

鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征

范柏江¹, 师良¹, 杨杰², 苏珊², 马荣³, 袁耀利³, 曾陈宇¹(1. 延安大学石油工程与环境工程学院, 陕西延安 716000; 2. 中国石油青海油田公司采油一厂, 青海海西 816400;
3. 延长油田股份有限公司吴起采油厂, 陕西吴起 710075)

摘要:在采用能量色散X射线荧光技术的测试过程中,受能量配置探索不足的影响,所测元素的数量往往较少,导致无法充分利用元素参数来刻画古沉积环境。此外,陆相有机质的来源包括河流输入有机质和水体生产有机质,如何对其进行定量区分尚存困难。针对能量色散X射线荧光技术的能量配置进行了改进,由此将精确测试的元素数量扩充到28个。选择鄂尔多斯盆地中部延长组7段(长7段)页岩为研究对象,开展了有机碳、主要元素、微量元素的地球化学测试。在分析主要元素、微量元素等地球化学特征的基础上,对长7段有机质的沉积水体、氧化还原状态和生产率等古沉积环境进行了恢复,建立了有机质来源的数学模型,并分析了有机质的供给特征。研究表明,长7段有机质形成于偏温暖潮湿的气候背景,水体为偏贫氧和缺氧的淡水环境,古生产力较高但初级生产力不高。对于鄂尔多斯盆地中部地区的页岩有机质,水体来源有机质的贡献略大于陆源输入有机质的贡献。

关键词:有机质;元素化学;沉积环境;页岩;延长组;吴起-安塞地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Sedimentary environment of lacustrine organic matter in the central Ordos Basin

Fan Bojiang¹, Shi Liang¹, Yang Jie², Su Shan², Ma Rong³, Yuan Yaoli³, Zeng Cengyu¹

[1. School of Petroleum and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi, 716000, China; 2. No. 1 Oil Production Plant, Qinghai Oil Field Company, PetroChina, Haixi, Qinghai 816400, China; 3. Wuqi Oil Production Plant, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., LTD, Wuqi, Shaanxi, 716000, China]

Abstract: The numbers of measurable elements in lacustrine shale samples by energy dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) technology are often limited due to insufficient energy configuration. This makes it difficult to fully restore the paleosedimentary environment for samples concerned. Furthermore, some lacustrine organic matter can be of river input origin or indigenously produced in lake water, quantitatively distinguishing one from the other is challenging. In this study, energy configuration of ED-XRF is improved to increase the number of accurately measurable elements to 28. Shale samples from the seventh member of Yanchang Formation (Chang 7) in central Ordos Basin are tested for geochemical characterization of organic carbon, major elements, trace elements and carbon isotopes. The results are used to restore the paleosedimentary environment of organic matter from Chang 7, including the water column, redox and productivity. A mathematical model is established to analyze the organic matter. The results show that the organic matter of Chang 7 shale is formed in fresh water with oxygen deficiency or anoxia, high paleoproductivity but a moderate primary productivity against a warm and humid climate background. For shale in the central Ordos Basin, organic matter is rather lake water produced than terrestrial input.

Key words: organic matter, element geochemistry, sedimentary environment, shale, Yanchang Formation, Wuqi-Ansai area, Ordos Basin

引用格式:范柏江, 师良, 杨杰, 等. 鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 648-657. DOI: 10.11743/ogg20220313.

Fan Bojiang, Shi Liang, Yang Jie, et al. Sedimentary environment of lacustrine organic matter in the central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 648-657. DOI: 10.11743/ogg20220313.

收稿日期: 2021-06-06; 修订日期: 2022-03-10。

第一作者简介: 范柏江(1983—), 男, 博士、副教授, 常规及非常规油气成藏机理。E-mail: 632258611@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702136); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-308)。

随着页岩油气的规模性开发,富有机质页岩的古沉积环境得到业界的普遍关注。针对海相页岩,目前已经形成了一批可靠的元素及化合物判识指标,实现了海相页岩物源输入条件、古沉积水体的咸度、水体的氧含量、古气候特征、古生产力强弱等的恢复^[1-2]。在此基础上,元素化学逐渐被引入湖相页岩的沉积环境研究。但是,湖相页岩由于受湖泊水体、河流输入等条件的影响,对其沉积环境的恢复与揭示相对滞后。

当前,能量色散X射线荧光技术是揭示湖相页岩沉积环境的有效方法之一。但是,在采用能量色散X射线荧光技术的测试过程中,普遍采用一种能量配置进行测试。事实上,由于主要元素和微量元素存在巨大的含量差异,采用相同的能量配置会导致严重的图谱压制现象,进而导致无法获得准确的元素含量。此外,基于一种能量配置的测试,其获得的元素数量较少,导致无法全面利用元素来刻画古沉积环境。

1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地中部,构造区划隶属于伊陕斜坡构造带,行政区划隶属于吴起—安塞—甘泉地区(图1)。由于研究区靠近长7段(三叠系延长组7段)古湖盆的边缘,普遍认为研究区泥页岩的发育程度不高,烃源岩品质中等^[3-5]。在最近5年的勘探实践中,安塞周边长7段泥页岩层系中不断发现油气显示。其中,D212井(日产量大于1.0 t)、D207井(日产量大于2.0 t)等5口井获得工业油流。基于长7段页岩的烃源岩评价亦认为,研究区页岩的非均质性强,生烃能力差异大,但整体有机质丰度较高,具备生烃能力^[6-7]。

