

渤海湾盆地埕北凹陷古近系沉积体系及砂体成因类型*

许 鹏^{1,2} 连豪杰³ 毕力格³ 胡贺伟² 郜政辉³ 姜福杰¹ 邵龙义³

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

3 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要 埕北凹陷是渤海湾盆地渤中坳陷内部的次级构造, 其勘探潜力一直受制于对区内砂体成因类型及储集层分布规律的认识。利用钻井岩心、测井曲线及地震反射剖面等资料, 对该凹陷古近系沉积特征、砂体成因类型和分布规律进行分析。研究区古近系发育扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊等沉积相, 扇三角洲主要发育在凹陷东北侧的陡坡带, 岩性以具块状构造的含砾粗砂岩为主, 地震反射特征主要表现为楔状的前积退积和杂乱反射, 测井相主要表现为低幅齿型、齿状箱型和钟型; 辫状河三角洲主要发育在凹陷西南侧的缓坡带, 岩性以具交错层理的砂岩为主, 地震反射特征主要表现为 S 形前积和叠瓦状前积, 测井相主要表现为箱型、钟型和漏斗型; 湖底扇受重力流控制, 主要发育在凹陷中心的半深湖-深湖区, 地震反射特征主要表现为蠕虫状前积反射; 准坝主要发育在湖泊边缘或中央局部隆起区, 因受波浪作用控制, 沉积特征表现为席状砂质沉积被泥岩包围, 地震反射特征主要表现为透镜状反射, 测井相主要表现为指状和漏斗型。纵向上, 沙三段以辫状河三角洲、扇三角洲和湖泊沉积相为主, 沙一二段以辫状河三角洲、扇三角洲和湖泊沉积为主, 东三段以辫状河三角洲、扇三角洲和湖泊沉积为主, 东二段以辫状河三角洲和湖泊沉积为主, 扇三角洲发育规模较小。埕北凹陷古近系砂体的生成和发育主要受构造活动、源区物源供给、微古地貌形态和湖平面变化等因素控制, 主要发育扇三角洲砂体、辫状河三角洲砂体、湖底扇砂体和准坝砂体。

关键词 渤海湾盆地 埕北凹陷 古近系 沉积相 砂体成因类型

第一作者简介 许鹏, 男, 1987 年生, 工学硕士, 高级工程师, 在中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院长期从事海上油气勘探研究工作。E-mail: xupeng17@cnooc.com.cn。

通讯作者简介 邵龙义, 男, 1964 年生, 工学博士, 博士生导师, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院教授, 长期从事沉积学和煤田地质学教学及研究工作。E-mail: ShaoL@cumt.edu.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Depositional systems and genetic types of sand bodies of the Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

XU Peng^{1,2} LIAN Haojie³ BI Lige³ HU Hewei² GAO Zhenghui³ JIANG Fujie¹ SHAO Longyi³

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

2 Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China

3 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

* 中海石油(中国)有限公司“七年行动计划”重大科技专项课题(编号: CNOOC-KJ135ZDXM36TJ08TJ)及国家自然科学基金项目(编号: 41572090)资助。[Co-funded by the Major Science and Technology special Project of CNOOC (China) Limited's “Seven-Year Action Plan” (No. CNOOC-KJ135ZDXM36TJ08TJ) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41572090)]

收稿日期: 2023-07-25 改回日期: 2024-03-04

Abstract Chengbei sag is a half graben basin in the Bohai Bay Basin. Its exploration potential is limited by the understanding of the genetic type of sand bodies and the distribution of reservoirs. This paper has analyzed the sedimentary characteristics, sand body genetic types and reservoir distribution patterns of the Paleogene in the Chengbei sag, using the drilling cores, log curves, and 3D seismic reflection data. The Paleogene in this sag has been developed with fan delta, braided river delta, sub-lacustrine fan sedimentary facies. The fan delta is developed in the steep slope zone on the northeast side of the sag, with lithology dominated by massive gravelly coarse-grained sandstones. The seismic reflections show lenticular and wedge progradation and retrogradation morphologies and chaotic and the logging facies mainly show low-amplitude jag-shaped, jagged box-shaped, and bell-shaped. The braided river delta is developed in the gentle slope zone on the southwest side of the sag, with lithology mainly consisting of cross-bedded sandstones. The seismic reflection shows S-shaped progradation and imbricated progradation patterns. The logging facies mainly show box-shaped, bell-shaped and funnel-shaped patterns. The sub-lacustrine fan is controlled by gravity flow and developed in the deep lacustrine area of the sag center. The seismic reflection is featured by worm-like progradation. The lacustrine shoal-bars are developed at the edge or central uplift of lakes, controlled by wave action, and are characterized by sheet-like sandy deposits surrounded by mudstone. The seismic reflection is featured by lens-shaped reflection, and the logging facies mainly show finger-shaped and funnel-shaped. Vertically, the Member 3 of the Shahejie Formation is mainly composed of braided river delta, fan delta, and lacustrine sedimentary facies. The Members 1 and 2 of Shahejie Formation are mainly composed of braided river delta, fan delta and lacustrine sedimentary facies. The Member 3 of Dongying Formation is mainly composed of braided river delta and fan delta sedimentary facies, while the Member 2 of Dongying Formation is mainly composed of braided river delta sedimentary facies, with the scale of fan delta development being small. The generation and development of Paleogene sand bodies in the Chengbei sag are mainly influenced by tectonic activity, sediment supply, palaeo-microgeomorphologies, and lake level changes. The predominant genetic types of these sand bodies include fan delta sand bodies, braided river delta sand bodies, sub-lacustrine fan sand bodies, and lacustrine shoal-bar sand bodies.

Key words Bohai Bay Basin, Chengbei sag, Paleogene, sedimentary facies, genetic types of sand body

About the first author XU Peng, born in 1987, master of engineering, is a senior engineer in Bohai Petroleum Research Institute of Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., Ltd. He is mainly engaged in offshore oil and gas exploration research. E-mail: xupeng17@cnooc.com.cn.

About the corresponding author SHAO Longyi, born in 1964, is a professor and doctoral supervisor of geology at College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing). He is currently leading an active group working on sedimentology and coal geology teaching and research work. E-mail: shaol@cumtb.edu.cn.

渤海湾盆地是中生代末以来叠置在太古界基底上的新生代克拉通断陷盆地。其西北受限于燕山山脉、西部毗邻太行山脉、东部是胶辽隆起、南部为鲁西隆起(田在艺和韩屏, 1991)。埕北凹陷呈北断南超的箕状构造, 区域内发育构造、地层岩性和不整合面等一系列圈闭, “生、运、聚”时空配置

十分优越(李昌谷和周永红, 2000)。经历 40 多年勘探, 渤海湾盆地逐渐成为我国主要的油气生产基地(刘强虎等, 2020; 徐长贵等, 2022; 杨海风等, 2023)。2010 年之后, 随着勘探程度的增加, 由于古近系总体埋深大、研究难度大、勘探分析风险大, 导致区域沉积体系需要更精细化的研究。

埕北凹陷的油气勘探主体为古近系东营组和沙河街组, 目前已在该凹陷的东北部发现了曹妃甸 21-3 油田, 东南侧发现了埕岛油田, 埕北凹陷主体处在这 2 个区域之间, 预示了该凹陷具有较好的勘探潜力。在油气勘探过程中, 开发效果及成败在于储集层的认识及评价, 而砂体预测则是储集层评价的重要基础(吴立群等, 2010; 王建强等, 2015; 胡贺伟等, 2024), 沉积相分析又是预测砂体分布的基础(朱筱敏等, 2013; 张自力等, 2021), 因此作者主要是对埕北凹陷古近系沉积相及砂体成因机制进行研究。前人对埕北凹陷的构造演化和沉积相进行研究时提出埕北凹陷古近系裂陷阶段主要经历了 3 个期次(付兆辉等, 2009, 2015; 胡贺伟等, 2020), 将该凹陷划分为缓坡带、洼陷带和陡坡带 3 个主要构造带(王飞琼, 2001; 张强等, 2017; 张晓庆等, 2019), 并在埕北凹陷相邻地区识别出扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊等沉积相(郭涛等, 2015; 胡贺伟等, 2020; 陈丽祥等, 2016)。由于该凹陷古近系砂体横向变化快、钻井资料欠缺, 因此, 且有关该凹陷内的砂体沉积成因类型及展布规律方面的研究还比较薄弱, 因此凹陷内有利储集层的预测精度受到了限制。

