

渤海湾盆地古近纪古地理特征与油气*

纪友亮^{1,2} 任红燕^{1,2} 张世奇³ 马铮涛^{1,2} 牛嘉玉⁴
郭姗姗^{1,2} 高晨曦^{1,2} 刘笑语^{1,2}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249

3 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266001

4 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要 渤海湾盆地是一个典型的内陆裂谷盆地, 内部发育 6 个坳陷、4 个隆起、54 个凹陷和 44 个凸起。沉积盆地的含油气性与其古地理分布有密切的关系。利用渤海湾盆地各坳陷大量的录井、岩心、古生物、测井、地震资料及前人的大量文献和数据, 对渤海湾盆地各坳陷古近系孔店组、沙河街组沙四段、沙三段、沙二段、沙一段、东营组进行了全区对比和统层。在此基础上, 对冀中坳陷、济阳坳陷、临清坳陷内东濮凹陷各组段的沉积相进行了分析, 编制了这些区域的古地理图; 充分利用前人文献和科研报告中所编制的辽河坳陷、黄骅坳陷、渤海海域古近系各组段的古地理图, 编制了渤海湾盆地孔店组、沙河街组沙四段、沙三段、沙二段、沙一段、东营组的古地理图。渤海湾盆地发育数十个含油气凹陷, 每个凹陷中心的深湖亚相泥岩构成烃源岩, 而在凹陷的边缘发育近岸水下扇、扇三角洲、三角洲、滩坝等砂体, 构成重要的储集层, 在有利的成藏条件下, 凹陷中央的烃源岩向周围与之互层的储集层供烃形成油藏, 在凹陷中央的烃源岩中, 还发育了页岩油、页岩气、致密油气等非常规油气。因此, 每个凹陷就是油气生成、运聚的基本单元, 是一个独立的油气运移—聚集系统。生油凹陷的分布及其古地理特征控制了油气在渤海湾盆地古近系中的平面分布。

关键词 渤海湾盆地 古近系 古地理 含油气特征

第一作者简介 纪友亮, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 中国石油大学(北京)博士研究生导师。研究方向为沉积学、储层地质学和层序地层学。E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Paleogene palaeogeography and oil and gas distribution in Bohai Bay Basin

JI Youliang^{1,2} REN Hongyan^{1,2} ZHANG Shiqi³ MA Zhengtao^{1,2} NIU Jiayu⁴
GUO Shanshan^{1,2} GAO Chenxi^{1,2} LIU Xiaoyu^{1,2}

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

2 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266001, China

4 Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

* 国家自然科学基金项目(编号: 42072115)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42072115)]

收稿日期: 2022-02-02 改回日期: 2022-03-06

Abstract The Bohai Bay Basin is a typical inner-continent rift basin characterized by six depressions, four uplifts, 54 sub-depressions and 44 sub-uplifts. The hydrocarbon distributions are closely related to their palaeogeography. In this paper, integration of a large number of well logging, core, paleontological and seismic data in various depressions in Bohai Bay Basin, as well as a large number of published data, were used to correlate and build the Paleogene (including the Kongdian, Shahejie and Dongying Formations) stratigraphic framework in each depression in Bohai Bay Basin. On this basis, the sedimentary facies of each formation and member of the Paleogene in the Jizhong Depression, Jiyang Depression, and Dongpu sub-depression of Linqing Depression were analyzed, and the sedimentary system map of these areas was compiled. Combined with previously published palaeogeographic reconstruction of the Liaohai Depression, Huanghua Depression and the Bohai Sea area, the lithofacies palaeogeographic map of the Kongdian Formation, the Members 4, 3, 2, 1 of Shahejie Formation, and Dongying Formation of the Paleogene in the Bohai Bay Basin were compiled. There are dozens of oil and gas-bearing sags in the Bohai Bay Basin. The deep lacustrine mudstone in the center of each sag constitutes the source rocks, while the nearshore sublacustrine fans, fan deltas, deltas, beach bars and other sand bodies on the sag margin are important reservoirs. Under favorable accumulation conditions, the source rock in the center of the sag supplies hydrocarbons to the surrounding interbedded reservoirs to form oil reservoirs. In the center of the sag, unconventional hydrocarbon resources such as shale oil, shale gas, and tight oil and gas are also developed. Therefore, each depression is the basic unit of oil and gas generation, migration and accumulation, and an independent oil and gas migration-accumulation system. The distribution of oil-generating sags and their palaeogeographic features control the planar distribution of oil and gas in the Paleogene in the Bohai Bay Basin.

Key words Bohai Bay Basin, Paleogene, palaeogeography, oil and gas bearing characteristics

About the first author JI Youliang, born in 1962, is a professor and a doctoral supervisor at China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in scientific research and teaching in petroleum geology, sedimentology and sequence stratigraphy. E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn.

渤海湾盆地是一个典型的内陆裂谷盆地, 内部发育 6 个坳陷, 4 个隆起, 54 个凹陷和 44 个凸起, 160 多个洼陷 (关世聪等, 1984; 翟光明等, 1990–1993; 胡见义和牛嘉玉, 2001; 任凤楼等 2008)。沉积盆地的含油气性与其古地理分布有密切的关系, 通过研究渤海湾盆地古近系的古地理特征, 不仅可以分析渤海湾盆地古近系的古地理变迁, 还可以从战略上预测油气勘探领域。虽然各石油公司分别在其管辖的区域内, 编制了各个坳陷或凹陷的含油层系的古地理图, 对产油区块和产油层段也编制了很精细的沉积微相图, 但目前缺少整个渤海湾盆地古近系各组段的统一的古地理图。从 20 世纪 70 年代以来, 中国石油辽河油田、大港油田、华北油田, 中国石化胜利油田、中原油田, 中海油天津分公司分别对渤海湾

盆地辽河坳陷、黄骅坳陷、冀中坳陷、东濮凹陷、济阳坳陷、渤中坳陷古近系的沉积相做了大量的工作, 并编制了每一个凹陷不同组段的古地理图 (翟光明等, 1990–1993)。但是在 1995 年前, 没有 1 张渤海湾盆地的统一的古地理图, 在国家“十五”科技攻关期间, 笔者编制了渤海湾盆地孔店组、沙河街组 (沙四段、沙三段、沙二段和沙一段) 和东营组的统一的古地理图。由于种种原因, 这些图件一直没有发表。此后, 渤海湾盆地各油田又经过了 20 多年的油气勘探、开发和科研院校的研究, 资料比以前更加丰富, 也出现了很多新的认识和新的图件, 精度比以前更高。在这 20 年的时间里, 笔者也先后与中原油田、胜利油田、华北油田、冀东油田、中海油天津分公司开展了合作, 编制了冀中坳陷、东濮凹

陷、济阳凹陷、南堡凹陷古近系各组段的新的沉积相图^①。本次编图,笔者利用渤海湾盆地各凹陷大量的录井、岩心、古生物、测井、地震资料以及前人的大量文献和数据,对渤海湾盆地各凹陷古近系孔店组、沙河街组、东营组进行了全区对比和统层。在此基础上,重新编制了新的渤海湾盆地古近系孔店组、沙河街组(沙四段、沙三段、沙二段和沙一段)、东营组的统一的古地理图。利用收集到的各凹陷的含油气分布资料(蒋有录等,2021),分析了古地理与油气分布的关系。

1 基本地质概况

1.1 区域构造背景

渤海湾盆地位于华北东部,为中—新生代裂陷盆地,在地理上包括华北平原、渤海海域和下辽河平原 3 个区域,其西部和北部边界分别为太行山和燕山山脉,南邻鲁西南隆起,东侧为郯庐断裂带所限。总体上呈长轴 1000 km 左右的北北东向近菱形展布,其南、北两端较窄,介于 50~100 km 之间,中部最宽,可达 400 km 以上,总面积约 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。盆地内新生代沉积厚度几百至几千米,最厚可达 12 000 m,油气资源丰富,是中国东部重要的油气产区(刘鸿允,1959;陈世悦等,2016)。

根据渤海湾盆地古近系的纵向和横向分布,通常把渤海湾盆地划分为冀中、黄骅、临清、济阳、渤中和下辽河—辽东湾 6 个凹陷,沧县、邢(台—)衡(水)、埕宁和内黄 4 个隆起,共 10 个次级构造单元。凹陷和隆起由更次一级的凸起和凹陷构成(陈凯等,2012)(图 1)。

新生界是渤海湾盆地沉积地层的主体,其沉积特征反映了裂谷盆地张裂—深陷—消亡的完整过程。渤海湾盆地新生代构造演化经历了古近纪裂陷沉降阶段和新近纪至第四纪后裂陷阶段,基本完成了一个完整的裂陷作用旋回。裂陷期发生了多幕裂陷,多幕沉降充填,可大致划分为孔店组—沙四

段、沙三段、沙二段—东营组沉积时期的 3 个裂陷伸展幕,不同凹陷裂陷伸展幕的划分略有差异,渐新世末,盆地裂陷作用基本结束,进入裂后热沉降阶段直至今今(任风楼等,2008;黄雷等,2009;冯有良,2005;冯有良等,2010;李三忠等,2010)。

1.2 地层发育特征

1.2.1 孔店组

孔店组的命名始于黄骅凹陷孔店凸起处,该处孔店组直接覆盖在上古生界之上。现已查明渤海湾盆地内孔店组的分布并不均匀,其中以黄骅凹陷最为发育,但分布也不连续,多集中于孔店、沧东、南皮 3 个凹陷中。

黄骅凹陷的孔店组从岩性上看,大体可分 3 段,自下而上为:孔三段以红色泥岩为主,夹灰绿色砂岩,尚未发现化石;孔二段一般为灰色砂泥岩,含五图真星介化石,局部地带夹基性喷发岩;孔一段是 1 套红色碎屑岩,其中含有火红美星介化石组合及大量的麻黄粉属化石。临清凹陷孔店组分布于东部地区,西部大部分地区缺失(仅残存于丘县凹陷与南宫凹陷中),沙三段不整合于白垩系之上;辽河凹陷内与孔店组对应的是以玄武岩为主、夹暗紫红色泥岩的房身泡组;渤海海域内孔店组钻遇井少,与陆上凹陷对比后也分为 3 段;济阳和冀中凹陷孔店组分布较为普遍(孙永传等,1989;姚益民,1995;纪友亮和张世奇,1996,1998)。

1.2.2 沙四段

沙四段在渤海湾盆地各凹陷普遍发育,岩性为 1 套深灰色泥岩与砂岩、砾岩、盐岩互层,沉积环境为深湖、半深湖、三角洲、扇三角洲、滩坝和生物碎屑滩。

渤海湾盆地中,沙河街组四段在济阳凹陷、冀中凹陷内发育较全,可分为上、中、下 3 个亚段。辽河凹陷在沙四段中、下亚段沉积时期处于隆起状态,缺失该套地层,仅在西部凹陷和大民屯凹陷中发育沙四段上亚段;根据沉积旋回变化,黄骅凹陷原沙四段相当于其他凹陷沙四中、下亚段,而其沙

^① 李应暹等. 1994. 辽河盆地第三系区域储集层评价研究. 纪友亮等. 1995. 南堡凹陷下第三系层序地层学研究. 钱峥等. 1995. 济阳凹陷深层沉积体系与储集层特征. 赵建章等. 1995. 冀中凹陷饶南次凹深层勘探层序地层解释. 乔军等. 1996. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体分布及成藏模式. 张舒亭等. 1996. 大兴断层下降盘沙三段砾岩油藏描述及勘探建设.

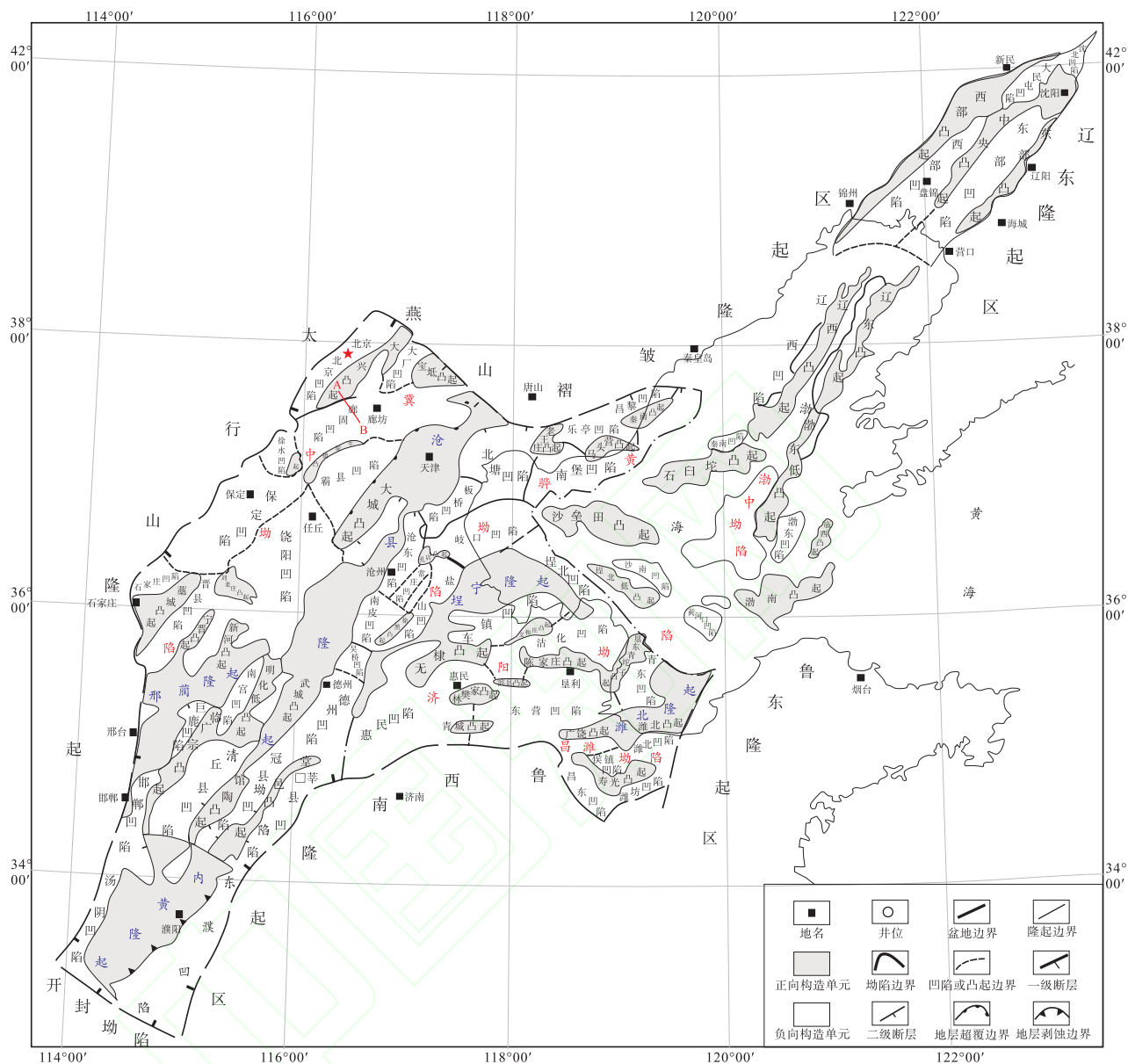


图 1 渤海湾盆地新生代沉积区构造轮廓简图

Fig. 1 Sketch map of tectonic outline of the Cenozoic sedimentary area in Bohai Bay Basin

