

文章编号: 1671-1505(2024)05-1140-12 DOI: 10.7605/gdxb.2024.05.098

古盐度对陆相页岩发育的控制作用： 以东营凹陷古近系沙三下页岩为例*

海 晴¹ 梁 超^{1,2} 杨 博¹ 韩 豫¹ 韩婉璐¹

1 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东青岛 266580

2 深层油气全国重点实验室，中国石油大学（华东），山东青岛 266580

摘 要 陆相优质烃源岩发育大多与湖泊咸化相关，但湖泊咸化对页岩发育的影响仍不清晰。以东营凹陷古近系页岩重点取心井樊 42 井为例，通过岩石薄片观察、XRD、岩石热解测试、XRF 二维元素扫描、微量元素测试等分析，结合有机地球化学测试数据、微量元素含量的垂向变化等，分析不同盐度演化阶段页岩成分、纹层结构、有机质丰度的变化。结果表明，研究区目的层段页岩可划分为 5 种岩相类型。目的层段环境演化可以划分为 5 个阶段，受控于气候、陆源输入等因素。古气候在沙三下亚段沉积时期呈现暖湿—相对湿冷—暖湿—相对干冷—相对暖湿的变化特征。陆源输入量呈多期旋回变化。不同类型岩石的沉积环境特征各异，高盐度的湖泊水体营养盐浓度高，具有较高的初级生产力，水体分层强烈，水体循环较弱。氧/盐度跃层位置相对较高，富氧带水深较浅，使得有机质更快脱离氧化环境沉降进入还原性水体，有利于有机质的保存。碳酸盐矿物含量高，且呈纹层状发育于滞水层中。

关键词 咸化湖盆 湖相页岩 纹层发育 有机质富集 古近系沙河街组 东营凹陷

第一作者简介 海晴，女，2004 年生，研究方向为油气地质方面研究。E-mail: 2201020326@s.upc.edu.cn。

通讯作者简介 梁超，男，1986 年生，教授，主要从事细粒沉积学研究。E-mail: liangchao0318@163.com。

中图分类号: P588.2 文献标志码: A

Paleosalinity control on development of lacustrine shale: an example of shale from the lower submember of Member 3 of Paleogene Shahejie Formation, Dongying sag

HAI Qing¹ LIANG Chao^{1,2} YANG Bo¹ HAN Yu¹ HAN Wanlu¹

1 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China

2 National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China

Abstract The development of lacustrine high-quality hydrocarbon source rocks is often associated with lake salinization, but the impact of salinization on shale development remains unclear. In this paper, taking the Paleocene shale of the Dongying sag as an example, we analyze the changes in shale composition, laminae structure, and organic matter abundance across different salinity evolution stages. This is

* 国家自然科学基金（编号：42272119, 42072164）和山东省重点研发计划（编号：2020ZLYS08）联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272119, 42072164) and the Shandong Provincial Key Research and Development Program (No. 2020ZLYS08)]

收稿日期: 2024-05-01 改回日期: 2024-06-11

done by means of thin-section observation, XRD, pyrolysis test of rocks, 2D elemental scanning of XRF, and trace elemental test, combined with organic geochemistry data and variations in elemental content. The results show that the shale within the depth range of 3120–3160 m in the lower submember of Member 3 of the Shahejie Formation of Well F42 can be divided into five lithofacies. The environmental evolution of the target section can be divided into five stages, which are controlled by factors such as climate and terrestrial input. During the deposition of the lower submember of Member 3 of the Shahejie Formation, the paleoclimate transitioned from warm and humid to relatively wet and cold, then to warm and humid, relatively dry and cold, and finally to relatively warm and humid. Terrestrial input showed multi-period cyclic changes. Characteristics of sedimentary environments varied among different lithofacies. High-salinity lakes had high nutrient concentration, high primary productivity, strong water stratification, and weak water circulation. The position of oxycline/halocline was relatively high, and the oxygen-rich zone was shallow, facilitating the rapid deposition of organic matter into reducing environments, which favored organic matter preservation. The carbonate mineral content was high and developed as laminae in stagnant water layers.

Key words salinized lake, lacustrine shale, laminae development, organic matter enrichment, Paleogene Shahejie Formation, Dongying sag

About the first author HAI Qing, born in 2004, is engaged in petroleum geology research. E-mail: 2201020326@s.upc.edu.cn.

About the corresponding author LIANG Chao, born in 1986, professor, is mainly engaged in fine-grained sedimentology research. E-mail: liangchao0318@163.com.

陆相页岩油资源潜力巨大，是未来油气勘探的重要接替领域（邹才能等，2015）。科学研究及勘探实践表明，陆相富有机质页岩发育与湖泊水体盐度密切相关（黎茂稳等，2022；郭旭升等，2023），多发育于微咸水—咸水环境，如渤海湾盆地古近系页岩、准噶尔盆地风城组和芦苇沟组页岩、松辽盆地青山口组页岩等（赵文智等，2020；龚德瑜等，2024；孟庆涛等，2024）。

湖泊生态学研究表明，适当的盐度可以提高湖泊初级生产力，水体分层通过控制溶解氧含量与分布，影响有机质的保存，最终利于有机质富集（Boehrer and Schultze, 2008）。盐度及离子类型还可以影响碳酸盐矿物沉淀，如Mg/Ca值对文石、方解石、高镁方解石、白云石的影响（兰敏文等，2022）。湖泊盐度及水体分层还可以控制湖泊水体循环，进而影响纹层的发育（李凯等，2017），现代湖泊沉积物中纹层多发育在盐跃层以下（Tylmann *et al.*, 2012；Zolitschka *et al.*, 2015）。东营凹陷古近纪水体盐度较高，特别是在沙四上一沙三下页岩沉积时期，盐度最高可达34‰，且处在相对封闭的水文环境（吴靖等，2014）。研究认为，湖泊咸化受海侵、深部热液和气候等多因素综合控制

（Liang *et al.*, 2024）。

湖泊水体盐度对页岩有机质富集、无机矿物构成、纹层发育与否具有显著控制作用（张顺等，2017；彭军等，2022），但具体的过程和机制尚不清晰，因此研究古盐度演化是研究陆相页岩发育机理的重要突破口。

1 区域地质背景

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳拗陷东南部，东起青坨子凸起，西邻惠民凹陷，南抵鲁西隆起和广饶凸起，北以陈家庄—滨县凸起为界，是中国陆相箕状断陷湖盆的典型代表，具有“北断南超，北深南浅”的特点（徐守余和李学艳，2005），包括博兴洼陷、牛庄洼陷、利津洼陷和民丰洼陷4个次级洼陷（图1-A）。

东营凹陷构造演化包括裂陷期和裂后拗陷期。裂陷期进一步细分为4个阶段：裂陷I幕、裂陷II幕、裂陷III幕、裂陷IV幕（彭丽，2017），在裂陷II、裂陷III期，湖盆沉降速率加快，湖泊大规模扩张，水体加深，形成了大面积的半深湖—深湖环境。该时期，温暖湿润的气候促进了初级生产力（Liang *et al.*, 2018），相对封闭的水文环境和较高