通过 8 口井钻井岩心、测井、510 km² 三维地震资料等的研究, 对埕北凹陷古近系沉积相类型及沉积模式进行分析, 确定出砂体成因机制, 以期为埕北凹陷储集层评价和预测提供有效的指导。

1 区域地质背景

在古近纪早期, 渤海湾盆地受大规模的裂陷作用影响, 形成 NW 向断层控盆的构造格局; 到古近纪晚期, 伴随裂陷作用的减弱, 郯庐断裂带右旋走滑活动的控制开始显现, 盆地转换为 NW 向和 NEE 向断裂体系共轭控盆的构造格局(Hsiao *et al.*, 2004; 刘一鸣等, 2019)(图 1-a)。受中生代以来太平洋板块和欧亚板块的俯冲, 在古生界和太古界、元古界基底之上发育了一系列断陷盆地(Yu and Koyi, 2016)。埕北凹陷为新生代渤海湾盆一级构造单元渤中坳陷内部的次级构造, 夹持在埕子口凸起与埕北低凸起之间, 凹陷内部表现为北断南超、呈北西向展布的箕状结构(图 1-a)(付兆辉等, 2015)。埕北凹陷从西南侧向东北侧, 分为超覆带、第一坡折带、第二坡折带、洼陷带及陡坡

带, 不同构造单元的新生代地层具有较大的差异性(图 1-b)。

区域上, 渤海湾盆地古近系从下向上包括孔店组、沙河街组和东营组, 沙河街从下向上划分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段, 东营组从下向上分为东三段、东二段和东一段。由钻井揭示可知, 埕北凹陷古近系主要发育地层为沙四段、沙三段、沙一二段、东三段和东二段共 5 套地层, 具有不同的岩性和地层特征。从地震剖面上来看, 沙河街组与下伏古生界、东营组与上覆馆陶组的不整合角度较大, 地层明显发生剥蚀, 沙四段发育不完整且较薄, 在此不做主要目的层分析。沙三段厚度 0~370 m, 主要发育灰色泥岩、粉砂岩、细砂岩, 局部发育大套砂砾岩, 与下伏中生界呈角度不整合接触, 该段顶部经历了沉积间断与侵蚀作用, 与上覆沙一二段平行不整合接触。沙一二段厚度达 200 m, 主要发育钙质粉砂岩、砂砾岩和夹层灰色泥岩, 其顶部发育黑色油页岩。东三段厚度达 300 m, 主要发育砂岩与灰色泥岩互层, 局部发育大套砾岩。东二段最厚, 达 420 m, 主要发育砾岩、砂岩、含砾砂岩、粉砂岩和泥岩(图 1-c)。

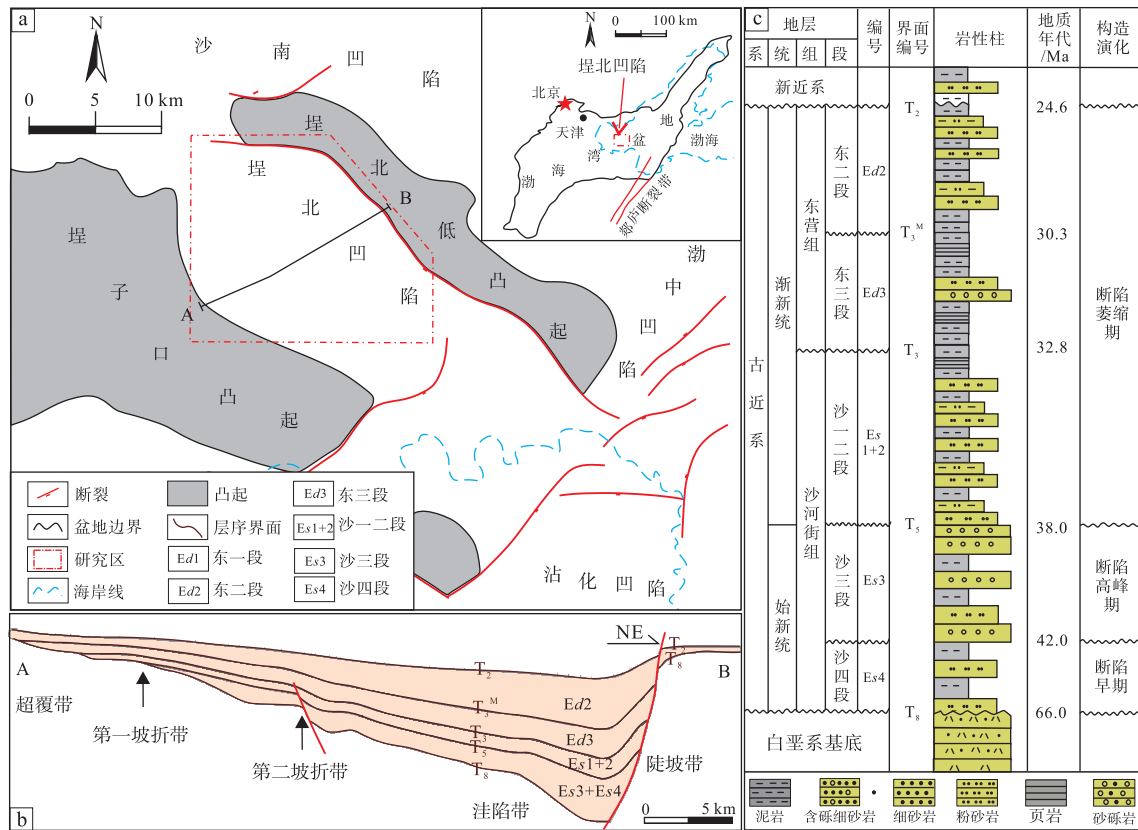
埕北凹陷古近系的构造演化分为 3 个阶段: 沙四段为断陷早期(66-42 Ma)、沙三段为断陷高峰期(42-38 Ma)、沙一二段—东二段为断陷萎缩期(38-24.6 Ma)(付兆辉等, 2009; 张强等, 2017; Zhang *et al.*, 2023)(图 1-c)。

2 沉积相特征

通过对埕北凹陷古近系 8 口井约 5680 m 岩心的描述、薄片岩矿鉴定, 识别出砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、灰岩和油页岩等 6 类岩石, 根据岩性及沉积构造划分为 9 种岩相类型(表 1), 划分出有井地区的沉积相类型, 进一步结合识别出的 5 种地震相类型, 分析整个埕北凹陷内无井地区的沉积相类型。总结出埕北凹陷的沉积相类型包括扇三角洲、辫状河三角洲和湖相 3 种(图 2, 图 3; 表 1), 其中不同的沉积相具有明显不同的地质地球物理响应特征。

2.1 扇三角洲

岩相组合 A 包含岩石类型主要有碎屑支撑砾岩、基质支撑砾岩、平行层理砂岩、块状砂岩、沙



a—埕北凹陷构造位置图；b—埕北凹陷盆地结构剖面图（剖面位置见图 a）；c—埕北凹陷古近系综合柱状图

图 1 渤海湾盆地埕北凹陷构造位置图及古近系地层柱状图

Fig. 1 Structural location maps and the Paleogene stratigraphic column of Chengbei sag, Bohai Bay Basin

纹层理粉砂岩(图 2-a)、杂色泥岩和灰色泥岩。岩相组合 A 下部的测井曲线为大段齿化箱型和钟型组合,具突变界面,指示冲刷面,为典型的分流河道特征,中部测井曲线呈漏斗型和齿型的组合,指示扇三角洲前缘的河口坝沉积,顶部的测井曲线表现为高幅齿型,指示前扇三角洲泥沉积(图 3-a)。根据上述岩性特征和测井特征,将岩相组合 A 解释为扇三角洲沉积相。在地震剖面上,扇三角洲的地震反射特征多为中频率、中振幅、低连续和楔状前积反射(图 4-a)。

