

刘见通,唐建云,韦堂静,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东部芦草沟组古环境分析[J]. 西安科技大学学报, 2026, 46(2): 431-443.

LIU Jiantong, TANG Jianyun, WEI Tangjing, et al. Paleoenvironmental analysis of Lucaogou Formation in eastern Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 431-443.

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东部芦草沟组古环境分析

刘见通¹, 唐建云², 韦堂静¹, 苏玉新¹

(1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区 石油学院, 新疆 克拉玛依 834000;

2. 克拉玛依职业技术学院 石油工程学院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:为重建准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东部芦草沟组的古气候、古盐度及古氧化还原等古环境,选取芦草沟组20块样品进行岩石学特征分析和元素地球化学测试,采用Sr/Cu值、Rb/Sr值、CaO/(MgO * Al₂O₃)值、锶(Sr)元素含量、Sr/Ba值、Mg/Ca值、V/(V + Ni)值、V/Cr值、Cu/Zn值、Fe/Mn值、Rb/K值、P/Ti值和P/Al值等多种判别指标,结合总有机碳含量恢复古环境。结果表明:芦草沟组以细粒沉积岩为主,岩性以粉砂岩类、泥岩类为主,呈厚层的灰色系,主要由泥岩和碳质泥岩构成,夹云屑砂岩、含泥质白云岩及具有白云质成分的粉砂岩等;芦草沟组沉积时期古气候条件偏向于干热,芦草沟组一段干旱和炎热的程度更明显,由芦草沟组一段向二段逐渐变得相对湿润,处于咸水环境,芦草沟组二段的咸度要低于芦草沟组一段,芦草沟组一段甚至出现高盐环境;芦草沟组的氧化还原条件整体处于贫氧-缺氧环境,指示深湖环境,芦草沟组二段比芦草沟组一段更深;芦草沟组一段与芦草沟组二段整体上具有较高的古生产力水平,但芦草沟二段P/Ti相对较高,一段则相对较低;古气候条件及古生产力对芦草沟组中有机质富集起主要控制作用,古氧化还原条件、盐度水平以及水深条件为次要因素,对有机质富集的影响相对有限。研究结果对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东部芦草沟组古环境演化及油气生成研究具有理论指导意义。

关键词:岩石学特征;地球化学特征;古环境;有机质富集;芦草沟组;吉木萨尔凹陷;准噶尔盆地
中图分类号:TE 122. 113 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9315(2026)02-0431-13
DOI:10. 13800/j. cnki. xakjdx. 2026. 0218

Paleoenvironmental analysis of Lucaogou Formation in eastern Jimusar Sag, Junggar Basin

LIU Jiantong¹, TANG Jianyun², WEI Tangjing¹, SU Yuxin¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing) at Karamay, Karamay 834000, China;

2. School of Petroleum Engineering, Karamay Vocational & Technical College, Karamay 834000, China)

Abstract: To reconstruct paleoenvironment of the Lucaogou Formation in the eastern Jimusar Sag of the Junggar Basin, such as the paleoclimate, paleosalinity and paleo-redox conditions and so on, 20 samples

收稿日期:2025-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52564001);新疆维吾尔自治区科技厅-重点研发项目(2024B01013-1);国家科技重大专项项目(2025ZD1408400);克拉玛依市人才选拔培养计划项目(2023rcxbjh)

通信作者:刘见通,男,山东兰陵人,博士,讲师,E-mail:2022592117@cupk.edu.cn

from Luchaogou Formation were selected for petrographic analysis and elemental geochemical testing. Multiple discrimination criterias were used—such as Sr/Cu, Rb/Sr, CaO/(MgO · Al₂O₃), Sr content, Sr/Ba, Mg/Ca, V/(V + Ni), V/Cr, Cu/Zn, Fe/Mn, Rb/K, P/Ti, and P/Al ratios—along with total organic carbon content, to reconstruct the paleoenvironment. The results show that the Luchaogou Formation mainly consists of fine-grained sedimentary rocks, dominated by siltstone and mudstone. These are thick, gray-colored strata primarily composed of mudstone and carbonaceous mudstone, with interbeds of tuffaceous sandstone, argillaceous dolomite, and siltstone containing dolomitic components. During the deposition of the Luchaogou Formation, the paleoclimate tend to be hot and arid. Member I was characterized by more intense aridity and heat, there was a gradual transition toward relatively more humid conditions from Member I to Member II. The depositional environment was saline, with Member II showing lower salinity than Member I, and Member I even exhibiting hypersaline conditions at times. Overall, the redox conditions indicate a dysoxic-anoxic environment. The formation was deposited in a deep-lake setting, with Member II representing deeper water than Member I. Both members exhibit high paleo-productivity, though Member II has relatively higher P/Ti values, indicating higher productivity compared with Member I. The study concludes that paleoclimate conditions and paleo-productivity were the primary controls on organic matter enrichment in Luchaogou Formation, while redox state, salinity, and water depth were secondary factors with relatively limited influence. These findings can provide theoretical guidance for understanding the paleoenvironmental evolution and hydrocarbon generation of the Luchaogou Formation in the eastern Jimsar Sag, Junggar Basin.

Key words: petrological characteristics; geochemical characteristics; paleoenvironment; organic matter enrichment; Lucaogou Formation; Jimusar Sag; Junggar Basin

0 引言

准噶尔盆地蕴藏着大量油气资源,其中二叠系和石炭系等烃源岩层的有机质含量极高,且广泛分布于盆地之中,是重要的烃源岩层,三叠系和白垩系孔隙发育,是优良的储集层。非常规油气资源的开发与利用正在全球范围内形成新的产业格局,战略价值被认为是推动石油工业可持续发展的核心动能^[1-2],而页岩油作为重要的非常规油气资源类型之一,在非常规油气勘探领域中占据了举足轻重的地位,也成为了国际学术界广泛关注和研究的热点话题。二叠系芦苇沟组蕴藏着丰富的非常规页岩油资源,在空间上分布广泛,在纵向上也发育有多套具有潜力的层位,显示出良好的勘探开发潜力。

关于在吉木萨尔凹陷芦苇沟组不同区域古环境的研究中,不同学者研究结果存在较大争议。李锋等认为芦苇沟组的沉积环境为相对温暖潮湿淡水还原环境^[3];王正和等认为在芦苇沟组的沉积过程中,古气候条件发生了显著的变化,表现为从芦苇沟组的下段到上段,气候逐渐由略为干热

转变为更温湿的环境^[4];张帅等认为芦苇沟组的古环境条件是一个干旱气候为主导的浅水咸化湖盆环境^[5];蒋中发等认为芦苇沟组下段形成于干旱气候控制的咸化贫氧-厌氧环境,沉积期水体深度显著,而过渡到上段时沉积体系转为湿润气候为主导的半咸水贫氧环境,同时伴随水深明显变浅的特征^[6];罗锦昌等认为芦苇沟组呈现干旱咸化还原的沉积环境,其中,芦苇沟组下段沉积于干旱气候环境下,古盐度偏高,构成了一个稳定的还原沉积环境,古生产力较为旺盛,芦苇沟组上段则是在干湿交替的气候条件下沉积形成的,古水深有所增加,古盐度则相对较低,还原性依然保持良好^[7]。

为系统解析目标层段泥岩的地球化学特征及其记录的古环境演化信息,揭示有机质富集的关键控制机制,结合已有研究成果,通过对古沉积环境恢复方法的综合调研,将研究焦点对准准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东部的J174井,共采集20块烃源岩样品,样品的颜色从灰色到深灰色不等,具体在芦苇沟组的一段采集10块样品,在芦苇沟组的二段也采集了同样数量的10块样品。对采集到的