三⁵岩性段分别与其他坳陷的沙四上亚段相当；渤海海域渤中 10 井钻遇的沙四段 3 个岩性段对应于其他坳陷的沙四段上、中、下 3 个亚段。临清坳陷沙四上亚段对应于其他坳陷的沙四中、上亚段（姚益民，1995；高红灿等，2011）。

1.2.3 沙三段

沙三段在渤海湾盆地各坳陷普遍发育，岩性为 1 套黑色泥岩、页岩与砂岩、砾岩、盐岩互层，沉积环境为深湖、半深湖、三角洲、扇三角洲、湖底扇和盐湖。济阳坳陷、渤海海域（图 2）、辽河坳陷中将沙三段划分为沙三上、沙三中、沙三下 3 个亚

段，而中原油田将临清坳陷及其内部主要含油气凹陷东濮凹陷沙三段划分为沙三¹、沙三²、沙三³、沙三⁴ 4 个亚段。冀中坳陷沙三段被划分为沙三¹、沙三²、沙三³、沙三⁴、沙三⁵、沙三⁶ 6 个亚段，黄骅坳陷的沙三段也被划分为沙三¹、沙三²、沙三³、沙三⁴、沙三⁵ 5 个亚段。通过综合对比分析，本次研究将临清坳陷和黄骅坳陷的沙三¹、冀中坳陷的沙三¹和沙三²划归沙三上段；将临清坳陷沙三²、沙三³，黄骅坳陷沙三²、沙三³和冀中坳陷沙三³、沙三⁴划归沙三中亚段；将临清坳陷、黄骅坳陷沙三⁴和冀中坳陷沙三⁵、沙三⁶划归沙三下亚段（姚

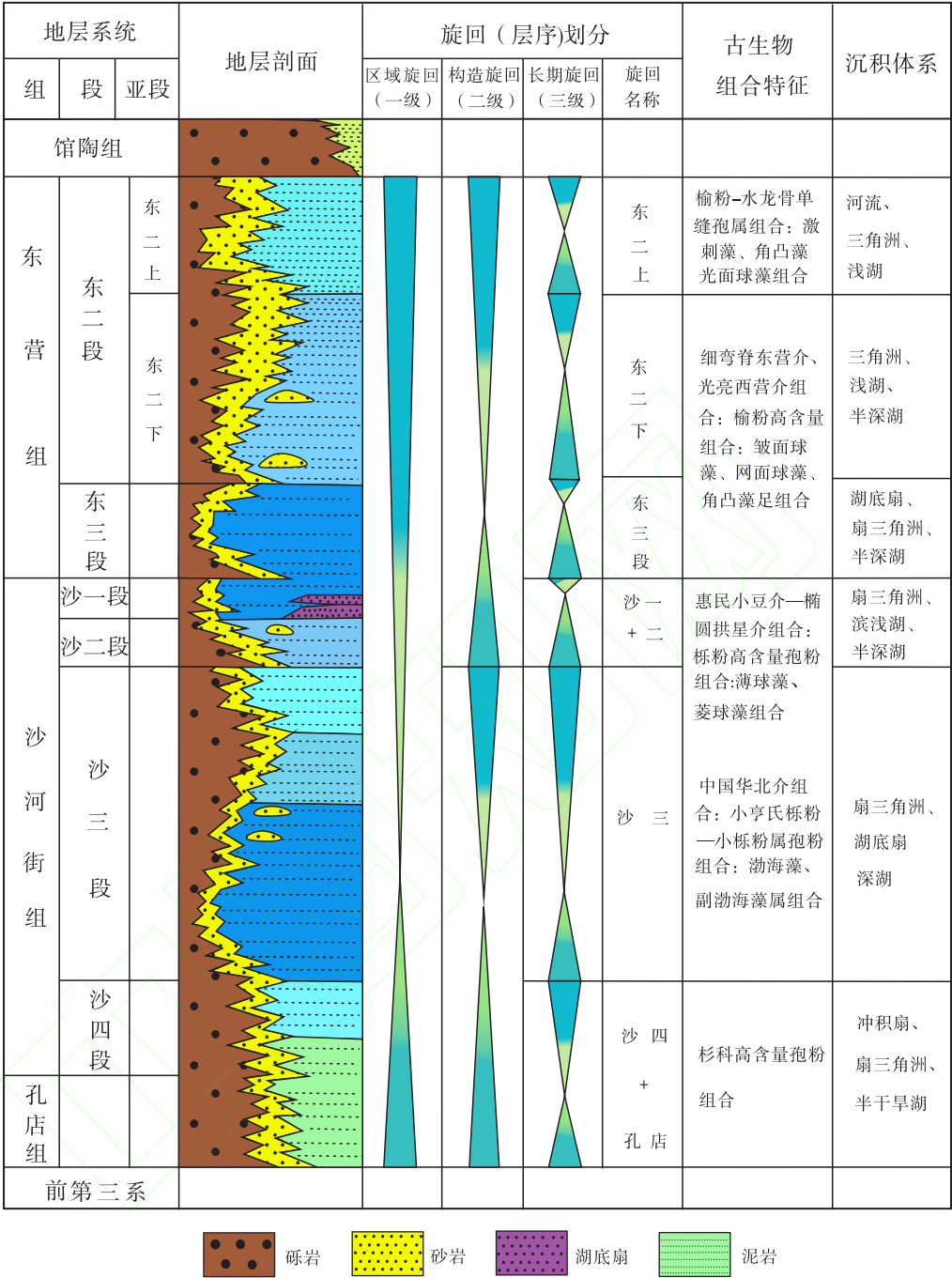


图 2 渤海湾盆地渤中凹陷古近系地层柱状图 (据徐长贵等, 2005, 有修改)
Fig. 2 Histogram of the Paleogene stratigraphy in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin (modified from Xu *et al.*, 2005)

益民, 1995)(表 1)。

1.2.4 沙二段

沙二段在渤海湾盆地各坳陷普遍发育, 地层划分也比较一致, 划分为沙二上亚段和沙二下亚段。岩性主要为一套红色砂泥岩互层, 沉积环境为干旱湖盆 (姚益民, 1995)。

1.2.5 沙一段

沙一段在渤海湾盆地各坳陷普遍发育, 地层划分也比较一致, 划分为沙一上亚段和沙一下亚段。岩性主要为暗色泥岩、砂岩、碳酸盐岩、盐膏岩, 沉积环境以深湖和半深湖、滩坝、生物碎屑滩坝为主, 沉积面积广 (姚益民, 1995)。

表 1 渤海湾盆地各坳陷地层划分对比表

Table 1 Stratigraphic division and correlation between different depressions in Bohai Bay Basin

层序		区域	临清坳陷 (东濮凹陷)			济阳坳陷			冀中坳陷			黄骅坳陷			渤海海域			辽河坳陷			渤海湾盆地								
Ⅱ级	Ⅲ级	地层	组	段	亚段	组	段	亚段	组	段	亚段	组	段	亚段	组	段	亚段	组	段	亚段	组	段	亚段						
Ⅲ	11	古	东营组	一		东营组	一		东营组	一		东营组	一		东营组	一		东营组	一		东营组	一							
	10			二			二			二			二			二			二			二							
	9			三			三			三			三			三			三			三							
	8		沙	上		沙	上		沙	上		沙	上		沙	上		沙	上		沙	上							
				下			下			下			下			下			下			下							
	7			上			上			上			上			上			上			上							
	二				二			二			二			二			二			二									
Ⅱ	6	近河	河	沙		河	沙	上	河	沙	1	河	沙	1	河	沙	上	河	沙	上	河	沙	上						
	1				2			2			3			3			4			4									
	5			三	2		三	中		三	3	街	三	2	街	三	中	街	三	中		三	中						
	3				4			3			4			3			4												
	4		街	段	4	街	段	下	街	段	5	街	段	4	街	段	下	街	段	下		段	下						
	3	系	组	沙		组	沙	上	组	沙	上	孔	沙	5	组	沙	上	组	沙	上		沙	上						
	四				四			四			四			四			四			四									
	下				下			下			下			下			下			下			下		下		下		下
Ⅰ	2			孔		孔	孔	一	孔	孔	一	店	孔	一	店	孔	一	房身泡组	上		孔	孔	一						

1.2.6 东营组

东营组在渤海湾盆地各坳陷普遍发育,地层划分也比较一致,划分为东营组一段、二段和三段。岩性为棕红、灰绿色泥岩与灰白色、紫红色粉砂岩、细砂岩、砾状砂岩互层,为河流、泛滥平原相和滨浅湖沉积。由于受华北运动Ⅱ幕的影响,其顶部遭受剥蚀,有些地区东一段几乎剥蚀殆尽。

2 渤海湾盆地古近系古地理特征

渤海湾盆地由辽河、渤中、冀中、黄骅、济阳、临清等新生代以来形成的次一级坳陷构成,这些坳陷具有相同的地质发展历史和地质构造作用,因此沉积了一套宏观上相似的古近系沉积物,但各坳陷间因为隆起的隔断,故各自又有独立的水动力系统,发育有不同的沉积体系。

全渤海湾盆地编图统层时,由于各坳陷的岩性差异较大,古生物分层精度又不高,故采用层序地层学(旋回法)进行统层。因层序(旋回)的发育受大地构造活动控制,故各坳陷可以统一。各坳

陷的统层情况见表1。考虑到传统习惯,图名仍按岩性组段命名(王鸿祯等,1985;吴崇筠等,1993;牛嘉玉和譙汉生,1999;林玉祥等,2015)。

2.1 孔店组沉积时期古地理特征

孔店组是盆地发展早期沉积的地层。此时盆地地势高差大,断裂控制的各凹陷彼此分隔独立,气候干热,沉积速率大于沉降速率,粗碎屑及红色沉积分布普遍,盐湖沉积发育,湖相沉积范围小。冲积扇—河流冲积平原、冲积扇—盐湖是最重要的2种沉积体系,仅局部地区发育近岸水下扇—湖泊体系。

2.1.1 辽河坳陷古地理展布特征

以厚层的玄武岩为主,夹碎屑岩沉积,在西部凹陷东侧、大民屯凹陷东侧靠台安—大洼断裂一带发育较局限的湖泊相沉积,在西部凹陷和大民屯凹陷西侧发育有冲积扇—河流冲积平原沉积体系(图3)。

