

引用格式: 刘金, 王剑, 谭静强, 等, 2023. 吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积古环境与有机质富集 [J]. 地质力学学报, 29 (5): 631–647. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022127

Citation: LIU J, WANG J, TAN J Q, et al., 2023. Sedimentary paleo-environment and organic matter enrichment in the Lucaogou Formation of the Jimsar Sag [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 631–647. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022127

吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积古环境与有机质富集

刘 金^{1,2}, 王 剑^{1,2}, 谭静强³, 崔海骅³, 刘 淼², 郑 雨², 宋雪琪³, 元 强⁴
LIU Jin^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, TAN Jingqiang³, CUI Haisu³, LIU Miao², ZHENG Yu², SONG Xueqi³,
YUAN Qiang⁴

1. 新疆页岩油勘探开发实验室, 新疆 克拉玛依 834000;
2. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;
4. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075

1. Key Laboratory of Shale Oil Exploration and Development, Karamay 834000, Xinjiang, China;
2. Research Institute of Experiment and Testing, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang, China;
3. School of Geosciences and Info-Physics Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
4. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China

Sedimentary paleo-environment and organic matter enrichment in the Lucaogou Formation of the Jimsar Sag

Abstract: The Lucaogou Formation in the Jimsar Sag is the main target layer of shale oil exploration and development in continental basins. However, its paleo-environmental information and organic matter enrichment mechanism still need to be determined. In order to investigate the paleo-environment of the Permian Lucaogou Formation, based on core and thin section observation, we carried out major and trace element analyses on 26 source rocks from Well J10025 by using X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). This analysis, combined with GC-MS biomarker data and typical sedimentary structures, reflects the paleo-environmental characteristics of the Lucaogou Formation. Geochemical indicators such as C-value, Sr/Ba, V/Cr, Pr/Ph, P, and Co show that the Lucaogou Formation was generally developed in a saline lake environment under an arid to semi-arid climate, with relatively deep water during deposition and hypoxic to anoxic conditions. The upper member was deposited in a semi-arid, brackish lake with weak reducibility, deep water body, and high productivity. In contrast, the lower member was deposited in an extremely dry, highly saline, and strongly reductive shallow lake with low productivity. The paleo-environment of the upper member fluctuated wildly, while that of the lower member was relatively stable. The correlation analyses between paleo-environmental indicators and TOC show that the preservation conditions and dilution rate of organic matter have limited influence on organic matter enrichment of the Lucaogou Formation. At the same time, the primary productivity is the main controlling factor.

Keywords: Jimsar; the Lucaogou Formation; shale oil; sedimentary paleo-environment; organic matter enrichment

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41872151); 中德科学中心合作交流项目 (M0588); 湖南省重点研发计划项目 (2022WK2004); 湖南省自然资源厅重大项目 (2022-05)

This research is financially supported by the Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41872151), the Project of the Sino-German Science Center (Grant No. M0588), the Key Research and Development Plan of Hunan Province (Grant No. 2022WK2004), and the Major Project of the Department of Natural Resources of Hunan Province (Grant No. 2022-05).

第一作者: 刘金 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事微束、微区分析及非常规油气地质研究。E-mail: 602393581@qq.com

通讯作者: 谭静强 (1983—), 男, 博士, 教授, 从事非常规油气地质评价研究。E-mail: tanjingqiang@csu.edu.cn

收稿日期: 2023-01-09; **修回日期:** 2023-06-13; **责任编辑:** 范二平

摘要：吉木萨尔凹陷芦草沟组是陆相盆地页岩油勘探开发的主力层位，但其古环境信息与有机质富集机理尚不明确。为了深入研究二叠系芦草沟组的沉积古环境，在岩心和薄片观察的基础上，通过 X 射线荧光光谱（XRF）和电感耦合等离子质谱（ICP-MS）对 J10025 井 26 块烃源岩样品进行主微量元素测试，并结合 GC-MS 生物标志化合物数据与典型沉积构造反映芦草沟组古环境特征。古气候指数 C 值、Sr/Cu、Sr/Ba、V/Cr、Pr/Ph、P、Co 元素等地化指标表明，芦草沟组整体上为干旱—半干旱的咸化湖泊沉积环境，沉积时期水体较深，且为贫氧—缺氧的状态。其中，芦草沟组上段整体为半干旱气候、微咸水环境，还原性相对较弱，水体较深，生产力较高，但环境波动较大；芦草沟组下段环境比较稳定，气候极度干旱，盐度较高，还原性相对较强，水体较浅，生产力较低。古环境指标与 TOC 含量的相关性分析结果显示，有机质的保存条件以及稀释速率对芦草沟组有机质富集的影响比较有限，而初级生产力大小是芦草沟组有机质富集的主控因素。

关键词：吉木萨尔；芦草沟组；页岩油；沉积古环境；有机质富集

中图分类号：TE122 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-6616（2023）05-0631-17

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022127

0 引言

近年来，随着非常规油气勘探开发的快速发展，页岩油也成为引领非常规油气革命的重要组成部分，服务于国家重大能源需求（贾承造，2017；邹才能等，2020；刘和和曹刚，2022）。页岩油是指以吸附或游离状态赋存于富有机质泥页岩中的原油，具有源储一体、滞留聚集、连续分布的特征（张金川等，2012；邹才能等，2013；姜在兴等，2014；廖柯熹等，2021）。中国页岩油资源潜力巨大，据“十三五”全国资源评价，陆上页岩油资源量为 283 亿吨，主要分布在松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、四川盆地等（赵文智等，2020；金之钧等，2021）。

研究区位于准噶尔盆地吉木萨尔凹陷，陆相页岩油资源潜力巨大，自 2010 年勘探开发以来已取得显著进展，单井产量不断提高，页岩油产能也逐年提升（郭旭光等，2019；支东明等，2019；葛洪魁，2021；程垒明等 2022）。其中，芦草沟组油页岩有效厚度大，分布范围广，是该区域内一套优质的烃源岩。相关学者对吉木萨尔凹陷沉积古环境开展了一些研究：曲长胜等（2017）基于吉 32 井岩心样品碳氧同位素数据，认为吉木萨尔凹陷从早期畅流湖泊环境演变为后期滞留封闭的咸化湖泊；张帅等（2018）通过研究芦草沟组云质岩主微量元素特征，认为吉木萨尔凹陷水体为分层较弱的缺氧环境，周边发育强烈火山活动；

蒋中发等（2020）根据吉 174 井烃源岩生物标志物特征，认为芦一段相对富集伽马蜡烷、植烷、 β 胡萝卜素烷等，为干旱气候咸化贫氧环境；Liu et al.（2022）根据 Sr/Cu、V/Cr、Sr/Ba 等无机地化指标认为芦草沟组上段经历了湖侵运动，气候干旱程度与水体咸化程度相对较低。总体上，目前对芦草沟组古环境的研究主要集中在地球化学领域，且所选样品大都来自博格达山北缘。此次研究则选择吉木萨尔凹陷中部新钻探的 J10025 井，利用岩石矿物、沉积构造、元素指标以及生物标志化合物综合反映芦草沟组沉积历史时期的古气候、古盐度、古氧相、古水深、古生产力等信息，进而反演芦草沟组上下段古环境的演化过程。同时，对古环境指标与总有机碳（TOC）含量进行拟合分析，探究芦草沟组有机质富集的主控因素，为吉木萨尔井区下一步油气勘探开发提供理论指导。

1 地质背景

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东南缘，是东部隆起上的一个次级构造单元，南北宽 30 km，东西长 60 km，总面积约 1300 km²（图 1）。吉木萨尔凹陷受断裂控制，南以三台断裂与博格达山前构造带相接，北以吉木萨尔断裂与沙奇凸起毗邻，东接古西凸起，西望北三台凸起，北西、南东分别为青 1 井南 1 号断裂和吉 7 井南断裂。凹陷内部地形平缓，总体表现出西深东浅、西断东超的箕状结构特征（匡立春等，2012）。凹陷自形成以来，

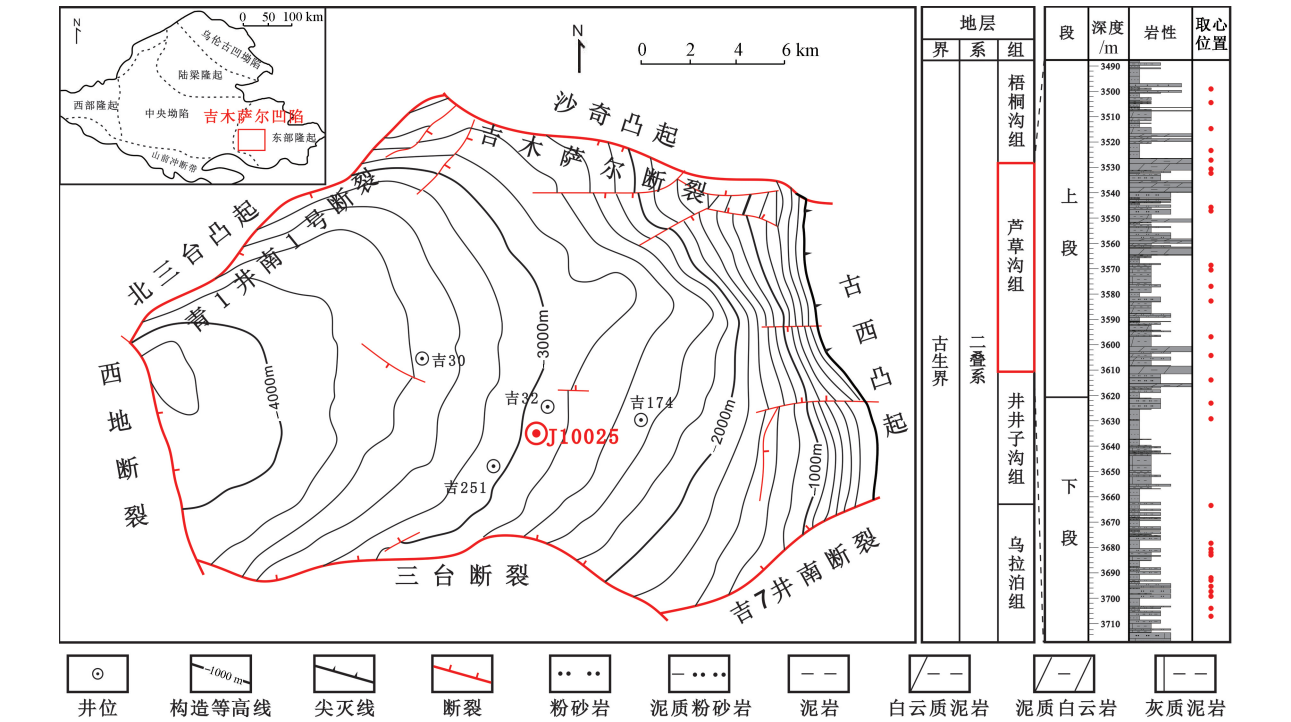


图 1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷构造位置及 J10025 井地层特征

Fig. 1 Structural location of the Jimsar Sag in the Junggar Basin and stratigraphic column of Well J10025

