

李超, 廖新武, 郭诚, 等. 渤海湾盆地莱北低凸起明化镇组明下段古环境[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(2): 43-52.

LI Chao, LIAO Xinwu, GUO Cheng, et al. Paleoenvironment of Lower Member of Minghuazhen Formation in Laibei low uplift, Bohai Bay Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(2): 43-52.

渤海湾盆地莱北低凸起明化镇组明下段古环境

李超, 廖新武, 郭诚, 赵大林, 李扬

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452)

摘要:针对渤海湾盆地莱北低凸起明化镇组明下段沉积古环境特征不清晰, 油气地质意义不明确等问题, 本文综合利用微量元素及古生物资料开展了古气候、古盐度、古氧化还原以及古水深等方面的研究。结果表明: Li、Ga、Sr 元素丰度以及 Sr/Ba 和 Th/U 等微量元素比值指示明化镇组明下段整体属于淡水环境; 对温度和湿度敏感的孢粉组合、反映沉积岩风化强度的蚀变指数 (CIA) 以及 Sr/Cu、Rb/Sr 微量元素比值均指示明化镇组明下段气候处于温寒过渡带; Co 元素含量分析认为, 明下段古水深介于 2.10~12.75 m, 平均古水深为 6.15 m, 指示浅水环境; U/Th、V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、Ce/Ce* 及 Eu/Eu* 比值法证实, 明化镇组明下段为弱还原-氧化环境。上述气候背景、稳定的构造、平缓的古地形以及充足的物源等地质因素的耦合为浅水三角洲的发育创造了条件; 同时, 莱北低凸起明化镇组明下段凹陷相间的构造格局为形成规模油藏提供了有利支撑。

关键词: 莱北低凸起; 明化镇组明下段; 古盐度; 古气候; 古水深; 氧化-还原条件

中图分类号: P618.13; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.254

0 引言

渤海湾盆地莱北低凸起垦利 6-1 亿吨级明星油田的成功发现大力助推了渤海油田上产 4 000 万 t 的步伐。由于对明化镇组明下段沉积时期的古环境认识不清, 沉积背景及油气地质意义认识滞后开发需要, 徒增了油田开发钻井的实施风险。恢复莱北低凸起古环境有利于揭示明化镇组明下段沉积时期的沉积体系特征及有利储层展布规律, 提高油田钻井成功率。古环境恢复通常包括: 古盐度、古气候、氧化-还原条件、古水深等内容。而地球化学及古生物分析是古环境恢复的主要手段, 因而可通过微量元素法、微量元素比值法、常量元素比值法以及孢粉分析等手段来开展古环境研究。为规避油田风险和挖掘油田潜力, 笔者开展了明化镇组明下段沉积时期的古环境研究, 明确了莱北低凸起明化

镇组明下段沉积时期的古环境有利于浅水三角洲的发育。特殊的沉积环境、沉积背景与凹陷相间的构造格局相结合为莱北低凸起形成规模油气藏提供了极佳的地质条件。

1 地质背景

莱北低凸起位于渤海湾盆地南部, 北临黄河口凹陷、南临莱州湾凹陷、东与庙西凹陷相接、西南部为青东凹陷(图 1)。该低凸起构造东西两侧以 NNE 走向的郯庐走滑断裂带为界, 南部以近 EW 向的大断层为界, 是一个整体呈 NE—SW 走向的长轴背斜。垦利 6-1 亿吨级油田位于该低凸起构造带上。钻井研究揭示, 莱北低凸起新生界自下而上依次发育古近系始新统沙河街组三段、渐新统沙河街组二段、沙河街组一段、东营组, 新近系中新统馆陶、明化镇组下段, 上新统明化镇组上段以及第四系平原组。整体缺失古新统, 沙三段局部缺失, 东营组则缺失东一段^[1]。明化镇组下段沉积时期, 莱北低凸起地形坡度极缓、可容纳空间低, 受气候、季节等因素影响造成河流和湖泊环境的频繁交互, 发育一套泥岩与细砂岩、粉砂岩的交互沉积, 储层岩性以

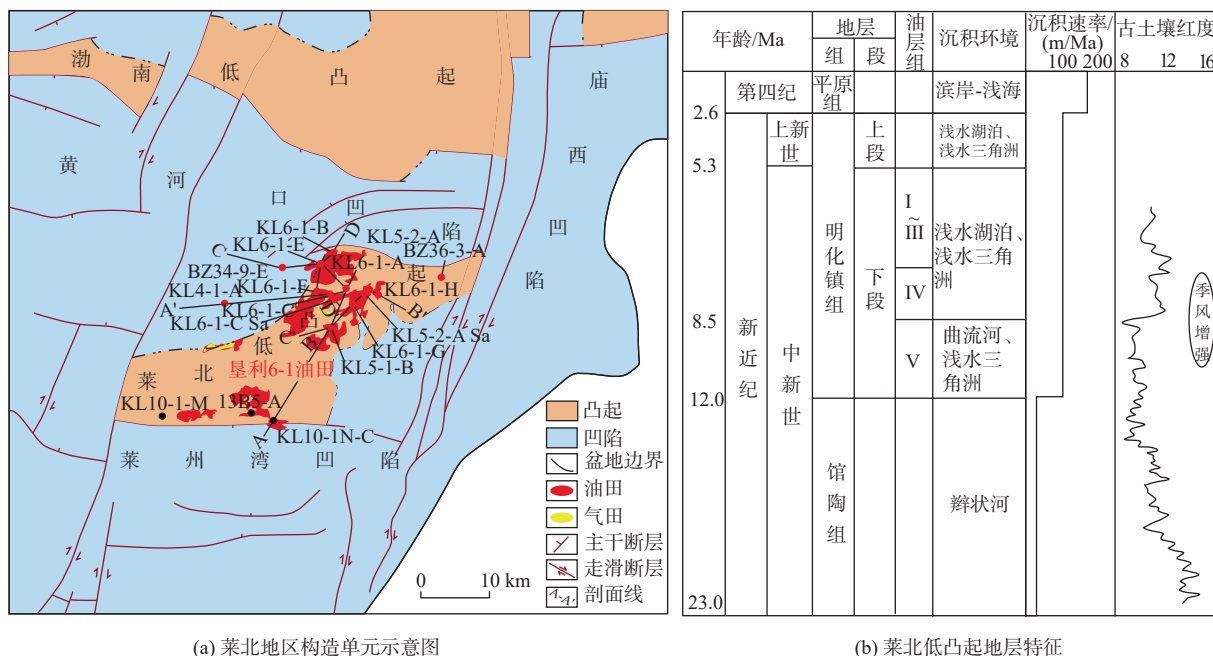
收稿日期: 2023-11-02

资助项目: 中海石油(中国)有限公司重大科研项目“海上油田大幅提高采收率关键技术”(KJGG2021-0505)