样品进行薄片磨制及鉴定,开展总有机碳(TOC)含量检测、主量元素以及微量元素的测试工作,结合扫描电镜结果分别进行主量元素、微量元素以及总有机碳含量分析,旨在为深入探讨其沉积环境形成机制及地质历史意义提供科学依据。

1 地质概况

准噶尔盆地是一个大型的多旋回叠合改造盆地,富含油气资源,区域地质特征鲜明地展示了造山带与沉积盆地相互镶嵌、共同存在的特殊景象,且这些地质构造大致呈近东西方向延伸,形成了独特的陆内盆山构造格局,准噶尔盆地历经了海西期、印支期、燕山期以及喜马拉雅期等多个构造变形阶段和叠加改造过程^[8]。盆地内蕴藏着中-下二叠统的烃源岩层,这些层位的沉积物主要由陆相咸化湖盆中的多元混合细粒物质构成,为页岩油资源的形成奠定了坚实的物质基础。

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部隆起区的西南,北侧以吉木萨尔断裂为界,南接三台断裂

带,西缘受老庄湾断裂控制,东侧与奇台凸起相邻。吉木萨尔凹陷是一个相对独立的二级构造单元,形态呈东高西低的“箕状”结构^[9-10]。在构造特征上,除了东侧以地层的侵蚀尖灭线作为边界外,其余三个方向均被断层所封闭和切割^[11-12],吉木萨尔凹陷内部的构造面积广泛,总面积 1 200 km²。吉木萨尔凹陷地层序列自下而上完整记录了石炭纪至第四纪的沉积演化,其中二叠系芦草沟组(P₂l)作为关键含油层系,是页岩油资源的核心储集层。芦草沟组可以进一步细分为两段,即芦草沟组一段(P₂l₁)和芦草沟组二段(P₂l₂)。根据地质勘探数据,在凹陷的西部地区,芦一段的厚度为 107 ~ 163 m,芦二段的厚度为 31 ~ 90 m。而在凹陷的东部地区,芦一段的厚度为 138 ~ 160 m,芦二段的厚度为 63 ~ 109 m。文中选取的研究井位是位于吉木萨尔凹陷中南部的 J174 井,自上而下穿过了芦一段(下段)和芦二段(上段),两者的厚度都接近 100 m(图 1)。

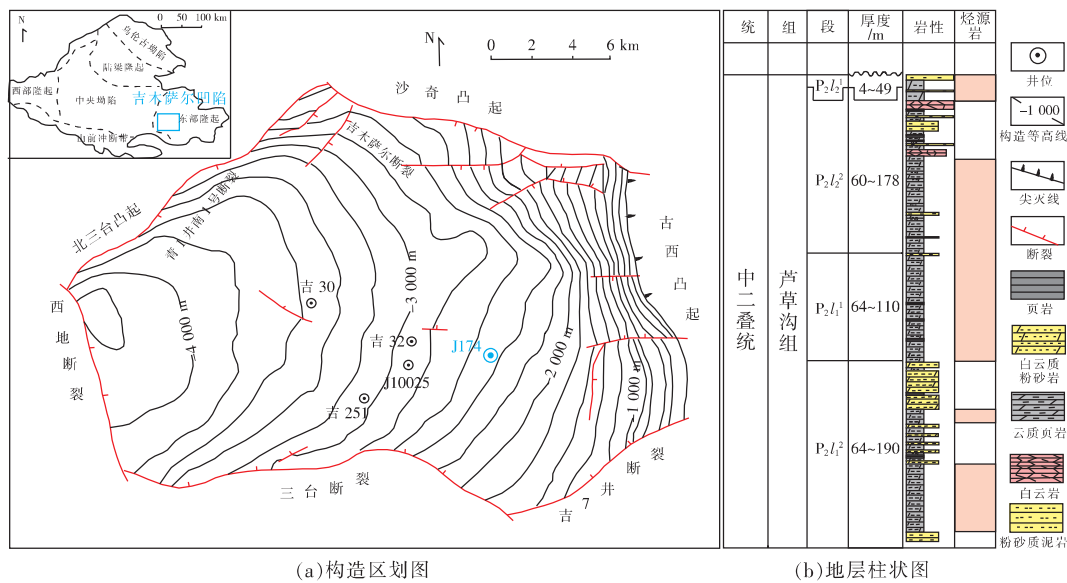


图 1 吉木萨尔凹陷构造位置(据文献[13-14]修改)

Fig.1 Structural location of the Jimusar Sag(revised based on references[13-14])

2 岩石学特征

结合现场岩芯描述以及扫描电镜,吉木萨尔凹陷芦草沟组岩性主要以细粒沉积岩为主,沉积岩岩性以粉砂岩类、泥岩类为主,为厚层的灰色系岩石,包括灰色、深灰色和灰黑色,主要由泥岩和碳质泥岩构成,此外还夹有云屑砂岩、含有泥质的

白云岩、粉砂岩以及具有白云质成分的粉砂岩等岩石,其粒度细,颜色深,以黑、黑灰色为主。

按照砂岩碎屑颗粒的大小特征对砂岩进行分类,砂岩可分为细砂岩与粉砂岩两大类,且以粉砂岩的分布最为普遍。在扫描电镜下观察,岩石基质内存在着形态不规则、呈片状的绿泥石,同时也发现了钾长石碎屑的存在,岩石的孔隙发育程度

较低,仅在少量基质中可见到溶蚀孔,但这些孔隙之间的连通性较差(图2(a)~(b));岩石中有的基质中有片状绿泥石与少量不规则状伊/蒙混层矿物,而有的基质中存在白云石、方解石晶粒。岩石的孔隙发育程度较低,仅在基质中观察到少量的晶间溶孔,且这些孔隙之间的连通性不良(图2(g)~(h));有的基质中有白云石晶粒与沸石类矿物,而有的基质中有玻屑物质与磷灰石,见有少量的基质中存在晶间溶孔(图2(i)~(j)),还分布有泥质细砂岩,主要颜色为灰色和黑色,含有钙质成分,呈现块状构造,偶见水平层理,有少量的黄铁矿分布其中。

泥岩类主要由泥岩、白云质泥岩和灰质泥岩等组成,主要以浅灰色、灰黑色以及深灰色为主。在扫描电镜下有的基质中存在不规则片状绿泥石以及数量不多的不规则形态伊/蒙混层矿物,基质中还分布有白云石的晶体颗粒和粒状的石英。岩石的孔隙并不发达,仅在基质的局部区域可见到溶孔的存在(图2(c)~(d)),有的基质中有片状绿泥石与少量不规则状伊/蒙混层矿物,而有的基质中有白云石晶粒与沸石类矿物,孔隙不发育,有少量的基质中存在的晶间溶孔(图2(e)~(f));样品有油浸现象,岩石中有的基质中有白云石晶粒、方解石晶粒孔隙较发育,大量基质中有晶间溶孔与晶间孔,连通性较差(图2(k)~(l))。

3 地球化学特征

地化样品均来自准噶尔盆地吉木萨尔凹陷的J174井,层位属于芦草沟组,共采集了20块烃源岩样品,下段和上段分别采集10块样品,样品的颜色从灰色变化到深灰色。针对这20块样品,开展主量元素、微量元素以及总有机碳含量的测定。样品采集深度为3 432.5~3 580.5 m(表1)。