经历了包括海西、印支、燕山和喜马拉雅在内的多期构造事件影响(方世虎等, 2005)。

准噶尔盆地下基底为寒武—奥陶系变质结晶基底, 经过俯冲、碰撞、裂陷、拗陷、再生前陆 5 个演化过程, 准噶尔盆地在晚古生代基本形成, 并且在多期陆内变形事件的改造下形成独特的棋盘状构造(吴晓智等, 2012; 任新成等, 2023)。早—中二叠世早期为盆地的裂陷期, 晚古生代碰撞形成的西准噶尔造山带导致盆地西北缘至南缘的沉积环境差异较大, 沉积格局发育为拗陷与隆起相间, 吉木萨尔凹陷当时属于昌吉拗陷的一部分。中二叠世中晚期为盆地沉降期, 沉积格局统一为大型内陆湖盆, 包括吉木萨尔凹陷的湖盆区域面积不断扩大, 到芦草沟组时期达到最大, 厚层泥页岩广泛发育。至晚二叠世为盆地萎缩期, 水体变浅, 湖盆逐渐消亡, 吉木萨尔凹陷经历抬升, 芦草沟组上部短暂沉积间断并遭受剥蚀, 随后接受梧桐沟组沉积(匡立春等, 2012; 吴晓智等, 2012)。吉木萨尔凹陷发育一套从石炭系到第四系的沉积地层, 其中二叠系自下而上为乌拉泊组、井井子沟组、芦草沟组和梧桐沟组。芦草沟组在全凹陷分布, 总厚度超过 200 m, 可以划分为上下两段, 岩石类型以深灰色泥岩、碳酸盐岩和

云质泥岩为主, 沉积相类型主要为半深湖—深湖相以及三角洲相(张文文等, 2021)。

根据物性和含油性, 芦草沟组发育上、下两个储层物性较好、含油较丰富的“甜点体”(斯春松等, 2013)。上甜点体位于芦二段底部, 以泥晶云岩、砂屑泥岩、云质泥岩等碳酸盐岩沉积为主, 含油储层分散且厚度小; 下甜点体位于芦一段顶部, 以泥质粉砂岩、云质粉砂岩、云质泥岩等碎屑岩沉积为主, 含油储层连续且厚度较大(匡立春等, 2012)。文中选取吉木萨尔凹陷中南部位置的 J10025 井为研究对象, 从下往上依次为芦一段(下段)和芦二段(上段), 各有 100 m 左右厚度, 地层岩性以及取样位置如图 1 所示。

2 样品和方法

此次研究共采集 J10025 井芦草沟组岩心样品 30 块, 包括 26 块烃源岩和 4 块砂岩, 采用搭载专业照相系统的 Zeiss A1 Scope 偏光显微镜对其进行详细观察。总有机碳(TOC)含量测定在中南大学地质新能源实验室依据国家标准(GB/T 19145-2003)进行, 实验仪器为 Leco-CS744 碳硫元素分析仪。首先称取样品 0.1 g 左右并粉碎至 100 目

(150 μm), 然后用稀盐酸预处理去除无机碳成分, 清洗至中性后烘干, 之后上机进行测试分析, 误差一般不超过 0.5%。

对 26 块烃源岩样品进行主微量元素测试, 实验前将样品粉碎至 200 目 (75 μm)。主量元素分析以国家标准 (GB/T 14506.28—2010) 为依据, 采用帕纳科公司 Axios^{max} 波长色散 X 射线荧光光谱仪, 测定样品中 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量, 分析误差小于 5%。微量元素分析根据国家标准 (GB/T 14506.30—2010), 采用 NexION300D 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测试, 检测极限达 10^{-6} 。选择大陆上地壳 (UCC) 元素丰度 (Boynton, 1984; McLennan, 2001) 为标准, 对主微量元素进行归一化处理, 分析样品中元素的富集程度。

生物标志化合物分析在中南大学地质新能源实验室进行, 首先对粉碎至 200 目 (75 μm) 以下的样品使用 YSC-全自动多功能抽提仪抽提, 之后进行族组分分离, 再使用 GCMS-QP2020NX 气相色谱质谱联用仪进行气相色谱-质谱 (GC-MS) 分析。进样口温度为 280.0 $^{\circ}\text{C}$, 采用分流模式进样, 分流比为 1:30, 载气为氦气。色谱柱初始温度 80.0 $^{\circ}\text{C}$, 平衡时间 3 min, 柱温箱温度程序共 103 min, 先以 3.0 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 230 $^{\circ}\text{C}$, 再以 2.0 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 310 $^{\circ}\text{C}$ 。MS 离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$, 接口温度为 300 $^{\circ}\text{C}$, 检测器电压为 0.15 kV, 同时进行全扫描和定扫描。

3 结果

3.1 岩石矿物与沉积构造

J10025 井薄片观察结果显示, 芦草沟组岩石类型多样, 包括泥岩、白云质泥岩、灰质泥岩、砂岩、粉砂岩、灰岩、白云岩等。其中, 芦草沟组上段以泥岩、白云质泥岩和泥质粉砂岩为主, 可见石英、长石和白云石等矿物, 有机质纹层较为发育, 富含鱼鳞等生物化石; 下段岩性以砂岩、白云质泥岩、灰质泥岩为主, 部分样品可见方解石脉 (图 2)。

此外, 芦草沟组岩心样品中还发育有石膏假晶、泄水构造与干裂碎片等沉积构造 (图 3)。石膏假晶一般形成于咸化湖相沉积环境, 表明硫酸盐矿物被方解石取代后仍保留了原始形态, 呈纤

维状、条带状或透镜状。泄水构造形成于固结成岩过程中, 由于差异压实作用, 岩石中的流体通过泄水通道突破纹层而发生变形。干裂碎片能够指示干旱暴露的环境, 碎片中的水分在岩石表面强烈蒸发扩散, 导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子在沉积物边缘聚集, 形成明亮边缘, 而沉积物内部离子相对较少, 表现为颜色较暗 (Wu et al., 2016)。

3.2 总有机碳与元素地化特征

3.2.1 总有机碳含量

有机质丰度是衡量和评价岩石生烃潜力的重要指标, 采用总有机碳 (TOC) 含量表征烃源岩有机质丰度的大小。实验结果显示, J10025 井芦草沟组 TOC 含量分布在 1.81%~19.60%, 平均为 6.63% (表 1)。其中, 芦草沟组上段 TOC 含量普遍高于下段, 且绝大多数样品的 TOC 含量超过 2%, 表明上段样品的有机质丰度更高。

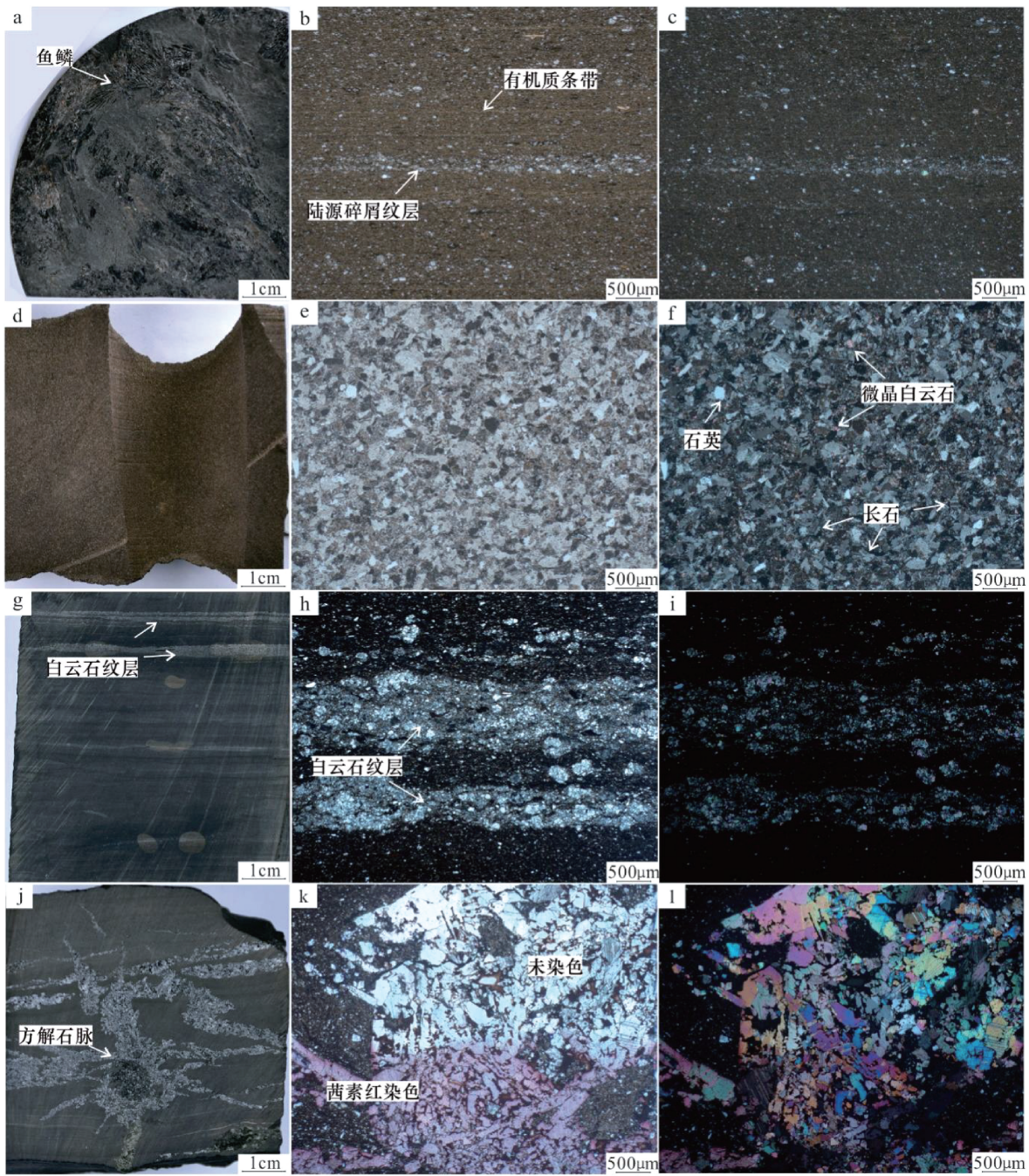
3.2.2 主量元素特征

J10025 井芦草沟组 26 块烃源岩的主量元素数据如表 1 所示。所有样品中 SiO_2 含量最多, 为 6.10%~65.33%, 平均值为 38.32%; Al_2O_3 含量次之, 为 2.44%~11.85%, 平均达 7.45%。 Na_2O 、 K_2O 含量较少, 平均分别占 2.64% 和 1.69%; P_2O_5 、 MnO 含量最少, 大部分样品仅有 0.10%。

将芦草沟组样品的主量元素含量与大陆上地壳 (UCC) 含量作比较 (图 4a), 可以发现 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 在上下段普遍亏损, SiO_2 与 MnO 在下段与 UCC 含量相当, 而上段却相对亏损, 这可能与芦草沟组上段有机质含量高有关。 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 的含量在芦草沟组上下段差异较大, 主要表现为在上段的相对亏损与在下段的相对富集, 这与下段灰质含量高密切相关。 P_2O_5 的相对富集程度与之相反, 在上段与 UCC 含量相当, 下段则表现为亏损状态, 这可能与芦草沟组上段生物化石较多、有机质含量高有关。

3.2.3 微量元素特征

通过电感耦合等离子质谱仪测试的微量元素有 B、Ga、Co、Ni、V、Cr、Sr、Ba 等 (表 2)。总体上, U (1.1~7.0 $\mu\text{g/g}$)、Co (4.5~16.7 $\mu\text{g/g}$)、Ga (5.2~20.0 $\mu\text{g/g}$) 等微量元素含量相对稳定, 上下段差异不大; 而 Sr (116~885 $\mu\text{g/g}$)、Ba (170~598 $\mu\text{g/g}$)、Cr (19.6~419.0 $\mu\text{g/g}$)、Ni (11.4~209.0 $\mu\text{g/g}$) 等元素含量变化范围较大, 其中 Sr 在下段含量普遍高于上段, Cr 与 Ni 含量



a、d、g、j 为岩心照片；b、e、h、k 为透射光；c、f、i、l 为正交偏光
a—c—泥岩，可见鱼鳞化石，上段顶部，3530.8 m；d—f—云质岩屑细砂岩，上段中部，3549.3 m；g—i—白云质泥岩，发育白云石纹层，上段底部，3603.1 m；j—l—灰质泥岩，下段，3685.5 m，下半部分用茜素红染色

