

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.12.011

引文格式: 张波, 郭晓英, 孟涛, 姜超, 刘鹏, 陈勇. 2025. 渤南洼陷沙四下亚段微量元素地球化学特征及其对沉积环境的指示[J]. 华东地质, 46(1): 55-67. (ZHANG B, GUO X Y, MENG T, JIANG C, LIU P, CHEN Y. 2025. Geochemical characteristics of trace elements in the Es₄^x Formation of the Bonan Sag and their implications for sedimentary environment [J]. East China Geology, 46(1): 55-67.)

渤南洼陷沙四下亚段微量元素地球化学特征 及其对沉积环境的指示

张 波¹, 郭晓英^{2,3}, 孟 涛¹, 姜 超¹, 刘 鹏¹, 陈 勇^{2,3}

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000;
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;
3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 渤南洼陷是渤海湾盆地重要的油气富集区, 为了进一步明确渤南洼陷沙四下亚段烃源岩的沉积环境和生烃潜力, 文章对其典型泥岩样品进行了微量元素测试和有机地球化学特征分析。选择对沉积环境较敏感的元素和元素组合(如 δCe_n 、 Ce_{anom} 、 Ni/Co 、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 、 V/Cr 、 B/Ga 等)进行分析, 并结合有机地球化学特征, 明确了渤南洼陷沙四下亚段沉积时期的气候、氧化还原环境和水体盐度等特征, 通过对比分析进一步探讨了这些参数在研究区古环境分析中的适用性, 以及影响有生烃潜力的烃源岩发育的因素。结果表明, 研究区泥岩的 La_n/Yb_n 值为 1.62~3.00, B/Ga 值为 1.43~3.73, 偏黑色泥岩的 $\text{Pr}/\text{Ph}<1$ 、 $\delta\text{Ce}_n>1$ 、 $\text{Ce}_{\text{anom}}>0$, 偏红色泥岩的 δCe_n 值为 0.95~0.96, $\text{Ce}_{\text{anom}}<0$, 这说明渤南洼陷沙四下亚段沉积时期部分区域气候温暖湿润, 沉积物沉积速率较慢, 整体处于淡水-微咸水环境, 且偏红色泥岩沉积于氧化环境, 偏黑色的泥岩沉积于弱还原环境。对比分析结果显示, 使用 δCe_n 、 Ce_{anom} 判别氧化-还原环境是可靠的, 根据泥岩的 Ni/Co 值、 V/Ni 值和 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值的相对大小可以推断其沉积时环境的缺氧程度, 根据 B/Ga 值可以区分淡水-微咸水和咸水环境。研究区泥岩干酪根类型指数为 -26.8~77.1, 为 II型-III型干酪根; 部分泥岩的 TOC、 S_1+S_2 、氯仿沥青 “A” 的含量表明其已经达到一般的烃源岩水平。与研究区的非烃源岩相比, 其 B/Ga 值较小, ETR 指数和伽马蜡烷指数较大, 这表明在缺氧环境下, 能否发育有生烃潜力的烃源岩可能取决于沉积水体的盐度。

关键词: 渤南洼陷; 沙四下亚段; 微量元素; 沉积环境

中图分类号: P588.21; P59

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)01-055-13

沉积岩中部分微量元素对沉积环境的变化较敏感, 使用微量元素及元素组合判别沉积环境, 是研究古环境的有效技术方法(Algeo 和 Maynard, 2004; 王峰等, 2017), 该方法已广泛应用于物源分析、沉积速率、古盐度、古氧化还原环境和古气候判别等多方面研究中(Galarraga et al., 2008; Wang

et al., 2021; 程银行等, 2024; 何洪茜等, 2022; 黄学勇等, 2023; 李传明等, 2023; 杨棵等, 2022; 章诚诚等, 2024; 赵晨君等, 2020; 周武等, 2024)。例如, 赵彦彦等(2019)综述了不同水体中沉积的碳酸盐岩的稀土元素特征; Wei 和 Algeo(2020)研究了泥质沉积物中 B 与 Ga 比值指示古盐度的有效性, 并

* 收稿日期: 2023-10-26 修订日期: 2024-08-20 责任编辑: 石磊

基金项目: 中国石化科技部“济阳坳陷近源领域成藏体系评价与目标优选(编号: P22066)”项目资助。

第一作者简介: 张波, 1972 年生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气勘探及石油地质综合研究工作。Email: zhangbo667.slyt@sinopec.com。

通信作者简介: 陈勇, 1976 年生, 男, 教授, 博士, 主要从事盆地成岩成藏流体分析及油气地球化学研究工作。Email: yongchenzy@upc.com。

指出了其阈值; Hatch 和 Leventhal(1992)、Jones 和 Manning(1994)以及 Galarraga et al.(2008)验证了 V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)等多种地球化学指标在沉积岩古氧化还原环境判别中的可靠性,也指出了相应指标的阈值。可见,目前运用微量元素判别古环境的技术方法已较为成熟。

渤南洼陷是渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷中部的三级构造单元,面积约 600 km²,具有发育时间长、沉积厚度大,生油时段多、生油期长,有机质丰度高以及母质类型丰富等特点。目前,洼陷内有 133 口探井钻至沙四下亚段,钻遇沙四下亚段地层超过 50 m 的钻井 54 口,而钻穿沙四下亚段地层的钻井仅 2 口,对该地层的勘探程度还相对较低。宋国奇等(2014)和杨棵等(2022)针对渤南洼陷沙四下亚段的储层特征、油气富集规律和沉积相类型等开展了大量研究,指出其为干旱环境下形成的 1 套红色地层。这套红层除了冲积扇和辫状河等沉积相外,还发育辫状河三角洲、扇三角洲及湖泊等沉积相类型(陈阳等,2019)。刘军锷(2014)根据孢粉、Sr/Ba 值及 B 含量特征,分析了渤南洼陷沙四下亚段沉积时的气候、水深和盐度,结果表明其沉积于温度相对较低、气候较干旱、水体深度较浅且盐度整体较高的环境;徐琦松等(2021)通过提取自然伽马能谱测井、地层叠加样式和孢粉中蕴含的气候信息,恢复了该亚段古气候的演化过程,认为该亚段地层沉积时,气候整体偏干旱,但也存在相对湿润的时期。

总体而言,前人在对渤南洼陷沙四下亚段沉积时期的古环境进行研究时,采样点集中于洼陷南部红层发育地带,而对洼陷北部可能具备生烃潜力的区域研究较少,且主要采用古氧化还原指标设定的阈值来推断氧化还原环境。然而,不同区域适用的阈值可能存在差异(Rimmer, 2004)。因此,在前人研究的基础上,本文系统采集了洼陷北部辫状河三角洲相、扇三角洲相、湖泊相发育区的样品,旨在减少采样点分布不均所导致的偏差。通过对比分析,明确了部分微量元素指标在研究区古环境分析中的适用性,并进一步确定了有利于具备生烃潜力烃源岩形成的古环境条件。本研究成果不仅可为渤南洼陷沙四下亚段的油气勘探与开发提供科学支撑,也可为同类区域的古

环境研究提供技术方法参考。

1 区域地质背景

渤南洼陷位于山东省东营市,构造上处于渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷中部,属于沾化凹陷的次级洼陷(图 1(a))。北靠埕东凸起,南临陈家庄凸起,西接义和庄凸起,东为孤岛凸起(宋国奇等,2014),是经印支运动、燕山运动和喜山运动改造后形成的断陷湖盆(李宗亮等,2008),总体呈现“北断南超、东西双断”的构造格局(杨棵等,2022)。区内古近系发育完整,自下而上包括孔店组、沙河街组和东营组。其中,沙河街组划分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段,沙四段又可划分为沙四下亚段和沙四上亚段。本次研究的目标层为沙四下亚段,其埋深 > 3 000 m,厚度为 200~850 m(陈阳等,2019; 徐琦松等,2023),该亚段沉积时,渤南洼陷处于初始裂陷期(王永诗和张顺,2023),洼陷沉降中心位于渤海斜 10 井东侧,南部为 2 个台阶状的斜坡,北部为陡坡带(图 1(b))。斜坡带发育冲积扇-辫状河-辫状河三角洲-湖泊的沉积体系,陡坡带发育扇三角洲-湖泊的沉积体系(陈阳等,2019)。该地层岩性以砂砾岩、紫红色泥岩夹薄层膏盐岩为主(杨棵等,2022),同时发育棕红色、灰色、灰绿色泥岩,个别井可见灰白色泥岩。