3.1 总有机碳含量

总有机碳含量(TOC)在东北石油大学非常规实验室完成,采用的仪器是Leco CS-200。所采集的样品中,有机碳的含量分布在1.15%~15.86%,平均达到7.24%,表明整体上有有机碳的含量是较高的,并且在垂直方向上的变化较为明显。芦草沟组一段有机碳含量在1.15%~14.04%,平均值为6.73%;芦草沟组二段有机碳含量在1.98%~15.86%,平均值为7.76%,上下两段的有机碳含量水平大致相当。

3.2 主量元素

主量元素分析采用荷兰Axios MAX型X射线荧光光谱仪进行测定,严格遵循GB/T14506.28—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分》,该规范详细规定了16种主次成分的定量检测流程,仪器测量精度控制在 $\pm 5\%$ 误差范围内。表1详细列出了J174井芦草沟组烃源岩样品的主量元素含量。其中, SiO_2 、 Al_2O_3 和CaO是主要的元素成分,含量分别为39.98~59.62%(平均值50.22%)、5.31%~19.23%(平均值12.29%)和1.02%~12.69%(平均值7.35%),FeO和MgO的含量也较高,含量分别为2.98%~6.53%(平均值4.27%)和1.06%~8.66%(平均值4.14%),次为 Na_2O 和 K_2O 的含量,分别为1.86%~5.21%(平均值3.41%)和1.09~4.99%(平均值2.63%)。芦草沟组的CaO含量显示出较高的水平,可能是由于沉积时期碳酸盐矿物与膏盐岩矿物的共同作用所致^[15]。泥岩中的 P_2O_5 、 TiO_2 和MnO元素含量较少,均不超过1%的比例,具体而言, TiO_2 的平均含量达到了0.54%, P_2O_5 的平均含量为0.15%,而MnO的平均含量则为0.08%。

3.3 微量元素

微量元素检测采用美国Thermo Fisher ICP7400型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES),严格遵循WHCS-FF-CS/02—2019《区域地球化学分析配套方法》第2部分标准,该规范专门针对钡等20种元素的ICP-OES检测流程作出明确规定。所有检测环节均在国土资源部大陆动力学国家重点实验室完成,仪器测量精度控制在 $\pm 5\%$ 误差范围内。通过电感耦合等离子体光谱仪的分析,检测出包括Cu、Sr、Rb、Ba、V、Cr、Ni、Zn等在内的多种微量元素。Cu(15.74×10^{-6} ~ 41.79×10^{-6})、Rb(56.79×10^{-6} ~ 82.98×10^{-6})、Zn(32.12×10^{-6} ~ 71.88×10^{-6})等微量元素含量相对稳定,上下段差异不大;而Sr(169.54×10^{-6} ~ 828.45×10^{-6})、Ba(289.85×10^{-6} ~ 659.98×10^{-6})、V(56.72×10^{-6} ~ 111.74×10^{-6})、Cr(18.46×10^{-6} ~ 65.01×10^{-6})及等元素的含量表现出了较大的波动范围。V、Cr、Ni等元素在上段地层中呈现显著富集特征,其中Ni元素含量波动尤为突出;下段Sr、Ba元素含量明显增高,且Ni元素分布趋于稳定。此外,Cu元素含量变化幅度较小,其余元素均未检测到显著异常。

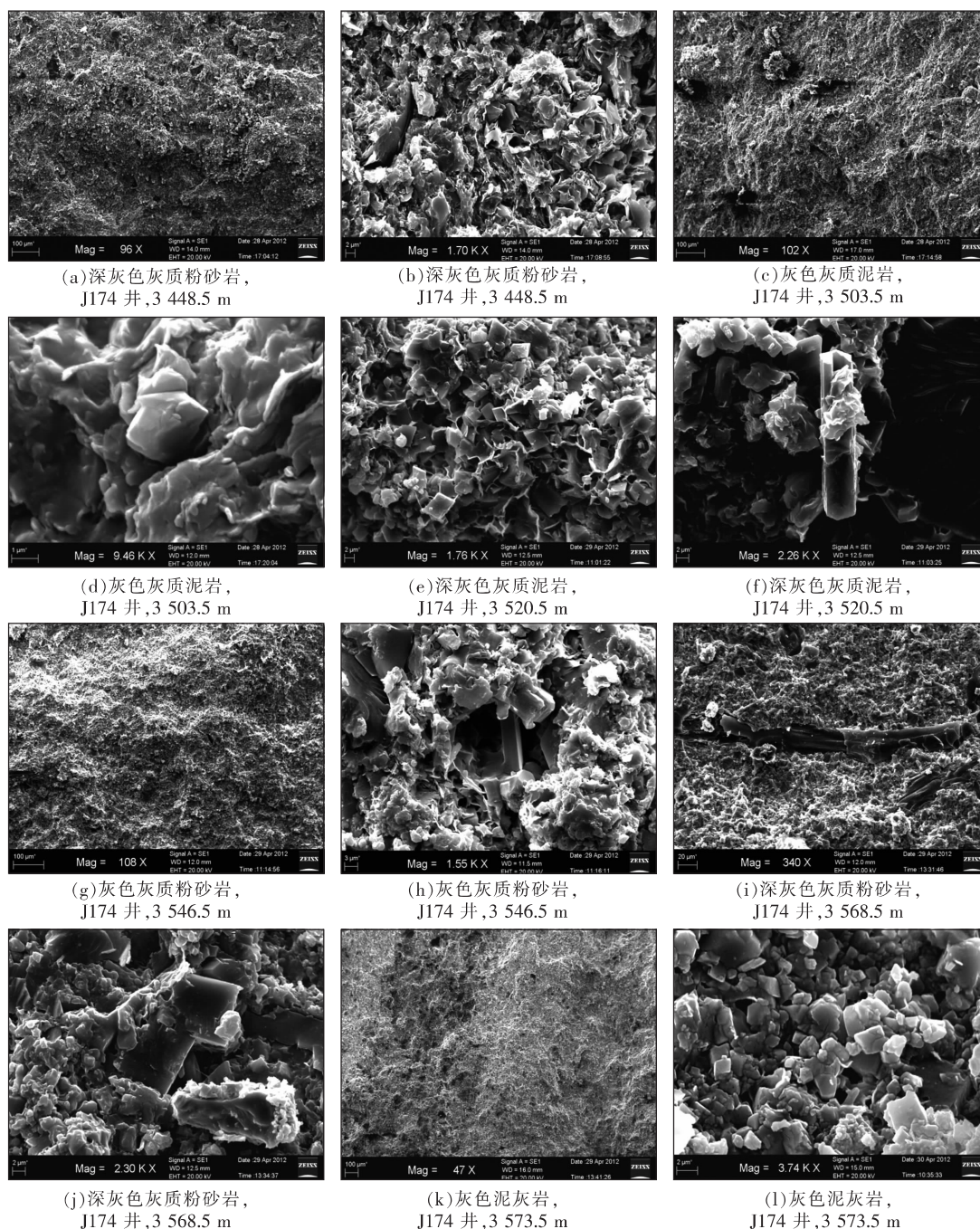


图2 芦草沟组岩芯岩石学特征(J174)

Fig. 2 Petrographic characteristics of core rocks in the Lucaogou Formation (Well J174)

4 古环境分析

在沉积古环境重构研究中,主量元素与微量元素的地球化学定量分析已成为核心手段,广泛应用于各大盆地沉积环境重建。古气候恢复需要综合多指标判别体系, $\text{CaO}/\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Sr/Cu 、 MgO/CaO 等关键比值常被作为重要判别依据^[16]。