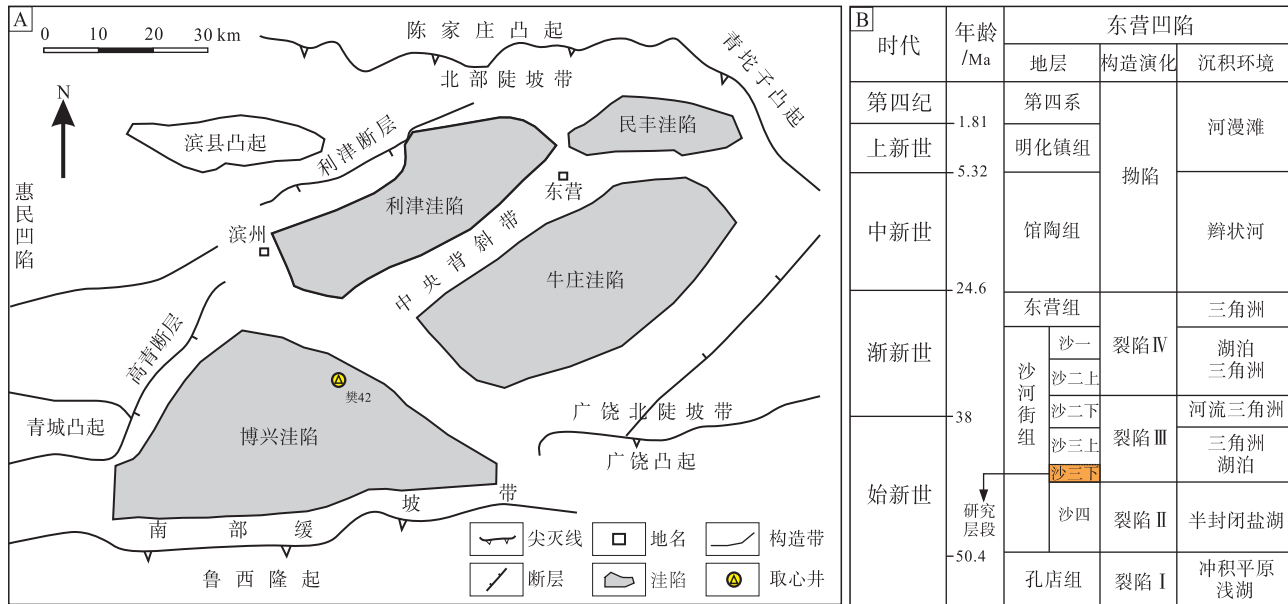


图 1 东营凹陷区域构造 (A) 及地层综合柱状图 (B)

Fig. 1 Regional tectonic map of Dongying sag (A) and synthetical stratum histogram (B)

的古盐度形成了湖底缺氧条件，形成了沙四上一沙三下富有机质页岩(图 1-B)，该页岩具有厚度稳定、埋深适中、有机质丰度高等特点 (张林晔等, 2003)，是东营凹陷最重要的烃源岩，也是页岩油勘探的重点 (刘惠民等, 2022)。

2 测试数据

本次研究共选取博兴洼陷樊 42 井 3120 ~ 3160 m 深度范围内的 30 个样品，使用蔡司偏光显微镜进行薄片观察，使用微区 X 射线荧光光谱仪开展 XRF 二维元素扫描，使用矿物 X 射线衍射仪开展 XRD 测试，使用碳硫分析仪依据 GB/T 19145—2003 《沉积岩中总有机碳的测定》开展总有机碳测试，使用热解仪依据 GB/T 18602—2012 《岩石热解分析》完成岩石热解测试。开展上述测试并得到样品中矿物及元素含量、地球化学数据等。

3 岩石学特征

3.1 矿物成分

东营凹陷沙三下页岩主要由方解石、黏土矿物、石英、斜长石等矿物构成，此外还发育有铁白云石、黄铁矿、钾长石、菱铁矿等矿物(表 1)。碳

酸盐矿物含量高，均值为 49.6%，最高可达 78.1%，其中以方解石为主，铁白云石含量明显低于方解石，且二者含量呈反比。黏土矿物含量介于 12.2% ~ 41.5% 之间，均值为 24.3%。石英含量介于 6.8% ~ 30.3% 之间，平均含量为 17.7%。斜长石介于 1.7% ~ 18.7% 之间，平均含量为 6.0%。黄铁矿平均含量为 2.0%，最高可达 5.7%。菱铁矿含量较少，仅在部分样品中出现，最高可达 1.9%。

3.2 有机地球化学特征

东营凹陷沙三下页岩 TOC 含量较高，多数介于 3.0% ~ 11.2% 之间，均值为 5.3%。游离烃 S_1 为 0.86 ~ 6.54 mg/g，均值为 3.83 mg/g；热解烃 S_2 为 4.86 ~ 62.40 mg/g，均值为 33.40 mg/g。生烃潜力 (S_1+S_2) 为 5.72 ~ 68.65 mg/g，均值为 37.20 mg/g，具有较高的生烃潜力。 T_{max} (最高热解峰温) 为 437 ~ 448 °C，均值为 444 °C。氢指数 HI 为 479 ~ 714 mg/g，均值为 622.65 mg/g (图 2)。

3.3 岩石学特征

碳酸盐矿物主要为方解石，方解石存在形式多样 (Wang *et al.*, 2013)。亮晶方解石晶型呈粒状或柱状，晶体表面纯净，未见次生变化，亮晶方解石纹层平直连续，纹层宽度变化较大，可见宽度较窄的亮晶方解石纹层与暗色富有机质黏土互层分布

表 1 东营凹陷樊 42 井页岩矿物组分含量
Table 1 Mineral component content of shale from Well F42 in Dongying sag

井深/m	全岩矿物质量分数/%								
	碳酸盐矿物	方解石	铁白云石	黏土总量	石英	斜长石	钾长石	黄铁矿	菱铁矿
3120.30	57.4	52.4	5.0	22.7	14.3	3.4	0.0	2.2	0.0
3120.50	62.9	60.5	2.4	20.4	11.5	3.9	0.0	1.4	0.0
3120.80	30.7	17.8	13.0	30.2	30.3	6.3	0.0	2.6	0.0
3121.50	56.3	50.9	5.5	22.6	14.2	5.2	0.0	1.6	0.0
3122.86	52.4	44.6	7.8	27.6	13.9	3.0	0.0	1.8	1.2
3124.50	64.0	56.3	7.7	16.6	12.7	5.2	0.0	1.5	0.0
3125.52	56.5	51.3	5.2	22.4	13.6	5.0	0.0	1.7	0.8
3127.04	55.4	48.6	6.8	22.3	15.7	3.4	1.1	2.1	0.0
3128.35	48.3	42.8	5.5	27.6	16.6	5.5	0.0	2.0	0.0
3129.20	56.9	48.3	8.6	20.1	14.2	6.8	0.0	2.1	0.0
3130.30	78.1	18.0	60.1	12.2	6.8	1.7	0.0	1.1	0.0
3130.50	48.9	29.5	19.5	29.8	15.4	4.5	0.0	1.5	0.0
3131.08	59.4	53.8	5.6	22.1	14.4	2.6	0.0	1.5	0.0
3131.29	20.2	13.8	6.4	41.5	30.2	5.5	0.0	2.6	0.0
3131.43	55.2	52.7	2.5	22.9	17.1	3.2	0.0	1.6	0.0
3131.44	64.3	60.8	3.5	16.9	14.3	3.0	0.0	1.5	0.0
3132.17	49.2	43.5	5.7	22.3	16.4	9.2	0.0	2.9	0.0
3135.48	37.9	32.3	5.6	31.4	22.6	5.9	0.0	2.1	0.0
3137.00	54.7	51.0	3.7	23.8	14.0	5.8	0.0	1.8	0.0
3138.20	47.4	41.4	6.0	25.7	19.1	5.5	0.0	2.3	0.0
3139.30	44.9	40.1	4.8	26.1	20.4	6.4	0.0	2.2	0.0
3140.64	36.5	34.6	1.9	25.0	24.9	7.9	0.0	5.7	0.0
3141.30	45.2	42.6	2.7	21.6	24.2	7.3	0.0	1.6	0.0
3142.50	38.0	30.5	7.5	19.4	21.7	18.7	0.0	2.2	0.0
3146.13	51.7	46.8	4.9	20.9	17.5	7.6	0.0	1.1	1.3
3149.93	47.7	36.9	10.8	21.3	19.5	8.0	0.0	1.6	1.9
3154.50	36.0	30.2	5.9	31.2	20.4	9.1	0.0	2.0	1.3
3155.10	37.7	35.9	1.8	32.7	18.2	8.5	1.1	1.9	0.0
3158.06	52.8	44.1	8.6	21.7	19.0	4.5	0.0	2.0	0.0
3160.40	42.7	39.6	3.2	29.4	17.2	8.4	0.0	2.3	0.0
均值	49.6	41.7	7.9	24.3	17.7	6.0	1.1	2.0	1.9