2 样品采集与分析测试方法

样品采集自渤南洼陷沙四下亚段的钻井岩心,设计采样井 9 口,除南部红层地带外,北部的辫状河三角洲相、扇三角洲及湖泊相区域亦纳入采样与测试范围(井位分布见图 1(b))。微量元素测试在青岛斯八达分析测试有限公司完成,采用电感耦合等离子体质谱法进行定量分析,分析仪器为美国 Varian820-MS,准确度等级为 10⁻¹²。色谱-质谱测试和有机地球化学测试在中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司完成,仪器为 Finnigan 公司生产的 Thermo-FinniganTrace-DSQ 气相色谱质谱联用仪。

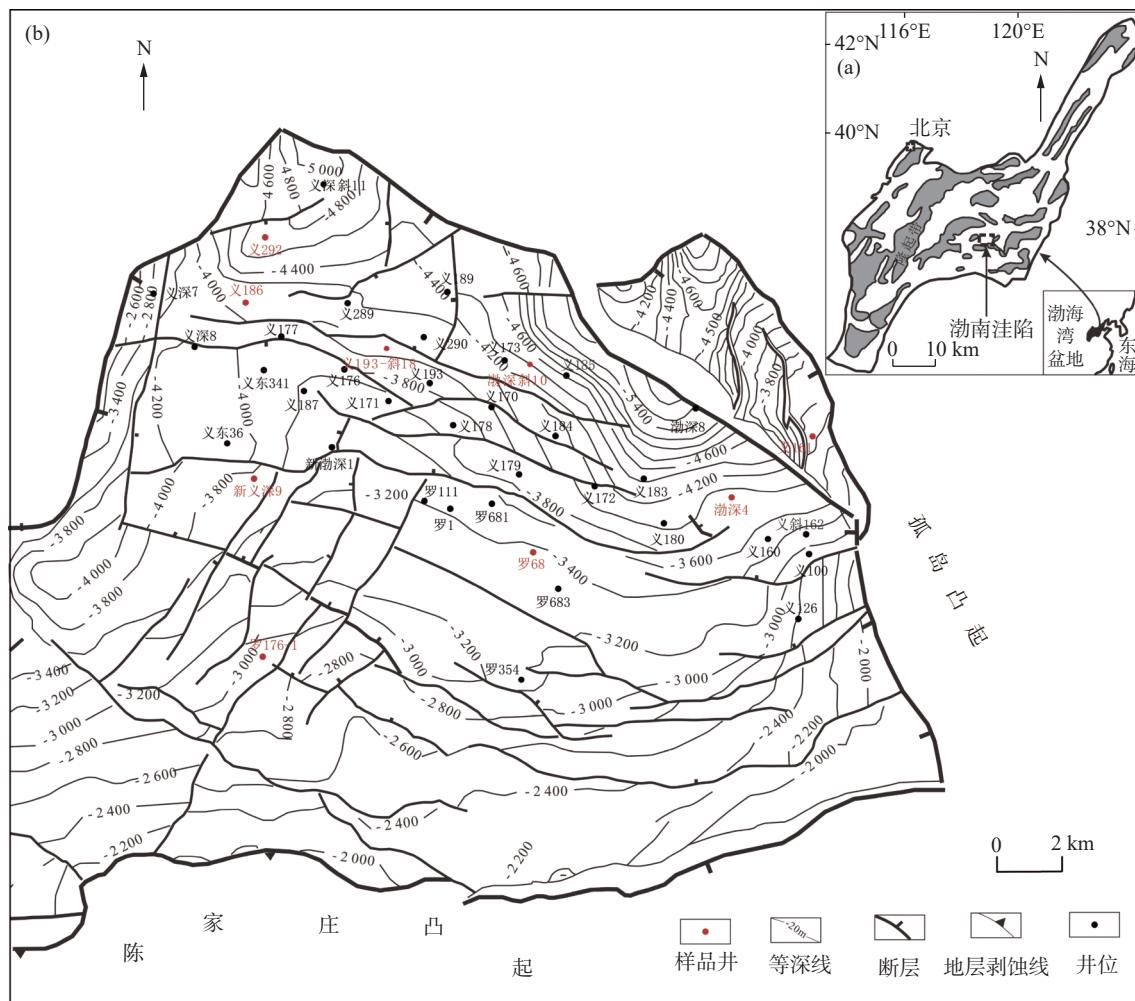


图1 渤海洼陷构造位置(a)和沙四下亚段顶面构造图(b)(资料来源于胜利油田)

Fig. 1 Tectonic setting of the Bonan Sag (a) and tectonic map of the top of the Es₄^x Formation (b) (Sourced from Shengli Oilfield)

3 稀土元素和微量元素地球化学特征

3.1 稀土元素地球化学特征

泥岩样品的稀土元素测试分析结果见表1。稀土元素总量(Σ REE)为 $(170.8\sim 328.5)\times 10^{-6}$, 平

均值为 234.7×10^{-6} ; 轻稀土元素(LREE)含量为 $(155.2\sim 309.9)\times 10^{-6}$, 平均值为 218.7×10^{-6} ; 重稀土元素(HREE)含量为 $(12.4\sim 18.6)\times 10^{-6}$, 平均值为 16.0×10^{-6} ; Σ LREE/ Σ HREE值为 $9.9\sim 16.6$, 平均值为13.7。

表1 渤海洼陷沙四下亚段泥岩稀土元素含量及其相关参数表

Table 1 Rare earth element content and related parameters of mudstone in the Es₄^x from Bonan Sag

井号	罗176-1	罗68	义161	义193-斜18	新义深9	渤深4	义186	义292	渤深斜10
深度/m	2 843.0	3 374.0	3 483.5	3 767.8	3 796.2	4 122.2	4 178.1	4 639.7	5 023.4
岩性	灰色泥岩	灰白色泥岩	紫红色泥岩	黑色泥岩	紫红色泥岩	紫红色泥岩	黑色泥岩	暗色泥岩	黑色泥岩
层位	沙四下	沙四下	沙四下	沙四下	沙四下	沙四下	沙四下	沙四下	沙四下
La	51.88	38.85	36.58	54.44	41.17	43.75	52.72	56.22	69.94
Ce	113.71	77.80	73.09	123.87	84.54	88.19	115.44	124.16	150.67
Pr	12.69	8.99	8.09	13.77	9.73	10.08	12.96	12.85	16.86
Nd	47.85	32.68	30.45	50.70	36.29	36.63	47.39	44.60	60.67
Sm	8.02	5.29	5.80	8.36	6.36	5.65	8.10	6.79	9.72
Eu	1.90	1.20	1.21	1.95	1.34	1.31	1.66	1.62	2.00