第一作者: 李超(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气田开发地质方面的研究工作。Email: lichao2@cnoc.com.cn

中—细粒岩屑长石砂岩为主^[1]。明化镇组下段被划分为 I—V 共 5 个油组, 油藏有效储层测井解释孔隙度为 20.0%~39.6%, 孔隙度中值为 31.9%, 平均

为 30.6%; 渗透率为 $(2.6 \sim 9\,978.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率中值为 $650.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1\,349.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 以高孔、高渗储层为主。



(a) 莱北地区构造单元示意图

(b) 莱北低凸起地层特征

据文献 [1] 修改

图 1 莱北低凸起区域构造位置及层序地层特征

Fig.1 Tectonic setting and sequence stratigraphy of the study area

2 样品采集及分析方法

针对渤海湾盆地莱北低凸起明化镇组明下段的探井分布和井资料情况, 本次研究重点在垦利 6-1 油田的 6-1、5-1 以及 5-2 区块内选取 13 口探井, 共取样 275 个。样品主要为反映地层原始沉积环境信息的泥岩。从实际挑选的样品来看, 明下段泥岩颜色以红褐色、黄褐色以及绿灰色为主。岩屑样品的地球化学元素测试分析由中海油实验中心渤海实验中心用 ZSX PrimusII X 射线荧光光谱仪 (BE64000171-01) 测试完成, 仪器精密度优于 5%, 测试方法依据 GB/T 14506.28—2010《硅酸盐岩石化学分析方法》第 28 部分: 16 个主次成分量测定^[2]。

3 明化镇组明下段沉积期古环境条件研究

3.1 环境古盐度条件

3.1.1 微量元素丰度指示的古盐度特征

在沉积学领域, 由于微量元素化学性质稳定,

能够较好地反映沉积物从母岩区到沉积区相关地质背景信息, 通常被用来分析沉积古环境^[3]。如通过分析锂 (Li)、锶 (Sr)、镓 (Ga) 等微量元素含量及不同微量元素的比值, 明确微量元素的分布规律, 可剖析沉积时期水体的古盐度特征。梁子若等^[4]认为, 咸水环境中, Li 的丰度 (质量分数: w) $> 150 \times 10^{-6}$, Sr 的质量分数 $> 800 \times 10^{-6}$, Ga 的质量分数 $< 8 \times 10^{-6}$; 淡水环境中, Li 的质量分数 $< 90 \times 10^{-6}$, Sr 的质量分数 $< 500 \times 10^{-6}$, Ga 的质量分数 $> 17 \times 10^{-6}$; 半咸水环境中, Ga 的质量分数为 $(8 \sim 17) \times 10^{-6}$ 。本次研究利用研究区 4 口探井深度范围在 840~1 605 m (明下段) 的微量元素分析 (表 1) 发现, 明化镇组明下段的 Li 元素丰度最大值为 82.69×10^{-6} , 最小值为 21.82×10^{-6} , 平均为 37.9×10^{-6} , 其中, V 油组主力含油层 Li 元素平均仅为 34.73×10^{-6} , 而且整个明下段 Li 元素丰度均 $< 90 \times 10^{-6}$, 表明沉积时期主要为淡水环境。而明化镇组明下段 Ga 元素丰度最大值为 34.05×10^{-6} , 最小值为 13.23×10^{-6} , 平均为 21.95×10^{-6} , 主力油层 V 油组 Ga 元素丰度为 20.19×10^{-6} , 超过了 17×10^{-6} 的判别门槛值, 判定为淡水环境。Sr 元素丰度最大值是 374.81×10^{-6} , 最小值为 120.04×10^{-6} , 平均为 164.11×10^{-6} , 按照判别标准, 整体环境应为

表 1 明化镇组明下段沉积岩样品微量元素丰度及比值

Table 1 Abundance trace elements and their ratios of sedimentary rock samples from the Lower Member of Minghuazhen Formation

层位	Li/10 ⁻⁶			Ga/10 ⁻⁶			Sr/10 ⁻⁶		
	咸水	半咸水	淡水	咸水	半咸水	淡水	咸水	半咸水	淡水
	>150	90~150	<90	<8	8~17	>17	800~1000	500~800	100~500
I 油组	37.85 ~ 82.69			16.48 ~ 34.05			137.28 ~ 251.82		
	50.02(25)			23.45(25)			173.40(25)		
II 油组	34.18 ~ 53.41			16.74 ~ 25.81			120.04 ~ 216.57		
	44.62(22)			21.51(22)			161.33(22)		
III 油组	31.03 ~ 51.66			17.36 ~ 27.17			132.57 ~ 208.01		
	44.16(13)			23.24(13)			170.57(13)		
IV 油组	30.19 ~ 46.29			15.48 ~ 25.35			130.29 ~ 229.09		
	39.55(15)			21.37(15)			191.91(15)		
V 油组	17.51 ~ 45.39			13.23 ~ 25.22			149.87 ~ 374.81		
	34.73(26)			20.19(26)			202.04(26)		

最小值~最大值
注: 平均值(样品数)。

淡水环境。综上所述,依据微量元素丰度分析认为,研究区整体属于淡水环境。

3.1.2 微量元素比值指示的古盐度特征

微量元素由于自身性质差异,在相同盐度条件下的溶解度不一样。如 Sr、Ba,在淡水条件下二者一般不发生沉淀,但随着水体盐度的增加,Ba 更易以 BaSO₄ 的形式优先析出,其次是 Sr 以 SrSO₄ 的形式析出。因此,可以通过二者含量比值判断沉积时期水体的古盐度。一般认为, Sr/Ba>1.0,为海相沉积; Sr/Ba 介于 1.0~0.5,为海陆过渡相(半咸水); Sr/Ba<0.5,为陆相(淡水)^[3]。通过莱北低凸起 13 口探井 275 个样品的分析化验数据,统计了明下段 Sr/Ba 比值特征(表 2)。结果发现, Sr/Ba 最大值为 0.29,最小值为 0.03,平均为 0.21,比值整体都<0.5,按照前文所述标准,可判断明下段沉积时期处于淡水环境。由于 Th 容易被黏土矿物吸附,U 容易滤失,因此也可利用 Th/U 比值来判断古盐度。通常认为, Th/U<2,为咸水环境; Th/U 介于 2~7,为半咸水环境; Th/U>7,为淡水环境^[3]。莱北低凸起明化镇组明下段砂岩样品测式的 Th/U 最大值为 5.28,最小值为 3.37,平均为 4.35,比值整体介于 2~7,指示沉积期整体为半咸水环境。结合微量元素丰度指示的古盐度特征,综合判断研究区明下段整体属于淡水环境。