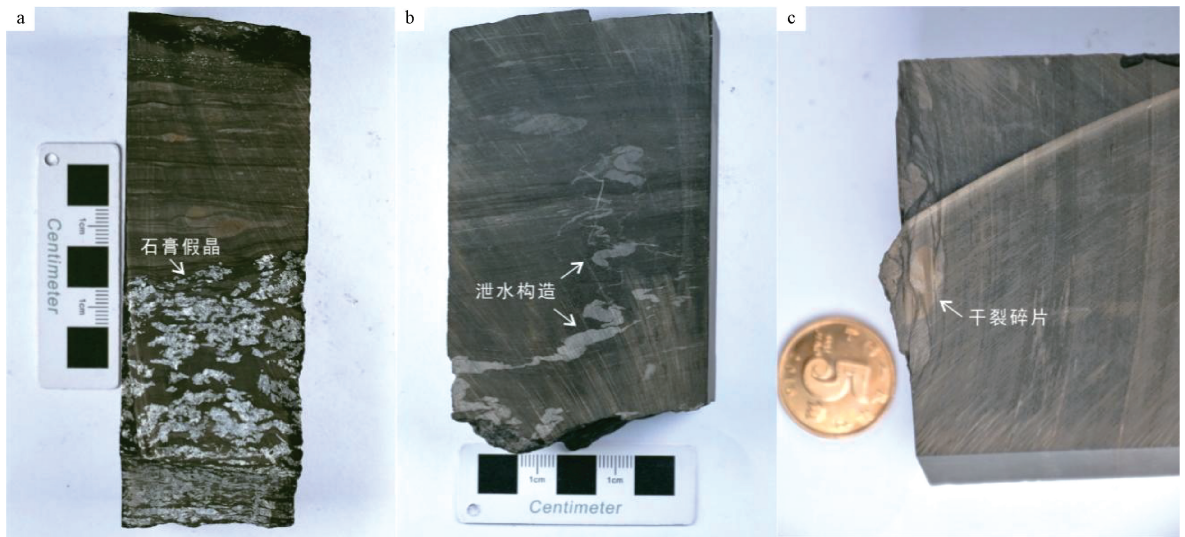
图 2 J10025 井芦草沟组岩心与岩石薄片特征

Fig. 2 Photographs of cores and thin sections of the Lucaogou Formation in Well J10025

(a—c) Mudstone with fish scales, the top of the upper member, 3530.8 m; (d—f) Dolomitic lithic fine sandstone, the middle of the upper member, 3549.3 m; (g—i) Dolomitic mudstone with dolomitic lamina, the bottom of the upper member, 3603.1 m; (j—l) Calcareous mudstone, half of the sample is alizarin red stained, the lower member, 3685.5 m

Core photos in the left column, transmitted light in the middle and orthogonal light in the right

则在上段变化显著，下段相对平缓。此外，Cu 含量变化幅度相对不明显，但存在异常高值，最高可达到 209 $\mu\text{g/g}$ ，其他元素无明显异常。芦草沟组上下段微量元素富集程度如图 4b 所



a—方解石型石膏假晶, 3701.3 m; b—泄水构造, 3576.6 m; c—干裂碎片, 3595.4 m

图 3 J10025 井芦草沟组沉积构造

Fig. 3 Photographs of sedimentary structures of the Lucaogou Formation in Well J10025

(a) Calcite gypsum pseudocrystals, 3701.3 m; (b) Drainage structure, 3576.6 m; (c) Cracked fragments, 3595.4 m

表 1 J10025 井芦草沟组 TOC 含量与主量元素含量

Table 1 Contents of TOC and major elements of the Lucaogou Formation in Well J10025

层位	样品	深度/m	TOC 含量/ %	SiO ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	MgO/ %	Na ₂ O/ %	K ₂ O/ %	P ₂ O ₅ / %	TiO ₂ / %	CaO/ %	Fe ₂ O ₃ / %	MnO/ %
上段	J-26	3499.5	5.77	18.68	4.58	0.67	0.52	0.53	0.13	0.18	1.10	2.46	0.03
	J-25	3506.8	1.81	62.71	11.69	2.44	0.54	1.94	0.23	0.56	7.47	6.21	0.16
	J-24	3515.0	7.76	65.33	11.85	1.68	1.18	3.29	0.40	0.62	2.84	3.92	0.09
	J-23	3523.7	6.81	18.08	4.16	0.42	1.58	0.61	0.10	0.14	1.05	1.51	0.03
	J-22	3526.1	5.74	16.46	4.34	0.49	2.02	0.91	0.27	0.20	0.64	1.91	0.04
	J-21	3530.8	14.93	14.84	3.70	0.62	1.25	0.70	0.29	0.14	1.08	2.33	0.05
	J-20	3547.8	5.53	15.49	4.16	0.81	1.81	1.01	0.09	0.17	0.41	2.01	0.02
	J-19	3569.2	3.10	10.76	3.34	2.01	1.69	0.87	0.03	0.13	1.96	1.54	0.04
	J-18	3570.5	6.75	10.24	3.05	2.06	1.82	0.48	0.03	0.11	1.07	1.32	0.02
	J-17	3574.2	19.60	55.68	8.74	1.26	2.82	1.99	0.46	0.41	4.54	2.81	0.13
	J-16	3576.6	16.97	6.10	2.44	0.41	1.20	0.51	0.09	0.10	1.48	1.86	0.04
	J-15	3595.4	15.80	46.24	8.64	4.52	3.22	2.05	0.13	0.39	5.67	2.67	0.08
	J-14	3603.1	7.04	38.92	7.12	8.42	2.26	1.66	0.22	0.28	13.85	3.29	0.15
	J-13	3613.7	6.98	53.72	9.84	5.56	4.38	1.75	0.10	0.48	6.00	4.65	0.13
平均值			8.90	30.94	6.26	2.24	1.88	1.31	0.18	0.28	3.51	2.75	0.07
下段	J-12	3624.3	3.62	49.98	9.74	6.05	4.64	1.99	0.07	0.51	6.98	3.34	0.13
	J-11	3629.2	2.29	55.41	9.74	2.88	4.40	1.71	0.08	0.44	8.92	2.13	0.12
	J-10	3664.3	4.20	52.01	8.90	4.46	3.55	1.79	0.11	0.34	9.94	2.90	0.12
	J-09	3679.5	3.11	49.71	8.56	6.69	3.67	1.44	0.07	0.35	10.32	4.08	0.13
	J-08	3681.6	2.44	52.87	9.50	5.16	3.92	2.29	0.06	0.39	7.39	4.30	0.13
	J-07	3684.5	3.48	39.19	7.97	8.09	3.62	1.68	0.09	0.38	12.67	3.56	0.13
	J-06	3685.5	5.82	58.81	11.19	2.51	4.00	3.39	0.15	0.60	3.45	2.67	0.08
	J-05	3695.3	2.50	39.14	8.19	5.27	3.04	2.66	0.17	0.44	15.44	3.59	0.12
	J-04	3696.9	1.95	42.57	8.35	9.31	3.01	2.33	0.04	0.36	11.31	2.98	0.18
	J-03	3699.9	5.73	50.47	9.43	4.90	3.10	2.80	0.08	0.43	8.43	3.05	0.13
	J-02	3701.3	7.87	29.90	6.37	8.39	2.52	1.66	0.11	0.28	17.03	2.67	0.09
	J-01	3708.3	4.85	43.00	8.09	7.35	2.99	1.95	0.09	0.36	12.42	2.83	0.15
平均值			3.99	46.92	8.83	5.92	3.54	2.14	0.09	0.41	10.36	3.17	0.13
平均值			6.63	38.32	7.45	3.94	2.64	1.69	0.14	0.34	6.67	2.95	0.10
上地壳 (UCC)			—	49.50	15.80	4.40	3.20	1.88	0.20	0.70	6.40	6.60	0.14

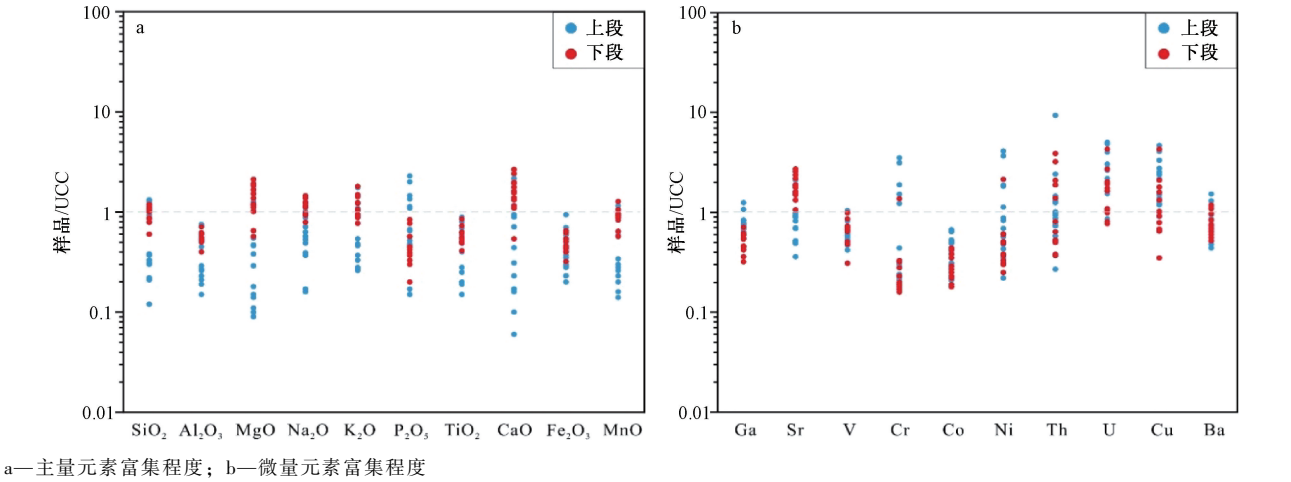


图 4 J10025 井芦草沟组主微量元素富集程度

Fig. 4 Concentration of major and trace elements of the Lucaogou Formation in Well J10025