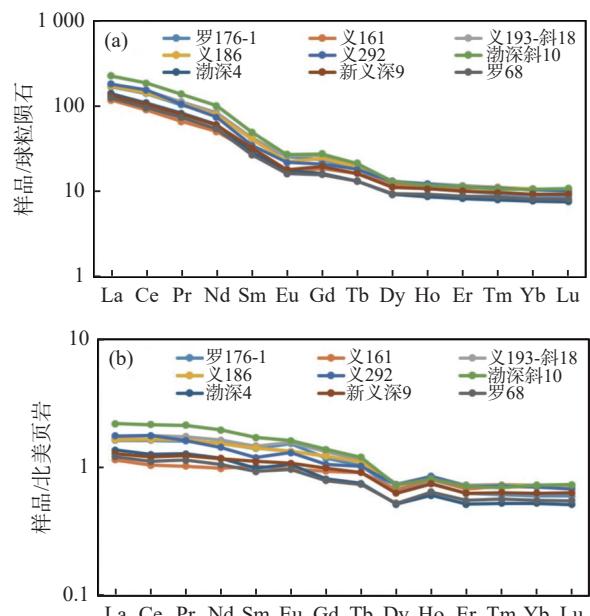
续表 1

井号	罗176-1	罗68	义161	义193-斜18	新义深9	渤海4	义186	义292	渤海斜10
Gd	6.15	4.11	4.89	6.87	5.14	4.22	6.38	5.49	7.18
Tb	0.87	0.63	0.78	0.98	0.78	0.64	0.94	0.87	1.02
Dy	3.82	3.05	3.91	4.32	3.65	3.00	4.24	4.24	4.20
Ho	0.78	0.67	0.83	0.89	0.78	0.63	0.87	0.88	0.85
Er	2.13	1.88	2.31	2.48	2.14	1.76	2.42	2.43	2.42
Tm	0.31	0.28	0.36	0.37	0.32	0.26	0.36	0.36	0.35
Yb	1.87	1.71	2.19	2.26	1.96	1.63	2.24	2.19	2.26
Lu	0.29	0.26	0.35	0.34	0.30	0.25	0.34	0.33	0.35
Σ REE	252.27	177.42	170.83	271.59	194.49	198.01	256.06	263.03	328.50
Σ LREE	236.06	164.82	155.21	253.09	179.41	185.62	238.27	246.25	309.87
Σ HREE	16.21	12.60	15.62	18.50	15.08	12.39	17.80	16.78	18.63
Σ LREE/ Σ HREE	14.56	13.08	9.94	13.68	11.90	14.98	13.39	14.67	16.63
δ Ce _N	1.04	0.97	0.98	1.06	0.98	0.98	1.03	1.07	1.03
δ Eu _N	0.80	0.76	0.67	0.76	0.69	0.79	0.68	0.79	0.70
La _N /Yb _N	18.66	15.28	11.24	16.24	14.16	18.11	15.87	17.29	20.89
La _N /Sm _N	4.07	4.62	3.97	4.10	4.07	4.87	4.10	5.21	4.53
Gd _N /Yb _N	2.65	1.93	1.80	2.45	2.12	2.09	2.30	2.02	2.57
δ Ce _n	1.01	0.94	0.96	1.03	0.96	0.95	1.00	1.05	1.00
δ Eu _n	1.19	1.13	0.99	1.13	1.02	1.17	1.01	1.16	1.05
Ce _{anom}	0.01	-0.02	-0.02	0.02	-0.01	-0.02	0.01	0.03	0.01
La _n /Yb _n	2.68	2.20	1.62	2.33	2.03	2.60	2.28	2.48	3.00
Gd _n /Yb _n	1.95	1.43	1.33	1.81	1.56	1.54	1.69	1.49	1.89

注：元素含量单位为 10^{-6} ； δ Eu_N= $2[\text{Eu}]_N/([\text{Sm}]_N+[\text{Gd}]_N)$, δ Ce_N= $2[\text{Ce}]_N/([\text{La}]_N+[\text{Pr}]_N)$, 角标N代表球粒陨石标准化，球粒陨石值来源于 Boynton, 1984； δ Eu_n= $2[\text{Eu}]_n/([\text{Sm}]_n+[\text{Gd}]_n)$, δ Ce_n= $2[\text{Ce}]_n/([\text{La}]_n+[\text{Pr}]_n)$, 角标n代表北美页岩标准化，北美页岩值来源于 Haskin and Haskin, 1966；Ce_{anom}= $\lg[3\text{Ce}_n/(2\text{La}_n+\text{Nd}_n)]$ (Elderfield and Greaves, 1982)

球粒陨石标准化和北美页岩标准化是沉积物常用的2种稀土元素标准化模式。前者能够反映样品相对地球原始物质的分异程度，揭示沉积物的源区特征；后者可以明确沉积过程中混合与均化的影响和分异程度(孟庆涛等, 2013)。研究区泥岩样品的La_N/Yb_N值为11.24~20.89, 平均值为16.42; Gd_N/Yb_N值为1.80~2.65, 平均值为2.21, δ Eu_N值为0.67~0.80, 呈现较明显的负Eu异常, δ Ce_N值为0.97~1.07, Ce元素异常不明显。它们的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线基本相同(图2(a)), 均表现为轻、重稀土元素分异较明显的右倾型。La_n/Yb_n值为1.62~3.00, 平均值为2.36, Gd_n/Yb_n值为1.33~1.95, 平均值为1.63, δ Eu_n值为0.99~1.19, δ Ce_n值为0.94~1.05, 相对于北美页岩, 不显示Eu和Ce异常。它们的北美页岩标准化稀土元素配分曲线基本相同(图2(b)), 整体平缓, 略微右倾。总之, 渤南洼陷沙四下亚段泥岩的轻、重稀土元素分异明显, 表现为轻稀土富集。

根据渤南洼陷沙四下亚段泥岩的 δ Ce_N- δ Eu_N、 δ Ce_N- Σ REE、 δ Ce_N-(La/Sm)_N相关性图解(图3)可



(a).球粒陨石的标准化曲线；(b).北美页岩的标准化曲线
图2 渤南洼陷沙四下亚段泥岩稀土元素的标准化配分曲线图

Fig. 2 REE patterns of mudstone in the Es₄ from Bonan Sag

知,泥岩的 δCe_N - δEu_N 和 δCe_N - ΣREE 不存在相关性,表明样品中稀土元素受成岩作用影响不明显。泥岩的 δCe_N - $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 相关性差,表明 Ce 异常可以

指示原始沉积物的沉积环境。总之,研究区泥岩样品的稀土元素含量受后期成岩作用影响较小,可以用来恢复古环境。

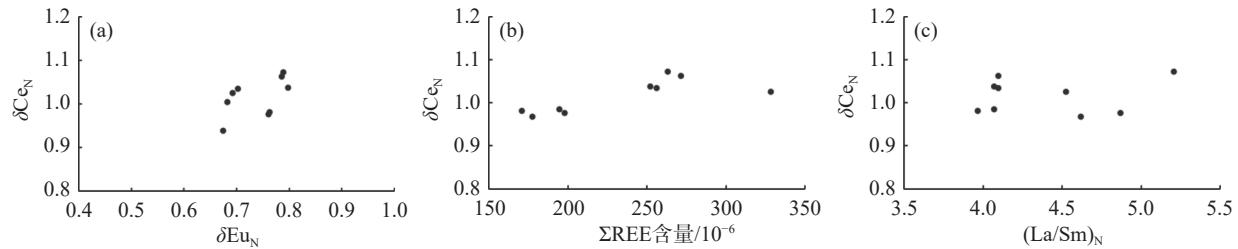


图3 渤海洼陷沙四下亚段泥岩 δCe_N - δEu_N (a)、 δCe_N - ΣREE (b)和 δCe_N - $(\text{La}/\text{Sm})_N$ (c)的相关性图解

Fig. 3 Correlation of δCe_N - δEu_N (a), δCe_N - ΣREE (b)and δCe_N - $(\text{La}/\text{Sm})_N$ (c)of mudstone in Es_4^x from Bonan Sag

3.2 微量元素地球化学特征

研究区泥岩样品的微量元素测试分析结果见表2。B 元素的含量为 $(34.38 \sim 84.40) \times 10^{-6}$,

平均值为 51.69×10^{-6} ; Ga 元素的含量为 $(13.98 \sim 30.99) \times 10^{-6}$, 平均值为 20.76×10^{-6} ; B/Ga 值为 $1.43 \sim 3.73$ 。

表2 渤海洼陷沙四下亚段泥岩部分微量元素含量及比值表
Table 2 Trace elements content and ratio of mudstone in the Es_4^x from Bonan Sag

井号	深度/m	岩性	B	V	Cr	Co	Ni	Ga	B/Ga	V/Ni	Ni/Co	V/Cr	V/(V+Ni)
渤深斜10	5 023.4	黑色泥岩	36.75	73.51	174.85	10.84	65.38	16.57	2.22	1.12	6.03	0.42	0.53
罗176-1	2 843.0	青灰色泥岩	34.38	80.49	103.87	14.88	58.94	19.42	1.77	1.37	3.96	0.77	0.58
义292	4 639.7	暗色泥岩	55.43	127.65	130.06	20.19	83.60	25.97	2.13	1.53	4.14	0.98	0.60
义193-斜18	3 767.8	黑色泥岩	44.34	108.14	105.94	19.04	68.35	30.99	1.43	1.58	3.59	1.02	0.61
义186	4 178.1	黑色泥岩	84.40	108.80	103.22	14.92	54.55	22.71	3.72	1.99	3.66	1.05	0.67
新义深9	3 796.2	紫红色泥岩	66.33	97.00	88.25	14.76	45.79	21.18	3.13	2.12	3.10	1.10	0.68
罗68	3 374.0	灰白色泥岩	41.91	57.73	80.07	8.33	24.43	13.98	3.00	2.36	2.93	0.72	0.70
渤深4	4 122.2	紫红色泥岩	41.09	93.59	106.88	11.20	38.72	19.74	2.08	2.42	3.46	0.88	0.71
义161	3 483.5	紫红色泥岩	60.62	82.02	67.91	12.19	26.62	16.24	3.73	3.08	2.18	1.21	0.76

