的 4 类轨迹中，2 类代表正常湖退过程，1 类指示强制湖退，1 类为湖侵过程，分别对应 4 个体系域。此外，除从轨迹分析的角度识别体系域外，同时结合传统的层序地层学研究方法，即利用岩性组合差异、测井曲线的突变、地震反射特征等共同确定关键体系域界面，以期能更精准地建立适用于断陷湖盆的高精度层序格架。

1) 低位体系域 (LST): 位于层序的底部，在四分体系域模型中，是指在湖平面相对上升、正常海 (湖) 退阶段沉积形成的所有沉积物 (Hunt and Tucker, 1992)。其底部界面为层序边界，顶部界面为最大水退面 (MRS)。上升前进型轨迹指示正常湖退过程，而渤中凹陷西洼在 LST 沉积前，靠近物源口的位置存在地形低点，具有较大的可容空间，沉积物更易在靠近物源口的位置以加积的形式沉积，从而形成上凸型的轨迹。地层叠置样式的改变是 MRS 的典型识别标志，即由进积—加积式向退积式转变，该界面通常是岩性突变界面，如 C43 井表现为砂泥突变界面，GR 曲线表现为明显的突变 (图 4)。

2) 湖侵体系域 (TST): 当滨线轨迹的运动方向由前进型变成后退型时，指示由 LST 转变为

TST，该时期沉积物的沉积速率小于湖平面的上升速率，其底界面为最大水退面 (MRS)，顶界面为最大湖泛面 (MFS)。根据最大湖泛面的定义，其最典型的识别标志为顺物源的地震剖面上表现为最远滨岸下超点所对应的界面，是一个连续性较好的反射地震同相轴。该界面之下，多为大段的厚层泥岩，界面之上多表现为进积型准层序组的特点，反映由湖侵再次变化为湖退过程 (图 4)。

3) 高位体系域 (HST): 当滨线轨迹的运动方向再次转变为前进型，指示湖侵的结束，再次进入湖退阶段。这一阶段仍表现为上升前进型，为正常湖退阶段，定义为高位体系域 (HST)。与 LST 时期不同，该时期轨迹表现为下凹型，而这可能与 TST 沉积后靠近物源口的位置更为平坦的地貌特征相关，沉积物更易向盆地中央推进。HST 的底界面为最大湖泛面 (MFS)，顶界面为强制湖退底界面 (BSFR) (图 4)。

4) 强制湖退体系域 (FSST): 当滨线轨迹由上升向下降型转变时，指示由正常湖退转变为强制湖退 (Helland-Hansen and Martinsen, 1996; 秦祎等, 2020)，将下降上凸前进型轨迹所对应的阶段解释为强制湖退体系域 (FSST)。此时滨线向湖盆中心快速推进，早期沉积物易被剥蚀形成下切谷。FSST 的底界面为强制湖退底界面 (BSFR)，顶界面对应层序界面，其中 BSFR 的典型识别标志为地

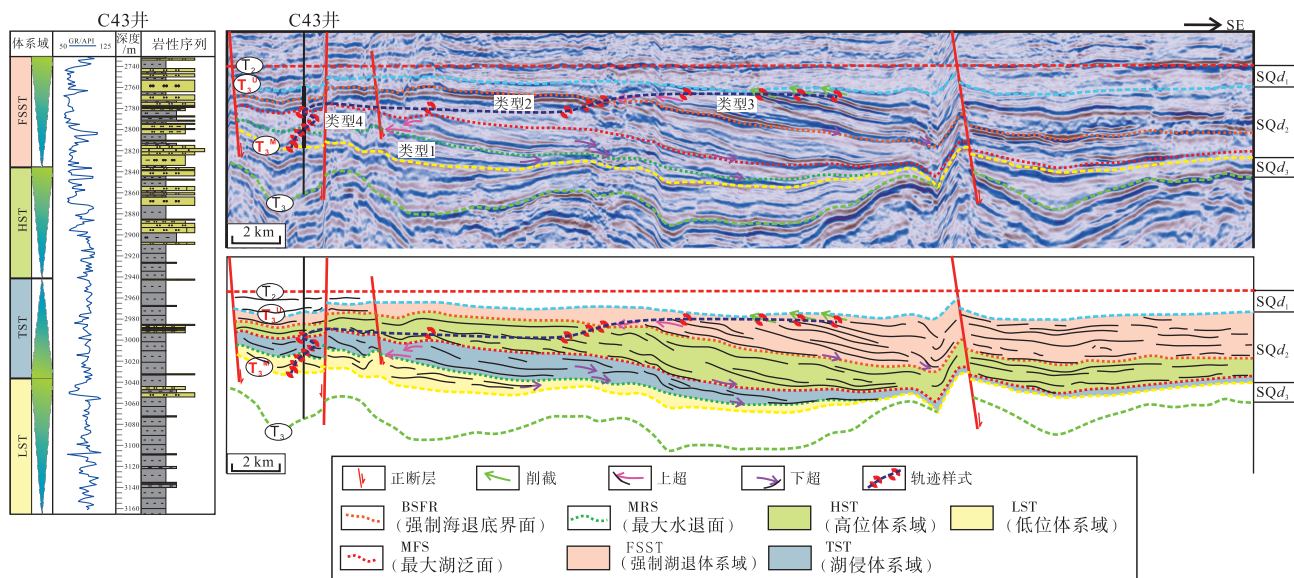


图 4 渤中凹陷层序 SQd_2 滨线迁移轨迹与层序格架 (剖面位置见图 1)

Fig. 4 Relationship between shoreline trajectories and sequence stratigraphy of sequence SQd_2 in Bozhong sag (seen location in Fig. 1)

震剖面上地层叠置样式的改变,即地层的退覆现象(研究区内表现为层序顶部的多期斜交型前积)(Posamentier *et al.*, 1992; Plint and Nummedal, 2000)(图 4)。

综上,根据轨迹运动学和轨迹剖面形态的差异可识别层序内部体系域类型及其变化过程。本次研究中,当运动学特征相同时,轨迹的剖面形态(上凸或下凹)与靠近物源口的位置沉积物堆积前地貌是否平坦有关(图 4)。