(图 3-C), 或发育宽度较大的堆叠状方解石脉充填于纹层之间(图 3-F)。泥晶方解石粒径较小, 表面污浊, 具有较好的定向性, 发育初期形成透镜体(图 3-E), 后期形成连续(图 3-D)或不连续纹层(图 3-A), 与富有机质黏土互层分布。少量样品内碳酸盐矿物主要以泥晶白云石形式存在(图 3-B), 晶粒细小, 整体未见明显定向。

样品中的长英质矿物主要为陆源碎屑颗粒(图 3-G), 长英质含量高的样品纹层不发育, 呈

块状构造, 且部分含有生物介壳(图 3-H)。黏土矿物呈现暗色, 部分样品发育连续的黏土纹层(图 3-D)。

东营凹陷沙三下页岩发育多种沉积构造, 根据页岩中有机质含量、纹层是否发育、方解石存在形式, 确定了 5 种岩相类型。

1) 高有机质亮晶方解石纹层状灰岩(图 4-A): TOC 含量约为 7.9%, 最高可达 11.2%; 碳酸盐矿物含量较高, 尤其是方解石矿

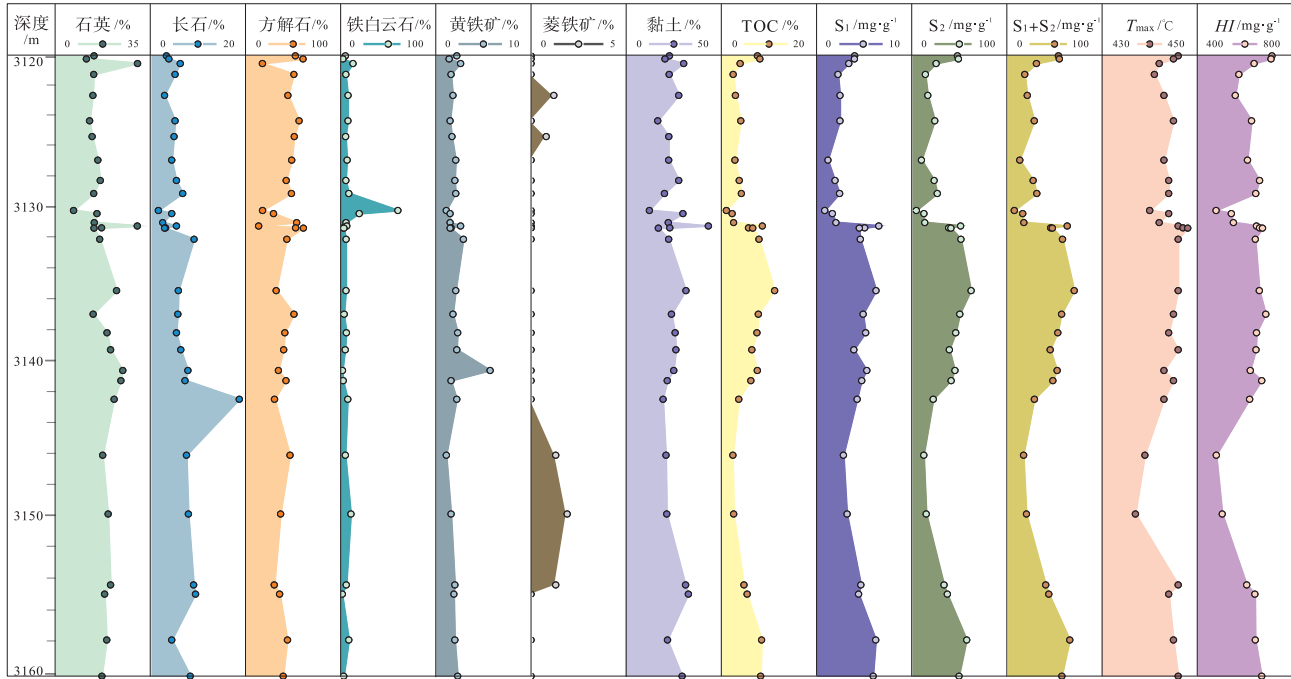


图 2 东营凹陷樊 42 井页岩矿物构成及有机地球化学参数特征

Fig. 2 Characteristics of mineral composition and organic geochemical parameters of shale from Well F42 in Dongying sag

物, 平均含量约为 52.4%, 最高可达 60.8%。纹层中多为亮晶方解石, 晶体表面干净, 未见矿物交代现象。亮晶方解石纹层发育且平直连续 (图 3-C), 纹层厚度在 70~100 μm , 后期充填的方解石脉 (图 3-F) 厚度多在 0.5~1.5 mm 之间, 晶体呈现粒状或柱状, 整体呈堆叠状产出。

2) 中有机质层状灰岩 (图 4-B): TOC 含量约为 2.8%, 碳酸盐矿物含量大于 50%, 其中方解石含量远高于白云石, 且多为泥晶方解石。纹层界面模糊且不连续 (图 3-A), 清晰纹层少见, 陆源碎屑含量较高, 部分样品中见生物介壳 (图 3-H)。

3) 低有机质块状白云岩 (图 4-C): TOC 含量约为 1.1%, 铁白云石含量极高, 可达 60.1%, 矿物分布无明显定向和规律性, 以泥晶白云石为主 (图 3-B), 分布于黏土矿物中, 未见清晰纹层, 整体为块状构造。

4) 高有机质泥晶方解石纹层状灰岩 (图 4-D): TOC 含量约为 7.8%, 碳酸盐矿物含量可达 54.7%, 其中以泥晶方解石为主, 黏土含量较高, 可达 23.8%。发育清晰的泥晶方解石纹层, 纹层平直连续, 纹层厚度较小, 泥晶方解石与黏土互层分布 (图 3-D)。

5) 中有机质纹层状黏土质灰岩 (图 4-E):