注: 元素含量单位为 10^{-6}

V 元素的含量为 $(57.73 \sim 127.65) \times 10^{-6}$, 平均值为 92.10×10^{-6} ; Ni 元素的含量为 $(24.43 \sim 83.60) \times 10^{-6}$, 平均值为 51.82×10^{-6} ; Co 元素的含量为 $(8.33 \sim 20.19) \times 10^{-6}$, 平均值为 14.04×10^{-6} ; Cr 元素的含量为 $(67.91 \sim 174.85) \times 10^{-6}$, 平均值为 106.78×10^{-6} ; V/Ni 值为 $1.12 \sim 3.08$; V/(V+Ni) 值为 $0.53 \sim 0.76$; Ni/Co 值为 $2.18 \sim 6.03$; V/Cr 值为 $0.42 \sim 1.21$ 。

沉积岩的 V/Cr 值、Ni/Co 值、V/Ni 值及 V/(V+Ni) 值可以反映沉积环境的氧化还原条件(张国伟等, 2017), 常被用作判识沉积环境的指标, 在海相地层研究中被广泛应用。前人研究认为, $V/\text{Cr} < 2$ 、 $\text{Ni}/\text{Co} < 5.0$ 、 $\text{V}/\text{Ni} < 1.9$ 、 $0.46 < \text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) <$

0.60 指示富氧的环境; $2.00 < \text{V}/\text{Cr} < 4.25$ 、 $5.0 < \text{Ni}/\text{Co} < 7.0$ 、 $1.9 < \text{V}/\text{Ni} < 3$ 、 $0.54 < \text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.82$, 指示贫氧的环境; $\text{V}/\text{Cr} > 4.25$ 、 $\text{Ni}/\text{Co} > 7.0$ 、 $\text{V}/\text{Ni} > 3$ 、 $0.84 < \text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.89$ 指示缺氧的环境(Galarraga et al., 2008; Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994)。但也有学者指出, 不应严格应用以往古氧化还原指标设定的阈值来推断氧化还原环境, 但可以用这些指标的相对差异推断相对缺氧程度(Rimmer, 2004)。

采用上述设定阈值, 根据研究区泥岩样品的 Ni/Co 值(图 4(a))、V/Ni 值(图 4(b))及 V/(V+Ni) 值可得出缺氧、富氧等不确定甚至相互矛盾的结

论,因此,使用上述指标研究古氧化还原环境时应根据研究区的实际地质背景选取合适的指标。

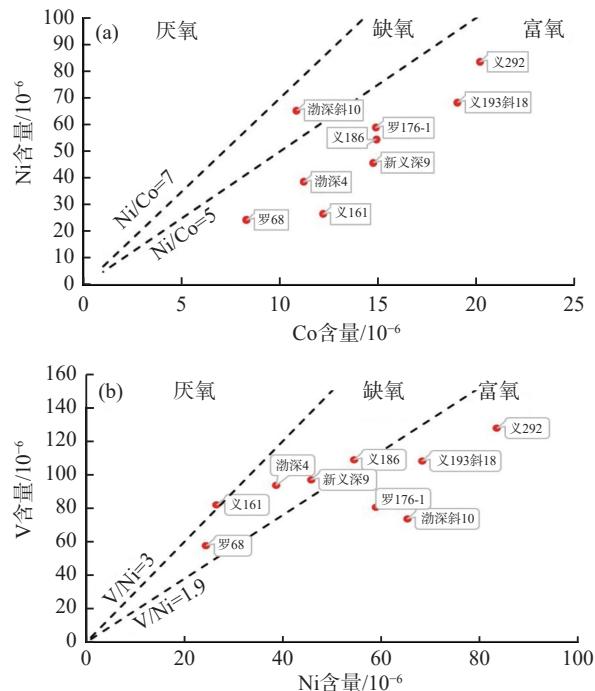


图4 渤南洼陷沙四下亚段泥岩 Ni-Co(a)、V-Ni(b)的含量关系图解

Fig. 4 Correlation between the content of Ni and Co (a), the content of V and Ni (b) of mudstone in the Es_4^x from Bonan Sag

4 微量元素特征对沉积环境的指示

4.1 古气候

在温暖湿润的气候条件下,风化作用和生物作用使沉积岩中的重稀土元素比轻稀土元素更容易发生迁移,导致轻稀土元素在风化残余物中富集(陈骏等,1996)。因此,岩石中相对较高的 La_N/Yb_N 值(11.5~14)指示了相对温湿的气候环境,相对低的 La_N/Yb_N 值(9~12)指示了相对干热的气候环境(Tanaka et al., 2007)。研究区泥岩样品的 La_N/Yb_N 值为11.24~20.89,平均值为16.42,整体偏高(表1),表明渤海洼陷沙四下亚段沉积时期,部分区域处于温湿的气候环境。

4.2 沉积速率

沉积岩稀土元素的分异程度可以反映沉积物的沉降速率(李伦等,2023)。当悬浮物在水中停留时间较短时,稀土元素随其快速沉积,与水体发

生交换的机会少,轻、重稀土元素分异弱,稀土元素配分模式较平缓, La_n/Yb_n 值为1(\pm);当悬浮物在水中停留时间较长时,其沉降缓慢,稀土元素有足够的空间被黏土吸附,并与有机质络合物进行化学反应,稀土元素强烈分异,配分模式变化显著, La_n/Yb_n 明显>1或<1(李双建等,2008)。研究区泥岩表现出明显的轻稀土元素富集特征(表1), La_n/Yb_n 明显>1,表明其沉积物的沉积速率较慢。

4.3 古氧化还原环境

Ce元素作为一种变价元素,可以反映沉积时水体的氧化还原条件。在氧化环境中,Ce³⁺容易被氧化为Ce⁴⁺,被Fe、Mn等氧化物胶体吸附,从而造成沉积水体的Ce亏损;在还原环境中,随着铁锰等氧化物的溶解,Ce⁴⁺还原为Ce³⁺(苑广尧和李凤杰,2023),从而造成水体的Ce富集。当 $\delta Ce_n > 1$ 时为正异常,指示还原环境;当 $\delta Ce_n < 0.95$ 时为负异常,指示氧化环境(王旭影和姜在兴,2021)。表1显示,研究区偏红色泥岩样品的 δCe_n 值为0.95~0.96,指示弱氧化环境;偏黑色泥岩样品的 δCe_n 值为1.00~1.03,指示弱还原环境。类似地,Ce异常指数(Ce_{anom})可用于指示沉积时水体的氧化还原条件, $Ce_{anom} > 0$ 反映还原环境, $Ce_{anom} < 0$ 反映氧化环境(Elderfield and Pagett, 1986)。表1显示,研究区偏红色泥岩样品的 Ce_{anom} 值为-0.02~-0.01,指示弱氧化环境;偏黑色泥岩样品的 Ce_{anom} 值为0.01~0.02,指示弱还原环境。

但是,研究区多为陆相沉积,是否存在大量Fe、Mn等氧化物胶体尚未知,因此需要综合沉积物的颜色及姥鲛烷与植烷的比值(Pr/Ph),进一步讨论用 δCe_n 、 Ce_{anom} 判别氧化-还原环境的可靠性。

Pr/Ph值可较好地指示沉积环境的氧化还原性。一般而言,Pr/Ph<1指示还原环境,Pr/Ph>1指示氧化环境。渤海洼陷沙四下亚段暗色泥岩的Pr/Ph<1(表3),表明这些泥岩沉积于还原环境。

表3 渤南洼陷沙四下亚段暗色泥岩的Pr/Ph表
Table 3 Pr/Ph value of dark mudstone in Es_4^x from Bonan Sag

井号	渤深斜10	义186	义193-斜18	义292
深度/m	5 023.4	4 178.1	3 767.8	4 639.7
层位	沙四下	沙四下	沙四下	沙四下
岩性	黑色泥岩	黑色泥岩	黑色泥岩	暗色泥岩
Pr/Ph	0.13	0.32	0.77	0.23

综上所述,用 δCe_n 、 Ce_{anom} 、沉积物颜色及Pr/Ph值指示的氧化还原环境,所得出的结果具有一致性,表明使用 δCe_n 、 Ce_{anom} 判别氧化-还原环境是可靠的。