4 滨线迁移特征与沉积演化

4.1 沉积相识别

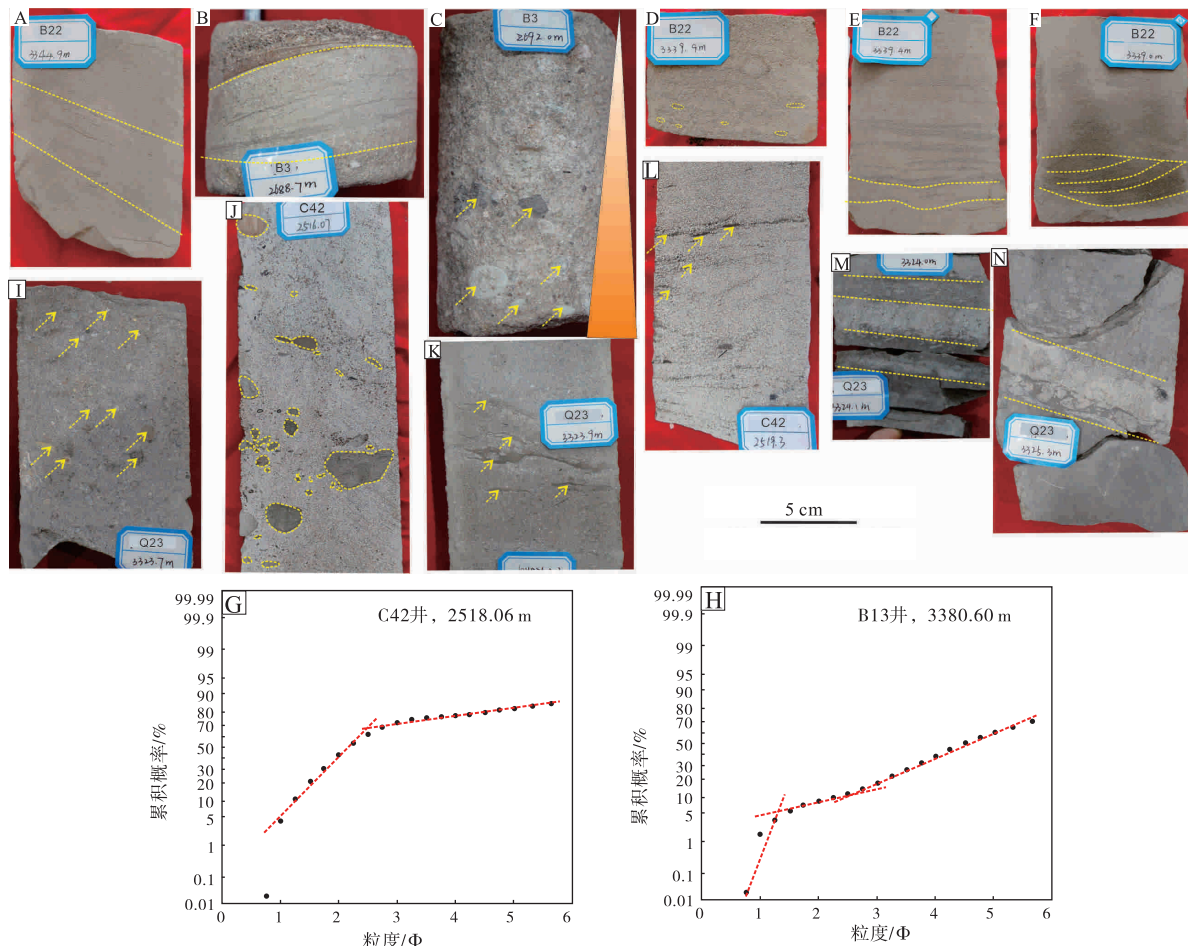
地震相分析与类比在少井或无钻井区域的沉积

相识别中具有重要的意义。少井的研究区内发育多种地震相,基于井震标定,建立井震关系,可指导全区关键层段沉积相解释。

研究区主要发育 3 类地震相,细分为 4 个亚类,结合前人总结的断陷湖盆经典地震相—沉积相模式(徐怀大等, 1990),并与研究区钻井标定,共解释为 3 类沉积体系,分别为三角洲、湖底扇与湖泊(图 5; 图 6; 图 7)。

4.1.1 S 形前积反射

S 形前积反射在剖面上特点为中—高振幅、中—高频率、中等连续反射。具有“顶积层、前积层、底积层”完整的三层结构,其中顶积层近似平行,前积层向盆地中央倾斜,角度最大,底积层较薄,并向盆地中央尖灭,与下伏地层表现为下超



A—B22 井, 3344.99 m, 交错层理; B—B3 井, 2688.7 m, 交错层理; C—B3 井, 水下分支河道底部砾石; D—B22 井, 3339.9 m, 顺层排列的泥砾; E—B22 井, 3339.4 m, 波状层理; F—B22 井, 3339.4 m, 波状交错层理; G—C42 井, 2518.06 m, 概率累积曲线; H—B13 井, 3380.6 m, 概率累积曲线; I—Q23 井, 3323.7 m, 漂浮砾石中砂岩; J—C42 井, 2516.07 m, 漂浮的泥砾; K—Q23 井, 3323.9 m, 泥岩撕裂屑; L—C42 井, 2519.3 m, 泥岩撕裂屑; M—Q23 井, 3329.1 m, 暗色泥岩与砂岩突变接触; N—Q23 井, 3325.3 m, 漂浮砾石与岩性突变

图 5 渤中凹陷层序 SQd_2 典型岩心沉积构造与概率累积曲线

Fig. 5 Typical sedimentary structures and probability cumulative curves of sequence SQd_2 in Bozhong sag

的地震反射终止关系。这类反射在研究区最为常见(图 7)，主要发育在层序 SQd_2 的 LST、TST 与 HST。

C41、C43 等井钻遇该类地震相，经与钻井、岩心、测井曲线样式标定，将其解释为三角洲。S 形前积反射对应较低的砂地比值，岩性包含细砂岩、粉砂岩，砂地比值常介于 0.1~0.3 之间，测井曲线形态多样，如中—高振幅钟形、中—高振幅漏斗形、低—中振幅指状、低振幅基线形，在垂向上正韵律（厚度 5~20 m）相互叠置，解释为多期水下分支河道，也可见正韵律与反韵律（厚度 5~15 m）叠置，解释为水下分支河道冲刷河口坝，水下分支河道之间发育泥质沉积，即测井曲线上表现为基线形，解释为支流间湾，沉积厚度介于 20~100 m（图 4；图 6）。常见交错层理（图 5-A，5-B），河道底部见砾石（图 5-C），冲刷面附近泥砾多顺层分布（图 5-D），反映在强水动力的作用下，水下分支河道频繁改道冲刷，在垂向上形成多期叠置的正韵律。此外，常见波状层理（图 5-E）和波状交错层理（图 5-F）。这类层理常出现在三角洲前缘，代表砂泥的交替供应与水体流动期/停滞期的交替。

