

鄂尔多斯盆地下侏罗统富县组黑色页岩 地球化学特征及其地质意义*

黄文科¹ 陈 兰¹ 达雪娟¹ 朱章雄¹ 徐桂文¹
杨佩琳² 毛伟丞¹ 骆宇晗¹ 廖显娇¹

1 重庆科技大学地球科学系, 重庆 401331

2 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司纯梁采油厂, 山东滨州 256504

摘 要 鄂尔多斯盆地下侏罗统富县组是重要的油气产层之一, 该组沉积时的古环境和物源体系对盆地构造演化、古地理重建及成藏研究等具有重要意义。以神木地区五堂村剖面为研究对象, 通过详细的野外地质调查和露头测量, 采集了 30 个砂岩、泥岩和页岩样品, 进行主量、微量以及稀土元素地球化学分析, 旨在探讨鄂尔多斯盆地富县组沉积时期的古盐度、古气候以及古氧化还原条件等。研究表明: (1) 鄂尔多斯盆地富县组中, Li、Ni、Ga、Sr 含量分别为 2.65~38.60 $\mu\text{g/g}$ 、1.42~47.30 $\mu\text{g/g}$ 、0.72~33.90 $\mu\text{g/g}$ 和 12.70~204.00 $\mu\text{g/g}$, 上述元素含量及 Sr vs. Ba 和 Th/U vs. Sr/Ba 散点图均指示富县组沉积时古水体为淡水环境; (2) 古气候指数 C 值为 0.26~3.57, 大部分样品的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值小于 4, Sr/Cu 平均值为 14.5, Rb/Sr 和 Mg/Ca 值分别为 0.5~1.0 和 0.03~2.23, CIA 值在 68.55~96.87 之间, 以上指标表明该时期的古气候以温暖湿润为主; (3) $V/(V+Ni)$ 值为 0.4~1.0, Cu/Zn 值主要分布于 0.1~1.2 之间, Ce/La 值大多低于 2; δCe 为 0.71~1.00, 平均值为 0.9, 呈负异常; δEu 在 0.88~1.58 之间, 平均值为 1.23, 呈正异常; $V/(V+Ni)$ 、Cu/Zn、Ce/La 值交点基本落在贫氧-缺氧的沉积环境中。与区域同时代地层进行对比, 认为富县组富含有机质黑色页岩的沉积机制主要为: 由于 Karoo-Ferrar 大火成岩省 (KFLIP) 引起温度升高, 造成风化作用增加, 陆源营养物质输入增加, 引起区域性表层生物生产力增加, 湖泊底部缺氧, 从而形成该黑色页岩。以上研究成果进一步明确了物源体系在该区域的地球化学特征以及变化规律, 为鄂尔多斯盆地早侏罗世地质演化提供了理论依据。

关键词 元素地球化学 古环境 富县组 侏罗系 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 黄文科, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: 1090663312@qq.com。

通讯作者简介 陈兰, 女, 1975 年生, 教授, 主要从事黑色页岩与大洋缺氧事件研究。E-mail: cllc-10@163.com。达雪娟, 女, 1984 年生, 实验师, 主要从事沉积学和地球化学研究。E-mail: 2009072@cqust.edu.cn。

中图分类号: P595 文献标志码: A

Geochemistry of the Fuxian Formation black shales (Lower Jurassic) in Ordos Basin and its geological significance

HUANG Wenke¹ CHEN Lan¹ DA Xuejuan¹ ZHU Zhangxiong¹ XU Guiwen¹

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42272125, 42241203, 41572095) 以及中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室开放基金 (编号: 202512, 202409, 202215) 共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272125, 42241203, 41572095) and Opening Foundations of the State Key Laboratories of Critical Mineral Research and Exploration, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (Nos. 202512, 202409, 202215)]

收稿日期: 2025-09-15 改回日期: 2026-08-14

YANG Peilin² MAO Weicheng¹ LUO Yuhan¹ LIAO Xianjiao¹¹ Department of Earth Sciences, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China² Chunliang Oil Production Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Shandong Binzhou 256504, China

Abstract The Lower Jurassic Fuxian Formation in the Ordos Basin represents an important stratigraphic unit for oil and gas reservoirs. Palaeoenvironmental conditions and provenance systems are of great significances to tectonic evolution, palaeogeographic reconstruction, and hydrocarbon accumulation; however, these aspects have received relatively limited attention in previous studies. Therefore, this study focuses on the Wutangcun section in the Shenmu area. Based on detailed field geological investigations, 30 samples of sandstone, mudstone, and shale were collected for major, trace, and rare earth element geochemical analyses. The primary objective is to discuss the palaeosalinity, palaeoclimate, and redox conditions. The results indicate the following: (1) Concentrations of elements such as Li (2.65–38.6 $\mu\text{g/g}$), Ni (1.42–47.3 $\mu\text{g/g}$), Ga (0.72–33.9 $\mu\text{g/g}$), and Sr (12.7–204 $\mu\text{g/g}$), as well as elemental ratios including Sr/Ba, Th/U and Rb/K₂O, suggest that the black shales of the Fuxian Formation were deposited under freshwater conditions. (2) The palaeoclimate was predominantly warm and humid, with possible short-term seasonal aridity according to the C value (0.26–3.57), elemental ratios including SiO₂/Al₂O₃ (most samples < 4), Sr/Cu (mean ratios of 14.5), Rb/Sr (0.5–1), Mg/Ca (0.03–2.23), and the Chemical Index of Alteration (CIA) (68.55–96.87). (3) Values of V/(V+Ni) (0.4–1), Cu/Zn (0.1–1.2), Ce/La (< 2), δCe (0.71–1), and δEu (0.88–1.58) indicate the suboxic to anoxic depositional environment in the study area. According to the above-mentioned results and comparison of Toarcian strata, the mechanism of Fuxian Formation black shales is that KFLIP-triggered climatic warming led to unusually increasing weathering and nutrients, then higher primary production, finally anoxic environments of lacustrine system. The research results further clarify the geochemical characteristics and variation patterns of the provenance system in this region, providing a theoretical basis for the Early Jurassic geological evolution of the Ordos Basin.

Key words elemental geochemistry, palaeoenvironment, Fuxian Formation, Jurassic, Ordos Basin

About the first author HUANG Wenke, born in 2000, master's degree candidate, is mainly engaged in research on geological engineering. E-mail: 1090663312@qq.com.

About the corresponding authors CHEN Lan, born in 1975, professor, is mainly engaged in researches on black shales and oceanic anoxic events. E-mail: clc-10@163.com. DA Xuejuan, born in 1984, experimentalist, is engaged in researches on sedimentology and geochemistry. E-mail: 2009072@cqust.edu.cn.

0 引言

鄂尔多斯盆地是中国油气勘探的重要盆地之一,其中三叠系和侏罗系是油气勘探开发的重点层系(赵俊兴等,1999;时志强等,2001;张云望等,2023),而侏罗系富县组记录了早侏罗世古气候、古环境等信息,为研究华北克拉通中生代环境转型和深化盆地地质演化提供了重要依据(赵俊兴等,1999;李昌昊等,2022)。富县组主要出露于陕西府谷至富县一带,岩性为黄绿色砂岩和泥岩