前已述及,用Ce异常指数(Ce_{anom})判别研究区古氧化-还原环境是可靠的,由此可以推测,与 Ce_{anom} 具有相关性的元素(元素组合)也可以反映研究区的古氧化-还原环境。如图5(a)、(b)和(c)

所示,研究区样品Ni/Co值与 Ce_{anom} 值呈正相关,V/Ni值和V/(V+Ni)值与 Ce_{anom} 值呈负相关,表明Ni/Co、V/Ni、V/(V+Ni)值均可用于指示研究区的古氧化-还原环境,Ni/Co值越大而V/Ni、V/(V+Ni)值越小,则指示缺氧程度越强。V/Cr-Ce_{anom}图(图5(d))显示,研究区样品的V/Cr值与 Ce_{anom} 值没有明显的相关性,表明V/Cr值不适合用作判识指标。

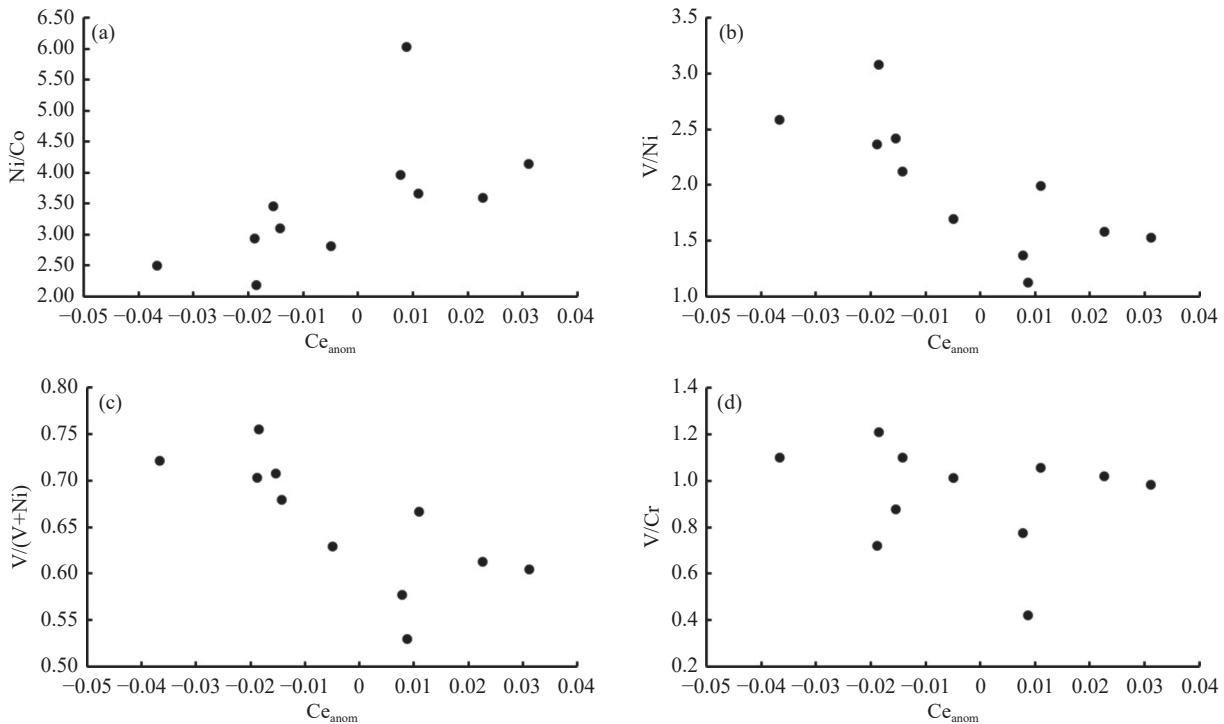


图5 渤海洼陷沙四下亚段泥岩 Ce_{anom} 与Ni/Co(a)、V/Ni(b)、V/(V+Ni)(c)、V/Cr(d)相关性图解

Fig. 5 Correlation of Ce_{anom} with Ni/Co (a), V/Ni (b), V/(V+Ni) (c), V/Cr (d) of mudstone in the Es_4^x from Bonan Sag

4.4 古盐度

硼(B)可通过取代 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面的H₂O和OH⁻而吸附在黏土矿物上,易迁移并富集于高盐度沉积物中。镓(Ga)的主要氢氧化物(即Ga(OH)₃)的溶解度较低,大多数Ga离子往往以氢氧化物的形式沉淀在淡水沉积物中(Wei and Algeo, 2020),因此,B/Ga值可作为衡量古盐度的标志之一。前人研究表明,在淡水沉积物中B/Ga值<3,在微咸水沉积物中B/Ga值为3~6,在咸水沉积物中B/Ga值>6(Wei and Algeo, 2020)。本次泥岩样品B/Ga值为1.43~3.73,多<3;将它们的B/Ga值投至Ga-B图(图6)中,结果表明渤海洼陷沙四下亚段沉积时期大部分区域为淡水环境,部分区

域为微咸水环境。

长链三环萜烷比值(ETR指数)($\text{ETR} = (\text{C}_{28}\text{TT} + \text{C}_{29}\text{TT}) / ((\text{C}_{28}\text{TT} + \text{C}_{29}\text{TT}) + \text{Ts})$)可以作为反映湖泊沉积介质条件的有效指标(田德瑞等,2018),ETR指数<2指示淡水-微咸水为主的沉积环境(杨岩岩,2021)。泥岩样品的ETR指数为0.369~0.850,平均值为0.583(表4),反映了研究区沙四下亚段沉积时为淡水-微咸水环境。

伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/C₃₀藿烷)在一定程度上能够反映沉积水体的盐度环境,伽马蜡烷指数为0.78~1.45指示咸化湖相环境,伽马蜡烷指数为0.30~0.82指示半咸化湖相环境,伽马蜡烷指数为0.08~0.30指示淡-微咸水湖相环境(傅家

摸等, 1991)。泥岩样品的伽马蜡烷指数为0.133~0.152(表4), 同样指示了沙四下亚段沉积时为淡-微咸水湖相环境。

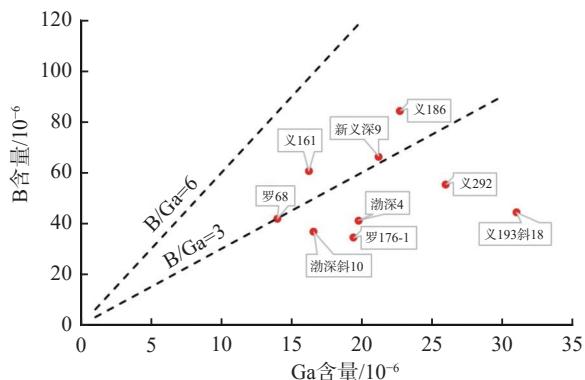


图6 渤南洼陷沙四下亚段泥岩B-Ga含量关系图解

Fig. 6 Correlation of B with Ga of mudstone in the Es₄^x from Bonan Sag

表4 渤南洼陷沙四下亚段泥岩样品 ETR 指数和伽马蜡烷指数表

Table 4 ETR index and gammacerane index of mudstone samples from Es₄^x in Bonan Sag

井号	深度/m	岩性	ETR	伽马蜡烷指数	B/Ga
义186	4 178.1	黑色泥岩	0.369	0.133	3.72
渤海斜10	5 023.4	深色泥岩	0.545	0.147	2.22
义292	4 639.7	泥岩	0.567	0.152	2.13
义193-斜18	3 767.8	泥岩	0.850	-	1.43

上述结果表明, 用B/Ga值区分淡水-微咸水和咸水是可靠的。然而, 表4显示, 样品间ETR指数、伽马蜡烷指数的相对大小与B/Ga值的相对大小呈现刚好相反的趋势, 因此, 如何使用B/Ga值指示水体的盐度相对大小还有待进一步研究。

5 石油地质意义

对渤南洼陷北部不同构造部位沙四下亚段泥岩样品的镜质组、惰质组、壳质组和腐泥组的相对含量进行统计(表5), 总体来看, 其腐泥组含量较高, 为26.7%~87.0%, 大部分>50%。腐泥组主要由藻类体及其腐泥化作用而形成的无定形体组成(孔庆芬, 2007), 是公认的有利于生烃的富氢组分, 其含量越高, 生油能力就越强(王永建等, 2010)。