鄂尔多斯盆地中部,长7段页岩的厚度较薄,普遍小于20 m。岩心识别发现,该套页岩的岩性不纯,多

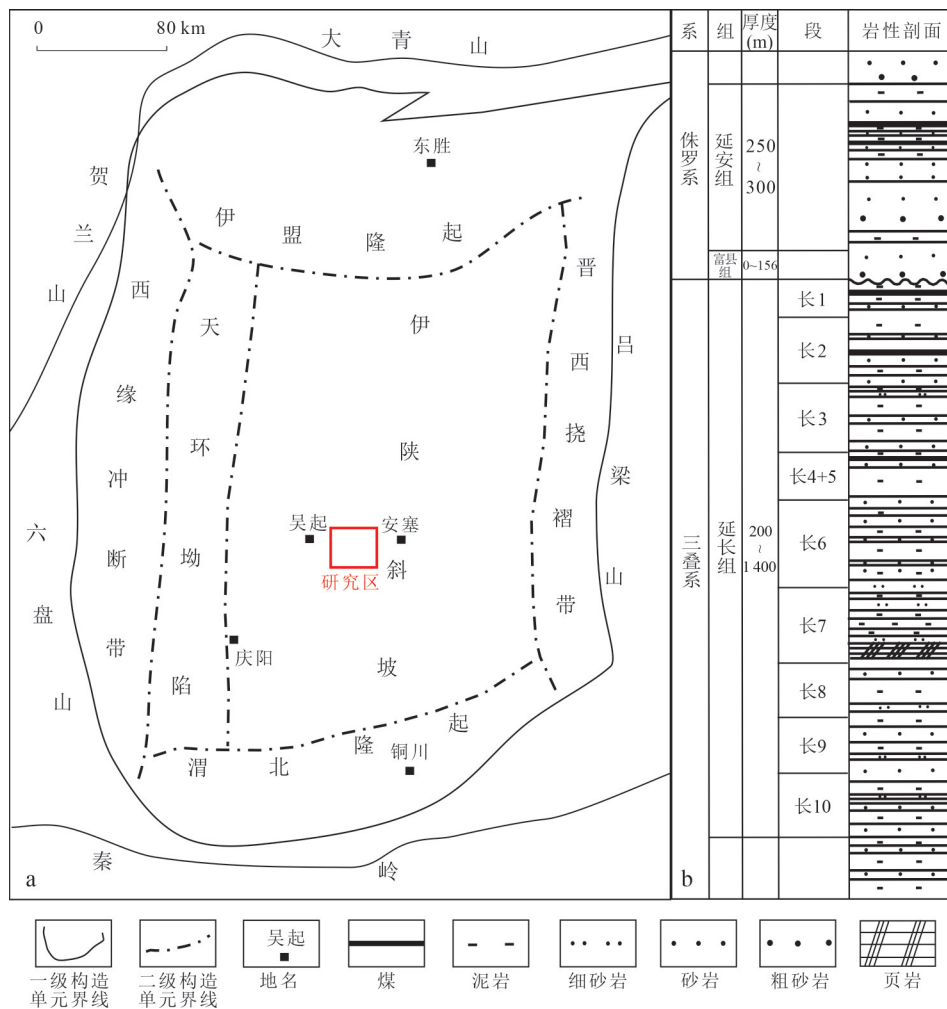


图1 鄂尔多斯盆地中部区域位置及地层发育情况

Fig. 1 Structural location of the central Ordos Basin with stratigraphic column of the study area

a. 鄂尔多斯盆地构造位置; b. 研究区地层柱状图

夹杂砂质纹层,砂质纹层的厚度普遍不足1 mm至数毫米,在岩心上表现出明暗相间的颜色特征(图2)。研究区为何能沉积富有机质页岩、控制有机质发育的沉积环境有何特征、有机质的物质来源及其贡献等尚缺乏探索。基于此,开展了有机碳、主要元素、微量元素的地球化学测试。在分析主要元素、微量元素等地球化学特征的基础上,对长7段页岩有机质的沉积水体、氧化还原状态和生产力等古沉积环境进行了恢复,建立了有机质来源的数学模型并分析了有机质的供给特征。

研究区页岩总有机碳(TOC)含量的数值范围为0.87%~10.81%,平均为4.47%。从21个页岩样品的TOC分布来看,TOC<2%的样品仅有4个;2%<TOC<4%的样品仅有5个;TOC>4%的样品达到12个(图3)。由此可见,研究区的高TOC特征与TOC>4%的样品比例大息息相关。

研究区页岩,氧碳原子比(O/C)数值范围为0.08~0.19,平均为0.14;氢碳原子比(H/C)数值范围为0.81~

1.88,平均数值1.39。在有机质类型判别图版上,样品涵盖了I型、II₁型、II₂型和III型有机质。其中,II₁型有机质的数量最多,II₁型有机质数量占样品总数的43%;其次为I型有机质和II₂型有机质;III型有机质较少,只有1个样品(图4)。

2 元素测量

能量色散X射线荧光技术的缺点是分辨率低且存在显著的检测限。然而,近10年来,薄窗检测器、微型X射线管、微型准直器、脉冲电路以及信号处理得到全面发展,能量色散X射线荧光技术已经成熟有效。值得注意的是,主要元素和微量元素对能量信号的敏感度不一样,因而在测试过程中需要有针对性的选择能量配置。

本次对元素的测量采用配备铑X射线管的能量色散X射线荧光分析仪(Bruker TRACER III-V ED-XRF)。采用同一方法针对主要元素和微量元素开展

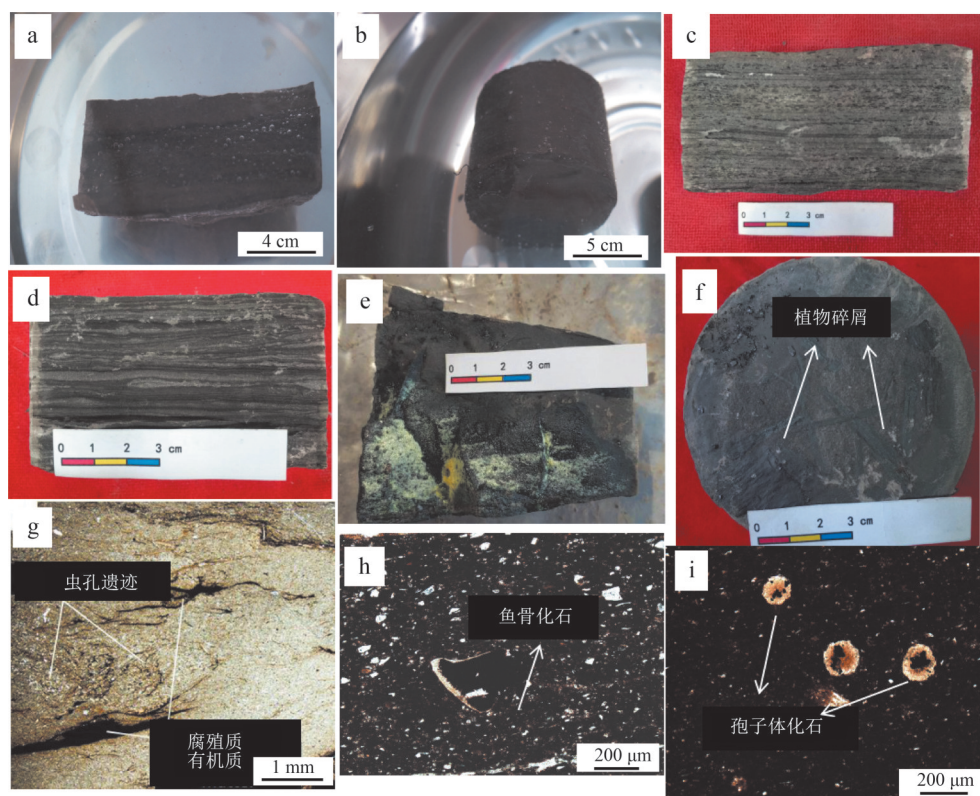


图2 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩岩心特征

Fig. 2 Core characteristics of Chang 7 shale, central Ordos Basin

a. 纯页岩在水中渗气, W336井, 埋深1 954.68 m, 岩心照片; b. 纯页岩在水中渗气, D214井, 埋深1 172.72m, 岩心照片; c. 含砂质纹层页岩, F134井, 埋深1 544.68 m, 岩心照片; d. 含砂质纹层页岩, D1199井, 埋深1 365.19 m, 岩心照片; e. 纯页岩裂缝渗油, D214井, 埋深1 170.46 m, 岩心照片; f. 页岩中植物碎屑遗迹, D19井, 埋深1 369.91 m, 岩心照片; g. 页岩中可见生物扰动现象(有虫孔遗迹)及陆源腐殖有机质, YY1井, 埋深135 6.26 m, 铸体薄片, 单偏光; h. 页岩中含鱼骨(鱼鳞)化石, YCCV1245井, 埋深1 562.63 m, 铸体薄片, 单偏光; i. 页岩中含孢子体化石, YCCV1245井, 埋深1 555.60 m, 铸体薄片, 单偏光

