

文章编号: 1671-1505(2024)05-1127-13 DOI: 10.7605/gdxb.2024.05.097

西藏羌塘盆地下侏罗统曲色组页岩沉积环境及有机质差异富集机理*

郑鸣宇^{1,2,3} 马义权^{1,2,3} 文华国^{1,2,3}

1 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学, 四川成都 610059

2 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川成都 610059

3 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059

摘要 羌塘盆地下侏罗统曲色组是重要的烃源岩层系, 但目前对该套烃源岩中有机质富集机理仍缺乏系统研究, 制约了对该区油气成藏物质基础的认识。以羌塘盆地南羌塘坳陷毕洛错地区下侏罗统曲色组厚度约 100 m 的富有机质页岩为研究对象, 综合岩心、TOC、主量元素和微量元素等数据, 系统研究了页岩沉积时的古环境和古气候特征, 分析了页岩中有机质富集的主控因素, 建立了该区曲色组页岩有机质的差异富集模式。结果表明, 页岩有机质含量具有 2 段性, 2 段有机质含量均呈自下而上递增趋势, 其中下段 (59~110 m) 有机质含量总体较低 (TOC 处于 0.3%~8.1% 之间, 均值为 2.7%), 包含 3 层薄层富有机质段; 而上段 (0~59 m) 有机质含量相对较高 (TOC 处于 0.8%~16% 之间, 均值为 4.9%)。曲色组沉积时期总体为潮湿气候环境, 并受到热液作用的影响, 下段的有机质富集主要与适量的陆源输入、氧化还原条件和古生产力有关; 上段的有机质富集主要受控于氧化还原条件和古生产力。曲色组上段与下段有机质富集机理的差异可能与古气候和海平面变化的驱动密切相关。

关键词 羌塘盆地 曲色组 有机质富集 陆源输入 古气候

第一作者简介 郑鸣宇, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: MY913615@163.com。

通讯作者简介 马义权, 男, 1988 年生, 博士, 研究员, 主要从事非常规油气储层非均质性研究。E-mail: yqma88@163.com。

中图分类号: P624 文献标志码: A

Depositional environments and mechanism of differential organic matter enrichment for shale of the Lower Jurassic Quse Formation in Qiangtang Basin, Tibet

ZHENG Mingyu^{1,2,3} MA Yiquan^{1,2,3} WEN Huaguo^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3 Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

*四川省天然气成藏物质基础青年科技创新团队基金项目(编号: 2022JDTD0004)和四川省自然科学基金项目(编号: 2022NSFSC1075)联合资助。[Co-funded by the Sichuan Province Youth Science and Technology Innovation Research Group Fund (No. 2022JDTD0004), and Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC1075)]

收稿日期: 2024-04-29 改回日期: 2024-06-18

Abstract The Lower Jurassic Quse Formation in the Qiangtang Basin is an important source rock series in the basin. However, a systematic study on the mechanism of organic matter enrichment in this source rock is still lacking, which limits the understanding of the material basis of hydrocarbon accumulation in this area. In this paper, the 100-meter thick organic matter-rich shale of the Lower Jurassic Quse Formation in the Biluoqiao area of the South Qiangtang Depression is used as a study subject. We systematically investigated the palaeoenvironmental and palaeoclimatic characteristics of shale at the time of deposition, analyzed the main controlling factors of the organic matter enrichment in the shale, and established models of differential organic matter enrichment in the shale of Quse Formation based on the integrated core, TOC, major and trace elements data. The results show that the shale can be divided into two intervals by the organic matter content which increased upward at both intervals. The lower interval (59~110 m) had a generally low organic matter content (the TOC contents range from 0.3% to 8.1%, with an average of 2.7%), and contained three thin organic matter-rich intervals. However, the organic matter content in the upper interval (0~59 m) was relatively high (the TOC contents range from 0.8% to 16%, with an average of 4.9%). The deposition of Quse Formation generally occurred in a humid environment, and was influenced by hydrothermal processes. The organic matter enrichment in the lower interval was mainly related to moderate terrestrial inputs, redox conditions and palaeoproductivity, and the organic matter enrichment in the upper interval was mainly controlled by redox conditions and palaeoproductivity. The difference in the organic matter enrichment mechanism between the upper and lower intervals of the Quse Formation may be closely related to the driving forces of palaeoclimate and sea level changes.

Key words Qiangtang Basin, Quse Formation, organic matter enrichment, terrestrial input, palaeoclimate

About the first author ZHENG Mingyu, born in 1999, is a master degree candidate and majoring in geological engineering. E-mail: MY913615@163.com.

About the corresponding author MA Yiquan, born in 1988, Ph.D., researcher, is mainly engaged in the heterogeneity study of unconventional oil and gas reservoirs. E-mail: yqma88@163.com.

西藏羌塘盆地是中国目前勘探程度最低的海相含油气盆地, 由于其保存了相对完整的中生界地层序列, 被认为具有较好的油气成藏物质基础(王剑等, 2020)。盆地内下侏罗统曲色组发育了一套富有机质页岩层系, 不仅是常规油气的烃源岩(李高杰等, 2020), 也可能是非常规油气的储集层(杜佰伟等, 2014)。烃源岩有机质显微组分综合分析表明, 曲色组烃源岩的有机质主要为 II₁ 型和 II₂ 型, 具有较高的总有机碳含量与生烃潜力, 被认为是羌塘盆地的优质烃源岩之一(唐友军等, 2019; 张晓等 2019; 李高杰等, 2020; 沈安江等, 2023)。对曲色组烃源岩地球化学及生物标志化合物特征的分析显示, 该烃源岩作为该区古油藏油源(唐友军等, 2022; 杨易卓等, 2022), 其发育可能受到了火山活动的影响(唐友军等, 2019; 彭清华等, 2022)。李高杰等(2020)利用有机地球

化学分析手段, 认为局限区域的障壁—潟湖沉积环境是曲色组优质烃源岩形成的有利环境。尽管前人对曲色组烃源岩特征及成因进行了探索, 但是对曲色组内部的优质烃源岩发育段的分布特征以及有机质富集机理还缺乏系统研究, 阻碍了进一步认识油气甜点段的分布规律以及该区的油气勘探部署。

在前人研究的基础上, 综合岩心、元素地球化学数据、总有机碳含量(TOC), 对羌塘盆地南羌塘拗陷下侏罗统曲色组富有机质页岩层系中的优质烃源岩段分布特征、烃源岩沉积时的水体古气候、古盐度和热液条件以及有机质富集机理进行系统的研究, 建立了曲色组富有机质页岩的差异富集模式, 以期对羌塘盆地油气勘探提供一定的科学依据。

1 区域地质概况

羌塘盆地位于青藏高原的腹地, 属于特提斯—

喜马拉雅构造域东段（王剑等，2020）。盆地北边发育可可西里—金沙江缝合带，南边发育班公湖—怒江缝合带（付修根等，2020a；潘应娣等，2023）。从东西两侧向中部发育的中央隆起，将羌塘盆地划分为北羌塘坳陷与南羌塘坳陷（万友利等，2021）。

盆地中侏罗统主要为海相地层，由下至上依次发育下统的曲色组（ J_1s ），中统色哇组（ J_2s ）、布曲组（ J_2b ）、夏里组（ J_2x ），上统索瓦组（ J_3s ）（夏国清等，2009）。曲色组岩性分上下 2 段，上段主要以富有机质页岩夹泥岩为主，下段主要以膏盐岩为主（王永胜和郑春子，2008；唐友军等，2019）。

研究区位于南羌塘坳陷毕洛错东南方向的索日卡地区，处于班公湖—怒江缝合带和中央隆起之间。其中的曲色组主要为一套富有机质页岩层系，沉积于半深水—深水洼地（沈安江等，2024；魏学斌等，2024），既是本地区主要的烃源岩之一，