为了进一步评价干酪根类型, 根据干酪根类型指数TI、HI-T_{max}图解明确其有机质类型。计算结果显示, 渤南洼陷沙四下亚段泥岩的干酪根类型指数TI为-26.8~77.1(表5)。依据石油天然气行业标准《SY/T5215—2014透射光-荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法》, 当TI≥80时为I型干酪根; 当40≤TI<80时为II₁型干酪根; 当0≤TI<40时为II₂型干酪根; 当TI<0时为III型干酪根。由此认为渤南洼陷沙四下亚段干酪根类型为II₁型-III型。研究区样品的HI-T_{max}图解(图7)

表5 渤南洼陷沙四下亚段不同构造部位泥岩显微组分相对含量(资料来源于胜利油田)

Table 5 Relative contents of macerals of mudstone at different structural sites in the Es₄^x of Bonan Sag (sourced from Shengli Oilfield)

构造部位	井号	深度/m	镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%	腐泥组/%	TI
北部陡坡带	义186	4 176.1	53.3	3.3	3.7	39.7	-1.8
		4 179.0	65.7	5.3	2.3	26.7	-26.8
		4 181.1	36.3	4.3	0.0	59.3	27.8
		4 182.1	33.3	5.0	0.7	61.0	31.3
	义193	3 939.2	33.0	3.7	0.0	63.3	34.9
渤南深洼带	义185	3 940.4	38.7	4.7	0.0	56.7	23.0
		4 564.0	14.7	1.3	0.0	84.0	71.7
	义185	4 586.0	42.3	1.7	0.0	56.0	22.6
		4 614.0	24.0	2.3	0.0	73.7	53.3
		4 652.0	59.0	3.7	0.0	37.3	-10.6
渤海4断阶带	渤海4	4 694.0	12.3	0.7	0.0	87.0	77.1
		4 040.0	2.0	27.0	0.3	70.7	42.4

注: TI=(腐泥组百分含量×100+壳质组百分含量×50-镜质组百分含量×75-惰质组百分含量×100)/100

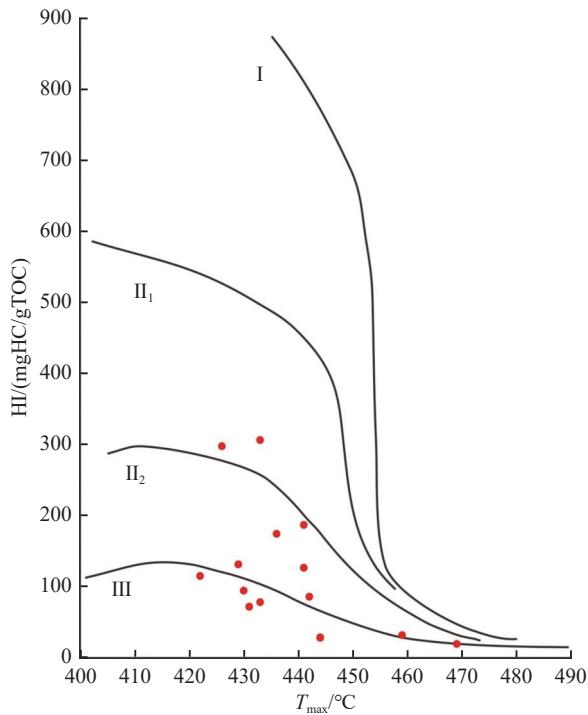


图7 渤南洼陷沙四下亚段泥岩有机质类型(底图引自 Zhu et al., 2009)

Fig. 7 Relationship between HI and T_{\max} of mudstone in the Es4x of Bonan Sag (after Zhu et al., 2009)

显示, 渤南洼陷沙四下亚段泥岩中的干酪根为Ⅱ型-Ⅲ型。上述结果表明, 渤南洼陷沙四下亚段存在生油潜力良好的生油母质。

泥岩有机地球化学参数测试结果显示, 渤南洼陷沙四下亚段泥岩总有机碳(TOC)含量为0.07%~1.02%, 平均含量为0.42%, 其中>0.5%的样品占37%; 岩石中游离烃和热解烃之和(S_1+S_2)为 $(0.02\sim 3.61)\times 10^{-6}$, 平均值为 0.69×10^{-6} , 其中 $>2\times 10^{-6}$ 的样品占14%; 氯仿沥青“A”的含量为0.002 8%~0.081 6%, 平均值为0.017 9%, 其中 $>0.05\%$ 的样品占10%。根据中华人民共和国石油天然气行业现行泥岩有机质丰度评价标准《SY/T5735—2019 烃源岩地球化学评价方法》, TOC<0.5%、 $S_1+S_2<2\times 10^{-6}$ 、氯仿沥青“A”<0.05%的泥岩为非烃源岩, 而研究区部分泥岩的TOC、 S_1+S_2 和氯仿沥青“A”含量显示其已经达到一般烃源岩水平。泥岩的镜质体反射率(Ro)为0.79%~1.97%, 平均值为1.24%, 表明其总体处于成熟-高成熟演化阶段, 其中成熟演化阶段占63%。

结合沙四下亚段暗色泥岩的微量元素特征可知, 研究区内一般烃源岩与部分非烃源岩均形成

于温暖湿润的气候、淡水-微咸水的缺氧水体中, 但是一般烃源岩的B/Ga值小于非烃源岩, ETR指数和伽马蜡烷指数大于非烃源岩, 推测水体的古盐度可能是控制沙四下亚段发育有生烃潜力烃源岩的重要因素。

6 结论

(1) 渤南洼陷沙四下亚段泥岩具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征, La_n/Yb_n 值为1.62~3.00, 表明沉积时期气候温暖湿润, 沉积物沉积速率较慢。其中, 偏黑色泥岩的 $\text{Pr}/\text{Ph}<1$ 、 $\delta\text{Ce}_n>1$ 、 $\text{Ce}_{\text{anom}}>0$, 指示其形成于还原环境; 偏红色泥岩样品的 δCe_n 值为0.94~0.96、 $\text{Ce}_{\text{anom}}<0$, 指示其形成于氧化环境。泥岩B/Ga值为1.43~3.73、ETR指数为0.369~0.850、伽马蜡烷指数为0.133~0.152, 表明其沉积时期大部分区域为淡水环境, 部分区域为半咸水环境。

(2) 泥岩的 δCe_n 、铈异常指数(Ce_{anom})、 Pr/Ph 值指示的氧化还原环境具有一致性, 表明其为判别氧化-还原环境的可靠参数。泥岩的Ni/Co- Ce_{anom} 呈现正相关, V/Ni- Ce_{anom} 、V/(V+Ni)- Ce_{anom} 呈现负相关, 它们的相对大小可用于推断缺氧程度。泥岩的B/Ga值与ETR指数、伽马蜡烷指数所反映的水体盐度结论具有一致性, 但是它们的B/Ga值与ETR指数、伽马蜡烷指数的相对大小呈现相反的趋势, 如何使用B/Ga值指示淡水-微咸水水体的盐度相对大小还有待深入研究。

(3) 研究区泥岩干酪根类型指数为-26.8~77.1, 干酪根为Ⅱ型-Ⅲ型, 部分泥岩的TOC>0.5%、 $S_1+S_2>2\times 10^{-6}$ 、氯仿沥青“A”>0.05%, 表明部分泥岩已成为具有生烃潜力的烃源岩。在缺氧环境下, 是否发育具有生烃潜力的烃源岩可能是由沉积水体的盐度决定的。

References

- ALGEO T J, MAYNARD J B. 2004. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cycloths[J]. *Chemical Geology*, 206(3-4): 289-318.
- BOYNTON W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. *Developments in Geochem-*