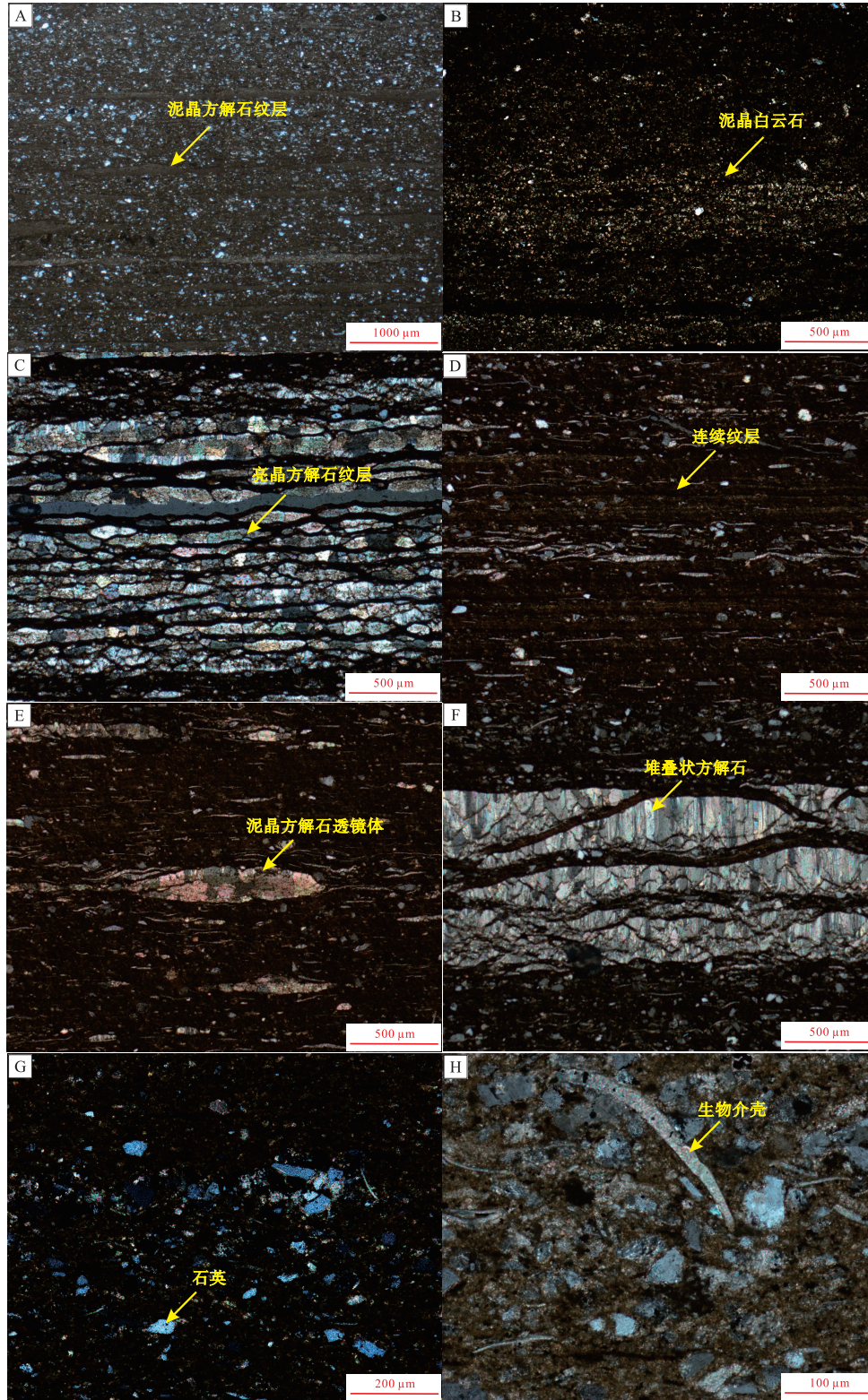
TOC 含量约为 2.6%, 碳酸盐矿物约为 47.7%, 其中方解石含量约为 36.9%。泥晶方解石多呈具定向性的透镜体 (图 3-E), 纹层不连续发育, 界面相对模糊。黏土和长英质碎屑含量较高 (图 3-G)。

4 沉积环境演化特征

4.1 沉积环境特点

Sr 与 Ba 化学性质相似, 但 Sr 的迁移能力比 Ba 的迁移能力强, 因此在不同沉积环境下会发生分离。Sr/Ba 值与古盐度存在正相关性, 可作为沉积时古盐度判别的指标 (Wei and Algeo, 2020)。一般认为 Sr/Ba 值小于 0.6 为淡水环境, 介于 0.6~1.0 之间为半咸水环境, 大于 1.0 为咸水环境 (邓宏文和钱凯, 1993)。研究区几乎所有样品的 Sr/Ba 值都大于 1 (图 5), 平均值为 3.7, 指示沉积时期为咸水环境。

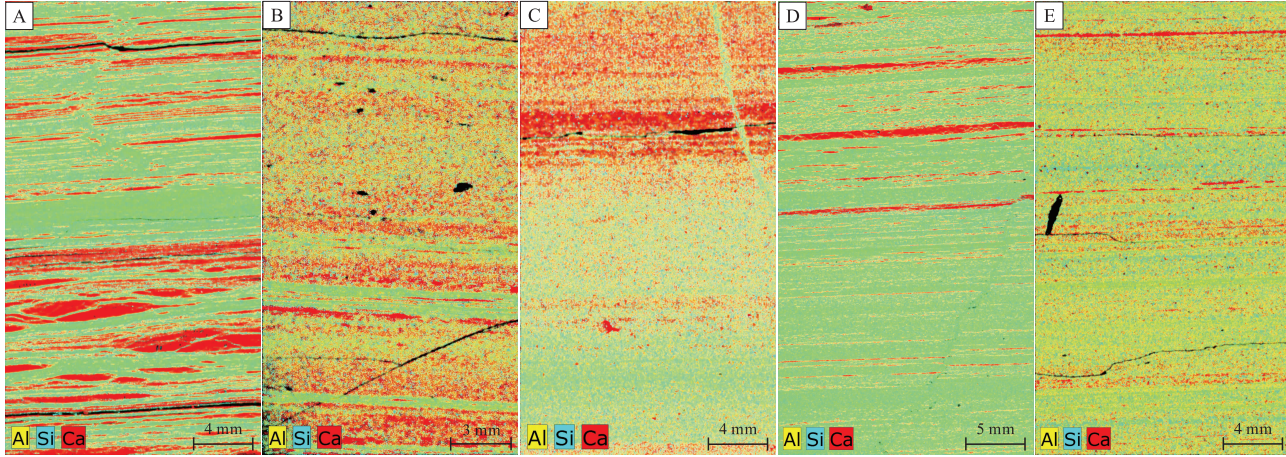
Th 在地表不易发生迁移, 而 U 在还原环境中易以四价态离子的形式沉淀, Th/U 值常作为沉积环境氧化—还原条件的指示 (Adams and Weaver, 1958; Li *et al.*, 2018)。一般认为 Th/U < 2 指示还原环境, Th/U 值介于 2~7 之间指示半氧化半还原环境, Th/U > 7 指示氧化环境。研究区测试样品的



A—泥晶方解石纹层不连续发育，陆源碎屑较多，3146.13 m (+)；B—泥晶白云石含量高，纹层界面模糊，3130.3 m (+)；C—亮晶方解石纹层连续发育，3120.3 m (+)；D—泥晶方解石和黏土互层，纹层连续发育，3140.64 m (+)；E—泥晶方解石呈透镜体状产出，3131.44 m (+)；F—亮晶方解石脉，晶体呈柱状或晶粒状，整体呈堆叠状，3155.1 m (+)；G—纹层不发育，陆源碎屑含量高，3127.04 m (+)；H—陆源碎屑含量高，含有生物介壳，3146.13 m (+)

图 3 东营凹陷樊 42 井页岩矿物组分赋存形态及沉积构造

Fig. 3 Mineral component occurrence and sedimentary structure of shale from Well F42 in Dongying sag



A—高有机质亮晶方解石纹层状灰岩，3120.3 m；B—中有机质层状灰岩，3121.5 m；C—低有机质块状白云岩，3130.0 m；
D—高有机质泥晶方解石纹层状灰岩，3137 m；E—中有机质纹层状黏土质灰岩，3149.93 m

图 4 东营凹陷樊 42 井页岩不同岩相元素二维分布特点

Fig. 4 Characteristics of two-dimensional distribution of elements in different lithofacies of shale from Well F42 in Dongying sag