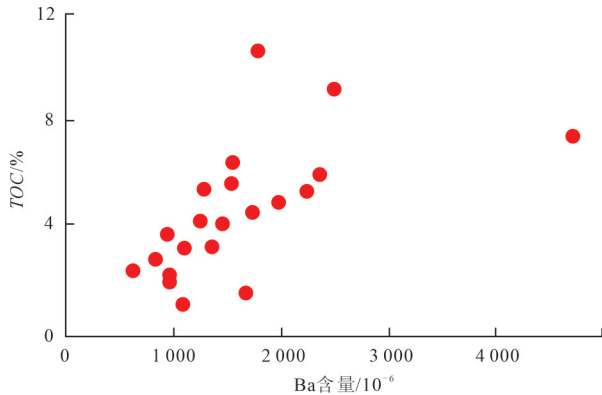


图3 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩总有机碳含量与Ba元素含量关系

Fig. 3 TOC vs. Ba content for Chang 7 shale, central Ordos Basin

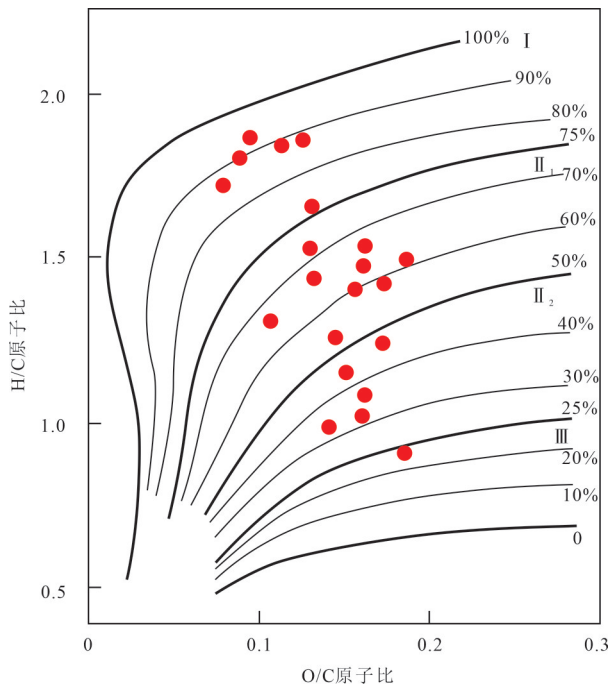


图4 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩有机质类型分布

Fig. 4 Organic matter types of Chang 7 shale, central Ordos Basin

测量,即将样品打磨为平整切面,将测量仪竖直放置(使得射线竖直向上发射),将样品置于测量仪上(射线发射口照射样品切面)。测量过程中,保证样品的平整切面完全紧贴于仪器的测量面,若两者非彻底接触则导致X射线信号衰减而产生误差。每个样品需分别在低能量条件和低能量条件下测量。高能量条件测量的元素包括钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、镓(Ga)、砷(As)、铅(Pb)、钍(Th)、铷(Rb)、铀(U)、锶(Sr)、钇(Y)、锆(Zr)、铌(Nb)和钼(Mo);低能量条件测量的元素包括钠(Na)、镁(Mg)、铝(Al)、硅(Si)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、钛(Ti)、锰(Mn)、铁(Fe)、钡(Ba)、钒(V)、铬(Cr)。

低能量条件即真空条件下,电压15 kV、电流23 μ A状态,有效照射时间60 s。高能量条件即采用增加Al-Ti-Cu过滤器,电压40 kV、电流11.6 μ A状态,有效照射时间60 s。在实验过程中,当设置电压为一恒定数值电压时、不同测量仪器由于硬件配置的差异会导致其设定电流出现一定的偏差。因此,在进行波普校正或者数据分析前,需要对仪器进行合理优化。本次实验中,仪器射线束的界面面积为3 mm $\times$ 4 mm(直径),为了使得照射点能够最大限度地反映样品的真实情况,在进行每个照射点测量时,可对同一点进行多次测量或者选择均质性较好的部位进行测量。对于Bruker TRACER III-V ED-XRF仪器,低能谱的计数率应该低于13 000原始计数/s(本次设置为12 000原始计数/s),高能谱的计数率可设置于1 500~2 000原始计数/s(本次设置为1 700原始计数/s)。测量完成后,利用仪器自带的Bruker AXS校正软件可进行能谱分析。

对21个页岩样品开展了主要元素和微量元素的测试工作。不同样品中的元素含量存在较大差异,但As, Mo, U, Sr和Ba 5种元素的相对含量明显较高。其中,As的数值范围为(5.93~50.25) $\times 10^{-6}$,平均数值为 16.88×10^{-6} ;Mo的数值范围为(0.19~7.03) $\times 10^{-6}$,平均数值为 2.75×10^{-6} ;U的数值范围为(2.09~17.54) $\times 10^{-6}$,平均数值为 7.57×10^{-6} ;Sr的数值范围为(303.15~508.52) $\times 10^{-6}$,平均数值为 391.40×10^{-6} ;Ba的数值范围为(636.97~4 775.12) $\times 10^{-6}$,平均数值为 $1 622.07 \times 10^{-6}$ (表1)。

3 微量元素富集特征

沉积物中,微量元素的亏损程度或富集程度是判别沉积环境的可靠指标。当前最普遍的方法是以太古宙澳大利亚平均页岩(PAAS)的元素含量作为参考标准。同时,为了消除元素来源差异对参考结果的影响,普遍采用Al标准化的元素富集系数EF(enrichment factors)对沉积物中的元素进行表征^[8](表2)。计算公式如下:

$$X_{EF} = (X/Al)_{\text{样品}} / (X/Al)_{\text{PAAS}} \quad (1)$$

式中:X与Al分别代表样品中元素X与元素Al的含量,%。样品采用PAAS(后太古宙澳大利亚页岩)进行标准化。

对微量元素富集因子的归类表明,样品分布于4个富集区间(图5)。18个微量元素中,有5个元素处于一般亏损区,8个元素处于微弱富集区。一般认为,一般亏损区间与微弱富集区间代表了无富集表现。有