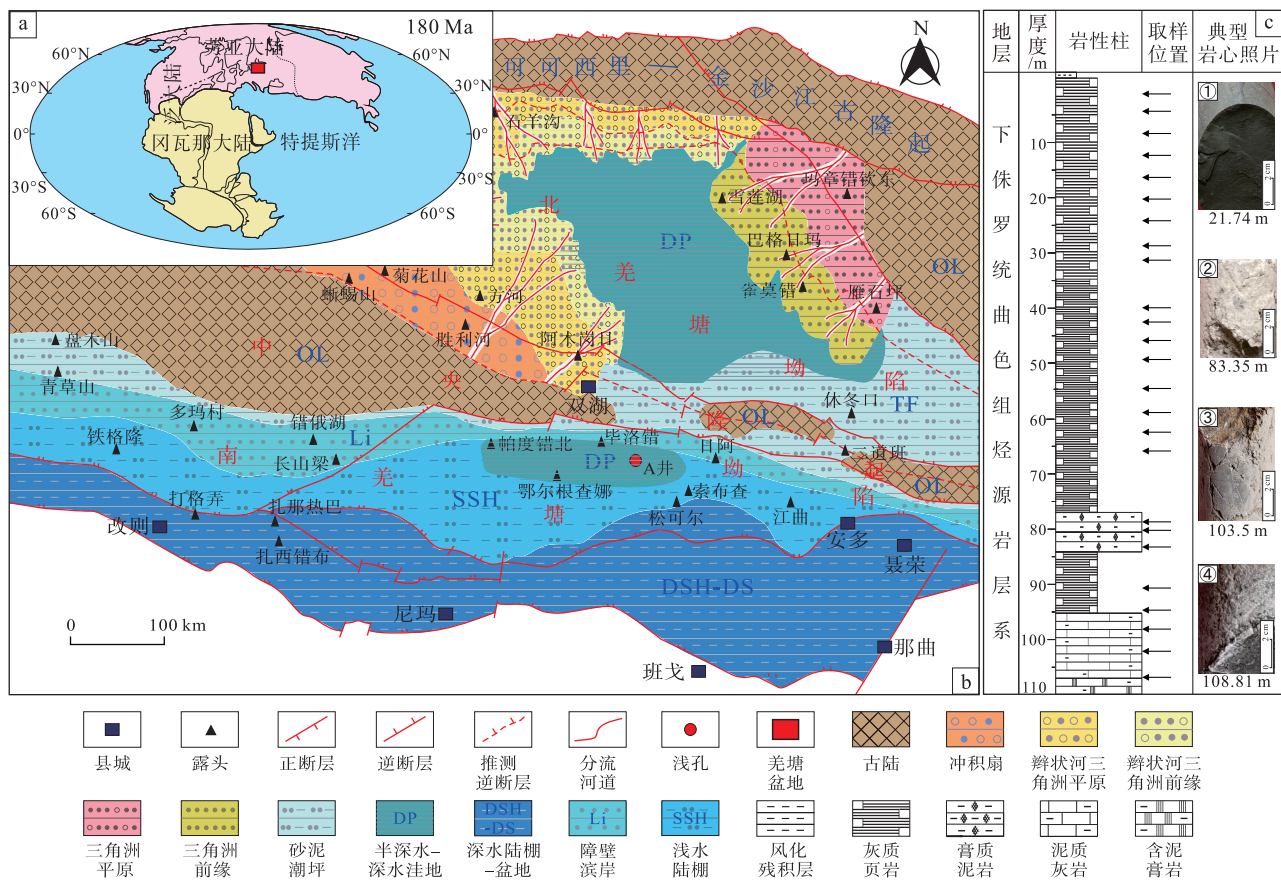
也是作者研究的目的层。

2 方法和材料

在前人研究的基础上，对南羌塘坳陷毕洛错地区 A 浅孔下侏罗统曲色组厚约 107 m 的烃源岩层系自下而上以 4~10 m 为间隔选取代表性样品。使用仪器 CS844 系列碳硫分析仪开展 TOC 含量分析，使用 PANalytical X 射线荧光光谱仪（XRF）开展主量元素含量分析，使用 Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）开展微量元素分析。使用富集因子（EF）表示沉积物中元素的富集程度（Xu *et al.*, 2023），采取澳大利亚后太古代页岩标准值进行归一化处理（Tribovillard *et al.*, 2006）。计算公式如下：

$$X_{EF} = (X/AI)_{sample} / (X/AI)_{PAAS} \quad (1)$$

注： X_{sample} 元素含量； X_{PAAS} 后太古代澳大利亚页岩标准值（Condie, 1993）



a—中生代中期古地理图（改自 Wilson, 1963；吴福元等，2020）；b—羌塘盆地地下侏罗统曲色组相古地理图

（改自沈安江等，2024）；c—A 浅孔曲色组岩性柱状图

图 1 羌塘盆地研究浅孔位置及目的层概况

Fig. 1 Location and target stratum of the studied Shallow Borehole A in Qiangtang Basin

以 Ti 元素为参考元素, 利用后太古宙澳大利亚页岩 (PAAS) 进行标准化, 得出元素未受到陆源输入影响的非碎屑组分含量 (Ma *et al.*, 2016), 目前常用于生物源钡和生物源硅的等生产力指标计算 (Dong *et al.*, 2022)。计算公式如下:

$$X_{XS} = X_{\text{sample}} - \text{Ti}_{\text{total}} \times (X/\text{Ti})_{\text{PAAS}} \quad (2)$$

注: X_{XS} 元素的非碎屑组分含量; X_{total} 元素含量; X_{PAAS} 后太古宙澳大利亚页岩标准值 (Condie, 1993)

化学蚀变指数 (CIA) 常用于指示碎屑岩的化学风化强度 (Nesbitt and Young, 1982), 岩石的风化程度通常与气候条件密切相关, 干旱寒冷的气候通常岩石的风化程度较弱, 而温暖潮湿的气候通常风化程度较强。考虑到成岩过程中, 钾交代作用的影响, 使得 CIA 数值偏低。因此计算时可采用 Panahi 等 (2000) 提出的公式进行校正。计算公式如下:

$$\text{CIA}_{\text{corr}} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}_{\text{corr}}) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}} = m \times (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) / (1 - m)$$

$$m = \text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$$

$$\text{CaO}_{\text{Remain}} = (\text{CaO} - \text{P}_2\text{O}_5 \times 10/3)$$

注: 所有元素成分均指摩尔分数浓度; CaO^* 指硅酸盐中的碳酸钙含量 (如果 $\text{CaO}_{\text{Remain}} < \text{Na}_2\text{O}$, 则 $\text{CaO}^* = \text{CaO}_{\text{Remain}}$; 如果 $\text{CaO}_{\text{Remain}} > \text{Na}_2\text{O}$, 则 $\text{CaO}^* = \text{Na}_2\text{O}$)。

3 结果

通过前期的岩心观察, 识别出该段是由灰质页岩、膏质泥岩、泥质灰岩和含泥膏岩组成。A 浅孔下侏罗统曲色组烃源岩层厚约 107 m, 该段烃源岩 TOC 含量最低为 0.3%, 最高可达到 16% (图 1-c)。

通过垂向上对 TOC 的整体变化趋势分析, 发现 2 段烃源岩 TOC 含量自下而上整体均呈现递增的趋势, 且下段烃源岩 TOC 含量整体上比上段 TOC 含量低, 因此根据岩相组合与总有机质含量的不同, 将曲色组烃源岩划分为上下 2 段 (图 2), 主要根据 TOC 含量 2%、4% 对有机质的富集程度进行了命名, 即高碳有机质和富碳有机质 (黎茂稳等, 2022)。

烃源岩沉积下段为 59~110 m, 识别出了 3 套富碳烃源岩段。第 1 套富碳烃源岩位于 60.6~64.3 m, 此区段主要发育灰质页岩, TOC 含量均值为 7.72%。第 2 套富碳烃源岩位于 79.1~81.1 m, 此区段主要发育膏质泥岩, TOC 含量均值为 5.1%。第 3 套富碳烃源岩位于 92.6~96.7 m, 此区段主要发育灰质页岩和泥质灰岩, TOC 含量均值为 8.1% (图 1-c)。主量元素中 Al_2O_3 、 SiO_2 与微量元素中 Zr 在纵向上均表现为快增—缓降—快增的曲线形态, 整体上呈现递增趋势; 去除陆源碎屑影响后的 V_{EF} (均值为 1.1) 整体呈中等程度富集、 Mo_{EF} (均值为 28.7) 整体呈强富集, 曲线同样表现为快增—缓降—快增的形态; 此外, 元素比值 Ni/Co、V/Cr、Ni/Al、Cu/Al、Zn/Al, 自下而上的曲线变化形态均与 TOC 相似, 整体上均呈递增趋势 (图 2)。

烃源岩沉积上段为 0~59 m, 识别出了 2 套富碳烃源岩段: 第 1 套富碳烃源岩位于 0~4.8 m, 此区段主要发育灰质页岩, TOC 含量均值为 8.3%。第 2 套富碳烃源岩位于 12.7~36.7 m, 此区段主要发育灰质页岩, TOC 含量均值为 8.6% (图 1-c)。主量元素中的 Al_2O_3 、 SiO_2 与微量元素 Zr 的曲线振幅相较于下段更剧烈, 尽管此时整体上仍处于递增趋势, 但与 TOC 的协变性降低; 去除陆源碎屑影响后的 V_{EF} 呈中等程度富集 (均值为 2.0)、 Mo_{EF} (均值为 40.4) 呈强富集, 且富集区间集中于 TOC 高值段, 在曲线上整体表现为递增趋势; 此外, 元素比值 Ni/Co、V/Cr、Ni/Al、Cu/Al、Zn/Al 与 TOC 曲线变化形态相似 (图 2)。

4 讨论

4.1 古气候与古盐度

在钾交代作用影响下, 会使得化学蚀变指数 (CIA) 偏低。通过计算公式校正后得到更为准确的化学蚀变指数 (CIA_{corr}) 用于古气候的重建 (Panahi *et al.*, 2000)。此外 $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ 也是研究古气候的常用指标 (马义权等, 2017)。本研究中样品 CIA_{corr} 值范围为 78.6~83.3 (均值为 81.9), 其中大部分在 80 以上, 在垂向上均呈现先增加后稳定的趋势 (图 3), 其中, 风化程度强说明下侏罗统曲色组烃源岩沉积整体上处于一