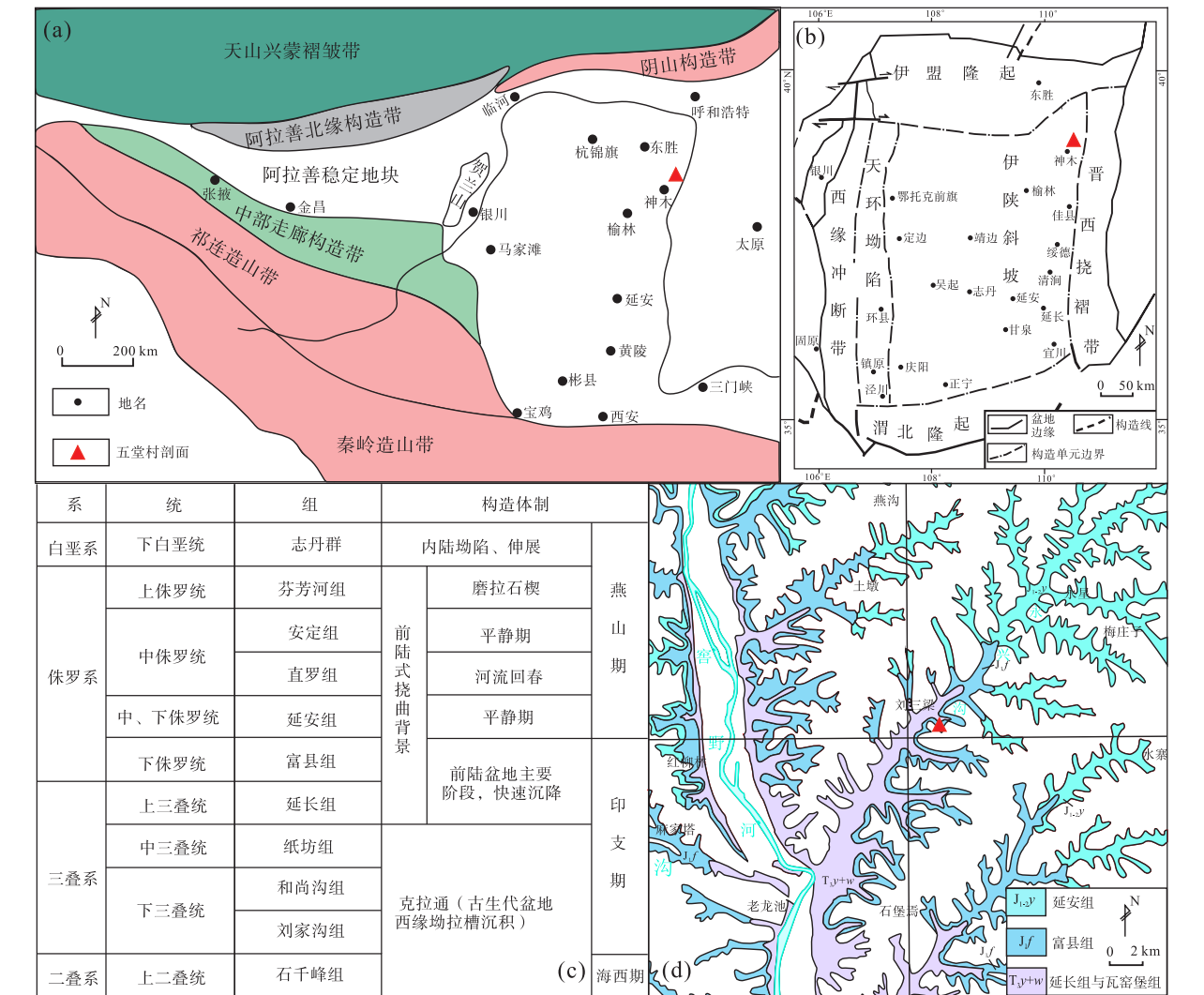
互层,夹黑色页岩、油页岩(时志强等,2001)。该组地层厚度变化大,自西向东逐渐变薄,直至尖灭,与下伏上三叠统呈平行不整合接触(赵俊兴等,1999),其沉积环境以湖滩相、浅湖相和深湖相为主(赵俊兴等,1999)。根据岩性特征,划分为“黑富县”、“白富县”、“红富县”以及“杂富县”,古气候由干旱转变为湿润(李昌昊等,2022)。另外, Sr/Ba、Sr/Cu、Rb/Sr、WIP 等指标指示富县组沉积时期气候以温暖湿润为主,伴有

强烈的化学风化作用（李滨兵，2023）。物质来源、源区构造背景等判别指标显示富县组物源来自阴山造山带（张云望等，2023）。一些学者通过孢粉组合、碳、氮以及硫元素循环扰动和菱铁矿成因等研究，证实了榆林安崖剖面早侏罗世托阿尔期发生了大洋缺氧事件（Toarcian Oceanic Anoxic Event, T-OAE）（Jin *et al.*, 2022；李滨兵，2023）。然而，上述研究多集中在榆林安崖剖面，神木一带富县组研究较少。因此，本研究在详细的野外勘测基础之上，以神木地区五堂村剖面为例，根据元素地球化学含量及特征比值分析了该剖面富县组沉积时水体的古盐度和古氧化还原条件以及该时期的古气候，进一步明确了物源体系在该区域的地球化学特征以

及变化规律，为鄂尔多斯盆地侏罗统地质演化提供了理论依据。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地，位于华北克拉通西部，北侧为大青山—阴山造山带，南侧为北祁连—秦岭造山带之间，西临阿拉善北缘构造带和中部走廊构造带（刘池洋等，2021）（图 1-a）。根据构造形态，将鄂尔多斯盆地划分为伊盟隆起、伊陕斜坡、渭北隆起、天环坳陷、晋西挠褶带及西缘冲断带共 6 个一级构造单元（张之辉，2020）（图 1-b）。该盆地内沉积地层发育



a—鄂尔多斯盆地构造图（据刘池洋等，2005；张云望等，2023；有修改）；b—鄂尔多斯盆地构造单元划分图（据韩文学等，2018；有修改）；c—神木地区地层发育简表（据张之辉，2020；张云望等，2023；有修改）；d—五堂村剖面位置图（据 1:20 万神木幅修改）

图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及剖面位置

Fig. 1 Division of tectonic units of Ordos Basin and section location

齐全,尤其是侏罗系自下而上可划分为下侏罗统富县组 (J_1f)、中下侏罗统为延安组 ($J_{1-2}y$)、中侏罗统直罗组 (J_2z) 和安定组 (J_2a)、上侏罗统为芬芳河组 (J_3f) (张云望等, 2023) (图 1-c)。在富县组沉积期,地势整体表现为“西高东缓中陷”的特征 (赵俊兴等, 1999; 李昌昊等, 2022), 具有河谷、斜坡、阶地、高地和河间丘等多种古地貌形态 (时志强等, 2001)。富县组岩性特征变化大,前人根据碎屑岩颗粒大小和颜色,划分为“粗富县”、“细富县”和“黑富县”、“红富县”、“杂富县” (陈兰等, 2025)。高选政 (1996)、李元昊等 (2020) 认为富县组以辫状河沉积为主,发育河流—浅湖相、冲积扇—河流相及三角洲相。根据古植物孢粉组合,邓胜徽等 (2015) 认为该组对应时代为托阿尔期,且有机碳同位素的明显负偏移,表明 T-OAE 事件在鄂尔多斯盆地具有响应 (Jin *et al.*, 2020)。

五堂村剖面 ($N 38^{\circ}56'25''$, $E 110^{\circ}34'8''$) 位于鄂尔多斯盆地神木市东北部,交通便利,露头完整 (图 1-d)。该剖面自下而上可分为 10 层,真厚度为 13.15 m,主要由砂岩和泥岩组成,并含有少量植物化石碎片 (图 2)。底部 (第 0 层) 为青灰色长石石英砂岩,1-5 层为颗粒较细的泥岩和粉砂岩,之上 (6-8 层) 岩石颗粒变粗,颜色逐渐加深,厚度逐渐变小,为黄绿色、灰白色、褐灰色中—粗砂岩,间夹灰白色泥页岩,可见板状交错层理。相比之下,顶部 (第 9 层) 岩性变化较大,自下而上为黄绿色粉砂质页岩、黑色页岩、褐灰色细—中砂岩、黄绿色粉砂质页岩、粉砂岩、细砂岩以及深灰色—灰黑色页岩。

2 样品采集及实验方法

本研究开展了详细的野外地质调查,对五堂村经典剖面进行了实测,并采集了 30 件样品,岩性主要为砂岩、泥岩和页岩 (图 2)。所有样品的主量、微量以及稀土元素测试均在中国科学院地球化学研究所完成。样品前处理过程为:先将岩石样品用清水冲洗、烘干,之后用陶瓷研钵初步研磨后去除样品中的粗碎屑颗粒,再将其中的泥质岩用玛瑙研钵破碎,最后用标准分样筛过筛后保留小于 200 目的样品。主量元素采用 X 衍射荧光光谱 (XRF) 分析,仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 ARL

Perform'X 4200 型 X 射线荧光光谱仪,分析数据均通过国际标样 (GSR) 和重复样的质量监控得到保障,分析精度优于 5%。微量和稀土元素采用 ICP-MS 仪器 (电感耦合等离子体质谱仪,德国耶拿分析仪器股份公司 Plasma Quant-MS Elite) 和标样 (OU、AGV 和 GBPG) 进行测试,重复性测试相对标准偏差 (Relative Standard Deviation, RSD) 优于 10%。