4.1.2 斜交型前积反射

这类反射在地震剖面上的特点为中—高振幅、中等频率、中等—高连续反射。顶积层薄或不发育，以前积层为主体，底积层向下倾方向变薄，与下伏层之间呈下超的接触关系（图 6）。该类反射特征主要发育在层序 SQd_2 的 FSST（图 6；图 7）。

经与钻井标定，该类地震相解释为三角洲，但与 S 形前积反射不同的是，斜交型前积对应较高砂地比（常介于 0.2~0.5 之间），GR 曲线常表现为中—高振幅箱形、中—高振幅钟形、低—中振幅指状的特点。在垂向上多表现为厚层的砂岩，对应箱形的测井曲线，解释为水下分支河道，厚度 10~30 m，垂向序列上反韵律相对较少，指状的测井曲线厚度 3~10 m，解释为前缘席状砂，正韵律之间的泥质沉积解释为支流间湾，沉积厚度 10~50 m（图 6）。

前积反射的样式可反映湖盆水体深度，一般认为各类前积反射代表的湖盆水体深度从大到小依次为：S 形前积反射、斜交型前积反射、叠瓦状前积反射和隐性前积反射（曾洪流等，2015；葛家旺

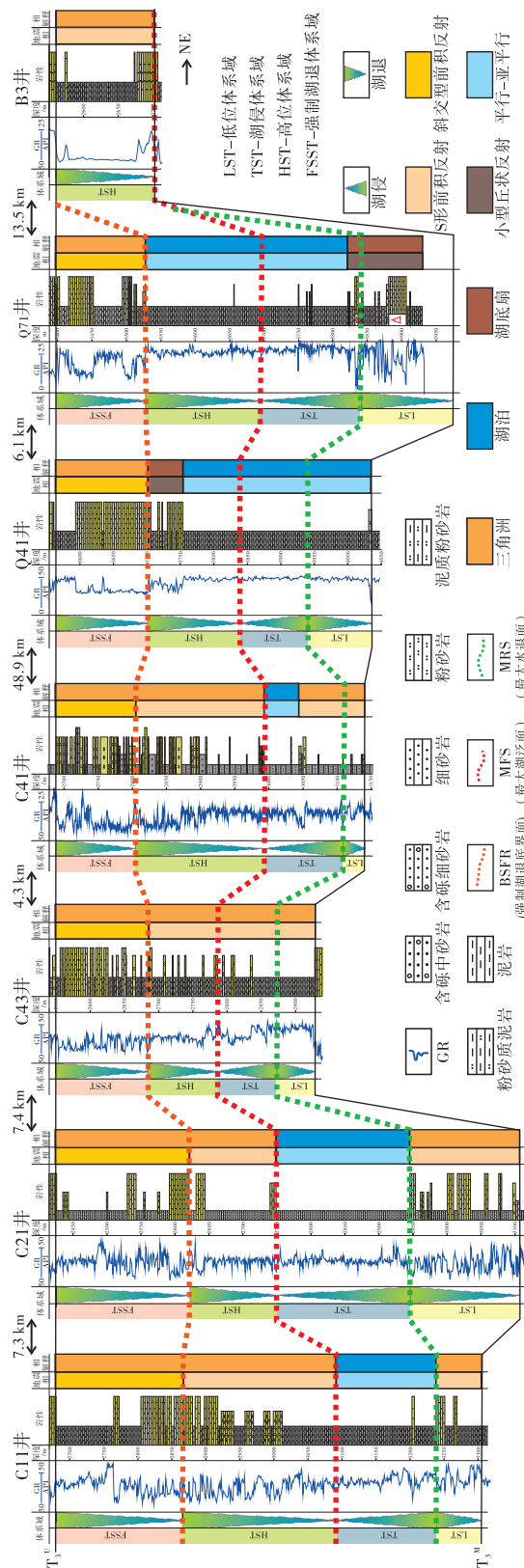


图 6 渤中凹陷层序 SQd_2 连井层序格架与沉积特征(剖面位置见图 1)
Fig. 6 Sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of sequence SQd_2 in Bozhong sag (seen location in Fig. 1)

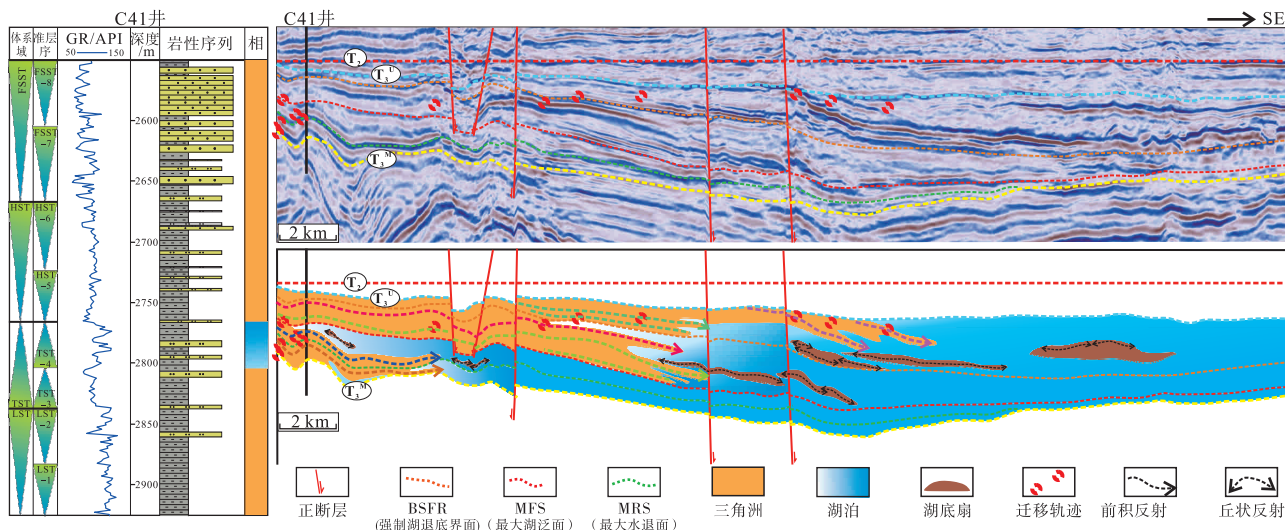


图 7 渤中凹陷层序 SQd_2 典型滨线迁移轨迹与沉积充填特征 (剖面位置见图 1)

Fig. 7 Relationship between shoreline trajectories and sedimentary filled characteristics of sequence SQd_2 in Bozhong sag (seen location in Fig. 1)