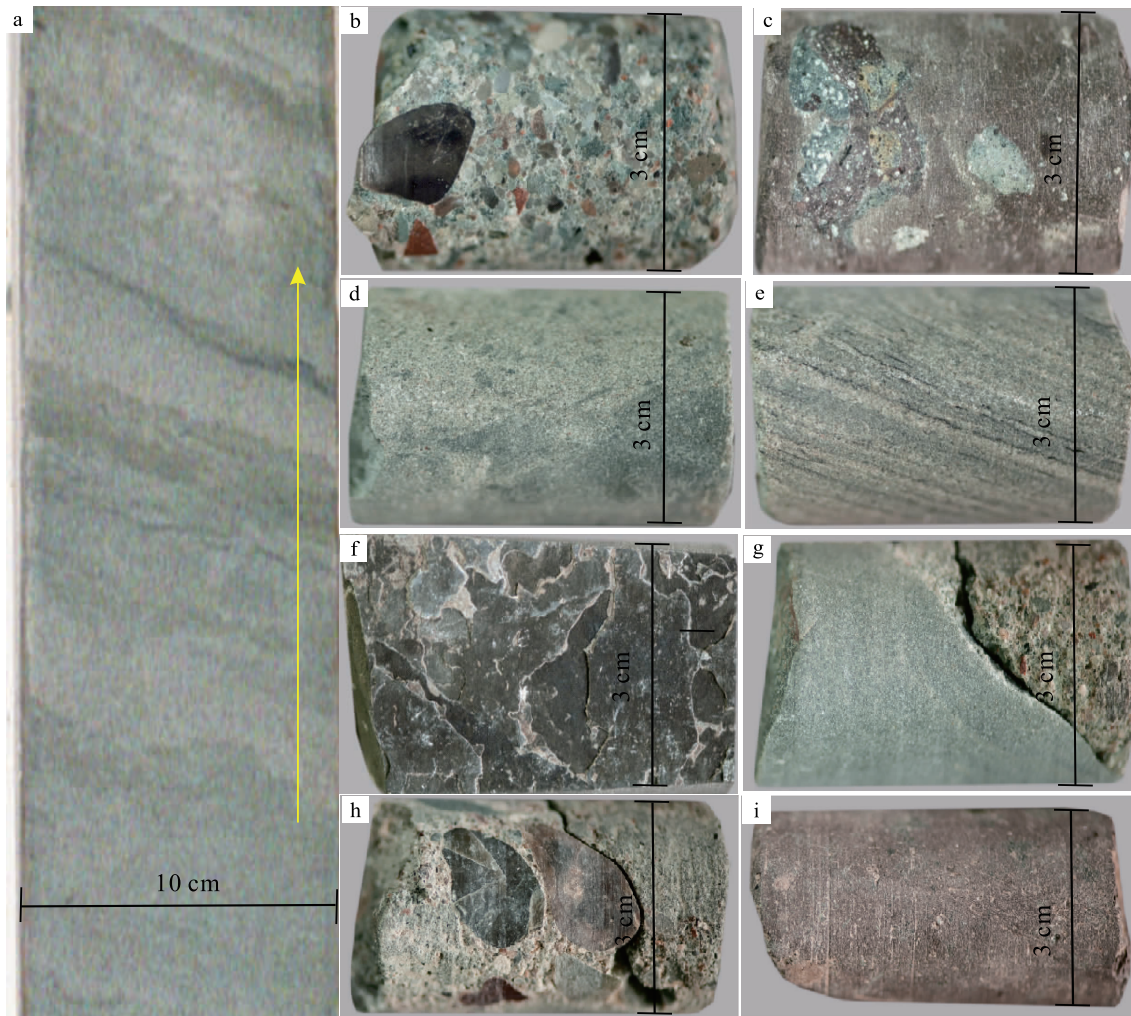
2.2 辫状河三角洲

辫状河三角洲指辫状河直接进入浅水体形成的沉积相,多发育在断陷湖盆地形高差小,搬运距离长,物源区距湖盆水体较远。岩相组合 B 下部包含碎屑支撑砾岩和基质支撑砾岩(图 2-b, 2-c, 2-g, 2-h)、块状砂岩(图 2-d)、水平层理粉砂岩和杂色泥岩,分选磨圆较好,具冲刷面及叠瓦状构造(图 2-h),可见紫红色泥岩(图 2-i),指示干旱

的沉积环境。该组合上部包含平行层理砂岩(图 2-e)、深灰色泥岩(图 2-f)和水平层理粉砂岩。该组合底部测井曲线表现为小段低幅齿型和钟型的组合,变化较快且突变面频繁出现,指示辫状河三角洲平原亚相的分流河道微相,中间表现为微齿漏斗型,指示辫状河三角洲前缘的河口坝微相,上部表现为高齿型,指示前三角洲泥沉积(图 3-b)。根据上述岩性特征和测井特征,将岩相组合 B 解释为辫状河三角洲沉积相。在地震剖面上,辫状河三角洲的地震反射特征主要为中频率、中振幅、低连续的前积反射(图 4-b)和中频率、中振幅、低连续的 S 型前积反射(图 4-c)。

2.3 湖相

埕北凹陷目标层位的沉积环境为断陷型湖泊,该类型湖泊分布于断陷盆地的各个凹陷中,其构造活动以断陷为主,横断面呈两侧陡的地堑式或者侧陡一侧缓的箕状。根据沉积物在湖泊内的位置和湖水深度,以正常浪基面为界将湖相沉积划分为半深



a—沙纹层理粉砂岩, C5 井, 深度 2278.00 m; b—碎屑支撑砾岩, C8 井, 深度 2957.00 m; c—基质支撑砾岩, C8 井, 深度 3096.00 m; d—块状砂岩, C8 井, 深度 3085.50 m; e—平行层理砂岩, C8 井, 深度 2980.00 m; f—深灰色泥岩, C8 井, 深度 2544.50 m; g—碎屑支撑砾岩, 底部具冲刷面; h—叠瓦状砾岩, C8 井, 深度 3035.00 m; i—紫红色泥岩, C8 井, 深度 3030.00 m。a 岩心的黄色箭头方向指示地层由老到新; b—i 为井壁取心

图 2 渤海湾盆地埕北凹陷古近系主要岩石类型

Fig. 2 Main rock types of the Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

—深湖和滨浅湖 2 个亚相。

半深—深湖亚相以半深—深湖泥为主, 偶发湖底扇砂体沉积。岩相组合 C 显示半深—深湖亚相主要以厚层灰色泥岩为主, 测井曲线特征主要表现为高幅齿型, 指示半深—深湖泥沉积, 地震反射特征表现为高振、中频率、高连续性的平行反射(图 4-g)。其间发育薄层砂岩, 夹在厚层泥岩之间。钻井主要分布在断裂附近与缓坡带靠近盆地边缘的位置, 很少能发现具有鲍马序列的显示湖底扇沉积相的岩心。但是在 C3 井岩心中见到夹于厚层深湖相泥岩中的薄层砂岩(图 3-c) 应该是湖底扇沉积。在地震剖面上, 湖底扇沉积表现为在大段高振

幅、高频率、中好连续性的平行反射波之间的低振幅、低频率、低连续性的蠕虫状前积反射或透镜状反射特征(图 4-e)。

滨浅湖亚相以滨浅湖泥和滩坝砂质沉积为主。岩相组合 C 显示滨浅湖亚相主要以以灰色—暗灰色泥岩夹细砂岩、粉砂岩为主, 测井曲线特征表现为箱型、钟型与齿型组合, 指示滩坝沉积与滨浅湖泥沉积(图 3-c; 图 5)。滨浅湖泥地震反射特征表现为中频率, 中振幅, 高连续性的平行—低平形反射(图 4-f), 其中滩坝地震反射特征主要表现为孤立丘状或透镜状地震反射(图 4-d)。