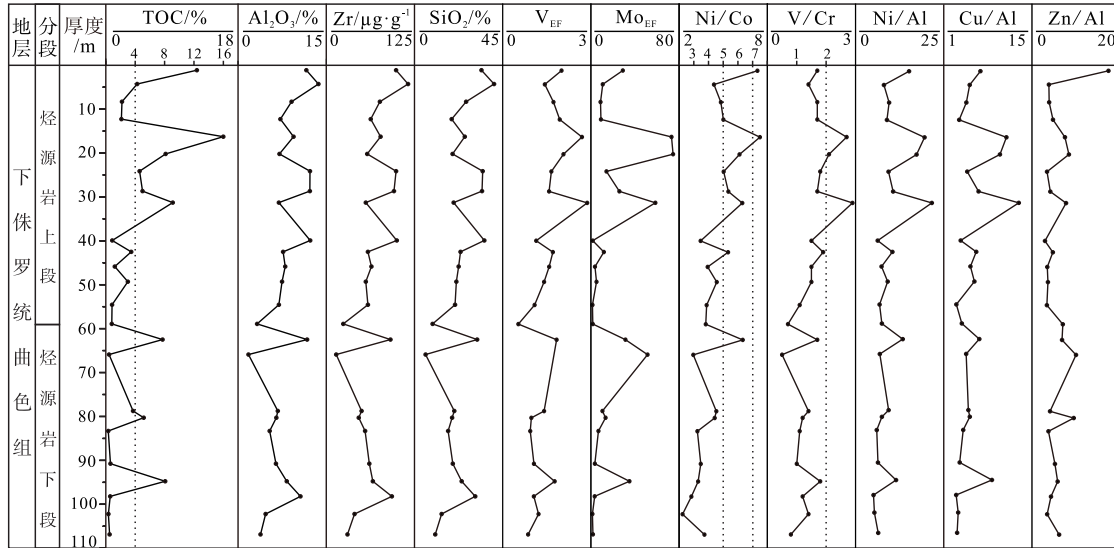


图 2 南羌塘坳陷 A 浅孔下侏罗统曲色组 TOC 含量、陆源输入 (Al_2O_3 、Zr、 SiO_2)、氧化还原 (V_{EF} 、 Mo_{EF} 、Ni/Co、V/Cr) 以及古生产力 (Ni/Al、Cu/Al、Zn/Al) 的垂向变化

Fig. 2 Vertical changes of TOC content, terrestrial inputs (Al_2O_3 , Zr, SiO_2), redox (V_{EF} , Mo_{EF} , Ni/Co, V/Cr), and palaeo-productivity (Ni/Al, Cu/Al, Zn/Al) of the Lower Jurassic Quse Formation in Shallow Borehole A in South Qiangtang Depression

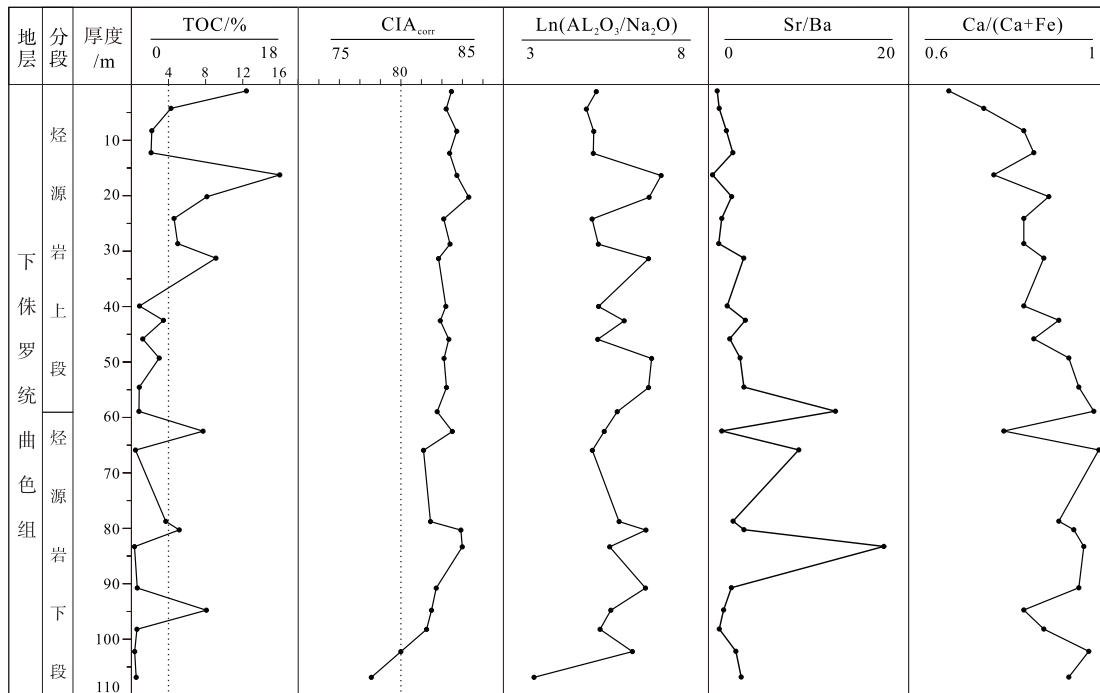


图 3 南羌塘坳陷 A 浅孔下侏罗统曲色组 TOC 含量、古气候 (CIA_{corr} 、 $Ln(Al_2O_3/Na_2O)$) 以及古盐度 (Sr/Ba、 $Ca/(Ca+Fe)$) 的垂向变化

Fig. 3 Vertical changes of TOC content, palaeoclimate (CIA_{corr} , $Ln(Al_2O_3/Na_2O)$), and palaeosalinity (Sr/Ba, $Ca/(Ca+Fe)$) of the Lower Jurassic Quse Formation in Shallow Borehole A in South Qiangtang Depression

个较为温暖潮湿的气候。此外，古气候指标 $Ln(Al_2O_3/Na_2O)$ 在纵向上与校正后的化学蚀变指数 (CIA_{corr}) 变化趋势基本一致，表明此时研究

区整体处于一个较为稳定的温暖湿润气候。

Sr/Ba 值、 $Ca/(Ca+Fe)$ 值被广泛用于水体古盐度的研究 (王子玉等, 1994; 文华国等, 2008;

谭梅等, 2023)。将 $Sr/Ba < 0.2$ 、 $Ca/(Ca+Fe) < 0.4$ 定义为淡水; $0.2 < Sr/Ba < 0.5$ 、 $0.4 < Ca/(Ca+Fe) < 0.6$ 定义为咸水; $Sr/Ba > 0.5$ 、 $Ca/(Ca+Fe) > 0.6$ 定义为海水。整段烃源岩 Sr/Ba 值的范围在 0.8~17.6 之间 (均值为 3.8); $Ca/(Ca+Fe)$ 值在 0.7~1 之间 (均值为 0.8), 所有烃源岩样品的 Sr/Ba 值均大于 0.5, $Ca/(Ca+Fe)$ 值均大于 0.6 (图 3)。表明下侏罗统曲色组烃源岩均在高盐度的海水环境中沉积, 这可能与早侏罗世受到南羌塘坳陷向北羌塘坳陷的区域性海侵 (万友利等, 2018) 密切相关。

4.2 热液活动

热液作用是指地下热水或热溶液在地壳中发生的化学作用, 对于地球内部化学循环以及矿物资源形成起到重要作用 (Chen *et al.*, 2012)。通过 Al-Fe-Mn 三角投点图、 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 和 Fe/Ti 等指标来判断, 研究区是否受到热液成因的影响。曲色组样品投点落在 Al-Fe-Mn 三角图的非热液成因区、 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 指标均大于 0.4 与 Fe/Ti 指标均小于 20 (图 4-a), 表明研究区不受热液作用的影响 (Adachi *et al.*, 1986; Garbán *et al.*, 2017; Lei *et al.*, 2019; Shi *et al.*, 2022)。然而考虑到中央隆起会给研究区带来陆源输入的原因 (王剑等, 2018), 将 Al-Fe-Mn 三角图的所有数据计算成非碎屑组分含量后, 在 $Al_{xs}-Fe_{xs}-Mn_{xs}$ 图上再次检验, 显示曲色组烃源岩的发育在一定程度上可能受到了热液作用的影响 (图 4-b)。