等, 2019)。相比 S 形前积反射, 斜交型前积反射形成于更浅的湖盆环境, 为相对低可容纳空间与充足物源供给时形成的具有高砂地比特点的三角洲。

三角洲平原的概率累积曲线与河流沉积相似, 多呈两段式的特点, 反映以河流作用为主的水动力特点(图 5-G); 三角洲前缘的水动力更为复杂, 概率累积曲线表现为三段式的特点, 反映河流与湖浪的双重作用(图 5-H)。

4.1.3 小型丘状反射

丘状反射常位于前积反射前方并被解释为湖底扇。在钻井与测井上, 湖底扇最为显著的特点是大段暗色泥岩夹砂岩, 砂岩厚度 10~25 m, 顶底均为突变关系, 测井曲线常呈箱形(官大勇等, 2023; 王启明等, 2024), 如邻区 Q41 井 3700 m (顶)、3760 m (底) 和 Q71 井 3880 m (顶)、3920 m (底)(图 6)。在岩心观察中见漂浮的泥砾(直径 0.5~1 cm, 图 5-I; 直径 1~3 cm, 图 5-J)与泥岩撕裂屑(图 5-K, 5-L)。岩心上的暗色泥岩与砂岩的突变也指示湖底扇的沉积特征(图 5-M, 5-N)。由于湖底扇与湖泊的岩性差异, 故湖底扇在地震剖面上其顶底界面通常为连续的强反射; 湖底扇在地震上最典型的识别标志是小型的丘状反射, 具有中—高振幅, 中等频率, 中等连续或断续、杂乱反射的特点, 这类反射常被解释由于滑动、滑塌而形成的重力流沉积(Pan *et al.*, 2019, 2020)。

4.1.4 平行—亚平行反射

在地震剖面上表现为中—高振幅、中等频率、中—高连续性的特点, 在层序 SQd_2 的各个沉积时期远离物源区的位置均广泛发育。钻井显示该类地震相对应大段的灰色或深灰色泥岩, 解释为湖泊沉积(图 6; 图 7)。

4.2 沉积充填特征

在轨迹分析与层序格架的约束下, 结合地震相、测井相、岩性组合, 解释渤中凹陷层序 SQd_2 的沉积充填特征。LST 沉积时期, 三角洲顶积层厚度大, 但三角洲向湖盆中央推进距离较短, 向深水湖盆中搬运的碎屑物质有限(Gong *et al.*, 2015)。C43 井(图 4)与 C41 井(图 7) LST 垂向上均可解释为 2 期准层序, 自下而上命名为 LST-1 与 LST-2。以 C41 井为例, LST-1 的沉积厚度约 48 m, 以厚层泥岩为主, 测井曲线幅度变化小, 表现为加积的特点; LST-2 沉积厚度约 45 m, 仍以泥岩为主, 解释为 2 个正韵律叠加, 为水下分支河道与支流间湾沉积, 这一时期与上凸上升前进型轨迹对应, 始终发生加积作用。TST 时期, 湖盆面积增大, 以平行—亚平行反射为主, 整体解释为湖泊沉积, 钻井垂向序列可细化为 2 期准层序(TST-3 与 TST-4)。C41 井的 TST-3 沉积厚度约 30 m, 仍以泥岩为主, 但顶部出现粉砂岩, 整体表现为退积的特点; TST-4 的沉积厚度约 37 m, 向上粉砂岩含

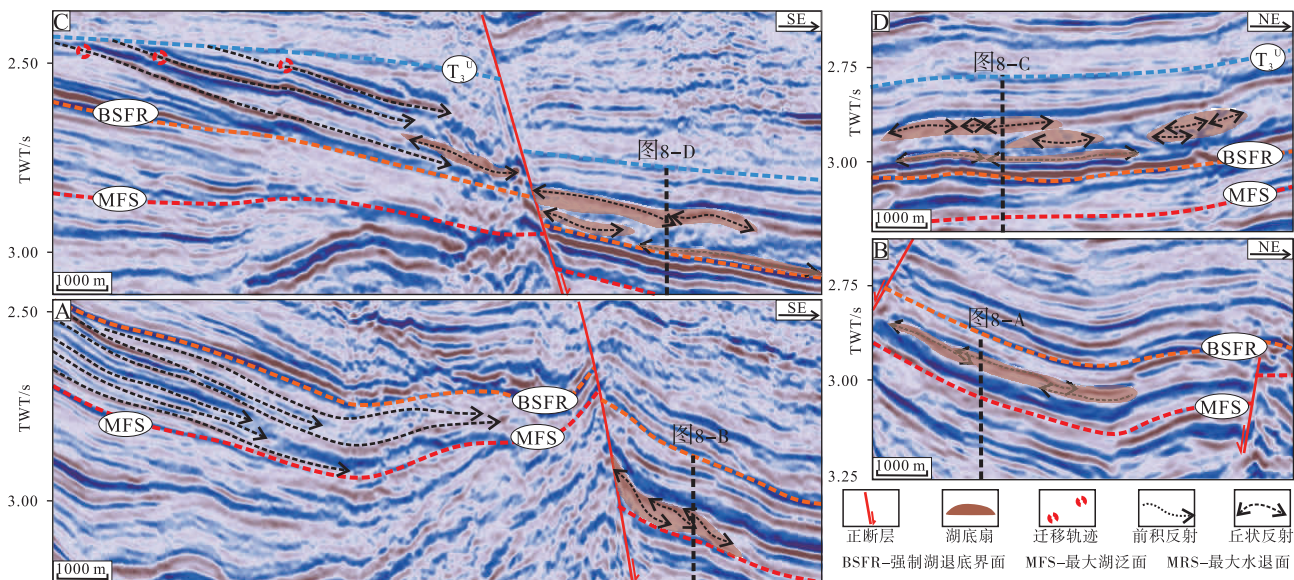
量略增加，也表现出退积的特点，对应的轨迹类型为上升上凸后退型。HST 时期，也为正常湖退情况下形成的三角洲沉积，但其顶积层厚度相对于 LST 时期的明显减小，前积层与底积层向盆地中心推进，其延伸距离大于 20 km。C41 井可识别出 2 个准层序（HST-5 与 HST-6），HST-5 的沉积厚度约 42 m，测井曲线表现为低幅指状，以支流间湾沉积为主，顶部出现薄层水下分支河道，整体呈现出进积的特点；HST-6 的沉积厚度约 59 m，下部多为泥岩，上部呈现正韵律的特点，由加积特点转变为进积。FSST 时期，以前积层为主体，向盆地中央远距离推进（>20 km），钻井显示砂岩含量显著增加，也可进一步划分为 2 个准层序。C41 井 FSST-7 的沉积厚度约 63 m，为多期正韵律叠加，解释为多期河道在垂向上叠加；FSST-8 的沉积厚度约 54 m，测井曲线表现为齿化箱形的特点，砂岩含量达到最高，该时期对应上凸下降前进型轨迹，指示湖平面相对下降，三角洲持续推进，且多期进积型三角洲在垂向上相互叠加（图 7）。