(a) Concentration of major elements; (b) Concentration of trace elements

表 2 J10025 井芦草沟组微量元素特征

Table 2 Trace elements characteristics of the Lucaogou Formation in Well J10025													
层位	样品	深度/m	B/ (μg/g)	Ga/ (μg/g)	Sr/ (μg/g)	V/ (μg/g)	Cr/ (μg/g)	Co/ (μg/g)	Ni/ (μg/g)	Th/ (μg/g)	U/ (μg/g)	Cu/ (μg/g)	Ba/ (μg/g)
上段	J-26	3499.5	196.0	12.0	169.0	78.3	26.6	10.40	28.9	4.4	2.16	36.3	170
	J-25	3506.8	300.0	11.6	265.0	80.3	25.3	4.61	11.4	5.7	1.21	24.2	189
	J-24	3515.0	363.0	13.5	321.0	108.0	33.0	12.20	42.5	7.0	4.26	57.2	425
	J-23	3523.7	60.7	12.3	229.0	70.5	181.0	13.20	93.5	4.9	2.65	98.0	370
	J-22	3526.1	74.3	17.1	293.0	91.9	373.0	16.70	209.0	7.4	6.81	79.6	598
	J-21	3530.8	69.9	10.9	223.0	77.2	419.0	15.90	187.0	4.2	5.61	66.2	261
	J-20	3547.8	128.0	20.0	116.0	136.0	52.0	12.70	45.0	5.6	3.05	60.7	445
	J-19	3569.2	132.0	13.3	161.0	74.1	37.0	10.60	24.5	4.1	1.50	33.1	337
	J-18	3570.5	74.1	11.1	304.0	55.2	225.0	5.21	95.3	1.5	1.53	112.0	508
	J-17	3574.2	83.7	9.0	223.0	68.5	29.1	7.82	22.0	8.2	3.88	28.5	204
	J-16	3576.6	88.7	10.2	293.0	70.0	28.2	7.66	25.7	5.2	2.78	31.0	281
	J-15	3595.4	91.8	6.8	429.0	62.1	20.4	5.21	17.8	52.3	7.04	21.9	199
	J-14	3603.1	51.1	5.7	683.0	65.3	146.0	6.34	57.8	13.5	3.68	51.5	324
	J-13	3613.7	129.0	12.6	159.0	87.9	35.4	9.76	35.3	3.3	1.44	29.2	252
	平均值		131.6	11.9	276.3	80.4	116.5	9.90	64.0	9.1	3.40	52.1	326
下段	J-12	3624.3	112.0	7.4	604.0	67.2	22.2	6.80	19.2	21.7	3.79	31.9	288
	J-11	3629.2	106.0	7.3	433.0	40.4	26.9	7.29	19.0	3.6	1.52	8.3	377
	J-10	3664.3	98.1	8.6	506.0	86.2	21.7	5.82	15.2	7.8	2.72	24.5	292
	J-09	3679.5	136.0	7.2	343.0	63.0	22.7	4.46	12.7	2.8	1.47	15.7	218
	J-08	3681.6	118.0	11.4	523.0	87.9	32.8	6.20	19.4	3.0	2.29	15.5	234
	J-07	3684.5	89.9	6.7	710.0	91.3	20.5	4.84	15.8	2.1	1.08	16.3	250
	J-06	3685.5	82.5	9.5	579.0	91.2	23.5	8.63	30.6	10.5	2.43	43.0	459
	J-05	3695.3	112.0	9.6	771.0	130.1	38.9	11.01	31.1	18.0	6.00	38.1	426
	J-04	3696.9	172.0	8.7	614.0	83.3	27.5	9.46	24.9	2.1	2.29	18.9	269
	J-03	3699.9	128.0	10.0	489.0	113.0	37.6	7.16	25.9	2.9	1.39	50.3	377
	J-02	3701.3	55.2	5.7	832.0	93.9	163.0	10.50	109.0	11.7	2.84	103.0	327
	J-01	3708.3	103.0	5.2	885.0	95.5	19.6	5.48	17.0	4.6	1.14	22.1	202
	平均值		109.4	8.1	607.4	86.9	38.1	7.30	28.3	7.6	2.40	32.3	310
平均值			121.3	10.1	429.1	83.4	80.3	8.70	47.5	8.4	2.90	43.0	319
上地壳 (UCC)			—	16.0	325.0	131.0	119.0	25.00	51.0	5.6	1.40	24.0	390

示, U、Cu 元素在上下段都表现为明显富集, 且上段富集程度更为显著。Sr 元素表现为在上段的亏损与在下段的富集, 而 Cr、Ni 却恰恰相反, 上段相对富集, 下段则亏损状态。其他微量元素,

如 Ga、V、Co、Ba 在上下段都表现出较大程度的亏损，其中 Co 亏损程度最严重。

3.3 饱和烃生物标志化合物

J10025 井芦草沟组样品正构烷烃的分布呈现单峰型特征，主峰碳原子分布在 nC_{17} — nC_{25} 之间

(图 5)。芦草沟组样品中还检测到丰富的类异戊二烯烃，如姥鲛烷 (Pr) 和植烷 (Ph)。芦草沟组的 Pr/Ph 变化范围较大 (0.19~1.50)，其中上段介于 0.47~1.50 (平均 1.00)，下段介于 0.19~1.14 (平均 0.64)。

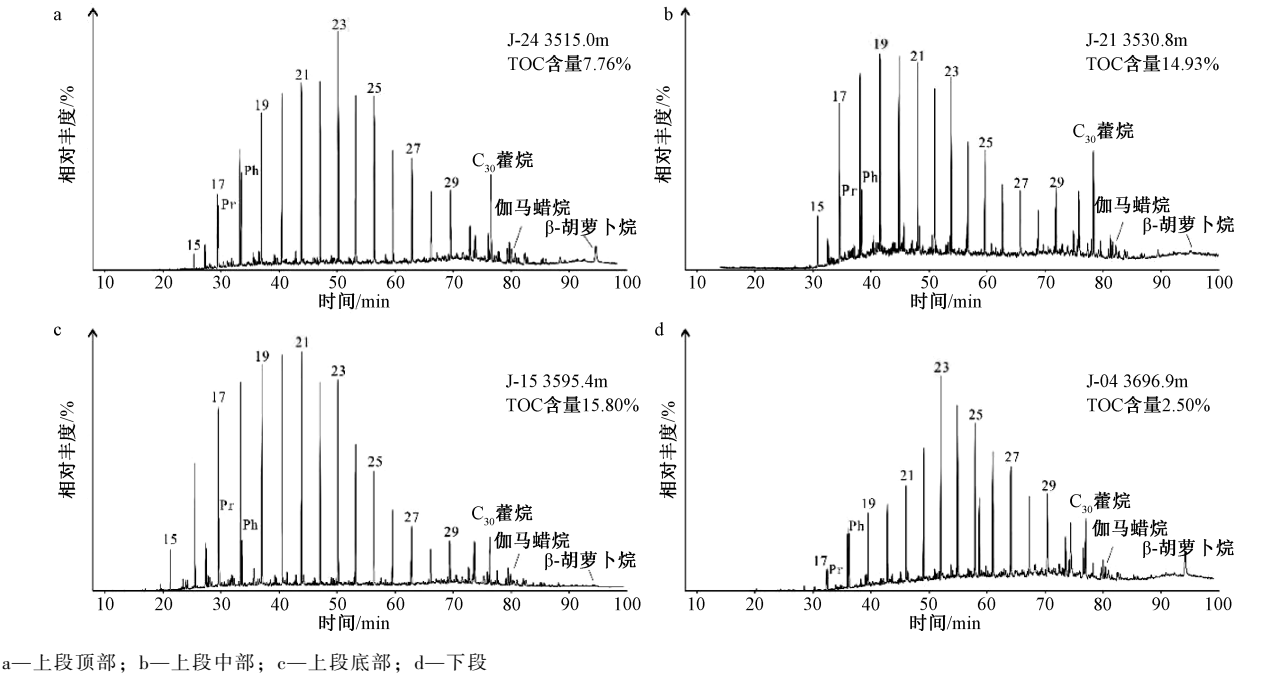


图 5 J10025 井芦草沟组饱和烃总离子流量特征

Fig. 5 Total ion chromatogram of saturated hydrocarbon of the Lucaogou Formation in Well J10025

(a) The top of the upper member; (b) The middle of the upper member; (c) The bottom of the upper member; (d) The lower member

此外，芦草沟组样品中还发现丰富的 β -胡萝卜素，但不同深度含量分布差异较大。部分样品检出含量极低， β -胡萝卜素指数 (β -胡萝卜素/ nC_{max}) 平均值为 2.72，其中上段介于 0.03~2.22，平均值为 0.77；下段 β -胡萝卜素指数则显著较高，介于 0.22~12.05，平均值为 4.67。

伽马蜡烷指数 GI (伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷) 平均值为 0.21，总体较稳定。其中上段差异稍大，介于 0.10~0.24，平均值为 0.19；下段 GI 介于 0.20~0.26，平均值为 0.23，变化幅度较小。

4 讨论

4.1 古环境重建

4.1.1 古气候

在沉积过程中，沉积物和沉积环境之间存在复杂的地球化学反应，而一些对气候变化敏感的元素可以很好地记录沉积时期的古气候特征。如

在干燥气候条件下，大气降水减少，地表水分大量蒸发，盆地水介质中 Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba 等元素会大量析出沉积在水底沉积物中；在湿润气候条件下，沉积岩中的 Fe、Mn、V、Cr、Co、Ni 等元素含量则相对较高 (Eskenazy, 1987; 彭雪峰等, 2012)。因此，可以用这两类元素含量的比值来判定气候条件，即古气候指数 C 值：

$$C \text{ 值} = \frac{\sum (Fe + Mn + Cr + Ni + V + Co)}{\sum (Ca + Mg + Sr + Ba + K + Na)} \quad (1)$$

研究表明，C 值小于 0.2 时指示干旱环境，介于 0.2~0.4 时指示半干旱环境，0.4~0.6 时为半干旱—半湿润环境，在 0.6~0.8 之间指示半湿润环境，大于 0.8 则为潮湿环境 (Moradi et al., 2016; Xie et al., 2021)。J10025 井芦草沟组岩心样品的 C 值变化范围较大，介于 0.07~1.14 之间 (表 3)。其中，芦草沟组下段 C 值分布在 0.07~0.21，指示极度干旱的环境。芦草沟组上段顶部除

个别数据偏大外, 大部分数据分布在 0.11~0.66, 指示半干旱—半潮湿的沉积环境。

表 3 J10025 井芦草沟组古气候与古盐度指标

Table 3 Paleo-climate and paleo-salinity proxies of the Lucaogou Formation in Well J10025

层位	古气候指标			古盐度指标		
	Sr/Cu	C 值	CIA	Sr/Ba	B/Ga	GI
上段	1.91~19.59	0.11~1.14	44~79	0.26~2.16	4.35~26.89	0.10~0.24
	6.83	0.54	58	0.96	11.32	0.19
下段	8.08~52.23	0.07~0.21	46~52	1.15~4.38	8.72~19.85	0.20~0.26
	26.25	0.13	49	2.10	13.85	0.23
芦草沟组	1.91~52.23	0.07~1.14	44~79	0.26~4.38	4.35~26.89	0.10~0.26
	15.79	0.35	54	1.49	12.49	0.21

注: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$

因喜湿性元素 Cu 与喜干性元素 Sr 两者化学性质的差异, 一些学者也运用 Sr/Cu 反映沉积时期的古气候条件 (林晓慧等, 2019; 马万里等, 2021)。当 Sr/Cu 大于 10 时, 指示炎热干旱气候, 反之则气候偏潮湿, 部分学者以 7 为界 (唐勇等, 2022; 徐银波等, 2022)。J10025 井芦草沟组样品的 Sr/Cu 值分布范围较广 (1.91~52.23), 其中上段比值普遍小于 10 (平均值 6.83), 表明气候偏潮湿; 下段 Sr/Cu 值明显较大 (平均值 26.25), 最高可达 52.23, 指示炎热干旱的环境。然而, 芦草沟组个别样品中白云石、方解石等碳酸盐矿物 Sr 含量相对较高, 会对指标的准确性产生一定干扰 (Wei and Algeo, 2020)。因此将 C 值与 Sr/Cu 两个指标相结合作交会图, 从而更准确地反映芦草沟组上下段古气候特征。芦草沟组总体上为干旱—半干旱的沉积环境, 在沉积历史时期由下段极度干旱的气候逐渐转变为上段半干旱—半潮湿的气候。

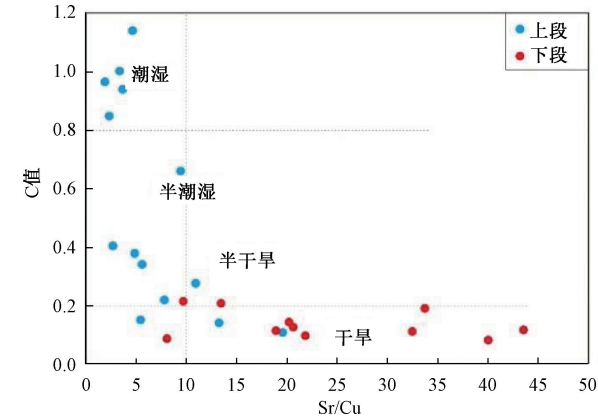


图 6 J10025 井芦草沟组 C 值-Sr/Cu 交会图

Fig. 6 Crossplot of C-value and Sr/Cu of the Lucaogou Formation in Well J10025

化学蚀变指数 (CIA) 是判断化学风化程度和古气候条件的一个有效指标, 且数值越大, 化学

风化程度越强、气候越潮湿 (McLennan, 1993; Xie et al., 2021), 计算公式如下:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O)] \times 100 \quad (2)$$