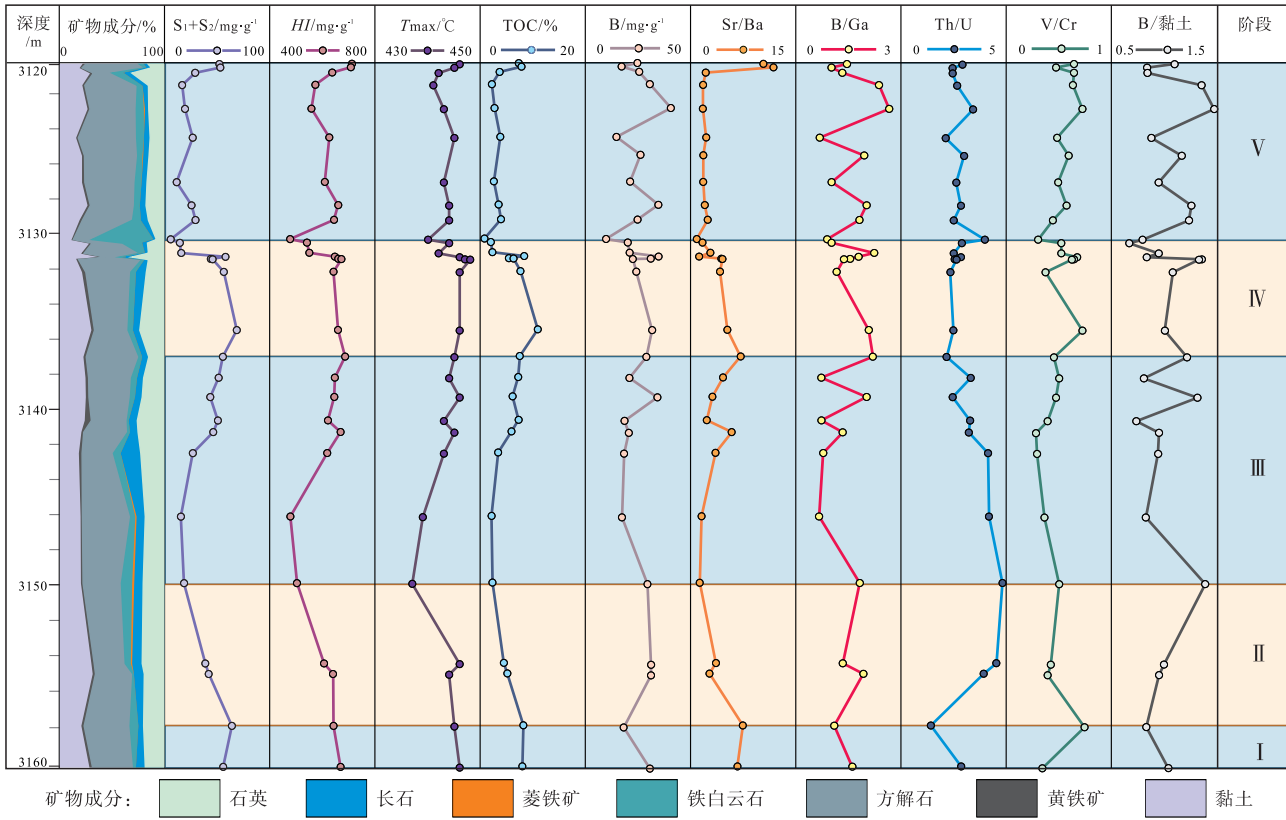


图 5 东营凹陷樊 42 井沙三下页岩沉积演化特征

Fig. 5 Sedimentary environment evolution of shale from the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation, Well F42 in Dongying sag

Th/U值介于 1.4~4.8 之间(图 5)，整体呈现半氧化半还原环境。

陆源输入程度的高低常借助 Al、Ti 元素含量反映，Al、Ti 元素含量越高，表明陆源碎屑物质

输入量越多(刘刚和周东升，2007；杨万芹等，2015)。气候潮湿、淡水输入增多的条件下，沉积岩中的 Al 元素含量较高。气候干旱的条件下，Mg/Ca 会呈现高值，且 Mg 的富集与白云石有关。

样品中的 Al、Ti 元素含量及 Ca/Mg 值呈现降低—升高旋回变化。沉积期内气候相对暖湿，沉积水体盐度高、还原性好，且盐度在不同时段存在变化。

4.2 沉积演化阶段

根据地球化学参数变化，将研究层段沉积环境演化划分为 5 个阶段。

阶段 I (3160~3158 m)：该阶段内 Sr/Ba 值大于 6.5，盐度较高且随深度递减而逐渐增高；Th/U 值降低，指示沉积环境偏向还原；此外，Al、Ca 等元素含量略有降低，Mg 元素含量升高。该沉积期内水体盐度升高且呈还原环境，陆源输入减少，气候相对暖湿。

阶段 II (3158~3150 m)：该阶段内 Sr/Ba 值自下而上显著降低，Th/U 值明显升高，Mg、Al、Ca 等元素含量持续降低。该沉积期内水体盐度降低且呈氧化环境，陆源输入减少，气候相对湿冷。

阶段 III (3150~3137 m)：该阶段内 Sr/Ba 值、B/Ga 值总体呈上升趋势，Th/U 值略有降低，Al、Ca、Ti 等元素含量较高。该沉积期内水体盐度上升且还原性增强，陆源输入增加，气候暖湿。

阶段 IV (3137~3130 m)：该阶段内 Sr/Ba 值、B/Ga 值均降低，Al、Ti 元素含量略有降低，Ca 元素含量略有升高，在阶段末 Mg 元素含量出现高值。该沉积期内水体盐度降低，陆源输入减少，气候相对干冷。

阶段 V (3130~3120 m)：该阶段内 Sr/Ba 值总体较低，除阶段顶部 3120 m 深度外，均介于 1.5~2.4 之间；Th/U 值略有降低，V/Cr 值略升高；Al、Ca、Ti 等元素含量持续降低，仅在 3120 m 深度时跃升出现高值。该沉积期内水体盐度相对较低，水体环境呈现半氧化半还原状态，气候相对暖湿。

5 盐度与页岩发育

5.1 盐度与页岩组构

由 HI 与 T_{max} 、TOC 含量关系反映出，样品中有机质均为 I 型和 II 型倾油有机质，且高盐度水体下的有机质成熟度(图 6-A)和烃源岩品质(图 6-B)更高。就本研究的测试数据而言，几乎所有样品的 Sr/Ba 值都大于 1，HI 小于 600 的数据出现在 Sr/Ba 值小于 3 的条件下，且在此条件下，

T_{max} 数值偏低；TOC 在 Sr/Ba 值大于 3 时均值为 7.2，最高达 11.2，在 Sr/Ba 值小于 3 时均值仅有 3.5。因此根据 Sr/Ba 值变化与 HI、 T_{max} 、TOC 的对应关系，将高低盐度界限大概对应于 Sr/Ba 值等于 3。Sr/Ba 值与 TOC 含量呈现明显正相关，反映水体盐度对有机质富集具有明显控制作用(图 7-A)。有机质的富集主要由初级生产力和保存条件共同控制，在高盐度环境中生物总量并不减少，且高盐度水体可限制寄生生物的生长，因此该环境下藻类具有较高的生产力(Liang *et al.*, 2024)。此外，湖泊水体分层会导致底层水体缺氧，避免有机质被氧化或生物降解。分层水柱位置与水体盐度呈正相关，较高的水体盐度会使跃层位置较高，含氧水柱较低，进而减少有机质被氧化的程度(Boehrer and Schultze, 2008)。湖泊水体盐度通过对生产力和保存条件的控制，进而控制了有机质富集(曹婷婷等, 2020)。

研究层段页岩碳酸盐矿物含量较高，均值为 49.6%。咸化的水体对方解石沉淀具有明显的控制作用(操应长等, 2023; 杜佰松等, 2023)，表现在 Sr/Ba 值与碳酸盐矿物含量呈正相关(图 7-B)。较高的水体盐度意味着陆源碎屑输入强度低、淡水注入少，从而有利于方解石沉淀，在高盐度阶段方解石含量高，反之则方解石含量低。

纹层发育是页岩的基本特点，纹层状页岩是页岩油勘探开发的甜点，纹层的发育与湖泊水体盐度密切相关(蒋龙等, 2023)。结合页岩纹层发育特征和盐度演化规律(马义权等, 2017)，不难发现，在较高盐度的阶段，纹层更为发育(图 3-C)。湖泊水体由浅至深依次发育紊流混合层、化跃层和滞水层，滞水层水体盐度高、氧含量低、水体循环差。纹层多发育在滞水层，盐度高、封闭的水文条件更有利于纹层的发育(Tylmann *et al.*, 2012)。生物扰动会破坏纹层结构，同时随深度增加或进入滞水层氧气耗尽，生物扰动强度降低。因此，较高的水体盐度有利于页岩纹层的发育和保存。