在三角洲向湖盆远距离推进的过程中，砂质沉积物可向深水湖盆中搬运。由于断层的活动或地形坡度的突变，经过滑动、滑塌或以异重流的形式进入深水湖盆，从而形成湖底扇沉积（Pan *et al.*,

2019；龚承林等，2023）。HST 与 FSST 沉积时期，研究区三角洲规模大，其前缘均易滑塌发育湖底扇沉积，但其规模存在差异。HST 时期的湖底扇厚度小、规模小，地震响应表现为中等振幅和中等反射，下伏泥岩与上覆泥岩均表现为强振幅的特点（图 8-A，8-B）；FSST 时期形成下降型轨迹，湖平面不断强制下降，可容空间不断减小，在沉积物供给充足的背景下，湖平面的下降促使更多的沉积物进入深水区，因而形成的湖底扇沉积厚、规模大，地震响应表现为中等振幅，内部断续、杂乱，在垂向上解释为多期湖底扇叠加（图 8-C，8-D）。

5 层序格架下的沉积充填过程

使用滨线迁移轨迹分析的方法，不仅可建立高精度层序地层格架，也可反演三角洲向湖盆的推进过程，解释三角洲与湖底扇之间的成因关联（Liu *et al.*, 2024）。渤中凹陷西洼层序 SQ_{d2} 早期 LST 沉积时，上升前进型轨迹指示三角洲向湖盆推进，而上凸型轨迹代表靠近物源口的位置存在地形低点，具有较大的可容纳空间，沉积物更易在低洼处加积的形式填平补齐，该类轨迹向湖盆推进距离较短，也指示三角洲向湖盆中央推进有限，厚层的顶积层证实这一过程，沉积物很难搬运至深水湖盆



A—FSST 顺物源方向典型湖底扇地震反射特征；B—FSST 垂直物源方向典型地震反射特征（与图 8-A 垂直）；C—HST 顺物源方向典型湖底扇地震反射特征；D—HST 垂直物源方向典型地震反射特征（与图 8-C 垂直）

图 8 渤中凹陷层序 SQ_{d2} 体系域 HST 与 FSST 典型三角洲与湖底扇成因关联（剖面位置见图 1）

Fig. 8 Typical relationship between deltas and sub-lacustrine fans of HST and FSST of sequence SQ_{d2} in Bozhong sag

(seen location in Fig. 1)

(Gong *et al.*, 2015)。TST 时期, 滨线轨迹变为上升后退型, 此时滨线向陆地变化距离小, 但垂向变化大, 指示该时期湖盆水体快速加深, 但湖盆面积变化不大, 而湖盆水体扩张导致沉积物难以在湖盆中沉积, 该时期以偏泥质小规模三角洲和几乎不发育湖底扇沉积为特征。HST 沉积时期, 滨线在剖面上呈下凹的形态, 指示沉积物进入物源区时地形相对平坦, 三角洲快速向湖盆推进, 形成“厚顶积层、厚前积层”的三角洲, 伴随着沉积物向湖盆中心推进的过程, 当具备滑塌失稳的触发机制时, 前缘沉积物将通过滑动、滑塌的形式进入深水区从而形成湖底扇。FSST 时期, 下降型的轨迹快速大幅度地向湖盆中央推进, 因而形成的三角洲具有极薄的顶积层, 其前积层占主导, 底积层相对于 HST 更厚, 也指示更多的沉积物被搬运至三角洲前缘 (Liu *et al.*, 2024), 更易形成大规模的湖底扇。因此, 滨线轨迹的运动学参数可用来判断沉积物的搬

运过程, 当滨线快速向湖盆中心推进时, 更多沉积物易被搬运更远距离, 从而在深水湖盆中形成湖底扇沉积 (图 9; 表 1)。在海相盆地如琼东南盆地中更新统具有相似的特点 (Gong *et al.*, 2015)。

6 油气地质意义

在本次研究中, 通过对迁移轨迹的分析, 区分了正常湖退与强制湖退的成因差异, 将四分的体系域划分并引入到渤中凹陷层序 SQd_2 的研究中, 探究了 S 形与斜交型前积反射差异性形成过程, 尤其是最大湖泛面之上的高位体系域与强制湖退体系域中均发育大型前积反射, HST 中发育大型 S 形前积反射, 对应以细砂岩、粉砂岩为主的三角洲, 在正常湖退过程中, 三角洲快速向湖盆推进, 在重力失稳的条件下也可形成重力流砂体 (地震反演结果表明, 砂体厚度约 10~13 m), 但其需克服的水体