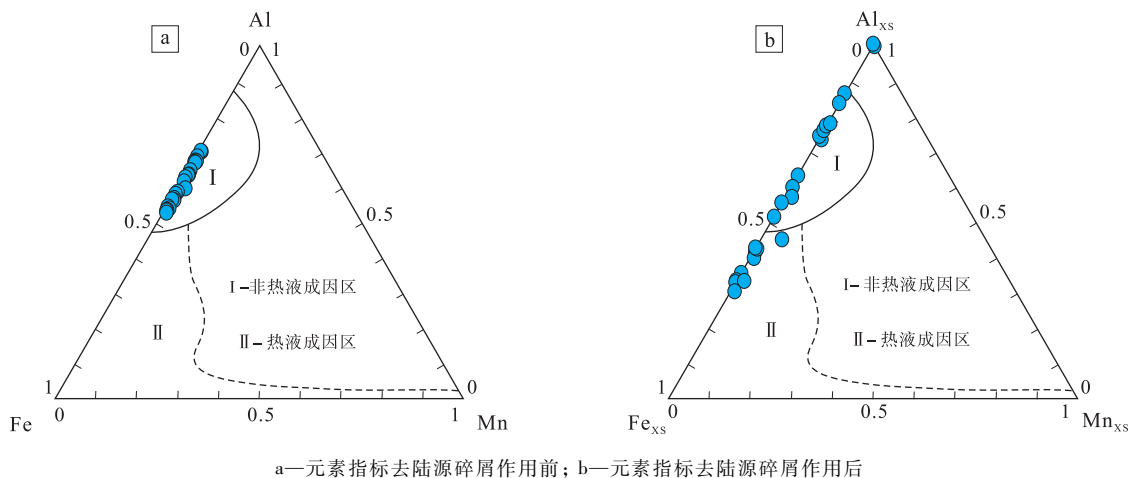


图 4 南羌塘坳陷 A 浅孔下侏罗统曲色组 Al-Fe-Mn 三元图解 (改自 Adachi *et al.*, 1986; Yamamoto, 1987)

Fig. 4 Al-Fe-Mn ternary diagrams of the Lower Jurassic Quse Formation in Shallow Borehole A in South Qiangtang Depression (modified from Adachi *et al.*, 1986; Yamamoto, 1987)

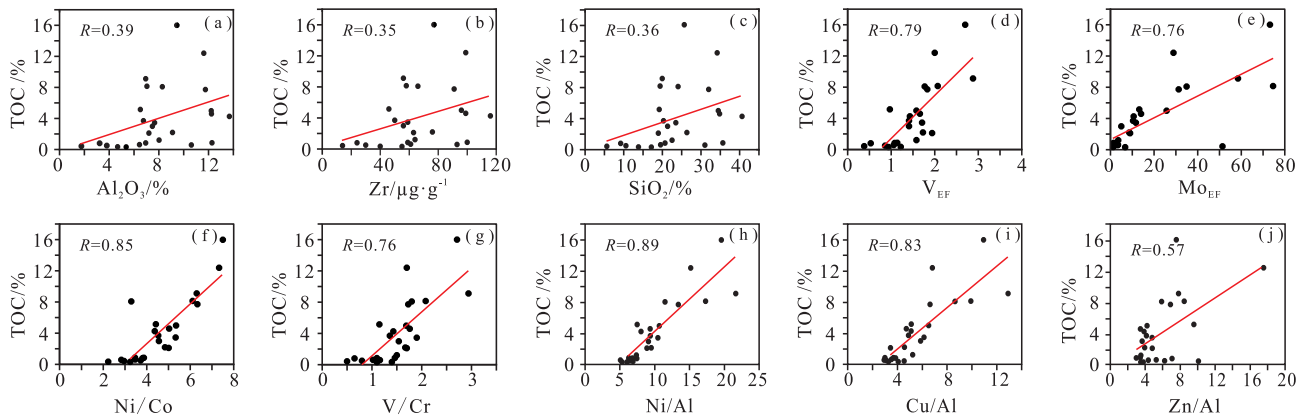
4.3 有机质的富集影响因素

4.3.1 陆源输入

通常, 陆源碎屑输入对有机质富集具有一定的稀释作用 (彭光荣等, 2023)。Zr 一般用来表示粗颗粒输入指标 (陈诗越等, 2003), Al_2O_3 通常用作细颗粒输入指标 (Canfield, 1994; Lei *et al.*, 2019); 石英颗粒由于其较好的稳定性, 可用于追踪陆源输入的变化 (李艳青等, 2011)。

通过对 Zr、 Al_2O_3 、 SiO_2 与 TOC 的相关性研究, 发现古陆源输入 (粗颗粒、细颗粒、石英) 对 TOC 富集的控制作用可能与其输入量密切相关 (图 5)。适量的陆源输入可能会携带丰富的营养物质进入水体, 促进生物勃发, 从而富集有机质, 过量的陆源输入对有机质有明显的稀释作用。通过分别对曲色组烃源岩沉积的上段与下段的陆源输入指标与 TOC 进行相关性分析, 发现上段烃源岩有机质的富集与陆源输入指标相关性较差, 而下段的烃源岩有机质的富集与陆源输入指标呈正相关 (图 6)。证明 2 段烃源岩有机质的富集主控因素不同, 下段的陆源输入是有机质富集的主控因素之一, 而上段有机质的富集可能主要受其他因素的控制。

从垂向上对陆源输入指标进行分析 (图 2), 发现曲色组烃源岩下段在沉积过程中, 陆源输入先从低值快速增大至过量, 然后再缓慢降低, 最后在下段沉积末期陆源输入存在突然增大再降低的现象, 说明外来陆源输入可能存在多期输入的现象, 这可



a—Al₂O₃ 与 TOC 交汇图；b—Zr 与 TOC 交汇图；c—SiO₂ 与 TOC 交汇图；d—V_{EF} 与 TOC 交汇图；e—Mo_{EF} 与 TOC 交汇图；

f—V/Cr 与 TOC 交汇图；g—Ni/Al 与 TOC 交汇图；h—Ni/Al 与 TOC 交汇图；i—Cu/Al 与 TOC 交汇图；j—Zn/Al 与 TOC 交汇图

图 5 南羌塘坳陷 A 浅孔下侏罗统曲色组陆源输入、氧化还原和古生产力分别与 TOC 含量的交汇图

Fig. 5 Intersections of terrestrial inputs, redox and palaeoproductivity with TOC content of the Lower Jurassic Quse Formation in Shallow Borehole A in South Qiangtang Depression

能与南羌塘坳陷下侏罗统曲色组沉积时期受到的区域性海侵密切相关。而上段烃源岩沉积过程中整体陆源输入整体上保持一个相对稳定的增长趋势，在具体表现上呈现波动性的特点，说明此时外来陆源输入较为稳定。