表1 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩元素含量数值
Table 1 Statistics of measured elements in Chang 7 shale, central Ordos Basin

元素	含量/ 10^{-6}	
	范围	平均值
Na	2 990.32 ~ 4 645.05	3 777.75
Mg	3 308.94 ~ 17 719.90	10 166.78
Al	58 133.92 ~ 92 155.36	76 457.26
Si	202 186.51 ~ 269 343.95	241 139.00
K	17 498.39 ~ 31 706.56	24 754.35
Ca	6 174.31 ~ 44 762.47	18 647.80
Ti	2 673.77 ~ 4 572.67	3 822.25
Fe	29 800.16 ~ 54 079.39	43 159.72
Ba	636.97 ~ 4 775.12	1 622.07
Mn	415.69 ~ 1 779.19	878.16
P	306.92 ~ 1 316.63	631.08
V	32.09 ~ 169.37	86.13
Cr	29.29 ~ 110.18	78.49
Co	9.47 ~ 50.88	26.04
Ni	42.09 ~ 73.01	57.25
Cu	20.18 ~ 63.25	42.61
Zn	71.55 ~ 124.72	102.85
Ga	14.46 ~ 31.11	22.86
As	5.93 ~ 50.25	16.88
Pb	13.01 ~ 33.69	18.72
Th	7.84 ~ 17.44	12.67
U	2.09 ~ 17.54	7.57
Y	27.75 ~ 41.23	32.98
Zr	90.93 ~ 190.26	139.23
Nb	8.58 ~ 15.48	11.33
Mo	0.19 ~ 7.03	2.75
Rb	95.02 ~ 211.47	157.28
Sr	303.15 ~ 508.52	391.40

表2 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩微量元素的富集因子(EF)范围
Table 2 Enrichment factors of trace elements in Chang 7 shale, central Ordos Basin

微量元素	EF值	微量元素	EF值
Ba	1.14 ~ 8.57(2.91)	As	4.62 ~ 39.08(13.13)
Ni	0.82 ~ 1.42(1.11)	Pb	0.76 ~ 1.97(1.09)
U	0.79 ~ 6.60(2.85)	Th	0.63 ~ 1.39(1.01)
V	0.27 ~ 1.41(0.72)	Y	1.20 ~ 1.78(1.42)
Cr	0.34 ~ 1.29(0.92)	Zr	0.51 ~ 1.06(0.77)
Co	0.55 ~ 2.97(1.52)	Nb	0.56 ~ 1.00(0.73)
Cu	0.47 ~ 1.48(0.99)	Mo	0.22 ~ 8.20(3.20)
Zn	0.98 ~ 1.71(1.41)	Rb	0.69 ~ 1.54(1.15)
Ga	0.84 ~ 1.81(1.33)	Sr	1.77 ~ 2.97(2.28)

注:表中数据为最小值~最大值(平均值)。

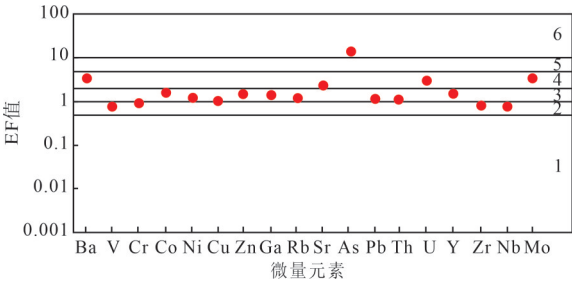


图5 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩微量元素富集程度对比
Fig. 5 Enrichment comparison of trace elements in Chang 7 shale, central Ordos Basin

1. 严重亏损区; 2. 一般亏损区; 3. 微弱富集区; 4. 一般富集区; 5. 富集区; 6. 非常富集区

13个元素无富集表现,其元素数量占元素总数的72.22%;Mo,U,Sr和Ba 4个元素为一般富集,该区间元素数量占元素总数的22.22%;仅有As元素为非常富集。

4 沉积环境特征

基于微量元素的绝对、相对含量指标来重建古沉积环境与沉积过程是非常有效的手段,且该方面已经取得了长足进展^[9]。在水体盐度、古气候、古生产力、水体氧化状态等沉积环境判识上已经非常有效^[9-11]。

4.1 水体盐度特征

沉积物在沉积期所处的水体盐度即古盐度。由于古盐度对水体的分层具有重要影响,它对沉积物的氧化-还原作用与过程具有间接的控制作用^[12]。微量元素中,Ba和Sr的化学性质相似,但两者的含量比值会随盐度的增大而增大。Sr/Ba<0.5指示淡水,Sr/Ba介于0.5~1.0指示半咸水,Sr/Ba>1指示咸水^[12-14]。研究区页岩的Sr/Ba数值范围为0.08~0.72,均值为0.30(图6)。由此可见,长7段页岩有机质总体形成于淡水环境。此外,通过Ca和Fe含量的相对比值也可判断古盐度。Ca/(Ca+Fe)<0.4指示淡水,0.4<Ca/(Ca+Fe)<0.8指示半咸水,Ca/(Ca+Fe)>0.8指示咸水^[12-14]。研究区Ca/(Ca+Fe)数值范围为0.12~0.52,平均数值为0.29。表明长7段页岩的古沉积环境为淡水水体环境。

4.2 水体含氧特征

V和Ni的化学性质相似,但V在相对氧化的水体中更容易富集,而Ni在相对还原的水体中更容易富集^[13-16]。因此,可以利用含量比V/(V+Ni)来识别水体

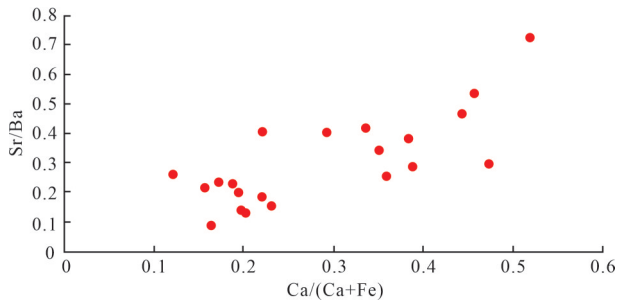


图6 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩Sr/Ba与Ca/(Ca+Fe)的关系

Fig. 6 Sr/Ba vs. Ca/(Ca+Fe) of Chang 7 shale, central Ordos Basin

的氧化还原状态。 $V/(V+Ni) < 0.46$ 指示氧化环境； $0.46 < V/(V+Ni) < 0.57$ 指示贫氧环境； $0.57 < V/(V+Ni) < 0.83$ 指示缺氧环境； $V/(V+Ni) > 0.83$ 指示静水的闭塞环境^[13-16]。长7段页岩的 $V/(V+Ni)$ 数值为0.37~0.73,平均数值为0.58,表明沉积期的水体为贫氧-缺氧环境(图7)。此外,As元素主要伴生于黄铁矿的矿物结构中,高含量的As元素是黄铁矿富存的佐证。长7段页岩的As元素含量高,一定程度上表明长7段页岩的古水体环境为偏还原的环境。