2.1.2 渤海海域古地理展布特征

孔店组沉积范围较小,为彼此分隔的单断沉积凹陷。各凹陷以滨浅湖亚相沉积为主。孔店组仅有少数井钻遇,钻井位置在凸起区,揭示主要为冲积

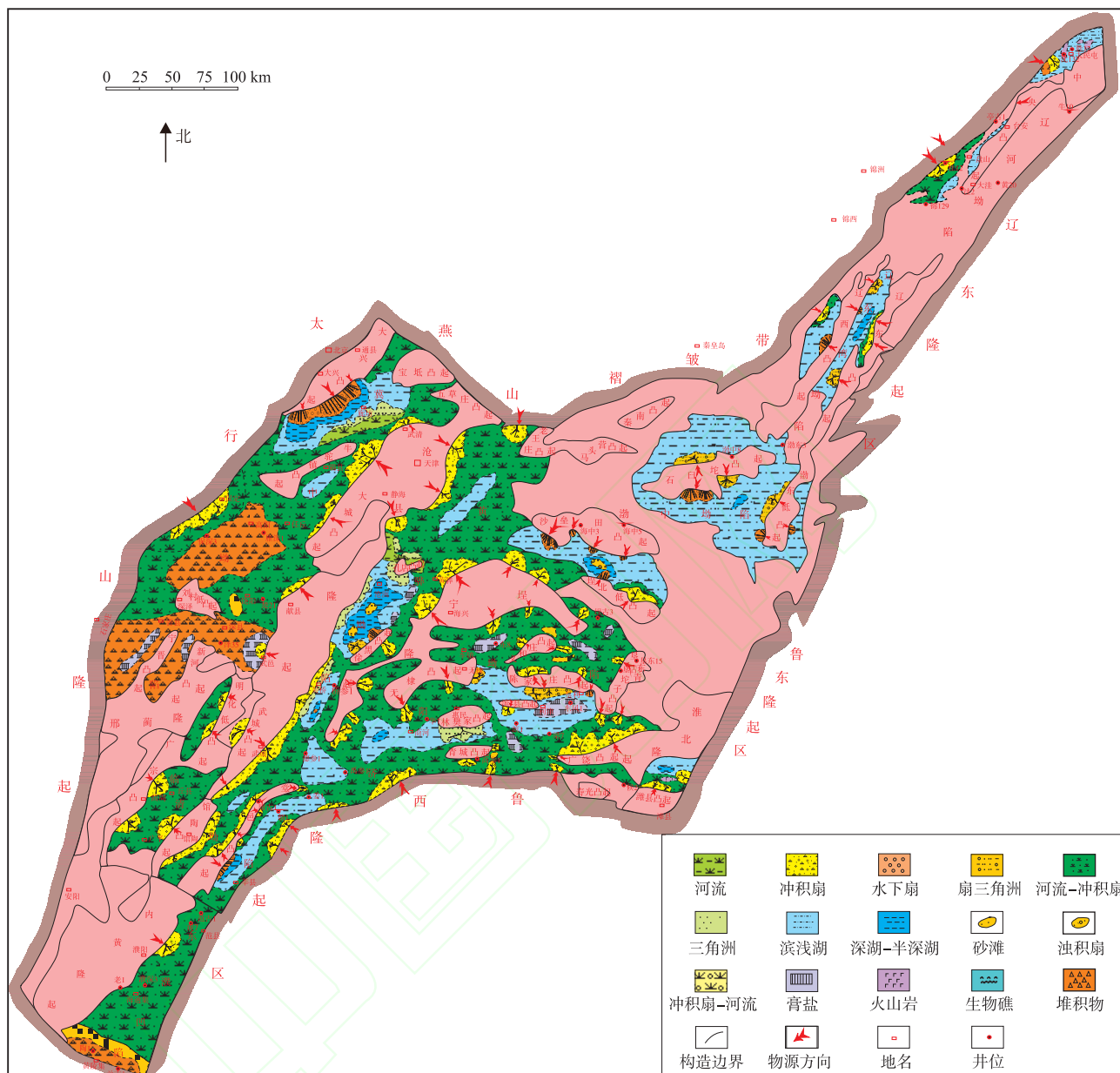


图 3 渤海湾盆地古近系孔店组沉积时期古地理

Fig. 3 Palaeogeography of the Paleogene Kongdian Formation sedimentary age in Bohai Bay Basin

扇和洪泛平原、滨浅湖沉积，如在渤中 34-2-1 井等井区发育有冲积扇—冲积平原体系。推测存在膏盐岩和泥质岩发育的半深湖区，位于沙垒田与石白坨凸起之间及渤南凸起与渤东低凸起之间的区域（董艳蕾等，2007）。

2.1.3 黄骅坳陷古地理展布特征

黄骅坳陷孔店组沉积相的宏观展布具有以下 5 个特点：（1）孔店组沉积主要分布于坳陷的南部地区，表现为一自成系统的内陆闭流凹陷沉积，以冲积扇—河流冲积平原—湖泊体系为主；（2）沧东

凹陷为主要沉积、沉降中心，以油页岩、暗色膏泥岩为主，向外侧变为红色砂泥岩沉积。各类砂岩、砾岩岩相以沧东凹陷为中心呈近半环带状展布。（3）冲积扇相呈舌状沿盆地边坡分布。冲积扇体一般在凹陷的东侧规模大，分布连续，沉积物粒度较粗；南北侧冲积扇体规模相对较小，分布亦不连续，沉积物粒度较细。（4）膏泥岩和泥膏盐沉积区，早期零星分布，晚期集中分布于沧东凹陷和徐杨桥西南侧。它们和冲积扇相之间为广阔的冲积平原相沉积。（5）在灯明寺和望海寺发育有火山岩

(冯文杰等, 2018)。

2.1.4 冀中拗陷古地理展布特征

北部受太行山东麓深断裂带北段的大兴断裂控制而发育有近岸水下扇和湖泊沉积体系。湖区面积有 1200 km², 较深湖区位于西部深断裂一侧, 滨浅湖区位于东部缓坡带, 岩性由红色、绿色及灰色泥岩夹细砂岩组成, 局部地区发育砾石滩。近岸水下扇主要分布于大兴断层下降盘, 平行于断层呈带状分布(图 3, 图 4), 水下扇的砾石成分为古生代灰岩及中生代喷出岩。

由于受太行山东麓断裂带中、南段及拗陷周边老山、拗陷内部剥蚀山地的控制, 冀中拗陷中部、南部广泛分布有冲积扇—河流冲积平原体系。岩性由杂色砂砾岩和红色泥岩组成。砂砾岩厚度占剖面厚度的 40%~90%, 成分成熟度及结构成熟度极低。平面形态呈扇状或扇裙状。近断裂带或山前的扇根部分, 砂砾岩占地层厚度的 90% 以上, 砾石大小悬殊, 杂乱堆积, 略显正韵律。冲积平原部分由砂砾岩与红色泥岩, 或红色泥岩夹砂砾岩组成(杜威等, 2020)。

拗陷南部发育有冲(坡)积扇—盐湖沉积体系, 与黄骅拗陷孔店组相似, 砾岩一般不具层理, 砾石直径 3~6 cm, 成分为燧石、石英岩、灰岩及火山岩等。

2.1.5 济阳拗陷古地理展布特征

孔店组沉积时期, 在东营凹陷和惠民凹陷中部

发育有较局限的滨浅湖亚相沉积, 在东营凹陷和沾化凹陷中分布有零星的盐岩、膏岩相沉积。其余部分沉积有广泛发育的冲积扇—河流—冲积平原(或洪水—漫湖)沉积体系(年涛, 2019; 年涛等, 2021)(图 3)。

2.1.6 临清拗陷古地理展布特征

东濮凹陷、冠县凹陷以及德川凹陷、莘县凹陷边缘地区主要发育有冲积扇—河流冲积平原沉积体系, 而德川凹陷和莘县凹陷中部则发育有滨浅湖亚相沉积, 莘县凹陷西南部发育有近岸水下扇沉积(纪友亮等, 2005)。

2.2 沙四段沉积时期古地理特征

沙四段沉积早期地势高差较大, 气候干燥, 渤海湾盆地湖区范围仍逐渐扩大, 水体由浅变深, 且逐渐稳定, 早期普遍形成红色砂泥质沉积, 因此主要发育与孔店组一致的冲积扇—河流冲积平原—湖泊沉积体系(图 5); 沙四段沉积中晚期, 由于断裂活动有所增强, 湖泊面积扩大, 水体加深, 主要为近岸水下扇—扇三角洲—滩坝—湖泊体系和冲积扇—盐湖沉积体系, 在浅水地带发育广泛的碳酸盐岩沉积和生物礁。后期湖盆萎缩, 形成以冲积扇—河流冲积平原为主的沉积体系, 并在顶部遭受剥蚀, 形成层序边界。盆地北部的辽河拗陷由于处于相对隆起状态, 故缺失了沙四段下部的沉积。

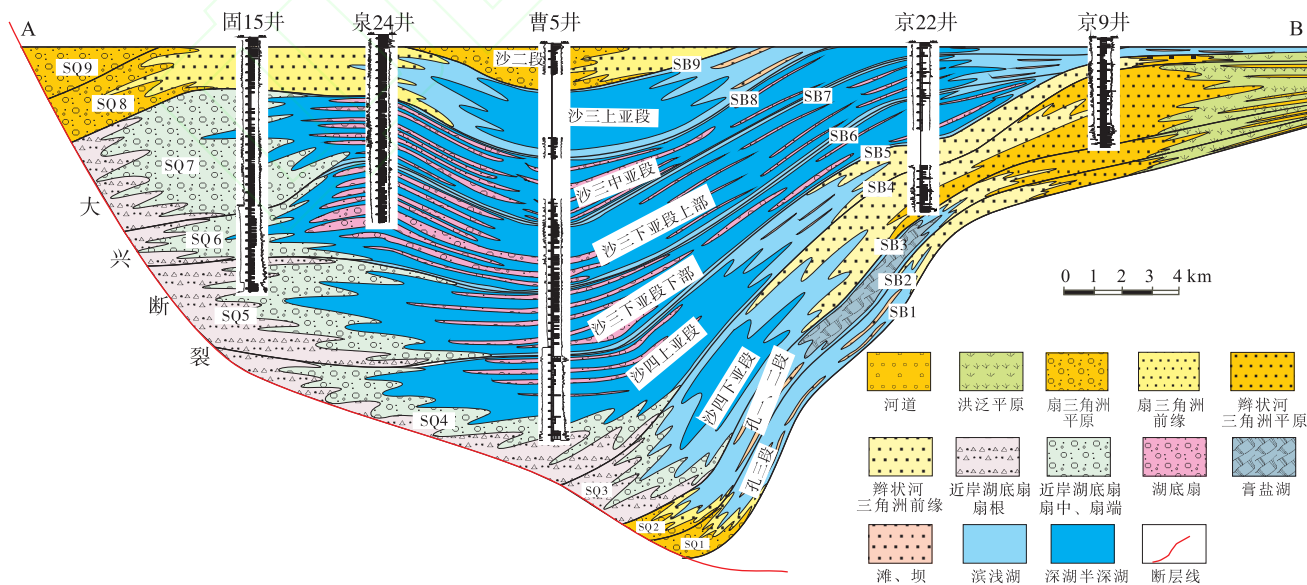


图 4 冀中拗陷廊固凹陷古近系层序及沉积相剖面图 (剖面位置见图 1)

Fig. 4 Sequence and sedimentary facies profile of the Paleogene in Langgu sag, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin

(See Fig. 1 for the profile's location)



图 5 渤海湾盆地古近系沙四段沉积时期古地理

Fig. 5 Palaeogeography of the Member 4 of Paleogene Shahejie Formation sedimentary age in Bohai Bay Basin

2.2.1 辽河拗陷古地理展布特征

该阶段的构造运动在辽河拗陷很不均衡，大民屯凹陷和西部凹陷断裂及扩张较为明显，而东部凹陷断裂活动微弱，基本上没有接受沉积。

1) 大民屯凹陷。沙四段上部沉积时期凹陷古地貌形态呈西高东低、南高北低的特征。在凹陷北部和东部的大部分地区发育湖泊相沉积，以暗色泥岩沉积为主，局部发育有浊积岩（静 74 井），该浊积岩面积不大，呈孤立的透镜体，夹持在暗色泥岩中。凹陷西部南端局部发育有粗碎屑的砾岩、砂

砾岩及红色、杂色泥岩顺斜坡而下堆集而成的冲积扇沉积体系。

2) 西部凹陷。由于构造活动和古地貌形态的分割，凹陷的沉积环境南北差异很大，大致以凹陷中部的曙光潜山和兴隆台古隆起一线为界，形成南北 2 种环境。北部地区为无明显水流注入的半封闭湖湾区，发育了滨浅湖亚相沉积。封闭的环境造成该区的水体具有高矿化度的特征，碳酸盐岩沉积物相对发育，主要为云质灰岩、钙质页岩和鲕粒灰岩，此外还有暗色泥岩夹薄层粉砂岩。总厚度一般

为 100~150 m, 其中鲕粒灰岩局部集中, 成为储集层。该区域以湖相沉积为主, 仅在北端的牛心坨形成小范围扇三角洲沉积。南部地区物源来自西部山地, 因此, 沿西侧一带砂岩偏多, 为扇三角洲沉积。由北至南分别发育了曙光、齐家—欢喜岭扇三角洲, 横向上连为一体呈带状。东侧主要为滨浅湖相沉积, 局部发育有滩坝相砂体。

2.2.2 渤海海域古地理展布特征

渤海海域钻遇沙四段的井较少。根据已有钻井资料分析, 本段地层分布较为局限。在渤中坳陷中北部的渤中 10 井—渤中 6—渤中 3 井区域发育近岸水下扇—湖泊沉积体系; 在渤中坳陷南部发育有冲积扇—河流冲积平原—湖泊沉积体系; 在沙垒田凸起南北两侧发育有冲积扇—扇三角洲沉积 (何仕斌等, 2001; 刘强虎等, 2017)。

2.2.3 黄骅坳陷古地理展布特征

与孔店期的沉积范围相比有了明显的向北扩大。在坳陷中部发育有范围较大的滨浅湖亚相沉积。沉积区主要分布于坳陷中南区, 靠近沧县隆起的坳陷西部边缘和靠近埕宁隆起的中南部边缘有河流的注入, 发育有带状的冲积扇—河流冲积平原沉积体系; 在舍女寺—齐家务—天津市新港一带和齐家务—王徐庄—赵家堡以及以东一带发育有环带状的滨浅湖亚相沉积; 在坳陷中部的太平村—唐家河—歧口及以东地区发育有浅湖—半深湖亚相沉积, 局部夹含小面积的湖底扇沉积 (姜华等, 2009; 祁鹏等, 2010)。