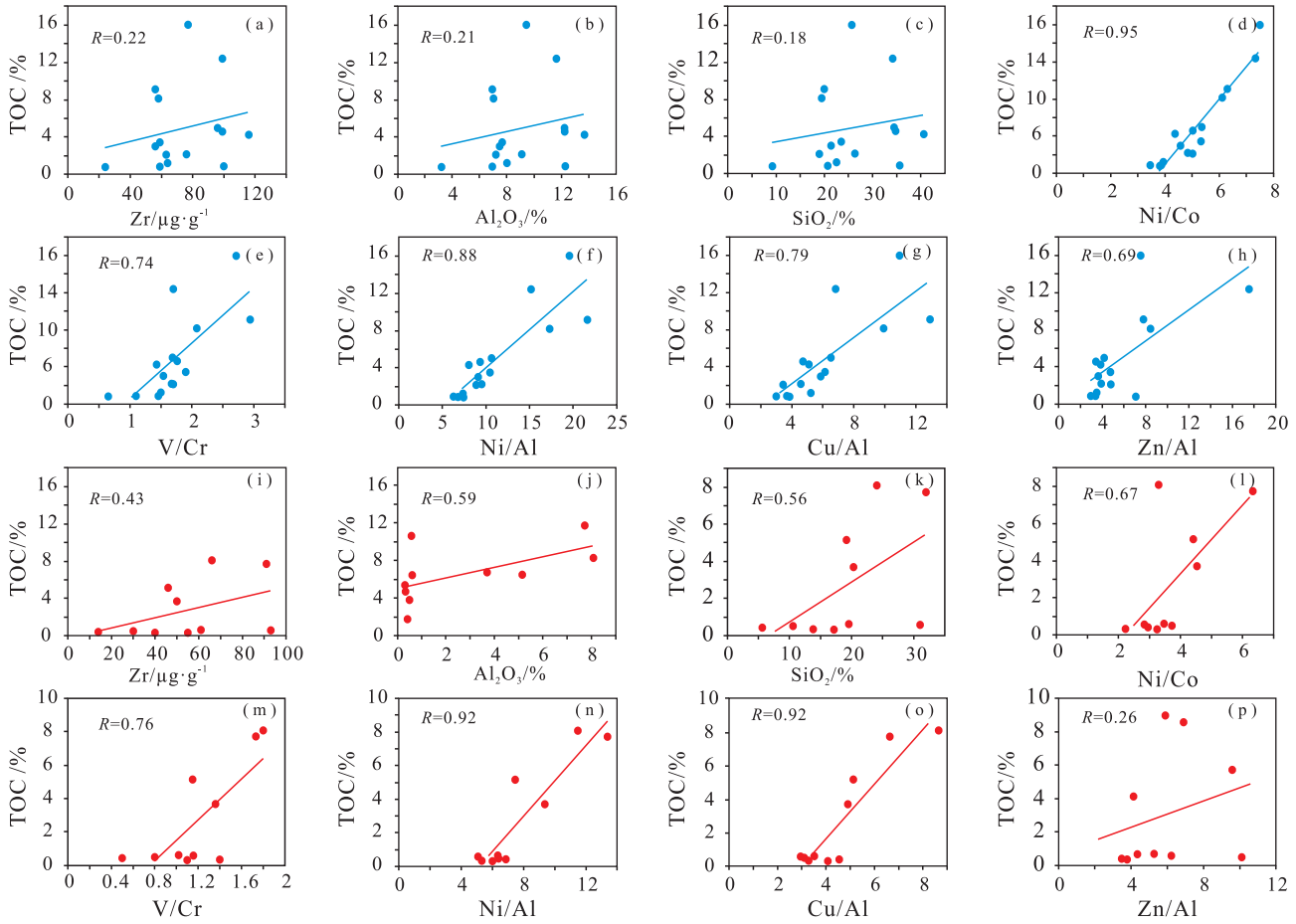
4.3.2 古氧化还原条件

古氧化还原条件间接影响有机质的保存，从而对有机质的富集起到控制作用。为了分析古氧化还原条件，常使用一些氧化还原敏感元素来进行分析。V 元素在还原环境下可以被还原为 V³⁺，在氧化环境下可以被氧化为 V⁵⁺；Mo 元素同样也存在不同的价态，其富集与缺氧环境有关，因此 V、Mo 元素可以很好地用作氧化还原条件的评价指标 (Hatch and Leventhal., 1992; Lézin *et al.*, 2013)。此外，元素的比值也可以用作古氧化还原环境的识别指标，Ni/Co < 5 与 V/Cr < 2 通常代表富氧环境、5 < Ni/Co < 7 与 2 < V/Cr < 4.25 通常代表氧气含量相对较低的环境、Ni/Co > 7 与 V/Cr > 4.25 通常代表一个缺氧环境 (Yan *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019; 白静等, 2020)。

通过对 V_{EF}、Mo_{EF}、Ni/Co 值、V/Cr 值与 TOC 的相关性研究，发现曲色组沉积时期的氧化还原状态对 TOC 的富集具有明显控制作用 (图 5)，当氧气含量相对较低时，促进了有机质的保存；当氧气含量相对较高时，不利于有机质的保存和富集。对曲色组烃源岩沉积上段与下段的氧化还原指标与 TOC 分别进行相关性分析，发现上下 2 段的氧化

还原指标均与 TOC 呈正相关 (图 6)，在垂向上的变化趋势与 TOC 曲线变化基本一致 (图 2)。尽管下段烃源岩沉积于氧气含量相对较高的富氧环境，然而受陆源输入和古生产力的影响，依然在下段形成了 3 段 TOC 的高值段，说明在富氧条件下同样能够产生富有机质页岩。在整个曲色组烃源岩沉积过程中，有机质的富集均与氧化还原反应的控制密切相关。

V_{EF} 和 Mo_{EF} 的协变图所示 (图 7-a)，曲色组整段烃源岩沉积过程中 Mo 相对于 U 强烈富集，在上下 2 段烃源岩沉积过程中，均受到不同程度“颗粒穿梭”的影响，使得 Mo 元素发生强富集作用，Mo/U 的高比值表明此时研究区处于与无限制海洋不同的“颗粒穿梭”趋势 (Algeo and Tribouillard., 2009; Tribouillard *et al.*, 2012)。此外，由于 Mo 对于氧化还原的反应比较敏感，且在硫化条件下富集，因此 Mo 与 TOC 的交汇图可用于古水文条件的研究，依据其比值大小可将其限制环境分为强 (Mo/TOC < 15 × 10⁻⁴)、中 (15 × 10⁻⁴ < Mo/TOC < 35 × 10⁻⁴) 和弱 (Mo/TOC > 35 × 10⁻⁴) 3 个等级 (Algeo and Lyons, 2006)。曲色组烃源岩沉积下段的 Mo/TOC 值范围为 1.4 × 10⁻⁴ ~ 22.2 × 10⁻⁴ (均值为 5.8 × 10⁻⁴)，曲色组烃源岩沉积上段的 Mo/TOC 值范围为 0.7 × 10⁻⁴ ~ 6.5 × 10⁻⁴ (均值为 3.3 × 10⁻⁴)，整体上受到强限制环境约束。根据 Mo 与 TOC 的交汇图 (图 7-b) 可知，研究区的海水封闭程度与黑海类似，代表此时研究区处于一个封闭一半封闭的



a—上段 Zr 与 TOC 交汇图；b—上段 Al₂O₃ 与 TOC 交汇图；c—上段 SiO₂ 与 TOC 交汇图；d—上段 Ni/Al 与 TOC 交汇图；e—上段 V/Cr 与 TOC 交汇图；f—上段 Ni/Al 与 TOC 交汇图；g—上段 Cu/Al 与 TOC 交汇图；h—上段 Zn/Al 与 TOC 交汇图；i—下段 Zr 与 TOC 交汇图；j—下段 Al₂O₃ 与 TOC 交汇图；k—下段 SiO₂ 与 TOC 交汇图；l—下段 Ni/Al 与 TOC 交汇图；m—下段 V/Cr 与 TOC 交汇图；n—下段 Ni/Al 与 TOC 交汇图；o—下段 Cu/Al 与 TOC 交汇图；p—下段 Zn/Al 与 TOC 交汇图

图 6 南羌塘坳陷 A 浅孔下侏罗统曲色组上段和下段陆源输入、氧化还原和古生产力分别与 TOC 含量的交汇图
 Fig. 6 Intersections of terrestrial inputs, redox and palaeoproductivity with TOC content of upper and lower intervals in the Lower Jurassic Quse Formation in Shallow Borehole A in South Qiangtang Depression

海水环境中 (Scott and Lyons, 2012)。毕洛错地区下侏罗统曲色组烃源岩发育于较封闭的凹陷区, 受到了一定的盆地限制 (谭富文等, 2016; 伊海生和夏国清, 2022)。区域性海侵作用 (万友利等, 2018), 使得深海区域的营养物质被携带进入研究区从而提高研究区的古生产力。

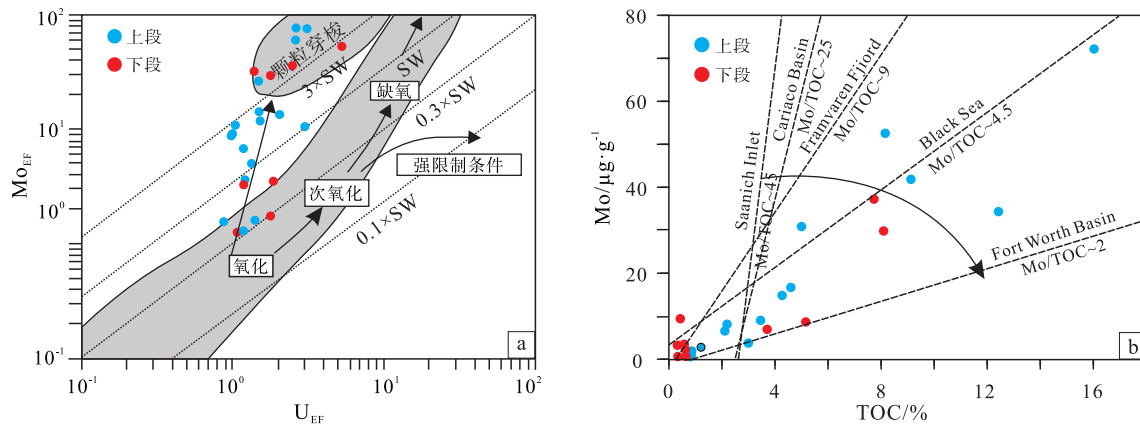
总体来说, 曲色组下段烃源岩沉积时水体含氧量相对较高, 这可能与该时期的研究区总体处于潮湿环境密切相关。上段烃源岩主要沉积于水体缺氧的环境, 这可能与早侏罗世托尔期全球大洋缺氧事件和区域性海侵作用相关 (Fu *et al.*, 2014; 付修根等, 2020b, 2021), 水体缺氧有利于有机质的保存, 这可能是上段烃源岩总有机质含量普遍高

于下段烃源岩的重要原因。

4.3.3 古生产力

海洋中的初级生产者们通过其生产作用间接控制有机质的输入, 从而间接控制有机质的富集, 因此查明古生产力情况对于研究有机质的富集具有重要作用。在还原条件下 Ni、Cu、Zn 是海洋生物有机质富集的主要营养元素 (Wang *et al.*, 2019)。由于其陆源碎屑组分含量远大于目前被测元素组分的总含量, 此时生物源钡和生物源硅作为评价古生产力的有效指标并不适用 (Dong *et al.*, 2022)。

利用较稳定的陆源输入元素指标 Al 去除陆源碎屑对古生产力的影响, 得出较为准确的 Ni/Al、



a— Mo_{EF} 与 U_{EF} 协变图 (改自 Dong *et al.*, 2022); b—TOC与Mo交汇图 (改自 Xu *et al.*, 2023)

图 7 南羌塘坳陷 A 浅孔下侏罗统曲色组氧化还原特征与盆地限制条件分析图

Fig. 7 Analysis of redox characteristics and basin constraints of the Lower Jurassic Quse Formation in Shallow Borehole A in South Qiangtang Depression

