

引用格式: 徐长贵, 杜晓峰, 庞小军, 等, 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 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 728-742. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222813](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222813)

Citation: XU C G, DU X F, PANG X J, et al., 2022. The source-sink system and its control on large-area lithologic reservoirs of the lower Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea [J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 728-742. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222813](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222813)

## 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

徐长贵<sup>1</sup>, 杜晓峰<sup>2</sup>, 庞小军<sup>2</sup>, 王启明<sup>2</sup>, 潘文静<sup>2</sup>

XU Changgui<sup>1</sup>, DU Xiaofeng<sup>2</sup>, PANG Xiaojun<sup>2</sup>, WANG Qiming<sup>2</sup>, PAN Wenjing<sup>2</sup>

1. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100010;
2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459
1. *China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China;*
2. *Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin 300459, China*

### The source-sink system and its control on large-area lithologic reservoirs of the lower Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea

**Abstract:** In recent years, a large number of large-area sand bodies have been drilled in the Neogene in the southern Bohai Sea, and several 100-million-ton oilfields have been discovered, indicating that the lower member of the Minghuazhen Formation has enormous exploration potential. The source-sink elements of the development of such sand bodies are unclear, which seriously restricts the exploration of lithologic reservoirs in the lower member of the Minghuazhen Formation. Using paleontology, heavy minerals, seismic, drilling and other data, this paper explores the source-sink system and its control on large-area lithologic reservoirs in the lower member of the Minghuazhen Formation of the southern Bohai Sea. The results show that: The Yanshan-Liaoxi uplift, the Liaodong uplift, the Luxi uplift and the Jiaodong uplift mainly develop source-sink systems in four directions in the study area's lower member of the Minghuazhen Formation. Next, the Luxi uplift and the Jiaodong uplift are relatively close. The Luxi uplift and the Liaodong uplift significantly impact the source-sink system in the study area's lower part of the Minghuazhen Formation. In contrast, the Yanshan-Liaoxi uplift has a weaker impact on the source-sink system. Three sedimentary systems, including rivers, river-lake interactions and lakes, are mainly developed in the study area's lower member of the Minghuazhen Formation. Among them, the sand bodies formed by river-lake interactions and lake shallow water deltas are larger. The study area's lower member of the Minghuazhen Formation has favorable source-sink conditions for creating large-scale sand bodies. Among them, temperate-subtropical climate, sufficient rainfall, developed paleo-water system, felsic metamorphic rocks and magmatic parent rocks, and frequent expansion and shrinkage of lakes are beneficial to the development of large-area sand bodies. The connection of channel sand-sheet sand-channel sand leads to the development of large-scale lithologic traps in the study area's lower member of the Minghuazhen Formation. Compared with channel sand alone, river-lake interactions and shallow water deltas have the potential to form large-area lithologic reservoirs. This understanding can help explore large Neogene oil and gas reservoirs in the Bohai Sea.

**Keywords:** source-sink system; large-area sand body; lithologic trap; lithologic reservoir; the lower member of the Minghuazhen Formation; southern Bohai Sea

基金项目: “十三五”国家科技重大专项 (2016ZX05024-003)

This research is financially supported by the Major Project of National Science and Technology (Grant 2016ZX05024-003)

第一作者简介: 徐长贵 (1971—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事石油地质与综合勘探研究。E-mail: [xuchg@cnooc.com.cn](mailto:xuchg@cnooc.com.cn)

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-06-29; 责任编辑: 范二平

**摘要:**近年来,在渤海南部新近系钻遇了大量大面积砂体,并发现了多个亿吨级油田,表明明化镇组下段勘探潜力巨大。该类砂体发育形成源-汇要素不清,严重制约了明下段的岩性油气藏勘探。文章利用古生物、重矿物、地震、钻井等资料,探讨了渤海南部浅层明下段源-汇体系及其对大面积岩性油气藏的控制。结果表明:渤海南部明下段沉积期发育多个方向的源-汇体系,其中,燕山-辽西隆起方向距离研究区最远,辽东隆起次之,鲁西隆起和胶东隆起较近,鲁西隆起和辽东隆起对研究区源-汇系统影响较大,燕山-辽西隆起对源-汇系统影响较弱;研究区明下段沉积期主要发育河流、河湖交互和湖泊这三种沉积体系,其中,河湖交互和湖泊浅水三角洲形成的砂体面积较大;研究区明下段沉积期具备形成大面积砂体的有利源-汇条件,其中,温带-亚热带气候、充足的降雨量、发达的古水系、长英质变质岩和岩浆岩母岩、湖泊范围频繁的扩大和缩小有利于大面积砂体的发育;河道砂-席状砂-河道砂的连通导致研究区明下段发育大面积的岩性圈闭,与单独的河道砂相比,河湖交互和浅水三角洲具有形成大面积岩性油气藏的潜力。该认识可为渤海海域新近系大型油气藏的勘探提供帮助。

**关键词:**源-汇体系;大面积砂体;岩性圈闭;岩性油气藏;明化镇组下段;渤海南部

**中图分类号:** P618.13      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-6616(2022)05-0728-15

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.20222813

## 0 引言

国内外学者对碎屑岩的源-汇体系进行了大量的研究(Septama and Bentley, 2017; 徐长贵等, 2017; 杜晓峰等, 2017; 朱红涛等, 2017; Sinclair et al., 2019; 操应长等, 2018; 胡贺伟等, 2020; Caracciolo, 2020),通过对源-汇要素(物源、沟谷、坡折、沉积和基准面变化)的研究,建立源-汇要素与碎屑岩沉积体系的富砂性和储层品质之间的关系,进行优质储层的预测,使少井区的优质储层研究从钻后总结逐渐走向钻前预测,提高了油气勘探评价中优质储层预测的成功率。近年来,源-汇体系的研究由定性、模式化逐渐发展到定量、应用化(Zeng and Zhu, 2022);源-汇体系的研究手段也越来越多样化,除了传统的碎屑组分分析、锆石测年、地震刻画等手段外,逐渐发展出高精度的测试技术、化验分析、地球物理技术、定量地质建模等(Lyster et al., 2021; 商晓飞等, 2022; Liu et al., 2022);研究的对象由盆缘源-汇体系向盆内重力流等的源-汇体系拓展(李莉妮等, 2022)。但是,国内外源-汇体系的研究主要集中在中深层源-汇体系和现代沉积的源-汇体系两方面(谈明轩等, 2020a, 2020b; 陈骥等, 2020),少有对浅层源-汇体系的研究。

新近系明化镇组下段(简称明下段)是中国东部浅层油气勘探的主要目的层系,自从蓬莱19-3油田发现之后,鲜有大型油气田的发现。学者对明下段的研究主要集中在沉积特征、油气成藏、剩余油分

布等方面,认为该段主要发育曲流河沉积,砂体之间连通性差,砂体横向变化快,很难形成大型连片砂体(赵汉卿等, 2017; 田盼盼等, 2018; 段雅君等, 2019; 李岳桐等, 2019; 牛博等, 2019; 谈明轩等, 2020a; 王利良等, 2022)。

近年来,在渤海海域南部明下段发现了垦利10-2(KL10-2)和垦利6-1(KL6-1)等大型油田,储量超过 $1.0 \times 10^8$  t(徐长贵等, 2021),揭示浅层仍然有形成大型油气田的巨大潜力。在垦利6-1和垦利10-2等亿吨级油田的勘探和评价过程中,发现明下段发育多种类型的砂体,横向上形成连片砂体和孤立砂体等多种形态,也是形成亿吨级油田的主要砂体发育方式。目前,对该海域明下段的研究主要集中在沉积类型、沉积环境、砂体构型、成藏等方面(徐长贵等, 2021; 杨超等, 2021; 王利良等, 2022),而对亿吨级油田发育区的源-汇体系研究较弱,形成大面积砂体分布的源-汇条件不清楚,严重制约了浅层大面积岩性油气藏的勘探。为了查明浅层源-汇体系对大面积岩性油气藏的控制,文中以渤海海域南部为例,综合地震、钻井、铸体薄片、古生物等资料,运用源-汇体系的理论,讨论浅层明下段源-汇体系对大面积岩性油气藏的控制作用,以期能够为渤海海域以及类似地区的浅层大面积岩性油气藏勘探提供帮助。

## 1 研究区概况

渤海海域地理上位于渤海湾盆地的东部,属于渤海湾盆地的主要组成部分,是走滑-伸展双重构

造背景下形成的一个新生代裂谷盆地,面积约 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$  (郝婧等, 2021), 郯庐断裂贯穿渤海海域。渤海南部主要由渤南低凸起、黄河口凹陷、莱北低凸起、莱州湾凹陷、垦东凸起、潍北凸起等组成(图 1a), 东部紧邻胶东隆起和辽东隆起, 西部紧靠燕山褶皱带(燕山隆起), 西南部紧邻鲁西隆起, 平面上呈凹隆相间的构造格局。

渤海南部新生代构造演化经历了多期裂陷作用(图 1b), 后又经历了新近纪以来的裂后热沉降和新构造运动(张晓庆等, 2017)。古近系沙河街组灰色泥岩、油页岩等为主要的烃源岩, 新近系明下段岩性以中薄层细砂岩与厚层紫红色、绿灰色、灰褐色泥岩的互层为主, 细砂岩为主要明下段的主要储层类型。近年来, 在明下段细砂岩中发现了多个超过亿吨级的大型油田, 揭示了明下段巨大的勘探潜力(徐长贵等, 2021)。

## 2 明下段沉积期源-汇条件

### 2.1 古气候条件

气候对河流径流量具有重要影响(Grafton et al., 2013; 石晓晴, 2018), 因此, 古气候恢复对渤海南部浅层明下段源-汇体系分析至关重要。对渤海海域南部孢粉分析显示, 明下段沉积期古气候波动剧烈, 明下段下部沉积期, 以亚热带气候为主, 天气炎热, 降雨量增多, 增强了物源区母岩的风化剥蚀能力, 供源充足, 有利于河流的发育和碎屑物质的搬运; 明下段上部以温带气候为主, 天气凉爽, 降雨量减少, 供源减弱, 河流的发育程度和碎屑物质的搬运量减少(图 2)。除此之外, 下部呈现亚热带气候为主、频繁间歇性发育温带气候的特点, 天气炎热与凉爽频繁波动、降雨量强与弱交互的发育, 有利于母岩的机械风化和形成大量碎屑物质, 也有利于河流水体的大量形成, 为大量碎屑物质的搬运提供了有利的气候条件。