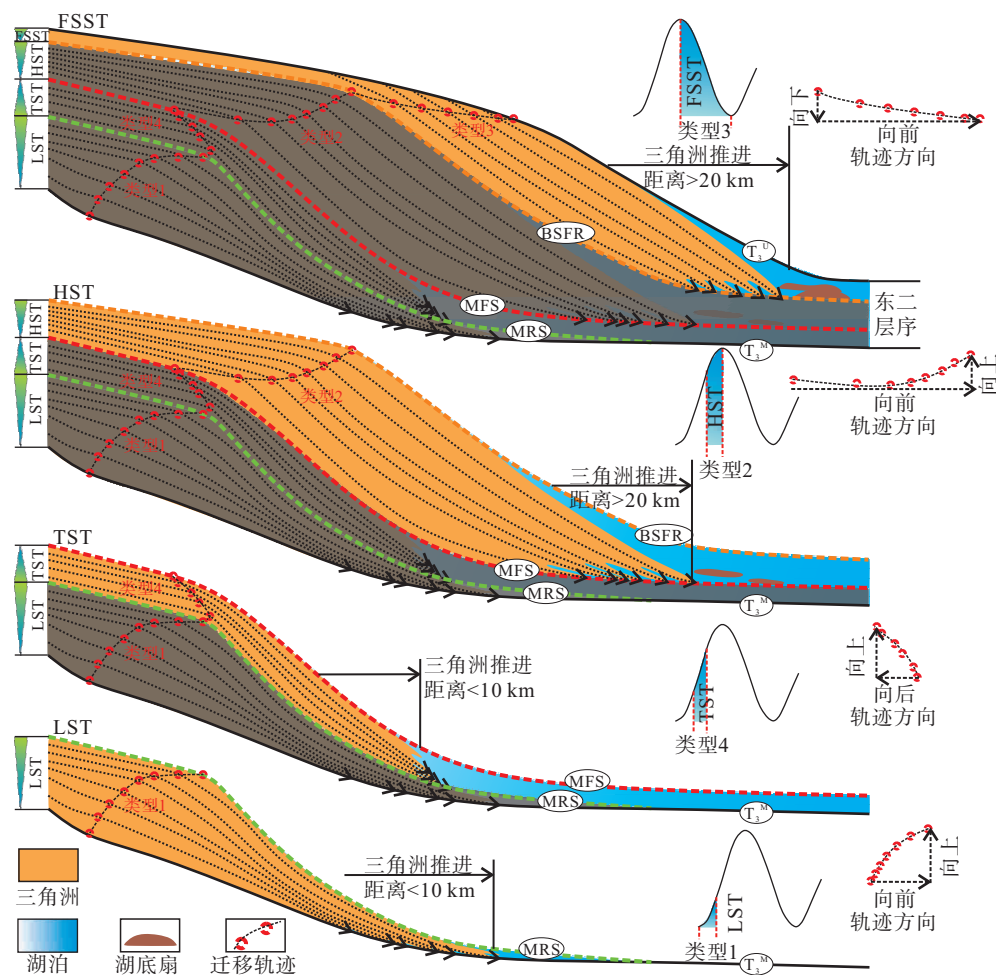


图 9 渤中凹陷层序 SQd_2 层序格架与沉积充填过程

Fig. 9 Sequence stratigraphy and sedimentary filling process of sequence SQd_2 in Bozhong sag

表 1 渤中凹陷层序 SQd₂ 体系域 HST 与 FSST 三角洲—湖底扇定量参数对比

Table 1 Different quantitative parameters of deltas and sub-lacustrine fans in HST and FSST of sequence SQd₂ in Bozhong sag

体系域	三角洲最远推进距离 / km	岩性	三角洲 砂地比	湖底扇宽度 / km	湖底扇长度 / km	湖底扇砂体厚度 / m	湖底扇 砂地比
FSST	> 20	中砂岩、细砂岩	0.2~0.5	3~10	7~15	15~25	0.2~0.3
HST	> 20	细砂岩、粉砂岩	0.1~0.3	3~7	4~11	10~13	0.1~0.2

阻力更大，因而砂质沉积物更多被保留在三角洲沉积中；在 FSST 中，由于相对湖平面快速下降，促进三角洲向湖盆快速推进，对应以细砂岩、中砂岩为主的三角洲，反映物源供给能力与河流搬运能力的增强，可携带更多粗粒碎屑物质进入研究区，相对湖平面的下降同时促进更多碎屑物质搬运进入深水湖盆形成更大规模的重力流沉积。因此，在强制湖退阶段，由于可容纳空间的减小，在物源供应充足的情况下，更易形成富砂三角洲，同时伴随大规模湖底扇的形成，其砂地比相对较高。地震反演结果表明，FSST 时期发育的湖底扇砂体厚度约 15~25 m（表 1）。

区分正常湖退与强制湖退过程有助于更好解释三角洲的富砂性及其与湖底扇之间的成因关联，并指导寻找有利砂体的发育位置（秦祎等，2020；Wu *et al.*, 2024）。

7 结论

本研究使用滨线迁移轨迹并结合经典层序地层学与沉积学的研究方法，研究了渤中凹陷西洼层序 SQd₂ 的高精度格架与沉积充填过程。具体结论如下：

- 1) 根据滨线轨迹的运动学特点（上升/下降、前进/后退）与轨迹剖面形态（上凸/下凹）的特点，渤海湾盆地渤中凹陷西洼东营组层序 SQd₂ 可识别出 4 类滨线轨迹，分别命名为上升上凸前进型、上升下凹前进型、下降上凸前进型和上升上凸后退型。
- 2) 基于 4 类轨迹样式提出在渤中凹陷西洼东营组层序 SQd₂ 中使用四分体系域的层序划分方案，并通过钻井岩性组合、测井曲线形态与地震反射特征验证四分体系域的划分的合理性。其中，上升上凸前进型对应低位体系域，上升下凹前进型指示高位体系域，下降上凸前进型为强制湖退体系域，上升上凸后退型解释为湖侵体系域。

3) 基于地震相识别与对应沉积相的解释，研究区共识别出 S 形前积反射、斜交型前积反射、小型丘状反射和平行—亚平行反射等 4 类地震相，进一步解释为三角洲、湖底扇与湖泊 3 类沉积体系。

4) 层序 SQd₂ 晚期发育大规模三角洲，上升型轨迹（HST）代表沉积物更易沉积于三角洲，但其前缘重力失稳时可形成小型湖底扇，而下降型轨迹指示的强制湖退阶段（FSST）时更多沉积物向湖盆中央推进，易形成大型湖底扇，其砂地比相对较高，是断陷湖盆寻找有利砂体和岩性圈闭的有利位置。

参考文献 (References)

代黎明,杨波,刘晓健,王改卫,崔海忠. 2014. 渤中西次洼东营组层序地层特征与沉积体系演化. 石油地质与工程,28(4): 7-10, 153. [Dai L M, Yang B, Liu X J, Wang G W, Cui H Z. 2014. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary system evolution of Dongying Formation, western subsag in Bozhong sag. Petroleum Geology and Engineering, 28(4): 7-10, 153]

葛家旺,朱筱敏,吴陈冰洁,张向涛,贾连凯,易震,肖张波. 2019. 辫状河三角洲沉积特征及成因差异: 以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例. 石油学报,40(S1): 139-152. [Ge J W, Zhu X M, Wu C B J, Zhang X T, Jia L K, Yi Z, Xiao Z B. 2019. Sedimentary characteristics and genetic difference of braided delta: a case study of Enping Formation in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolelei Sinica, 40(S1): 139-152]

龚承林, Ronald J Steel, 彭旸, 王英民, 李东伟. 2022. 深海碎屑岩层序地层学 50 年(1970—2020)重要进展. 沉积学报, 40(2): 292-318. [Gong C L, Ronald J S, Peng Y, Wang Y M, Li D W. 2022. Major advances in deep-marine siliciclastic sequence stratigraphy, 1970 to 2020. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 292-318]

龚承林,徐长贵,官大勇,王启明,李东伟. 2023. 渤中凹陷断拗转换期湖扩—湖退型层序及其对规模湖底扇发育展布的控制. 古地理学报, 25(5): 992-1010. [Gong C L, Xu C G, Guan D Y, Wang Q M, Li D W. 2023. Sequence stratigraphic model of Bozhong subbasin during a syn-rift to post-rift transition and its controls on regionally extensive sublacustrine fans. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(5): 992-1010]

官大勇,杜晓峰,王启明,王志萍. 2023. 渤海海域莱州湾凹陷沙三段水道型湖底扇发育特征与沉积模式. 地球科学, (2): 503-516.