Cu/Al、Zn/Al 等古生产力指标 (Zhanget *al.*, 2020)。通过对 Ni/Al、Cu/Al、Zn/Al 与 TOC 的相关性分析,发现曲色组古生产力指标对 TOC 的富集控制机制,在古生产力低值区域对 TOC 富集基本没有影响,而在古生产力相对较高的范围内对 TOC 富集具有促进作用(图 5)。对曲色组烃源岩沉积上段与下段的古生产力指标与 TOC 分别进行相关性分析,发现上下 2 段的古生产力指标均与 TOC 呈正相关(图 6)。在垂向上 2 段的整体变化趋势相对一致,但曲色组烃源岩沉积下段的古生产力远小于曲色组烃源岩沉积上段的古生产力(图 2)。

5 有机质差异富集机理

在层序地层学、沉积学系统研究的基础上,结合烃源岩沉积的古环境指标(古气候与古盐度、热液活动)和有机质富集指标(古陆源输入、古氧化还原、古生产力)认为研究区下侏罗统曲色组烃源岩有机质富集存在 2 个不同阶段。

曲色组烃源岩沉积的第 1 个阶段发生在下段(图 8-a)。该阶段 TOC 含量与陆源输入指标具有明显正相关,说明陆源输入对有机质的富集有一定促进作用。总体潮湿背景下,一定的淡水输入为研究区带来了营养物质,有利于浮游生物勃发,从而促进古生产力升高。但是该阶段的氧化还原指标显示水体主要为富氧环境,使得有机质保存条件较差可能是导致下段部分层位 TOC 含量较低的主要原

因。因此,曲色组烃源岩下段有机质的富集主要受陆源输入、氧化还原与古生产力的共同作用,沉积了以灰质页岩、膏质泥岩、泥质灰岩、含泥膏岩为主的岩石类型。

曲色组烃源岩沉积的第 2 个阶段发生在上段(图 8-b)。这一阶段沉积早期,相对较高的氧气含量使有机质的保存受到影响,使得此时有机质含量不高。该阶段 TOC 含量与陆源输入指标的相关性较低,说明陆源输入对有机质富集的影响不大。该时期区域性海侵引起研究区海平面升高(万友利等, 2018),造成底层水体含氧量减小。海侵带来的营养物质促进了水体表层生物勃发,提高了古生产力。可能伴随早侏罗世托尔期全球大洋缺氧事件的出现(Fu *et al.*, 2014; 付修根等, 2020b, 2021),研究区内大量生物死亡,在其死亡沉降过程中,进一步消耗掉了水体中的溶解氧,使得此时水体缺氧状态加剧,有机质得以较好保存。因此,曲色组烃源岩上段有机质的富集主要受到氧化还原条件与古生产力的控制,沉积了以灰质页岩为主的岩石类型。

6 结论

1) 根据 Mo/TOC 的均值为 4.3×10^{-4} ,表明羌塘盆地封闭程度与黑海类似,属于一个强限制盆地。且曲色组烃源岩在缺氧环境下大于富氧环境下的总有机质含量,说明在封闭缺氧的凹陷环境更有利于有机质的富集。

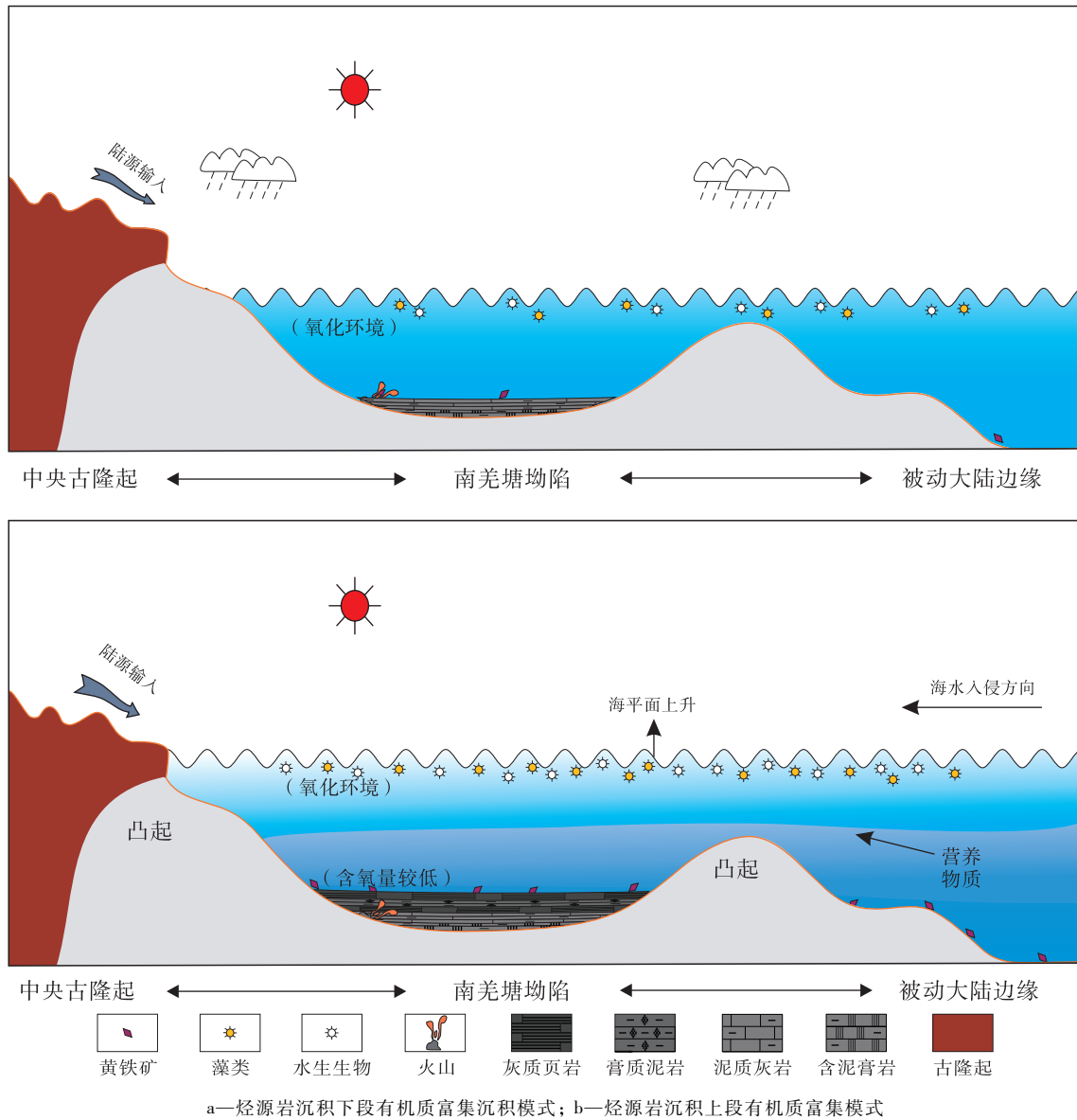


图 8 南羌塘坳陷下侏罗统曲色组页岩有机质富集模式

Fig. 8 Organic matter enrichment models for shale of the Lower Jurassic Quse Formation in South Qiangtang Depression

2) 根据陆源输入指标与总有机质含量的相关性分析结果，发现适量的陆源输入更有利于有机质富集；根据氧化还原指标与总有机质含量的相关性分析结果，发现当氧气含量相对较高时对于有机质的富集没有明显促进作用，此外有机质在富氧环境中也不利于保存，而当氧气含量相对较低时更有利于有机质的富集；根据古生产力指标与总有机质含量的相关性分析结果，发现较高的古生产力促进有机质的富集。

3) 根据有机质富集机理分析，识别出下侏罗

统曲色组烃源岩的“二段式”发育模式。在烃源岩沉积的第 1 阶段（烃源岩沉积下段），氧气含量相对较高的环境下，一定的淡水输入为研究区带来了营养物质，间接促进了古生产力升高，此时有机质的富集主要受到陆源输入、氧化还原作用与古生产力的共同控制。在烃源岩沉积的第 2 阶段（烃源岩沉积上段），在氧气含量相对较低的还原环境下，受到区域海水入侵与早侏罗世托尔期全球大洋缺氧事件共同影响，此时有机质的富集主要是受到氧化还原条件与古生产力的控制。

参考文献 (References)