基于 J174 井连续采集的 20 件样品所提供的

丰富元素地球化学数据,对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷东部芦草沟组地区进行了深入的古环境分析,包括了古氧化还原性、古气候特征、古盐度状况、古水深情况以及古生产力水平等多个维度。

4.1 古气候

湖泊中的初级生产力状况以及氧化还原等古环境条件均受到古气候的显著影响,同时古气候也是塑造沉积岩元素分布格局和矿物组成特征的

重要因素。在不同的气候背景下,元素的富集程度呈现明显的差异,例如,在温暖且湿润的气候条件下,诸如 Fe、Mn、Ni、Cr、Co、Cu 和 Rb 等元素会表

现出较高的富集程度,相反,则富集程度较低^[17-18]。所以,可以根据元素来分析判断古气候环境。

表1 准噶尔盆地吉木萨凹陷岩芯主微量元素计算结果

Table 1 Calculation results of main and trace elements in Jimusar Sag, Junggar Basin

样品编号	Sr/Cu	Rb/Sr	CaO/(MgO * Al ₂ O ₃)	Sr/Ba	Mg/Ca	Fe/Mn	Rb/K	V/(V + Ni)	V/Cr	Cu/Zn	P/Ti	P/Al
J174-3	10.971	0.265	12.819	0.574	0.154	39.556	37.738	0.675	1.689	0.449	0.366	0.017 6
J174-5	7.837	0.396	11.341	0.427	0.220	94.801	47.563	0.675	2.338	0.436	0.311	0.015 8
J174-6	9.354	0.320	6.088	0.710	0.238	22.923	30.977	0.598	2.919	0.685	0.982	0.054 9
J174-8	6.916	0.210	9.892	0.528	0.490	48.727	52.101	0.621	2.407	0.575	0.212	0.011 0
J174-10	8.983	0.306	12.443	0.494	0.302	31.917	42.572	0.581	1.200	0.412	0.343	0.014 9
J174-11	13.337	0.125	6.361	0.969	0.436	28.067	26.674	0.586	2.013	0.649	0.441	0.019 8
J174-15	9.431	0.256	13.957	0.605	0.247	55.333	40.005	0.618	2.627	0.604	0.138	0.010 0
J174-16	8.806	0.247	11.077	0.636	0.474	40.875	28.777	0.590	2.795	0.709	0.469	0.023 8
J174-17	8.1696	0.246	8.291	0.631	0.311	69.143	36.752	0.617	2.652	0.708	0.134	0.009 9
J174-20	8.571	0.455	18.082	0.476	0.464	36.545	48.522	0.597	3.926	0.469	0.047	0.003 1
平均值	9.237	0.283	11.035	0.605	0.334	46.789	39.168	0.616	2.457	0.569	0.344	0.018 1
J174-25	14.517	0.144	23.694	1.051	0.743	108.833	37.701	0.672	3.073	0.503	0.231	0.012 5
J174-26	25.662	0.099	13.795	1.259	0.985	46.917	36.402	0.680	2.814	0.536	0.015	0.001 9
J174-28	50.766	0.104	9.796	2.005	1.779	100.667	26.511	0.719	3.968	0.372	0.039	0.001 4
J174-30	10.496	0.178	6.685	1.302	0.999	64.667	22.594	0.741	2.907	0.613	0.321	0.010 1
J174-32	17.632	0.116	2.416	1.102	1.904	59.714	13.0936	0.719	3.109	0.502	0.222	0.007 6
J174-36	14.408	0.168	5.505	1.396	0.866	78.801	25.595	0.740	2.728	0.444	0.207	0.006 6
J174-37	24.622	0.116	1.742	1.263	1.009	50.167	16.056	0.759	3.092	0.517	0.016	0.000 5
J174-40	43.534	0.097	4.566	1.255	0.517	68.429	21.095	0.755	3.277	0.462	0.654	0.018 9
J174-42	23.284	0.103	2.144	1.132	1.039	134.667	23.794	0.705	3.544	0.575	0.373	0.011 9
J174-43	20.476	0.157	6.186	1.312	0.720	114.250	20.185	0.767	3.319	0.609	0.333	0.011 4
平均值	24.539	0.128	7.653	1.308	1.056	82.711	24.303	0.726	2.183	0.513	0.241	0.008 3

Sr/Cu 比值是喜干型元素 Sr 与喜湿型元素 Cu 之间的比值,已被广泛用作推断古气候的重要指标之一。当 Sr/Cu 比值介于 1.0 ~ 10.0 时,通常表示气候温暖潮湿;当比值超过 10.0 时,表明气候倾向于干热;Rb 元素能够在源岩中稳定存在并缓慢迁移,相比之下,Sr 元素在化学风化过程中容易被释放,从而导致其浓度逐渐降低^[18](图 3,图 4)。因此,Rb/Sr 比值可以作为评估化学风化程度的指标,Rb/Sr 比值较高时,意味着化学风化程度较深,气候相对温暖湿润^[19];在温暖潮湿的环境中,由于 CaO 容易遭受风化淋滤和分解,成为反映古气候的重要化学参数。基于这一特性,可以利用 CaO 与 (MgO·Al₂O₃) 的比值,来重构和解析准噶尔盆地吉木萨凹陷东部芦草沟沉积时期的古气候状况。根据以往研究成果,较高的 CaO/(MgO·Al₂O₃) 比值通常指示着温暖的气候条件,较低的比值则可能意味着寒冷的气候环境。

根据图 3(a),芦草沟组一段的所有数据点均落在了由这两个指标所界定的干热区域内。芦草沟组二段极少部分落在干热区,大部分都落在温湿区;根据图 3(b),芦草沟组一段基本处于低值区,而芦草沟组二段大多数点落在高值区,表明在芦草沟组沉积时期,整体上的古气候条件偏向于干热。特别是芦草沟组一段,与二段相比其干旱和炎热的程度更为显著。从古气候的演变来看,存在由芦草沟组一段向二段逐渐变得相对湿润的趋势。

4.2 古盐度

在恢复古沉积环境及其演化的研究中,古盐度的恢复占据着重要的地位。为了准确恢复古盐度,研究者们已经探索了多种方法,这些方法包括计算法、利用元素比值的方法以及锶钙法^[20],选择采用锶(Sr)元素的含量、Sr/Ba 值和 Mg/Ca 值这 3 个地球化学指标,对准噶尔盆地吉木萨凹陷东部芦草沟组沉积时期的古盐度进行分析。