5.2 沉积模式

总体而言，在该沉积阶段湖泊水体盐度较高，呈半氧化半还原环境，为咸水的半深湖沉积环境。水体盐度对页岩无机组分、有机质含量和纹层结构具有显著控制作用(Yuri *et al.*, 2008)，建立了高

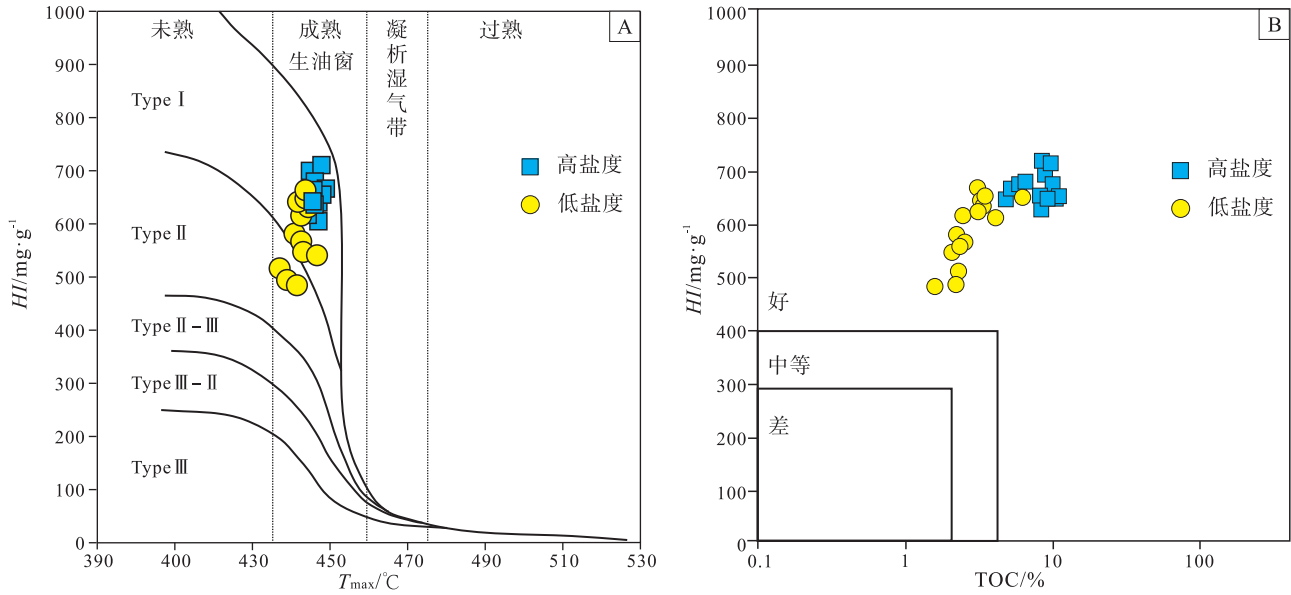


图 6 东营凹陷樊 42 井页岩有机质类型及质量

Fig. 6 Organic matter types and quality of the shale from Well F42 in Dongying sag

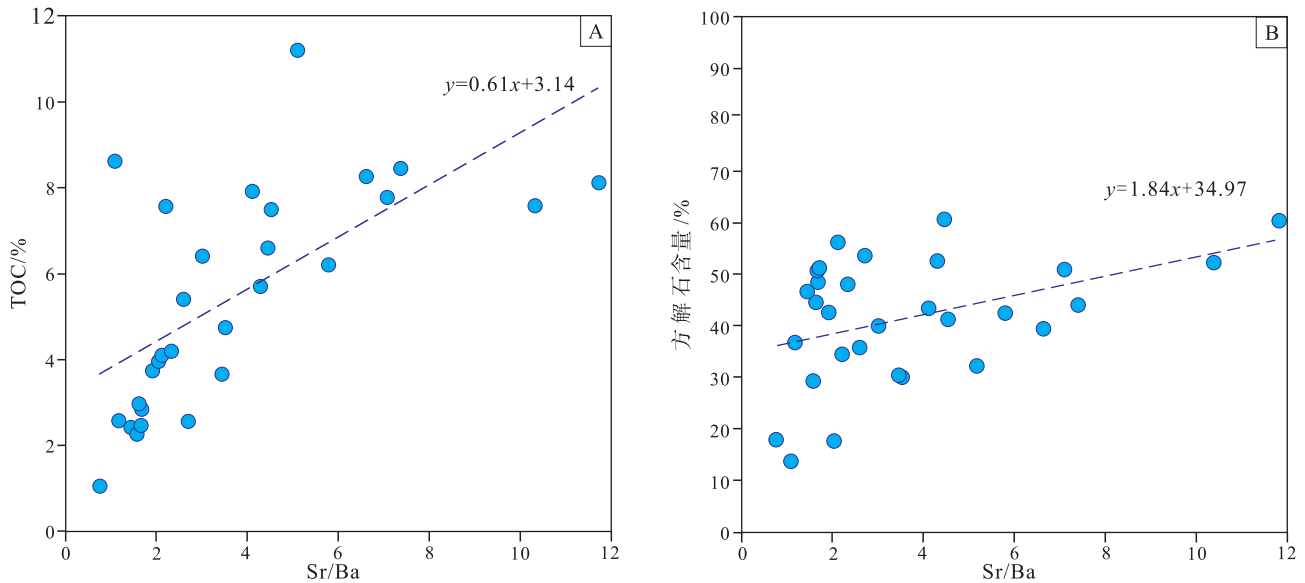


图 7 东营凹陷樊 42 井页岩 Sr/ Ba 值与 TOC 含量 (A) 和方解石含量 (B) 相关性

Fig. 7 Relationship diagram of Sr/ Ba versus TOC content (A) and calcite content (B) of shale from Well F42 in Dongying sag

盐度和低盐度 2 种沉积模式(图 8)。

高盐度湖泊水体中, 营养盐浓度高, 具有较高的初级生产力; 水体分层强烈, 水体循环较弱。氧/盐度跃层位置相对较高, 富氧带水深较浅, 使得有机质更快脱离氧化环境沉降进入还原性水体, 利于有机质的保存。滞水层内发育纹层, 且纹层平直连续。碳酸盐矿物含量高, 且呈纹层状(图 8-A)。

低盐度湖泊水体中, 淡水注入增多, 陆源输入强度高, 富氧带初级生产力降低, 水体循环较强; 氧/盐度跃层位置下移, 使得有机质在长距离沉降中被氧化。沉积物内陆源碎屑比例增高, 碳酸盐矿物含量降低, 有机质含量和成熟度较低, 与高盐度水体模式相比, 同深度下纹层几乎不发育且界面模糊(图 8-B)。