3 结果

3.1 主量元素

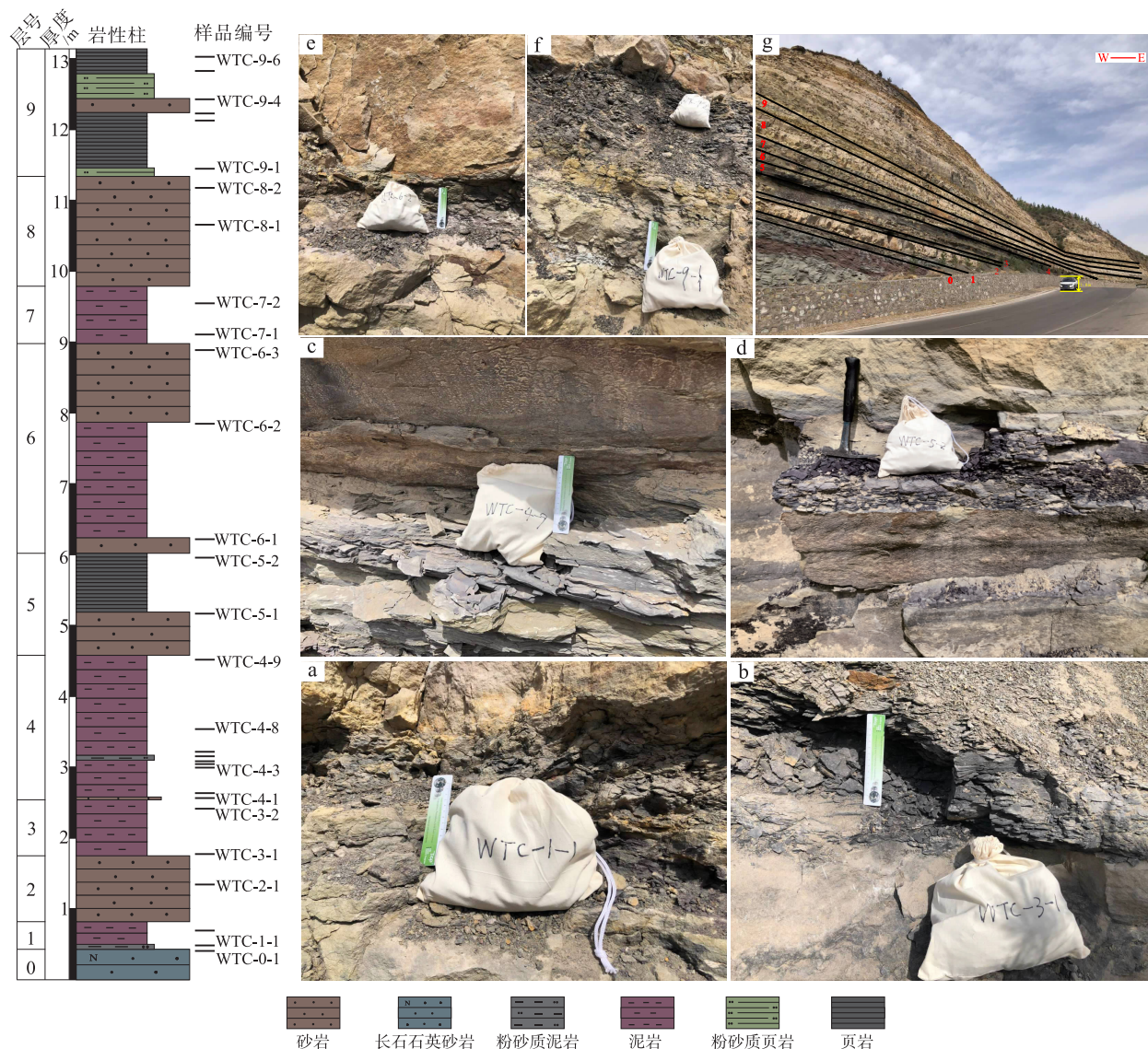
研究区所有样品的主量元素以 SiO_2 、 Al_2O_3 以及 Fe_2O_3 为主,其中 SiO_2 的含量最高,为 52.42% ~ 98.61%,平均值为 64.07%; Al_2O_3 含量变化较大,为 0.41% ~ 28.56%,平均值为 19.22%, Fe_2O_3 含量介于 0.55% ~ 14.25% 之间。 K_2O 和 CaO 含量相对较高,其中 K_2O 含量为 0.02% ~ 3.29%,平均值为 2.04%; CaO 含量在 0.09% ~ 12.09% 之间,平均值为 1.05%。其余 MgO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 、 TiO_2 等氧化物含量均低于 2%。 Mg/Ca 值为 0.03 ~ 2.23,平均值为 1.09。 SiO_2/Al_2O_3 值除样品 WTC-8-1 为 240.51 以外,其余样品均分布在 1.89 ~ 14.97 之间。化学蚀变指数 CIA (Chemical Index of Alteration) 值均大于 60,成分变异指数 ICV (Index of Compositional Variability) 值大部分低于 1 (附表 1)。

3.2 微量元素

研究区富县组砂岩、泥岩和页岩样品微量元素含量及特征比值如附表 2。 Cu 、 Zn 、 Sr 、 Th 、 U 含量分别为 3.25 ~ 19.20 $\mu g/g$ 、4.06 ~ 69.10 $\mu g/g$ 、12.7 ~ 204.0 $\mu g/g$ 、3.01 ~ 17.10 $\mu g/g$ 和 0.77 ~ 4.45 $\mu g/g$,其含量均低于上地壳平均丰度。然而, Li 、 V 、 Cr 、 Ga 含量高于上地壳平均丰度,分别为 2.65 ~ 38.60 $\mu g/g$ 、13.3 ~ 156.0 $\mu g/g$ 、5.55 ~ 101.00 $\mu g/g$ 以及 0.72 ~ 33.90 $\mu g/g$ 。 Sc 、 Co 、 Ni 、 Rb 、 Ba 、 Hf 等元素含量无明显变化。 Sr/Cu 值变化范围较大,为 1.90 ~ 34.15。 Sr/Ba 、 Rb/Sr 、 Cu/Zn 和 $V/(V+Ni)$ 平均值均低于 1。

3.3 稀土元素

附表 3 显示了研究区所有样品的稀土元素含量和特征比值。轻稀土元素 (LREE) 含量为 14.57



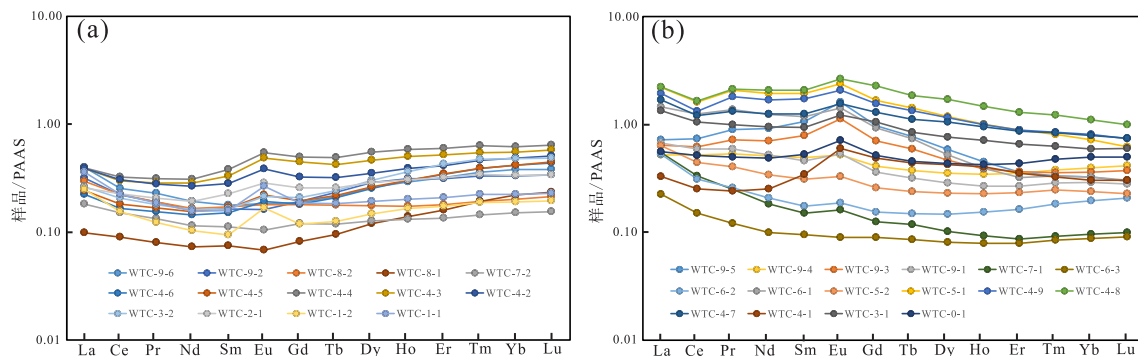
a—真厚度 0.43~0.50 m 段，样品 WTC-1-1 为灰黑色薄层状粉砂质泥岩；b—真厚度 1.75~1.79 m 段，样品 WTC-3-1 为灰黑色泥岩；c—真厚度 3.56~4.54 m 段，样品 WTC-4-9 为深灰色泥岩；d—真厚度 5.19~5.98 m 段，样品 WTC-5-2 为紫红色页岩；e—真厚度 6.24~7.87 m 段，样品 WTC-6-2 为中部紫红色泥岩；f—真厚度 11.35~11.47 m 段，样品 WTC-9-1 为黄绿色粉砂质页岩；g—剖面全景

图 2 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组岩性柱状图及露头特征

Fig. 2 Lithological column and photographs illustrating outcrop characteristics of the Fuxian Formation in Wutangcun section, Ordos Basin

~319.66 $\mu\text{g/g}$ ，平均值为 93.98 $\mu\text{g/g}$ ；重稀土元素（HREE）含量为 1.48~29.33 $\mu\text{g/g}$ ，平均值为 7.98 $\mu\text{g/g}$ 。总稀土元素（ ΣREE ）含量变化较大，为 16.9~348.99 $\mu\text{g/g}$ ，平均值为 101.96 $\mu\text{g/g}$ ，低于 PAAS（Post-Archean Australian Average Shale，后太古代澳大利亚平均页岩）标准值。而轻、重稀土元素比值（ $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ ）介于 5.77~30.84 之间，平均值为 11.93，高于 PAAS 标准值。经 PAAS（McLennan, 2001）标准化后稀土元素配