3.2 古气候条件

3.2.1 化学蚀变指数法

前人研究表明,气候条件是岩石风化的关键因素之一,因此可依据岩石的风化程度来反推沉积时期的古气候条件。相关研究认为,上地壳中石英、

斜长石以及钾长石所占的体积百分数相对稳定,地壳化学风化过程中,长石中 Ga、Na 和 K 元素含量较少,从而导致氧化铝与含有 Na、K 元素的碱金属比值变大^[5-6]。因此,便提出了利用蚀变指数(CIA)来反映物源区风化强度以及古气候特征。蚀变指数(CIA)计算方法如下, $CIA=[(Al_2O_3)/(CaO^*+Na_2O+Al_2O_3)]\times 100$, CIA 指数越大,说明化学蚀变作用越强,指示了湿润的古气候环境。本次研究过程中利用莱北低凸起 10 口井的地球化学资料,共计样本点 108 个,分别计算了 Al₂O₃、CaO^{*}+Na₂O 以及 K₂O 的摩尔浓度,并通过(A-CN-K)三端元图版投点发现(图 2),有 78 个点落在了弱化学蚀变区,有 30 个点落在了中等化学蚀变区。表明明化镇组明下段沉积时期为温带、湿润气候^[7]。

3.2.2 Sr/Cu、Rb/Sr 比值法

微量元素由于其性质差异,在沉积物搬运过程中,受古气候条件的影响,部分容易保留,部分容易溶解、迁移。有学者将微量元素划分为喜湿型元素和喜干型元素两大类,因此,可根据喜湿型元素和喜干型元素含量比值剖析沉积时期的古气候条件^[8-11]。基于有限的资料,本次研究选取喜干型元素 Sr 和喜湿型元素 Cu、Rb 的含量比值来对沉积古气候条件进行综合分析。如明化镇组明下段 Sr/Cu、Rb/Sr 的垂向变化趋势连井剖面图所示(图 3),由于 Sr 元素容易在干旱、蒸发的高盐度水体中富集,而喜湿型元素 Cu 容易在湿润条件下富集。前人研究指出, Sr/Cu<10 代表温暖湿润的气候条件, Sr/Cu>10 代表干热的气候条件^[3]。因此,研究区明化镇组明下段沉积时期主要温暖湿润环境。剖面中 KL6-1-5 井和 KL6-1-6 井的 Sr/Cu 存在>10 的情况,说明明下段 V 油组沉积时期,存在短暂的干旱气候环境。

表 2 明化镇组明下段基于 Sr/Ba 和 Th/U 的古盐度判别指标

Table 2 Paleosalinity discrimination indicators based on Sr/Ba and Th/U in the Lower Member of Minghuazhen Formation

层位	井名	微量平均值(样本数)				Th/U			Sr/Ba		
		Sr/10 ⁻⁶	Ba/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	咸水	半咸水	淡水	咸水	半咸水	淡水
						<2	2~7	>7	>1	0.6~1	<0.6
I 油组	KL6-1-2	148.04(4)	594.25(4)	15.81(4)	3.71(4)		4.88			0.25	
	KL6-1-5	185.58(10)	1562.77(10)	11.47(10)	2.32(10)		4.94			0.17	
	KL6-1-6	181.51(5)	615.84(5)	13.99(5)	3.16(5)		4.45			0.29	
	KL6-1-14	163.25(6)	592.73(6)	14.24(6)	2.89(6)		4.97			0.28	
II 油组	KL6-1-2	145.11(7)	618.71(7)	15.30(7)	2.90(7)		5.28			0.24	
	KL6-1-5	168.86(4)	847.51(4)	13.75(4)	2.82(4)		4.88			0.24	
	KL6-1-6	157.77(8)	584.85(8)	11.53(8)	2.55(8)		4.52			0.28	
	KL6-1-14	166.46(3)	1573.66(3)	12.63(3)	3.55(3)		3.77			0.11	
III 油组	KL6-1-2	141.72(3)	749.85(3)	15.01(3)	3.07(3)		4.89			0.19	
	KL6-1-5	158.70(4)	938.97(4)	13.23(4)	3.00(4)		4.41			0.20	
	KL6-1-6	163.52(3)	739.78(3)	11.02(3)	2.56(3)		4.31			0.23	
	KL6-1-14	193.69(3)	1971.72(3)	13.51(3)	2.83(3)		4.77			0.10	
IV 油组	KL6-1-2	205.92(4)	2264.19(4)	13.33(4)	4.49(4)		3.37			0.12	
	KL6-1-5	180.46(4)	1478.66(4)	12.77(4)	3.22(4)		3.97			0.16	
	KL6-1-6	168.88(4)	731.44(4)	10.92(4)	5.04(4)		3.57			0.25	
	KL6-1-14	206.46(3)	4229.79(3)	12.64(3)	2.89(3)		4.39			0.05	
V 油组	KL6-1-2	187.69(7)	1849.68(7)	13.90(7)	3.29(7)		4.24			0.13	
	KL6-1-5	190.51(6)	2087.58(6)	12.85(6)	3.63(6)		4.05			0.13	
	KL6-1-6	161.52(7)	2051.82(7)	9.23(7)	2.34(7)		3.96			0.09	
	KL6-1-14	255.79(6)	7430.74(6)	12.51(6)	2.99(6)		4.23			0.03	

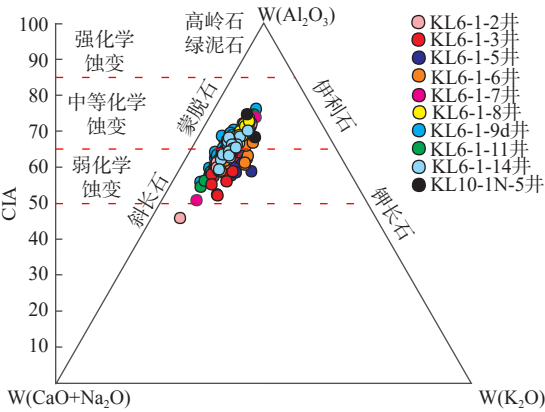


图 2 明化镇组明下段砂岩风化程度的 A-CN-K 三角图^[7]
Fig.2 A-CN-K triangle diagram of the weathering degree of sandstone in the Lower Member of Minghuazhen Formation^[7]