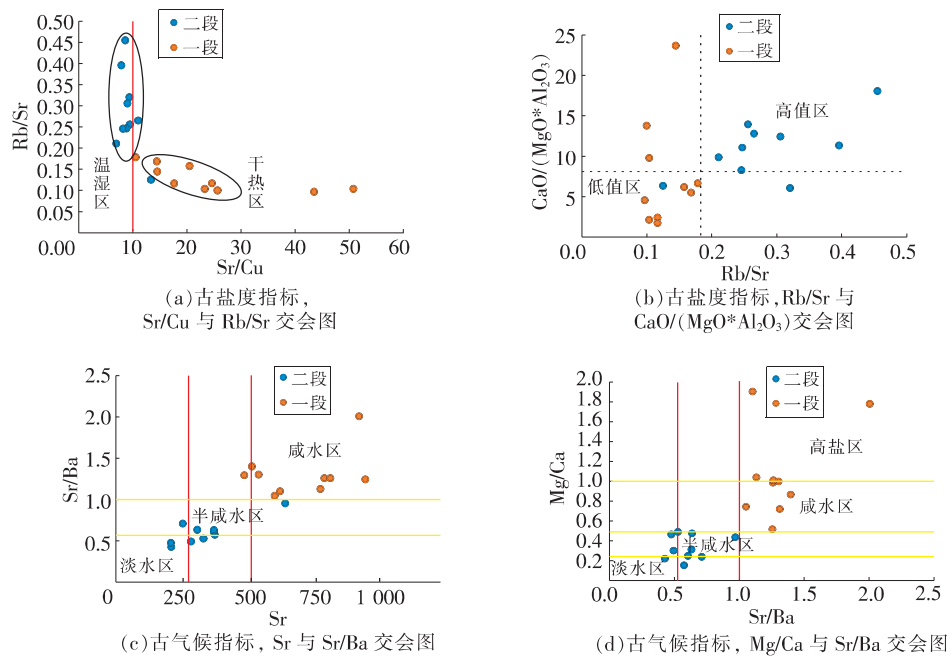


图3 古环境指标交会图

Fig. 3 Intersection diagram of paleoenvironmental indicators

随着盐度条件的变化,不同元素的富集程度会呈现出明显的不同。Ba 元素的迁移能力相对较弱,在水体盐度增加的情况下,它往往会首先以 BaSO_4 的形式发生沉淀。而 Sr 元素的迁移能力则较强,只有在沉积水体的盐度增加到一定水平时,才会以 SrSO_4 的形式沉淀下来。Sr 元素的含量以及 Sr/Ba 值在指示古盐度方面具有显著的效果,并且与古盐度之间存在明显的正相关关系。当 Sr 含量大于 500×10^{-6} 时,表明是咸水环境;在 300×10^{-6} 至 500×10^{-6} 的范围时,代表半咸水环境;而当 Sr 含量小于 300×10^{-6} ,则指示为陆生淡水环境。当现 Sr/Ba 值大于 1.00 时,代表海相咸水或咸化湖泊的沉积^[21];在 0.60 至 1.00 的范围内时,代表海陆过渡相的半咸水沉积;而 Sr/Ba 值小于 0.60 时,代表陆相淡水沉积^[22],此外, Mg/Ca 比值也被用作区分淡水与咸水环境的指标之一,其中 Mg/Ca 比值大于 1 通常反映的是高盐环境;在 0.5 至 1 的范围内反映咸水环境;0.25 至 0.5 之间则指示半咸水环境;而小于 0.25 则通常反映淡水环境。

古盐度指标 Sr 和 Sr/Ba 的交会图(图 3(c))表明,芦草沟组一段大部分落在半咸水区,极少数落在咸水区,而芦草沟组二段基本全部落于咸水区;古盐度指标 Sr/Ba 和 Mg/Ca 的交会图(图 3(d))表明,芦草沟组一段全部处于咸水区,部分甚

至落于高盐区的范围,而芦草沟组二段同样大多数处于半咸水区;芦草沟组二段的环境咸度要低于芦草沟组一段,而芦草沟组一段在部分时期甚至出现了高盐环境。

4.3 古氧化还原条件

有机质保存的一个重要条件是含氧相对较少的贫氧至缺氧环境,因此,准确判别沉积水体的氧化还原特征是研究有机质富集的关键。通过分析 Ni/Co ^[23]、 V/Cr ^[24]、 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 、 $(\text{Cu} + \text{Mo})/\text{Zn}$ 等比值^[25],可以获取沉积环境氧化还原条件的重要线索,这是由于当沉积环境处于氧化状态时镍、铜、锌等元素通常保持溶解状态,而在还原状态时,则以硫化物的形式存在。

由于 V 在氧化条件下更易富集,而 Ni 在还原条件下容易富集, $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 比值小于 0.46 时,为弱氧化,比值在 0.46 到 0.57 之间代表氧化环境,0.57 到 0.83 之间指示还原环境当比值达到 0.83 到 1.00 时,代表强还原沉积环境。 V/Cr 值也被用来表征氧化还原环境,其中 V/Cr 值小于 2 表示氧化环境,2 到 4.25 之间表示弱还原环境,大于 4.25 则表示强还原环境^[26]。Cu 和 Zn 元素对沉积环境的氧化还原性非常敏感, Cu/Zn 值小于 0.21 还原环境,0.21 到 0.38 之间为弱还原环境;0.35 到 0.50 之间对应还原-氧化环境,0.50 到 0.63 之间为弱氧化环境,而大于 0.63 时指示氧化环境。

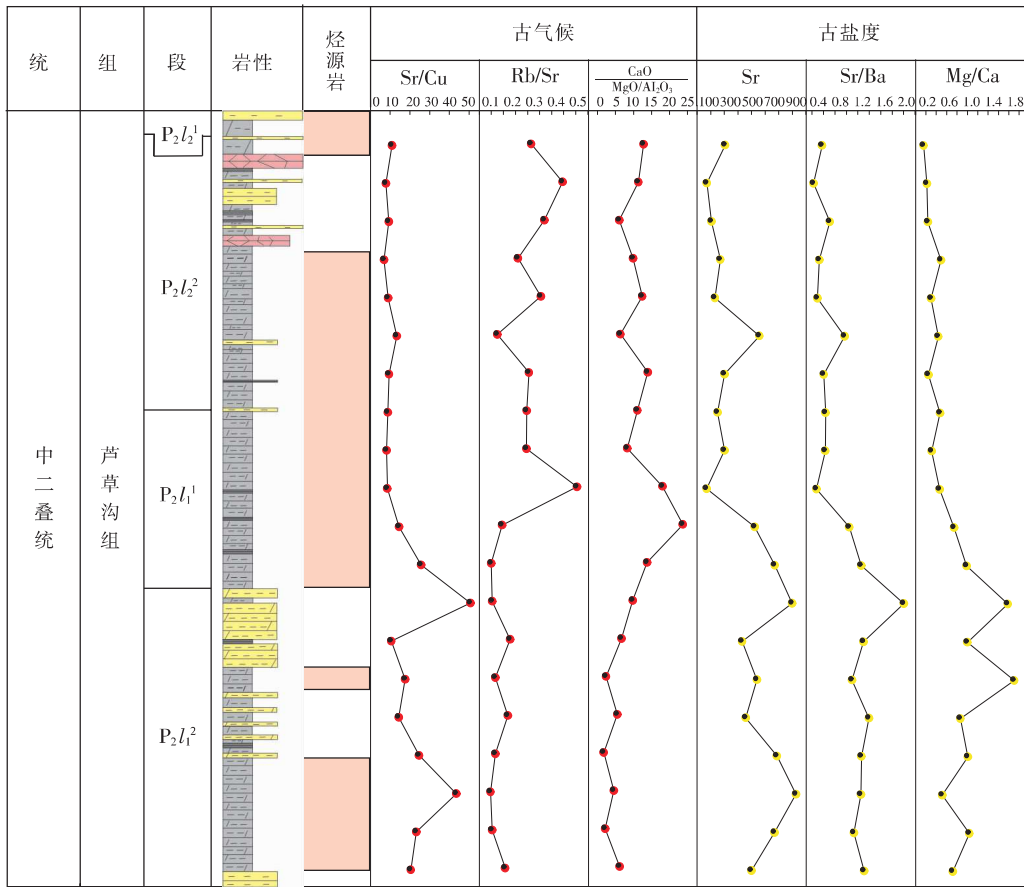


图4 吉木萨尔凹陷古盐度指标与古气候指标的垂向变化

Fig. 4 Vertical variation of paleosalinity and paleoclimate index in Jimusar Sag

芦草沟组一段及二段处于贫氧-缺氧环境区,但是二段相较于一段更偏向氧化环境;芦草沟组一段及二段均处于贫氧-缺氧环境区,相较于芦草沟组二段,芦草沟组一段的还原性更强。总体来看,芦草沟组沉积时期主要处于贫氧至缺氧的环境,且从古氧化还原环境演变的角度来看,芦草沟组一段向芦草沟组二段逐渐转向相对氧化的状态(图5(a)~(b))。