分模式见图 3，具有轻微左倾（图 3-a）以及右倾趋势（图 3-b）。 δCe 的值均小于 1，表现为负异常； δEu 值介于 0.88~1.58 之间，平均值为 1.23，具有正异常特征。（ La/Yb ）_{SN}、（ La/Sm ）_{SN} 和（ Gd/Yb ）_{SN} 能反映轻、重稀土元素之间的分馏程度（Taylor and McLennan, 1985），其比值分别为 0.44~5.63、0.68~3.64 和 0.36~2.98，平均值分别为 1.75、1.58 以及 1.19。



a—稀土元素 PAAS 标准化后曲线呈左倾型；b—稀土元素 PAAS 标准化后曲线呈右倾型

图 3 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组稀土元素 PAAS 标准化后配分模式

Fig. 3 PAAS-Normalized REE distribution pattern diagram of the Fuxian Formation in Wutangcun section, Ordos Basin

4 讨论

4.1 古盐度

古盐度是指示地质历史时期环境变化的一个重要标志，不仅揭示水体盐度变化，还反映区域气候干湿变化 (Fritz, 1996; SolotChina *et al.*, 2014; 田景春和张翔, 2016)。一般来说，Li、Ni、Ga、Sr 的含量以及 Sr/Ba、Th/U、Rb/K₂O 等特征比值对沉积环境的盐度有较明显的控制作用，常作为古盐度判别指标 (郑荣才和柳梅青, 1999; 王峰等, 2017; 常海亮等, 2022; 范萌萌等, 2023) (表 1)。

在盐水沉积环境下，Li 和 Ni 含量分别高于 150 μg/g 和 40 μg/g，Ga 含量低于 8 μg/g，Sr 含量介于 800~1000 μg/g 之间；而在淡水沉积环境下，Li 含量低于 90 μg/g，Ni 含量介于 20~25 μg/g，Ga 含量高于 17 μg/g，Sr 含量介于 100~500 μg/g (王峰等, 2017; 常海亮等, 2022) (表 1)。富县组所有样品 Li、Ni、Ga 和 Sr 含量分别为 2.65~38.60 μg/g、1.42~47.30 μg/g、0.72~33.90 μg/g 和 12.7~204.0 μg/g，平均值分别为 23.66 μg/g、17.86 μg/g、20.92 μg/g 和 115.47 μg/g，均指示了淡水环境 (附表 2; 表 1)。

此外，当 Sr/Ba<0.6、Th/U>7、Rb/K₂O<4 时，为淡水沉积；Sr/Ba 值为 0.6~1.0、Th/U 值为 2~7、Rb/K₂O 值为 4~6 时，为半咸水—微咸水沉积；而海水沉积时，Sr/Ba>1.0、Th/U<2 以及 Rb/K₂O>6 (郑荣才和柳梅青, 1999; 范萌萌等, 2023) (表 1)。研究区所有样品 Sr/Ba 和 Rb/K₂O 值分别为 0.10~0.62 和 2.55~6.10，平均值分别

为 0.24 和 4.12，而 Th/U 值变化较大，为 1.31~11.24 (附表 2; 表 1)。Sr/Ba、Th/U 和 Rb/K₂O 值在剖面中部 (样品 WTC-4-8 到 WTC-7-2) 趋于平缓，而底部和顶部呈微弱幕式变化 (图 4)。

从富县组古盐度散点图 (图 5) 可以看出，Ba 含量多集中在 200~800 μg/g 之间，Sr/Ba 值大部分低于 0.4，Sr vs. Ba 和 Th/U vs. Sr/Ba 散点图均投点在淡水区域。以上研究表明，富县组沉积时的古水体条件为陆相淡水环境。

4.2 古气候

在不同气候条件下沉积物中主、微量元素呈现出不同程度的富集 (胡锋等, 2022)。其中，喜湿型元素主要有 Cr、Ni、Mn、Cu、Fe、Ba、Br、Co、Cs、Hf、Rb、Sc、Th 等，而喜干型元素主要为 Sr、Pb、Au、As、Ca、Na、Ta、U、Zn、Mg、Mo、B 等 (金明和李婉巍, 2003)。因此，可通过古气候指数 C (Cao *et al.*, 2012)、主量和微量元素特征比值 (SiO₂/Al₂O₃、Sr/Cu、Rb/Sr、Mg/Ca) (陈平等, 2020) 以及化学蚀变指数 (CIA) (Nesbitt and Young, 1982) 等对古气候进行研究。

研究表明，古气候指数 C<0.2 为干旱环境，0.2≤C<0.6 为半干旱—半潮湿环境，C≥0.6 为潮湿环境 (Cao *et al.*, 2012)。研究区古气候指数 C 值在 0.26~3.57 之间，平均值为 1.57，整体处于潮湿环境 (附表 2)。

通常 SiO₂/Al₂O₃>4 或 Sr/Cu>10 时，指示干燥炎热气候。反之，当 SiO₂/Al₂O₃<4 或 Sr/Cu<10 时，为温湿气候 (陈平等, 2020)。Rb/Sr 高值为

表 1 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组古盐度判别指标
Table 1 Discriminant indicators of palaeosalinity of the Fuxian Formation at Wutangcun section, Ordos Basin

指标	判别标准及资料来源			样品测试结果	
	值域	古盐度	资料来源	测试平均值	水体盐度类型
Li	< 90 μg/g	淡水	王峰等,2017	23.66 μg/g	淡水
	90~150 μg/g	淡水—微咸水			
	> 150 μg/g	盐水			
Ni	20~25 μg/g	淡水	王峰等,2017	17.86 μg/g	淡水
	25~40 μg/g	淡水—微咸水			
	> 40 μg/g	盐水			
Ga	> 17 μg/g	淡水	常海亮等,2022	20.92 μg/g	淡水
	8~17 μg/g	淡水—微咸水			
	< 8 μg/g	盐水			
Sr	100~500 μg/g	淡水	王峰等,2017	115.47 μg/g	淡水
	500~800 μg/g	淡水—微咸水			
	800~1000 μg/g	盐水			
Sr/ Ba	< 0.6	淡水	郑荣才和柳梅青,1999	0.24	淡水
	0.6~1	半咸水			
	> 1	盐水			
Th/ U	> 7	淡水	范萌萌等,2023	6.09	微咸水
	2~7	微咸水—半咸水			
	< 2	盐水			
Rb/ K ₂ O	< 4	淡水	范萌萌等,2023	4.12	微咸水
	4~6	微咸水			
	> 6	盐水			

温湿气候，而低值则为干旱气候（马大钧等，2024）。相反，Mg/Ca 高值代表气温升高，干旱、炎热、少雨气候；低值代表气温降低，温暖、湿润、多雨气候（范萌萌等，2019）。五堂村剖面 SiO₂/Al₂O₃ 值介于 1.89~14.97 之间，大部分样品比值低于 4（附表 1）。在样品 WTC-0-1 与 WTC-7-2 之间，WTC-2-1 和 WTC-4-1 该值突增，其余样品值较低，之上出现先增后减的幕式变化（图 4）。Sr/Cu 平均值为 14.50，剖面底部波动较大，从样品 WTC-4-7 到 WTC-5-1 趋于平缓，在中部 WTC-6-1 处达到最大值 34.15，逐渐降低至 WTC-8-1 处的最小值（1.9），剖面顶部具有先增长随后衰减的幕式演化特征（图 4）。Rb/Sr 值多介于 0.5~1.0 之间，平均值为 0.71；Mg/Ca 值分布在 0.03~2.23 区间，平均值为 1.09（附表 1）。Rb/Sr 最大值在剖面顶部，而 Mg/Ca 最大值在样品 WTC-4-8 处，最小值均位于 WTC-8-1 处，且曲线变化趋势基本一致（图 4）。元素比值变化趋势反

映出研究区相对湿润并伴随有波动的气候特征，表明样品沉积时期湿润气候和半干旱气候交替出现，但整体偏湿润。

化学风化指数 CIA 值与风化程度呈正比：当 CIA 值介于 50~65 之间时反映的是较低的化学风化程度，指示寒冷干燥的古气候；介于 65~85 之间时，化学风化程度低，显示温湿的古气候；介于 85~100 之间时，化学风化程度高，为湿热的古气候（Nesbitt and Young, 1982）。研究区 CIA 值为 68.55~96.87，平均值为 88.02。CIA 值在 WTC-2-1 处为最小值，在 WTC-4-1 到 WTC-4-9 处值略微降低，从 WTC-5-2 处开始增大，到 WTC-7-2 处达到最大值（附表 1；图 4）。整体而言，研究区富县组 CIA 值高于 85，为湿热气候。

砂岩与泥页岩因粒径、矿物组成及沉积水动力条件差异，古气候指标响应存在差异，因此，本研究将砂岩、泥页岩样品分别讨论其古气候特征。Al₂O₃ vs. SiO₂ 散点图中（图 6-a），研究区砂岩样