- 白静, 徐兴友, 陈珊, 刘卫斌, 刘畅, 张昌盛. 2020. 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复: 以吉页油1井为例. *中国地质*, 47(1): 220-235. [Bai J, Xu X Y, Chen S, Liu W B, Liu C, Zhang C S. 2020. Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling sag, Songliao Basin: a case study of Jiyeyou 1 Well. *Geology in China*, 47(1): 220-235]
- 陈诗越, 王苏民, 金章东, 沈吉. 2003. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr/Rb 值及其环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, (4): 35-38. [Chen S Y, Wang S M, Jing Z D, Shen J. 2003. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the central Tibetan Plateau and its environment implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (4): 35-38]
- 杜佰伟, 彭清华, 谢尚克, 郑博. 2014. 羌塘盆地南部侏罗统曲色组页岩气资源潜力分析. *新疆石油地质*, 35(2): 144-148. [Du B W, Peng Q H, Xie S K, Zheng B. 2014. The Quse shale gas resource potential of Lower Jurassic in Southern Qiangtang Basin, Tibet. *Xingjiang Petroleum Geology*, 35(2): 144-148]
- 付修根, 王剑, 宋春彦, 刘中戎. 2020a. 羌塘盆地第一口油气科学钻探井油气地质成果及勘探意义. *沉积与特提斯地质*, 40(1): 15-25. [Fu X G, Wang J, Song C Y, Liu Z R. 2020a. Hydrocarbon geological results and exploration significance of the first oil and gas scientific drilling well in Qiangtang Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(1): 15-25]
- 付修根, 王剑, 曾玉红, 宋春彦, 曾胜强. 2020b. 羌塘中生代盆地大洋缺氧事件及全球对比. *地质论评*, 66(5): 1130-1142. [Fu X G, Wang J, Zeng Y H, Song C Y, Zeng S Q. 2020b. Oceanic anoxic events in the Mesozoic Qiangtang Basin and global comparison. *Geological Review*, 66(5): 1130-1142]
- 付修根, 王剑, 文华国, 宋春彦, 王忠伟, 曾胜强, 冯兴雷, 韦恒叶. 2021. 东特提斯开阔海环境中托尔期大洋缺氧事件的记录: 对全球气候变化和区域环境扰动的启示. *中国科学: 地球科学*, 51(12): 2184-2196. [Fu X G, Wang J, Wen H G, Song C Y, Wang Z W, Zeng S Q, Feng X L, Wei H Y. 2021. A Toarcian Ocean anoxic event record from an open-ocean setting in the eastern Tethys: implications for global climatic change and regional environmental perturbation. *Science China: Earth Sciences*, 51(12): 2184-2196]
- 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 李志明, 蒋启贵, 吴世强, 李政, 徐祖新. 2022. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义. *石油与天然气地质*, 43(1): 1-25. [Li M W, Ma X X, Jin Z J, Li Z M, Jiang Q G, Wu S Q, Li Z, Xu Z X. 2022. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China. *Oil & Gas Geology*, 43(1): 1-25]
- 李高杰, 夏国清, 伊海生, 季长军, 杨嘉宝. 2020. 西藏南羌塘坳陷泥质烃源岩评价及有利生烃区预测. *地质论评*, 66(5): 1241-1260. [Li G J, Xia G Q, Yi H S, Ji C J, Yang J B. 2020. Evaluation of muddy hydrocarbon source rocks and prediction of favorable hydrocarbon zones in the South Qiangtang Depression, Tibet. *Geological Review*, 66(5): 1241-1260]
- 李艳青, 余振兵, 马昌前. 2011. 石英 SEM-CL 微结构及其在岩石学中的应用. *地球科学进展*, 26(3): 325-331. [Li Y Q, Yu Z B, Ma C Q. 2011. SEM-CL Analysis of quartz and its application in petrology. *Advances in Earth Science*, 26(3): 325-331]
- 马义权, 杜学斌, 刘惠民, 陆永潮. 2017. 东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征、成因及演化. *地球科学*, 42(7): 1195-1208. [Ma Y Q, Du X B, Liu H M, Lu Y C. 2017. Characteristics, depositional processes, and evolution of shale lithofacies of the Upper Submember of Es₄ in the Dongying Depression. *Earth Science*, 42(7): 1195-1208]
- 潘应娣, 胡修棉, 马安林, 梁文博. 2023. 班公湖—怒江缝合带同碰撞海沟盆地砂岩物源分析及其大地构造意义. *地质学报*, 97(9): 2992-3005. [Pan Y D, Hu X M, Ma A L, Liang W B. 2023. Provenance analysis of sandstone in the syncollisional trench basin of the Banggong Lake-Nujiang suture zone and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2992-3005]
- 彭清华, 杜佰伟, 谢尚克. 2022. 羌塘盆地昂达尔错古油藏油气来源及成藏模式. *科学技术与工程*, 22(33): 14599-14607. [Peng Q H, Du B W, Xie S K. 2022. Hydrocarbon source and reservoir forming model for the Paleo-reservoir of Angdarco area in Qiangtang Basin. *Science Technology and Engineering*, 22(33): 14599-14607]
- 彭光荣, 陈聪, 龙祖烈, 张丽丽, 汪旭东, 马勇, 辛志源, 翟普强. 2023. 白云凹陷烃源岩有机质富集机理. *地质学报*, 97(12): 4164-4178. [Peng G R, Chen C, Long Z L, Zhang L L, Wang X D, Ma Y, Xin Z Y, Zhai P Q. 2023. Organic matter enrichment of different types of source rocks in the Baiyu sag. *Acta Geologica Sinica*, 97(12): 4164-4178]
- 沈安江, 付小东, 张建勇, 魏学斌, 胡安平, 王剑, 熊绍云, 付修根, 谢渊, 刘思琪, 李茜, 王鑫, 贺训云, 乔占峰, 郑剑锋, 段军茂. 2023. 羌塘盆地上三叠统一下侏罗统海相页岩油特征及发现意义. *石油勘探与开发*, 50(5): 962-974. [Shen A J, Fu X D, Zhang J Y, Wei X B, Hu A P, Wang J, Xiong S Y, Fu X G, Xie Y, Liu S Q, Li Q, Wang X, He X Y, Qiao Z F, Zheng J F, Duan J M. 2023. Characteristics and discovery significance of the Upper Triassic-Lower Jurassic marine shale oil in Qiangtang Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 962-974]
- 沈安江, 熊绍云, 胡安平, 张建勇, 许强, 付小东, 潘立银, 王鑫, 刘思琪, 李茜, 段军茂. 2024. 羌塘盆地中生代岩相古地理研究新进展. *海相油气地质*, 29(1): 30-44. [Shen A J, Xiong S Y, Hu A P, Zhang J Y, Xu Q, Fu X D, Pan L Y, Wang X, Liu S Q, Li Q, Duan J M. 2024. New progress in the study of Mesozoic lithofacies and paleogeography in Qiangtang Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 29(1): 30-44]
- 谭富文, 张润合, 王剑, 斯春松, 马立桥. 2016. 羌塘晚三叠世一早白垩世裂陷盆地基底构造. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 43(5): 513-521. [Tan F W, Zhang R H, Wang J, Si C S, Ma L Q. 2016. Discussion on basement structures of the late Triassic-early Cretaceous Qiangtang rift basin in Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(5): 513-521]