孢粉含量变化对古气候具有明显的指示作用。常见于亚热带地区的金缕梅科枫香粉属(*Liquidambarpollenites*)在明下段中、下部连续稳定出现(图 2)。分布于温带-亚热带的阔叶常绿植物壳斗科栎属(*Quercoidites*) 在明下段的含量为 1.19%~25.40%, 平均值为 12.42%, 并且在明下段下部连续稳定维持较高含量, 而在明下段上部仅零星出现。主要分布于温带的松科松属(*Pinus*) 在明下段沉积

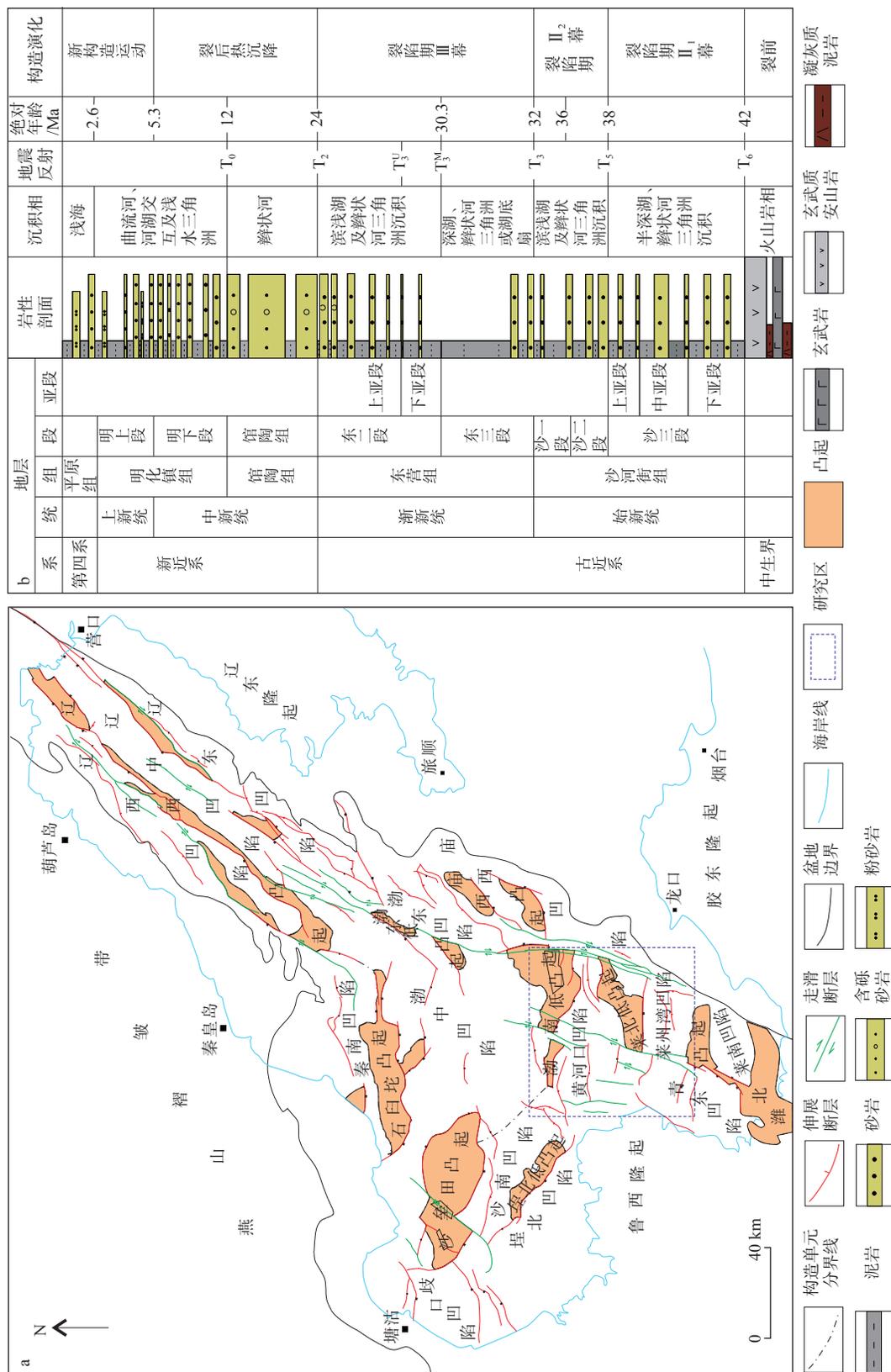
中期含量达到最高值 31.80%, 指示气温逐渐转凉, 并且主要集中于明下段的上部层位, 其含量为 5.56%~31.80%, 平均值高达 13.69%, 而明下段下部其含量为 2.63%~22.40%, 平均值为 7.17%, 显著低于明下段上部, 指示明下段沉积期古气候具有从下向上逐渐从亚热带向温带转变的趋势。从典型分子类型来看, 明下段沉积期古气候主要为温带-亚热带气候类型, 但是化石含量波动变化大, 指示气候交替变化频繁且剧烈。明下段下部沉积时期化石含量及分异度显著高于明下段上部沉积时期, 尤其是部分指示相对炎热的气候分子如芸香粉属(*Rutaceipollis*)和指示降雨量较大的云杉粉属(*Piceapollenites*)仅分布于明下段下部, 进一步反映明下段下部沉积时期整体为亚热带气候类型, 较明下段沉积晚期气候湿热。

### 2.2 物源条件

物源分析在确定盆地的沉积构造演化、沉积物物源位置和性质、沉积物搬运路径、沉积体系分布及时空演化规律中有重要的作用, 是源-汇系统研究的核心内容之一(杨仁超等, 2013; 徐长贵等, 2017)。主要方法有碎屑岩类分析法、重矿物组合分析法、元素地球化学分析(稀土元素)、地震资料的前积结构分析法、阴极发光分析法、同位素测年分析法等(王轲和翟世奎, 2020)。根据盆地结构和周缘古地貌格局, 可以了解渤海南部明下段时期主要水系分布, 在此基础上开展岩屑组分与重矿物组合分析, 明确并提高物源方向的示踪精度。

#### 2.2.1 物源分布

渤海海域作为渤海湾盆地的一部分, 西接华北中部造山带(太行山隆起), 北接燕辽-龙岗陆块(燕山褶皱带), 东为胶辽吉带(胶东隆起和辽东隆起), 南邻鲁西隆起。渤海海域新近纪盆内凸起不再提供物源, 沉积物物质供给主要受益外区域物源水系的控制。一些学者认为渤海海域南部明下段主要受到东北、西北、东南、西南这四个方向物源的影响(陈容涛等, 2017), 其中, 西北方向的燕山-辽西物源、东北方向的辽东物源为远物源, 西南方向的鲁西物源、东南方向的胶东隆起为近物源。西北部燕山-辽西物源和西南部鲁西物源主要母岩为变质岩, 次要母岩为岩浆岩; 东北部辽东物源、东南部胶东隆起主要母岩为岩浆岩, 次要母岩为变质岩与沉积岩。结合周缘古地貌与构造格局(图 3), 渤海海域南部地区邻近鲁西隆起和胶东隆起, 为优势的物



a—大地构造位置; b—地层综合柱状图

图 1 渤海海域大地构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Geotectonic position and stratigraphic comprehensive histogram of the Bohai Sea