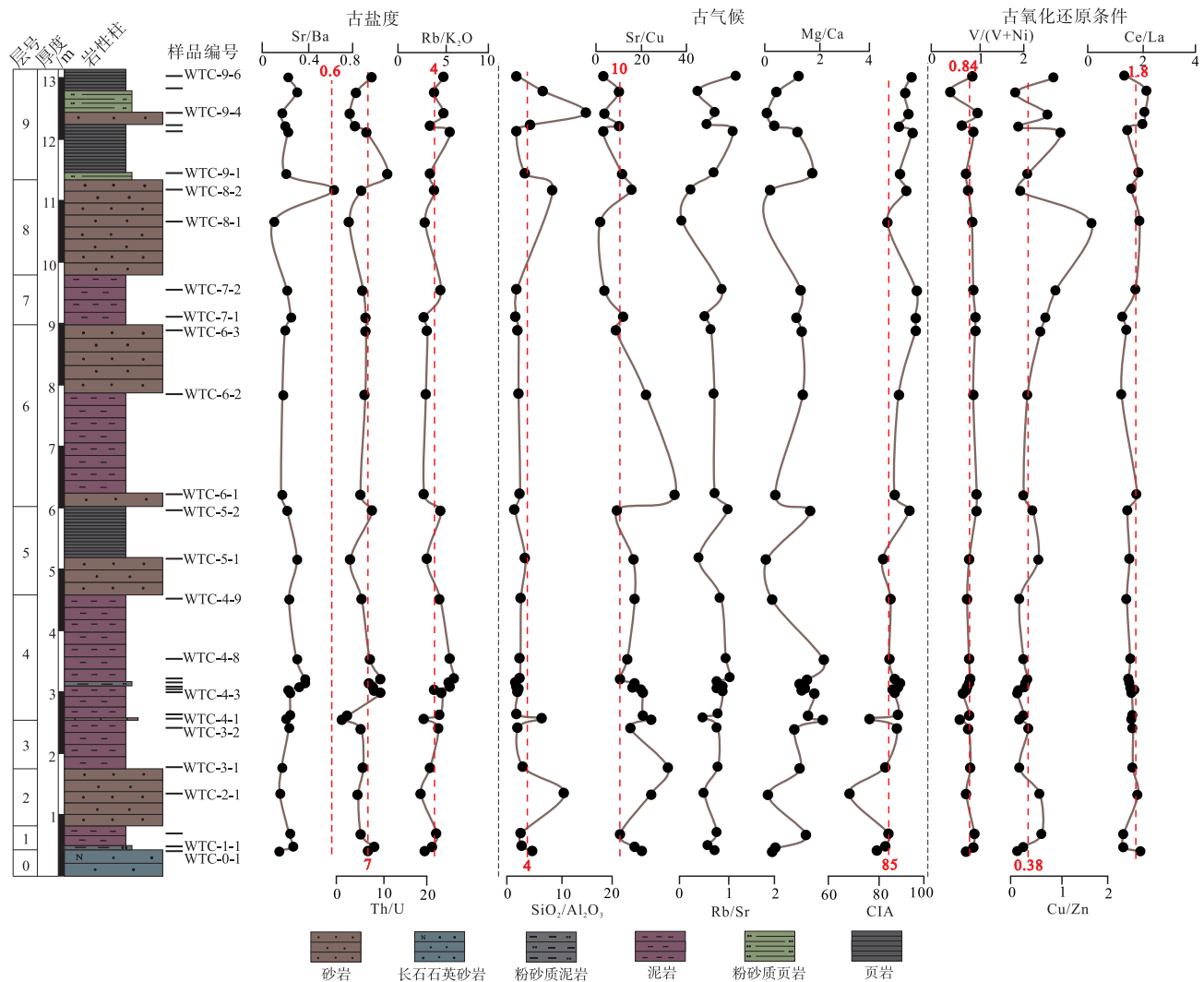
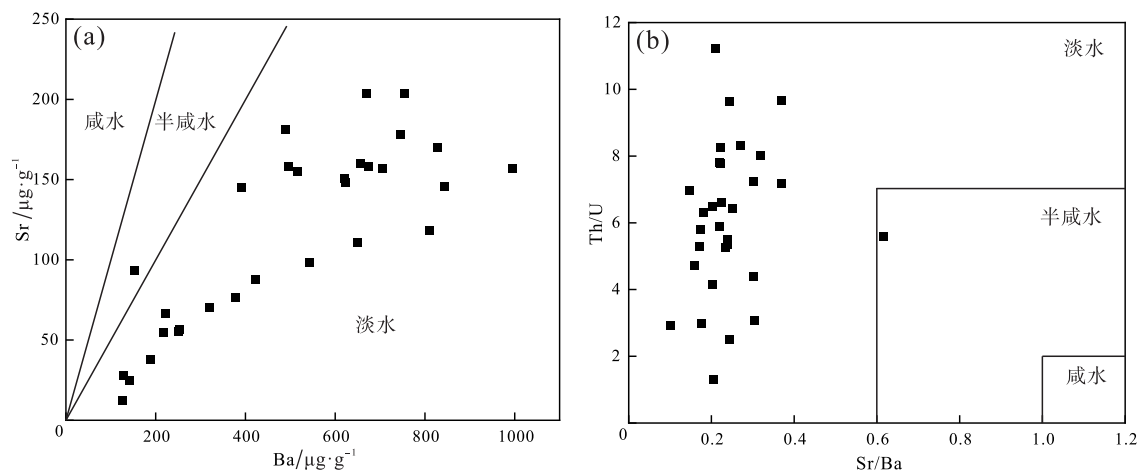


图 4 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组元素特征比值变化曲线

Fig. 4 Curves of element characteristic ratios of the Fuxian Formation in Wutangcun section, Ordos Basin



a—Sr vs. Ba 散点图 (底图据 McManus *et al.*, 1998); b—Th/U vs. Sr/Ba 散点图 (底图据 Tribouillard *et al.*, 2006)

图 5 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组古盐度散点图

Fig. 5 Scatter plots of palaeosalinity of the Fuxian Formation in Wutangcun section, Ordos Basin

品因水动力较强, SiO_2 含量较高, 绝大多数样品位于干燥区域。相反, 泥页岩样品 Al_2O_3 含量更高, 几乎所有样品位于湿润区域(图 6-a)。另外, 在 CIA vs. C 散点图(图 6-b)上显示几乎所有样品均位于湿润区域, 表明研究区富县组主要为温暖湿润气候。研究区 Sr/Cu、Rb/Sr 等比值具有幕式波动特征(图 4), 指示了沉积期存在轻微干湿交替, 但 CIA 值整体高且稳定(平均值 88.02, 附表 1)、气候指数 C 多大于 0.6 (附表 2)。综上所述, 五堂村剖面古气候条件为温暖湿润, 存在短期气候波动, 这与榆林安崖剖面孢粉指示的古气候条件相一致(邓胜徽等, 2017)。

4.3 古氧化还原条件

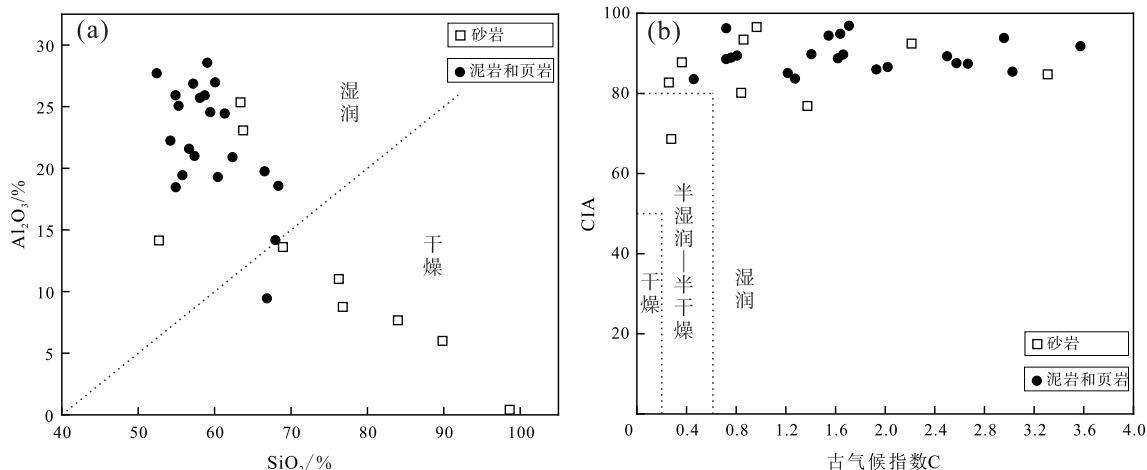
氧化—还原敏感元素 V、Cr、Ni、Co、Cu、Zn、Mo、Cd、U 等含量和特征比值 $V/(V+Ni)$ 、 Cu/Zn 以及 Ce/La 、 δCe 和 δEu 可以反映水体的古氧化还原条件(Taylor and McLennan, 1985; Jones and Manning, 1994)。