4.4 古水深

沉积时期古水深的变化对沉积物中元素的分布模式有着重要影响^[27]。随着从滨岸到深海的过渡,Fe、Mn、P、Co、Ni、Ca、Zn等元素的含量呈增加的趋势,特别是Fe元素易氧化,通常会在近岸区域富集,而Mn元素因其相对稳定性,能够在远岸区域聚集。因此,Fe/Mn的比值可以指示水深变化。

在沉积物的迁移过程中,Mn元素含量会随着水深的增加而逐渐上升。相比之下,Fe元素则显得较为不稳定。常常利用Fe/Mn的比值推断古水深,较小的Fe/Mn值意味着更大的水深,当Fe/Mn

的比值小于100时,代表着深水湖泊环境,比值在100至150之间时,指示半深水湖泊,当比值超过150时,代表着浅水湖泊^[28];沉积物中Rb和K元素的迁移及富集过程深受黏土矿物的影响,其中Rb元素相较于K元素更易被黏土矿物所吸附,并随之向远处迁移。因此可以通过Rb/K的比值来推断古水深的变化情况,当Rb/K的比值较大时,意味着水体较深,当比值较小时表明水体较浅。

芦草沟组一段和二段位于深湖区范围内,极少部分落在半深湖区,芦草沟组二段的值较一段而言整体偏高,表明芦草沟组沉积期为深湖环境,且芦草沟组二段比芦草沟组一段更深(图5(c))。

4.5 古生产力

丰富的有机物来源与优越的生产力条件是促进有机质富集的关键因素。古生产力的大小对于有机质富集程度以及烃源岩的生烃能力具有重要影响。学者们利用多种地球化学指标来进行研究,这些指标包括总有机碳的含量、微量元素的含量及生物标志化合物等^[29]。P元素虽然被视为衡

量古生产力的一个重要指标,但其指示作用可能会受其他因素的干扰,如海水的氧化还原状态变化以及 Fe 化合物对 P 的吸附效应等,导致 P 含量的高低并不总是能够准确对应古生产力的

即便存在这样的限制,P 元素仍然是当前评估古生产力时最常用的指标之一^[30]。选择 P/Al 值和 P/Ti 比值这两个参数来表征芦草沟组的古生产力条件(图 6)。

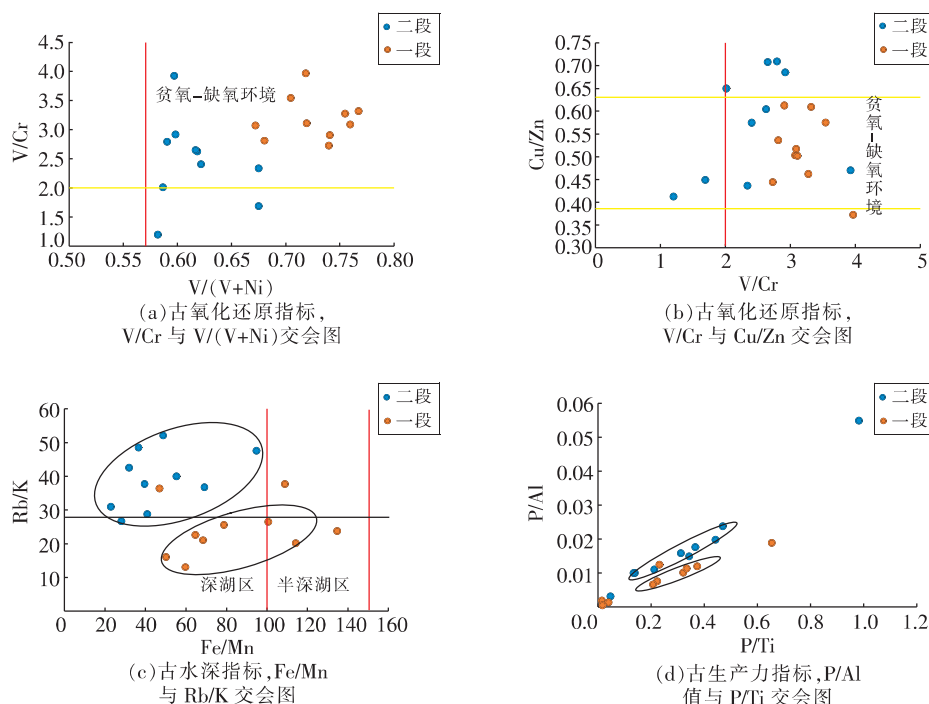


图5 古氧化还原指标、古水深指标及古生产力指标交会图

Fig. 5 Cross plot of paleoredox index, paleowater depth index and paleoproductivity index

为了消除碎屑矿物对有机 P 含量可能造成的潜在影响,Al 元素校正法及结合 Ti 元素的方法常被用作消除陆源碎屑干扰的手段,从而更有效地表征古湖泊的营养水平。芦草沟组一段 P/Al 值为 0.000 52 ~ 0.018 93,平均值为 0.008 29, P/Ti 值为 0.014 71 ~ 0.653 85,平均值为 0.241 07;芦草沟组二段的 P/Al 值为 0.003 13 ~ 0.054 89,平均值为 0.018 1, P/Ti 值为 0.046 51 ~ 0.982 14,平均值为 0.344 42,表明芦草沟组一段和芦草沟组二段的古生产力水平基本一致,且整体上均保持了较高的水平。

芦草沟组一段与二段具有较高的古生产力水平,芦草沟二段 P/Ti 相对较高,一段相对较低,显示芦草沟组二段是一个富营养化环境,生产力较高,下段的生产力处于较低水平(图 5(d))。

5 有机质富集主控因素

烃源岩有机质富集机制受控于初级生产力、保存条件及稀释速率等多元因素的协同作用^[31-32]。针对吉木萨尔凹陷芦草沟组,本研究通过古环境

指标与总有机碳(TOC)含量的关联性建模,揭示古气候特征的 Sr/Cu 值、Rb/Sr 值和 CaO/(MgO * Al₂O₃)值,衡量古盐度的锶(Sr)元素含量、Sr/Ba 值和 Mg/Ca 值,反映古氧化还原状态的 V/(V + Ni)比值、V/Cr 比值及 Cu/Zn 值,在评估古水深方面,采用 Fe/Mn 值和 Rb/K 值两个关键指标;在反映古生产力时,主要依据 P/Ti 值和 P/Al 值来进行判断,确定芦草沟组有机质富集的主控因素(图 7)。

TOC(有机碳含量)与古气候指标 Sr/Cu 值、Rb/Sr 值和 CaO/(MgO * Al₂O₃)值均呈现较好的相关性(R^2 分别为 0.407 9、0.438 5 和 0.403 2),表明芦草沟组有机质富集的主要控制因素是古气候,相对温暖且湿润的气候条件可能对有机质的富集起到了积极的促进作用;TOC 与古盐度指标 Sr 元素含量、Sr/Ba 值和 Mg/Ca 值之间相关性不明显(R^2 分别为 0.064、0.019 9 和 0.049),暗示古盐度在此区域并不是有机质富集的主控因素;TOC 与反映古水深的 Fe/Mn 比值($R^2 = 0.004 2$)及 Rb/K 值($R^2 = 0.146 9$)均未展现出明显的相关性,这表明这些指标对有机质富集的影响并不显