- 谭梅,季长军,周冰洋,康少伟. 2023. 南羌塘坳陷上三叠统一下侏罗统碳酸盐岩元素地球化学特征及指示意义. 地质论评, 69(3): 943-958. [Tan M, Ji C J, Zhou B Y, Kang S W. 2023. Element geochemical characteristics and their indicative significance of the Upper Triassic-Lower Jurassic carbonate rocks in the Southern Qiangtang Depression. Geological Review, 69(3): 943-958]
- 唐友军,杨易卓,孟宪新,王霆,何大祥,李梦如,季长军,孙鹏,蔡意兰. 2019. 火山活动对南羌塘盆地曲色组烃源岩地球化学特征影响探讨. 天然气地球科学, 30(5): 721-728. [Tang Y J, Yang Y Z, Meng X X, Wang T, He D X, Li M R, Ji C J, Sun P, Cai Y L. 2019. Influence of volcanic activity on geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Quse Formation in the South Qiangtang Basin. Natural Gas Geoscience, 30(5): 721-728]
- 唐友军,张欣越,季长军,王霆,何大祥,杨易卓,孙鹏,李博恩,裴冰冰. 2022. 南羌塘盆地侏罗系砂糖状白云岩古油藏油源研究: 来自芳烃化合物和单体烃碳同位素的证据. 长江大学学报(自然科学版), 19(2): 1-11. [Tang Y J, Zhang X Y, Ji C J, Wang T, He D X, Yang Y Z, Sun P, Li B C, Pei B B. 2022. Crude oil source of granulated dolomite paleo-reservoir from the Jurassic strata in the South Qiangtang Basin: evidence from carbon isotopes of aromatic compounds and monomeric hydrocarbons. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 19(2): 1-11]
- 万友利,王剑,付修根,谭富文,王忠伟. 2018. 羌塘盆地南部古油藏带布曲组白云岩地球化学特征及成因机制. 成都理工大学学报(自然科学版), 45(2): 129-141. [Wan Y L, Wang J, Fu X G, Tan F W, Wang Z W. 2018. The geochemical characteristics and mechanism of dolomite in paleo-reservoir of Buqu Formation, south Qiangtang Basin, Tibet, China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 45(2): 129-141]
- 万友利,赵瞻,胡志中,李学仁. 2021. 羌塘盆地中侏罗统布曲组白云岩有序度与晶胞参数的影响因素及地质意义. 沉积与特提斯地质, 41(4): 512-523. [Wan Y L, Zhao Z, Hu Z Z, Li X R. 2021. Controlling factors and their geological significances of order degrees and unit-cell parameters of dolomites in the Middle Jurassic Buqu Formation in Qiangtang Basin. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 41(4): 512-523]
- 王剑,付修根,沈利军,谭富文,宋春彦,陈文彬. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景. 地质论评, 66(5): 1091-1113. [Wang J, Fu X G, Shen L J, Tan F W, Song C Y, Cheng W B. 2020. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang(Tibet). Geological Review, 66(5): 1091-1113]
- 王永胜,郑春子. 2008. 藏北南羌塘盆地毕洛错地区下侏罗统曲色组石膏岩层. 地层学杂志, (3): 321-326. [Wang Y S, Zheng C Z. 2008. Gypsum beds of the early Jurassic Quse formation in the biloucuo area of the southern qiangtang basin, Northern Xizang. Journal of Stratigraphy, (3): 321-326]
- 王子玉,程安进,卓二军,姚琬圭. 1994. 太湖全新世沉积物的古盐度指标及其环境意义. 地层学杂志, (3): 196-202. [Wang Z Y, Chen A J, Zhuo E J, Yao W G. 1994. Paleosalinity indicators of Holocene sediments from Lake Taihu and their environmental significance. Journal of Stratigraphy, (3): 196-202]
- 魏学斌,张小军,张世铭,盛军,伍坤宇,马新民,郭笑,魏巍,王朴,苟迎春. 2024. 南羌塘盆地 BK4 井曲色组油页岩生物标志物异常组合现象及意义. 天然气地球科学, 35(2): 327-343. [Wei X B, Zhang X J, Zhang S M, Sheng J, Wu K Y, Ma X M, Guo X, Wei W, Wang P, Gou Y C. 2024. Abnormal assemblage of biomarkers in oil shale and its significance in Well BK4, Quse Formation in South Qiangtang Basin. Natural Gas Geoscience, 35(2): 327-343]
- 文华国,郑荣才,唐飞,郑爱萍,桑廷元,陈守春,李瑰丽,李联新. 2008. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长 6 段古盐度恢复与古环境分析. 矿物岩石, (1): 114-120. [Wen H G, Zheng R C, Tang F, Zheng A P, Sang Y Y, Chen S C, Li G L, Li L X. 2008. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos Basin. Mineralogy and Petrology, (1): 114-120]
- 吴福元,万博,赵亮,肖文交,朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36(6): 1627-1674. [Wu F Y, Wan B, Zhao L, Xiao W J, Zhu R X. 2020. Tethyan geodynamics. Acta Petrologica Sinica, 36(6): 1627-1674]
- 夏国清,伊海生,黄华谷,李军鹏. 2009. 北羌塘盆地中侏罗统布曲组缓坡相及沉积演化. 岩性油气藏, 21(2): 29-34. [Xia G Q, Yi H S, Huang H G, Li J P. 2009. Carbonate ramp facies and sedimentary evolution of Middle Jurassic Buqu Formation in northern Qiangtang Basin. Lithologic Reservoirs, 21(2): 29-34]
- 杨易卓,黄志龙,赵珍,唐友军. 2022. 羌塘盆地毕洛错地区古油藏地球化学特征与油源对比. 地球科学, 47(5): 1834-1848. [Yang Y Z, Huang Z L, Zhao Z, Tang Y J. 2022. Geochemical characteristics and oil source correlation of Paleo-reservoirs in Biluocuo area, Qiangtang Basin. Earth Science, 47(5): 1834-1848]
- 伊海生,夏国清. 2022. 羌塘盆地优质烃源岩和白云岩储油层的层位与分布. 沉积与特提斯地质, 42(3): 455-464. [Yi H S, Xia G Q. 2022. Stratigraphic position of high-quality source rocks and distribution of oil-bearing dolomites in the Qiangtang Basin. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3): 455-464]
- 张晓,徐桂文,达雪娟,陈兰. 2019. 藏北羌塘盆地侏罗纪含砾石藻黑色岩系地球化学特征与地质意义. 矿物学报, 39(5): 520-526. [Zhang X, Xu G W, Da X J, Chen L. 2019. Geochemical characteristics of the Jurassic coccolith-bearing black rock series from the Qiangtang Basin, Northern Tibet, China and their significances. Acta Mineralogica Sinica, 39(5): 520-526]
- Adachi M, Yamamoto K, Suigiski R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific: their geological significance as indication of ocean ridge activity. Sedimentary Geology, (47): 125-148.
- Algeo T J, Lyons T W. 2006. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: implications for analysis of paleoredox and palaeohydrographic conditions. Paleogeography, 21(1016): 23.
- Algeo T J, Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation. Chemical Geology, 268(3-4): 211-225.
- Chen H, Xie X X, Hu C Y, Huang J H, Li H J. 2012. Geochemical charac-

- teristics of Late Permian sediments in the Dalong Formation of the Shangsi Section, Northwest Sichuan Basin in South China: implications for organic carbon-rich siliceous rocks formation. *Journal of Geochemical Exploration*, 112: 35–53.
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust; contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104: 1–37.
- Canfield D E. 1994. Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments. *Chemical Geology*, 114(3–4): 315–329.
- Dong T, Wang C, Liang X, Wang G C, Jiang S. 2022. Paleodepositional conditions and organic matter accumulation mechanisms in the Upper Ordovician-lower Silurian Wufeng-Longmaxi shales, Middle Yangtze region, South China. *Marine and Petroleum Geology*, 143: 105823.
- 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, Wabauensee country, Kansas, USA. *Chemical Geology*, 99(1–3): 65–82.
- Fu X G, Tan F W, Feng X L, Wang D, Chen W B, Song C Y, Zeng S Q. 2014. Early Jurassic anoxic conditions and organic accumulation in the eastern Tethys. *International Geology Review*, 56(12): 1450–1465.
- Garbán G, Martínez M, Márquez G, Rey O, Escobar M, Esquinas N. 2017. Geochemical signatures of bedded cherts of the upper La Luna Formation in Táchira State, western Venezuela: assessing material provenance and paleodepositional setting. *Sedimentary Geology*, 347: 130–147.
- Lézin C, Andreu B, Pellenard P, Bouchez J L, Emmanuel L, Faure P, Landrein P. 2013. Geochemical disturbance and paleoenvironmental changes during the early Toarcian in NW Europe. *Chemical Geology*, 341: 1–15.
- Lei Z H, Dashtgard S E, Wang J, Li M, Feng Q L, Yu Q, Zhao A K, Du L T. 2019. Origin of chert in Lower Silurian Longmaxi Formation: implications for tectonic evolution of Yangtze Block, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 529: 53–66.
- Ma Y Q, Fan M J, Lu Y C, Guo X S, Hu H Y, Chen L, Wang C, Liu X C. 2016. Geochemistry and sedimentology of the Lower Silurian Longmaxi mudstone in southwestern China: implications for depositional controls on organic matter accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 75: 291–309.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715–717.
- Panahi A, Young G M, Rainbird R H. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199–2220.
- Scott C, Lyons T W. 2012. Contrasting molybdenum cycling and isotopic properties in euxinic versus non-euxinic sediments and sedimentary rocks: refining the paleoproxies. *Chemical Geology*, 324–325: 19–27.
- Shi J, Zou Y R, Cai Y L, Zhan Z W, Sun J N, Liang T, Peng P A. 2022. Organic matter enrichment of the Chang 7 member in the Ordos Basin: insights from chemometrics and element geochemistry. *Marine and Petroleum Geology*, 135: 105404.
- Tribovillard 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.
- Tribovillard N, Algeo T J, Baudin F, Riboulleau A. 2012. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum-uranium covariation: applications to Mesozoic paleoceanography. *Chemical Geology*, (324–325): 46–58.
- Wang Y X, Xu S, Hao F, Lu Y B, Shu Z G, Yan D T, Lu Y C. 2019. Geochemical and petrographic characteristics of Wufeng-Longmaxi shales, Jiaoshiha area, southwest China: implications for organic matter differential accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 138–154.
- Xu L L, Huang S P, Wang Y, Zhou X H, Liu Z X, Wen Y R, Zhang Y L, Sun M D. 2023. Palaeoenvironment evolution and organic matter enrichment mechanisms of the Wufeng-Longmaxi shales of Yuanán block in western Hubei, middle Yangtze: implications for shale gas accumulation potential. *Marine and Petroleum Geology*, 152: 106242.
- Yamamoto K. 1987. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, 52(1–2): 65–108.
- Yan D T, Chen D Z, Wang Z Z, Li J, Yang X R, Zhang B. 2019. Climatic and oceanic controlled deposition of late ordovician-early silurian black shales on the north yangtze platform, south China. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 112–121.
- Zhang L C, Xiao D S, Lu S, Jiang S, Lu S F, Jiang S, Lu S D. 2019. Effect of sedimentary environment on the formation of organic-rich marine shale: insights from major/trace elements and shale composition. *International Journal of Coal Geology*, 204: 34–50.
- Zheng S C, Feng Q L, Tribovillard N, Servais T, Zhang Y, Gao B. 2020. New insight into factors controlling organic matter distribution in Lower Cambrian source rocks: a study from the Qiongzhusi Formation in South China. *Journal of Earth Science*, 31(1): 181–194.

(责任编辑 郑秀娟)