2.2.4 冀中坳陷古地理展布特征

沙四段沉积时期的古地形承袭了孔店期的地形特征, 但其高差明显减小, 湖泊面积向南有了很大的扩展, 孔店组沉积时期的南北分区面貌基本上已不存在。坳陷北端靠燕山褶皱带的地区和南端发育冲积扇—河流冲积平原—沼泽沉积体系 (图 5); 坳陷西侧靠太行山隆起的中南段和东部地区发育冲积扇—河流冲积平原沉积体系; 坳陷东南端发育冲积扇—干盐湖沉积体系。坳陷中部地区发育广泛的湖泊相沉积, 坳陷北部宝坻凸起附近以及坳陷靠沧县隆起的东部地区发育有冲积扇—河流冲积平原沉积体系, 岩性以红色泥岩夹砂岩为代表。坳陷中北部的廊坊—固安—霸县一带发育水下扇—湖泊沉积体系。西部大兴断层的强烈活动, 促使西部发展为沉积中心, 形成较深—深湖区, 西侧山高岸陡, 河流

带来的碎屑物直接注入湖区形成近岸水下扇; 而东岸地势平缓, 形成以滩坝为主的沉积。坳陷中南部和南部分别发育有冲积扇—河流冲积平原—滨湖沼泽沉积体系和冲积扇—河流冲积平原—干盐湖 (潟湖) 沉积体系。

2.2.5 济阳坳陷古地理展布特征

沙四段沉积时期, 气候开始由原来的孔店组沉积时期的干旱气候向温暖潮湿气候的转变, 其沉积范围和湖泊范围较孔店组有较大的扩大, 湖域面积广, 湖水深度增大, 主要为深湖—半深湖沉积。在各凹陷的周边地区有物源注入, 陡坡带形成近岸水下扇或扇三角洲, 斜坡带的浅湖区发育滩坝和碳酸盐岩滩, 深湖区发育湖底扇 (图 5)。3 个主要凹陷的古地理特征如下:

1) 沾化—车镇凹陷。沙四段沉积中心转移明显, 主要在渤南洼陷, 湖水深度大, 最大沉积厚度达 700 余米, 而孤北洼陷、郭局子及套儿河洼陷平均厚度在 100 m 左右。沙四段岩性主要为灰质泥岩夹油页岩、石灰岩、生物灰岩和薄层砂岩, 沾化凹陷义东、孤南地区发育生物礁。另外, 从地球化学特征来看, B/Sr 值平均为 0.004, B/K 值为 0.2, 用硼测得古盐度为 18‰~32‰, 基本上属于咸化湖泊范畴。从沾化—车镇凹陷沙四段砂岩百分比趋势来看, 砂岩百分比含量较高的部分多属于陡坡带和缓坡带的扇形砂体。沉积环境主要以咸化湖泊为背景, 在沾化凹陷南斜坡及车镇凹陷大部分地区属滨浅湖沉积, 在套儿河洼陷及郭局子洼陷北部陡坡发育冲积扇沉积, 陈家庄隆起北部及孤北洼南部发育三角洲沉积, 渤南洼陷北坡以扇三角洲裙为特征。较深湖沉积主要发育在渤南洼陷及孤北洼陷, 并零星见有深水浊积岩分布。

2) 东营凹陷。沙四段沉积时期, 水深较大, 主要为深湖—半深湖环境, 沉积中心较为分散, 地层最大厚为 400 多米, 平均为 200~300 m, 横向变化较小。砂体主要分布于陈家庄凸起下降盘, 砂体分布较为集中, 厚度较大, 为沿陡坡带形成的近岸水下扇及断槽重力流沉积碎屑岩, 在坡折带的浅湖区发育碳酸盐岩滩坝沉积。在沉降中心及附近的深湖环境形成了呈环状分布的浊积岩、风暴岩。

3) 惠民凹陷。沙四段沉积以深灰、褐色泥岩、油页岩、泥灰岩和灰岩互层为特征, 主要为深湖—半深湖环境。沉积中心相对于孔店组有所转

移,主要的沉积中心在阳信洼陷,最大沉积厚度达 700 余米。砂体分布趋势主要在陡坡带,滋镇洼陷、阳信洼陷及里则镇北部陡坡带均有砂体分布。北镇洼陷的物源主要来自埕宁隆起,碎屑物质直接注入湖泊水体,形成扇三角洲—湖泊沉积体系,在扇三角洲前缘形成了湖底扇沉积。在滋镇、阳信洼陷的较深湖区,均可见浊积岩分布,在缓坡带则发育三角洲砂体及滩坝砂体。

2.2.6 临清坳陷古地理展布特征

临清坳陷沙四段沉积时期,除东濮凹陷外,其余地区沉降弱,水体浅,主要发育有冲积扇相、河流相、滨浅湖相和三角洲相等。

1) 德州凹陷。为沙四段临清坳陷的主要沉积中心之一,以滨浅湖亚相沉积为主。在西侧靠近武城凸起的边缘地区发育冲积扇—河流冲积平原沉积体系;在北部靠埕宁隆起区零星发育近岸水下扇沉积;在凹陷中部发育有小范围的半深湖相沉积。

2) 冠县凹陷。在凹陷南靠近馆陶凸起和武城凸起的西部边缘区、靠近堂邑凸起的东部边缘区均发育冲积扇—河流冲积平原沉积体系;凹陷中心区发育有半深湖相—湖底扇沉积体系,其余地区皆为滨浅湖相沉积。

3) 莘县凹陷。其沉积特征与冠县凹陷相似,靠近凸起(或隆起)的边缘地区发育冲积扇—河流冲积平原沉积,凹陷中部地区为滨浅湖亚相沉积,局部发育分布范围较小的半深湖相沉积。

4) 东濮凹陷。东濮凹陷是临清坳陷中沉降幅度和沉积厚度最大的凹陷。本段沉积时期,沉积环境为深湖—半深湖相。由于兰聊断层活动强烈,造成水体东深西浅的特点。凹陷东部兰聊断层下降盘形成一系列近岸水下扇沉积;凹陷北部的观城地区和南端的黄陵集—马厂地区发育有三角洲相沉积;凹陷西部发育冲积扇—浅湖相沉积。中部和东部大部分地区为湖泊相沉积,且半深湖亚相分布范围较广,其中湖底扇沉积较发育。

2.3 沙三段沉积时期古地理特征

沙三段沉积时期,是渤海湾盆地的强裂陷期,此时期控制各坳陷的主干断裂活动强烈,地形高差较大,湖盆大幅度沉降,沉降大于沉积,加上气候潮湿,非补偿深水环境分布范围广阔,湖区范围和水体深度达到最大,可达 200 m,普遍发育黑色、深灰色泥岩和油页岩,凹陷边缘发育深灰色泥岩和

砂、砾岩互层,沉积厚度达到 2000 m。整体以近岸水下扇—半深湖—深湖—湖底扇沉积体系和(扇)三角洲—半深湖—深湖—湖底扇沉积体系为主(冯增昭,1993)(图 6)。常见和最具特色的沉积相类型是大型长轴三角洲及各种类型的浊流沉积、近岸水下扇、远岸湖底扇和三角洲前方的滑塌湖底扇等,在盆地的各个坳陷的不同沉积背景中都能够找到,类型多样,特点各异。

辽河坳陷和济阳坳陷沙三段是在沙四段沉积基础上的继续发展,坳陷内的构造格局没有发生大的变化。冀中坳陷中央隆起带的形成将坳陷分隔为东西 2 个凹陷带,东部凹陷带从饶阳经霸县到廊坊—固安等凹陷,是深湖和浅湖分布区;西部凹陷带沉积速率大于沉降速率,形成超补偿沉积的河流环境。黄骅坳陷在沙三段沉积之前,沉积范围较小,主要位于坳陷中南区,沉积较薄。从沙三段沉积时期开始,坳陷大范围沉降,沉积中心向北转移,沧东、歧口、南堡等凹陷成为主要沉积发育区。

2.3.1 辽河坳陷古地理展布特征

沙三段沉积时期,西部凹陷、东部凹陷和大民屯凹陷虽都经历深陷期,但裂陷强度不同,西部凹陷最为强烈,大民屯凹陷相对最弱。因此沉积物的表现形式不同,西部凹陷以深湖—半深湖和湖底扇为主;东部凹陷由于断裂分割明显,具有多沉积中心,沉积相类型主要为湖泊、湖底扇、扇三角洲和冲积扇,局部夹含伴随断裂活动而形成的火山岩;大民屯凹陷以河流—三角洲—湖泊沉积体系为主(图 6)。

1) 大民屯凹陷。沙四段沉积时期的水进达到最大程度并维持一段时间后,沙三段沉积早期开始水退。这次水退受凹陷沉降中心转移控制,凹陷东界南段断层活动强烈,南部沉降,北部相对抬升,水体由北向南逐渐退缩,范围较沙河街组四段沉积时期缩小,且呈现了凹陷北端为陆上环境、南部为湖盆环境的局面。在湖盆内部,湖底形态北高南低,并有水下隆起,水体较沙河街组四段沉积时期为浅,水介质性质为淡水。物源供给区也随之改变,此阶段的大民屯凹陷有 3 处 4 个陆源碎屑供给区。对凹陷沉积具有举足轻重作用的是北端三台子物源区。与凹陷长轴方向大致平行的河流贯穿南北,携带陆源碎屑由北至南依次发育了如泛滥平原、三角洲平原和三角洲前缘亚相。地震资料显示,沙三段具有清晰的前积结构。该物源区供给的

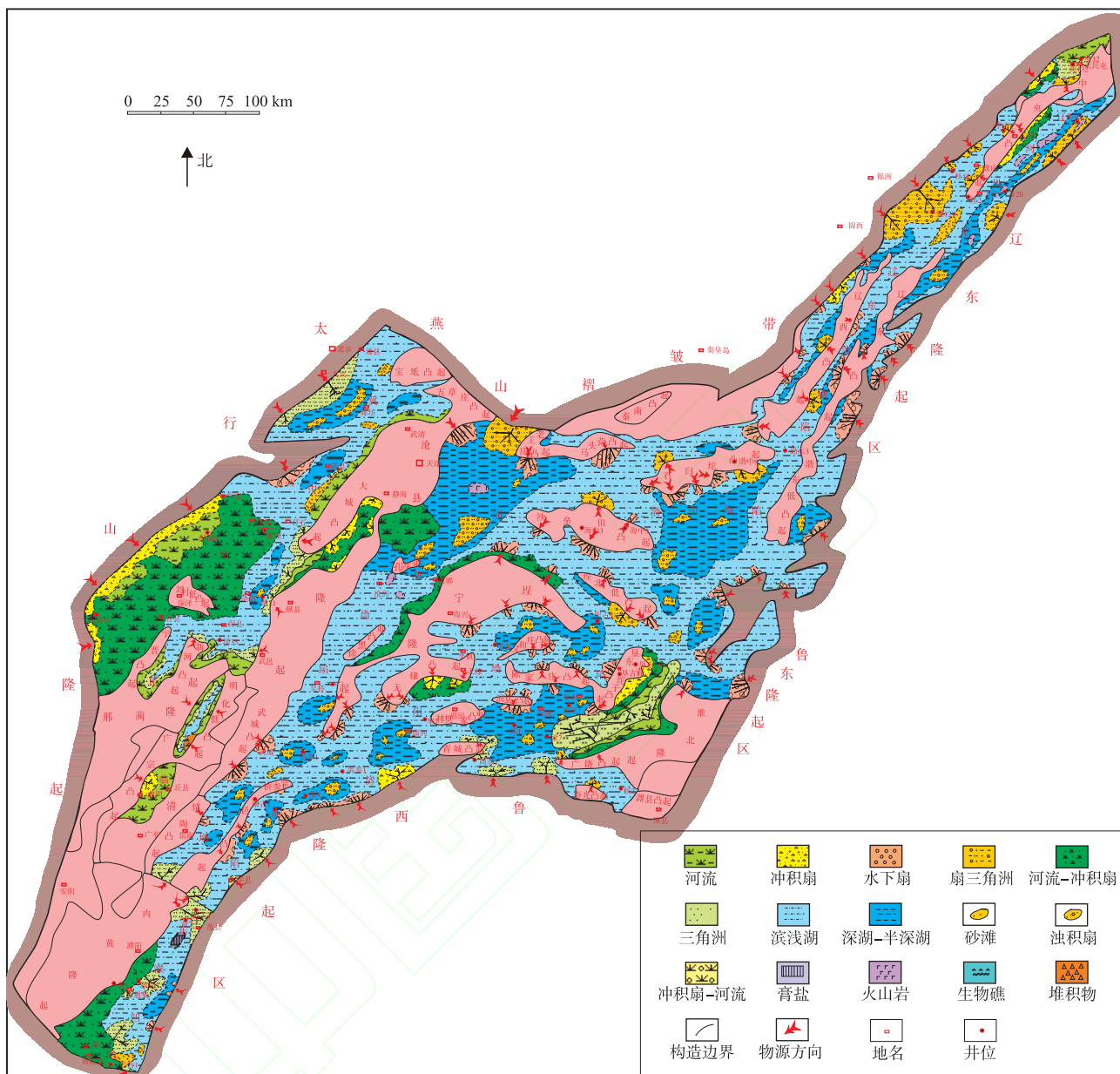


图 6 渤海湾盆地古近纪沙三段沉积时期古地理

Fig. 6 Paleogeography of the third member of Shahejie Formation in Bohai Bay Basin

碎屑覆盖面积约占整个凹陷的一半以上。与前阶段相比,该物源是新生的物源,它既是水退的结果,同时由于碎屑大量供给,又促进了水退。其次是凹陷东界南端法哈牛以东物源区,该物源区的形成与南段断裂有直接关系。由断裂形成的断阶,造成凹陷内外高差加大,外侧物源注入凹陷,在断层下降盘一侧形成冲积扇,进入水体后向凹陷中心延伸的部分形成了扇三角洲。凹陷南端物源实际上是继承

前阶段的物源,但具有明显衰退的特征,因而由其控制下发育的冲积扇,特别是扇三角洲覆盖范围较前期大幅度减小。

2) 西部凹陷。本段沉积时期西部凹陷急剧凹陷,水进加剧,形成了面积较广的深湖环境,两侧高地提供物源,凹陷中央发育深湖—半深湖—湖底扇沉积,凹陷西侧发育近岸水下扇、扇三角洲和滨浅湖沉积体系^①。

① 李应暹等. 1994. 辽河盆地第三系区域储集层评价研究.