此外,由于喜湿型元素 Rb 容易保留在黏土矿物中,而喜干型元素 Sr 容易发生迁移,这二者的比值也通常用来判断沉积古气候条件。在明下段沉积时期 Rb/Sr 值总体较高,说明喜湿型元素 Rb 含量高,而喜干型元素 Sr 含量相对较低,说明此时沉积古气候以湿润气候条件为主。综上所述,研究区明化镇组明下段主要以湿润气候为主,在 V 油组沉积期有短暂的干旱气候出现(图 3)。

3.2.3 基于孢粉分析的古气候特征

气候环境是生物生长、分布的关键因素之一,不同气候环境,生物的种属和分布也各不相同。尤其是植物,由于不具备动物的迁徙能力,其化石往往被用来分析沉积古环境和古气候。在古生物学和地史学中,孢子和花粉因个体体积小而且容易保存的特点,通常被研究人员用来作为古气候研究的重要资料^[3,12-13]。本文以 KL6-1-3 井为例(图 4),通过定性和定量分析,利用对温度和湿度敏感型孢粉组合变化的丰度差异来恢复研究区明化镇组明下段沉积期古气候。

根据植物对气候环境的选择性,结合研究区已有的古生物资料情况,以 KL6-1-3 井 792~1 538 m 深度段为例,利用孢粉植物进行气候区带划分。按照温度可识别出亚热带孢粉、亚热带—温带过渡带孢粉、温带孢粉、温带—寒带过渡带孢粉、寒带孢粉等 5 类。其中,亚热带孢粉中枫香粉属孢粉有一定程度分布,主要集中在明化镇组明下段 V 油组,其次为山核桃粉属孢粉,在整个明下段均有分布,其余栎粉属、漆树粉属、雪松粉属、水龙骨单缝孢属则发育程度低。亚热带—温带过渡带孢粉中,榆

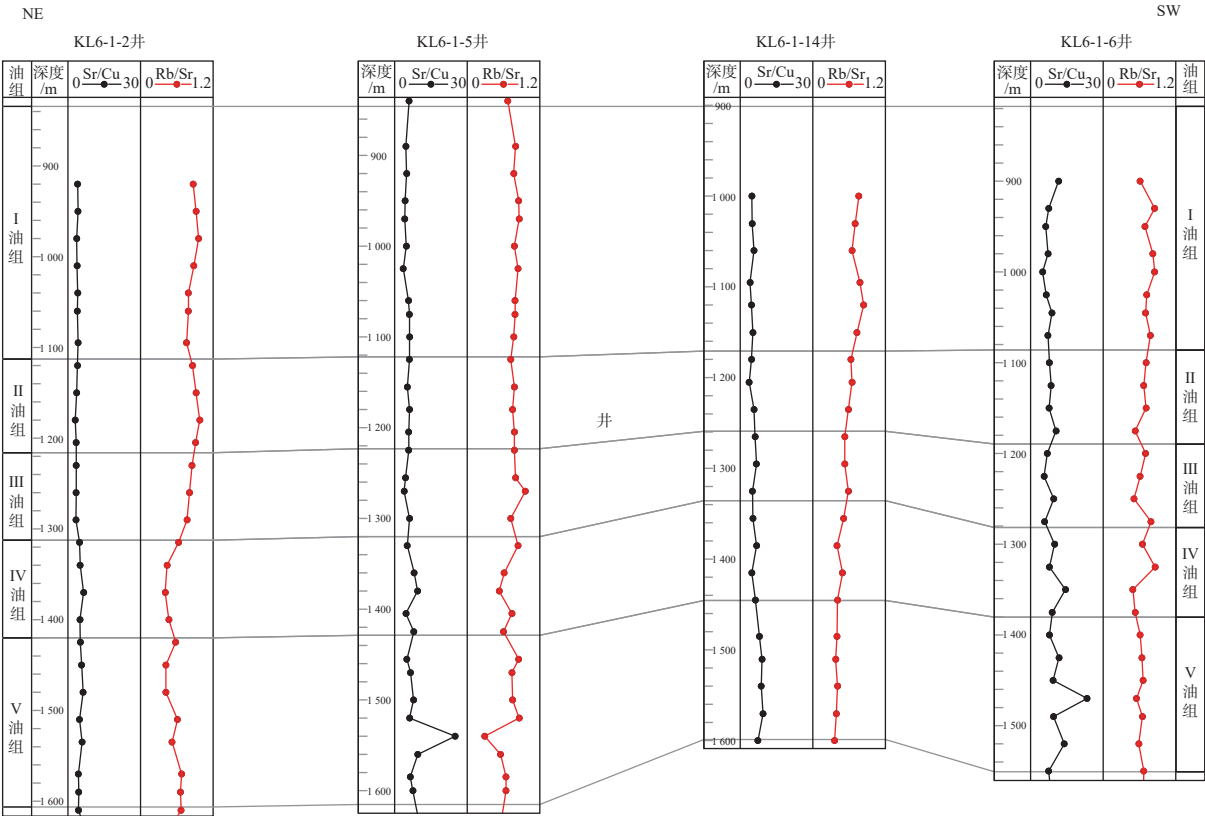


图 3 明化镇组明下段 Sr/Cu、Rb/Sr 垂向变化趋势连井剖面图

Fig.3 Vertical variation trends of Sr/Cu and Rb/Sr in the well-to-well correlation of the Lower Member, the Minghuazhen Formation