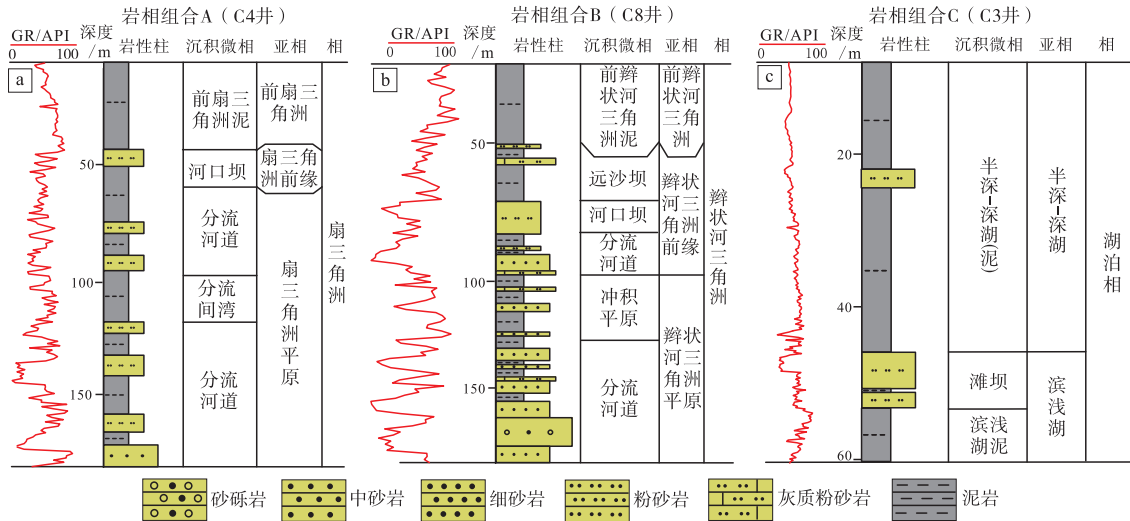


图 3 渤海湾盆地埕北凹陷古近系典型岩相组合与沉积特征

Fig. 3 Typical lithofacies associations and sedimentary characteristics of the Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

表 1 渤海湾盆地埕北凹陷古近系岩相特征

Table 1 Lithofacies characteristics of the Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

岩石类型	岩相类型	描述	常见沉积相
砾岩	基质支撑砾岩	砾石分选性、磨圆度较差, 基质支撑(图 2-c)	湖底扇、扇三角洲平原、辫状河三角洲平原
	具有叠瓦状构造的碎屑支撑砾岩	砾石明显叠瓦状排列, 可见冲刷面(图 2-h)	辫状河三角洲平原
砂岩	交错层理砂岩	以细砂岩为主, 具交错层理(图 2-e)	辫状河三角洲前缘
	块状砂岩	无层理(图 2-d)	辫状河三角洲平原、湖底扇
粉砂岩	沙纹层理粉砂岩	深灰色, 中-厚层粉砂岩(图 2-a)	辫状河三角洲前缘、扇三角洲前缘、滩坝
泥岩	杂色泥岩	以紫红色泥岩为主, 主要发育在缓坡带(图 2-i)	辫状河三角洲
	深灰色泥岩	深灰色、块状(图 2-f)	前辫状河三角洲、前扇三角洲、滨浅湖
灰岩	石灰岩	根据钻井岩屑判断	滨浅湖泥
有机岩	油页岩	灰黑色、有页理, 据钻井岩屑判断	滨浅湖泥

3 沉积环境演化规律

根据埕北凹陷不同构造—地貌单元演化特征, 以单井—连井分析为基础, 结合地震相类型与分布范围分析, 在古地理背景下得出了埕北凹陷古近系沙三段、沙一二段、东三段和东二段的沉积相和砂体类型平面图, 确定埕北凹陷古近系各时期沉积演化规律。

3.1 沙三段沉积期

沙三段形成于断陷高峰期, 统一的盆地还没有完全形成, 陡坡带埕北低凸起断裂开始发育, 构造活动强烈(张强等, 2017; 张晓庆等, 2019)。位于陡坡带 C4 井揭示该组岩性多为大套砂砾岩, 自然伽马曲线表现为齿化箱型, 为扇三角洲相(图 5)。由

于陡坡带高差较大, 裂隙与源区的距离较近, 沉积相类型以扇三角洲为主, 在缓坡带由于高差较小, 地势较平缓, 沉积相以辫状河三角洲为主, 且从已钻井沉积相连井剖面可以看出, 垂向分布上沙三段扇三角洲厚度远大于辫状河三角洲(图 6)。

根据典型地震剖面分析, 沙三段共识别出 3 种地震相类型, 分别为: (1) 埕北凹陷缓坡带发育的具中振幅、中频率、低连续前积反射特征的辫状河三角洲沉积; (2) 洼陷带发育的具中振幅、中频率、高连续中强反射特征的湖相沉积; (3) 陡坡带发育的中振幅、中频率、低连续楔状前积反射特征的扇三角洲沉积(图 7)。

在断陷湖盆中, 湖平面变化代表了沉积过程中可容纳空间的变化, 断层活动的强弱在一定程度上决定了可容纳空间的大小, 进而影响扇三角洲的分

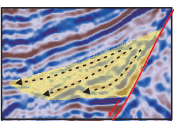
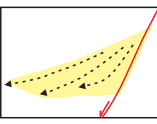
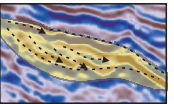
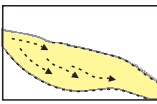
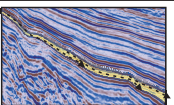
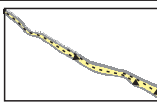
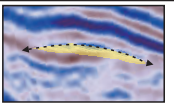
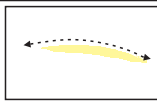
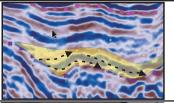
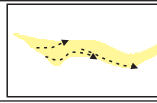
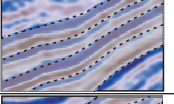
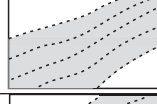
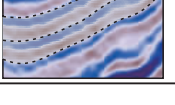
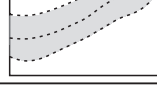
编号	地震相	地震剖面	地震反射样式	地震反射特征	亚相/微相	相	古地貌背景
a	楔状地震相			中频率、中振幅、低连续楔状前积、退积反射	\	扇三角洲	陡坡为主、近物源区
b	前积地震相			中振幅、中频率、低连续前积反射特征	辫状河三角洲平原	辫状河三角洲	缓坡带、缓坡带折带、远物源区
c				中振幅、中频率、中连续S型前积反射特征	辫状河三角洲前缘		
d	透镜状地震相			孤立丘状或透镜状反射	滩坝	湖相	湖盆中央构造局部隆起区
e				低振幅、低频率、低连续蠕虫状前积反射或透镜状反射特征	湖底扇		斜坡坡度变化区
f	席状地震相			高振幅、中频率、高连续强反射	深湖-半深	湖相	洼陷区
g				中振幅、中频率、高连续中强反射	滨浅湖		

图 4 渤海湾盆地埕北凹陷古近系沉积体系地震相特征

Fig. 4 Seismic facies characteristics of sedimentary system of the Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

布。此时沙三段物源来自于凹陷北东部埕北低凸起与西南部埕子口凸起，沉积相类型以辫状河三角洲和扇三角洲为主(图 8-a)。

3.2 沙一二段沉积期

沙一二段形成于断陷萎缩期，边界断层活动减弱，古气候由沙一二段早期干旱环境转换为晚期相对潮湿环境，该阶段湖盆扩张，水体相对加深(张强等, 2017; 张晓庆等, 2019)。垂向上 C4 井显示底部发育砂砾岩、中间砂泥岩互层，粒度呈现向上变细的趋势，测井相特征主要表现为钟型和漏斗型，为扇三角洲平原和前缘沉积(图 5)。由于埕北凹陷断裂活动微弱，受地形坡度及物源供给能力的影响，区域残余厚度变化不大，厚度为 50 ~ 100 m。沙一二段缓坡带以辫状三角洲为主，在辫状河三角洲前缘部位，局部构造隆起处发育滩坝砂体，而陡坡带发育扇三角洲。沙一二段顶部发育泥岩、灰岩和油页岩的滨浅湖沉积，从已钻井沉积相连井剖面可以看出，沙一二段沉积相分布特征基本继承沙三段沉积相分布特征，陡坡带以扇三角洲为