- istry, 2; 63-114.
- CHEN J, WANG H T, LU H Y. 1996. Behaviours of REE and other trace elements during pedological weathering-evidence from chemical leaching of loess and paleosol from the Luochuan section in central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 61-72 (in Chinese with English abstract).
- CHEN Y, ZHANG Y, ZHU Z J, ZHANG R G, LI L L, CHEN W, LIU P. 2019. Early sedimentary sequence and petroleum geological significance of faulted Basins: a case study on the lower Es4 in Bonan Sag, Jiyang Depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 24(3): 313-322 (in Chinese with English abstract).
- CHENG Y H, JIN R S, CUNNEY M, PETROV V A, MIAO P S. 2024. The strata constraint on large scale sandstone-type uranium mineralization in Meso-Cenozoic Basins, northern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(7): 1953-1976 (in Chinese with English abstract).
- ELDERFIELD H, GREAVES M J. 1982. The rare earth elements in seawater[J]. *Nature*, 296(5854): 214-219.
- ELDERFIELD H, PAGETT R. 1986. Rare earth elements in ichthyoliths: variations with redox conditions and depositional environment[J]. *Science of the Total Environment*, 49: 175-197.
- FU J M, SHENG G Y, XU J Y, JIA R F, FAN S F, PENG P A, EGLINTON G, GOWAR A P. 1991. Application of biomarker compounds in assessment of paleoenvironments of Chinese terrestrial sediments[J]. *Geochimica*, (1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- GALARAGA F, REATEGUI K, MARTÍNEZ A, MARTÍNEZ M, LLAMAS J F, MÁRQUEZ G. 2008. V/Ni ratio as a parameter in palaeoenvironmental characterisation of nonmature medium-crude oils from several Latin American Basins[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 61(1): 9-14.
- HASKIN M A, HASKIN L A. 1966. Rare earths in European shales: a redetermination[J]. *Science*, 154(3748): 507-509.
- HATCH J R, LEVENTHAL J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 99(1-3): 65-82.
- HE H X, XIAO J F, LAN Q, YANG H Y, HUANG M L. 2022. Black mudstone sedimentary environment and shale gas accumulation conditions of lower Silurian Longmaxi Formation in Northern Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 50(6): 898-908 (in Chinese with English abstract).
- HUANG X Y, GAO M S, HOU G H, ZHANG G, DANG X Z. 2023. Grain size characteristics and environmental response of marine sediments in Laizhou Bay[J]. *East China Geology*, 44(4): 402-414 (in Chinese with English abstract).
- JONES B, MANNING D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111(1-4): 111-129.
- KONG Q F. 2007. The organic maceral characteristic of Yanchang source rock in Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(2): 163-166 (in Chinese with English abstract).
- LI C M, ZENG J H, LIU H T, LI H J, LOU D, CUI Y, DONG X Y, LIU S N. 2023. Geochemical characteristics and development mechanism of upper Paleozoic dark mudstone in Huanghua Depression of Bohai Bay Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(2): 306-321 (in Chinese with English abstract).
- LI L, ZHANG P Y, LIANG K K, LI S K, WEI Z F, WANG Y L. 2023. Main controlling factors and models of organic matter enrichment in salt lake facies: a case study of gray mudstone of Lower Youshashan Formation in western Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 34(8): 1357-1373 (in Chinese with English abstract).
- LI S J, XIAO K H, WO Y J, LONG S X, CAI L G. 2008. REE geochemical characteristics and their geological significance in Silurian, West of Hunan Province and North of Guizhou Province[J]. *Geoscience*, 22(2): 273-280 (in Chinese with English abstract).
- LI Z L, JIANG Y L, LIU H. 2008. Effects of Guxi fault on gas migration and accumulation in Gubei buried hill zone[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 15(5): 24-26 (in Chinese with English abstract).
- LIU J E. 2014. Petroleum accumulation and depositional features of red beds in the lower Es4 of Bonan Sag, the Jiyang Depression[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- MENG Q T, LIU Z J, HU F, SUN P C, LIU R, ZHOU R J, ZHEN Z. 2013. Geochemical characteristics of Eocene oil shale and its geological significances in Huadian Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(2): 390-399 (in Chinese with English abstract).
- RIMMER S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. *Chemical Geology*, 206(3-4): 373-391.
- SONG G Q, LIU P, LIU Y L. 2014. Diagenesis and reservoir

- porosity evolution of the lower section of the 4th member of Shahejie Formation in Bonan Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 941-948 (in Chinese with English abstract).
- TANAKA K, AKAGAWA F, YAMAMOTO K, TANI Y, KAWABE I, KAWAI T. 2007. Rare earth element geochemistry of Lake Baikal sediment: its implication for geochemical response to climate change during the last glacial/interglacial transition[J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(9-10): 1362-1368.
- TIAN D R, WU K, ZHANG R C, PAN W J, WANG X. 2018. Geochemical features and oil-source correlation of crude oils from JZ20 oil field on the northern margin of Liaoxi Uplift, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(3): 410-417 (in Chinese with English abstract).
- WANG X Y, JIANG Z X. 2021. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in the 3rd Member of Paleocene Funing Formation in Dongtai Depression, North Jiangsu Basin, and their geological significance[J]. *Geological Review*, 67(2): 355-366 (in Chinese with English abstract).
- WANG F, LIU X C, DENG X Q, LI Y H, TIAN J C, LI S X, YOU J X. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265-1273 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y J, WANG Y B, WANG Y J, TAN J Y. 2010. Organic petrology of hydrocarbon source rocks from Taizhou Formation in Gaoyou Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 21(6): 1024-1028 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y X, XU S, HAO F, POULTON S W, ZHANG Y Y, GUO T X, LU Y B, BAI N. 2021. Arid climate disturbance and the development of salinized lacustrine oil shale in the Middle Jurassic Dameigou Formation, Qaidam Basin, northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 577: 110533.
- WANG Y S, ZHANG S. 2023. Formation mechanism of high-quality reservoirs in deep strata of Paleogene, Bonan Sub-sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(1): 11-19 (in Chinese with English abstract).
- WEI W, ALGEO T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 341-366.
- XU Q S, WANG Y S, GONG J Q, YUE Y, MENG T, ZHANG S, JIANG C. 2023. The migration of sedimentary center during the Lower Submember of the Fourth Member of Shahejie period in the Bonan Sag[J]. *Geological Review*, 69(S1): 301-302 (in Chinese with English abstract).
- XU Q S, WANG Y S, MA L C, MENG T, BI J F, WANG T Y. 2021. The evolution of paleoclimate during the Lower Sub-member of the Fourth Member of Shahejie period in the Bonan Sag[J]. *Geological Review*, 67(S1): 127-128 (in Chinese with English abstract).
- YANG Y Y. 2021. Application implications of biomarkers in geochemistry – a case study of tricyclic terpene alkane compounds[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, (19): 88-89, 91 (in Chinese).
- YANG K, ZHU X M, YANG H Y, ZHU S F, DONG Y L, JIN L, SHEN T T, YE L. 2022. Multi method characterization of a paleo-provenance system: a case study from the lower 4th member of the Shahejie Formation from the Bonan Sag in Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(6): 1542-1560 (in Chinese with English abstract).
- YUAN G Y, LI F J. 2023. Geochemical characteristics and geological significance of Paleogene rare earth elements in the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 34(8): 1374-1384 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG C C, FANG C G, LIU T, WU T, SHAO W, LIAO S B, XU J L. 2024. Research progress on flood-triggered hyperpycnal flows in sedimentary Basins[J]. *East China Geology*, 45(1): 49-61 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG G W, TAO S, TANG D Z, XU Y B, CUI Y, WANG Q. 2017. Geochemical characteristics of trace elements and Rare earth elements in Permian Lucaogou oil shale, Santanghu Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 42(8): 2081-2089 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO C J, KANG Z H, HOU Y H, YU X D, WANG E B. 2020. Geochemical characteristics of rare earth elements and their geological significance of Permian Shales in lower Yangtze area[J]. *Earth Science*, 45(11): 4118-4127 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Y Y, LI S Z, LI D, GUO L L, DAI L M, TAO J L. 2019. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 43(1): 141-167 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU W, HAN X, LONG Y, YUE L, XU A Q, CHEN R. 2024. Discussion on the geological features and sedimentary environment of the Early Carboniferous Jiujialu Formation in Jinsha area of central Guizhou[J]. *East China Geology*, 45(2): 187-197 (in Chinese with English abstract).
- ZHU W L, HUANG B J, MI L J, WILKINS R W T, FU N, XI-

AO X M. 2009. Geochemistry, origin, and deep-water exploration potential of natural gases in the Pearl River Mouth and Qiongdongnan Basins, South China Sea [J]. AAPG Bulletin, 93(6): 741-761.