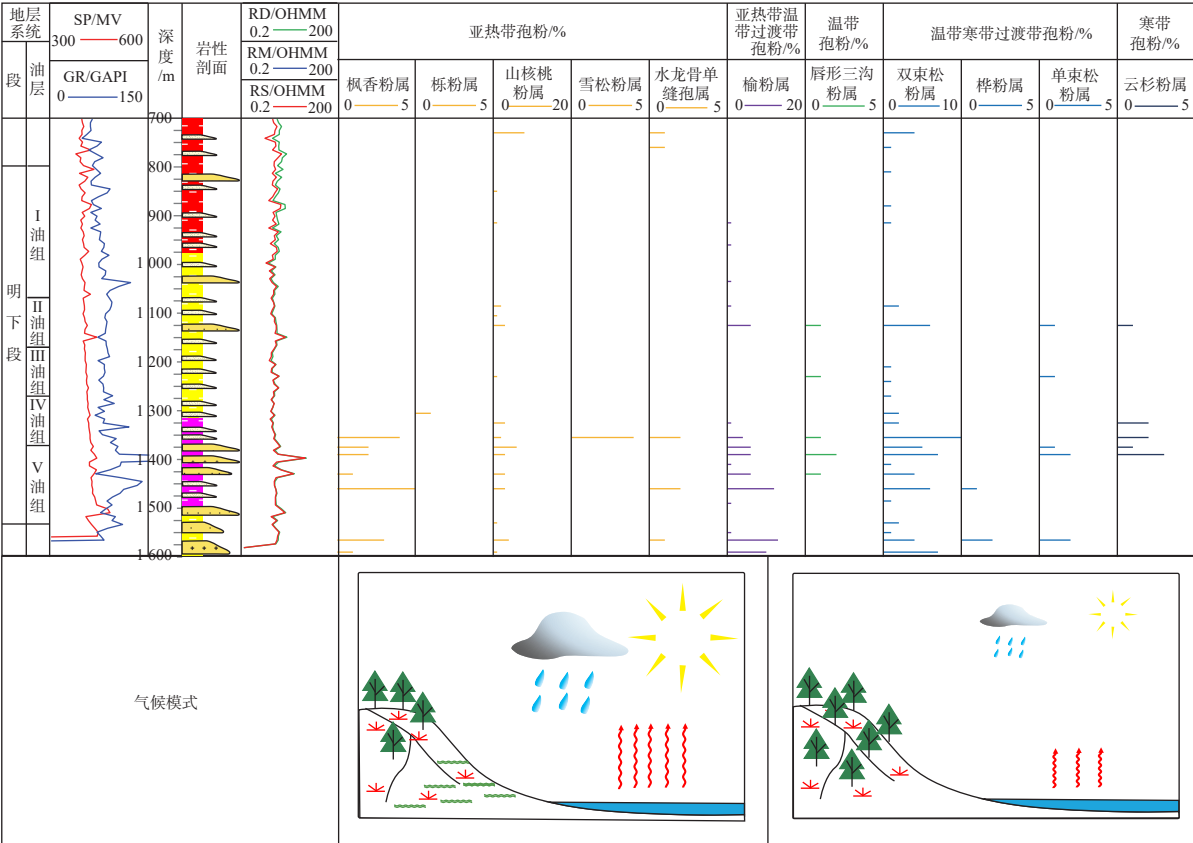


图 4 明化镇组明下段孢粉纵向分布及气候模式

Fig.4 Vertical distribution and climate model in palynology of the Lower Member, the Minghuazhen Formation

粉属孢粉发育程度高,在明下段 I 油组、IV 油组和 V 油组均有分布,反映温带气候环境的唇形三沟粉属发育程度低。指示温带—寒带过渡带的双束松粉属个数和含量在所有孢粉中占了绝对优势,整个明下段均有分布,数量上 IV 油组和 V 油组最多,而桦粉属、单束松粉属发育程度较低。寒带孢粉云杉粉属个数少,纵向分布程度低,仅在 IV 油组有少量分布,其余各油组不发育。综上分析表明,反映古环境的各类孢粉集中分布在明化镇组明下段 IV 油组和 V 油组,从孢粉数量的绝对优势来看,沉积时期主要为温寒过渡带气候。

3.3 基于 Co 元素分析的古水深条件

通常情况下,利用古地貌恢复技术结合反映氧化还原环境的泥岩分布情况以及沉积相特征,可以定性半定量分析沉积时期的古水深。但是这种分析方法往往精度不高,受人为影响因素较大。考虑到宇宙中 Co 元素平均含量稳定、能够反映沉积物的沉积速率。有学者提出利用钴(Co)元素来定量计算沉积时期古湖盆水体深度,计算公式如(1)所示:

$$V_s = V_o \times \frac{N_{Co}}{S_{Co} - t \times T_{Co}} \quad (1)$$

$$t = \frac{S_{La}}{N_{La}} \quad (2)$$

$$h = (3.05 \times 10^5) / (V_s)^{3/2} \quad (3)$$

式中: V_s 为该样品沉积时期的沉积速率, mm/a;

V_o 为当时正常湖泊沉积速率, mm/a;

N_{Co} 为正常湖泊沉积物中的 Co 元素的丰度 (20×10^{-6});

S_{Co} 为样品中 Co 元素的丰度, 10^{-6} ;

T_{Co} 为陆源碎屑岩中钴元素的平均丰度, 4.68×10^{-6} ;

t 为来自物源的 Co 对样品的贡献值;

S_{La} 为样品中测试的 La 的丰度, 10^{-6} ;

N_{La} 是陆源碎屑沉积岩中 La 的平均丰度, 38.99×10^{-6} ;

h 为恢复的古水深, m^[14-15]。

本次研究共选取 13 口探井的泥岩样品微量元素分析化验数据,利用上述公式定量计算了古水深(表 3)^[7]。明化镇组明下段样品数据中 Co 元素含量最小值为 9.14×10^{-6} ,最大值为 29.54×10^{-6} ,平均为 18.02×10^{-6} 。La 元素含量最小值为 24.13×10^{-6} ,最大值为 73.10×10^{-6} ,平均值为 44.58×10^{-6} 。基于上述 2 个微量元素的含量以及常量元素数据,可计算出样品沉积时期的沉积速率以及当时的古水深。结果表明,沉积速率与古水深呈反比关系,水体越浅,沉积速率越大。明化镇组明下段古水深介于 2.10~12.75 m,平均为 6.15 m,指示明下段沉积期整体为浅水环境,这与前文基于岩性特征指示的水体环境相对应。明下段自下而上 V 油组—I 油组,湖盆水体深度逐渐变深,整个 V 油组沉积时期水体最浅,平均水深为 4.78 m,也进一步表明了研究区古水深符合浅水三角洲的形成条件。

表 3 研究区明下段泥岩样品古水深参数^[7]

Table 3 Paleowater depth parameters of mudstone samples from the Lower Member of the Minghuazhen Formation in the study area^[7]

层位	Co/ 10^{-6}	La/ 10^{-6}	t	V_s	h/m
I 油组	15.49 ~ 29.54	39.09 ~ 73.10	1 ~ 1.87	0.39 ~ 0.74	4.78 ~ 12.75
	19.88(25)	45.21(25)	1.16(25)	0.57(25)	7.49(25)
II 油组	14.15 ~ 23.18	38.71 ~ 51.18	0.99 ~ 1.31	0.45 ~ 0.84	3.95 ~ 10.14
	18.12(22)	43.75(22)	1.12(22)	0.63(22)	6.27(22)
III 油组	15.88 ~ 20.87	39.85 ~ 60.66	1.02 ~ 1.56	0.51 ~ 0.83	4.04 ~ 8.43
	18.18(13)	46.81(13)	1.20(13)	0.65(13)	6.05(13)
IV 油组	15.42 ~ 20.75	37.78 ~ 50.62	0.97 ~ 1.3	0.52 ~ 0.76	4.64 ~ 8.06
	18.11(15)	44.64(15)	1.14(15)	0.63(15)	6.16(15)
V 油组	9.14 ~ 20.53	24.13 ~ 53.13	0.62 ~ 1.36	0.53 ~ 1.28	2.10 ~ 7.84
	15.77(26)	42.48(26)	1.09(26)	0.79(26)	4.78(26)