主，缓坡带以辫状河三角洲为主(图 6; 图 8-b)。

沙一二段共识别出 5 种地震相类型，分别为(1)缓坡带发育的中频率、低振幅、低一中连续进积反射特征的辫状河三角洲沉积；(2)缓坡带发育的中振幅、中频率、中连续 S 型前积反射特征的辫状河三角洲沉积；(3)洼陷带发育的高振幅、中频率、高连续强反射特征的湖相沉积；(4)洼陷带发育的中振幅、中频率、高连续中强反射特征的湖相沉积；(5)陡坡带发育的中振幅、中频率、低连续楔状前积、退积反射特征的扇三角洲沉积(图 7)。

3.3 东三段沉积期

东三段亦形成于断陷萎缩期，构造活动较沙一二段减弱，湖盆范围扩张，盆地水体逐渐变浅，呈现“广盆、浅水”的沉积特征(张强等, 2017)。是在沙河街组沉积背景上发展起来的一套水退式碎屑沉积。东三段随着不断被充填，缓坡带地形坡度持续变缓，同时物源区变小，辫状河三角洲向超覆线后退；而陡坡带扇三角洲受物源通道类型、物源区面积变小的影响，其发育的扇三角洲面积相对减

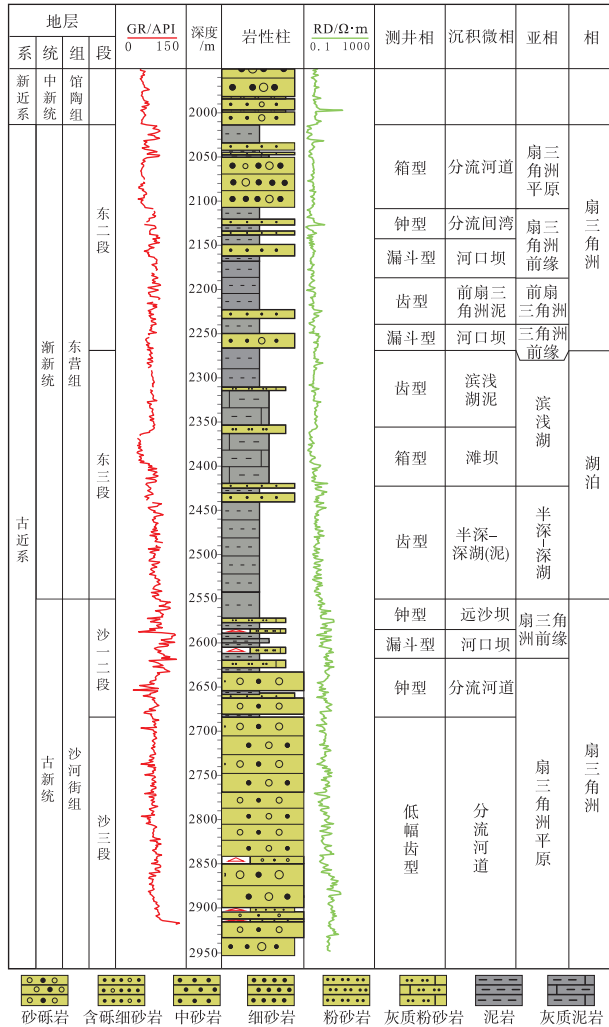


图 5 渤海湾盆地埕北凹陷 C4 井古近系沉积体系柱状图
Fig. 5 Columnar section showing sedimentary system of the Paleogene of Well C4 in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

小(图 8-c)。C4 井东三段主要发育大套灰色泥岩、其间发育黄色细砂岩，测井相特征主要表现为高幅齿型与箱型组合，以湖相沉积为主(图 5)。连井沉积相图显示东三段沉积湖盆扩张，扇三角洲沉积范围减小(图 6)。

东三段共识别出 4 种地震相类型，分别为 (1) 埕北凹陷缓坡带发育的具有中振幅、中频率、中连续 S 型前积反射特征的辫状河三角洲沉积；(2) 洼陷带发育的中振幅、中频率、高连续中强反射特征的湖相沉积；(3) 辫状河三角洲前缘发育的低振幅、低频率、低连续型透镜状反射特征的湖底扇沉积；(4) 陡坡带发育的中振幅、中频率、低连续楔状退积反射特征的扇三角洲沉积(图 7)。

3.4 东二段沉积期

东二段也形成于断陷萎缩期，埕北低凸起构造活动减弱，沉积物开始继续区域盆地中央进行充填(图 7；图 8-d)。C4 井东二段主要发育黄色砂砾岩、砂岩和灰色泥岩，测井相特征主要表现为钟型与箱型组合，以扇三角洲为主(图 5)。连井沉积体系图显示东二段沉积湖盆扩张、扇三角洲持续萎缩(图 6)。

东三段共识别出 5 种地震相类型，分别为：(1) 缓坡带发育的中频率、低振幅、低一中连续进积反射特征的辫状河三角洲沉积；(2) 缓坡带发育的中振幅、中频率、中连续 S 型前积反射特征的辫状河三角洲沉积，且向洼陷内推进较远；(3) 洼陷带发育的高振幅、中频率、高连续强反射特征的湖相沉积；(4) 洼陷带发育的中振幅，中频率，高连续中强反射特征的湖相沉积；(5) 陡坡带发育的中振幅、中频率、低连续楔状退积反射特征的扇三角洲沉积(图 7)。

4 埕北凹陷古近系砂体成因类型

埕北凹陷古近系砂体形成机制主要受沉积环境、源区物源供给、微古地貌形态和湖平面变化等因素耦合影响。根据埕北凹陷测井地质和三维地震观察，将埕北凹陷古近系砂体成因类型分为以下几类(表 2)：

4.1 扇三角洲砂体

埕北凹陷扇三角洲砂体的形成主要受到构造、物源供给和湖平面变化的影响。埕北凹陷扇三角洲主要分布在受东北部边界断裂控制的陡坡带，主体砂体分布于陡坡带的断裂附近(图 8)，主要受构造作用影响。通过对陡坡带沉积相连井图和典型地震剖面分析(图 6；图 7)，扇三角洲砂体在不同时期发育的厚度变化较大。沙三段处于断陷高峰期，盆地内构造活动最强，伴随着断层活动，湖盆内部基底下降，且物源从断裂处垮塌下来，此时期的沉积速率和可容空间增长速率都较大，致使沙三段的扇三角洲砂体发育规模最大。沙一二段一东二段进入断陷萎缩期，断陷盆地内构造活动减弱，基底沉降速率减缓，沉积物供给速率大幅降低，可容空间增长速率大于沉积物供给速率，致使扇三角洲砂体沉积向湖盆边缘收缩，分布范围逐渐缩小。