其中, CaO^* 表示 CaO 在岩石硅酸盐成分中的含量, 并用以下公式进行校正: $CaO' = CaO - (10/3) P_2O_5$, 如果 $CaO' > Na_2O$, 那么 $CaO^* = Na_2O$; 否则 $CaO^* = CaO'$ 。芦草沟组下段 CIA 分布在 46~52, 指示中等的化学风化程度、干旱气候; 上段 CIA 相对较高 (44~79), 指示中等—强烈的化学风化程度、半干旱—半潮湿气候。此外, 在岩心观察时, 芦草沟组部分样品中发育的干裂碎片、泄水构造等也能指示干旱快速沉积的环境条件, 与地球化学指标表征结果一致。

4.1.2 古盐度

在湖泊盆地中, 古盐度是沉积环境分析的一个重要内容。国内外学者运用矿物学、地球化学与古生物学等多种手段进行古盐度重建, 包括石膏、岩盐等蒸发岩矿物、锶钡比值、碳氧同位素、生物标志化合物等 (Zhang et al., 2017; Wei and Algeo, 2020)。此次研究主要采用地球化学的方法, 运用锶钡比值 (Sr/Ba)、硼镓比值 (B/Ga) 以及伽马蜡烷指数 (GI) 三个指标对芦草沟组古湖泊水体盐度条件进行判断。

锶与钡化学性质相似, 但锶元素迁移能力更强。在水体盐度较低时, Ba^{2+} 会首先与 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 结合形成沉淀, 而 Sr^{2+} 会继续迁移, 随着盐度不断增大, Sr^{2+} 才开始沉淀 (史忠生等, 2003; 陶树等, 2009)。因此, 可以用 Sr/Ba 值反映水体盐度, 当 $Sr/Ba < 0.2$ 时, 指示淡水环境; 当 $0.2 < Sr/Ba < 0.5$ 时, 指示微咸水环境; 当 $Sr/Ba > 0.5$ 时, 水体为咸水环境 (Rohling, 2000; Wei and Algeo, 2020)。

J10025 井芦草沟组样品的 Sr/Ba 值普遍大于 0.6, 反映芦草沟组整体盐度偏高, 为咸化湖泊环境。其中, 芦草沟组上段 Sr/Ba 介于 0.26~2.16 (平均值 0.96), 水体盐度略低; 而芦草沟组下段 Sr/Ba 较大, 介于 1.15~4.38 (平均值 2.10), 表明下段水体更加咸化。一些学者运用 B/Ga 指示水体盐度: 当 B/Ga<2 时, 指示淡水环境, 2<B/Ga<6 指示微咸水环境, 比值大于 6 时则为咸水环境 (钟红利等, 2012; Wang et al., 2017)。研究中, 芦草沟组上段 B/Ga 除顶部数据较大外, 其他介于 4.35~13.42, 指示微咸水—咸水环境; 而下段比值普遍较大 (8.72~19.85), 指示咸化环境。

伽马蜡烷在某种程度上与水体分层的咸化环境密切相关, 因此可以采用伽马蜡烷指数 (GI) 指示盐度条件, 一般情况下, GI 数值越大, 水体盐度越高 (Schoell et al., 1994; 冯伟平等, 2020)。芦草沟组伽马蜡烷指数总体比较稳定, 分布在 0.10~0.26, 其中上段数值普遍较小 (平均 0.19), 下段数值则相对较大 (平均 0.23), 指示水体分层的较咸水环境, 且下段盐度更高 (图 7), 与 Sr/Ba、B/Ga 参数的指示结果一致。此外, 芦草沟组发育的方解石型石膏假晶也可以作为咸化湖泊环境的证据。

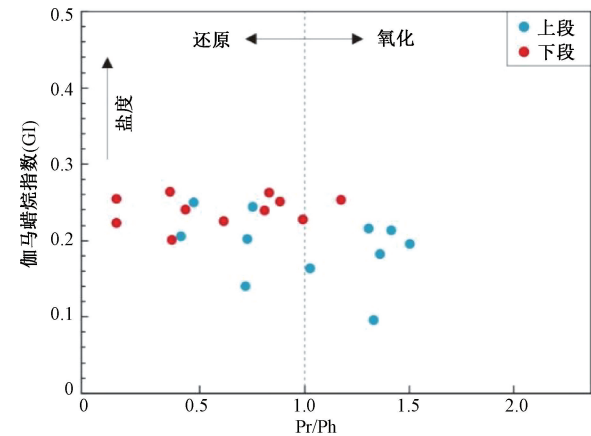


图 7 J10025 井芦草沟组 Pr/Ph 与 GI 交会图
Fig. 7 Crossplot of Pr/Ph and GI of the Lucaogou Formation in Well J10025

4.1.3 氧化还原条件

在细粒碎屑岩中, 判断沉积时期水体氧化还原条件的指标有很多, 包括黄铁矿、生物化石等沉积学证据, 微量元素地化指标以及一些生物标志化合物等 (Algeo and Liu, 2020; 施辉等, 2022)。选取 V/Cr、V/(V+Ni) 两个无机地化指标以及姥植比 (Pr/Ph) 和 β -胡萝卜烷指数 (β -胡

萝卜烷/ C_{max}) 两个有机地化指标, 来综合反映芦草沟组沉积历史时期的氧化还原条件 (表 4)。

表 4 J10025 井芦草沟组氧化还原条件指标
Table 4 Paleo-redox proxies of the Lucaogou Formation in Well J10025

层位	氧化还原指标			
	V/Cr	V/(V+Ni)	Pr/Ph	β -胡萝卜烷指数
上段	0.18~3.27	0.29~0.88	0.47~1.50	1.19~66.47
	1.85	0.62	1.00	21.84
下段	0.54~4.87	0.46~0.85	0.19~1.14	2.86~34.69
	3.09	0.77	0.64	10.01
芦草沟组	0.18~4.87	0.29~0.88	0.19~1.50	1.19~66.47
	2.42	0.69	0.82	15.93

注: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$

V、Cr、Ni、Mo、U 等是氧化还原敏感元素, 在不同的氧化环境条件下以不同的价态形式存在, 从而表现出明显的地球化学性质差异。在氧化环境中, 这些元素一般以高价水溶态的形式存在, 在还原环境中则以低价形式与其他元素或有机质结合, 以络合物的形式赋存于沉积物中 (Algeo et al., 2011; 胡俊杰等, 2017)。在还原条件下, V 较易被吸附而沉淀, Cr、Ni 则相对较易富集, 因此可以利用 V/Cr、V/(V+Ni) 有效判断水体氧化还原条件。研究表明, V/Cr<2 时指示氧化环境, 2<V/Cr<4.25 时指示贫氧环境, V/Cr>4.25 指示缺氧环境; V/(V+Ni) 值在 0.84~0.89 时指示水体强烈分层的还原环境, 介于 0.6~0.84 时指示水体分层一般的缺氧环境, 介于 0.46~0.6 时指示水体分层较弱的贫氧环境 (Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994; Tribovillard et al., 2006)。J10025 井岩心样品的 V/Cr 分布在 0.18~4.87 之间, 上段除个别数据较小外普遍大于 2, 而下段 V/Cr 则普遍偏大 (平均值 3.09); V/(V+Ni) 比值分布在 0.29~0.88, 上段平均为 0.62, 下段平均为 0.77。以上无机地化指标都表明, 芦草沟组总体上为贫氧—缺氧的沉积环境, 且下段还原性更强。

姥鲛烷和植烷来源于叶绿素中植基侧链的演化, 当沉积水体为氧化时植基侧链形成姥鲛烷, 缺氧时形成植烷, 因此可以用姥植比 (Pr/Ph) 作为氧化还原度的指标 (Peters et al., 2005; 马中良等, 2020)。芦草沟组的姥植比 (Pr/Ph) 变化范围较大 (0.19~1.50), 其中上段数值介于 0.47~1.50 (平均 1.00), 下段介于 0.19~1.14 (平均

0.64), 表明芦草沟组的沉积水体总体上处于还原环境, 且下段还原性相对更强 (图 7)。β-胡萝卜素来源于胡萝卜素, 胡萝卜素在浮游生物、藻类、高等植物等古生物体中广泛存在, 当沉积水体还原性强时形成 β-胡萝卜素并被保存, 所以 β-胡萝卜素指数为含盐的缺氧古沉积环境的重要指标 (Mukhopadhyay and Gormly, 1984)。芦草沟组 β-胡萝卜素指数在上段较小, 分布在 1.19~66.47 (平均 21.84), 下段数值相对较大, 分布在 2.86~34.69 (平均 10.01), 表明芦草沟组下段还原性更强。

4.1.4 古水深

元素在沉积物中的聚散与沉积时期的古水深密切相关。由滨岸向深海过渡, Fe、Mn、P、Co、Ni、Ca、Zn 等元素含量不断增加。其中, Fe 易氧化, 多在近岸区聚集, Mn 相对 Fe 较稳定, 能在远岸区聚集。因此, 可以利用 Mn/Fe 反映水深变化, 研究表明两者比值与古水深呈正相关关系, 且比值大于 0.01 时指示深湖环境 (张永生等, 2003; 王欢等, 2022)。J10025 井芦草沟组岩心样品的 Mn/Fe 介于 0.01~0.05 之间, 数值波动较小, 总体上表明吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积时水体较深。

为了深入研究芦草沟组沉积时期湖平面的变化规律, 研究采用钴元素含量推算岩石的沉积速率, 进而计算湖泊古水深。具体计算公式如下 (吴智平和周瑶琪, 2000; 王峰等, 2017):

$$V_s = V_0 \times N_{Co} / (S_{Co} - t \times T_{Co}) \tag{3}$$

$$t = S_{La} / N_{La} \tag{4}$$

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

其中, V_s 为沉积速率; V_0 为正常湖泊沉积速率, 0.2 mm/a; N_{Co} 为正常湖泊沉积物中钴的丰度, 20 μg/g; S_{Co} 为样品中钴的丰度; t 为物源钴对样品的贡献值; T_{Co} 为陆源碎屑岩中钴的丰度, 4.68 μg/g; S_{La} 为样品中镧的丰度; N_{La} 为陆源碎屑岩中镧的平均丰度, 38.99 μg/g; h 为古水深, m。

Co 元素计算结果显示 (表 5), 芦草沟组在沉积时期古湖泊水深范围在 3.36~62.69 m, 下段水体相对较浅, 平均水深 14.67 m; 上段水体相对较深, 尤其在上段顶部古水深普遍大于 30 m。总体上, 芦草沟组表现为自下而上水体逐渐变深的特征, 这一结果与已有研究中报道的二叠纪湖侵事件相对应 (Liu et al., 2022)。

4.1.5 古生产力

古生产力在有机质富集和烃源岩生烃潜力方

表 5 Co 元素计算 J10025 井芦草沟组古水深参数
Table 5 Paleo-water depth parameters of the Lucaogou Formation by Co calculation