最小值~最大值

注: 平均值(样品数)。

3.4 古氧化—还原条件

微量元素可以有效地指示沉积环境的氧化-还

原条件,钒(V)、铬(Cr)、铜(Cu)、钴(Co)、镍(Ni)、钍(Th)等元素的含量及其比值可作为古氧化还原条件的判别指标^[4],同时稀土元素中铈(Ce)异常和

铕 (Eu) 异常也可以指示环境改变。通过 U/Th、V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)、Ce/Ce* 以及 Eu/Eu* 比值法可对氧化-还原条件进行判别^[16]。

3.4.1 U/Th、V/Cr、V/(V+Ni) 及 Ni/Co 比值法

前人利用 U/Th、V/Cr、V/(V+Ni) 及 Ni/Co 比值等方法进行氧化-还原环境的综合判断,并给出了对应的判断依据(表 4)。

U 元素易氧化和迁移,而 Th 为惰性元素,相对稳定且迁移能力弱。依据研究区明化镇组明下段的 U/Th 发现(图 5),除 KL6-1-2 和 KL6-1-6 井在 IV 油组存在 2 个高值点以外,各单井 U/Th 多 < 0.3。计算研究区各井 U/Th 比值,最大为 1.19,最小为 0.20,平均为 0.27,指示明下段沉积期主要是氧化环境,在 IV 油组沉积初期和 V 油组沉积末期为短暂的贫氧环境。Cr 通常分布于陆源碎屑,V 多分布在还原条件下的沉积物中,因此,V/Cr 比值常用来作为

表 4 基于微量元素比值的古氧化-还原参照表^[17-18]

Table 4 Indicators of paleo-redox condition based on trace element ratios^[17-18]

古氧化-还原指标			
微量元素比值	氧化环境	贫氧环境	缺氧环境
U/Th	<0.75	0.75~1.25	/
V/Cr	<2	2~4.5	/
V/(V+Ni)	<0.6	0.6~0.84	0.84~0.9
Ni/Co	<5	/	/

古氧化还原参数^[19]。通过样品中 Cr 和 V 元素的含量计算 V/Cr,发现 4 口井 V/Cr 比值均 < 2.1,平均仅为 1.73,依据表 4 判断其为氧化环境到贫氧环境。微量元素 V/(V+Ni)最大值为 0.89,最小值为 0.79,平均为 0.86,指示整体沉积环境为贫氧环境;微量元素 Ni/Co 最大值为 3.13,最小值为 2.47,平均为 2.77,指示整体沉积环境为贫氧环境。综上所述,研究区明下段沉积环境整体为弱氧化-弱还原环境。

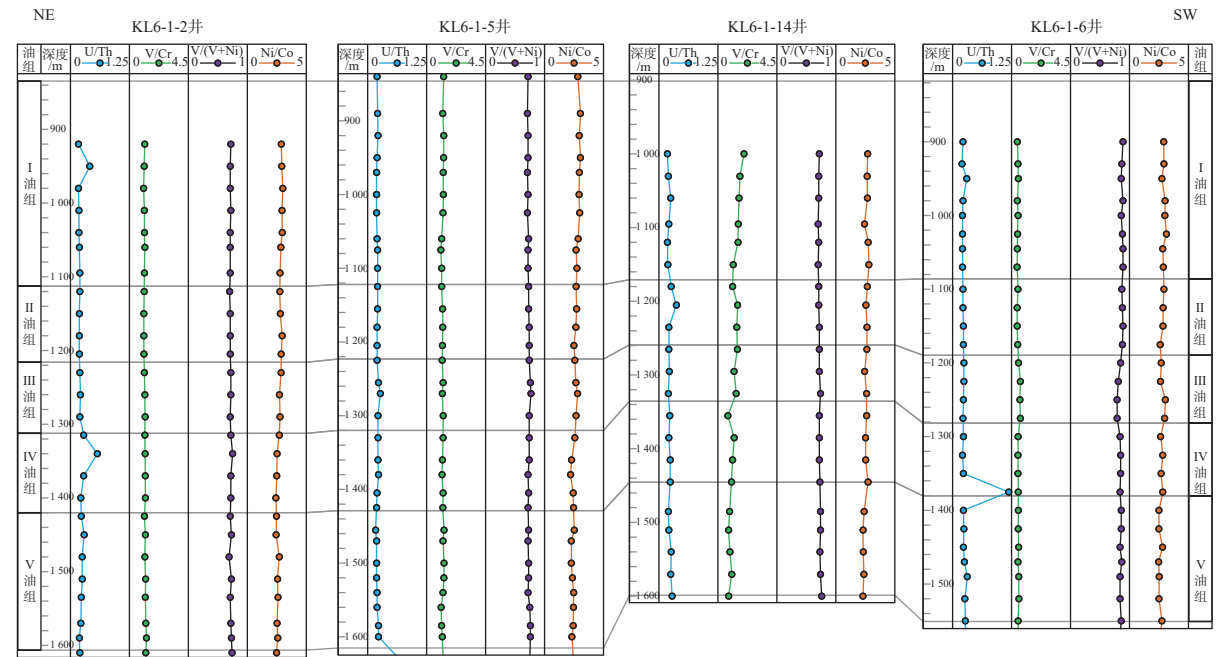


图 5 反映氧化还原环境的微量元素比值连井剖面

Fig.5 Well-to-well correlation of trace element ratios in reactive redox environments

3.4.2 Ce/Ce*和 Eu/Eu*比值法

在利用地球化学方法开展沉积环境分析过程中,通常利用稀土元素的稳定性来判断沉积时期的古氧化-还原特征。由于 Ce 和 Eu 为变价元素,既可以在氧化环境中成为 Ce⁺⁴ 和 Eu⁺³,也可以在还原环境中被还原呈+3 价的 Ce 和+2 价的 Eu。Eu⁺³ 在还原环境中变为 Eu⁺² 易发生沉淀,导致 Eu 富集,而其在氧化环境中不易留存。同样+4 价的 Ce 在还原条件容易变为 Ce⁺³ 溶解于水中,导致沉积物中 Ce

含量降低。反之,在氧化条件下易沉淀,导致 Ce 富集。因此,有学者利用 Ce/Ce*(Ce* = 10^{1/2}(lgLa+lgPr)) 和 Eu/Eu*(Eu* = 10^{1/2}(lgSm+lgGd)) 比值法,即 Ce 和 Eu 的异常情况来判断沉积环境(Ce*为 Ce 的平均值,Eu*为 Eu 平均值),计算方法为中国东部泥质岩稀土平均含量计算方法,Ce/Ce* < 1、Eu/Eu* < 1 为氧化环境;反之,二者均 > 1 则为还原环境^[20]。前文已阐述了 V/(V+Ni)也可指示水体的氧化-还原环境。因此,可考虑 Ce/Ce*和 Eu/Eu*比值与 V/(V+