3) 东部凹陷。除西侧边部和茨榆坨, 三界泡潜山外, 整个凹陷为湖水淹没。在西侧斜坡上, 自新开至大湾一线沉积了以砂砾岩为主夹有杂色泥岩的小型冲积扇—扇三角洲沉积体系, 呈带状展布沿凹陷走向分布, 其物源方向来自中央凸起; 东侧断崖下的青龙台地区, 来自东部的物源形成了扇三角洲—湖底扇沉积体系; 此外, 彰驿站外侧也有物源进入茨东断槽, 从外向里发育了冲积扇、扇三角洲及湖底扇体系组合。在驾掌寺洼陷、二界沟洼陷内亦应有此类沉积^①。

2.3.2 渤海海域古地理展布特征

沙三段沉积时期, 渤海海域地壳的拉张—走滑断陷加剧, 改变了始新世时那种分割的局面, 彼此沟通, 形成一个完整的坳陷, 然而坳陷中仍发育众多的凸起。这一时期由于湖盆深, 水域面积大以及长时间的沉陷, 形成了各凹陷以黑色、深灰色泥岩和页岩沉积为主, 仅在凹陷边缘和凸起周边有物源注入。该时期发育的沉积相主要有近岸水下扇、扇三角洲、半深湖—深湖泥质沉积, 滨浅湖亚相, 局部见湖底扇沉积。

石臼坨凸起规模大, 在下降盘中形成多个近岸水下扇, 扇体规模一般较大。沙垒田凸起在东北、西南2个方向以断裂与渤中、沙南2个凹陷相接, 各形成一规模较大的近岸水下扇和扇三角洲沉积。庙西凸起与渤东凹陷为断层接触, 在断层下降盘发育了2个较大的近岸水下扇群。在庙西凸起与渤南凸起之间也发育有较大规模的近岸水下扇。渤东低凸起西北、东南两侧分别为渤中凹陷和渤东凹陷, 也形成了一些近岸水下扇, 但规模不大。埕北低凸起、渤南凸起与沙南凹陷、渤中凹陷均以缓坡过渡, 主要发育扇三角洲沉积。渤南凸起与埕北低凸起之间, 发育有湖底扇和小规模的近岸水下扇。

沙三段总的沉积特点是以短源、内源沉积为主, 深湖—半深湖区面积大, 而滨浅湖仅在缓坡边缘发育; 粗碎屑沉积为陡坡发育近岸水下扇, 缓坡发育扇三角洲, 局部较大规模砂体前端可发育湖底扇(徐长贵等, 2005; 吴磊等, 2006; 杨波等, 2010)。

2.3.3 黄骅坳陷古地理展布特征

黄骅坳陷沙三段以湖泊相为主, 占90%以上, 岩性为深湖—半深湖相的灰黑色、深灰色泥岩, 仅在靠埕宁隆起的东南缘和靠沧县隆起的中段发育有小范围的河流冲积平原沉积, 在坳陷中部零星分布有火山岩相(图6)。

沙三段沉积时期沉积中心位于坳陷中北部, 该区紧邻燕山物源区, 边界断层活动强烈, 在陡坡带发育近岸水下扇, 在北大港地区发育湖底扇。

黄骅坳陷南堡凹陷的高尚堡地区近岸水下扇分布于边界断层下降侧, 沉积厚度1000 m。平面可分为扇根、扇中、扇缘3个亚相。扇根主要由混杂堆积的砾岩、砂岩等组成, 具块状构造; 扇中由互层状砂砾岩或含砾砂岩组成; 扇缘为暗色泥岩或粉砂岩夹薄层砾岩或砂岩构成。

黄骅坳陷中区的北大港区, 湖底扇基本成一扇形, 其分布面积约600 km², 其延伸方向为北东—南西, 横剖面上呈楔形体, 是近岸砂体滑塌搬运再沉积的产物, 鲍马序列各段均可见到^②。

2.3.4 冀中坳陷古地理展布特征

沙三段沉积时期, 受北东向构造的影响, 冀中坳陷东西分带清楚, 整个坳陷分成3个带: 西部凹陷带、中央隆起带和东部凹陷带。西部凹陷带的凹陷小而浅, 东部凹陷带大而深, 连成一体。以保定—雄县—永清—武清一线为界, 将坳陷分成南北两区, 北区西陡东缓, 南区东陡西缓。

在北区廊固凹陷大兴断层下降盘发育近岸水下扇沉积, 砾岩占地层厚度的50%以上, 分布范围达300 km², 是一套巨厚的成分单一、分选差、颗粒—基质支撑、快速堆积的砂砾岩体沉积。其横向变化迅速, 在近岸处呈裙带状分布^③。

北区廊固凹陷较深湖区发育有深水浊流沉积, 其显著特点是频繁出现正韵律序列, 递变层理清楚, 粒度概率图以宽粒度区间、低百分含量为特征, 陆源成分多且成熟度低, 其岩屑含量可高达60%~70%, 该套粗粒沉积剖面上夹于湖相泥中、平面上位于深水湖心部位(杨德相等, 2016)。

冀中坳陷北区的其余大部分地区为滨浅湖、半

① 李应暹等. 1994. 辽河盆地第三系区域储集层评价研究.

② 纪友亮等. 1995. 南堡凹陷下第三系层序地层学研究.

③ 张舒亭等. 1996. 大兴断层下降盘沙三段砾岩油藏描述及勘探建设.

深湖亚相沉积, 只在靠沧县隆起的边缘发育沼泽相和滨湖滩坝相沉积^①。

冀中拗陷西南部的清苑—赵兰庄地区和沧县隆起西侧发育有河流冲积平原沉积。前者处于西侧太行山主要物源控制下, 持续处于补偿和超补偿状态, 由红色泥岩和砂岩组成, 砂岩段一般为从含砾砂岩到中细砂岩和粉砂组成的正韵律层。后者向拗陷中部过渡为三角洲相沉积。冀中拗陷南区的南部也发育小型三角洲沉积, 其余地区分布有广泛的滨浅湖—深湖一半深湖亚相沉积 (张大智等, 2008; 曾洪流等, 2015; 罗妮娜等, 2020; 张宸赫等, 2020)。

2.3.5 济阳拗陷古地理展布特征

济阳拗陷沙三段深湖亚相泥岩广泛分布, 约占拗陷总面积的 90%, 暗色泥岩累计厚度可达千米以上。砂砾岩在剖面中的含量仅 10%~15%。沙三段沉积时期是济阳拗陷最重要的生油岩发育阶段。

1) 东营凹陷。沙三段沉积时期, 水体普遍较深, 范围较大, 以湖泊相沉积为主, 发育来自东部的长轴大型三角洲和湖底扇沉积。沉积中心较分散, 地层最大厚度达 600 m, 平均厚度为 300~400 m。砂体分布可分为 2 种类型: 一种是在缓坡带形成的具有一定规模的三角洲沉积, 在其附近可发育有滩坝及风暴岩沉积, 主要发育于凹陷南部地区。另一种类型是浊流沉积物, 又可细分成 3 种: 陡坡近岸水下扇、斜坡具供水道的远岸湖底扇和三角洲滑塌湖底扇, 分别以发育于凹陷北部的陈家庄南侧近岸水下扇、凹陷南部的梁家楼湖底扇和凹陷中部的牛庄三角洲前缘浊积岩透镜体为代表 (刘鑫金等, 2017; Liu *et al.*, 2021)。

2) 沾化—车镇凹陷。沙三段沉积时期沾化—车镇凹陷湖盆发育最兴盛, 巨厚的深湖亚相泥岩占 79%, 埕子口、陈家庄及义和庄凸起为湖盆沉积的主要物源区, 在其附近形成近岸水下扇和深水湖底扇等浊积流沉积。沉积中心变得较为复杂, 渤南、郭局子及套儿河洼陷为新的沉积中心, 最大沉积厚度可达 500 m, 孤北洼陷、富林洼陷的沉积平均厚度也可达 250~300 m。砂岩百分比等值线趋势表明, 砂岩含量较高的部位基本上沿陡坡带发育扇三

角洲及扇三角洲裙, 缓坡带主要发育三角洲及碎屑滩坝沉积^②。

3) 惠民凹陷。沙三沉积时期湖盆面积较大, 水体较深, 以大套暗色泥岩、油页岩夹浊积岩体为特色。由于古地理环境的变迁, 惠民凹陷主要的沉积中心在临南洼陷及阳信洼陷, 最大沉积厚度可达 500 m。见有较多适应深水环境的古生物化石, 如脊刺华北介、稳瘤华北介、惠民华北介、扁平高盘螺及渤海藻等, 有机质含量丰富, 有机碳含量 1.5%~2%, 总烃含量在 600×10^{-6} 以上, 为极好的生油岩。惠民凹陷砂体含量较高部位主要在凹陷西部临盘地区及阳信洼陷北部陡坡带, 主要发育推进式三角洲及扇三角洲的砂体沉积。惠民凹陷沙三段沉积时期, 较深湖沉积主要分布在临南洼陷及滋镇洼陷, 临南地区沿湖盆长轴方向发育长轴三角洲体系, 三角洲体系由一系列朵状体呈裙状分布, 为来自南西方向物源的主要河流多期改道、分叉的结果。在三角洲朵体前缘的深水区 (主要为临南洼陷、宿安) 发育深水浊积岩。临南斜坡发育了短轴三角洲, 从地震测线上可明显看出典型 S 型前积, 物源来自南侧, 可能有较大河流注入。滋镇洼陷陡岸带陵县—基山断裂下降盘主要分布了扇三角洲裙, 物源来自凹陷北侧。阳信洼陷北坡发育冲积扇沉积, 物源来自埕宁隆起。

2.3.6 临清拗陷古地理展布特征

沙三段沉积时期是临清拗陷的深陷期, 水体扩大, 深湖亚相和半深湖亚相沉积范围是整个沙河街组最大的。

临清拗陷北部地区有多个沉积中心发育, 其中德州凹陷的沉积中心是德南, 冠县凹陷的最大沉积中心是中部的白马湖次凹和冠县东次凹; 莘县凹陷的沉积中心是中部的堂邑次凹。这些沉积中心发育深湖一半深湖亚相, 此时围绕它们的滨浅湖相区大部分已连通, 组成拗陷北部的沉积主体。在堂邑凸起的西侧、武城凸起的东侧和姜店次凹东缘发育近岸水下扇沉积; 在内黄隆起北侧、莘县凹陷东缘发育有三角洲相沉积; 在德南洼陷、白马湖次凹和堂邑次凹的半深湖暗色泥岩中局部夹含零星分布的湖底扇沉积。

① 赵建章等. 1995. 冀中拗陷饶南次凹深层勘探序地层解释.

② 钱崢等. 1995. 济阳拗陷深层沉积体系与储集层特征. 乔军等. 1996. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体分布及成藏模式.