当沉积水体还原性越强时, V 元素迁移能力降低, 但相对于 Ni、Cu、Zn 元素来说容易吸附沉降, $V/(V+Ni)$ 和 Cu/Zn 值越高(郭艳琴等, 2016; 王峰等, 2017; 安亚运等, 2021)。一般来说, $V/(V+Ni)$ 值大于 0.84 为还原环境, 小于 0.60 为氧化环境, 介于二者之间为贫氧环境(Dill *et al.*, 1988; Tribouillard *et al.*, 2006)。 $\text{Cu}/\text{Zn} > 0.63$ 为氧化环境, 0.50~0.63 之间为弱氧化环境, 0.38~0.50 区间为弱还原—弱氧化环境,

<0.38 则为还原环境(郭艳琴等, 2016)。研究区 $V/(V+Ni)$ 和 Cu/Zn 的平均值分别为 0.81 和 0.44 (附表 2), 其中 $V/(V+Ni)$ 值较为稳定, 尤其在剖面中下部变化较小, 在顶部 WTC-9-1 之上波动较为明显, 在 12.45 m 处达到最高值 0.97 以及 12.8 m 处达到最低值 0.41 (图 4), 而 Cu/Zn 值整体波动较大, 仅 WTC-3-2 到 WTC-4-9 段变化不大, 最大值和最小值分别在 WTC-8-1 和 WTC-9-5 处, 分别为 1.65 和 0.10 (附表 2; 图 4)。

Ce 和 Eu 为变价元素, 可以随沉积环境而改变, 在强酸、还原条件下沉积物中 Eu 富集, 在碱性、氧化环境中沉积物 Eu 亏损(刘安等, 2013)。与 Eu 相反, Ce 在还原条件下沉积物表现为 Ce 亏损, 在氧化环境中呈正异常或无明显的负异常(杨兴莲等, 2008)。此外, $\text{Ce}/\text{La} < 1.5$ 为富氧环境, 1.5~1.8 之间为贫氧环境, $\text{Ce}/\text{La} > 1.8$ 为厌氧环境(张琴等, 2018)。研究区所有样品 δCe 呈负异常, 为 0.71~1.00, 平均值为 0.9; δEu 呈正异常, 为 0.88~1.58, 平均值为 1.23 (附表 3)。 Ce/La 值为 1.23~2.14, 平均值为 1.62, 最大值和最小值分别在 WTC-9-5 和 WTC-6-2 处, 剖面底部 WTC-0-1 到 WTC-2-1 处该值减小, 中部 WTC-2-1 到 WTC-7-1 处相对稳定, 顶部呈现增大趋势(图 4)。

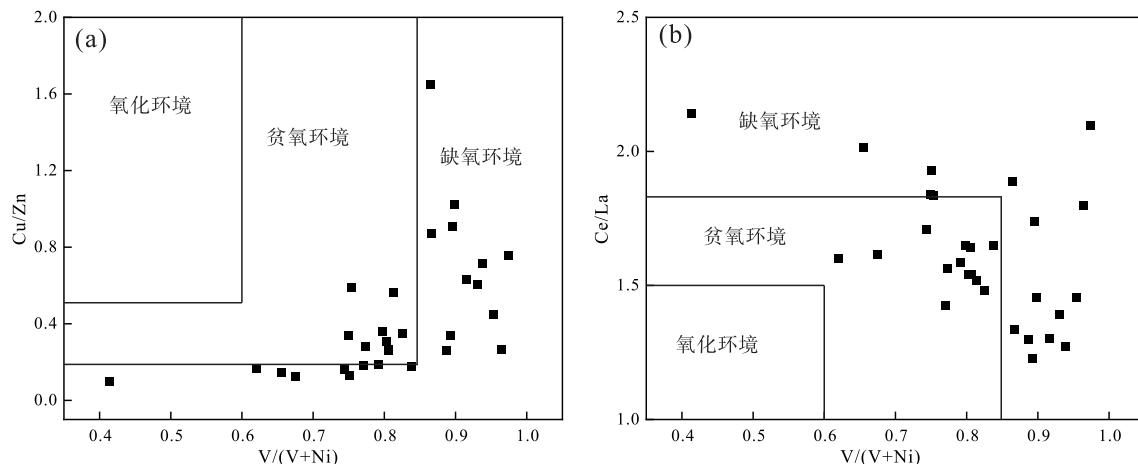
$V/(V+Ni)$ 值为 0.4~1.0, Cu/Zn 值主要分布于 0.1~1.2 之间, Ce/La 值大多低于 2。 $V/(V+Ni)$ 、 Cu/Zn 、 Ce/La 值交点基本落在贫氧—缺氧的沉积环境中(图 7)。



a— Al_2O_3 vs. SiO_2 散点图(底图据 Nesbitt and Young, 1982); b—CIA vs. C 散点图(底图据 Fedo *et al.*, 1995)

图 6 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组古气候指标散点图

Fig. 6 Scatter plots of palaeoclimatic proxy indicators of the Fuxian Formation in Wutangcun section, Ordos Basin



a—Cu/Zn vs. V/(V+Ni) 散点图 (底图据 Tribouillard *et al.*, 2006); b—Ce/La vs. V/(V+Ni) 散点图 (底图据 Sahoo *et al.*, 2016)

图 7 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组氧化还原指标散点图

Fig. 7 Scatter plots of redox indicators of the Fuxian Formation in Wutangcun section, Ordos Basin

4.4 沉积机制

根据大量叶肢介、介形虫、双壳类、植物、孢粉等化石以及少量的 Re-Os、U-Pb 等同位素定年,认为下侏罗统 Toarcian 阶对应着鄂尔多斯盆地富县组 (J_1f)、柴达木盆地饮马沟组 (J_1ymg)、塔里木盆地阳霞组 (J_1yx)、准噶尔盆地三工河组 (J_1s)、四川盆地自流井组 (J_1z)、辽宁金羊盆地北票组 (J_1b) 以及田师傅盆地长梁子组 (J_1c) (陈兰等, 2025)。四川盆地 3 口井 (X1-X3) 样品的岩石学和地球化学特征显示,在 T-OAE 期间四川盆地的岩相特征、沉积过程以及古环境变化主要受到湖平面的控制 (Cui *et al.*, 2023)。另外,一些学者从 T-OAE 角度探讨大安寨黑色岩系有机质富集机制,认为该套黑色岩系主要沉积在贫氧的氧化还原条件下,受控于初级生产率提高以及含氧量减少的保存条件 (Liu *et al.*, 2020a)。塔里木盆地北缘库车河地区 2 个剖面主要沉积环境为缺氧环境,而且 Karoo-Ferrar 大火成岩省 (KFLIP) 活动可能是早侏罗世环境变化的重要触发因素之一 (邱若原等, 2023)。柴达木盆地大煤沟剖面饮马沟组 Toarcian 期化学风化作用强烈,在温暖干旱的气候条件下,煤沉积中断而出现红层以及蒸发岩沉积,陆生植物急剧减少,这种气候事件可能与季风循环增强有关,从而引起聚煤作用减弱 (Lu *et al.*, 2020)。辽宁金羊盆地北票组黑色页岩并不是在水柱含氧量降低的条件下形成的,而是气候变暖、水循环增加、

陆源 (河流来源) 有机质输入增加,引起区域性的生物生产力增加,从而导致研究区发育大量富含有机质的黑色页岩沉积 (Liu *et al.*, 2020b),而田师傅盆地长梁子组发育黑色泥岩、页岩、灰绿色/棕褐色粉砂质泥岩、粉砂岩、砂岩,沉积环境为河流—滨湖—沼泽相,孢粉显示 T-OAE 期间气候以热—半湿润为主,伴有温暖—中等湿润气候 (Zhang *et al.*, 2021)。对比上述黑色页岩形成时的沉积环境和气候条件,推测鄂尔多斯盆地富县组黑色岩系沉积在贫氧—缺氧环境下,主要是由于 Karoo-Ferrar 大火成岩省 (KFLIP) 释放 CO_2 导致温度升高,温室效应使得风化作用增加,进一步引起陆上来源的营养物质输入如 N、P 等增加,造成初级生物生产力增加,且湖泊底部处于缺氧环境,从而有利于大量富含有机质的黑色页岩形成 (图 8)。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地富县组 Li、Ni、Sr 含量较低,而 Ga 含量较高,结合 Sr/Ba、Th/U、Rb/ K_2O 等比值,认为富县组沉积时期的水体为淡水环境。

2) 根据 “C” 和 CIA 值以及 SiO_2/Al_2O_3 、Rb/Sr、Sr/Cu、Mg/Ca 等比值,推测富县组沉积时气候湿润,但存在阶段性干湿波动。