(a) Geotectonic position; (b) Stratigraphic comprehensive histogram

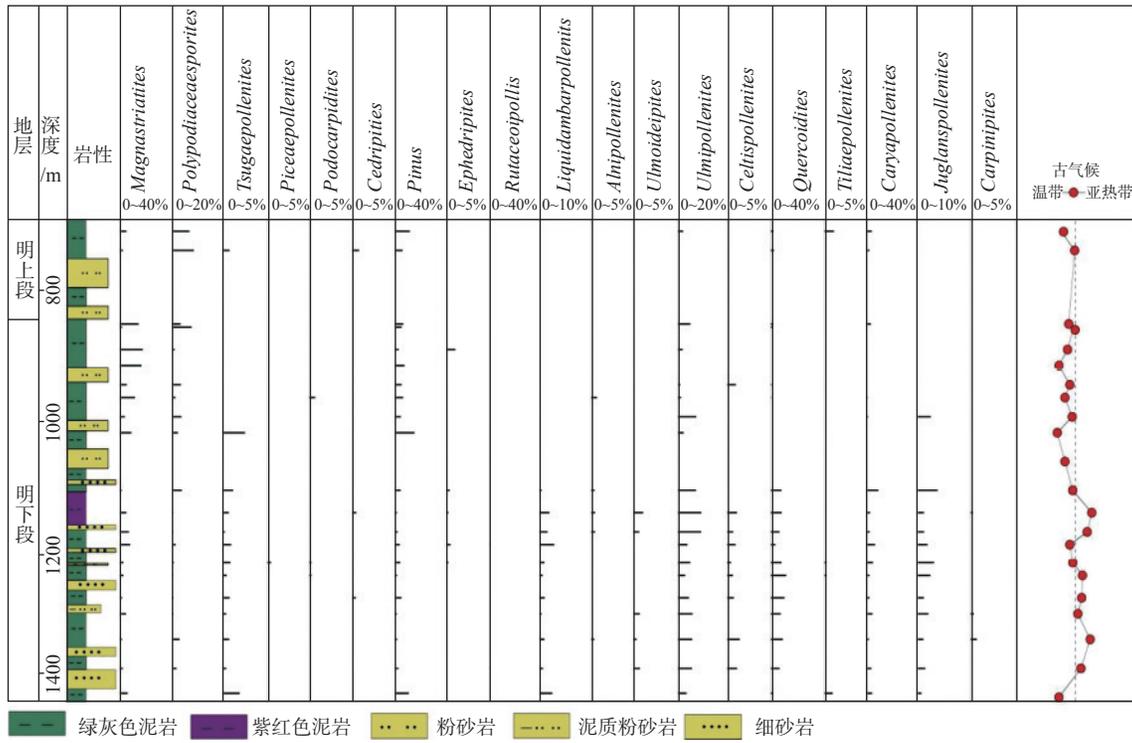


图 2 渤海南部新近纪古气候分析

Fig. 2 Paleoclimate analysis of the southern Bohai Sea of Neogene

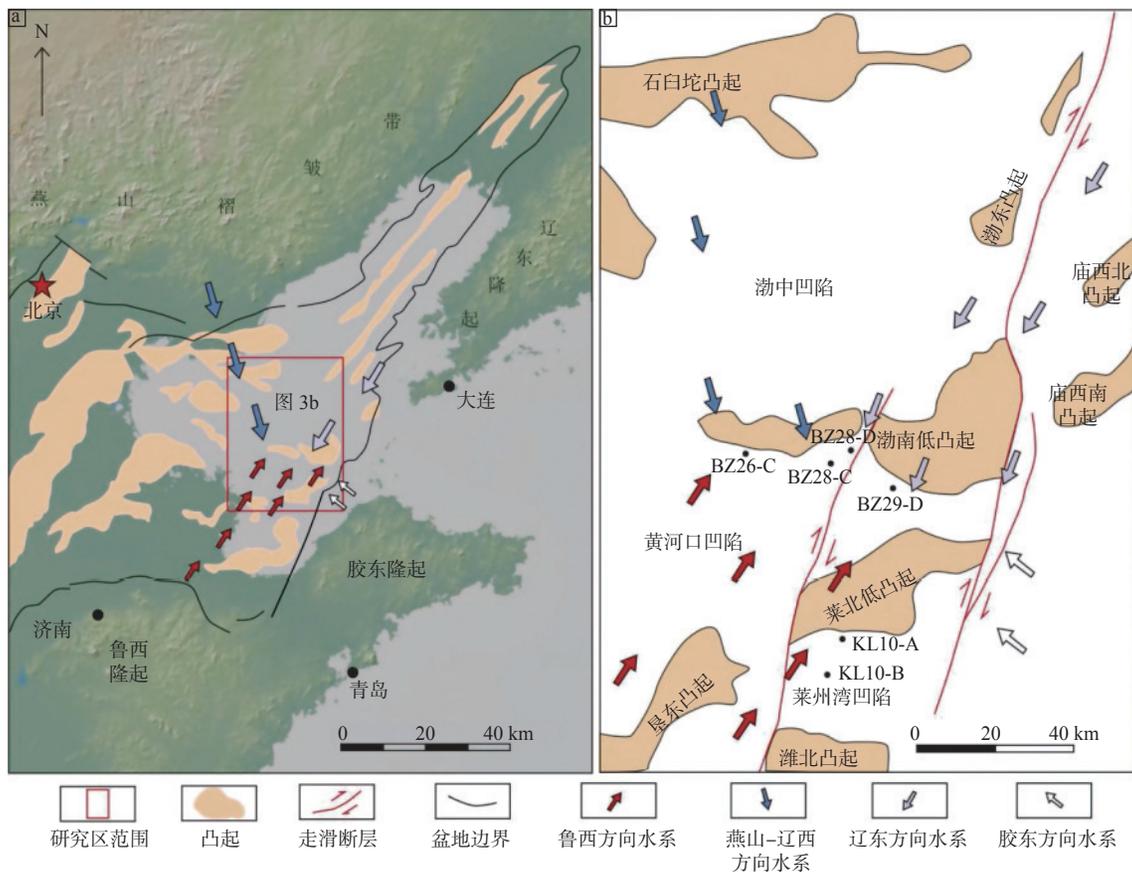


图 3 渤海南部地区物源分布及主要水系方向

Fig. 3 Source distribution and directions of the of main water systems in the southern Bohai Sea

源供给方向,而西北部和东北部的燕山-辽西和辽东物源可能为潜在的物质供给来源。

### 2.2.2 古水系特征

水系是碎屑物质搬运的主要介质,而沟谷是承载水系及其流向的主要通道,对沉积区砂体的搬运和卸载具有重要的控制作用。构造古地貌及其单元的区域展布能较好地揭示主要沟谷的分布,进而对宏观物源方向判断起到很好的指示作用(胡贺伟等, 2020)。古水系分布、古地貌与古水系叠合特征表明(图 3, 图 4),渤海南部明化镇组至少发育四个方向的古水系,分别对应西南方向鲁西隆起区、东南方向胶东隆起区、东北方向辽东隆起区和西北方向的燕山-辽西物源,沟谷展布方向与盆地坡折带之间近于垂直或斜交。其中,鲁西隆起区方向的沟谷水系最为发育,整体上呈南西-北东向分布,至研究区呈扇形散开,胶东隆起方向沟谷水系发育较少,呈南东-北西向展布,沟谷水系之间近于平

行。受研究区分布范围的限制,研究区东北部斜坡带未完整展现,辽东隆起方向的沟谷水系在古地貌上的特征相对于西南方向不是十分明显,但从区内的主要沟谷展布来看,该方向的沟谷分布及平面组合与鲁西隆起区的特点相似。此外,研究区西北部受到燕山褶皱带方向的远源影响,但影响范围主要分布在研究区的西北部。

### 2.2.3 母岩成分差异

重矿物组合及其含量变化可以半定量反映母岩性质,进而来明确物源方向(许苗苗等, 2021)。在渤海南部地区新近纪明下段共选取 6 口井数据,主要重矿物组合类型及平均含量为:绿帘石(34.28%)+石榴石(14.21%)+白钛矿(14.59%)+磁铁矿(14.14%)+褐铁矿(12.03%)+锆石(2.48%)+电气石(0.44%)。其中,绿帘石+石榴石反映变质岩的母岩类型,磁铁矿+褐铁矿+锆石+白钛矿指示岩浆岩的母岩类型,锆石+电气石+白钛矿指示沉积岩的母岩类型。明

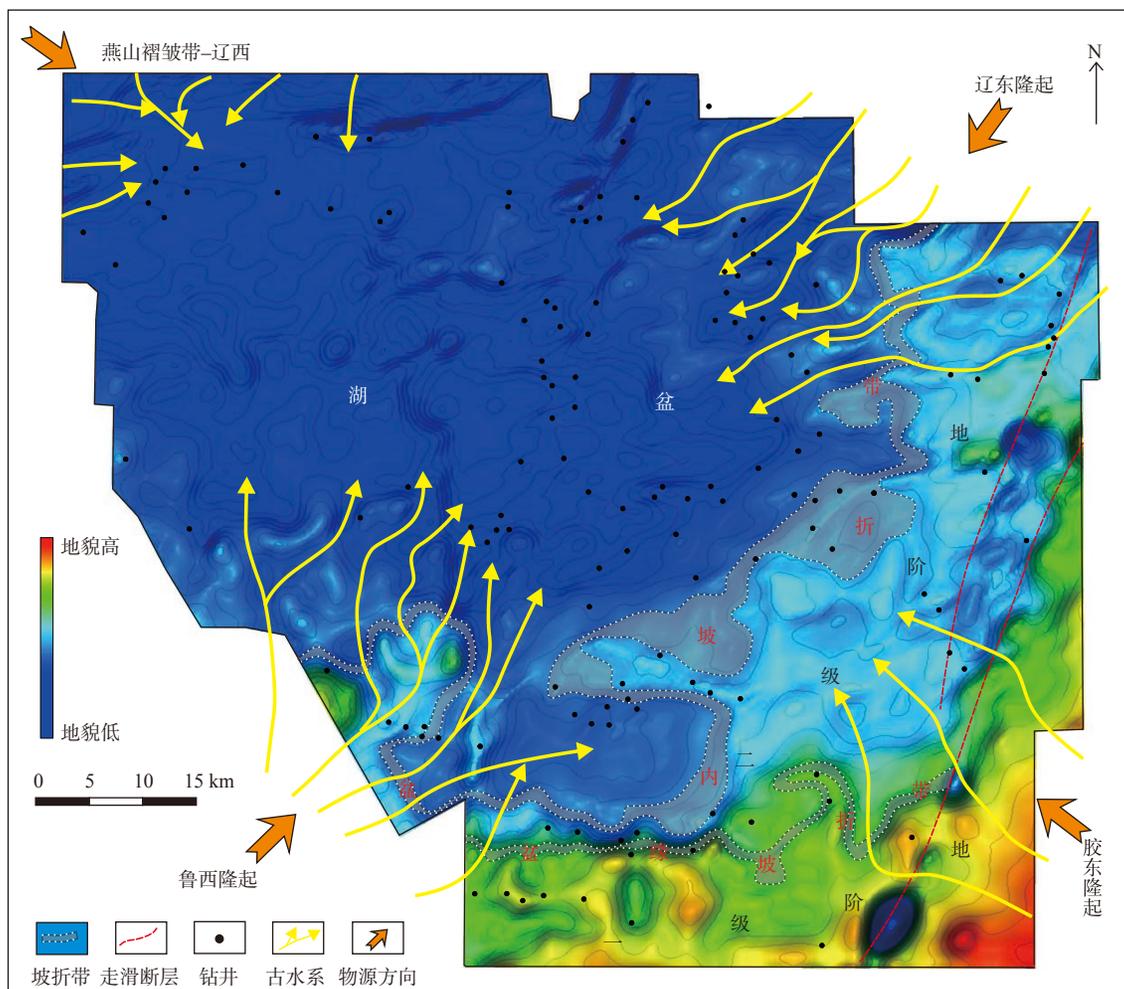


图 4 渤海南部地区明下段沉积期古地貌与古水系叠合图

Fig. 4 Superimposition of paleo-geomorphology and paleo-water system in the lower Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea

下段不同井重矿物组合百分含量平面分布存在差异,可以指示不同的物源方向(图5)。南部 KL10-A、KL10-B 井绿帘石+石榴石占比均超过 60%,反映变质岩为主要的母岩类型,指示物源主要来自南部的鲁西隆起;中东部 BZ28-D 和 BZ29-D 井绿帘石+石榴石占比<40%,褐铁矿+磁铁矿>50%,反映岩浆岩物源为主,变质岩物源次之,指示物源来自东北方向的辽东隆起(图5);而中西部 BZ26-C、BZ28-C 的绿帘石+石榴石占比也超过 60%,也反映变质岩为主要的母岩类型。陈容涛等(2017)根据碎屑砂岩骨架成分 Dickinson 三角图对该地区物源进行了分析,认为渤海南部和东部砂岩骨架数据落于岩浆弧区域,而西北部向大陆板块物源区迁移,岩屑组分中也出现了更多的沉积岩屑,指示西北部的物源受到了大陆板块物源的影响,可认为西北部受燕山-辽西地区物源的影响更大。综上,研究区南部、西南部物源仍为鲁西隆起,西北方向的物源可能受燕山-辽西物源的影响,而在东北部,鲁西隆起的物源

影响力减弱,辽东隆起的物源影响增强,东南部有少量的胶东隆起供源。

### 2.3 沉积古地貌

古地貌是确定盆地分布、盆地结构、湖泊范围、沉积体系特征及演化的重要因素(王建国等,2017;康海亮等,2021)。在区域层序地层格架分析基础上,通过估算剥蚀厚度、压实校正、古水深恢复等基础工作,重建了研究区明下段不同沉积期的古地貌特征。

渤海南部明下段发育明显的多级坡折带(图4),形成了独特的坡折体系,坡折带之间对应坳陷盆地不同沉积地貌单元,且湖盆范围逐步扩大(图6,图7)。坡度整体较缓,小于 $0.5^{\circ}$ 。其中,一级阶地对应陆相区,坡度约为 $0.38^{\circ}$ ,坡度较陡,距离物源区较近,易发育河流沉积;二级阶地对应古湖岸带,坡度约 $0.26^{\circ}$ ,坡度变缓,水深约 $0\sim 3.5\text{ m}$ ,发育河流和浅水三角洲交互沉积;三级阶地对应盆地区,约为 $0.1^{\circ}$ ,坡度变得更缓,往往发育在沉积古地貌中最低

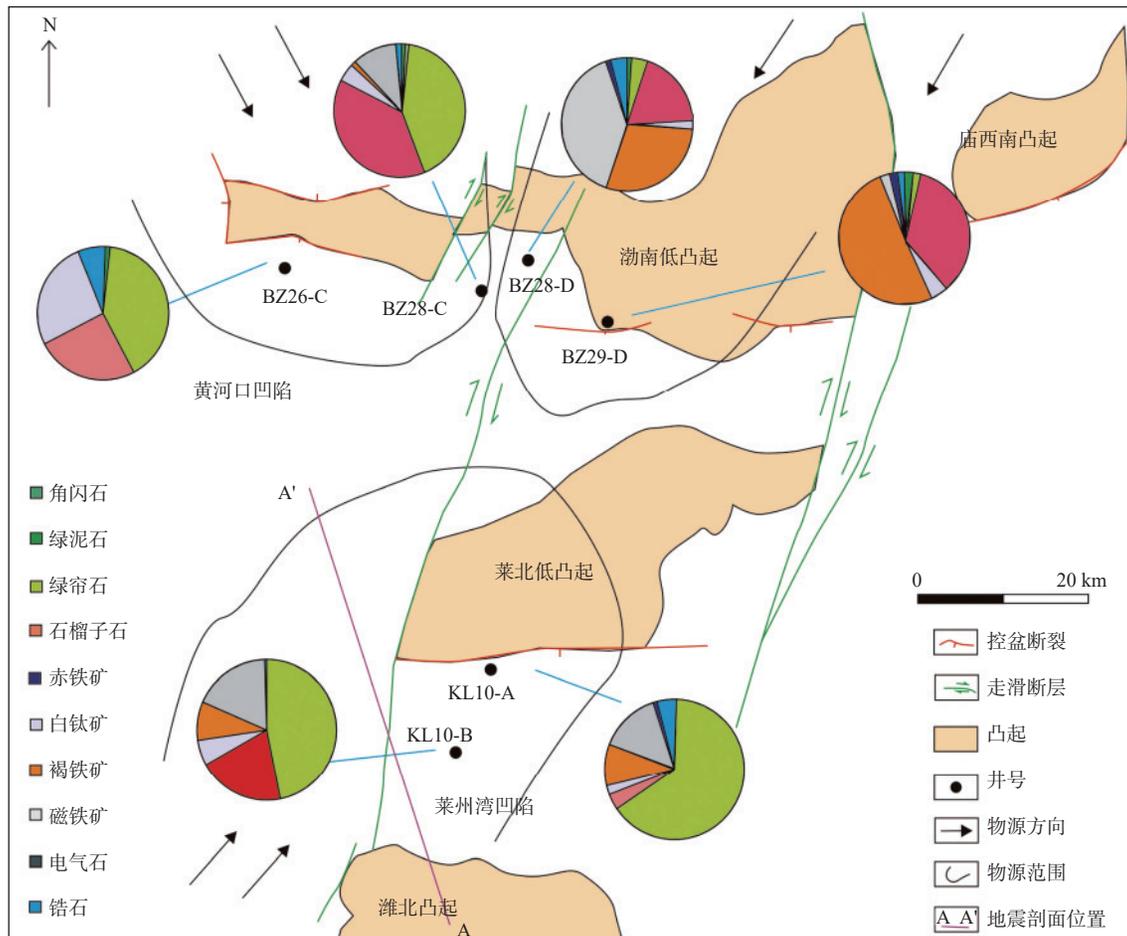


图5 渤海南部地区明下段重矿物相对百分含量对比

Fig. 5 Comparison of the relative percentages of heavy minerals in the lower member of the Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea

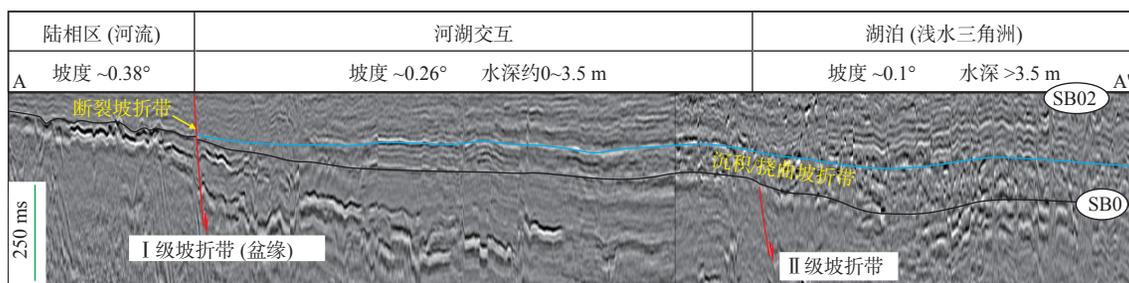
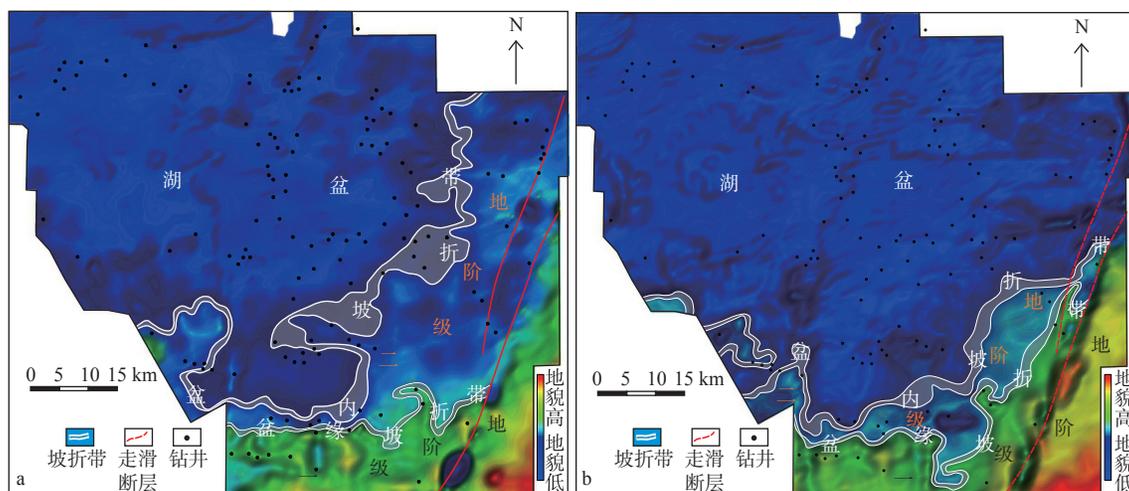


图 6 渤海南部地区明下段下部地震剖面特征 (SB02 层拉平; 地震剖面位置见图 5)

Fig. 6 Seismic profile characteristics of the lower lower part of the lower member of the Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea (The SB02 layer is flattened. See Fig. 5 for the location of the seismic section)



a—明下段下部古地貌; b—明下段上部古地貌

图 7 渤海南部地区明下段不同沉积期古地貌特征

Fig. 7 Paleo-geomorphic characteristics of the lower member of the Minghuazhen Formation in different depositional stages in the southern Bohai Sea

(a) Paleo-geomorphic characteristics of the lower part of the lower member of the Minghuazhen Formation; (b) Paleo-geomorphic characteristics of the upper part of the lower member of the Minghuazhen Formation

洼且最平坦的位置, 是小型湖盆发育的位置, 水深超过 3.5 m, 以浅水三角洲沉积为主。

总体上, 渤海南部新近系明下段沉积古地貌表现为三个显著特征: ①受郯庐断裂带东支活动以及靠近盆地边缘的影响, 研究区表现为东南高、西南低, 盆地主要分布在北部广大区域; ②受新近纪稳定的构造沉降控制, 导致了典型的坳陷湖盆萎缩期盆地地貌的形成, 盆地充填为填平补齐过程, 南部地区多为宽缓的大斜坡; 新近纪构造古地貌坡度整体较缓, 通常 <math>1^\circ</math>, 大部分地区如盆地斜坡和湖盆内部坡度往往介于 <math>0.1^\circ\sim 0.3^\circ</math>, 表现出明显的盆大水浅、地形平缓的特征; ③明化镇组沉积期构造沉降速率有所增强, 在经历馆陶组沉积期填平补齐盆地演化后, 湖盆范围明显扩大且多个洼陷连成一片, 具备“盆大水浅、地形平缓”的特征(图 6, 图 7)。