临清坳陷南部地区的东濮凹陷仍然呈现东深西浅的特征。东部沿兰聊断层的濮城、前梨园、白庙、新庄出现串珠状分布的近岸水下扇。西南部的大部分地区为河流冲积平原沉积。凹陷北端、南端和中部的海通集附近发育有大型的三角洲相沉积，凹陷沉积中心部位为深湖半深湖相泥岩和页岩。北部以文留为中心发育一小范围的盐湖相盐岩、盐膏岩沉积（赵澄林等，1992；Wang *et al.*, 2021）。

2.4 沙二段沉积时期古地理特征

渤海湾盆地各凹陷沙二段以浅灰色泥岩、灰绿色、棕红色泥岩夹砂岩和砾岩沉积，地层厚度较沙

三段小很多，仅有 50~300 m。反映了沙二沉积时期，边界断裂活动减弱，盆地扩张和裂陷大为减弱，气候干旱，加上大量碎屑物质的不断进积、充填，致使盆地水体变浅、水域变小，半深湖亚相明显缩小，而三角洲沉积和河流冲积平原沉积较为发育（图 7）。

2.4.1 辽河坳陷古地理展布特征

由于受区域大背景上断裂活动减弱的影响，大民屯凹陷和东部凹陷湖盆萎缩、消失，主要发育冲积扇—河流冲积平原和河流沼泽等陆上沉积类型，仅在西部凹陷发育湖泊相沉积。东部凹陷中区零星分布有火山岩体。



图 7 渤海湾盆地古近纪沙二段沉积时期古地理

Fig. 7 Palaeogeography of the Member 2 of Paleogene Shahejie Formation sedimentary age in Bohai Bay Basin

1) 大民屯凹陷。沙二段沉积时期, 大民屯凹陷迅速回返, 沉积环境发生了很大变化, 水域面积明显收缩, 除局部地区保持了零星的、小面积水域外, 其他广大地区皆为陆上环境。泛滥平原相发育范围较大。由于是河流冲积沉积物, 其各亚相、微相配置关系错综复杂。大民屯凹陷以红色泥岩发育为其显著特征, 红层厚度达 200 m 以上。凹陷南部西侧和北部西侧局部地区粗碎屑从边缘高地向低处推进, 发育了冲积扇体系。

2) 西部凹陷。该阶段由于断裂活动减弱和北端的隆起, 湖盆扩张作用趋于停止, 致使湖盆水体收缩, 沉积环境较早期阶段有较大不同。浊积沉积区向南偏转。在东侧, 由早期的高升地区转移到兴隆台地区, 并受冷家堡断崖的影响成为一个新的浊积发育区。碎屑物由冷东断崖进入湖盆, 一部分就近沉积在断崖深槽内; 一部分向南北两侧(主要向南)流动一定距离后沉积下来, 兴隆台地区为一水下高地, 沉积物重力流在流动过程中, 受地形影响, 浊积体在不同部位厚度变化很大。在西侧, 同样受北端隆起的影响。早期阶段 4 条峡谷中北部的 2 条消失; 南部峡谷虽依然保留, 但浊积岩的沉积规模和范围较早期大为缩小。

与前一阶段相比, 该阶段的沉积物重力流能量明显降低, 表现在浊积砂体颗粒较细、厚度较薄、分布面积较小、多呈透镜体状分布。

3) 东部凹陷。裂隙及扩张活动减弱, 早期沉积物充填了凹陷, 地势较平坦, 略呈北高南低状, 同时两侧山地高差变小, 湖水由北向南逐渐退出。除牛居至青龙台地区和东坡边缘地区发育冲积扇外, 其余为泛滥平原相, 在泛滥平原内, 河流往复改道, 河道间的洪泛区内植物繁盛, 在地层中见到碳质泥岩由北向南增多的现象。

2.4.2 渤海海域古地理展布特征

渤海海域沙二段沉积时期, 基本上继承了沙三段沉积时期的特点, 以湖泊相沉积为主, 但湖盆范围变小, 半深湖相分布区域明显缩小。在拗陷边缘和凸起周边发育有近岸水下扇或扇三角相沉积(图 7)。水下隆起和凸起边缘发育碎屑滩坝和生屑滩坝(证据)。

石臼坨凸起北侧、沙垒田凸起南侧及庙西凸起、埕北低凸起的西北侧, 均以较大的边界断裂与洼陷接触, 在断层下降盘形成多个近岸水下扇, 局

部断层活动不强地区可形成扇三角洲。在渤南凸起, 埕北低凸起北侧, 整体为缓坡与洼陷接触, 局部发育有断层, 主要发育为扇三角洲, 边部为滨浅湖泥质沉积。沙垒田凸起东北侧虽有断层活动, 但活动幅度小, 主要形成扇三角洲。在沙垒田凸起东侧及庙西与渤南凸起之间的斜坡下部, 由于受局部断层影响, 发育有水下扇。沙垒田凸起的东南端斜坡部位及石臼坨凸起东部的低隆起, 发育有碳酸盐岩台地及滨浅湖滩坝沉积(赵国连和赵澄林, 2002; 朱筱敏等, 2008, 2019)。

2.4.3 黄骅拗陷古地理展布特征

沙二段沉积早期, 黄骅拗陷湖泊分布范围仍较广, 以北大港和沧洲南部地区为沉积中心, 发育有较丰富的深水湖底扇沉积。后期随边界断裂活动的减弱, 湖盆开始收缩, 陆源碎屑沉积向湖推进, 在拗陷西部边缘北段发育河流冲积平原—三角洲沉积体系, 物源来自沧县隆起; 拗陷中南部边缘发育冲积扇—河流冲积平原和扇三角洲沉积体系; 在拗陷北缘的高尚堡地区发育有近岸水下扇或扇三角洲沉积体系, 拗陷中部为滨浅湖亚相沉积。

2.4.4 冀中拗陷古地理展布特征

沙二段沉积时期, 冀中拗陷湖域面积缩小, 拗陷南区的中西部区域、东部边缘地带等大部分地区发育有河流冲积平原—沼泽亚相或滨湖—沼泽亚相沉积; 中间夹含呈北北东向带状分布的滨浅湖亚相沉积, 仅占拗陷南区沉积的 25% 左右。在霸县凹陷、任丘凹陷和献县凹陷北侧分别发育有三角洲相沉积, 是本段沉积时期南区最有利的沉积相带。

拗陷北区和沙三段沉积时的格局比较相似, 在靠近宝坻凸起、大兴凸起和太行山隆起的拗陷西北边缘区零星分布近岸水下扇, 在靠近大兴断裂带的沉积中心的半深湖亚相沉积区夹含有远岸水下扇沉积(图 7), 组成本区主要的储集体类型; 拗陷东南边缘区发育湖漫沼泽亚相沉积; 其余区域皆为湖泊相沉积。

2.4.5 济阳拗陷古地理展布特征

沙三段沉积时期晚期, 济阳拗陷尽管湖盆范围扩大, 使惠民凹陷、东营凹陷、沾化凹陷和车镇凹陷连为一体。拗陷仅有林樊家—滨县东家庄—孤岛和义和庄等孤立凸起发育, 但因沙二段沉积时期, 盆地基底断陷作用减弱及大量碎屑物质的不断进积、充填、致使盆地水体变浅, 总体发育滨浅湖亚

相,但以滨湖亚相为主。坳陷周缘地区发育冲积扇、扇三角洲和三角洲相沉积。岩性主要为灰色含砾砂岩、砾岩、砂岩、砂质泥岩及少量碳质泥岩,地层厚度 50~500 m,在凹陷中心地层厚度较大。

1) 东营凹陷。主要发育滨浅湖相沉积(缓坡发育三角洲),浅湖区分布于凹陷西部博兴—梁家—利津—盐窝一线,其外围地区主要发育滨湖亚相沉积。在牛 25 井—王 79 井之间发育滩坝沉积,同时在高青—金家庄地区,由于来自青城凸起和广饶凸起碎屑物质的影响,形成了范围较大的三角洲体系沉积。在草桥—羊角沟一线则发育了较长的冲积扇裙。在滨南洼陷因受滨县凸起碎屑物质的影响,分别在滨 54 井—滨 43 井和滨 34 井—单 107 井等地发育了规模不大的扇三角洲体系沉积,而在坨—胜—永地区,由于碎屑物质供给充分,形成了大范围的三角洲体系(王永诗等,2016)。

2) 沾化—车镇凹陷。主要发育了滨湖亚相、冲积扇和扇三角洲体系沉积。其中冲积扇相主要发育在埕东凸起南侧及垦东—青坨子凸起西侧;扇三角洲体系主要发育在军马场、孤岛凸起东侧及五号桩低凸起南侧、河流体系沉积发育于孤南洼陷。东部向盆地方向于垦 20 井—垦 4 之间发育了三角洲体系沉积。车镇凹陷沉积体系展布相对较简单,在凹陷北部主要发育了冲积扇体系和三角体系沉积、而洼陷中南部均为滨湖亚相沉积。

3) 惠民凹陷。沙二段沉积期,惠民凹陷砂岩厚度较大,一般 50~200 m,呈围绕凹陷中心的环带状分布,凹陷中心厚度最大,可达 250 m 以上。另外在临南洼陷夏 33 井—夏 30 井之间及夏 37 井等地有 2 个砂岩厚度相对较大的地区分别大于 100 m 和 200 m。砂岩百分含量等值线图也显示在滋镇洼陷和临南洼陷内砂岩百分含量较高,达 60%~80%,而凹陷内的大部分地区砂岩百分含量为 20%~40%之间。据此认为,惠民凹陷在沙二段沉积期主要发育滨浅湖亚相沉积,且该湖泊范围较小,主要发育在临南—商河一带,在凹陷的北部广泛发育了三角洲体系沉积,而南斜坡夏 37 井—夏 103 井一线发育了扇三角洲体系沉积。

2.4.6 临清坳陷古地理展布特征

沙二段沉积时期,临清坳陷由深陷向收缩转变,湖盆相对抬升,水体变浅,反映陆上沉积的河流冲积平原和冲积扇相等沉积相占很大比例。

临清坳陷北区仅在德州凹陷北部,冠县凹陷白马湖次凹和莘县凹陷堂邑次凹发育有局限的滨浅湖亚相沉积,其余广大区域发育有冲积扇和河流冲积平原沉积体系。

临清坳陷南区的东濮凹陷按沉积特征的差异可分成 4 个区块:凹陷北部发育三角洲沉积体系;凹陷西南部和东部地区发育冲积扇—河流冲积平原沉积体系;凹陷中部发育滨浅湖—滩坝沉积体系。

2.5 沙一段沉积时期古地理特征

沙一段沉积时期,边界断裂活动又开始加强,盆地又开始扩张,再加上气候潮湿与海水的入侵,致使盆地水体又变深、水域变广。至使本期沉积时,湖泊范围又进一步扩大,深湖—半深湖亚相进一步增加,各凹陷的连通面积扩大,凸起的范围变小,在凸起的周围发育扇三角洲、滩坝、三角洲等沉积,生物碎屑滩坝、生物礁、泥灰岩段也是这个时期的沉积的特色(图 8)。

2.6 东营组沉积时期古地理特征

东营组沉积时期,边界断裂活动又开始减弱,盆地扩张和裂陷大为减弱,东营组晚期气候逐渐干旱,再加上大量碎屑物质的不断进积、充填,致使盆地水体又变浅、水域面积大幅度变小。此时期主要发育了三角洲相沉积和河流冲积平原,东营组晚期,挤压抬升,使得东营组遭到不同程度的剥蚀,在多数凹陷东营组地层保存不全(胡孝林等,2000;黄众等,2012;李建平等,2012)(图 9)。

3 古地理与油气的关系

前已述及,渤海湾盆地古近系沉积期发育数十个含油气凹陷,每个凹陷都是一个基本的沉积单元,凹陷中的深湖亚相泥岩构成烃源岩,而在凹陷的边缘发育的近岸水下扇、扇三角洲、三角洲、滩坝等砂体,构成潜在的储集层,在有利的成藏条件下,凹陷中央的烃源岩向周围与之互层的储集层供烃形成油藏,因此每个凹陷就是一个独立的油气运移—聚集系统。各凹陷往往又发育多个古近系沉积厚度大、地层发育较完整的洼陷。沉积洼陷是凹陷中油气生成、运聚的基本单元,并控制了油气的平面分布;不同类型洼陷的沉降和沉积特征以及油气富集情况存在较大的差异(蒋有录等,2019,



图 8 渤海湾盆地古近纪沙一段沉积时期古地理

Fig. 8 Palaeogeography of the Member 1 of Paleogene Shahejie Formation sedimentary age in Bohai Bay Basin

2021; 宋明水等, 2021)。基于古地理特征及大量统计资料, 对渤海湾盆地古近系的洼陷类型及与油气富集的关系开展了分析。渤海湾盆地古近系在不同时期, 湖域的面积、水深及烃源岩的厚度与质量有很大差异, 根据这些特征, 可划分为早期发育型洼陷、继承发育型洼陷和晚期发育型洼陷 3 大类 (图 10); 早期发育型洼陷在孔店组和沙四段沉积期, 洼陷就开始发育; 继承发育型在沙三段和沙二段沉积期, 洼陷仍持续发育; 晚期发育型在沙一段和东营组沉积期, 洼陷才开始发育。不同类型洼陷的分布具有分区性, 其主力烃源岩系及生烃期不同。

蒋有录等 (2019, 2021) 和宋明水等 (2021) 采用模糊数学评价方法对渤海湾盆地主要含油气凹陷中的 54 个洼陷进行生烃能力评价, 认为沉积洼陷的发育类型与生烃类型整体上具有一定对应关系: 生烃能力强的洼陷, 多为继承发育型和晚期发育型洼陷; 生烃能力中等—较差的洼陷, 以早期发育型洼陷居多。富油凹陷主要由继承发育和晚期发育的生烃洼陷组成; 而由早期发育型洼陷组成的凹陷, 其含油气情况则较差。洼陷的发育类型与油气的运移距离及富集层系也具有一定相关性: 继承发育和晚期发育的生烃洼陷的供烃动力强, 油气运移