3) V/(V+Ni)、Cu/Zn、Ce/La 值以及 δCe 负异常和 δEu 正异常等特征,表明富县组沉积时

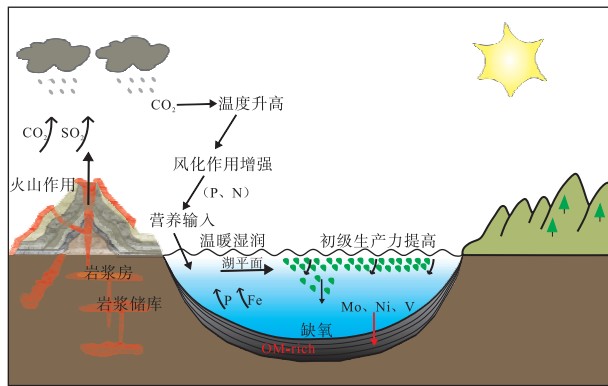


图 8 鄂尔多斯盆地五堂村剖面富县组沉积模式
Fig. 8 Sedimentary model of the Fuxian Formation
in Wutangcun section, Ordos Basin

期水体为贫氧-缺氧环境。

4) 由于 Karoo-Ferrar 大火成岩省释放 CO_2 导致温度升高, 造成风化作用加强和陆源营养物质输入增加, 引起初级生物生产力增加, 使得湖泊底部处于缺氧条件, 从而有利于鄂尔多斯盆地富县组发育大量富含有机质的黑色页岩沉积。

致谢 非常感谢重庆科技大学王茂成副教授参加野外地质调查工作、中国地质科学院季长军研究员以及中国科学院地球化学研究所柏中杰研究员对地球化学实验的大力支持和帮助。感谢审稿专家提出的宝贵意见!

附件: 本文附件(附表 1 至附表 3)详见古地理学报官网 (www.gdxb.cn) 和中国知网 (www.cnki.net)。

参考文献 (References)

- 安亚运, 杨忠琴, 向坤鹏, 黄艺, 陈厚国, 贺永忠, 刘伟, 余谦. 2021. 黔北地区奥陶纪-志留纪之交黑色页岩地球化学特征及意义: 以贵州道真道真 1 井为例. 地质论评, 67(4): 1105-1118. [An Y Y, Yang Z Q, Xiang K P, Huang Y, Chen H G, He Y Z, Liu W, Yu Q. 2021. The geochemical characteristics and significance of the Ordovician-Silurian black shale in northern Guizhou: a case study of the Well Daoye-1 in Daozhen County. Geological Review, 67(4): 1105-1118]
- 常海亮, 张宏伟, 杜春彦, 祝朝辉, 段超, 侯雪刚. 2022. 鹿邑凹陷太原组-山西组泥岩元素地球化学特征及对沉积环境的指示. 科学技术与工程, 22(25): 10845-10856. [Chang H L, Zhang H W, Du C Y, Zhu C H, Duan C, Hou X G. 2022. Geochemical character-

istics of elements in Taiyuan Formation-Shanxi Formation and their implications for sedimentary environment in Luyi Sag. Science Technology and Engineering, 22(25): 10845-10856]

- 陈兰, 达雪娟, 朱章雄, 徐桂文, 毛伟丞, 黄文科, 夏芳, 杨佩琳, 骆宇哈, 廖显娇. 2025. 托阿尔期大洋缺氧事件在中国陆相地层的碳循环扰动响应. 古地学报, 27(2): 528-540. [Chen L, Da X J, Zhu Z X, Xu G W, Mao W C, Huang W K, Xia F, Yang P L, Luo Y H, Liao X J. 2025. Response to carbon cycle perturbation during the Toarcian oceanic anoxic event in terrestrial strata of China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(2): 528-540]
- 陈平, 林卫兵, 龚大建, 尚飞, 刘晓彤. 2020. 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. 地质科学, 55(4): 1025-1043. [Chen P, Lin W B, Gong D J, Shang F, Liu X T. 2020. 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. Chinese Journal of Geology, 55(4): 1025-1043]
- 邓胜徽, 商平, 卢远征, 赵怡, 李鑫, 樊茹, 董淑欣. 2015. 内蒙古锡林浩特盆地早侏罗世晚期植物群: 兼论中国早侏罗世晚期气候. 古地学报, 17(5): 617-634. [Deng S H, Shang P, Lu Y Z, Zhao Y, Li X, Fan R, Dong S X. 2015. A late Early Jurassic flora from Xilinhot Basin of Inner Mongolia, with discussions on coeval climate in China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 17(5): 617-634]
- 邓胜徽, 卢远征, 赵怡, 樊茹, 王永栋, 杨小菊, 李鑫, 孙柏年. 2017. 中国侏罗纪古气候分区与演变. 地学前缘, 24(1): 106-142. [Deng S H, Lu Y Z, Zhao Y, Fan R, Wang Y D, Yang X J, Li X, Sun B N. 2017. The Jurassic palaeoclimate regionalization and evolution of China. Earth Science Frontiers, 24(1): 106-142]
- 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 康博, 李文厚, 张卫国. 2019. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义. 西北大学学报(自然科学版), 49(4): 633-642. [Fan M M, Bu J, Zhao X Y, Kang B, Li W H, Zhang W G. 2019. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 49(4): 633-642]
- 范萌萌, 卜军, 袁珍, 张卫国. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部延安组古环境恢复. 西安科技大学学报, 43(5): 912-922. [Fan M M, Bu J, Yuan Z, Zhang W G. 2023. Palaeoenvironment restoration of Yan'an Formation in the central and eastern part of Ordos Basin. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 43(5): 912-922]
- 高选政. 1996. 鄂尔多斯盆地早侏罗世岩相古地理. 煤田地质与勘探, 24(3): 1-4. [Gao X Z. 1996. Lithofacies palaeogeography of Lower Jurassic in Ordos Basin. Coal Geology & Exploration, 24(3): 1-4]
- 郭艳琴, 余芳, 李洋, 梁大勇, 李文厚, 赵靖舟, 马艳萍. 2016. 鄂尔多斯盆地东部石盒子组盒 8 沉积环境的地球化学表征. 地质科学, 51(3): 872-890. [Guo Y Q, Yu F, Li Y, Liang D Y, Li W H,