### 3 大面积砂体分布特征

#### 3.1 沉积体系类型

通过对钻井、测井、岩芯、壁芯、古生物以及地震相综合表征, 结合区域沉积背景及沉积古地貌, 在渤海南部地区明下段识别出河流体系、河湖交互体系和湖泊体系。

##### 3.1.1 河流体系

渤海南部明下段河流体系主要发育在研究区西南部和东南部近物源区, 为典型的单一河道曲流河沉积。研究区曲流河坡降小、河深大、宽深比小、河道侧向迁移明显, 点坝砂体普遍发育。研究区曲流河沉积主要岩石类型有含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩和红色或黄色泥岩(图 8), 单层砂岩

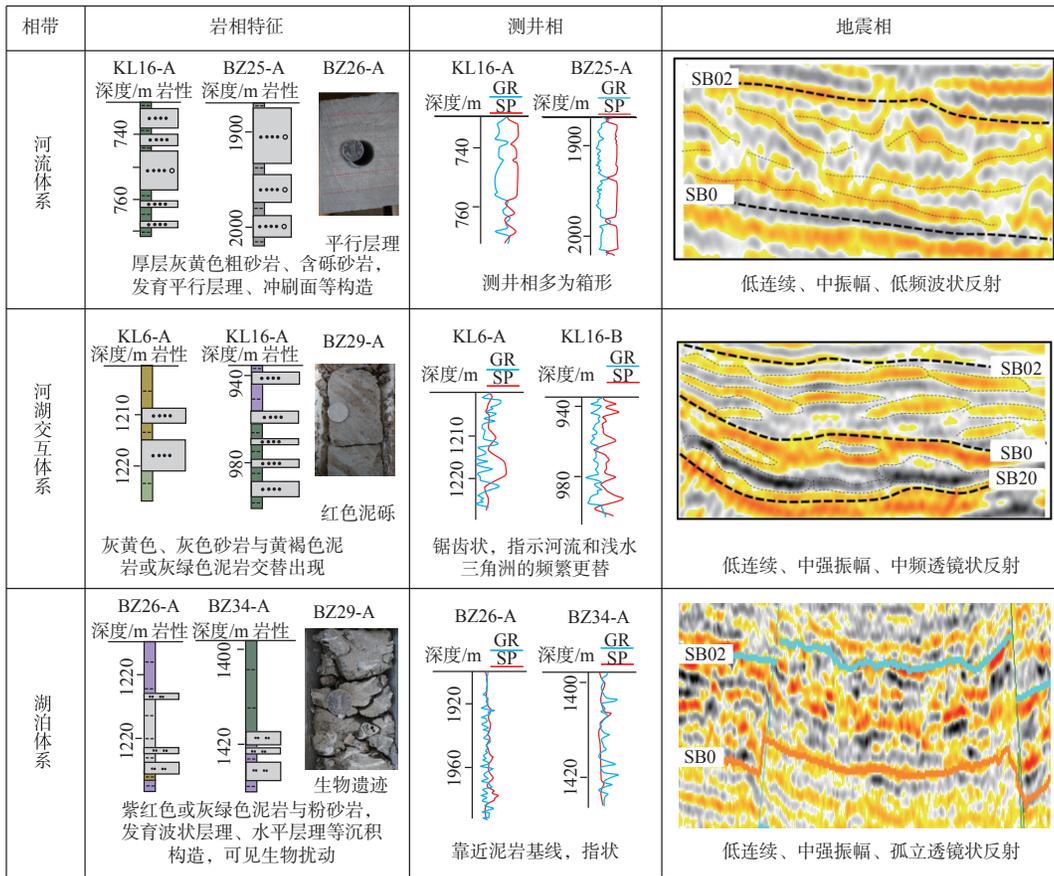


图8 河流体系—河湖交互体系—湖泊体系沉积特征对比分图

Fig. 8 Comparison of sedimentary characteristics of river system, river-lake interaction system and lake system

厚度相对较大，骨架颗粒分选和磨圆一般，成分成熟度介于0.4~0.6，岩层中发育有平行层理、交错层理、冲刷面等沉积构造。

曲流河沉积的地震反射特征具有明显的河道沉积响应(图8)，在地震剖面中多为中强振幅、中低连续、中频的地震反射结构，具有明显的波状-透镜状地震反射构型。与辫状河河道沉积地震反射不同的是，由于曲流河河道多以多期孤立河道的方式存在，且河道砂体通常被河漫等细粒沉积物所夹持，因此在地震振幅上明显强于辫状河三角洲，而波状-透镜状地震反射则被解释为孤立多期河道。

### 3.1.2 河湖交互体系

湖平面的升降控制着湖岸线的扩张和收缩，湖盆坡度越平缓，同等水深变化下湖岸线的变化越明显(孙雨等, 2015; 杨超等, 2021)。渤海南部地区明下段盆地范围大，构造坡度平缓，在明下段沉积期，低水位和高水位的转换导致湖平面频繁的波动，古湖岸线在较大范围内来回迁移，由最低水位和最高水位期湖岸线范围称为河湖交互带。在低水位时期，河湖交互带以发育河流体系为主，在高水位期，

河湖交互体带以湖泊体系为主，由于研究区稳定的沉降、极缓的坡降和频繁变化的古水深，导致在河湖交互带内，河流相沉积和浅水三角洲相沉积频繁交替，造成了河湖交互带垂向上浅水三角洲沉积和河流相沉积频繁相互叠置，并且交互带内的泥岩沉积频繁暴露于地表，导致大量泥岩氧化而呈红色，且泥岩中多见生物扰动，同时在砂岩中可以出现红色或者灰绿色泥砾散布(图8)。河湖交互体系砂岩类型以含砾砂岩或细砂岩为主，单层砂岩厚度变小；在测井相上呈现粗锯齿状，指示河流相和浅水三角洲沉积的频繁更替作用；砂体构型多为侧向叠置拼合，呈透镜-拼合板状，反映出明显的底荷-悬浮负载作用。

河湖交互带地震振幅整体上强于河流体系(图8)，其中，中弱振幅、中低连续性波状-蠕虫状地震相多为低水位期曲流河沉积地震响应，在古湖岸带向陆一侧更为发育，向盆地方向地震响应则更加趋向于浅水三角洲沉积。在平面分布上，由于古湖岸带砂体是浅水三角洲分流河道和陆相河流河道的多期叠合，地震属性反映出的砂体平面特征多为连片叠

合的朵叶状, 平行于岸线分布。

### 3.1.3 湖泊体系

渤海南部明下段湖泊体系主要发育在研究区中部, 在湖泊体系内部主要发育浅水三角洲、滨浅湖两种沉积相。

在明下段沉积期, 盆地地形坡度较缓, 物源供给充足, 构造沉降缓慢, 发育的浅水三角洲以浅水三角洲平原亚相为主。沉积物粒度较细, 以薄层细砂岩、粉砂岩和泥岩为主, 多发育正粒序, 测井曲线主要表现为指状或钟状, 靠近泥岩基线(图 8)。沉积构造可见平行层理、交错层理、波状层理、脉状层理等, 分流河道的频繁侧向迁移导致了沉积构造少有保留, 前缘和前三三角洲的泥岩被改造, 在砂岩中形成了大量破碎泥岩岩块。同时, 古水深的频繁变化, 导致部分泥岩被暴露氧化成红色, 且与灰绿色泥岩掺杂存在。研究区浅水三角洲的地震反射特征受可容空间变化的控制作用明显, 在层序发育的早期晚期, 可容空间较小, 河道具有一定的下切作用, 河道间相互叠置特征明显, 地震反射多为中连续、中强振幅的波状-板状构型。在层序发育的中晚期, 随着湖平面上升, 可容空间增加, 孤立的分流河道发育, 地震反射则以低连续、中强振幅的孤立透镜状为主。

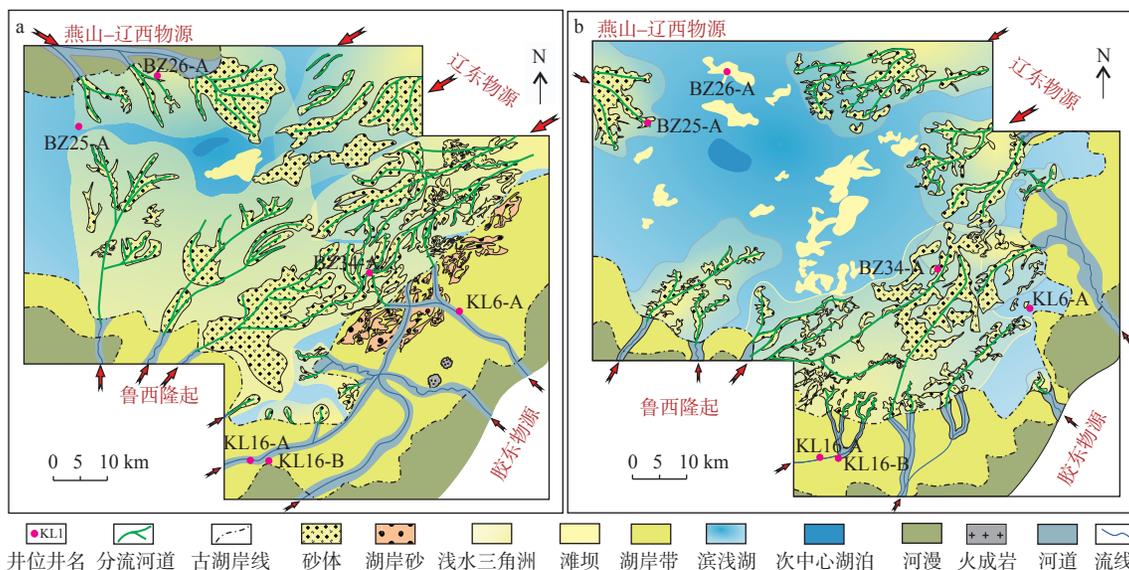
滨浅湖相主要分布在研究区盆地中北部, 沉积

岩类型发育粉砂岩、粉砂质泥岩、浅灰色-灰绿色块状泥岩, 多发育水平层理、波状层理(图 8)。由于明下段盆地坡缓水浅, 滨浅湖相沉积范围随着湖平面的变化迁移明显, 并且呈现出湖岸线交互频繁的特征, 低水位期岸线整体向盆地方向迁移, 而高水位期岸线整体向物源方向迁移。