层位	样品	深度/ m	$S_{Co}/$ (μg/g)	$S_{La}/$ (μg/g)	t	$V_s/$ (mm/a)	$h/$ m
上段	J-26	3499.5	10.40	13.90	0.36	0.46	31.11
	J-25	3506.8	4.61	20.30	0.52	1.84	3.86
	J-24	3515.0	12.20	31.60	0.81	0.48	29.39
	J-23	3523.7	13.20	22.90	0.59	0.38	40.73
	J-22	3526.1	16.70	26.60	0.68	0.30	59.85
	J-21	3530.8	15.90	16.40	0.42	0.29	62.69
	J-20	3547.8	12.70	31.40	0.81	0.45	32.18
	J-19	3569.2	10.60	19.50	0.50	0.48	28.62
	J-18	3570.5	5.21	17.90	0.46	1.31	6.46
	J-17	3574.2	7.82	13.80	0.35	0.65	18.45
	J-16	3576.6	7.66	17.00	0.44	0.71	16.06
	J-15	3595.4	5.21	26.90	0.69	2.02	3.36
	J-14	3603.1	6.34	14.90	0.38	0.88	11.71
下段	J-13	3613.7	9.76	17.90	0.46	0.53	25.32
	J-12	3624.3	6.80	22.80	0.58	0.98	9.87
	J-11	3629.2	7.29	17.00	0.44	0.76	14.50
	J-10	3664.3	5.82	18.60	0.48	1.12	8.19
	J-09	3679.5	4.46	12.40	0.32	1.35	6.18
	J-08	3681.6	6.20	19.30	0.49	1.03	9.23
	J-07	3684.5	4.84	10.60	0.27	1.12	8.12
	J-06	3685.5	8.63	37.70	0.97	0.97	10.03
	J-05	3695.3	11.01	10.55	0.27	0.41	36.67
	J-04	3696.9	9.46	17.10	0.44	0.54	24.31
	J-03	3699.9	7.16	21.00	0.54	0.86	12.05
	J-02	3701.3	10.50	18.40	0.47	0.48	28.78
	J-01	3708.3	5.48	16.00	0.41	1.12	8.10

面起着重要的作用。国内外学者采用不同的地球化学指标来反映古生产力大小, 包括总有机碳含量、碳和氮同位素、生物标志化合物以及微量元素丰度 (铜、钡、锌等; Jiang et al., 2020; 罗锦昌等, 2022)。此次研究采用 TOC 含量、P 含量、P/Ti 比值三个参数来表征芦草沟组的古生产力条件 (表 6)。

总有机碳含量在沉积物有机质中占比最大, 是表征古生产力最直接的指标。J10025 井芦草沟组的 TOC 含量变化范围较大, 分布在 1.81%~19.60%, 上段平均值为 8.90%, 下段平均值为 3.99%, 指示相对较高的古生产力条件。其中, 芦草沟组上段底部的 TOC 含量普遍较高, 与上甜点段对应。

沉积物中磷元素的含量及分布特征与烃源岩初级生产力和有机质的供给密切相关 (Tribouvillard et al., 2006)。芦草沟组上段磷元素含量较高 (最大 0.20%), 反映营养物质的大量输入, 这可能是由于二叠纪中期间歇性的火山喷发释放出大量富

表 6 J10025 井芦草沟组古水深、古生产力与碎屑输入指标

Table 6 Paleo-water depth, paleo-productivity and detrital input proxies of the Lucaogou Formation in Well J10025

层位	古水深/m			古生产力		碎屑输入
	Mn/Fe 分析	Co 分析	TOC 含量/%	P 含量/%	P/Ti	Al ₂ O ₃ /TiO ₂
上段	0.01~0.04	3.36~62.69	1.81~19.60	0.01~0.20	0.05~1.05	19~29
	0.03	26.41	8.90	0.08	0.38	24
下段	0.03~0.05	6.18~36.67	1.95~7.87	0.02~0.07	0.09~0.37	19~26
	0.04	14.67	3.99	0.04	0.24	22
芦草沟组	0.01~0.05	3.36~62.69	1.81~19.60	0.01~0.20	0.05~1.05	19~29
	0.03	20.99	6.63	0.06	0.31	23

注：最小值~最大值
平均值

含营养离子的火山灰，从而引发了芦草沟组上段湖泊水体的富营养化现象（Pan et al., 2020）。钛（Ti）主要来自陆源碎屑，因此常用 P/Ti 消除陆源碎屑的影响，从而更好地表征古湖泊营养状况。在表 6 中，芦草沟烃源岩上段 P/Ti 相对较高（平均值为 0.38），下段则相对较低（平均值为 0.24），这些指标都表明芦草沟组上段是一种具有较高生产力的富营养化环境，下段生产力则相对较低。

4.2 古环境演化特征

根据 J10025 井芦草沟组岩心样品的地球化学古环境指标可以分析得出：芦草沟组总体上表现

为干旱—半干旱的咸化湖泊沉积环境，沉积时期水体较深，且为贫氧—缺氧的状态。其中，芦草沟组上段整体为半干旱气候、微咸水环境，还原性相对较弱，水体较深，但环境波动较大；芦草沟组下段环境比较稳定，气候极度干旱，盐度较高，还原性相对较强，且水体较浅。在 J10025 井芦草沟组古环境演化图中（图 8），古盐度指标与古气候指标变化趋势相对一致，即古气候指标 C 值与 Sr/Cu 较大时，对应的古盐度参数 Sr/Ba、B/Ga 与 GI 也相对较高，表明同一沉积时期气候干旱则盐度偏高，气候潮湿则盐度偏低。芦草沟组由

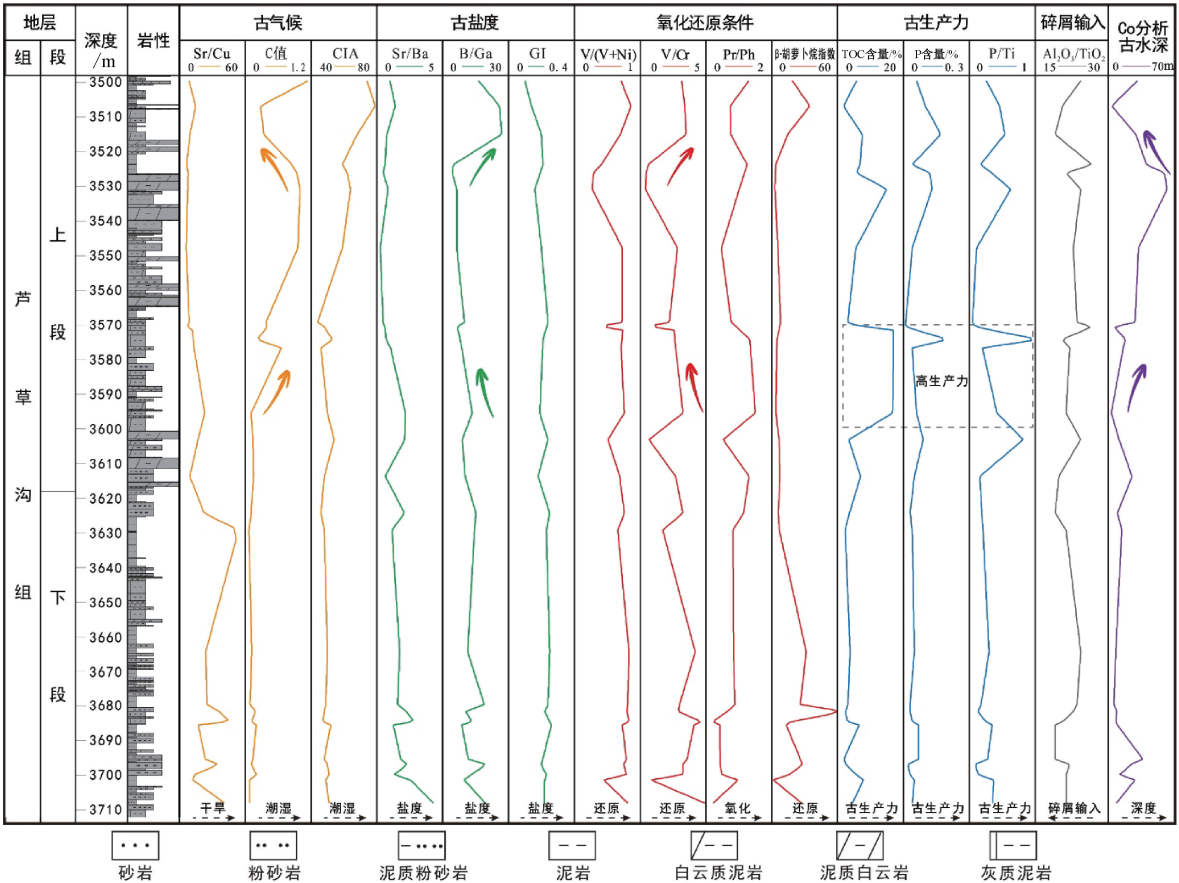


图 8 J10025 井芦草沟组古环境演化特征
Fig. 8 Evolution of paleoenvironment of the Lucaogou Formation in Well J10025

下段咸水湖泊环境转变为上段盐度较低的微咸水环境, 气候干旱程度也随之减弱。除此之外, 表征水体氧化还原条件的两个无机地化指标 V/Cr 、 $V/(V+Ni)$ 与两个有机地化指标 Pr/Ph 、 β -胡萝卜素/ C_{max} 也大致同步, 指示芦草沟组为贫氧—缺氧的环境。但需要注意的是, 一些岩心样品的生物标志化合物中并未检测到 β -胡萝卜素, 所以仅将高 β -胡萝卜素/ C_{max} 值作为缺氧还原环境的指示标志。

结合古环境演化图 (图 8), 将吉木萨尔凹陷芦草沟组上下段沉积环境作详细对比研究: 芦草沟组下段为极度干旱、缺氧还原的咸化湖相环境, 指示古环境信息的指标变化幅度普遍较小, 表明下段环境演化相对稳定; 与之相比, 芦草沟组上段为半干旱微咸水的还原环境, 古环境参数波动性较大, 且呈现出一定的阶段性特征。此次研究将芦草沟组上段古环境的演化又细分为三个阶段: ①沉积演化早期, 芦草沟组主要表现为气候干旱、缺氧还原的咸水浅湖环境, 主要沉积砂岩、粉砂

岩与白云质泥岩; ②沉积演化中期, 芦草沟组气候偏潮湿, 盐度开始降低, 还原性减弱, 为半深湖—深湖环境, 主要沉积白云质泥岩与砂屑白云岩; ③沉积演化晚期, 气候干旱程度又逐步加深, 水体盐度变高, 湖平面下降, 重新转变为缺氧还原的环境, 主要沉积泥岩与白云质粉砂岩。这一阶段性变化趋势可能与芦草沟组沉积历史时期的大规模气候变化、火山活动以及湖盆周边的构造运动等因素密切相关 (Jiang et al., 2020; Pan et al., 2020)。

4.3 有机质富集机理

研究表明, 烃源岩中有机质的富集受多种因素共同影响, 主要包括初级生产力大小、有机质的保存条件以及稀释速率三方面因素 (罗锦昌等, 2022; Zhao et al., 2023)。为了深入探究吉木萨尔凹陷芦草沟组有机质的富集机理, 相应开展古环境指标与 TOC 含量拟合分析, 确定芦草沟组有机质富集的主控因素 (图 9)。