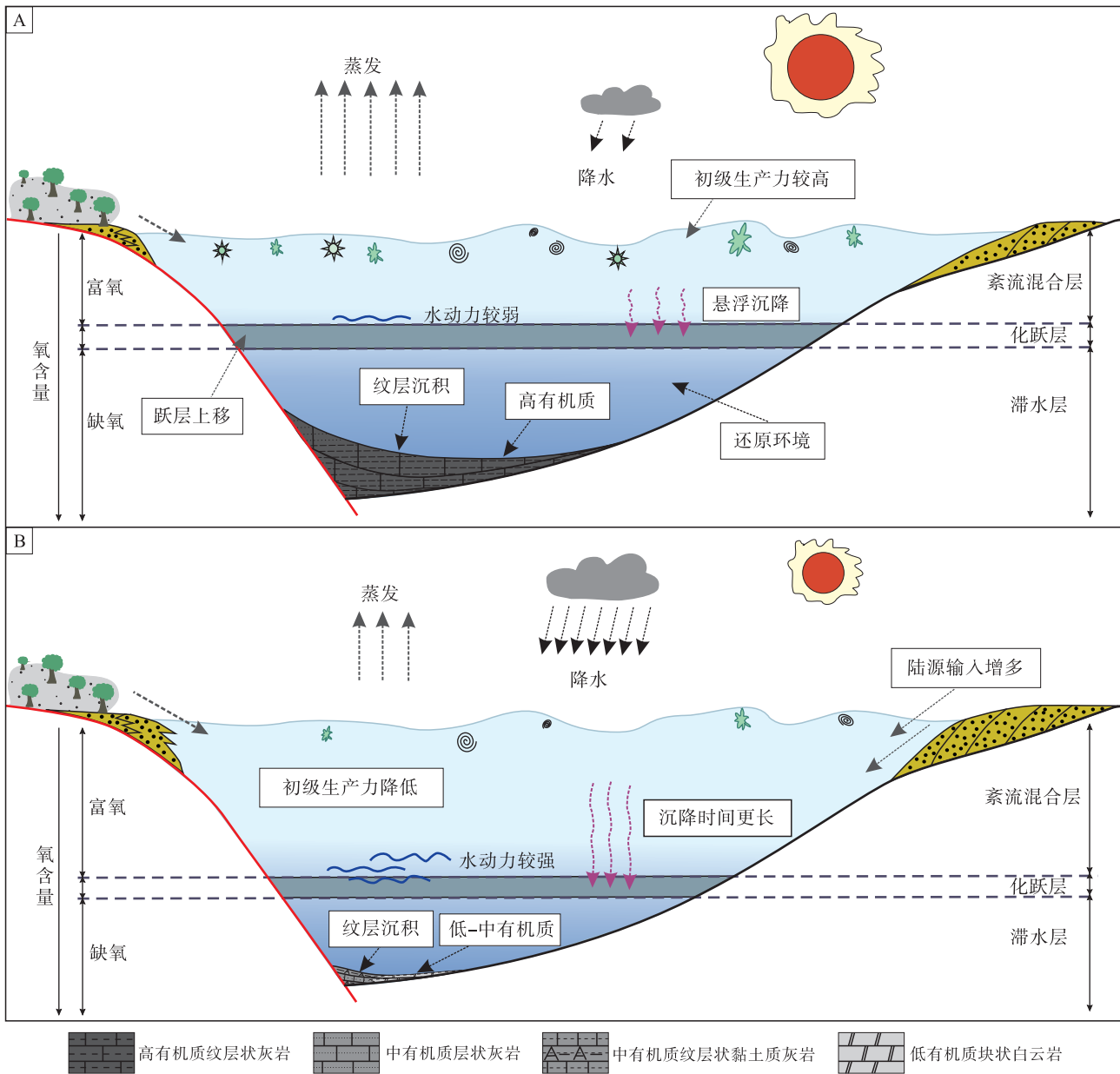


图 8 东营凹陷古近系沙三下亚段咸化湖泊沉积模式

Fig. 8 Sedimentation model of salinized lake from the lower submember of Member 3 of Paleogene Shahejie Formation, Dongying sag

6 结论

1) 以矿物组分含量和沉积构造作为主要依据，沙三下页岩可划分为 5 种岩石类型，其中高有机质亮晶方解石纹层状灰岩和高有机质泥晶方解石纹层状灰岩分布广泛。

2) 沉积环境演化具有阶段性，古盐度在研究层段内变化频繁，自下而上呈现升高→显著降低→升高→持续降低→显著升高的变化趋势；陆源输入量呈较少→增多→减少→增多的旋回变化；古气候

呈现暖湿→相对湿冷→暖湿→相对干冷→相对暖湿的变化特征；水介质整体呈半氧化半还原性，随盐度升高更偏向还原性水体。

3) 高盐度的湖泊水体具有较高的初级生产力，同时盐度升高使得分层水体的跃层上移，而缺氧的还原环境更有利于有机质赋存。因此高盐度还原性水体有利于有机质的富集、碳酸盐矿物的沉淀和纹层的发育，建立了盐度主控的咸化湖泊页岩沉积模式。

参考文献 (References)

- 操应长,梁超,韩豫,蕙克来,王俊然,籍士超,梅俊芳. 2023. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨. 古地理学报, 25(4): 729-741. [Cao Y C, Liang C, Han Y, Xi K L, Wang J R, Ji S C, Mei J F. 2023. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 729-741]
- 曹婷婷,姚威,李志明,李政,黎茂稳. 2020. 渤海湾盆地沾化凹陷湖相泥页岩地球化学特征及有机质富集规律. 石油实验地质, 42(4): 558-564. [Cao T T, Yao W, Li Z M, Li Z, Li M W. 2020. Geochemical characteristics of lacustrine shale and enrichment mechanism of organic matter in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(4): 558-564]
- 邓宏文,钱凯. 1993. 试论湖相泥质岩的地球化学二分性. 石油与天然气地质, 14(2): 85-97. [Deng H W, Qian K. 1993. Geochemical binary division character of lacustrine argillite. *Oil & Gas Geology*, 14(2): 85-97]
- 杜佰松,朱光有,刘舒飞,王业哈,于炳松,徐渴鑫. 2023. 浅析影响方解石生长和溶解的动力学因素及机制. 地学前缘, 30(4): 335-351. [Du B S, Zhu G Y, Liu S F, Wang Y H, Yu B S, Xu K X. 2023. Key factors and mechanisms affecting calcite growth and dissolution: a critical review. *Earth Science Frontier*, 30(4): 335-351]
- 龚德瑜,刘泽阳,何文军,周川闽,秦志军,卫廷召,杨春. 2024. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组有机质多元富集机制. 石油勘探与开发, 51(2): 260-272. [Gong D Y, Liu Z Y, He W J, Zhou C M, Qin Z J, Wei T Z, Yang C. 2024. Multiple enrichment mechanisms of organic matter in the Fengcheng Formation of Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 260-272]
- 郭旭升,马晓潇,黎茂稳,钱丹辉,胡宗全. 2023. 陆相页岩油富集机理探讨. 石油与天然气地质, 44(6): 1333-1349. [Guo X S, Ma X X, Li M W, Qian M H, Hu Z Q. 2023. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1333-1349]
- 蒋龙,杜玉山,张云蛟,王冠民,任敏华,程紫燕,孟维新,侯植耀. 2023. 牛庄洼陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段细粒沉积岩纹层状亮晶方解石脉的发育机理与模式. 石油学报, 44(10): 1637-1649. [Jiang L, Du Y S, Zhang Y J, Wang G M, Ren M H, Cheng Z Y, Meng W X, Hou Z Y. 2023. Development mechanism and model of lamellar calcite veins of fine-grained sedimentary rocks from the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation in Niuzhuang subsag. *Acta Petrolei Sinica*, 44(10): 1637-1649]
- 兰敏文,宋友桂,程良清. 2022. 湖泊碳酸盐矿物的形成过程及古气候环境指示意义. 地球科学与环境学报, 44(2): 156-170. [Lan M W, Song Y G, Cheng L Q. 2022. Review on formation of lacustrine carbonate minerals and their paleoclimate significance. *Journal of Earth Science and Environment*, 44(2): 156-170]
- 黎茂稳,马晓潇,金之钧,李志明,蒋启贵,吴世强,李政,徐祖新. 2022. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义. 石油与天然气地质, 43(1): 1-25. [Li M W, Ma X X, Jin Z Y, Li Z M, Jiang Q G, Wu S Q, Li Z, Xu Z X. 2022. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China. *Oil & Gas Geology*, 43(1): 1-25]
- 李凯,游海涛,刘兴起. 2017. 中国湖泊沉积物纹层年代学研究进展. 湖泊科学, 29(2): 266-275. [Li K, You H T, Liu X Q. 2017. Review on lake sediment varve chronology in China. *Journal of Lake Sciences*, 29(2): 266-275]
- 刘刚,周东升. 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例. 石油实验地质, 29(3): 307-310. [Liu G, Zhou D S. 2007. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: taking Qianjiang Formation in the Jianghan basin as an example. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(3): 307-310]
- 刘惠民,李军亮,刘鹏,王鑫,王勇,邱贻博,李政,王伟庆. 2022. 济阳坳陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向. 石油学报, 43(12): 1717-1729. [Liu H M, Li J L, Liu P, Wang X, Wang Y, Qiu Y B, Li Z, Wang W Q. 2022. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang depression. *Acta Petrolei Sinica*, 43(12): 1717-1729]
- 马义权,杜学斌,刘惠民,陆永潮. 2017. 东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征、成因及演化. 地球科学, 42(7): 1195-1208. [Ma Y Q, Du X B, Liu H M, Lu Y C. 2017. Characteristics, depositional processes, and evolution of shale lithofacies of the upper submember of Es₄ in the Dongying Depression. *Earth Science*, 42(7): 1195-1208]
- 孟庆涛,张训,杨亮,高家俊,刘招军,胡菲,邢济麟,张成铭,康嘉楠,崔博,董秦玮,张恩威. 2024. 陆相湖相沉积细粒沉积有机质富集机理研究: 以松辽盆地长岭凹陷青山口组为例. 古地理学报, 26(2): 401-415. [Meng Q T, Zhang X, Yang L, Gao J J, Liu Z J, Hu F, Xing J L, Zhang C M, Kang J N, Cui B, Dong Q W, Zhang E W. 2024. Mechanism study of organic matter enrichment in fine-grained sediments in continental depression lacustrine basin: an example from the Qingshankou Formation in Changling sag, Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(2): 401-415]
- 彭军,杨一茗,刘惠民,曾垚,于乐丹,许天宇. 2022. 陆相湖盆细粒沉积岩的沉积特征与成因机理: 以东营凹陷南坡陈官庄地区沙河街组四段上亚段为例. 石油学报, 43(10): 1409-1426. [Peng J, Yang Y M, Liu H M, Zeng Y, Yu L D, Xu T Y. 2022. Sedimentary characteristics and genetic mechanism of fine grained hybrid sedimentary rocks in continental lacustrine basin; a case study of the upper submember of Member 4 of Shahejie Formation in Chenguanzhuang area, southern slope of Dongying sag. *Acta Petrolei Sinica*, 43(10): 1409-1426]
- 彭丽. 2017. 济阳坳陷古近系沙三下亚段湖相泥页岩岩相非均质性及其控制因素研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文. [Peng L. 2017. Heterogeneity and Controlling Factors of Lithofacies of the