- [Guan D Y, Du X F, Wang Q M, Wang Z P. 2023. Development characteristics and sedimentary model of sublacustrine fan of channel type in the third member of shahejie formation in the northern Laizhou Bay depression, Bohai Sea area. *Earth Science*, (2): 503–516]
- 雷鸣, 杨香华, 朱红涛, 徐长贵. 2017. 渤中凹陷南部东二下段沉积体地震反射特征及沉积模式. *地质科技情报*, 36(3): 278–285.
- [Lei M, Yang X H, Zhu H T, Xu C G. 2017. Seismic reflection characteristics and sedimentary model of sedimentary bodies of lower E₄2 of Dongying Formation, southern of central Bohai Sag. *Geological Science and Technology Information*, 36(3): 278–285]
- 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]
- 牛成民, 杜晓峰, 王启明, 张参, 丁熠然. 2022. 渤海海域新生界大型岩性油气藏形成条件及勘探方向. *岩性油气藏*, 34(3): 1–14. [Niu C M, Du X F, Wang Q M, Zhang C, Ding Y R. 2022. Formation conditions and exploration direction of large-scale lithologic reservoirs of Cenozoic in Bohai Sea. *Lithologic Reservoirs*, 34(3): 1–14]
- 庞小军, 王清斌, 杜晓峰, 代黎明, 李欢, 王茂祯. 2016. 渤中凹陷西北缘古近系物源演化及其对储层的影响. *大庆石油地质与开发*, 35(5): 34–41. [Pang X J, Wang Q B, Du X F, Dai L M, Li H, Wang M Z. 2016. Matter provenance evolution and its influences on palaeogene reservoirs in the northwestern margin of Bozhong Sag. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 35(5): 34–41]
- 秦春雨, 王华, 姜平, 杨希冰, 邹康. 2020. 断陷盆地轴向沉积体系空间展布及演化特征: 以北部湾盆地涠西南凹陷为例. *中国矿业大学学报*, 49(3): 542–551. [Qin C Y, Wang H, Jiang P, Yang X B, Zou K. 2020. Spatial distribution and evolution of axial deltaic system in continental rift basin: a case study of Weixinan sag, Beibuwan Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(3): 542–551]
- 秦伟, 朱筱敏, 王彤, 郭诚, 谢爽慧. 2020. 陆相断陷湖盆强制湖退及沉积响应: 以莱州湾凹陷沙三段为例. *古地理论*, 22(3): 457–468. [Qin Y, Zhu X M, Wang T, Guo C, Xie S H. 2020. Forced regression and its sedimentary response to continental lacustrine rift basin: a case of the Member 3 of Shahejie Formation in Laizhouwan sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(3): 457–468]
- 王启明, 杨海风, 官大勇, 黄晓波, 徐伟, 王志萍, 潘凯. 2024. 大型湖底扇源-汇系统耦合与沉积充填过程: 以渤中凹陷东南斜坡带东营组为例. *沉积学报*, 44(1): 308–323. [Wang Q M, Yang H F, Guan D Y, Huang X B, Xu W, Wang Z P, Pan K. 2024. Source-sink system coupling and sedimentation filling process of a large sublacustrine fan: a case study from the Dongying Formation in the southeast slope of Bozhong Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 44(1): 308–323]
- 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]
- 夏庆龙, 周心怀, 薛永安, 田立新, 庞雄奇, 王应斌. 2012. 渤海海域油气藏形成分布与资源潜力. 北京: 石油工业出版社. [Xia Q L, Zhou X H, Xue Y A, Tian L X, Pang X Q, Wang Y B. 2012. Hydrocarbon Reservoir Formation, Distribution and Resource Potential in Bohai Sea. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 谢玉洪, 张功成, 沈朴, 刘丽芳, 黄胜兵, 陈少平, 杨树春. 2018. 渤海湾盆地渤中凹陷大气田形成条件与勘探方向. *石油学报*, 39(11): 1199–1210. [Xie Y H, Zhang G C, Shen P, Liu L F, Huang S B, Chen S P, Yang S C. 2018. Formation conditions and exploration direction of large gas field in Bozhong sag of Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 39(11): 1199–1210]
- 徐长贵, 周心怀, 杨波, 王昕. 2009. 渤中凹陷石南陡坡带构造—岩性复合圈闭的形成及分布规律. *现代地质*, 23(5): 887–893. [Xu C G, Zhou X H, Yang B, Wang X. 2009. Forming and distribution regularity of the structural-lithologic composite traps in the Shinan steep slope zone, Bozhong Sag. *Geoscience*, 23(5): 887–893]
- 徐长贵, 周家雄, 杨海风, 叶涛. 2024. 渤海海域油气勘探新领域、新类型及资源潜力. *石油学报*, 45(1): 163–182. [Xu C G, Zhou J X, Yang H F, Ye T. 2024. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 163–182]
- 徐怀大, 王世风, 陈开远. 1990. 地震地层学解释基础. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 42–49. [Xu H D, Wang S F, Chen K Y. 1990. The Basis of Seismic Sequence Interpretation. Hubei Wuhan: China University of Geosciences Press, 42–49]
- 薛永安. 2017. 精细勘探背景下渤海油田勘探新思路与新进展. *中国海上油气*, 29(2): 1–8. [Xue Y A. 2017. New ideas and progresses under refine exploration background of Bohai oilfield. *China Offshore Oil and Gas*, 29(2): 1–8]
- 曾洪流, 赵贤正, 朱筱敏, 金凤鸣, 董艳蕾, 王余泉, 朱茂, 郑荣华. 2015. 隐性前积浅水曲流河三角洲地震沉积学特征: 以渤海湾盆地冀中坳陷饶阳凹陷肃宁地区为例. *石油勘探与开发*, 42(5): 566–576. [Zeng H L, Zhao X Z, Zhu X M, Jin F M, Dong Y L, Wang Y Q, Zhu M, Zheng R H. 2015. Seismic sedimentology characteristics of sub-clinoformal shallow-water meandering river delta: a case from the Suning area of Raoyang sag in Jizhong depression, Bohai Bay Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5): 566–576]
- 张曼莉, 林畅松, 何敏, 张忠涛, 李浩. 2019. 珠江口盆地晚渐新世陆架边缘三角洲沉积层序结构及演化. *石油与天然气地质*, 40(4): 875–885. [Zhang M L, Lin C S, He M, Zhang Z T, Li H. 2019. Sequence architecture and evolution of shelf-margin deltaic systems of the Late Oligocene in Pearl River Mouth Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(4): 875–885]
- 张新涛, 张黎, 李虹, 王军. 2021. 渤海中部海域大型湖底扇地球物理响应及勘探意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 48(6): 723–731. [Zhang X T, Zhang L, Li H, Wang J. 2021. Geophysical