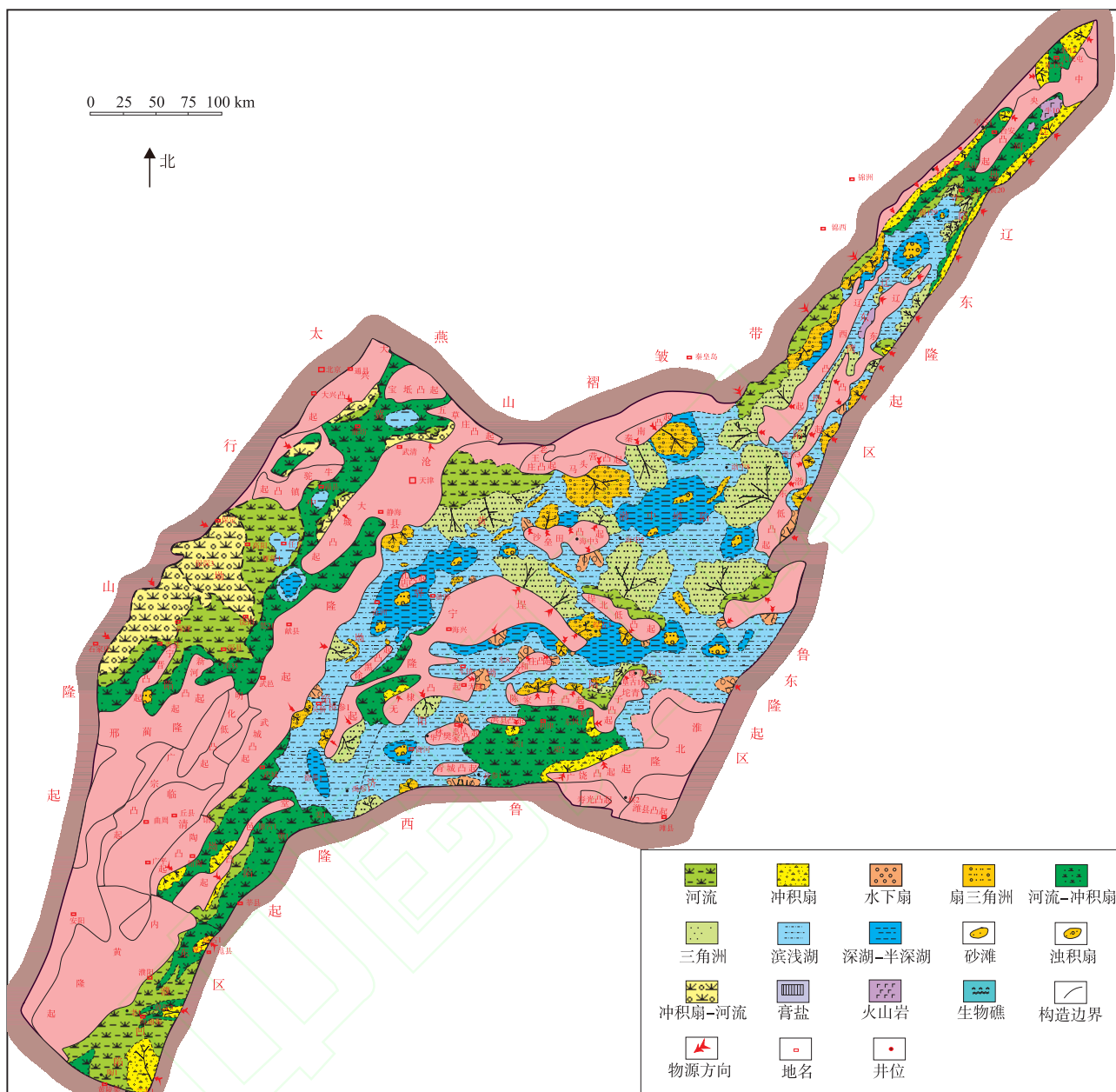


图 9 渤海湾盆地古近纪东营组沉积时期古地理

Fig. 9 Palaeogeographic map of the Paleogene Dongying Formation sedimentary age in Bohai Bay Basin

距离较长, 因此, 继承发育型洼陷中油气多富集于中部层系, 而在晚期发育型洼陷中油气在浅部层系较富集; 早期发育型洼陷的供烃动力较弱, 油气运移的距离较短且油气主要赋存于下部层系 (蒋有录等, 2019, 2021; 宋明水等, 2021)。

4 结论

1) 渤海湾盆地古近系总体演化经历了湖泊的形成—扩张—收缩、湖泊再扩张—再收缩—消亡的

演化过程。孔店组一沙四段—沙三段—沙二段沉积期为湖泊的形成—扩张—收缩的第 1 个阶段, 沙二段—沙一段—东营组沉积时期为湖泊再扩张—再收缩—消亡的阶段。

2) 渤海湾盆地古近系沉积期发育了 54 个含油气凹陷, 每个凹陷都是一个基本的沉积单元, 凹陷中的深湖亚相泥岩构成烃源岩, 而在凹陷的边缘发育的近岸水下扇、扇三角洲、三角洲、滩坝等砂体, 构成潜在的储集层, 在有利的成藏条件下, 凹

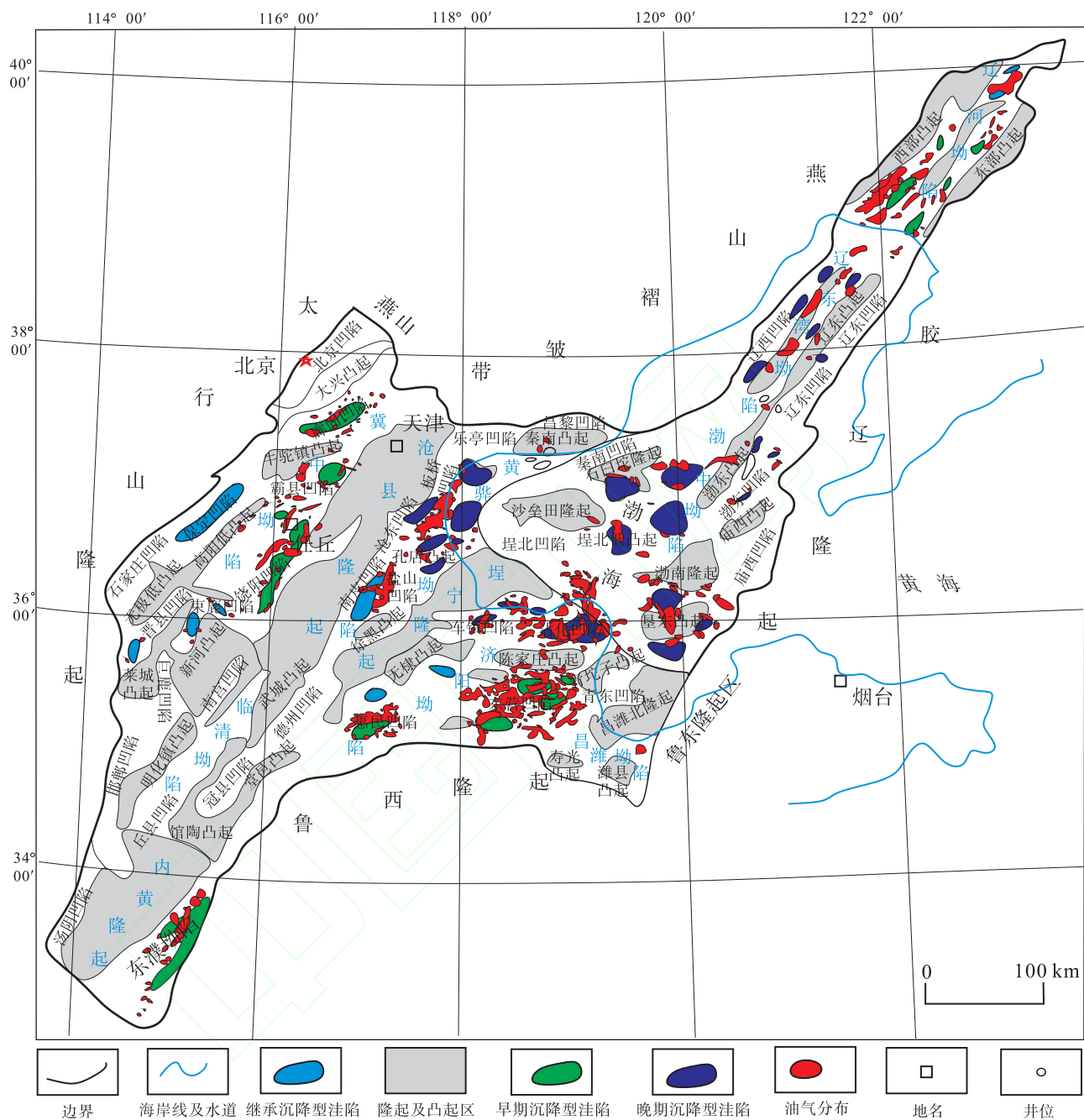


图 10 渤海湾盆地古近系不同类型洼陷与油气分布 (据蒋有录等, 2019)

Fig. 10 Oil and gas distribution of the Paleogene in different types of sags in Bohai Bay Basin (after to Jiang *et al.*, 2019)

陷中央的烃源岩向周围与之互层的储集层供烃形成油藏, 因此每个凹陷就是一个独立的油气运移—聚集系统。

3) 富油凹陷主要由继承发育和晚期发育的生烃洼陷组成; 而由早期发育型洼陷组成的凹陷, 其含油气情况则较差。洼陷的发育类型与油气的运移

距离及富集层系也具有一定相关性: 继承发育和晚期发育的生烃洼陷的供烃动力强, 油气运移距离较长, 因此, 继承发育型洼陷中油气多富集于中部层系, 而在晚期发育型洼陷中油气在浅部层系较富集; 早期发育型洼陷的供烃动力较弱, 油气运移的距离较短且油气主要赋存于下部层系。

参考文献 (References)

- 陈世悦,张顺,王永诗. 2016. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征. 石油勘探与开发, 43(2): 198-208. [Chen S Y, Zhang S, Wang Y S. 2016. Lithofacies types and reservoir characteristics of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying Sag, Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development, 43(2): 198-208]
- 陈凯,漆家福,刘震. 2012. 渤海海域渤东地区新生代断裂特征及对油气的控制. 地质科技情报, 31(1): 63-71. [Chen K, Qi J F, Liu Z. 2012. Characteristics of Cenozoic faults and their control on oil and gas in the Bodong area of the Bohai Sea. Geological Science and Technology Information, 31(1): 63-71]
- 董艳蕾,朱筱敏,李德江. 2007. 渤海湾盆地辽东湾地区古近系地震相研究. 沉积学报, 25(4): 554-563. [Dong Y L, Zhu X M, Li D J. 2007. Research on Paleogene seismic facies in Liaodong Bay area, Bohai Bay Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 25(4): 554-563]
- 杜威,纪友亮,季梦瑶,金治光,赫兰双,冉爱华,谢伟,尹天豪. 2020. 渤海湾盆地饶阳凹陷早渐新世高精度年代地层格架建立及意义. 中国石油大学学报(自然科学版), 44(4): 142-151. [Du W, Ji Y L, Ji M Y, Jin Z G, He L S, Ran A H, Xie W, Yin T H. 2020. Establishment and significance of early Oligocene high-precision chronostratigraphic framework in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 44(4): 142-151]
- 冯文杰,芦凤明,吴胜和. 2018. 断陷湖盆长轴缓坡辫状河三角洲前缘储层构型研究: 以大港枣园油田枣南断块孔一段枣 V 油组为例. 中国矿业大学学报, 47(2): 158-170. [Feng W J, Lu F M, Wu S H. 2018. Study on the reservoir architecture of the braided river delta front on the long axis of the faulted lake basin: a case study of the Zao V oil formation in the first member of the first section of the Zaonan fault block in Dagang Zaoyuan Oilfield. Journal of China University of Mining and Technology, 47(2): 158-170]
- 冯有良. 2005. 断陷盆地层序格架中岩性地层油气藏分布特征. 石油学报, 26(4): 17-22. [Feng Y L. 2005. Distribution characteristics of lithologic stratigraphic oil and gas reservoirs in the sequence framework of faulted basins. Acta Petrolei Sinica, 26(4): 17-22]
- 冯有良,周海民,任建业. 2010. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应. 中国科学: 地球科学, 40(10): 1356-1376. [Feng Y L, Zhou H M, Ren J Y. 2010. Paleogene sequence stratigraphy in the eastern Bohai Bay Basin and its response to tectonic activity. Science China: Earth Science, 40(10): 1356-1376]
- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学. 北京: 石油工业出版社. [Feng Z Z. 1993. Sedimentary Petrology. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 高红灿,郑荣才,陈发亮. 2011. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组层序地层. 石油与天然气地质, 32(54): 839-850. [Gao H C, Zheng R C, Chen F L. 2011. Sequence stratigraphy of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin. Oil and Gas Geology, 32(54): 839-850]
- 关世聪等. 1984. 中国海陆变迁海域沉积相与油气. 北京: 科学出版社. [Guan S C et al. 1984. Sedimentary facies and oil and gas in China's sea-land transition area. Beijing: Science Press]
- 何仕斌,朱伟林,李丽霞. 2001. 渤中凹陷沉积演化上和第三系储盖组合分析. 石油学报, 22(2): 38-43. [He S B, Zhu W L, Li L X. 2001. Sedimentary evolution and analysis of upper Tertiary reservoir-caprock combination in Bozhong Sag. Acta Petrolei Sinica, 22(2): 38-43]
- 胡见义,牛嘉玉. 2001. 渤海湾盆地油气聚集理论和勘探实践的再深化. 石油学报, 22(1): 1-5. [Hu J Y, Niu J Y. 2001. Further deepening of oil and gas accumulation theory and exploration practice in Bohai Bay Basin. Acta Petrolei Sinica, 22(1): 1-5]
- 胡孝林,张金森,张功成,丁放. 2000. 渤中凹陷及其周围东营组层序地层特征. 中国海上油气(地质), 14(6): 375-383. [Hu X L, Zhang J M, Zhang G C, Ding F. 2000. Sequence stratigraphic characteristics of the Bozhong Sag and its surrounding Dongying Formation. China Offshore Oil and Gas (Geology), 14(6): 375-383]
- 黄众,朱红涛,周心怀. 2012. 渤中坳陷西斜坡 BZ3-8 区块东营组东二下高分辨率井震层序及地震沉积学. 海洋地质与第四纪地质, 32(1): 61-67. [Huang Z, Zhu H T, Zhou X H. 2012. High-resolution well-seismic sequence and seismic sedimentology of the second lower Dongying Formation in the BZ3-8 block of the western slope of the Bozhong Depression. Marine Geology and Quaternary Geology, 32(1): 61-67]
- 黄雷,周心怀,刘池洋. 2009. 渤海海域新生代盆地演化的重要转折期: 证据及区域动力学分析. 中国科学: 地球科学, 42(6): 893-904. [Huang L, Zhou X H, Liu C Y. 2009. An important turning point in the evolution of Cenozoic basins in the Bohai Sea: evidence and regional dynamic analysis. China Science: Earth Science, 42(6): 893-904]
- 纪友亮,张世奇. 1996. 陆相断陷湖盆层序地层学. 北京: 石油工业出版社. [Ji Y L, Zhang S Q. 1996. Sequence Stratigraphy of Continental Fault Depression Lacustrine Basin. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 纪友亮,张世奇. 1998. 层序地层学原理及层序成因机制模式. 北京: 地质出版社. [Ji Y L, Zhang S Q. 1998. Principles of Sequence Stratigraphy and Sequence Genetic Mechanism Model. Beijing: Geological Publishing House]
- 纪友亮,冯建辉,王生朗,张宏安,王德仁. 2005. 东濮凹陷古近系沙河街组沙三段沉积期湖岸线的变化及岩相古地理特征. 古地理学报, 7(2): 145-156. [Ji Y L, Feng J H, Wang S L, Zhang H A, Wang D R. 2005. Variation of lake shoreline and lithofacies palaeogeography characters during sedimentary period of 3rd Member of Shahejie Formation of Paleogene in Dongpu Depression. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 7(2): 145-156]
- 姜华,王华,林正良. 2009. 南堡凹陷古近纪幕式裂陷作用及其对沉积充填的控制. 沉积学报, 27(5): 976-982. [Jiang H, Wang H, Lin Z L. 2009. Paleogene episodic rifting and its control on sedimentary filling in Nanpu Sag. Acta Sedimentologica Sinica, 27(5): 976