著;TOC 和 $V/(V + Ni)$ 值、 V/Cr 值以及 Cu/Zn 值的相关性中,TOC 和 $V/(V + Ni)$ 、 V/Cr 以及 Cu/Zn 均呈现较差的相关性 (R^2 分别为 0.008 3、0.051 1 和 0.080 4),说明古氧化还原条件并非有

机质富集的主导控制因素; P/Ti 与 TOC 含量之间具有较好的正相关性(其 R^2 值为 0.320 7),说明初级生产力的大小对芦苇沟组有机质的富集起到了主要的控制作用。

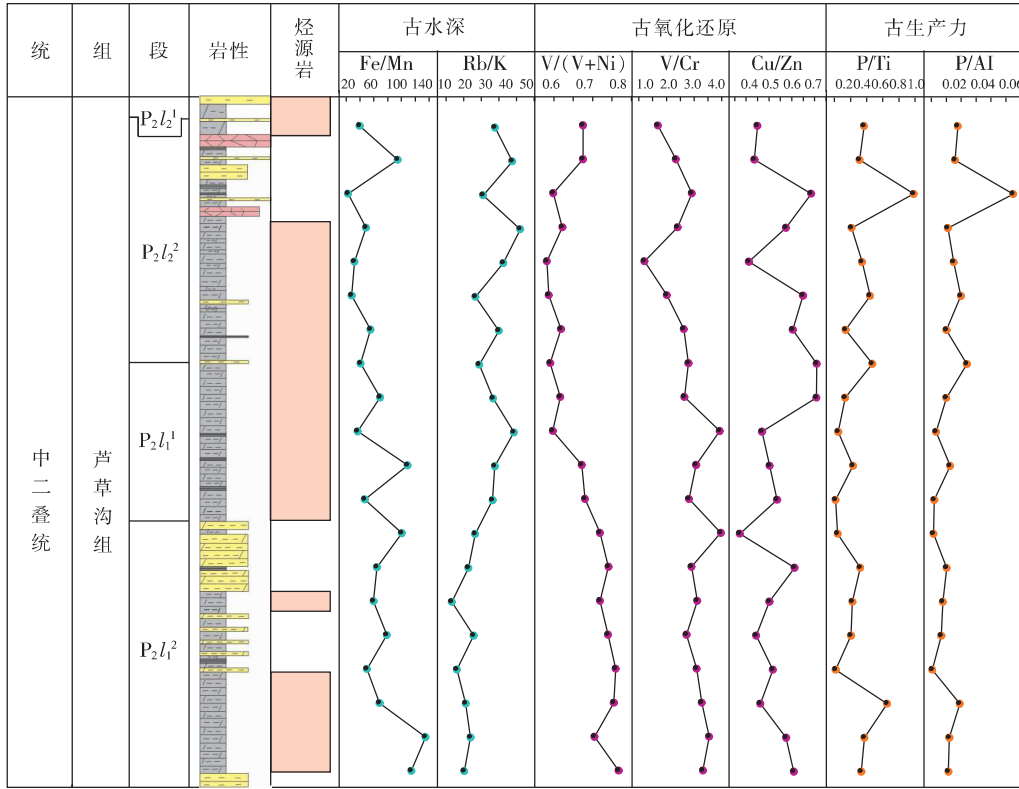


图6 吉木萨尔凹陷古氧化还原指标、古水深指标及古生产力指标的垂向变化

Fig.6 Vertical changes of palaeo-redox index, palaeo-water depth index and palaeo-productivity index in Jimusar Sag

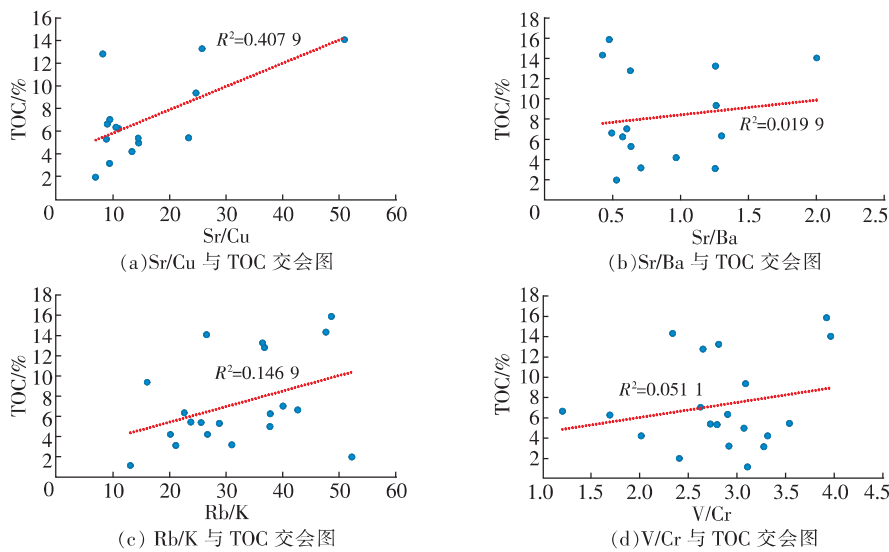


图7 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组有机质富集的主控因素

Fig.7 Main controlling factors of organic matter enrichment in the Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组中的有机质富集主要受控于古气候和古生产力因素,古氧

化还原条件、古盐度以及古水深对有机质富集的影响则相对有限。

6 结 论

1) 吉木萨尔凹陷芦草沟组主要以细粒沉积岩为主,岩性以粉砂岩类、泥岩类为主,夹有云屑砂岩、含泥质白云岩及具有白云质成分的粉砂岩等岩石。

2) 芦草沟组的沉积期古气候条件偏向于干热,芦草沟组一段与二段相比干旱和炎热的程度更显著。从古气候的演变来看,芦草沟组一段向二段逐渐变得相对湿润趋势,处于贫氧-缺氧的深湖咸水环境,从芦草沟组一段向芦草沟组二段逐渐转向相对还原的状态。

3) 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组中的有机质富集主要受控于古气候和古生产力因素,而古氧化还原条件、古盐度以及古水深对有机质富集的影响则相对有限。

参考文献 (References):