- Zhao J Z, Ma Y P. 2016. Geochemical characteristics of sedimentary environment on He₈ Member of Shihezi Formation in eastern Ordos Basin. *Chinese Journal of Geology*, 51(3): 872–890]
- 韩文学, 麻伟娇, 陶士振, 姚泾利, 刘新社. 2018. 鄂尔多斯盆地上古生界灰岩烃源岩生烃潜力评价. *地球科学*, 43(2): 599–609. [Han W X, Ma W J, Tao S Z, Yao J L, Liu X S. 2018. Hydrocarbon generation potential evaluation of Upper Paleozoic limestone in Ordos Basin. *Earth Science*, 43(2): 599–609]
- 胡锋, 李社红, 吴梅, 韩桥, 郝立凯. 2022. 广东湛江湖光岩玛珥湖沉积物主、微量元素对近四百年气候环境变化的记录. *矿物岩石地球化学通报*, 41(5): 926–933. [Hu F, Li S H, Wu M, Han Q, Hao L K. 2022. Records of major and trace elements in the sediment of Huguangyan Maar Lake, Zhanjiang, Guangdong Province, on climate and environmental changes in the past 400 years. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(5): 926–933]
- 金明, 李毓巍. 2003. 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. *铀矿地质*, 19(6): 349–354. [Jin M, Li W W. 2003. Petrogeochemical characteristics of Lower Cretaceous and Pliocene rocks and paleoclimate evolution in Wulanhua region. *Uranium Geology*, 19(6): 349–354]
- 李滨兵. 2023. 鄂尔多斯盆地早侏罗世 Toarcian 期湖泊的氮循环与环境演化. 成都理工大学硕士学位论文. [Li B B. 2023. Nitrogen cycles and evolution of lacustrine environment during the early Toarcian (Early Jurassic) in the Ordos Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 李昌昊, 葛禹, 金鑫, 时志强. 2022. 鄂尔多斯盆地早侏罗世富县期沉积演化: 大洋缺氧事件前后陆地气候变化的响应. *古地理学报*, 24(4): 697–712. [Li C H, Ge Y, Jin X, Shi Z Q. 2022. Sedimentological evolution during the Early Jurassic Fuxian period in Ordos Basin: palaeoclimatic response to Toarcian Oceanic Anoxic Event. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(4): 697–712]
- 李元昊, 杨桂茹, 彭建, 郑亚军, 王茜, 何拓平. 2020. 鄂尔多斯盆地前侏罗纪古地貌形成演化及沉积充填特征. *世界地质*, 39(1): 56–65. [Li Y H, Yang J R, Peng J, Zheng Y J, Wang Q, He T P. 2020. Formation and evolution of pre-Jurassic palaeogeomorphology and characteristics of sedimentary filling in Ordos Basin. *Global Geology*, 39(1): 56–65]
- 刘安, 李旭兵, 王传尚, 危凯, 王保忠. 2013. 湘鄂西寒武系烃源岩地球化学特征与沉积环境分析. *沉积学报*, 31(6): 1122–1132. [Liu A, Li X B, Wang C S, Wei K, Wang B Z. 2013. Analysis of geochemical feature and sediment environment for hydrocarbon source rocks of Cambrian in west Hunan-Hubei area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 1122–1132]
- 刘池洋, 赵红格, 王锋, 陈洪. 2005. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性. *地质学报*, 79(6): 737–747. [Liu C Y, Zhao H G, Wang F, Chen H. 2005. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 737–747]
- 刘池洋, 王建强, 张东东, 赵红格, 赵俊峰, 黄雷, 王文青, 秦阳. 2021. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存—成藏特点. *石油与天然气地质*, 42(5): 1011–1029. [Liu C Y, Wang J Q, Zhang D D, Zhao H G, Zhao J F, Huang L, Wang W Q, Qin Y. 2021. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(5): 1011–1029]
- 马大钧, 程斌, 付大巍, 陈丽君, 孟祥雨, 刘华. 2024. 珠三坳陷文昌 B 凹陷古近系文昌组—恩平组古气候特征. *矿产勘查*, 15(6): 946–955. [Ma D J, Cheng B, Fu D W, Chen L J, Meng X Y, Liu H. 2024. Paleoclimate characteristics of the Paleogene Wenchang–Enping Formation in Wenchang B sag, Zhushan Depression. *Mineral Exploration*, 15(6): 946–955]
- 邱若原, 方琳浩, 卢远征, 邓胜徽, 张新智, 吕沛宗, 任嘉豪, 黄汝婷, 房亚男, 张小宇, 李宏佳, 鲜本忠, 师生宝. 2023. 早侏罗世大洋缺氧事件在塔里木盆地的响应. *沉积学报*, 41(2): 425–434. [Qiu R Y, Fang L H, Lu Y Z, Deng S H, Zhang X Z, Lü P Z, Ren J H, Huang R T, Fang Y N, Zhang X Y, Li H J, Xian B Z, Shi S B. 2023. Responses to the Early Jurassic oceanic anoxic events in the Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(2): 425–434]
- 时志强, 韩永林, 张锦泉. 2001. 鄂尔多斯盆地早侏罗世富县期岩相古地理特征. *矿物岩石*, 21(3): 124–127. [Shi Z Q, Han Y L, Zhang J Q. 2001. Lithofacies paleogeography of Fuxian stage in Early Jurassic in Ordos Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(3): 124–127]
- 田景春, 张翔. 2016. *沉积地球化学*. 北京: 地质出版社. [Tian J C, Zhang X. 2016. *Sedimentary Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House]
- 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. *沉积学报*, 35(6): 1265–1273. [Wang F, Liu X C, Deng X Q, Li Y H, Tian J C, Li S X, You J Q. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1265–1273]
- 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 张俊明, 郭庆军, 皮道会. 2008. 黔东震旦系一下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征. *地质论评*, 54(1): 3–15. [Yang X L, Zhu M Y, Zhao Y L, Zhang J M, Guo Q J, Pi D H. 2008. REE geochemical characteristics of the Ediacaran–Lower Cambrian black rock series in eastern Guizhou. *Geological Review*, 54(1): 3–15]
- 张琴, 梁峰, 王红岩, 雷治安, 漆麟. 2018. 页岩元素地球化学特征及古环境意义: 以渝东南地区五峰—龙马溪组为例. *中国矿业大学学报*, 47(2): 380–390. [Zhang Q, Liang F, Wang H Y, Lei Z A, Qi L. 2018. Elements geochemistry and paleo sedimentary significance: a case study of the Wufeng–Longmaxi shale in southeast Chongqing. *Journal of China University of Mining & Technology*, 47(2): 380–390]

- 张云望,金鑫,乔培军,李滨兵,洪彦哲,陈俞超,芦刚,杜怡星,时志强. 2023. 鄂尔多斯盆地东北部下侏罗统富县组沉积物源分析: 来自榆林安崖剖面砂岩的岩石学及元素地球化学证据. 沉积学报, 41(5): 1414–1429. [Zhang Y W, Jin X, Qiao P J, Li B B, Hong Y Z, Chen Y C, Lu G, Du Y X, Shi Z Q. 2023. Petrological and geochemical constraints on sedimentary provenance of the Fuxian Formation(Lower Jurassic) sandstones in the northeastern Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(5): 1414–1429]
- 张之辉. 2020. 鄂尔多斯盆地东北缘早—中侏罗世延安组煤期古环境与古气候. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Zhang Z H. 2020. Paleoenvironment and paleoclimate of Early – Middle Jurassic Yan'an Formation coal-forming period in the northeast margin Ordos Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 赵俊兴,陈洪德,张锦泉. 1999. 鄂尔多斯盆地侏罗统富县组沉积体系及古地理. 岩相古地理, 19(5): 40–46. [Zhao J X, Chen H D, Zhang J Q. 1999. The depositional systems and palaeogeography of the Lower Jurassic Fuxian Formation in the Ordos Basin. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 19(5): 40–46]
- 郑荣才,柳梅青. 1999. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究. 石油与天然气地质, 20(1): 20–25. [Zheng R C, Liu M Q. 1999. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 20–25]
- Cao J, Wu M, Chen Y, Hu K, Bian L Z, Wang L G, Zhang Y. 2012. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China. *Geochemistry*, 72(3): 245–252.
- Cui H, Zhu S F, Liang C, Ma W Z, Tong H, Shi Z S. 2023. Facies association analysis of a Toarcian siliciclastic-carbonate lacustrine system, Sichuan Basin, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 631: 111841.
- Dill H, Teschner M, Wehner H. 1988. Petrography, inorganic and organic geochemistry of Lower Permian Carbonaceous fan sequences (“Brandschiefer Series”) – Federal Republic of Germany: constraints to their paleogeography and assessment of their source rock potential. *Chemical Geology*, 67(3/4): 307–325.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921–924.
- Fritz S C. 1996. Paleolimnological records of climatic change in North America. *Limnology and Oceanography*, 41(5): 882–889.
- Jin X, Shi Z Q, Baranyi V, Kemp D B, Han Z, Luo G M, Hu J F, He F, Chen L, Preto N. 2020. The Jenkyns Event(early Toarcian OAE) in the Ordos Basin, North China. *Global and Planetary Change*, 193: 103273.
- Jin X, Zhang F, Baranyi V, Kemp D B, Feng X B, Grasby S E, Sun G Y, Shi Z Q, Chen W H, Dal Corso J. 2022. Early Jurassic massive release of terrestrial mercury linked to floral crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 598: 117842.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111: 111–129.
- Liu J C, Cao J, Hu G, Wang Y, Yang R F, Liao Z W. 2020a. Water-level and redox fluctuations in a Sichuan Basin lacustrine system coincident with the Toarcian OAE. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 558: 109942.
- Liu M, Sun P, Them T R, Li Y F, Sun S L, Gao X Y, Huang X, Tang Y J. 2020b. Organic geochemistry of a lacustrine shale across the Toarcian Oceanic Anoxic Event(Early Jurassic) from NE China. *Global and Planetary Change*, 191: 103214.
- Lu J, Zhou K, Yang M F, Eley Y, Shao L Y, Hilton J. 2020. Terrestrial organic carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) and environmental perturbations linked to Early Jurassic volcanism: evidence from the Qinghai-Tibet Plateau of China. *Global and Planetary Change*, 195: 103331.
- McLennan S M. 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4): 2000GC000109.
- McManus J, Berelson W M, Klinkhammer G P, Johnson K S, Coale K H, Anderson R F, Kumar N, Burdige D J, Hammond D E, Brumsack H J, McCorkle D C, Rushdi A. 1998. Geochemistry of barium in marine sediments: implications for its use as a paleoproxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(21–22): 3453–3473.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715–717.
- Sahoo S K, Planavsky N J, Jiang G, Kendall B, Owens J D, Wang X, Shi X, Anbar A D, Lyons T W. 2016. Oceanic oxygenation events in the anoxic Ediacaran ocean. *Geobiology*, 14(5): 457–468.
- SolotChina E P, Sklyarov E V, Solotchin P A, Vologina E G, Sklyarova O A. 2014. Mineralogy and crystal chemistry of carbonates from the Holocene sediments of Lake Kiran(western Transbaikalia): connection with paleoclimate. *Russian Geology and Geophysics*, 55(4): 472–482.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1–312.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232(1–2): 12–32.
- Zhang Q, Gong E P, Zhang Y L, Guan C Q. 2021. Early Jurassic (Toarcian) warming identified from lacustrine sediments of eastern Liaoning, China. *Geological Magazine*, 158: 1194–1208.

(责任编辑 张西娟)