一般而言,较低的Th/U含量比值(0~2)指示缺氧环境^[17]。Wignall和Twitchett还提出利用综合参数 δU 来判断缺氧环境,计算公式为 $\delta U = U/[1/2(U+Th/3)]$; $\delta U > 1$ 代表缺氧环境, $\delta U < 1$ 代表氧化环境^[18]。研究区Th/U的数值范围为0.86~7.19,平均数值为2.38。尽管Th/U的平均数值落入偏氧化的数值范围,但从样品分布来看,21个样品中有15个样品的Th/U数值小于2。研究区 δU 的数值范围为0.59~1.55,平均数值为1.19。因此,Th/U和 δU 综合表明,研究区整体属于偏缺氧的环境。

4.3 气候特征

气候条件直接影响了陆源沉积物的输送过程,而对有机质的富集产生影响。因此,可以利用元素含

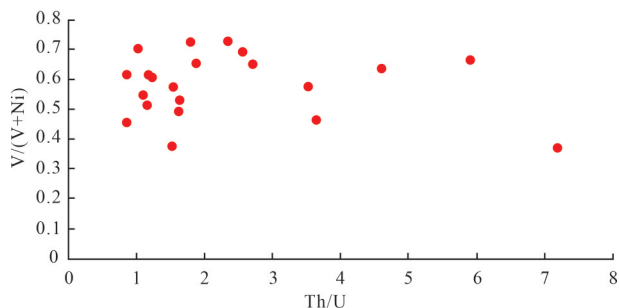


图7 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩Th/U与V/(V+Ni)的关系

Fig. 7 Th/U vs. V/(V+Ni) of Chang 7 shale, central Ordos Basin

量对古气候条件进行重建。在潮湿气候中,水体中的V,Cr,Sr,Co,Ni和Mn等元素会相对富集;在干旱气候中,水体中则容易发生含盐矿物沉淀(例如Mg,K,Ca,Sr,Na,Ba)。上述两类元素含量的比率被称为气候指数数值,即 $C_{\text{数值}} = \sum(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{V} + \text{Co}) / \sum(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba} + \text{K} + \text{Na})$, $C_{\text{数值}}$ 是当前非常有效的古气候表征指标。干旱、半干旱、半干旱-半潮湿、半潮湿、潮湿环境的 $C_{\text{数值}}$ 分别为0~0.2,0.2~0.4,0.4~0.6,0.6~0.8,0.8~1.0^[19-20]。研究区页岩 $C_{\text{数值}}$ 的范围为0.49~1.18,均值为0.77,指示研究区页岩沉积于偏潮湿的环境(图8)。

Sr/Cu含量比率也是判断古气候的重要指标。一般情况下,高的Sr/Cu比率,即Sr/Cu比率大于10.0指示干热气候,而Sr/Cu比介于1.0~10.0指示暖湿气候^[21]。长7段页岩的Sr/Cu数值范围为5.85~22.73,平均数值为10.03。但是从数据分布看,21个样品中有13个样品的Sr/Cu数值小于10.00,表明研究区整体上为偏温暖潮湿的气候。

4.4 生产力特征

在一定的地质历史阶段,古生物在单位面积、单位时间内所产生的有机体数量称为古生产力。古生产力具有初级生产力和次级生产力两种表现形式。高TOC指示研究区具有较高的古生产力水平。由于Ba元素主要以硫酸钡形式沉积于水体中,它往往与陆源物质的输入具有直接关系。陆源物质的输入量越多,硫酸钡含量也越高,古生产力往往越强^[15-16]。因此,Ba元素也是判断古生产力的常用指标。Ba含量与TOC含量的正相关关系也表明,研究区的Ba含量能反映古生产力的高低(图3)。长7段页岩的Ba含量数值范围为 $(636.98 \sim 4\,775.12) \times 10^{-6}$,平均数值为 $1\,622.07 \times 10^{-6}$,指示了偏高的古生产力水平。P主要来源于水生生物如鱼类的骨骼、牙齿等,它是反映初级生产力大小的有效指标。在实际运用中,为了消除自生矿物或者

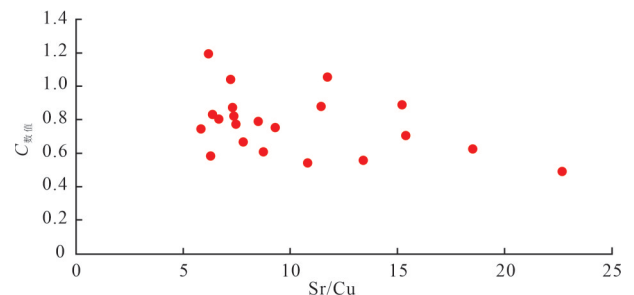
图8 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩 $C_{\text{数值}}$ 与Sr/Cu的关系

Fig. 8 C_{value} vs. Sr/Cu of Chang 7 shale, central Ordos Basin

沉积有机质对P的稀释作用,往往采用P/Ti含量比率判断初级生产力^[15-16,22]。长7段页岩的P含量数值范围为0.03%~0.13%,均值为0.06%。P/Ti数值范围为0.38%~1.15%,均值为0.56%。研究区P含量数值以及P/Ti数值均不偏高,表明水体的初级生产力并不高。Ba与P含量的不一致很可能表明,尽管水体的初级生产力不高,但外来有机质的输入对整体生产力具有较大的贡献。

4.5 水体封闭性特征

对于湖泊水体,水体的封闭性越强,氧化还原敏感元素越容易富集。长7段页岩的氧化还原敏感元素仅仅表现出轻微富集。例如,Zn,Co和Y等元素整体上处于微弱富集区域;U和Mo元素整体上处于一般富集区(图5)。水体封闭性还可以利用 U_{EF}/Mo_{EF} 的比率进行识别^[9,23]。21个样品中,有7个样品的 U_{EF} 数值以及 Mo_{EF} 数值均小于1,在经典判别图版上无法显示,该类样品数占样品总数的33.3%。在 U_{EF}/Mo_{EF} 交汇图上,9个样品的 U_{EF} 及 Mo_{EF} 数值范围为0.3~1.0 SW(SW代表海水中的富集系数),4个样品的 U_{EF} 及 Mo_{EF} 数值范围为0.1~0.3 SW(图9)。整体而言,页岩有机质主要形成于一般-中等的封闭性水体环境中。值得注意的是,上述数值的变化范围较大,推测这可能与湖泊水体的频繁震荡有关;由于湖泊水体存在水体原生有机质与外来输入有机质,上述差异还可能与样品有机质的来源相关。