- [1] 王拓,朱如凯,白斌,等.非常规油气勘探、评价和开发新方法[J].岩性油气藏,2013,25(6):35-39.
WANG Tuo, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. New methods for the exploration, evaluation and development of unconventional reservoirs[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(6):35-39.
- [2] QIU Z, ZOU C N. Controlling factors on the formation and distribution of "sweet-spot areas" of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 194:103989.
- [3] 李锋,杜小弟,徐银波,等.准东地区二叠系芦草沟组发育期古环境特点恢复的地球化学记录[J].石油地质与工程,2016,30(2):12-16.
LI Feng, DU Xiaodi, XU Yinbo, et al. Geochemical records of paleoenvironmental characteristics during the development period of the Permian Lucaogou Formation in the Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(2):12-16.
- [4] 王正和,周继兵,余谦,等.准噶尔盆地南缘芦草沟组碳质细粒沉积岩地球化学特征及地质背景[J].东北石油大学学报,2018,42(1):86-95.
WANG Zhenghe, ZHOU Jibing, YU Qian, et al. Geochemistry and its geological background of the carbonaceous fine-grained sedimentary rocks in Lucaogou Formation, southern Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Northeast Petroleum University 2018, 42(1):86-95.
- [5] 张帅,柳益群,焦鑫,等.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,2018,20(1):33-48.
ZHANG Shuai, LIU Yiqun, JIAO Xin, et al. Sedimentary environment and formation mechanism of dolomitic rocks in the Middle Permian Lucaogou Formation, Jimusar Depression, Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 20(1):33-48.
- [6] 蒋中发,丁修建,王忠泉,等.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,2020,32(6):109-119.
JIANG Zhongfa, DING Xiujian, WANG Zhongquan, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(6):109-119.
- [7] 罗锦昌,田继军,马静辉,等.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,2022,34(5):73-85.
LUO Jinchang, TIAN Jijun, MA Jinghui, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of Permian Lucaogou Formation in Jiye-1 well area, Jimusar Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(5):73-85.
- [8] 汪双双,柳益群,周鼎武,等.新疆三塘湖地区二叠纪岩浆岩的岩石学与矿物学研究[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(3):354-363.
WANG Shuangshuang, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, et al. Petrography and mineralogy of Permian magmatic rocks in the Santanghu area, Xinjiang[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(3):354-363.
- [9] 寇均益.陆内裂谷盆地致密油层成岩作用研究[D].西安:西北大学,2015.
KOU Junyi. Research on diagenesis of tight oil reservoirs in the inner-lake rift basins[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [10] 匡立春,胡文瑄,王绪龙,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层初步研究:岩性与孔隙特征分析.[J].高校地质学报,2013,19(3):529-535.
KUANG Lichun, HU Wenxuan, WANG Xulong, et al. Research of the tight oil reservoir in the Lucaogou Formation in Jimusar Sag: Analysis of lithology and porosity characteristics[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(3):529-535.
- [11] 郭旭光,何文军,杨森,等.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,2019,30(8):1168-1179.
GUO Xuguang, HE Wenjun, YANG Sen, et al. Evalua-

- tion 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*, 2019, 30(8): 1168–1179.
- [12] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 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*, 2012, 39(6): 657–667.
- KUANG Lichun, TANG Yong, LEI Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 657–667.
- [13] 王欢, 马世忠, 牛东亮, 等. 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*, 2022, 41(1): 143–150.
- WANG Huan, MA Shizhong, NIU Dongliang, et al. 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*, 2022, 41(1): 143–150.
- [14] ZOU C. Preface for the special issue of formation and enrichment of tight (shale) oil resources in Chinese continental basins [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 178: 1–2.
- [15] 胡涛, 庞雄奇, 姜福杰, 等. 陆相断陷咸化湖盆有机质差异富集因素探讨——以东濮凹陷古近系沙三段泥页岩为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 140–152.
- HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Factors controlling differential enrichment of organic matter in saline lacustrine rift basin: A case study of third member Shahejie Fm in Dongpu Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 140–152.
- [16] 康李茜, 邓昆, 白斌, 等. 鄂尔多斯盆地吴旗-志丹地区延长组长7段泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2024, 44(2): 161–176.
- KANG Liqian, DENG Kun, BAI Bin, et al. Geochemical characteristics and geological implication of the mudstone from the 7 member of the Yanchang Formation in the Wuqi-Zhidan area, Ordos basin [J]. *Minerals and Rocks*, 2024, 44(2): 161–176.
- [17] 王启宇, 牟传龙, 陈小炜, 等. 准噶尔盆地及周缘地区石炭系岩相古地理特征及油气基本地质条件[J]. *古地理学报*, 2014, 16(5): 655–671.
- WANG Qiyu, MOU Chuanlong, CHEN Xiaowei, et al. Palaeogeographic characteristics and basic geological conditions of petroleum of the Carboniferous in Junggar Basin and its adjacent areas [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(5): 655–671.
- [18] UNKEL I, FERNANDEZ M, BJRCK S, et al. Records of environmental changes during the Holocene from Isla de los Estados (54.4°S), southeastern Tierra del Fuego [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 74(3): 99–113.
- [19] YANG H F, HUANG Y J, MA C, et al. Recognition of Milankovitch cycles in XRF core-scanning records of the Late Cretaceous Nenjiang Formation from the Songliao Basin (northeastern China) and their paleoclimate implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194: 104183.
- [20] CHIVAS R A, DECKKER D P, SHELLEY G M J. Strontium content of ostracods indicates lacustrine palaeosalinity [J]. *Nature*, 1985, 316: 251–253.
- [21] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 936–946.
- FU Jinhua, LI Shixiang, XU Liming, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 936–946.
- [22] MCCULLOCH M, CAPPO M, et al. Tracing the life history of individual barramundi using laser ablation MC-ICP-MS Sr-isotopic and Sr/Ba ratios in otoliths [J]. *Marine & Freshwater Research*, 2005, 56(5): 637–644.
- [23] BRYN J, DAVID A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1–4): 111–129.
- [24] SCHEFFLER K, BUEHMANN D, SCHWARK L. Analysis of late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies—response to climate evolution and sedimentary environment [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 240(1/2): 184–203.
- [25] DYPVIK H. Geochemical compositions and depositional conditions of Upper Jurassic and Lower Cretaceous Yorkshire clays, England [J]. *Geological Magazine*, 1984, 121(5): 489–504.
- [26] 马明, 陈国俊, 吕成福, 等. 珠江口盆地白云凹陷始新统—下渐新统沉积环境与泥岩物源[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 610–621.
- MA Ming, CHEN Guojun, LV Chengfu, et al. Eocene-Low Oligocene sedimentary environment and mudstone provenance in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin [J].

- Acta Petrolei Sinica,2016,37(5):610-621.
- [27] 陆雨诗,胡勇,侯云东,等.鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J].科学技术与工程,2021,21(28):11999-12009.
LU Yushi,HU Yong,HOU Yundong,et al. Geochemical characteristics of trace elements in Yanghugou Formation in the Western Margin of Ordos Basin and their implications for sedimentary environment [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (28) : 11999 - 12009.
- [28] 王春连,刘成林,胡海兵,等.江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J].古地理学报,2012,14(2):165-175.
WANG Chunlian,LIU Chenglin,HU Haibing,et al. Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression, Jiangnan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14 (2) : 165 - 175.
- [29] JIANG Y H,HOU D J,LI H,et al. Impact of the paleoclimate, paleoenvironment, and algae bloom: Organic matter accumulation in the Lacustrine Lucaogou Formation of Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China [J]. Energies, 2020, 13 (6) : 1488.
- [30] 李艳芳,邵德勇,吕海刚,等.四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J].石油学报 2015,36(12),1470-1483.
LI Yanfang, SHAO Deyong, Lv Haigang, et al. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (12) , 1470 - 1483.
- [31] 黄道军,李新虎,刘燕,等.鄂尔多斯盆地中东部本溪组致密砂岩储层特征及有利层段优选[J].西安科技大学学报,2023,43(1):109-118.
HUANG Daojun, LI Xinhua, LIU Yan, et al. Characteristics and favorable intervals selection of tight sandstone reservoirs in Benxi Formation, central-eastern Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43 (1) : 109 - 118.
- [32] 刘二虎,陈志鹏,王起琮,等.鄂尔多斯盆地靖边地区马家沟组中上组合天然气成因类型[J].西安科技大学学报,2022,42(2):324-334.
LIU Erhu, CHEN Zhipeng, WANG Qicong, et al. Genetic types of natural gas from upper & middle assemblage of Majiagou Formation in Jingbian area, Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42 (2) : 324 - 334.

(责任编辑:李克永)