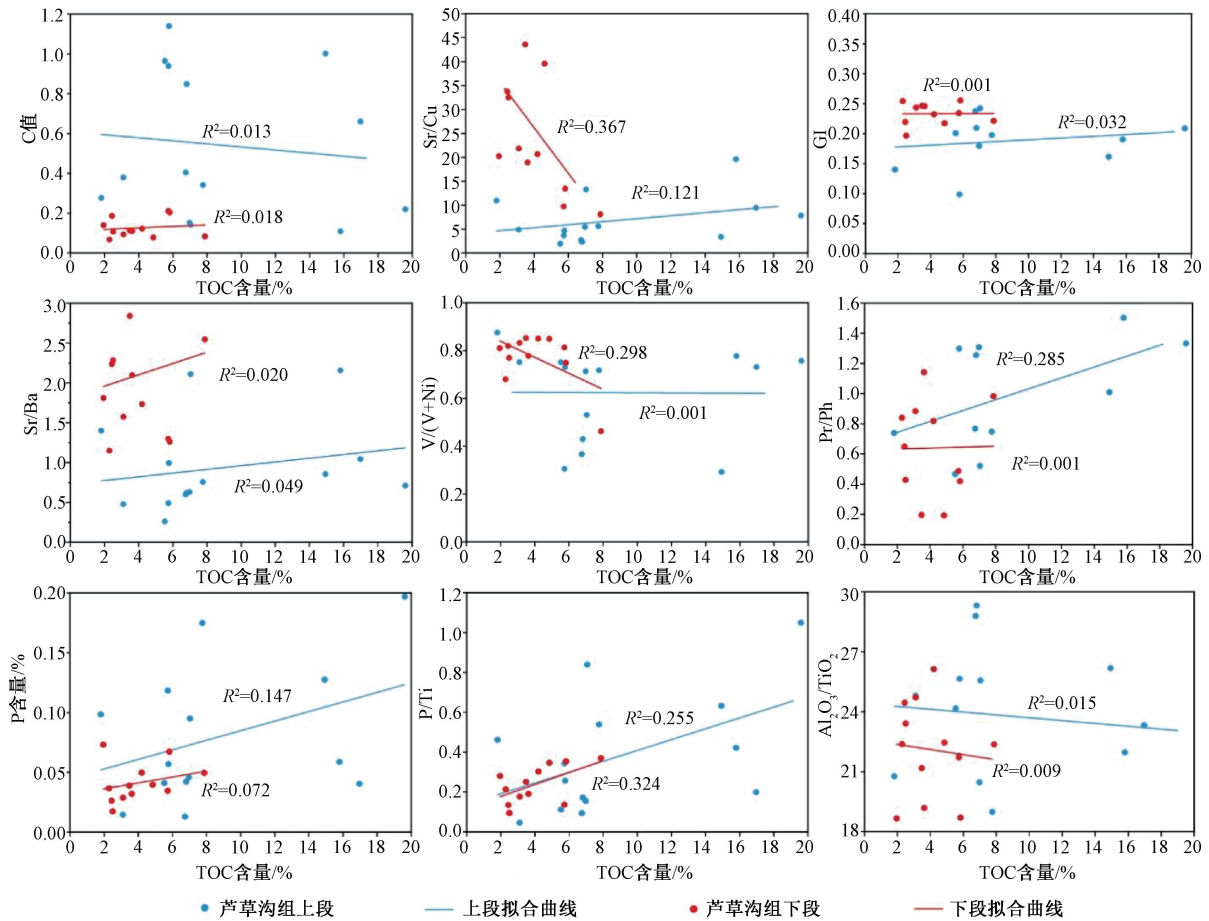


图 9 J10025 井芦草沟组古环境指标与 TOC 含量相关性分析

Fig. 9 Correlation analyses between paleo-environment indicators and TOC content of the Lucaogou Formation in Well J10025

古气候条件一般通过影响藻类以及陆生植物的生长速率控制生产力大小，从而间接影响有机质的聚集。此次研究中 C 值与 TOC 含量无明显相关性 ($R^2 < 0.1$)，Sr/Cu 与 TOC 拟合相关性较差，表明古气候条件对芦草沟组有机质的富集影响比较有限。有机质保存条件受古盐度、水体分层、氧化还原条件等因素影响，一般情况下，水体分层的还原环境有利于有机质的保存。然而，在此次拟合分析中，古盐度指标 Sr/Ba、GI 以及氧化还原条件 $V/(V+Ni)$ 、Pr/Ph 与 TOC 含量相关性都比较差，表明古盐度和氧化还原条件也不是芦草沟组有机质富集的主控因素。结合芦草沟组的古环境特征分析，该现象可能是因为芦草沟组沉积时底层水体处于比较稳定的缺氧还原环境，且水体较为咸化，这种特殊的环境有利于有机质的良好保存 (张逊等, 2018)。

虽然 P 含量与 TOC 含量的拟合相关性较差，但 P/Ti 与 TOC 含量呈较好的正相关关系 ($R^2 = 0.255$, $R^2 = 0.324$)，表明初级生产力大小是芦草沟组有机质富集的主控因素。初级生产力大小与有机质来源密切相关，研究表明芦草沟组有机质主要来源于水生藻类与陆生高等植物，且芦草沟组上段藻类输入较多，高等植物则占据了下段有机质的主要来源 (Su et al., 2019)。芦草沟组上段 P 元素的大量输入，反映了一种富营养化的水体环境，有利于藻类勃发，从而导致上段 TOC 含量较高。此外，有机质的稀释速率主要受碎屑输入影响，常用 Al_2O_3/TiO_2 表示，两者比值越小，碎屑输入越多 (Zhao et al., 2023)。芦草沟组的 Al_2O_3/TiO_2 波动性较小 (表 6)，反映稳定的陆源碎屑供给量，且 Al_2O_3/TiO_2 与 TOC 含量拟合较差，表明有机质稀释速率对芦草沟组有机质富集影响较小。

5 结论

(1) 吉木萨尔凹陷芦草沟组岩石类型多样，上段岩性以泥岩、白云质泥岩和泥质粉砂岩为主，可见石英、长石和白云石等矿物；下段以砂岩、白云质泥岩、灰质泥岩为主，部分样品可见方解石脉。此外，岩心样品中还发育有石膏假晶、泄水构造与干裂碎片等沉积构造。

(2) 芦草沟组在沉积历史时期总体上为干旱—半干旱的咸化湖泊沉积环境，其中，芦草沟

组上段整体为半干旱气候、微咸水环境，还原性相对较弱，水体较深，生产力较高，但环境波动较大；芦草沟组下段环境比较稳定，气候极度干旱，盐度较高，还原性相对较强，水体较浅，生产力较低。

(3) 有机质的保存条件以及稀释速率对芦草沟组有机质富集影响有限，而初级生产力大小是芦草沟组有机质富集的主控因素。芦草沟组上段 P 元素的大量输入，反映了一种富营养化的水体环境，有利于藻类勃发，从而导致上段 TOC 含量较高。

References

- ALGEO T J, KUWAHARA K, SANO H, et al., 2011. Spatial variation in sediment fluxes, redox conditions, and productivity in the Permian-Triassic Panthalassic Ocean [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308 (1-2): 65-83.
- ALGEO T J, LIU J S, 2020. A re-assessment of elemental proxies for paleoredox analysis [J]. *Chemical Geology*, 540: 119549.
- BOYNTON W V, 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 2: 63-114.
- CHENG L M, LI Y F, LU M, et al. 2022. Identification method of shale deformation structure based on whole core CT scanning: a case study of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Xinjiang oil & Gas*, 18 (3): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- ESKENAZY G M, 1987. Rare earth elements in a sampled coal from the Pirin deposit, Bulgaria [J]. *International Journal of Coal Geology*, 7 (3): 301-314.
- FANG S H, XU H M, SONG Y, et al., 2005. Characteristics and evolution of the composite petroleum system in Jimsar depression, eastern Junggar Basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26 (3): 259-264. (in Chinese with English abstract)
- FENG W P, WANG F Y, WANG Z X, et al., 2020. Characteristics and origin of crude oils in the Wulanhua sag [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 932-940. (in Chinese with English abstract)
- GE H K, CHEN Y K, TENG W W, et al., 2021. Micro-Mechanism of Production and Method of Enhanced Oil Recovery for Jimsar Shale Oil [J]. *Xinjiang oil & Gas*, 17 (3): 84-90 (in Chinese with English abstract).
- GUO X G, HE W J, YANG S, et al., 2019. Evaluation and application of key technologies of “Sweet Area” of shale oil in Junggar Basin: case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 30 (8): 1168-1179. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- HU J J, MA Y S, WANG Z X, et al., 2017. Palaeoenvironment and palaeoclimate of the middle to late Jurassic revealed by geochemical records in northern margin of Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 19 (3): 480-490. (in Chinese with English abstract)
- JIA C Z, 2017. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory [J]. Petroleum Exploration and Development, 44 (1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Y H, HOU D J, LI H, et al., 2020. Impact of the paleoclimate, paleoenvironment, and algae bloom: organic matter accumulation in the lacustrine Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar basin, NW China [J]. Energies, 13 (6): 1488.
- JIANG Z F, DING X J, WANG Z Q, et al., 2020. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 32 (6): 109-119. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Z X, ZHANG W Z, LIANG C, et al., 2014. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 35 (1): 184-196. (in Chinese with English abstract)
- JIN Z J, ZHU R K, LIANG X P, et al., 2021. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 48 (6): 1276-1287. (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.
- KUANG L C, TANG Y, LEI D W, et al., 2012. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 39 (6): 657-667. (in Chinese with English abstract)
- LIAO K X, WANG M A, PENG H, et al., 2021. Analysis of Factors Affecting the Dehydration Effect of Shale Gas Triethylene Glycol Dehydration Unit [J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 41 (5): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- LIN X H, ZHAN Z W, ZOU Y R, et al., 2019. Elemental geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern Junggar Basin and its depositional environmental implications [J]. Geochimica, 48 (1): 67-78. (in Chinese with English abstract)
- LIU H, CAO G, 2022. Opportunities and challenges for scientific and technological innovation and development of oil and gas production engineering in the new era [J]. Oil Drilling & Production Technology, 44 (5): 529-539. DOI: 10.13639/j. odpt. 2022.05.001. (in Chinese with English abstract)
- LIU D D, FAN Q Q, ZHANG C, et al., 2022. Paleoenvironment evolution of the Permian Lucaogou Formation in the southern Junggar Basin, NW China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 603: 111198.
- LUO J C, TIAN J J, MA J H, et al., 2022. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of Permian Lucaogou Formation in Jiye-1 well area, Jimsar Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 34 (5): 73-85. (in Chinese with English abstract)
- MA W L, JIANG X Q, LI X, et al., 2021. Geochemical characteristics and paleoenvironment paleoclimate significance of mudstone in the Shang-Gan-Chai-Gou Formation at the northwestern margin of Qaidam Basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40 (5): 1166-1180. (in Chinese with English abstract)
- MA Z L, TAN J Q, ZHAO H, et al., 2020. Organic geochemistry and geological significance of oil seepage from the Devonian of Luquan area, Yunnan Province [J]. Journal of Geomechanics, 26 (6): 952-960. (in Chinese with English abstract)
- MCLENNAN S M, 1993. 100th Anniversary symposium: evolution of the earth's surface || weathering and global denudation [J]. Journal of Geology, 101 (2): 295-303.
- MCLENNAN S M, 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2 (4): 2000GC000109.
- MORADI A V, SARI A, AKKAYA P, 2016. 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, 341: 289-303.
- MUKHOPADHYAY P K, GORMLY J R, 1984. Hydrocarbon potential of two types of resinite [J]. Organic Geochemistry, 6: 439-454.
- PAN Y S, HUANG Z L, LI T J, et al., 2020. Environmental response to volcanic activity and its effect on organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation of the Malang Sag, Santanghu Basin, Northwest China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 560: 110024.
- PENG X F, WANG L J, JIANG L P, 2012. Geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin and its environmental implications [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 31 (2): 121-127, 151. (in Chinese with English abstract)
- PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M, 2005. The biomarker guide [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- QU C S, QIU L W, YANG Y Q, et al., 2017. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonatic rock from Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, NW China and their paleolimnological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 91 (3): 605-616. (in Chinese with English abstract)
- REN X C, XIU J L, LIU L, et al., 2023. Late Paleozoic-Mesozoic structural style, deformation sequence, and formation process and mechanism of the checkboard structure in the eastern Junggar Basin [J]. Journal of Geomechanics, 29 (2): 155-173. (in Chinese with English abstract)
- ROHLING E J, 2000. Paleosalinity: confidence limits and future applications [J]. Marine Geology, 163 (1-4): 1-11.
- SCHOELL M, HWANG R J, CARLSON R M K, et al., 1994. Carbon isotopic composition of individual biomarkers in gilsonites (Utah) [J]. Organic Geochemistry, 21 (6-7): 673-683.
- SHI H, LI Z X, YANG Y Y, et al., 2022. The factors influencing the enrichment of organic matters in the Carboniferous source rocks, Ounan depression, eastern Qaidam basin [J]. Journal of