- response of large sublacustrine fan in central Bohai Sea and its exploration significance. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 48(6): 723–731]
- 赵梦, 杨海风, 石文龙, 钱赓, 姚城. 2021. 渤海西北部古近系东二下段物源分析. *中国海上油气*, 33(4): 22–30. [Zhao M, Yang H F, Shi W L, Qian G, Yao C. 2021. Provenance analysis of the lower submember of second member of Dongying Formation (Ed_2^1) of Paleogene in northwestern of Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 33(4): 22–30]
- 朱伟林, 吴景富, 张功成, 任建业, 赵志刚, 吴克强, 钟锴, 刘世翔. 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. [Zhu W L, Wu J F, Zhang G C, Ren J Y, Zhao Z G, Wu K Q, Zhong K, Liu S X. 2015. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic basins. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 88–101]
- Burgess P M, Lammers H, van Oosterhout C, Granjeon D. 2006. Multivariate sequence stratigraphy: Tackling complexity and uncertainty with stratigraphic forward modeling, multiple scenarios, and conditional frequency maps. *AAPG Bulletin*, 90(12): 1883–1901.
- Catuneanu O. 2019. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 188: 312–388.
- Gawthorpe R L, Fraser A J, Collier R E L. 1994. Sequence stratigraphy in active extensional basins: Implications for the interpretation of ancient basin-fills. *Marine and Petroleum Geology*, 11(6): 642–658.
- Gong C L, Wang Y M, Pyles D R, Steel R J, Xu S, Xu Q, Li D. 2015. Shelf-edge trajectories and stratal stacking patterns: Their sequence-stratigraphic significance and relation to styles of deep-water sedimentation and amount of deep-water sandstone. *AAPG Bulletin*, 99(7): 1211–1243.
- Hampson G J, Sixsmith P J, Kieft R L, Jackson C A L, Johnson H D. 2009. Quantitative analysis of net-transgressive shoreline trajectories and stratigraphic architectures: Mid-to-Late Jurassic of the North Sea rift basin. *Basin Research*, 21(5): 528–558.
- Helland-Hansen W, Gjølberg J G. 1994. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: A different perspective. *Sedimentary Geology*, 92(1–2): 31–52.
- Helland-Hansen W, Martinsen O J. 1996. Shoreline trajectories and sequences: description of variable depositional-dip scenarios. *Journal of Sedimentary Research*, 66(4): 670–688.
- Henriksen S, Hampson G J, Helland-Hansen W, Johannessen E P, Steel R J. 2009. Shelf edge and shoreline trajectories, a dynamic approach to stratigraphic analysis. *Basin Research*, 21(5): 445–453.
- Hunt D, Tucker M E. 1992. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: Deposition during base-level fall. *Sedimentary Geology*, 81(1–2): 1–9.
- Liu P Y, Gong C L, Gearon J H, Guan D Y, Wang Q M, Qi K, Li D W. 2024. Increased sediment connectivity between deltas and deep-water fans in closed lake basins: a case study from Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China. *Sedimentary Geology*, 460(2): 562–575.
- Pan S X, Liu C Y, Li X B, Liang S J, Chen Q L, Zhang W T, Zhang S C. 2019. Giant sublacustrine landslide in the Cretaceous Songliao Basin, NE China. *Basin Research*, 31(6): 1066–1082.
- Pan S X, Liu H Q, Xu D N, Wei P S, Qu Y Q, Guan X, Liu C Y, Zhang S C. 2020. Sublacustrine gravity-induced deposits: The diversity of external geometries and origins. *Sedimentary Geology*, 407(6): 105738.
- Patruno S, Helland-Hansen W. 2018. Clinofolds and clinofold systems: Review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins. *Earth-Science Reviews*, 185(10): 202–233.
- Paumard V, Bourget J, Payenberg T, George A D, Ainsworth R B, Lang S. 2019. From quantitative 3D seismic stratigraphy to sequence stratigraphy: Insights into the vertical and lateral variability of shelf-margin depositional systems at different stratigraphic orders. *Marine and Petroleum Geology*, 110(12): 797–831.
- Plint A G, Nummedal D. 2000. The falling stage systems tract: Recognition and importance in sequence stratigraphic analysis. *Geological Society, London, Special Publications*, 172(1): 1–17.
- Posamentier H W, Allen G P, James D P, Tesson M. 1992. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: Concepts, examples, and exploration significance. *AAPG Bulletin*, 76(11): 1687–1709.
- Vail P R, Mitchum R M, Thompson III S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap [M] // Payton C E. *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration*. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists: 63–81.
- Wu Q R, Xian B Z, Gao X Z, Yu Z Y, Chen P, Tian R H, Zhang W M, Liu J P, Wang Z, Zhao Z. 2024. Impact of climate-driven base-level on the diagenesis of lacustrine turbidites: Insights from Eocene Dongying Sag, Bohai Bay Basin, East China. *Sedimentary Geology*, 466(8): 106637.
- Xu C G, Lu H, Song Z Q, Jia D H. 2020. Sequence stratigraphy of the lacustrine rift basin in the Paleogene system of the Bohai Sea area: architecture mode, deposition filling pattern, and response to tectonic rifting processes. *Interpretation*, 8(2): SF57–SF79.
- Xu S, Cong F Y, Hao F, Xu C G, Zou H Y, Zhang X T, Xu S H. 2018. Shelf-edge trajectory and sediment dispersal in a lacustrine setting: a case study from Qinnan Depression, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 91(5): 562–575.
- Zhang X, Lin C S, Zhang Z T, Feng X, Zhang B, Bei R M, Shu L F, Jiang J, Xing Z C, Sun H. 2022. Shoreline migration paths and depositional architecture of early-mid Miocene deltaic clinofolds in response to sea-level changes in the north-eastern shelf margin, South China Sea. *Sedimentology*, 69(3): 1456–1489.
- Zhu H T, Yang X H, Zhou X H, Liu K Y. 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(3): 20–33.

(责任编辑 李新坡)