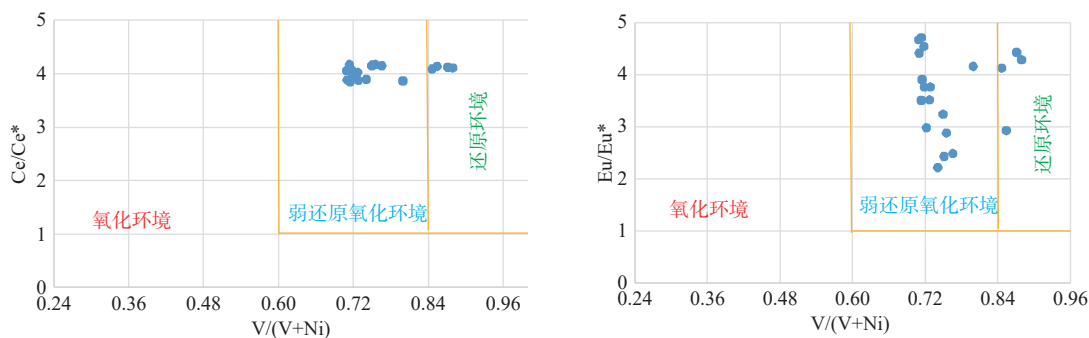


图6 莱北低凸起明化镇组明下段沉积环境分析判别图

Fig.6 Analysis and discrimination of sedimentary environment in the Lower Member of Minghuazhen Formation in the Laibei low uplift

Ni)的比值交汇分析进行综合判断。如图6所示, Ce/Ce^* 和 Eu/Eu^* 均 > 2 , $V/(V+Ni) > 0.7$, 指示沉积时期水体较浅, 为弱还原-氧化环境。

4 古环境条件下的地质意义

本文通过地球化学资料以及孢粉资料的综合分析, 认为莱北低凸起明化镇组明下段沉积时期气候湿润, 古水深介于 2.10~12.75 m, 平均古水深为 6.15 m, 沉积背景为淡水、微咸水, 明下段沉积环境整体为弱还原-氧化环境, 莱北低凸起北东方向物源供给充裕, 加之地层倾角 $< 1^\circ$ 。特定的古气候条件、物源供给以及平缓的地形特征为明下段浅水三角洲沉积创造了条件。高密度河流进入低密度淡水湖泊, 在极浅水条件下, 湖泊水体能量抵消作用弱, 河道下切延伸距离远, 容易形成以水下分流河道为骨架的储层砂体。由于莱北低凸起北临黄河口凹陷、南临莱州湾凹陷、东与庙西凹陷相接、西南部为青东凹陷(图1)。周缘的生烃凹陷与NE—SW走向的莱北低凸起形成了极好的成藏条件。薛永安等^[21]针对莱北低凸起提出“汇聚脊控制源外油气成藏和富集”, 并认为该区域明化镇明下段发育大型叠置连片“枝-蔓”砂体。通过沉积古环境的恢复以及基于地震资料预测的沉积微相平面展布也进一步佐证了其观点的可靠性。来自明下段下部的沙河街组和东营组生成油气在以“泥包砂”为特征的水下分流河道中聚集成藏, 为垦利6-1亿吨级油藏的形成创造了有利条件。

5 结论

(1) Li元素丰度均值为 37.9×10^{-6} , Ga元素丰度均值为 17.83, Sr元素丰度均值为 164.11, Sr/Ba平

均为 0.21, U/Th 平均为 0.24, 均指示了明化镇组明下段处于淡水、微咸水环境。

(2) Sr/Cu、Rb/Sr 比值法表明, 研究区明化镇组明下段主要以湿润气候为主, 在 V 油组沉积期有短暂的干旱气候出现。目的层段 IV 油组、V 油组整体以亚热带的枫香粉属、山核桃粉属和亚热带—温带过渡带榆粉属为主, 孢粉数量丰富, 沉积时期为亚热带—温带过渡带、温寒过渡带气候。

(3) 利用 Co 和 La 元素定量计算了明化镇组明下段古水深为 2.10~12.75 m, 平均为 6.15 m, 指示明下段沉积期整体为浅水环境。

(4) U/Th、 $V/(V+Ni)$ 、 V/Cr 及 Ni/Co 比值法以及 Ce/Ce^* 和 Eu/Eu^* 比值法表明, 明化镇组明下段沉积时期水体较浅, 为弱还原-氧化环境。

参考文献:

- [1] 徐长贵, 杨海风, 王德英, 等. 渤海海域莱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, 2021, 48(1): 12-25.
XU C G, YANG H F, WANG D Y, et al. Formation conditions of Neogene large-scale high-abundance lithologic reservoir in the Laibei low uplift, Bohai Sea, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 12-25.
- [2] 沈文超, 邵龙义, 周倩羽, 等. 西湖凹陷古近系平湖组泥质岩地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质学报, 2022, 96(6): 2078-2093.
SHEN W C, SHAO L Y, ZHOU Q Y, et al. Geochemistry of argillaceous rocks of the Eocene Pinghu Formation from Xihu Depression in East China Sea Basin and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(6): 2078-2093.
- [3] 曾传富. 鄂尔多斯盆地中三叠统纸坊组沉积特征及古环境研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
ZENG C F. Sedimentary characteristics and paleoenvironment in Zhifang Formation of the Middle Triassic in Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [4] 梁子若, 侯明才, 曹海洋, 等. 内蒙古大青山石拐盆地侏罗系