- Geomechanics, 28 (2): 203-216. (in Chinese with English abstract)
- SHI Z S, CHEN K Y, SHI J, et al., 2003. Feasibility analysis of the application of the ratio of strontium to barium on the identifying sedimentary environment [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 10 (2): 12-16. (in Chinese with English abstract)
- SI C S, CHEN N G, YU C F, et al., 2013. Sedimentary characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 35 (5): 528-533. (in Chinese with English abstract)
- SU Y, ZHA M, DING X J, et al., 2019. Petrographic, palynologic and geochemical characteristics of source rocks of the Permian Lucaogou formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, NW China: origin of organic matter input and depositional environments [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 183: 106364.
- TANG Y, ZHENG M L, WANG X T, et al., 2022. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 33 (5): 677-692. (in Chinese with English abstract)
- TAO S, TANG D Z, ZHOU C Y, et al., 2009. Element Geochemical Characteristics of the Lower Assemblage Hydrocarbon Source Rocks in Southeast Sichuan-Central Guizhou (Chuandongnan-Qianzhong) Region and Its Periphery Areas and Their Implications to Sedimentary Environments [J]. Geology in China, 36 (2): 397-403. (in Chinese with English abstract)
- TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al., 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. Chemical Geology, 232 (1-2): 12-32.
- WANG F, LIU X C, DENG X Q, et al., 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 H, MA S Z, NIU D L, et al., 2022. Elemental geochemical characteristics of fine grained sedimentary rocks of the Lucaogou Formation in the western Jimusar Sag of the Junggar Basin and their paleo-environmental significances [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 41 (1): 143-150. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z W, FU X G, FENG X L, et al., 2017. Geochemical features of the black shales from the Wuyu Basin, southern Tibet: implications for palaeoenvironment and palaeoclimate [J]. Geological Journal, 52 (2): 282-297.
- WEI W, ALGEO T J, 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 287: 341-366.
- WU H G, HU W X, CAO J, et al., 2016. A unique lacustrine mixed dolomitic-clastic sequence for tight oil reservoir within the middle Permian Lucaogou Formation of the Junggar Basin, NW China: reservoir characteristics and origin [J]. Marine and Petroleum Geology, 76: 115-132.
- WU X Z, HE D F, YANG D S, et al., 2012. Structural character and hydrocarbon accumulation in the Luliang uplift, Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 47 (1): 73-91. (in Chinese with English abstract)
- WU Z P, ZHOU Y Q, 2000. Using the characteristic elements from meteoritic must in strata to calculate sedimentation rate [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18 (3): 395-399. (in Chinese with English abstract)
- XIE W Q, TAN J Q, WANG W H, et al., 2021. Middle Jurassic lacustrine source rocks controlled by an aridification event: a case study in the northern Qaidam Basin (NW China) [J]. International Journal of Coal Geology, 242: 103779.
- XU Y B, SUN P C, LI Z, et al., 2022. The geochemical characteristics and metallogenic condition of Permian Lucaogou Formation oil shale in Jimsar, Junggar Basin, Xinjiang [J]. Geology in China, 49 (1): 311-323. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J C, LIN L M, LI Y X, et al., 2012. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 19 (5): 322-331. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S, LIU Y Q, JIAO X, et al., 2018. Sedimentary environment and Formation mechanism of dolomitic rocks in the middle Permian Lucaogou Formation, Jimusar Depression, Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20 (1): 33-48. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W W, HAN C C, TIAN J J, et al., 2021. Sequence stratigraphy division and evolutionary features of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 33 (5): 45-58. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X, ZHUANG X G, TU Q J, et al., 2018. Depositional process and mechanism of organic matter accumulation of Lucaogou Shale in Southern Junggar Basin, Northwest China [J]. Earth Science, 43 (2): 538-550. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y S, YANG Y Q, QI Z X, et al., 2003. Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang Sag of Jiangnan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 5 (1): 29-35. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Y, HE Z L, JIANG S, et al., 2017. Marine redox stratification during the early Cambrian (ca. 529~509 Ma) and its control on the development of organic-rich shales in Yangtze Platform [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 18 (6): 2354-2369.
- ZHAO D F, GUO Y H, WANG G, et al., 2023. Organic matter enrichment mechanism of Youganwo Formation oil shale in the Maoming Basin [J]. Heliyon, 9 (2): e13173.
- ZHAO W Z, HU S Y, HOU L H, et al., 2020. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 47 (1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- ZHI D M, SONG Y, HE W J, et al., 2019. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in middle-lower Permian, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 40 (4): 389-401. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG H L, PU R H, YAN H, et al., 2012. Analysis on paleosalinity and paleoenvironment of late Paleozoic in Tarim Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 42 (1): 74-81. (in Chinese with English abstract)

ZOU C N, YANG Z, CUI J W, 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of Nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 40 (1): 14-26. (in Chinese with English abstract)

ZOU C N, PAN S Q, JING Z H, et al., 2020. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 41 (1): 1-12. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

程奎明, 李一凡, 吕明, 等, 2022. 基于全直径岩心 CT 扫描的页岩变形构造识别方法: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例 [J]. 新疆石油天然气, 18 (3): 19-24.

方世虎, 徐怀民, 宋岩, 等, 2005. 准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷复合含油气系统特征及其演化 [J]. 地球学报, 26 (3): 259-264.

冯伟平, 王飞宇, 王宗秀, 等, 2020. 乌兰花凹陷原油特征及成因 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 932-940.

葛洪魁, 陈玉琨, 滕卫卫, 等, 2021. 吉木萨尔页岩油微观产出机理与提高采收率方法探讨 [J]. 新疆石油天然气, 17 (3): 84-90.

郭旭光, 何文军, 杨森, 等, 2019. 准噶尔盆地页岩油“甜点区”评价与关键技术应用: 以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例 [J]. 天然气地球科学, 30 (8): 1168-1179.

胡俊杰, 马寅生, 王宗秀, 等, 2017. 地球化学记录揭示的柴达木盆地北缘地区中一晚侏罗世古环境与古气候 [J]. 古地理学报, 19 (3): 480-490.

贾承造, 2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义 [J]. 石油勘探与开发, 44 (1): 1-11.

姜在兴, 张文昭, 梁超, 等, 2014. 页岩油储层基本特征及评价要素 [J]. 石油学报, 35 (1): 184-96.

蒋中发, 丁修建, 王忠泉, 等, 2020. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组烃源岩沉积古环境 [J]. 岩性油气藏, 32 (6): 109-119.

金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等, 2021. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题 [J]. 石油勘探与开发, 48 (6): 1276-1287.

匡立春, 唐勇, 雷德文, 等, 2012. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力 [J]. 石油勘探与开发, 39 (6): 657-667.

廖柯熹, 王敏安, 彭浩, 等. 页岩气三甘醇脱水装置脱水效果影响因素分析 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2021, 41 (5): 1-8.

林晓慧, 詹兆文, 邹艳荣, 等, 2019. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境意义 [J]. 地球化学, 48 (1): 67-78.

刘合, 曹刚. 新时期采油采气工程科技创新发展的挑战与机遇, 2022 [J]. 石油钻采工艺, 44 (5): 529-539. DOI: 10.13639/j.odpt.2022.05.001.

罗锦昌, 田继军, 马静辉, 等, 2022. 吉木萨尔凹陷吉页1井区二叠系芦草沟组沉积环境及有机质富集机理 [J]. 岩性油气藏, 34 (5): 73-85.

马万里, 江小青, 李璇, 等, 2021. 柴达木盆地西北缘上干柴沟组泥岩地球化学特征与古环境古气候意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 40 (5): 1166-1180.

马中良, 谭静强, 赵晗, 等, 2020. 云南禄劝地区泥盆系油苗地球化学特征及地质意义 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 952-960.

彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍, 2012. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 31 (2): 121-127, 151.

曲长胜, 邱隆伟, 杨勇强, 等, 2017. 吉木萨尔凹陷芦草沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义 [J]. 地质学报, 91 (3): 605-616.

任新成, 修金磊, 刘林, 等, 2023. 准噶尔东部晚古生代—中生代构造样式、变形序列及棋盘格构造的形成过程与机制 [J]. 地质力学学报, 29 (2): 155-173.

施辉, 李宗星, 杨元元, 等, 2022. 柴东欧南凹陷石炭系烃源岩有机质富集的影响因素 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 203-216.

史忠生, 陈开远, 史军, 等, 2003. 运用铈钕比判定沉积环境的可行性分析 [J]. 断块油气田, 10 (2): 12-16.

斯春松, 陈能贵, 余朝丰, 等, 2013. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层沉积特征 [J]. 石油实验地质, 35 (5): 528-533.

唐勇, 郑孟林, 王霞田, 等, 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境 [J]. 天然气地球科学, 33 (5): 677-692.

陶树, 汤达祯, 周传祯, 等, 2009. 川东南-黔中及其周边地区下组合烃源岩元素地球化学特征及沉积环境意义 [J]. 中国地质, 36 (2): 397-403.

王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等, 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.

王欢, 马世忠, 牛东亮, 等, 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷西区芦草沟组细粒岩元素地球化学特征及古环境意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 41 (1): 143-150.

吴晓智, 何登发, 杨迪生, 等, 2012. 准噶尔盆地陆梁隆起构造特征与油气成藏 [J]. 地质科学, 47 (1): 73-91.

吴智平, 周瑶琪, 2000. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法 [J]. 沉积学报, 18 (3): 395-399.

徐银波, 孙平昌, 李昭, 等, 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔地区二叠系芦草沟组油页岩地球化学特征与成矿条件 [J]. 中国地质, 49 (1): 311-323.

张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等, 2012. 页岩油分类与评价 [J]. 地学前缘, 19 (5): 322-331.

张帅, 柳益群, 焦鑫, 等, 2018. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷中二叠统芦草沟组云质岩沉积环境及白云石成因探讨 [J]. 古地理学报, 20 (1): 33-48.

张文文, 韩长城, 田继军, 等, 2021. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组层序地层划分及演化特征 [J]. 岩性油气藏, 33 (5): 45-58.

张逊, 庄新国, 涂其军, 等, 2018. 准噶尔盆地南缘芦草沟组页岩的沉积过程及有机质富集机理 [J]. 地球科学, 43 (2): 538-550.

张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等, 2003. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境 [J]. 古地理学报, 5 (1): 29-35.

赵文智, 胡素云, 侯连华, 等, 2020. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界 [J]. 石油勘探与开发, 47 (1): 1-10.

支东明, 宋永, 何文军, 等, 2019. 准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向 [J]. 新疆石油地质, 40 (4): 389-401.

钟红利, 蒲仁海, 闫华, 等, 2012. 塔里木盆地晚古生代古盐度与古环境探讨 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 42 (1): 74-81.

邹才能, 杨智, 崔景伟, 等, 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策 [J]. 石油勘探与开发, 40 (1): 14-26.

邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等, 2020. 页岩油气革命及影响 [J]. 石油学报, 41 (1): 1-12.