附中文参考文献

- 陈骏, 王洪涛, 鹿化煜. 1996. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其它微量元素的化学淋滤研究 [J]. 地质学报, 70(1): 61-72.
- 陈阳, 张扬, 朱正杰, 张瑞刚, 李良林, 陈威, 刘鹏. 2019. 济阳坳陷渤海洼陷沙四下亚段沉积序列及石油地质意义 [J]. 中国石油勘探, 24(3): 313-322.
- 程银行, 金若时, CUNEY M, PETROV V A, 苗培森. 2024. 中国北方盆地大规模铀成矿作用: 地层篇 [J]. 地质学报, 98(7): 1953-1976.
- 傅家摸, 盛国英, 许家友, 贾蓉芬, 范善发, 彭平安, EGLINTON G, GOWAR A P. 1991. 应用生物标志化合物参数判识古沉积环境 [J]. 地球化学, (1): 1-12.
- 何洪茜, 肖加飞, 兰青, 杨海英, 黄明亮. 2022. 黔北下志留统龙马溪组黑色泥岩沉积环境及页岩气成藏条件 [J]. 地球与环境, 50(6): 898-908.
- 黄学勇, 高茂生, 侯国华, 张戈, 党显璋. 2023. 莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析 [J]. 华东地质, 44(4): 402-414.
- 孔庆芬. 2007. 鄂尔多斯盆地延长组烃源岩有机显微组分特征 [J]. 新疆石油地质, 28(2): 163-166.
- 李传明, 曾溅辉, 刘海涛, 李宏军, 楼达, 崔宇, 董雄英, 刘姝宁. 2023. 渤海湾盆地黄骅坳陷上古生界暗色泥岩地球化学特征及其发育机制 [J]. 地球科学与环境学报, 45(2): 306-321.
- 李伦, 张鹏远, 梁慨慷, 李尚昆, 魏志福, 王永莉. 2023. 盐湖相有机质富集主控因素与模式——以柴西盆地新近系上新统下油砂山组灰色泥岩为例 [J]. 天然气地球科学, 34(8): 1357-1373.
- 李双建, 肖开华, 沃玉进, 龙胜祥, 蔡立国. 2008. 湘西、黔北地区志留系稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 现代地质, 22(2): 273-280.
- 李宗亮, 蒋有录, 刘华. 2008. 孤西断层对孤北潜山带天然气运移和聚集的影响 [J]. 油气地质与采收率, 15(5): 24-26.
- 刘军锷. 2014. 济阳坳陷渤海洼陷沙四下亚段红层沉积特征及其油气富集规律 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉).
- 孟庆涛, 刘招君, 胡菲, 孙平昌, 柳蓉, 周人杰, 甄甄. 2013. 桦甸盆地始新统油页岩稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 43(2): 390-399.
- 宋国奇, 刘鹏, 刘雅利. 2014. 渤南洼陷沙河街组四段下亚段成岩作用与储层孔隙演化 [J]. 沉积学报, 32(5): 941-948.
- 田德瑞, 吴奎, 张如才, 潘文静, 王鑫. 2018. 渤海湾盆地辽西凸起北段锦州 20 油田原油地球化学特征及油源对比 [J]. 石油实验地质, 40(3): 410-417.
- 王旭影, 姜在兴. 2021. 苏北东台坳陷古新统阜宁组三段微量、稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质论评, 67(2): 355-366.
- 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 李元昊, 田景春, 李士祥, 尤靖茜. 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义 [J]. 沉积学报, 35(6): 1265-1273.
- 王永建, 王延斌, 王言剑, 坛俊影. 2010. 高邮凹陷泰州组烃源岩有机岩石学 [J]. 天然气地球科学, 21(6): 1024-1028.
- 王永诗, 张顺. 2023. 渤海湾盆地沾化凹陷渤海洼陷古近系深层优质储层形成机制 [J]. 石油实验地质, 45(1): 11-19.
- 徐琦松, 王永诗, 巩建强, 岳宇, 孟涛, 张盛, 姜超. 2023. 渤南洼陷沙四下亚段沉积中心迁移演化规律 [J]. 地质论评, 69(S1): 301-302.
- 徐琦松, 王永诗, 马立驰, 孟涛, 毕俊凤, 王天宇. 2021. 渤南洼陷沙四下亚段沉积时期古气候演化 [J]. 地质论评, 67(S1): 127-128.
- 杨岩岩. 2021. 地球化学中生物标志物的应用意义——以三环萜烷化合物为例 [J]. 内蒙古科技与经济, (19): 88-89, 91.
- 杨棵, 朱筱敏, 杨怀宇, 朱世发, 董艳蕾, 金磊, 申婷婷, 叶蕾. 2022. 古物源体系多方法表征——以渤海湾盆地沾化渤海洼陷沙四下亚段为例 [J]. 沉积学报, 40(6): 1542-1560.
- 苑广尧, 李凤杰. 2023. 柴达木盆地北缘古近系稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 天然气地球科学, 34(8): 1374-1384.
- 章诚诚, 方朝刚, 刘桃, 吴通, 邵威, 廖圣兵, 徐锦龙. 2024. 沉积盆地洪水异重流研究进展 [J]. 华东地质, 45(1): 49-61.
- 张国伟, 陶树, 汤达祯, 徐银波, 崔义, 王琼. 2017. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组油页岩微量元素和稀土元素地球化学特征 [J]. 煤炭学报, 42(8): 2081-2089.
- 赵晨君, 康志宏, 侯阳红, 余旭东, 王恩博. 2020. 下扬子二叠系泥页岩稀土元素地球化学特征及地质意义 [J]. 地球科学, 45(11): 4118-4127.
- 赵彦彦, 李三忠, 李达, 郭玲莉, 戴黎明, 陶建丽. 2019. 碳酸盐 (岩) 的稀土元素特征及其古环境指示意义 [J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 141-167.
- 周武, 韩雪, 龙宇, 岳龙, 徐安全, 陈仁. 2024. 黔中金沙地区早石炭世九架炉组地质特征及沉积环境讨论 [J]. 华东地质, 45(2): 187-197.

Geochemical characteristics of trace elements in the Es₄^x Formation of the Bonan Sag and their implications for sedimentary environment

ZHANG Bo¹, GUO Xiaoying^{2,3}, MENG Tao¹, JIANG Chao¹, LIU Peng¹, CHEN Yong^{2,3}

(1. Development Research Institute of Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China; 2. National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China; 3. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: The Bonan Sag is an important oil and gas-rich region of Bohai Bay basin. In order to clarify the depositional environment and hydrocarbon potential of the hydrocarbon source rocks in the lower subsection of Es₄^x in the Bonan Sag, and the hydrocarbon potential of the hydrocarbon source rocks of the Es₄^x, we analyzed the typical mudstone samples of the Es₄^x in the Bonan Sag by trace element testing and organic geochemical characteristics. Through selecting the elements and element combinations sensitive to the depositional environment, such as $\delta\text{Ce}_{\text{n}}$, Ce_{anom} , Ni/Co, V/Ni, V/(V+Ni), V/Cr, B/Ga etc., in combination with the organic geochemical characteristics, this paper clarified the climate, redox environment and salinity during the sedimentary period of the Es₄^x in the Bonan Sag. The applicability of these parameters in the paleoenvironment study for the working area and the factors affecting the development of source rocks with hydrocarbon generation potential were discussed. The results show that the La_n/Yb_n values range from 1.62 to 3.00; B/Ga range from 1.43 to 3.73; the blackish mudstones have Pr/Ph<1, $\delta\text{Ce}_{\text{n}}>1$, and $\text{Ce}_{\text{anom}}>0$, and the reddish mudstones samples have $\delta\text{Ce}_{\text{n}}$ values ranging from 0.94 to 0.96, and $\text{Ce}_{\text{anom}}<0$. It indicates a warm and humid climate in some areas during the depositional period of the Es₄^x in the Bonan Sag, a slow sediment deposition rate, and a freshwater-slightly saline environment of the whole area, while that part of the area was in an anoxic environment, except for the oxygen-rich environment. The results of comparative analysis show that using $\delta\text{Ce}_{\text{n}}$ and Ce_{anom} is reliable to discriminate redox environments, and the relative magnitudes of mudstone Ni/Co, V/Ni, and V/(V+Ni) can infer the anoxicity of environment during their deposition, and the B/Ga ratio can distinguish freshwater-brackish water and brackish water environment. In addition, the mudstone in the study area of the Es₄^x has a high content of sapropelinite, the kerogen is type II-III; TOC, S₁+S₂, and chloroform bitumen “A” contents of some mudstones indicate that they have reached the level of general hydrocarbon source rocks. Compared with the non-hydrocarbon source rock in the study area, they have smaller B/Ga and larger ETR index and gammacerane index. This suggests that the development of hydrocarbon-generating potential source rocks in anoxic environments may depend on the salinity of the sedimentary water.

Key words: Bonan Sag; Es₄^x; trace element; sedimentary environment