4.6 陆源供给特征

除了处于极端湿热等特殊环境外, Al_2O_3 和 TiO_2 非常稳定。在湖相泥页岩中,Al完全能指示粘土矿物的含量,而 TiO_2 完全能指示原始铁镁矿物如黑云母、闪

石、辉石和橄榄石的含量^[9,24-25]。在地质演化过程中,由于原始铁镁矿物容易向粘土矿物转变,因此,可以利用 TiO_2 的含量变化来表征母岩向粘土矿物的转化。考虑到石英、方解石或其他非粘土矿物的稀释作用,泥页岩 TiO_2 和 Al_2O_3 含量会发生改变,因而可以利用两者的比率来判别物源的多样性。研究区Ti/Al含量比数值极其稳定,Ti/Al比率小于0.1且无明显的变化趋势,表明沉积期的陆源物质供给相对稳定。

Sr是活泼的阳性金属元素。水体中的Sr存在陆源、地壳热液等多种来源,而生物作用及成岩作用会对Sr的富集产生影响。因此,水体沉积物的Sr含量往往具有较大变化。本次测量中,Sr含量为 $(303.15 \sim 508.52) \times 10^{-6}$,平均数值 391.40×10^{-6} 。该数值与陆源物质的锶含量(世界陆地土壤中含量约 300×10^{-6})相近。由此可见,研究区Sr主要由陆源物质进行供给,无明显的热液来源。

5 物质来源特征

5.1 物质来源

陆相有机质的来源包括河流输入有机质和水体生产有机质两个方面。在富集途径上,陆相有机质则可以通过3种途径富集:①湖泊周边的陆源有机质输入(以河流为主),如陆源高等植物(图2f,i);②湖泊水体自身营养物质产生有机质,如水生生物(图2g,h);③湖泊深部水体涌流带来有机质。针对前两种来源途径的研究较多,但对第三种来源途径的探索极少。

湖泊水体发生涌流时,深部水体将营养物质带至浅部水体,浅部水体发生光合作用而导致生物繁盛,由此增加了水体生产有机质的能力。值得注意的是,水体涌流过程中,深水沉积中的富集微量元素会被带至浅部水体,例如Mo,Ni,Ba,Cr,Zn,V,U,Cu,As和Co等^[17]。研究区微量元素富集因子与典型涌流的元素富集因子进行对比发现,研究区仅有Mn和As的含量高于典型涌流的元素含量,即存在显著富集现象;其他10个元素无元素富集现象(图10)。由此可以推断,尽管研究区处于湖泊的边缘沉积部位,但并没有发生水体涌流过程,即不存在深部营养物质上涌导致的水体有机质的增加与繁盛。

5.2 定量特征

有机质的类型能大致反映有机质的来源。例如,I型有机质大多来源于水体有机质、III型有机质大多

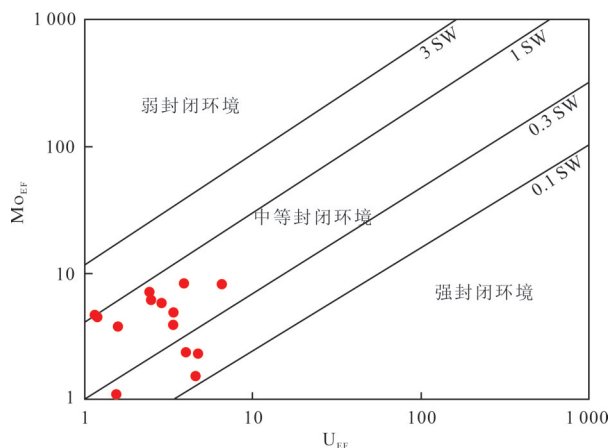


图9 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩 U_{EF} 与 Mo_{EF} 的关系

Fig. 9 U_{EF} vs. Mo_{EF} of Chang 7 shale, central Ordos Basin

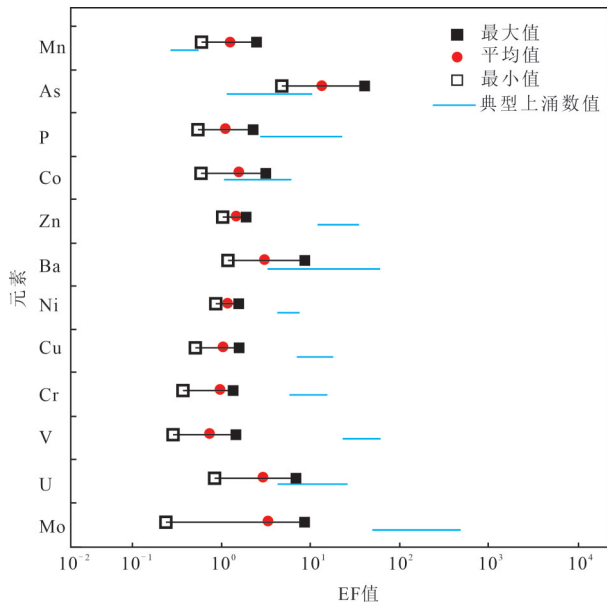


图10 鄂尔多斯盆地中部与典型水体涌流事件的微量元素富集因子对比(典型数值据文献[17])

Fig. 10 Trace element enrichment factors of central Ordos Basin compared with those of typical upwelling events (typical data from reference[17])

来源于陆源输入、Ⅱ型有机质则是不同来源的混合组成。事实上,有机质的类型属性是渐变的,为此,众多学者采用0~100的数值来对有机质的来源进行量化表征^[26-30]。为了表征有机质的类型属性,基于有机质类型图版,建立了“水体有机质比例”(W_{OR})参数来进行表征。水体有机质比例代表水体有机质占总有机质的比例。

在确定“水体有机质比例”时需假定:① H/C最高、O/C最低的有机质完全来源于水体有机质。也即在H/C和O/C图版上,位于左上端的包络线其有机质完全来源于水体有机质,此时的水体有机质比例为100%;② H/C最低、O/C最高的有机质完全来源于陆地或其他物源的输入。也即在H/C和O/C图版上,位于右下端的包络线其有机质完全来源于外界的输入,此时的水体有机质比例为0;③ 其他样品根据插值法在图版上确定(图4)。

研究区水体有机质比例范围为0.24~0.93,平均数值为0.62(图11)。上述数值表明,研究区水体来源有机质的贡献略大于陆源输入有机质的贡献。从21个样品的数值分布来看,以水体有机质为主的样品(水体有机质比例大于0.55的样品),其有机碳含量相对稳定,TOC含量数值大致集中分布于2.5%~6.0%的数值范围(图11)。以陆地输入有机质为主的样品(水体有机质比例小于0.55),其有机碳含量变化