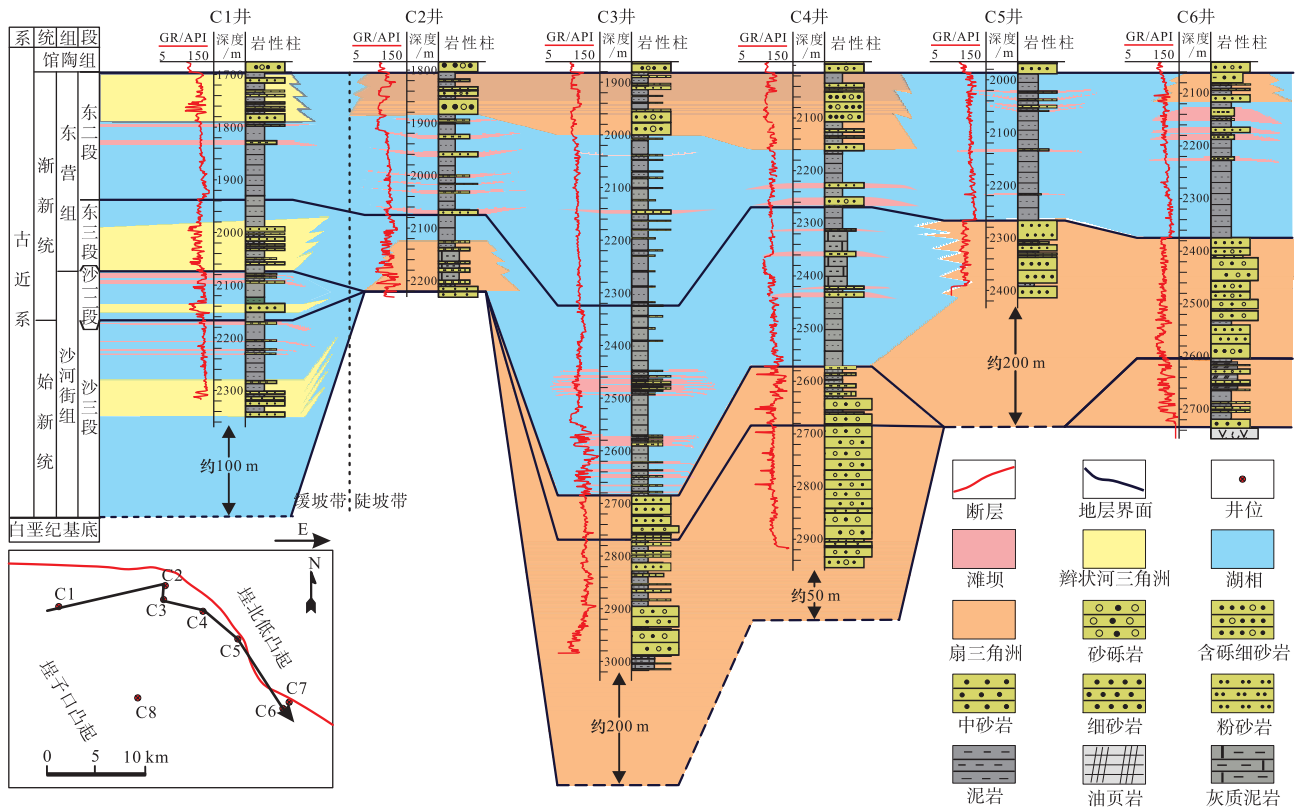


图 6 渤海湾盆地埕北凹陷古近系连井沉积体系对比

Fig. 6 Cross section showing well-to-well correlation of sedimentary system of the Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