### 3.2 大面积砂体沉积分布特征

渤海南部地区明下段河流体系砂质沉积主要来源于曲流河河道砂体, 主要分布在曲流河河道的摆动范围内, 在平面上呈细条带状分布(图 9)。湖泊体系浅水三角洲相砂体呈朵叶状, 平面分布比曲流河砂体广泛, 但是三角洲砂体面积依然比较局限, 朵叶体之间相互孤立, 整体连通性较差。在河湖交互体系内, 由于地形坡度极缓, 宽阔的河湖交互带成为河流沉积物的主要卸载区, 沉积作用最为活跃, 同时, 反复周期性淹没-暴露造成浅水三角洲与曲流河交互发育, 沉积物垂向加积作用弱而横向分散作用强, 河湖交互过程造成频繁的河流改道、交切叠置, 从而形成以河道砂体为骨架、以决口扇和河漫席状砂体为河道间沉积物的大型复合连片砂体。所以河湖交互带的分布控制了大面积砂体的平面展布。

明下段沉积早期, 湖泊区面积较大, 分布在研究区北西部, 在此阶段湖盆快速扩张, 湖岸线交互



a—沉积早期; b—沉积晚期

图 9 渤海南部地区明下段沉积体系展布图

Fig. 9 Distribution map of the sedimentary systems in the early and late sedimentation of the lower Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea

(a) Early sedimentation; (b) Late sedimentation

频繁,河湖交互带广泛分布在研究区东南部(图 9a),围绕湖区呈半环状展布,范围较大,此时大面积连片砂体在河湖交互带内广泛发育,整体呈宽条带状平行湖岸线展布。明下段晚期湖泊区面积扩大,但是湖水较浅,湖平面变化范围较小,湖岸线频繁交互但是交互范围有限,此时的河湖交互范围要比明下段沉积早期窄,整体也平行于岸线呈半环状分布,大面积连片砂体在河湖交互带内呈窄条带状展布(图 9b)。

#### 4 源-汇体系对大面积砂体发育的控制

渤海海域明下段沉积期,构造稳定,盆地处于整体沉降阶段,盆地的源-汇体系受古气候、物源供给、搬运方式、古地貌的控制,物源体系、搬运体系和汇聚体系共同控制了搬运碎屑沉积物的能力和大面积砂体的分布。

##### 4.1 古气候对大面积砂体的控制

古气候控制了降雨的频率、降雨量,进一步控制了湖泊水体的变化范围和大规模砂体的分布范围。渤海海域明下段存在两种古气候类型(图 2),明下段沉积早期以亚热带气候为主,温度较高。后期以温带气候为主,温度较低。明下段沉积早期高温亚热带气候条件下,降雨的频率多,雨水充足,为河流的长距离搬运和碎屑物的承载量提供了有力的古气候条件。另外,该时期的气候频繁向温带气候变化,降雨量频繁波动,导致湖泊范围反复扩大一缩小,河道砂体频繁决口和改道,以及河道席状砂化,最终形成河道和席状砂组成的大面积砂体

(图 10),该时期最有利于大面积砂体的发育。至明化镇沉积晚期,受温带气候的影响,降雨的频率降低,降雨量减少,河流搬运能力减弱,河流承载碎屑物质的能力减弱,向研究区提供碎屑物质的能力降低,可供沉积的砂体变少,砂体规模和分布范围逐渐变小,大面积砂体的范围减小。

##### 4.2 物源供给对大面积砂体的控制

长英质母岩能够为砂体提供充足的碎屑物质,来自西南的鲁西隆起区、东南的胶东隆起区、东北的辽东隆起区和西北的燕山-辽西隆起等四个物源区(尤其是辽东隆起、鲁西隆起和胶东隆起)为研究区明下段大面积砂体的发育提供了物质基础。渤海南部明下段母岩主要以变质岩或变质岩与岩浆岩的组合为主(图 5),能够为大面积砂体的发育提供充足的物质成分。明下段沉积期的古水系主要分布在燕山-辽西隆起、辽东隆起、鲁西隆起和胶东隆起四个方向(图 3,图 4),其中,燕山-辽西隆起距离研究区较远,辽东隆起、鲁西隆起和胶东隆起距离研究区较近,但胶东隆起水系发育较少,因此,辽东隆起和鲁西隆起为研究区明下段砂体的主要供源方向,较近、较多的古水系短距离搬运碎屑物质的能力较强。辽东隆起和鲁西隆起充足的供源为明下段大面积砂体的发育提供了物质和古水系保障。

##### 4.3 搬运体系对大面积砂体的控制

隆起带与湖泊之间形成了面积较大的可供河流搬运的地带,搬运体系主要发育在该地带(图 9,图 10)。研究区明下段的搬运体系主要为河流。河流从上

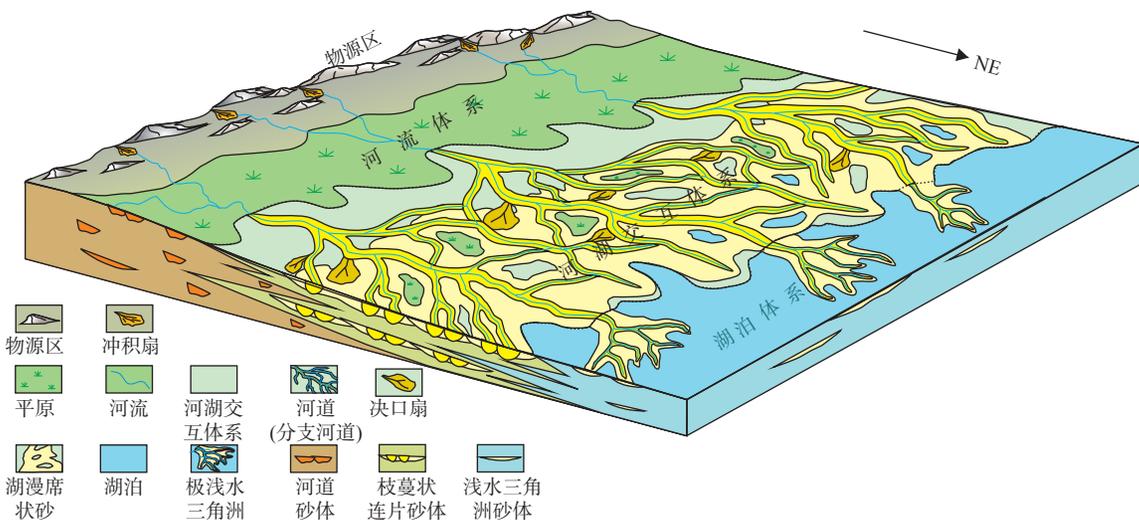


图 10 渤海南部地区明下段沉积期源-汇体系模式图

Fig. 10 Model diagram of the source-sink system in the lower member of the Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea

游携带碎屑物质向湖泊持续搬运的过程中, 发生河流的不断迁移、切割, 直到湖泊边缘形成分流河道。因此, 上游主要以相对单一的河流搬运体系为主, 向湖盆方向逐渐过渡为“网状”河流搬运体系。在距离湖盆更近的位置, 受湖泊范围的频繁波动等影响, 河道多处发生决口, 形成大量新的河流搬运体系。在湖泊边缘, 受湖泊水体阻力的影响, 河流在岸线附近形成鸟足状等分支河流搬运体系(图 10)。

随着河流体系的频繁改道, 越靠近湖盆方向, 形成大量相互交错的相互连通的河道砂和席状砂, 导致河道砂之间被席状砂连通, 砂体的面积增大。

#### 4.4 汇聚体系对大面积砂体的控制

汇聚体系是砂体主要的沉积场所(图 9, 图 10)。明下段沉积期, 盆地坡度整体较缓, 形成于周围隆起的古水系流向研究区的过程中, 受沉积古地形和湖泊范围频繁变化的影响, 在湖泊波及不到的位置, 主要发育河流体系, 以河道砂沉积为主, 较孤立, 呈线条状分布, 面积小。在湖泊能波及的范围内, 河流与湖泊频繁交互, 主要发育河湖交互体系, 主要沉积大面积河道砂、席状砂, 且河道砂之间往往被席状砂连通, 呈片状、藤状, 面积大。在长期湖泊发育的位置, 坡度最缓, 主要以浅水三角洲砂体和湖相泥岩为主, 砂体呈朵叶状或鸟足状, 范围也较大。因此, 在亚热带古气候、距离物源较近、水系发达、坡度相对较缓、湖泊范围频繁变化的范围内和长期湖泊发育的位置, 最有利于河湖交互体系

和浅水三角洲等大面积砂体的沉积。

### 5 油气勘探意义

渤海南部是渤海湾盆地油气较为富集的油区之一, 其中油气区主要分布在黄河口凹陷和莱州湾凹陷。近年来, 在渤海南部明下段发现了大面积岩性油气藏, 如垦利 6-1 等亿吨级大型油田, 横向上, 油层呈连片分布(图 11), 平面上, 油气藏呈片状分布, 面积大(图 12)。勘探实践表明, 渤海南部甚至整个渤海海域明下段仍然具有巨大的勘探潜力。

渤海南部早期的油气勘探主要以古近系三角洲和明下段河道砂为主, 河道砂之间连通性差, 河道砂面积小, 平面上常呈“条带状”分布, 剖面上呈透镜状分布, 发育的圈闭面积小, 不具备发育大面积岩性油气藏的潜力。近年来, 作者所在团队运用源-汇理论, 通过分析渤海海域明化镇组沉积期的古气候条件、物源体系、搬运体系和汇聚体系, 获得以下认识: 渤海南部明下段沉积期以亚热带和温带气候为主, 期间存在亚热带、多雨与温带少雨频繁交替的环境, 为河流的搬运提供了充足的水动力条件; 研究区周围的辽东隆起、鲁西隆起和胶东隆起物源区距离湖泊较近, 母岩类型为长英质变质岩或变质岩与岩浆岩的组合, 长英质粗粒母岩为大面积砂岩提供了充足的碎屑物质; 研究区发育四个方向的大型古水系, 以及河流、河湖交互、湖泊等汇聚体系, 尤其是河湖交互和湖泊体系能够形成面积较