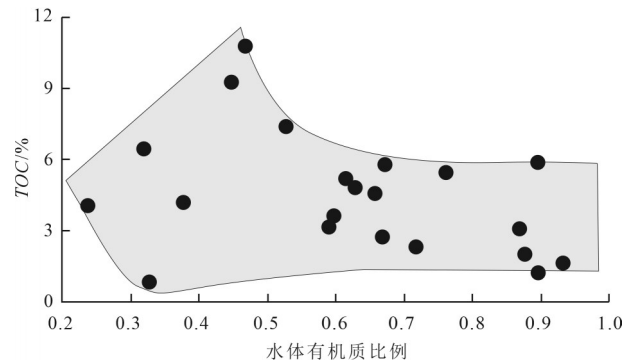


图11 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩水体有机质比例与TOC关系

Fig. 11 Indigenous organic matter ratio vs. TOC, Chang 7 shale, central Ordos Basin

极大(图11)。如前所述,研究区Ba元素富集,整体古生产力较高;但P元素不富集,指示水体的初级生产力并不高,表明外来有机质的输入对整体生产力具有较大贡献^[31-32]。由此可见,浅湖相页岩的有机质富集,它们是水体生产力与河流输入两者共同作用的结果。

事实上,陆地物质的输入状况(如输入量、输入速率、物质来源等)复杂多变,在此背景下形成的沉积有机质会出现较大的性质差异^[33-38]。水体来源有机质由于组成相对单一,其元素组成与水体有机质比例的相关性相对显著(图12)。研究区水体有机质比例越高的样品,其含氢组分的占比往往越高,具体表现是水体有机质比例随H/C比的增高而增大。此外,水体有机质比例大于0.8的样品,其O/C比较低;水体有机质比例小于0.8的样品,其O/C比无显著的变化趋势。上述特征进一步证实,水体有机质占比极高的样品其有机质主体是含氢丰富的水体有机质,而其他样品的有机质主体则是混合来源(图12)。

6 结论

1) 在运用能量色散X射线荧光技术时,针对主要元素和微量元素可分别采用低能环境和高能环境进行测量,由此可以获得更多可靠的元素信息。基于C、H和O等元素差异,结合有机质的类型差异可以定量识别不同来源有机质。

2) 长7段页岩有机质形成于偏温暖潮湿的气候条件、水体为偏贫氧和缺氧的淡水水体、古生产力较高但初级生产力不高。相对于湖泊水体自身形成的有机质而言,水体来源有机质的贡献略大于陆源输入有机质的。

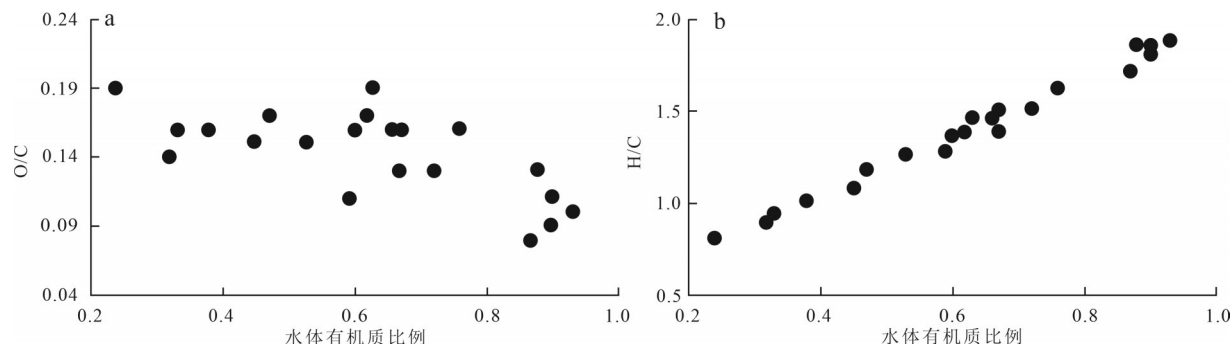


图12 鄂尔多斯盆地中部长7段页岩有机质来源参数

Fig. 12 Parameters reflecting organic matter origins, Chang 7 shale, central Ordos Basin

a. O/C与有机质比例关系; b. H/C与有机质比例关系

参 考 文 献

- [1] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(8): 1179-1209.
- [2] Caplan M L, Marc Bustin R. Palaeoenvironmental and palaeoceanographic controls on black, laminated mudrock deposition: example from Devonian Carboniferous strata, Alberta, Canada [J]. Sedimentary Geology, 2001, 145(1): 45-72.
- [3] 庞正炼, 邹才能, 陶士振, 等. 中国致密油形成分布与资源潜力评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(7): 60-67.
Pang Zhenglian, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. Formation, distribution and resource evaluation of tight oil in China[J]. Engineering Science, 2012, 14(7): 60-67.
- [4] 陈宇航, 朱增伍, 王喆, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长7油页岩时空分布及控制因素——来自沉积环境和沉积速率的制约[J]. 石油实验地质, 2018, 38(2): 200-209.
Chen Yuhang, Zhu Zengwu, Wang Zhe, et al. Time-space distribution of Chang 7 oil shale in southeastern Ordos Basin: Controlled by sedimentary environments and deposition rates[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 38(2): 200-209.
- [5] 范柏江, 晋月, 师良, 李亚婷. 鄂尔多斯盆地中部页岩油的勘探潜力—以长7湖相页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1-11.
Fan Bojiang, Jin Yue, Shi Liang, et al. Shale oil exploration potential in central Ordos Basin: A case study of Chang 7 lacustrine shale[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1-11.
- [6] 范柏江, 梅启亮, 王小军, 等. 泥岩与页岩地化特征对比—以鄂尔多斯盆地安塞地区延长组7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1119-1128.
Fan Bojiang, Mei Qiliang, Wang Xiaojun, et al. Geochemical comparison of mudstone and shale—A case study of the 7th member of Yanchang Formation in Ansai area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1119-1128.
- [7] 师良, 赵彤彤, 查辉, 等. 延安周边地区页岩地化特征及页岩油潜力评价[J]. 现代地质, 2021, 35(4): 1043-1053.
Shi Liang, Zhao Tongtong, Zha Hui, et al. Geochemical characteristics and shale oil potential of shale in the Yan'an Area [J]. Geoscience, 2021, 35(4): 1043-1053.
- [8] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1-2): 12-32.
- [9] Algeo T J, Tribouillard N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation [J]. Chemical Geology, 2009, 268(3-4): 211-225.
- [10] Liu B, Sun J, Zhang Y, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 608-624.
- [11] 赵建华, 金之钧, 林畅松, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 701-715.
Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Lin Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 701-715.
- [12] 林俊峰, 郝芳, 胡海燕, 等. 廊固凹陷沙河街组烃源岩沉积环境与控制因素[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 163-173.
Lin Junfeng, Hao Fang, Hu Haiyan, et al. Depositional environment and controlling factors of source rock in the Shahejie Formation of Langgu Sag[J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 36(2): 163-173.
- [13] 陈平, 林卫兵, 龚大建, 等. 贵州岑巩区块下寒武统变马冲组黑色页岩沉积地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 地质科学, 2020, 55(4): 1025-1043.
Chen Ping, Lin Weibing, Gong Dajian, et al. Sedimentary geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the black shale of the Lower Cambrian Bianmachong Formation in the Cen'gong Block, Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(4): 1025-1043.
- [14] 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 等. 抚顺盆地始新统将军屯组油页岩地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2340-2350.
Liu Zhaojun, Meng Qingtao, Liu Rong, et al. Geochemical characteristics of oil shale of Eocene Jijuntun Formation and its geological significance, Fushun Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2340-2350.
- [15] Fu X G, Wang J, Chen W B, et al. Organic accumulation in lacustrine rift basin: Constraints from mineralogical and multiple geochemical proxies[J]. International Journal of Earth Sciences, 2015, 104(2): 495-511.
- [16] Wang Z W, Wang J, Fu X G, et al. Geochemistry of the Upper Triassic black mudstones in the Qiangtang Basin, Tibet: Implications for paleoenvironment, provenance, and tectonic setting[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 160(3): 118-135.
- [17] Brumsack H J. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2006, 232(2-4): 344-361.
- [18] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. Science, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [19] Moradi A V, Sari A, Akkaya P. Geochemistry of the Miocene oil