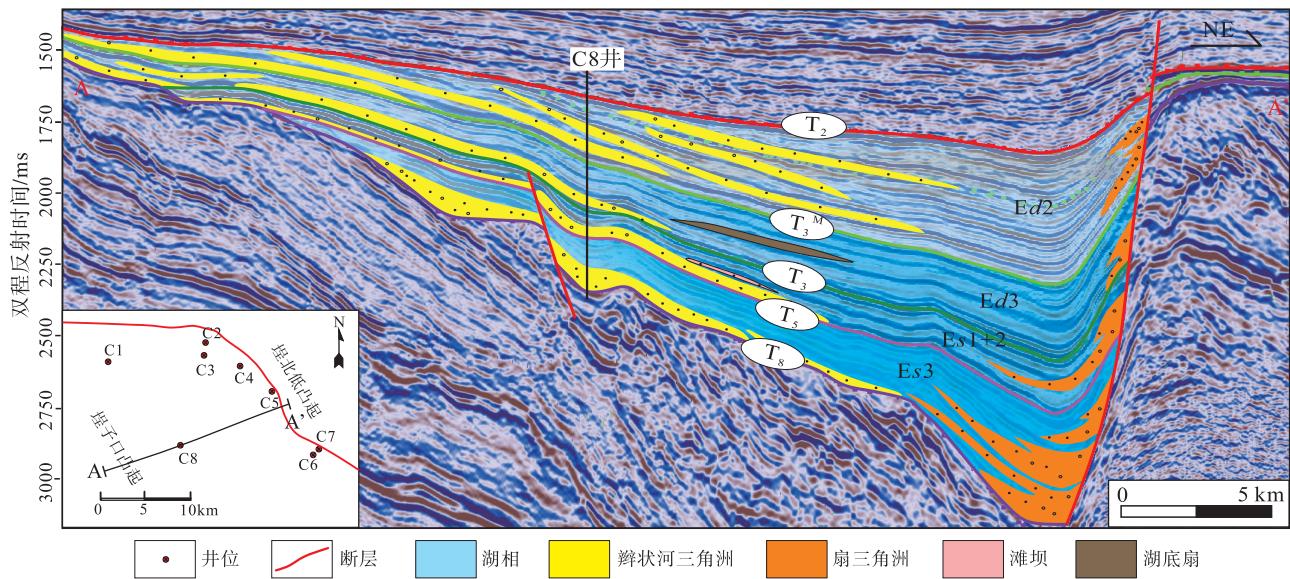


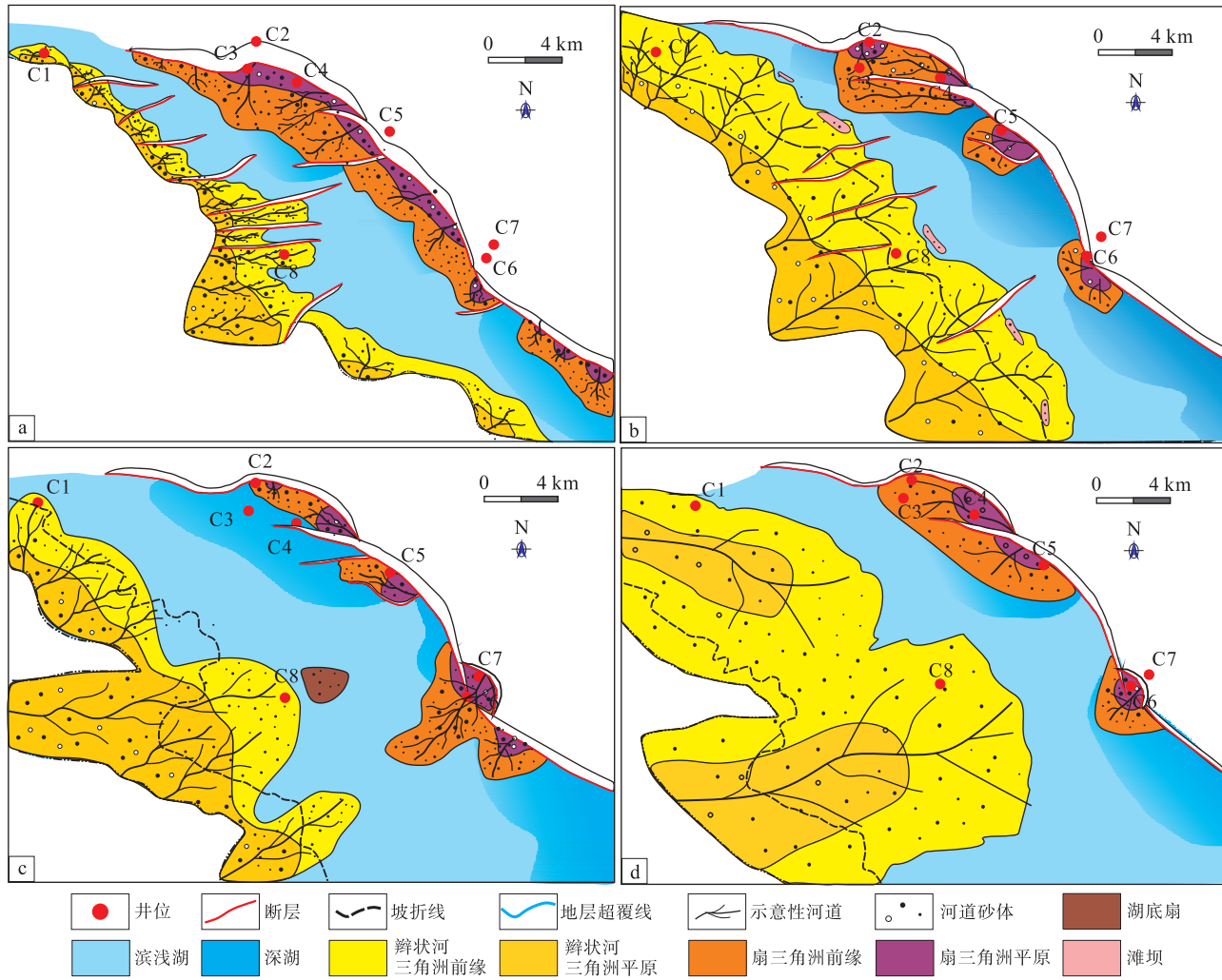
图 7 渤海湾盆地埕北凹陷过 C8 井北东向古近系沉积体系地震剖面

Fig. 7 Cross sections showing seismic sequence stratigraphic framework and sedimentary facies of the Paleogene in SW-NE direction passing through Well C8 in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

4.2 辫状河三角洲砂体

辫状河三角洲砂体因其分选较好、粒度较粗及泥质杂基含量较低，可能具有良好的储集层质量

(McPherson *et al.*, 1987)。区内辫状河三角洲的发育主要受到构造升降和湖平面波动的影响。缓坡带辫状河三角洲展布范围主要受由坡折带及其所形成



a—沙三段；b—沙一二段；c—东三段；d—东二段

图 8 渤海湾盆地埕北凹陷古近系沉积相及砂体类型平面图

Fig. 8 Maps showing sedimentary facies distribution and sand body genetic types of different members of the Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

表 2 渤海湾盆地埕北凹陷古近系陆相断陷湖盆沉积相及砂体类型

Table 2 Sedimentary facies and sand body types of the Paleogene continental faulted lake basin in Chengbei sag, Bohai Bay Basin

砂体成因类型	扇三角洲砂体			辫状河三角洲砂体			湖底扇砂体	滩坝砂体
沉积环境	扇三角洲平原	扇三角洲前缘	前扇三角洲	辫状河三角洲平原	辫状河三角洲前缘	前辫状河三角洲	湖底扇	滩坝
岩相类型	砾岩、砂砾岩、泥质岩	泥岩、粉—细砂岩	暗色泥质沉积物	砂岩、含砾砂岩	中砂、细砂	暗色泥质沉积物	厚层砂砾岩、砂岩、泥岩	中—细砂岩
测井曲线	齿化箱型或钟型	微齿箱型、钟型	指状	齿型、指状	微齿漏斗型、钟型	指状	—	指状
地震外部反射特征	楔状前积退积反射			S形前积、上超充填、叠瓦状前积反射			蠕虫状前积反射	孤立丘状或透镜状反射
地震内部反射特征	中振幅、中频率、低连续			中振幅、中频率、中—低连续			低振幅、低频率、低连续	低振幅、低频率、低连续
构造位置	陡坡带			缓坡带坡折附近			洼陷带	平缓区的构造高部位

的古地形所控制。对沉积速率来说,在缓坡带裂陷作用较陡坡带的影响较小,沉积速率较稳定。沙三段一东三段,处于裂陷发育阶段的裂陷萎缩期,由于基地沉降,湖平面上升、可容空间增大速率大于沉积速率,导致辫状河三角洲砂体整体呈现退积的沉积趋势(图 8-a,图 8-b,图 8-c)。到东二段,为裂陷萎缩期的末期,埕北凹陷内部构造活动强度最弱,可容空间增大速率减慢,此时沉积速率大于可容空间增大速率,致使砂体不断向洼陷内部进积(图 8-d)。因此东二段时期辫状河三角洲砂体的分布范围最广(图 7;图 8-d)。

4.3 湖底扇砂体

区内湖底扇砂体主要分布在裂陷萎缩期。岩性特征主要表现为厚层泥岩段中间的砂岩,典型的湖底扇可以观察到鲍马序列,但由于取心有限而未观察到。测井相特征主要表现为在大段低幅齿型中间夹小段箱型(图 3-c)。在震害上,在东三段缓坡带辫状河三角洲前端识别到蠕虫状前积反射和透镜状前积反射地震相,并且其发育在缓坡带辫状河三角洲向湖泊方向延伸的前端,可能是由于水动力条件的波动导致向前进积的辫状河三角洲前缘向中央洼陷垮塌形成。

4.4 滩坝砂体

研究区 C3 井滨浅湖亚相中发育滩坝微相,主要表现为厚层泥段之间的薄层砂体,测井相特征主要为箱型和漏斗型(图 3-c)。埕北凹陷滩坝砂体受波浪作用的影响,但由于湖盆边缘为断层所限,湖盆范围较小,湖浪与湖流作用较弱,不足以对来自湖盆两侧的扇三角洲和辫状河三角洲进行充分改造,因此呈孤立发育的特点(图 6;图 8-b)。主要分布在东三段和沙一二段湖泊的边缘或中央部隆起周围和湖湾等缓坡带滨浅湖地区,发育厚层泥岩夹细砂岩与粉砂岩,测井曲线特征表现为箱型和漏斗型。

5 结论

1) 埕北凹陷古近系主要发育砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、灰岩和油页岩等 6 类岩石类型,识别出 9 种岩相类型及 5 种岩相组合,发育辫状河三角洲、扇三角洲和湖泊共 3 种沉积相。

2) 埕北凹陷古近系沉积特征表现为:在纵向

上,沙三段以辫状河三角洲、扇三角洲和湖相为主,沙一二段以辫状河三角洲、扇三角洲和湖相为主,东三段以辫状河三角洲、扇三角洲和湖相为主,东二段以辫状河三角洲和湖相为主,扇三角洲发育规模较小。横向上,缓坡带发育辫状河三角洲,洼陷带发育湖底扇—深湖序列,陡坡带发育扇三角洲序列。

3) 埕北凹陷古近系砂体类型主要为扇三角洲砂体、辫状河三角洲砂体、湖底扇砂体和滩坝砂体成因类型,砂体成因主要受构造、物源供给、湖平面波动和水动力条件变化等因素的影响,有利砂体分布在断裂转换带、坡折和沟谷发育处,且随时间的推移,由洼陷边缘向洼陷中心转移。

参考文献 (References)

- 陈丽祥,李慧勇,代黎明,刘建国. 2016. 埕北低凸起围区古沟谷与古坡折带特征及其对沉积体系的控制作用. 长江大学学报(自然科学版), 13(5): 15-19,3-4. [Chen L X, Li H Y, Dai L M, Liu J G. 2016. Characteristics of ancient gully and ancient slope break zones and their controlling effects on sedimentary system in Chengbei low uplift area. Journal of Yangtze University (Science and Technology Edition), 13(5): 15-19,3-4]
- 付兆辉,张在振,李德纯,施明华,程明. 2009. 渤海湾盆地埕北凹陷古近系沉积体系分析与油气成藏. 沉积学报, 27(1): 26-31. [Fu Z H, Zhang Z Z, Li D C, Shi M H, Cheng M. 2009. Analysis of Paleogene sedimentary system and hydrocarbon accumulation in Chengbei Sag, Bohai Bay Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 27(1): 26-31]
- 付兆辉,秦伟军,李敏. 2015. 渤海湾盆地埕北凹陷古近系沉积特征与油气圈闭. 海洋地质前沿, 31(1): 9-15. [Fu Z H, Qin W J, Li M. 2015. Paleogene sedimentary characteristics and oil and gas traps in Chengbei sag, Bohai Bay Basin. Marine Geology Frontiers, 31(1): 9-15]
- 郭涛,李慧勇,石文龙,王思权,涂翔. 2015. 渤海海域埕北低凸起及周围地区构造沉积特征与有利勘探目标. 油气地质与采收率, 22(2): 28-32,38. [Guo T, Li H Y, Shi W L, Wang S Q, Tu X. 2015. Tectonic-sedimentary characteristics and favorable exploration targets of Chengbei low uplift and its surrounding areas in Bohai sea. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 22(2): 28-32,38]
- 胡贺伟,李慧勇,于海波,肖述光,徐伟. 2020. 渤海湾盆地埕北低凸起及围区古近系“源-汇”系统控砂原理定量分析. 古地理学报, 22(2): 266-277. [Hu H W, Li H Y, Yu H B, Xiao S G, Xu W. 2020. Quantitative analysis of sand control principle of Paleogene “source and sink” system in Chengbei low bulge and surrounding area of Bohai Bay Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(2): 266-277]
- 胡贺伟,许鹏,于海波,连豪杰,姬新元,丁熠然,邵龙义. 2024. 沙南