- Lower 3rd Member of Paleogene Shahejie Formation Lacustrine Shale in Jiyang Depression. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Wuhan)]
- 吴靖,姜在兴,钱侃,徐丹. 2014. 山东省东营凹陷沙四上亚段咸化机制特征. 地球学报,35(6): 733-740. [Wu J, Jiang Z X, Qian K, Xu D. 2014. Characteristics of salinization mechanism on the upper part of Fourth Member of Shahejie Formation in the Dongying sag, Shandong Province. Acta Geoscientica Sinica,35(6): 733-740]
- 徐守余,李学艳. 2005. 胜利油田东营凹陷中央隆起带断层封闭模式研究. 地质力学学报,11(4): 19-24. [Xu S Y, Li X Y. 2005. Fault seal model of the central uplift, Dongying Depression. Journal of Geomechanics,11(4): 19-24]
- 杨万芹,蒋有录,王勇. 2015. 东营凹陷沙三下—沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析. 中国石油大学学报(自然科学版),39(4): 19-26. [Yang W Q, Jiang Y L, Wang Y. 2015. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es3-upper Es4 in Dongying sag. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition),39(4): 19-26]
- 张林晔,孔祥星,张春荣,周文,徐兴友,李政. 2003. 济阳拗陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义. 地球化学,32(1): 35-42. [Zhang L Y, Kong X X, Zhang C R, Zhou W, Xu X Y, Li Z. 2003. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang Depression. Geochimica,32(1): 35-42]
- 张顺,刘惠民,陈世悦,王永诗,蒲秀刚,张奎华,韩文中. 2017. 中国东部断陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案探讨：以渤海湾盆地南部古近系细粒沉积岩为例. 地质学报,91(5): 1108-1119. [Zhang S, Liu H M, Chen S Y, Wang Y S, Pu X G, Zhang K H, Han W Z. 2017. Classification scheme for lithofacies of fine grained sedimentary rocks in faulted basins of eastern China: insights from the fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai Bay Basin. Acta Geologica sinica,91(5): 1108-1119]
- 赵文智,朱如凯,胡素云,侯连华,吴松涛. 2020. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义. 石油勘探与开发,47(6): 1079-1089. [Zhao W Z, Zhu R K, Hu S Y, Hou L H, Wu S T. 2020. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation. Petroleum Exploration and Development, 47(6): 1079-1089]
- 邹才能,朱如凯,白斌,杨智,侯连华,查明,付金华,邵雨,刘可禹,曹宏,袁选俊,陶士振,唐晓明,王岚,李婷婷. 2015. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战. 矿物岩石地球化学通报,34(1): 3-17. [Zou C N, Zhu R K, Bai B, Yang Z, Hou L H, Zha M, Fu J H, Shao Y, Liu K Y, Cao H, Yuan X J, Tao S Z, Tang X M, Wang L, Li T T. 2015. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,34(1): 3-17]
- Adams J A S, Weaver C E. 1958. Thorium to uranium ratios as indicators of sedimentary processes: examples of the concept of geochemical facies. AAPG Bulletin,42: 387-430.
- Boehrer B, Schultze M. 2008. Stratification of lakes. Reviews of Geophysics,46(2): RG2005.
- Li D L, Li R X, Zhu Z W, Wu X L, Liu F T, Zhao B S, Cheng J H, Wang B P. 2018. Elemental characteristics and paleoenvironment reconstruction: a case study of the Triassic lacustrine Zhangjiatan oil shale, southern Ordos Basin, China. Acta Geochimica,37(1): 134-150.
- Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, Wu J, Wang Y S, Hao F. 2018. The sedimentary characteristics and origin of lacustrine organic-rich shale in the salinized Eocene Dongying Depression. Geological Society of America Bulletin,130(1/2): 154-174.
- Liang C, Yang B, Cao Y C, Liu KY, Wu J, Hao F. 2024. Salinization mechanism of lakes and controls on organic matter enrichment: from present to deep-time records. Earth-Science Reviews,251: 104720.
- Tylmann W, Szpakowska K, Ohlendorf C, Woszczyk M, Zolitschka B. 2012. Conditions for deposition of annually laminated sediments in small meromictic lakes: a case study of Lake Suminko(northern Poland). Journal of Paleolimnology,47: 55-70.
- Wang C L, Liu C L, Xu H M, Wang L C, Zhang L B. 2013. Carbon and Oxygen isotopes characteristics of Paleocene saline lake facies carbonates in Jiangling Depression and their environmental significance. Acta Geologica Sinica,34: 567-576.
- Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 287: 341-366.
- Yuri Z N, Eder V G, Zamirailova A G. 2008. Composition and formation environments of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation(the central part of the West Siberian Basin). Marine and Petroleum Geology,25(3): 289-306.
- Zolitschka B, Francus P, Ojala A E K, Schimmelmann A. 2015. Varves in lake sediments: a review. Quaternary Science Reviews,117: 1-41.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)