- shale (Hançili Formation) in the Çankırı-Çorum Basin, Central Turkey: Implications for Paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance and tectonic setting[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 341(15): 289–303.
- [20] Ding J H, Zhang J C, Tang X, et al. Elemental geochemical evidence for depositional conditions and organic matter enrichment of black rock series strata in an inter-platform basin: The lower Carboniferous Datang formation, southern Guizhou, Southwest China [J]. *Minerals*, 2018, 8(11), 509.
- [21] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 微量元素分析在判断沉积介质环境中的应用[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 382–389.
Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: A case study of Lake Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 382–389.
- [22] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1984, 48 (12): 2469–2482.
- [23] 贺贻平, 陈振林, 张悦. 四川盆地周缘龙马溪组富有机质页岩地球化学差异性分析及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(5): 1014–1022.
He Yiping, Chen Zhenlin, Zhang Yue. The difference analysis and geological significance of geochemical characteristics of organic-rich shales from the Longmaxi Formation in the Periphery of Sichuan Basin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(5): 1014–1022.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwells, 1985.
- [25] 丰成友, 赵一鸣, 李大新. 内蒙古正蓝旗羊蹄子山-磨石山钛矿区硅质岩地球化学特征及沉积环境意义[J]. *矿床地质*, 2008, 27(4): 483–493.
Feng chengyou, Zhao Yiming, Li daxin. Geochemical characteristics of siliceous rocks in Yangtizishan-Moshishan anatase ore district, Zhenglanqi County, Inner Mongolia, with implications for sedimentary environment [J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27 (4): 483–493.
- [26] 夏鹏, 付勇, 杨镇, 等. 黔北镇远牛蹄塘组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系[J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 947–956.
Xia Peng, Fu Yong, Yang Zhen, et al. The relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation in the Niutitang black shale in Zhenyuan, northern Guizhou [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 947–956.
- [27] Hu T, Pang X Q, Jiang S, et al. Oil content evaluation of lacustrine organic-rich shale with strong heterogeneity: A case study of the Middle Permian Lucaoguo Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China [J]. *Fuel*, 2018, 221(3): 196–205.
- [28] Awan R S, Liu C L, Gong H W, et al. Paleo-sedimentary environment in relation to enrichment of organic matter of Early Cambrian black rocks of Niutitang Formation from Xiangxi area China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 112(2): 1–20.
- [29] 王鹏威, 陈筱, 刘忠宝, 等. 海相富有机质页岩储层压力预测方法——以涪陵页岩气田上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 467–476.
Wang Pengwei, Chen Xiao, Liu Zhongbao, et al. Reservoir pressure prediction for marine organic-rich shale: A case study of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale in Fuling shale gas field, NE Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 467–476.
- [30] 刘伟, 王振奇, 叶琳, 等. 渤中坳陷优质烃源岩有机质丰度下限标准[J]. *断块油气田*, 2020, 27(6): 725–728.
Liu Wei, Wang Zhenqi, Ye Lin, et al. Lower limit standard of organic matter abundance of high quality source rocks in Bozhong Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27 (6): 725–728.
- [31] 海连富, 王磊, 马治军, 等. 宁夏固原炭山地区中侏罗统延安组油页岩特征及其沉积环境[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(3): 747–756.
Hai Lianfu, Wang Lei, Ma Zhijun, et al. Oil shale characteristics and sedimentary environment of Yan'an Formation in Middle Jurassic in Tanshan Area, Guyuan, Ningxia [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(3): 747–756.
- [32] 丁江辉, 张金川, 石刚, 等. 皖南地区上二叠统大隆组页岩沉积环境与有机质富集机理[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 158–172.
Ding Jianghui, Zhang Jinchuan, Shi Gang, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanisms of the Upper Permian Dalong Formation shale, southern Anhui Province, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 158–172.
- [33] 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 931–948.
Qiu Zhen, Wei Hengye, Liu Hanlin, et al. Accumulation of sediments with extraordinary high organic matter content: Insight gained through geochemical characterization of indicative elements [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 931–948.
- [34] 郑国栋, 孟庆涛, 刘招君. 松辽盆地北部青一段油页岩地球化学特征及其记录的古湖泊学信息[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(2): 392–404.
Zheng Guodong, Meng Qingtao, Liu Zhaojun. Geochemical characteristics and Paleolimnological information of oil shale in 1st Member of Qingshankou Formation in Northern Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 392–404.
- [35] 梁新平, 金之钧, 刘全有, 等. 火山灰对富有机质页岩形成的影响——以西西伯利亚盆地中生界巴热诺夫组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 201–211.
Liang Xinping, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Impact of volcanic ash on the formation of organic-rich shale: A case study on the Mesozoic Bazhenov Formation, West Siberian Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 201–211.
- [36] 李浩, 王保华, 陆建林, 等. 东濮凹陷古近系页岩油富集地质条件与勘探前景[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(3): 33–41.
Li Hao, Wang Baohua, Lu Jianlin, et al. Geological characteristics and exploration prospects of Paleogene continental shale oil accumulation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45 (3): 33–41.
- [37] 柳蓉, 闫旭, 刘招君, 等. 银额盆地白垩统巴音戈壁组含油页岩系孢粉化石特征及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(2): 341–355.
Liu Rong, Yan Xu, Liu Zhaojun, et al. Characteristics and geological significance of palynological fossils from Bayingebi Formation of Lower Cretaceous in Yin'e Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 341–355.
- [38] 贾建亮, 刘招君, 孟庆涛, 等. 中国陆相油页岩含油率与总有机碳的响应机理[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(2): 368–377.
Jia Jianliang, Liu Zhaojun, Meng Qingtao, et al. Response mechanism between oil yield and total organic carbon of non-marine oil shale in China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 368–377.