- 元素地球化学特征及沉积环境指示意义 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2020, 47(3): 307-317.
- LIANG Z R, HOU M C, CAO H Y, et al. Elemental geochemistry characteristics of Jurassic and indication of sedimentary environment of Shiguai Basin, Daqingshan, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(3): 307-317.
- [5] 徐小涛, 邵龙义. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素 [J]. 古地理学报, 2018, 20(3): 515-522.
- XU X T, SHAO L Y. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(3): 515-522.
- [6] 蔡雄飞, 叶琴, 肖明元. 对南华系下统莲沱组 CIA 值寒冷气候认识的几点商榷: 以鄂西神农架、湘西北南华系莲沱组为例 [J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(4): 621-636.
- CAI X F, YE Q, XIAO M Y. Some opinions concerning the understanding of CIA cold climate of the Liantuo Formation of Nanhua System: exemplified by the Nanhua System from Shennongjia in western Hubei and western Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(04): 621-636.
- [7] 廖新武, 杨庆红, 李超, 等. 渤海湾盆地垦利 6-1 油田新近系明化镇组下段浅水三角洲沉积特征 [J]. 岩性油气藏, 2025, 37(2): 1-11.
- LIAO X W, LIU Z B, LI C, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta in the Neogene lower member of Minghuazhen Formation, Kenli 6-1 Oilfield in Bohai Bay Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(2): 1-11.
- [8] 韩永林, 王海红, 陈志华, 等. 耿湾—史家湾地区长 6 段微量元素地球化学特征及古盐度分析 [J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 20-26.
- HAN Y L, WANG H H, CHEN Z H, et al. Paleosalinity analysis and trace element geochemistry of Chang 6 Member in Gengwan-Shijiaowan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 20-26.
- [9] 王昌勇, 郑荣才, 刘哲, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 9 油层组古盐度特征及其地质意义 [J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 159-165.
- WANG C Y, ZHENG R C, LIU Z, et al. Paleosalinity of Chang 9 Reservoir in Longdong area, Ordos Basin and its geological significance[J]. Acta Sedimentologica, 2014, 32(1): 159-165.
- [10] 金明, 李婉巍. 乌兰花地区下白垩统、上新统岩石地球化学特征及其古气候演变 [J]. 铀矿地质, 2003, 19(6): 349-354.
- JIN M, LI W W. Petrogeochemical characteristics of Lower Cretaceous and Pliocene rocks and paleoclimate evolution in Wulanhua region[J]. Uranium Geology, 2003, 19(6): 349-354.
- [11] 刘新宇, 邵磊, 史德锋, 等. 西沙西科 1 井元素地球化学特征与海平面升降的关系 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(6): 8-17.
- LIU X Y, SHAO L, SHI D F, et al. Element geochemistry of Well Xike 1 on the Xisha Islands and its bearing on sea level fluctuation[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(6): 8-17.
- [12] 徐兆辉, 胡素云, 汪泽成, 等. 古气候恢复及其对沉积的控制作用: 以四川盆地上三叠统须家河组为例 [J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 235-244.
- XU Z H, HU S Y, WANG Z C, et al. Restoration of paleoclimate and its geological significance: as an example from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 235-244.
- [13] 李杰, 杨士雄, 梅西, 等. 中国陆架海区第四纪孢粉学研究进展 [J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(2): 42-51.
- LI J, YANG S X, MEI X, et al. Progress of Quaternary palynology researches in Chinese shelf areas[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(2): 42-51.
- [14] 吴智平, 周瑶琪. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法 [J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 395-399.
- WU Z P, ZHOU Y Q. Using the characteristic elements from meteoritic dust in strata to calculate sedimentation rate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 395-399.
- [15] 张才利, 高阿龙, 刘哲, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 油层组沉积水体及古气候特征研究 [J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 582-587.
- ZHANG C L, GAO E L, LIU Z, et al. Study of character on sedimentary water and paleoclimate for Chang 7 oil layer in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 582-587.
- [16] 冯乔, 张耀, 徐子苏, 等. 胶莱盆地早白垩世瓦屋店组、水南组元素地球化学特征与古环境分析 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2018, 37(1): 20-34.
- FENG Q, ZHANG Y, XU Z S, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental analysis of dark fine grained rocks of Wawukuang and Shuinan Formations in Jiaolai Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(1): 20-34.
- [17] 李广之, 胡斌, 邓天龙, 等. 微量元素 V 和 Ni 的油气地质意义 [J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 13-17.
- LI G Z, H B, DENG T L, et al. Petroleum geological significance of microelements V and Ni[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 13-17.
- [18] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标: 元素地球化学综述 [J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(2): 76-88.
- WEI H Y. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: an overview of elementary geochemistry[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(2): 76-88.
- [19] 连梦利, 刘达东, 林瑞钦, 等. 黔北地区五峰组—龙马溪组页岩沉积环境及有机质富集机理 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53(9): 3756-3772.
- LIAN M L, LIU D D, LIN R Q, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of Wufeng-Longmaxi shale in the northern Guizhou area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3756-3772.
- [20] 刘鑫, 尚婷, 田景春, 等. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长 4+5 段沉积期古环境条件及意义 [J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3501-3518.
- LIU X, SHANG T, TIAN J C, et al. Paleo-sedimentary environ-

- mental conditions and its significance of Chang 4+5 Member of Triassic Yanchang Formation in the Zhenbei area, Ordos Basin, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11): 3501-3518.
- [21] 薛永安, 杨海风, 徐春强, 等. 渤海湾盆地垦利 6-1 亿吨级岩性油田成藏条件及勘探关键技术 [J]. *石油学报*, 2022, 43(2):

307-324.

XUE Y A, YANG H F, XU C Q, et al. Accumulation conditions and key technologies for exploration of Kenli6-1 as the hundred-million-ton-level lithologic oilfield in Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(2): 307-324.

Paleoenvironment of Lower Member of Minghuazhen Formation in Laibei low uplift, Bohai Bay Basin

LI Chao, LIAO Xinwu, GUO Cheng, ZHAO Dalin, LI Yang

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC (China) Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The characteristics of ancient sedimentary environment and the geological significance of oil and gas in the Lower Member of Minghuazhen Formation in the Laibei low uplift of the Bohai Bay Basin remain to be clarified. We utilized comprehensively the trace elements and paleontological data and analyzed the climate, salinity, redox conditions, and water depth during the time of Minghuazhen Formation to understand the paleoenvironment. Results indicate that the abundance of Li, Ga, Sr elements, and the ratios of Sr/Ba and Th/U trace elements, reflect that the sediments were formed in a freshwater environment. Data from the palynological assemblages sensitive to temperature and humidity, the alteration index (CIA) reflecting the weathering intensity of sedimentary rocks, and the Sr/Cu, Rb/Sr trace element ratios all indicate a warm and cold transition zone. The analysis of cobalt element content suggests that the ancient water depth ranges from 2.10 to 12.75 m, on average of 6.15 m, indicating a shallow water environment. All the contents or ratios of U/Th, V/(V+Ni), V/Cr, Ni/Co, Ce/Ce*, and Eu/Eu* reflect a weak redox environment. The joint working by the ancient climate background, stable geological structures, and gentle terrain favored the development of shallow water deltas, and the structural pattern of alternating depressions and uplifts provided a good support for the formation of large-scale oil reservoirs in the Minghuazhen Formation.

Key words: Laibei low uplift; Lower Member of Minghuazhen Formation; paleosalinity; paleoclimate; paleowater depth; redox conditions