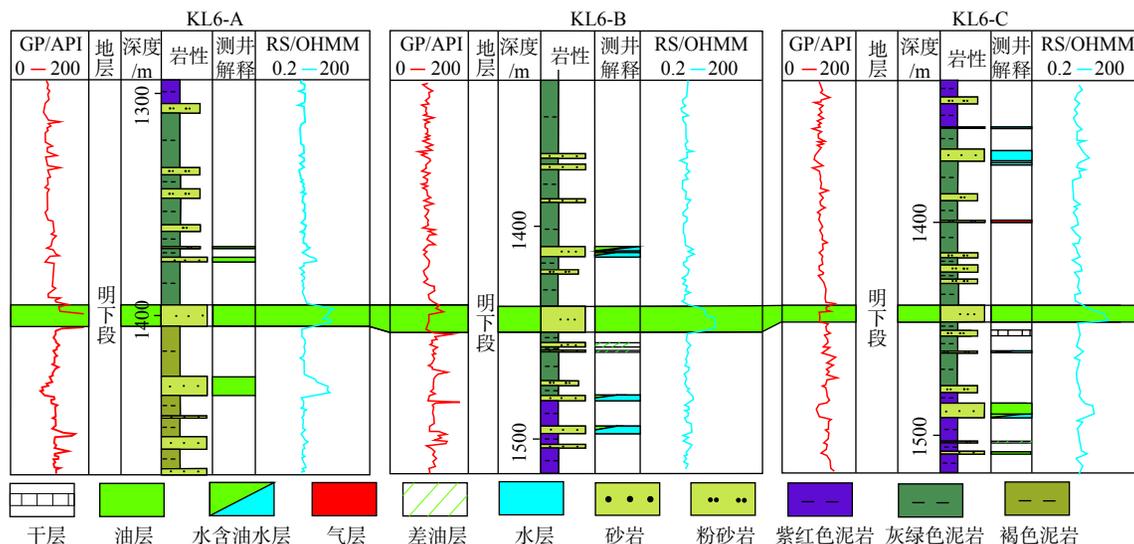
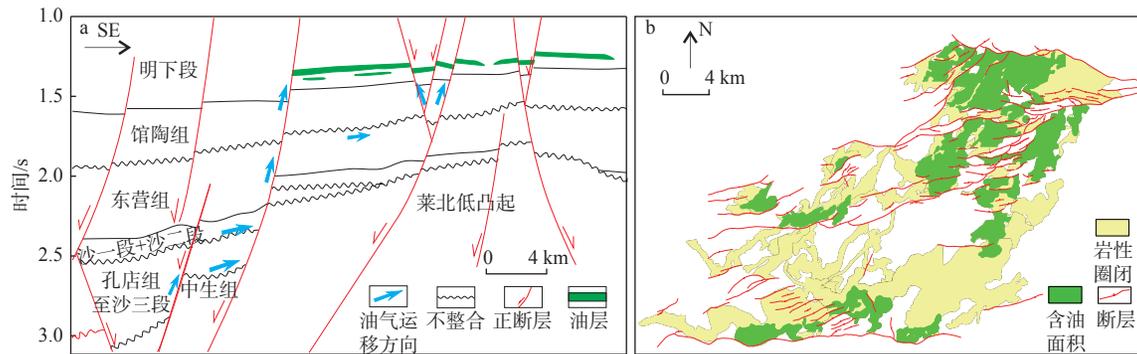


图 11 渤海南部地区垦利 6-1 构造明下段砂体和油层连续分布特征

Fig. 11 Continuous distribution characteristics of the sand bodies and oil layers in the lower member of the Minghuazhen Formation of KL 6-1 structure in the southern Bohai Sea



a—成藏模式; b—含油面积分布

图 12 渤海南部地区明下段垦利 6-1 构造岩性油藏成藏模式和含油面积分布

Fig. 12 Accumulation model and oil-bearing area distribution of the KL 6-1 structural lithologic reservoir in the lower member of the Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea

(a) Accumulation model; (b) Oil-bearing area distribution

大的砂体(图 9, 图 10), 具备发育大面积岩性圈闭的条件(图 11)。由于烃类沿通源断裂运移至河道-席状砂之后(图 12a), 会沿着河道-席状砂连片砂体运移到更大范围的圈闭中, 形成大型油气藏(图 12b)。

在垦利 6-1 明下段亿吨级油田的勘探过程中总结出该认识之后, 指导了垦利 10-2 的勘查, 成功发现了又一个亿吨级油田。勘探实践表明: 渤海海域新近系均具有发育大面积岩性圈闭巨大潜力, 在浅层探明程度较高的条件下, 仍然具有发现大型油气田的潜力。

## 6 结论

(1) 渤海南部明下段发育大面积砂体, 砂体之间相互连通, 主要发育河流、河湖交互和湖泊这三种沉积体系。其中, 河湖交互和湖泊浅水三角洲是大面积砂体发育的主要沉积相类型。

(2) 研究区明下段沉积期, 燕山-辽西隆起方向距离研究区最远, 主要影响西北方向的砂体分布; 辽东隆起次之, 主要影响东北方向的砂体分布; 鲁西隆起较近, 对西南方向的砂体具有重要影响; 胶东隆起最近, 主要影响东南方向的砂体分布。研究区明下段沉积期发育的多个小型浅水湖泊是周围碎屑物质的最终归宿。

(3) 亚热带气候、长英质变质岩和岩浆岩母岩、充足的降雨量、发达的古水系、以及湖泊范围的频繁扩大和缩小为渤海南部明下段沉积期大面积砂体的形成提供了有利的源-汇条件。在有利源-汇条件的保障下, 河道砂-席状砂的连通导致研究区

明下段发育大面积的岩性圈闭。与单独的河道砂相比, 河湖交互和浅水三角洲具有形成大面积岩性油气藏的潜力。

## References

- CAO Y C, XU Q S, WANG J, 2018. Progress in "Source-to-Sink" system research[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 116-131. (in Chinese with English abstract)
- CARACCILO L, 2020. Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: review, application and future development[J]. *Earth-Science Reviews*, 209: 103226.
- CHEN J, ZHANG W Y, JIANG Z X, et al., 2020. Characteristics and control factors of the source-to-sink system in the Erlangjian-Heimahe area on the south bank of Qinghai lake[J]. *Acta Petroli Sinica*, 41(7): 821-834. (in Chinese with English abstract)
- CHEN R T, WANG Q B, WANG F L, et al., 2017. Application of heavy minerals multivariate statistic analysis to provenance studies: a case of Huanghekou depression[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 13(2): 1-5, 107. (in Chinese with English abstract)
- DU X F, PANG X J, WANG Q B, et al., 2017. Restoration of the Paleoprovenance of the  $Es_{12}$  in the eastern of Shijiutuo uplift and its control on reservoir[J]. *Earth Science*, 42(11): 1897-1909. (in Chinese with English abstract)
- DUAN Y J, DONG Y X, JIANG X Y, et al., 2019. Sedimentary characteristics of the meandering river and recognition of abandoned river in the lower reaches of Minghua town in Raoyang[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 35(4): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- GRAFTON R Q, PITTOCK J, DAVIS R, et al., 2013. Global insights into water resources, climate change and governance[J]. *Nature Climate Change*, 3(4): 315-321.
- HAO J, ZHANG H H, LI C R, et al., 2021. Petroleum exploration history and enlightenment in Bohai sea[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(3): 328-336. (in Chinese with English abstract)
- HU H W, LI H Y, YU H B, et al., 2020. Quantitative analysis of source-to-