- 凹陷古近系中深层砂岩储层特征与岩性油气藏勘探. 地质论评, 70(3): 1145-1158. [Hu H W, Xu P, Yu H B, Lian H J, Ji X Y, Ding Y R, Shao L Y. 2024. Characteristics of middle-deep sandstone reservoirs and exploration of lithologic traps in the Paleogene of Shanan sag. *Geological Review*, 70(3): 1145-1158]
- 李昌谷, 周永红. 2000. 埕北凹陷南斜坡带东段含油体系研究. 天然气地球科学, 11(4-5): 26-29, 4. [Li C G, Zhou Y H. 2000. Study on oil-bearing system in the eastern section of the southern slope belt of Chengbei sag. *Natural Gas Geoscience*, 11(4-5): 26-29, 4]
- 刘强虎, 朱红涛, 杜晓峰, 薛永安, 杨香华, 杨海风, 石文龙, 周子强. 2020. 渤海海域砂砾岩体沉积响应进展及热点. 地球科学, 45(5): 1676-1705. [Liu Q H, Zhu H T, Du X F, Xue Y A, Yang X H, Yang H F, Shi W L, Zhou Z Q. 2020. Sedimentary response progress and hot spots of sand and gravel mass in Bohai Sea. *Journal of Earth Sciences*, 45(5): 1676-1705]
- 刘一鸣, 吴智平, 刘丽芳, 张晓庆, 李伟, 陈少平, 郝鑫. 2019. 埕北凹陷及邻区新生代断裂体系与构造格局. 大地构造与成矿学, 43(6): 1133-1143. [Liu Y M, Wu Z P, Liu L F, Zhang X Q, Li W, Chen S P, Hao X. 2019. Cenozoic fault system and structural pattern in Chengbei sag and adjacent areas. *Geotectonics and Metallogeny*, 43(6): 1133-1143]
- 田在艺, 韩屏. 1991. 渤海盆地构造变形分析及其拗陷机制. 河北地质学院学报, 14(1): 1-18, 2. [Tian Z Y, Han P. 1991. Structural deformation analysis and depression mechanism of Bohai Basin. *Journal of Hebei Institute of Geology*, 14(1): 1-18, 2]
- 王飞琼. 2001. 埕北油田开发特点与认识. 中国海上油气, 15(6): 31-36. [Wang F Q. 2001. Development characteristics and understanding of Chengbei Oilfield. *China Offshore Oil and Gas*, 15(6): 31-36]
- 王建强, 刘池洋, 郭真, 张东东. 2015. 鄂尔多斯盆地中南部晚三叠世延长期区域构造环境转变的沉积响应. 地学前缘, 22(3): 194-204. [Wang J Q, Liu C Y, Guo Z, Zhang D D. 2015. Sedimentary response to the transformation of regional tectonic environment during the Late Triassic Yanchang period in the central and southern Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 194-204]
- 吴立群, 焦养泉, 杨琴, 张承泽, 杨生科. 2010. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组物源体系分析. 沉积学报, 28(3): 434-440. [Wu L Q, Jiao Y Q, Yang Q, Zhang C Z, Yang S K. 2010. Provenance system analysis of Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(3): 434-440]
- 徐长贵, 杜晓峰, 庞小军, 王启明, 潘文静. 2022. 渤海南部明化镇组下段源-汇体系及其对大面积岩性油气藏的控制作用. 地质力学学报, 28(5): 728-742. [Xu C G, Du X F, Pang X J, Wang Q M, Pan W J. 2022. Source-sink system of lower member of Minghuazhen Formation in southern Bohai Sea and its controlling effect on large lithologic reservoirs. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 728-742]
- 杨海风, 钱赓, 徐春强, 高雁飞, 康荣. 2023. 渤海湾盆地黄河口凹陷中央构造脊沙河街组砂体展布规律与储层发育特征. 地球科学, 48(8): 3068-3080. [Yang H F, Qian G, Xu C Q, Gao Y F, Kang R. 2023. Sand-body distribution and reservoir development characteristics of Shahejie Formation, central structural ridge of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Earth Sciences*, 48(8): 3068-3080]
- 张强, 刘丽芳, 张晓庆, 刘一鸣, 陈少平. 2017. 东北石油大学学报, 41(4): 88-98, 9-10. [Zhang Q, Liu L F, Zhang X Q, Liu Y M, Chen S P. 2017. Control of Paleogene structure on sedimentation in Chengbei sag. *Journal of Northeast Petroleum University*, 41(4): 88-98, 9-10]
- 张晓庆, 宋明水, 侯中帅, 郝冉冉, 张强, 刘一鸣, 陈少平, 吴智平. 2019. 裂陷盆地构造-沉积耦合关系及其控藏作用: 以渤海湾盆地埕北凹陷古近系为例. 中国矿业大学学报, 48(6): 1317-1329. [Zhang X Q, Song M S, Hou Z S, Hao R R, Zhang Q, Liu Y M, Chen S P, Wu Z P. 2019. Tectonic-sedimentary coupling in rifted basins and its hydrocarbon accumulation control: a case study of Paleogene in Chengbei sag, Bohai Bay Basin. *Journal of China University of Mining and Technology*, 48(6): 1317-1329]
- 张自力, 朱筱敏, 廖凤英, 李琦, 张锐锋, 曹兰柱, 施瑞生. 2021. 断陷盆地缓坡带河流沉积砂体定量表征及控制因素分析: 以霸县凹陷文安斜坡东营组三段为例. 地学前缘, 28(1): 141-154. [Zhang Z L, Zhu X M, Liao F Y, Li Q, Zhang R F, Cao L Z, Shi R S. 2021. Quantitative characterization and controlling factors analysis of fluvial sedimentary sand bodies in gentle slope belt of faulted basin: a case study of the third member of Dongying Formation, Wen'an slope, Baxian sag. *Earth Science Frontiers*, 28(1): 141-154]
- 朱筱敏, 李洋, 董艳蕾, 赵东娜, 王欣, 朱茂. 2013. 地震沉积学研究方法和歧口凹陷沙河街组沙一段实例分析. 中国地质, 40(1): 152-162. [Zhu X M, Li Y, Dong Y L, Zhao D N, Wang X, Zhu M. 2013. Seismic sedimentology research methods and case study of the first member of Shahejie Formation in Qikou sag. *Geology of China*, 40(1): 152-162]
- Hsiao L Y, Graham S A, Tilander N. 2004. Seismic reflection imaging of a major strike-slip fault zone in a rift system: Paleogene structure and evolution of the Tan-Lu fault system, Liaodong Bay, Bohai, offshore China. *AAPG Bulletin*, 88(1): 71-97.
- McPherson J G, Shanmugam G, Moiola R J. 1987. Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas. *Geological Society of America Bulletin*, 99(3): 331-340.
- Yu F S, Koyi H. 2016. Cenozoic tectonic model of the Bohai Bay Basin in China. *Geological Magazine*, 153(5-6): 866-886.
- Zhang M, Waldron J W F, Wu Z, Zhang X. 2023. Growth and transtensional reactivation of a basin-bounding fault: Chengbei sag, Bohai Bay Basin, East China. *Tectonophysics*, 862: 229937.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)