- 982]
- 蒋有录,苏圣民,刘华,王永诗,刘景东. 2019. 渤海湾盆地新生界沉积洼陷类型及与油气富集的关系. 石油学报, 40(6): 635-645. [Jiang Y L, Su S M, Liu H, Wang Y S, Liu J D. 2019. Types of Cenozoic sedimentary depressions and their relationship with oil and gas enrichment in the Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(6): 635-645]
- 蒋有录,苏圣民,刘华,赵鸿皓. 2021. 渤海湾盆地油气成藏期差异性及其主控因素. 石油与天然气地质, 46(2): 1255-1264. [Jiang Y L, Su S M, Liu H, Zhao H H. 2021. Differences and main controlling factors of hydrocarbon accumulation period in Bohai Bay Basin, *Oil and Gas Geology*, 46(2): 1255-1264]
- 李建平,杨波,周心怀. 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): 1-9. [Li J P, Yang B, Zhou X H. 2012. Sequence stratigraphy and sedimentary facies analysis of Dongying Formation in Bozhong Sag. *Journal of Northeast Petroleum University*, 36(4): 1-9]
- 李三忠,索艳慧,戴黎明. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地质前缘, 17(4): 64-89. [Li S Z, Suo Y H, Dai L M. 2010. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64-89]
- 林玉祥,孟彩,韩继雷,朱传真,王玉伟,赵慧,曹高社. 2015. 华北地台区古近纪—新近纪岩相古地理特征. 中国地质, 42(4): 1058-1067. [Lin Y X, Meng C, Han J L, Zhu C Z, Wang Y W, Zhao H, Cao G S. 2015. Paleogene-Neogene lithofacies and paleogeographic features in North China Platform Area. *China Geology*, 42(4): 1058-1067]
- 刘鸿允. 1959. 中国古地图. 北京: 科学出版社. [Liu H Y. 1959. *Paleogeographic Map of China*. Beijing: Science Press]
- 刘强虎,朱筱敏,李顺利. 2017. 沙垒田凸起西部断裂陡坡型源-汇系统. 地球科学, 42(11): 1883-1896. [Liu Q H, Zhu X M, Li S L. 2017. Steep slope type source-sink system of the western Shaleitian uplift. *Earth Science*, 42(11): 1883-1896]
- 刘鑫金,刘惠民,宋国奇. 2017. 济阳拗陷东营三角洲前缘斜坡重力流成因砂体特征及形成条件. 中国石油大学学报(自然科学版), 41(4): 36-45. [Liu X J, Liu H M, Song G Q. 2017. Characteristics and formation condition of gravity flow developing in low-lying slope zone of Dongying delta in Jiyang depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 41(4): 36-45]
- 罗妮娜,侯守探,纪友亮,吕文睿,张艺楼,陈佩磊,李圣明,张兰. 2020. 渤海湾盆地饶阳凹陷大王庄地区古近系沙三上亚段混积模式研究. 沉积学报, 38(5): 1037-1048. [Luo N N, Hou S T, Ji Y L, Lü W R, Zhang Y L, Chen P L, Li S M, Zhang L. 2020. Study on the mixed sedimentary model of the Paleogene Upper 3rd Member of Shahejie Formation in the Dawangzhuang area of Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(5): 1037-1048]
- 年涛. 2019. 东营凹陷及其周缘地区古近系孔—沙四下亚段沉积相研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1-165. [Nian T. 2019. The sedimentary facies study of the Eocene Ek1 to the Lower Es4 Formation in the Dongying Sag and its peripheral regions. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1-165]
- 年涛,姜在兴,王贵文,贾光华,闫晓倩,孟嘉轶,吕江锋. 2021. 渤海湾盆地东营凹陷始新统红层沉积再认识. 沉积学报, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.086. [Nian T, Jiang Z X, Wang G W, Jia G H, Yan X Q, Meng J Y, Lü J F. 2021. Re-understanding of Eocene red bed sediments in Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.086]
- 牛嘉玉,谯汉生. 1999. 中国东部油气勘探新领域与前景: 中国科协首届年会论文集(下). 北京: 石油工业出版社. [Niu J Y, Qiao H S. 1999. New Fields and Prospects of Oil and Gas Exploration in Eastern China: Proceedings of the First Annual Conference of China Association for Science and Technology (Part 2). Beijing: Petroleum Industry Press]
- 祁鹏,任建业,卢刚臣. 2010. 渤海湾盆地黄骅坳陷中北区新生代幕式沉降过程. 地球科学: 中国地质大学学报, 35(6): 1041-1052. [Qi P, Ren J Y, Lu G C. 2010. Cenozoic episodic subsidence process in the central and northern Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 35(6): 1041-1052]
- 任凤楼,柳忠泉,邱连贵,韩立国,周丽. 2008. 渤海湾盆地新生代各坳陷沉降的时空差异性. 地质科学, 43(3): 546-557. [Ren F L, Liu Z Q, Qiu L Q, Han L G, Zhou L. 2008. Spatial and temporal differences in subsidence of Cenozoic depressions in the Bohai Bay Basin. *Geological Science* 43(3): 546-557]
- 宋明水,王永诗,郝雪峰,安天下. 2021. 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力. 石油与天然气地质, 42(6): 1243-1254. [Song M S, Wang Y S, Hao X F, An T X. 2021. Paleogene deep oil and gas accumulation system and exploration potential in Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Oil and Gas Geology*, 42(6): 1243-1254]
- 孙永传,王德发,郑浚茂. 1989. 黄骅坳陷下第三系沉积体系特征. 北京: 石油工业出版社. [Sun Y C, Wang D F, Zheng J M. 1989. Characteristics of Lower Tertiary sedimentary system in Huanghua Depression. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 王永诗,王勇,朱德顺. 2016. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩优质储层成因. 中国石油勘探, 21(2): 28-36. [Wang Y S, Wang Y, Zhu D S. 2016. Genetic mechanism of high-quality glutenite reservoirs at the steep slope in northern Dongying sag. *China Petroleum Exploration*, 21(2): 28-36]
- 王鸿祯等. 1985. 中国古地图集. 北京: 地图出版社. [Wang H Z, et al. 1985. Atlas of the Palaeogeography of China. Beijing: Cartographic Publishing House]
- 吴崇筠等. 1993. 中国含油气盆地沉积学. 北京: 石油工业出版社. [Wu C Y, et al. 1993. Sedimentology of China Petroleum-bearing Basin. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 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 and provenance analysis of Pa-

- leogene sedimentary system in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 26(1): 81-88]
- 谢武仁. 2006. 渤中凹陷古近系成岩层序与优质储集层研究. 中国地质大学(北京)博士论文. [Xie W R. 2006. Research on Paleogene diagenetic sequence and high-quality reservoirs in Bozhong Depression. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 徐长贵, 许效松, 丘东洲, 赖维成, 周心怀. 2005. 辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析. *古地理学报*, 7(4): 449-459. [Xu C G, Xu X S, Qiu D Z, Lai W C, Zhou X H. 2005. Analysis of Paleogene structural framework and sequence stratigraphic framework and palaeogeography in the central and southern Liaoxi sag, Liaodong Bay area. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 7(4): 449-459]
- 杨波, 徐长贵, 王丽君. 2010. 渤中凹陷西次洼陡坡带 427 地区东营组高精度层序地层与岩性圈闭识别研究. *长江大学学报(自然科学版)*, 7(2): 37-41. [Yang B, Xu C G, Wang L J. 2010. High resolution sequence stratigraphy and lithologic trap identification of the Dongying Formation in 427 area of the West subsag, Bozhong Depression. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 7(2): 37-41]
- 杨德相, 蒋有录, 赵志刚. 2016. 冀中坳陷洼槽地质特征及其与油气分布关系. *石油地球物理勘探*, 51(5): 990-1001. [Yang D X, Jiang Y L, Zhao Z G. 2016. Geological characteristics of troughs in Jizhong Depression and their relationship with oil and gas distribution. *Petroleum Geophysical Exploration*, 51(5): 990-1001]
- 姚益民. 1995. 渤海湾盆地第三系. 北京: 石油工业出版社. [Yao Y M. 1995. Lower Tertiary of Bohai Bay Basin. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 曾洪流, 赵贤正, 朱筱敏. 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. 2015. Seismic sedimentology characteristics of recessive foreset shallow meandering river delta: taking the Suning area of Raoyang Sag, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin as an example. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5): 566-576]
- 张大智, 纪友亮, 张瑞峰, 初丽兰. 2008. 饶阳凹陷古近系层序地层研究. *地质调查与研究*, 31(1): 33-42. [Zhang D Z, Ji Y L, Zhang R F, Chu L L. 2008. Study on the Paleogene sequence stratigraphy in Raoyang Sag. *Geological Survey and Research*, 31(1): 33-42]
- 赵澄林, 刘孟慧, 纪友亮. 1992. 东濮凹陷下第三系碎屑岩沉积体系与成岩作用. 北京: 石油工业出版社. [Zhao C L, Liu M H, Ji Y L. 1992. Depositional System and Diagenesis of Lower Tertiary Clastic Rocks in Dongpu Depression. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 赵国连, 赵澄林. 2002. 渤中凹陷地震—沉积相研究. *成都理工学院学报*, 29(1): 41-48. [Zhao G L, Zhao C L. 2002. Seismic-sedimentary facies study in Bozhong Sag. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, 29(1): 41-48]
- 翟光明等. 1990-1993. 中国石油地质志, 1 卷, 3 卷, 4 卷, 5 卷, 6 卷, 7 卷, 16 卷. 北京: 石油工业出版社. [Zhai G M, et al. 1990-1993. *China Petroleum Geology*, Volume 1, Volume 3, Volume 4, Volume 5, Volume 6, Volume 7, Volume 16. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生. 2008. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 38(增刊 1): 1-10. [Zhu X M, Dong Y L, Yang J S. 2008. The Paleogene sequence stratigraphic framework and distribution of sedimentary systems in the Liaodong Bay Area. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 38(Supp.1): 1-10]
- 朱筱敏, 钟大康, 袁选俊. 2019. 中国含油气盆地沉积地质学进展. *石油勘探与开发*, 43(5): 820-829. [Zhu X M, Zhong D K, Yuan X J. 2019. Advances in sedimentary geology of petroliferous basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(5): 820-829]
- 张宸赫, 韩军铮, 纪友亮, 周勇, 苏芮, 王世超, 尹俊霞, 张素华, 唐林, 刘尽贤. 2020. 陆相湖盆扇三角洲—滩坝体系砂体展布特征与叠置模式: 以渤海湾盆地饶阳凹陷留西地区沙三上亚段为例. *天然气地球科学*, 31(4): 518-531. [Zhang C H, Han J Z, Ji Y L, Zhou Y, Su R, Wang S C, Yin J X, Zhang S H, Tang L, Liu J X. 2020. Distribution characteristics and superimposition patterns of sand bodies in the fan delta-beach-bar system in lacustrine basins: based on the upper sub-member of Es3 in Liuxi area of Rao Yang Depression in Bohai Bay Basin as an example. *Natural Gas Geoscience*, 31(4): 518-531]
- Liu J P, Xian B Z, Ji Y L, Gong C L, Wang J H, Wang Z, Chen P, Song D L, Wei W Z, Zhang X M, Dou L X. 2021. Alternating of aggradation and progradation dominated clinothems and its implications for sediment delivery to deep lake: the Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Marine and Petroleum Geology*, 114(2020): 1-14.
- Wang R, Ji Y L, Colomera L, Mountney N P, Yuan B, Li D J, Song H Y, Zhou S. 2021. Axial and transverse depositional systems of a syn-rift basin fill (Bohai Bay Basin, China). *Marine and Petroleum Geology*, 128(2021): 1-31.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐 杰)