- sink system controls on sand-body distribution of the Paleogene in Chengbei low uplift and surrounding areas, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(2): 266-277. (in Chinese with English abstract)
- KANG H L, LIN C S, NIU C M, 2021. Ancient landform of the Dongying formation in the Shadongnan structural zone, western Bohai Sea area and its control on the sedimentation[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 19-30. (in Chinese with English abstract)
- LI L N, ZHAO Z G, CUI Y C, et al., 2022. "Source-to-sink" analysis of turbidite deposits in the upper cretaceous-Eocene Rajang group in southern South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(1): 61-72. (in Chinese with English abstract)
- LI Y T, WANG W Q, WANG G, et al., 2019. Neotectonism and its control on hydrocarbon accumulation in Huanghua depression of the Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 43(6): 94-104. (in Chinese with English abstract)
- LIU L, STOCKLI D F, LAWTON T F, et al., 2022. Reconstructing source-to-sink systems from detrital zircon core and rim ages[J]. *Geology*, 50(6): 691-696.
- LYSTER S J, WHITTAKER A C, HAMPSON G J, et al., 2021. Reconstructing the morphologies and hydrodynamics of ancient rivers from source to sink: Cretaceous Western Interior Basin, Utah, USA[J]. *Sedimentology*, 68(6): 2854-2886.
- NIU B, ZHAO J H, FU P, et al., 2019. Trend judgment of abandoned channels and fine architecture characterization in meandering river reservoirs: a case study of Neogene Minghuazhen formation Nm III 2 layer in Shijiutuo bulge, Chengning uplift, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 891-901. (in Chinese with English abstract)
- SEPTAMA E, BENTLEY SR S J, 2017. Source-to-sink sediment delivery in the Gulf of Papua from scanning electron microscopy and mineral liberation analysis-aided provenance analysis of deep-sea turbidite sands[J]. *AAPG Bulletin*, 101(6): 907-936.
- SHANG X F, LI M, LIU J L, et al., 2022. Source-sink system based sand body distribution prediction and 3D geological modeling: a case study of the 2<sup>nd</sup> Member of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 42(1): 62-72. (in Chinese with English abstract)
- SHI X Q, 2018. Evolution of global typical river runoff under climate change[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research. (in Chinese with English abstract)
- SINCLAIR H D, STUART F M, MUDD S M, et al., 2019. Detrital cosmogenic <sup>21</sup>Ne records decoupling of source-to-sink signals by sediment storage and recycling in Miocene to present rivers of the Great Plains, Nebraska, USA[J]. *Geology*, 47(1): 3-6.
- SUN Y, ZHAO D, YU L M, et al., 2015. Sandbody distribution and sedimentary model in shallow lacustrine fluvial-dominated delta front: a case study from Putaohua oil layer of Yongle area in Songliao basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(3): 439-447. (in Chinese with English abstract)
- TAN M X, ZHU X M, ZHANG Z L, et al., 2020a. Fluvial sequence pattern and its response of geomorphy in depression phase of rift basin: a case study of the lower member of Neogene Minghuazhen Formation in Shaleitian Uplift area, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(3): 428-439. (in Chinese with English abstract)
- TAN M X, ZHU X M, ZHANG Z L, et al., 2020b. Summary of sedimentological issues and fundamental approaches in terms of ancient "Source-to-Sink" systems[J]. *Oil & Gas Geology*, 41(5): 1107-1118. (in Chinese with English abstract)
- TIAN P P, LIN C Y, ZHANG X G, et al., 2018. Flow characteristics and remaining oil distribution of flow unit in fluvial reservoir: a case study of fluvial Minghuazhen formation of Yangerzhuang oilfield in Neogene Huanghua depression[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 42(2): 11-22. (in Chinese with English abstract)
- WANG J G, JIANG C J, CHANG S, et al., 2017. Structural trend surface conversion method for micro-amplitude paleotopographic restoration of cratonic basins[J]. *Acta Petroli Sinica*, 38(1): 77-83, 104. (in Chinese with English abstract)
- WANG K, ZHAI S K, 2020. Geochemical methods for identification of sedimentary provenance[J]. *Marine Sciences*, 44(12): 132-143. (in Chinese with English abstract)
- WANG L L, NIU C M, YANG H F, et al., 2022. Evolution of channel patterns and its geological significance for oil and gas exploration in the Lower Member of Minghuazhen Formation in Laibei low uplift, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 43(3): 364-375. (in Chinese with English abstract)
- XU C G, DU X F, XU W, et al., 2017. New advances of the "Source-to-Sink" system research in sedimentary basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- XU C G, YANG H F, WANG D Y, et al., 2021. Formation conditions of Neogene large-scale high-abundance lithologic reservoir in the Laibei low uplift, Bohai Sea, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(1): 12-25. (in Chinese with English abstract)
- XU M M, WEI X C, YANG R, et al., 2021. Research progress of provenance tracing method for heavy mineral analysis[J]. *Advances in Earth Science*, 36(2): 154-171. (in Chinese with English abstract)
- YANG C, ZHU H T, NIU C M, et al., 2021. Characteristics and models of shallow-water environmental river-lake interaction in continental basins[J]. *Earth Science*, 46(5): 1771-1782. (in Chinese with English abstract)
- YANG R C, LI J B, FAN A P, et al., 2013. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 99-107. (in Chinese with English abstract)
- ZENG Z W, ZHU H T, 2022. Modern Dryland source-to-sink system segments and coupling relationships from digital elevation model analysis: a case study from the Mongolian Altai[J]. *Remote Sensing*, 14(5): 1202.
- ZHANG X Q, WU Z P, ZHOU X H, et al., 2017. Cenozoic tectonic characteristics and evolution of the southern Bohai Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(1): 50-60. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H Q, ZHANG J M, LI S B, et al., 2017. Sedimentary characteristics and evolution models of lower part of Minghuazhen Formation in Neogene system in oilfield A, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(4): 1021-1029, 1046. (in Chinese

with English abstract)

ZHU H T, XU C G, ZHU X M, et al., 2017. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin [J]. Earth Science, 42(11): 1851-1870. (in Chinese with English abstract)

### 附中文参考文献

操应长, 徐琦松, 王健, 2018. 沉积盆地“源-汇”系统研究进展 [J]. 地质学前沿, 25(4): 116-131.

陈骥, 张万益, 姜在兴, 等, 2020. 青海湖南岸二郎剑—黑马河地区源-汇体系特征及控制因素 [J]. 石油学报, 41(7): 821-834.

陈容涛, 王清斌, 王飞龙, 等, 2017. 重矿物多元统计分析在物源研究中的应用: 以黄河口凹陷为例 [J]. 新疆石油天然气, 13(2): 1-5, 107.

杜晓峰, 庞小军, 王清斌, 等, 2017. 石白坨凸起东段围区沙一二段古物源恢复及其对储层的控制 [J]. 地球科学, 42(11): 1897-1909.

段雅君, 董运晓, 姜新雨, 等, 2019. 饶阳凹陷明化镇组下段曲流河沉积特征及废弃河道识别 [J]. 科技通报, 35(4): 21-26.

郝婧, 张厚和, 李春荣, 等, 2021. 渤海海域油气勘探历程与启示 [J]. 新疆石油地质, 42(3): 328-336.

胡贺伟, 李慧勇, 于海波, 等, 2020. 渤海湾盆地埋北低凸起及围区古近系“源-汇”系统控砂原理定量分析 [J]. 古地理学报, 22(2): 266-277.

康海亮, 林畅松, 牛成民, 2021. 渤海西部沙东南构造带东营组古地貌特征及对沉积的控制作用 [J]. 地质力学学报, 27(1): 19-30.

李莉妮, 赵志刚, 崔宇驰, 等, 2022. 南海南部上白垩统一始新统 Rajang 群浊流沉积物源-汇对比分析 [J]. 古地理学报, 24(1): 61-72.

李岳桐, 王文庆, 王刚, 等, 2019. 渤海湾盆地黄骅坳陷新构造运动特征及其控藏作用 [J]. 东北石油大学学报, 43(6): 94-104.

牛博, 赵家宏, 付平, 等, 2019. 曲流河废弃河道走向判定与单砂体构型表征: 以渤海湾盆地埋北隆起石白坨凸起西部新近系明化镇组下段为例 [J]. 石油勘探与开发, 46(5): 891-901.

商晓飞, 李蒙, 刘君龙, 等, 2022. 基于源-汇系统的砂体分布预测与三维地质建模: 以四川盆地川西坳陷新场构造带须二段为例 [J]. 天然气工业, 42(1): 62-72.

石晓晴, 2018. 气候变化背景下全球典型江河径流演变规律 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院.

孙雨, 赵丹, 于利民, 等, 2015. 浅水湖盆河控三角洲前缘砂体分布特征与沉积模式探讨: 以松辽盆地北部永乐地区葡萄花油层为例 [J]. 沉积学报, 33(3): 439-447.

谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等, 2020a. 断陷盆地拗陷期河流层序样式及其地貌响应: 以渤海湾盆地沙垒田凸起区新近系明化镇组下段为例 [J]. 古地理学报, 22(3): 428-439.

谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等, 2020b. 古“源-汇”系统沉积学问题及基本研究方法简述 [J]. 石油与天然气地质, 41(5): 1107-1118.

田盼盼, 林承焰, 张宪国, 等, 2018. 河流相流动单元渗流特征及剩余油分布: 以黄骅坳陷羊二庄油田新近系明化镇组河流相储层为例 [J]. 东北石油大学学报, 42(2): 11-22.

王建国, 蒋传杰, 常森, 等, 2017. 克拉通盆地微古地貌恢复的构造趋势面转换法 [J]. 石油学报, 38(1): 77-83, 104.

王轲, 翟世奎, 2020. 沉积物源判别的地球化学方法 [J]. 海洋科学, 44(12): 132-143.

王利良, 牛成民, 杨海风, 等, 2022. 渤海湾盆地埋北低凸起明化镇组下段河道类型演化及其油气地质意义 [J]. 石油学报, 43(3): 364-375.

徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等, 2017. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展 [J]. 石油与天然气地质, 38(1): 1-11.

徐长贵, 杨海风, 王德英, 等, 2021. 渤海海域埋北低凸起新近系大面积高丰度岩性油藏形成条件 [J]. 石油勘探与开发, 48(1): 12-25.

许苗苗, 魏晓椿, 杨蓉, 等, 2021. 重矿物分析物源示踪方法研究进展 [J]. 地球科学进展, 36(2): 154-171.

杨超, 朱红涛, 牛成民, 等, 2021. 陆相盆地浅水背景河湖交互特征及其模式 [J]. 地球科学, 46(5): 1771-1782.

杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 等, 2013. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势 [J]. 沉积学报, 31(1): 99-107.

张晓庆, 吴智平, 周心怀, 等, 2017. 渤海南部新生代构造发育与演化特征 [J]. 大地构造与成矿学, 41(1): 50-60.

赵汉卿, 张建民, 李栓豹, 等, 2017. 渤海湾盆地 A 油田新近系明化镇组沉积特征及演化模式 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(4): 1021-1029, 1046.

朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等, 2017. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展 [J]. 地球科学, 42(11): 1851-1870.

### 获奖者简历:

徐长贵, 教授级高级工程师, 中国海洋石油有限公司勘探部总经理, 海洋油气勘探资深专家。先后获得全国劳动模范、李四光地质科学奖、黄汲清青年地质科学技术奖, 入选国务院政府特殊津贴专家、“国家百千万人才工程”、海南省“千人专项”计划等, 带领团队获得中国五四青年奖章。2021年荣获第十七次李四光地质科学奖。主要从事石油地质与综合勘探研究: 创新揭示高地温背景下两种优质储层形成机理, 推动中国近海深层/超深层获得重大油气发现; 创新揭示增压型转换带控制油气富集机理, 推动我国近海地幔热隆和太平洋斜向俯冲双动力源控制下的复杂断裂带勘探获得重大突破; 创新建立陆相断陷盆地源-汇系统时空耦合控砂原理, 指导渤海中深层勘探获得重大突破。发表论文 58 篇, 其中 EI/SCI 收录 24 篇, 出版专著 3 部, 发明专利 6 项, 先后获国家科技进步奖 2 项、省部(行业)级特等奖 1 项、一等奖 6 项、二等奖 9 项。

