

引用格式: 赵爽, 赵文璞, 李一凡. 2026. 黔东北地区成冰纪大塘坡组页岩古环境演化与有机质富集机理[J]. 沉积学报. doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.016.
Zhao Shuang, Zhao WenPu, Li YiFan. 2026. Evolution of Paleoenvironment and Mechanism of Organic Matter Enrichment of the Datangpo Formation in Northeastern Guizhou[J]. Acta Sedimentologica Sinica, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.016.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.016 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.016

黔东北地区成冰纪大塘坡组页岩古环境演化与有机质富集机理

赵爽¹, 赵文璞², 李一凡²

1. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇三地质大队, 贵州铜仁 554300

2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

摘要 【目的】黔东北地区大塘坡组的沉积环境演化与有机质富集机制缺乏系统性研究。本研究旨在通过高分辨率地球化学分析, 揭示沉积环境演化序列, 阐明有机质富集的主控因素。【方法】对黔东北地区KZ8井大塘坡组43件岩心样品进行了系统的TOC及主微量元素地球化学分析, 样品涵盖I段(锰碳酸盐岩与含锰页岩)、II段(黑色页岩)和III段(灰色页岩)。【结果】研究揭示了大塘坡组I段沉积于气候有限回暖背景下, 中一强局限盆地中铁化与硫化还原条件的高频交替, 并伴有显著热液活动与间歇性海侵。锰碳酸盐岩期较高的TOC主要受热液与海水输入驱动的高生产力控制; 而含锰页岩期生产力因营养供给受限有所下降, 但其TOC在硫化保存条件下未显著降低。此外I段有机质在锰矿形成过程中部分被消耗。大塘坡组II段沉积于温暖气候下的强局限环境, 以持续硫化还原和高陆源输入为特征, 增强的陆源营养输入维持的生产力与强局限硫化水体优越保存条件的高效耦合, 使其TOC含量达到峰值; 大塘坡组III段则因生产力衰竭及水体完全氧化导致TOC含量低。【结论】明确了该区域“生产力-保存条件”协同控制下有机质富集机制随环境演化的规律, 为区域页岩气勘探提供了直接依据。研究认识基于单井数据, 其区域代表性有待更多钻孔验证, 且各环境要素对TOC的定量贡献尚未精确厘定, 未来需建立更具普适性的富集模型。

关键词 成冰纪; 大塘坡组; 古气候; 氧化还原; 初级生产力; 有机质富集

第一作者 赵爽, 男, 1988年出生, 硕士研究生, 高级工程师, 沉积矿产勘查, E-mail: 244129268@qq.com

通信作者 李一凡, 男, 副教授, 博士生导师, 细粒沉积学和沉积地球化学, E-mail: liyifan@cugb.edu.cn

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)00-0000-00

0 引言

在全球能源需求持续增长的形势下, 非常规能源勘探与开发成为热点, 页岩气作为重要的非常规能源, 其勘探开发对缓解能源压力意义重大。中国深层古老烃源岩勘探近年来取得显著进展, 例如四川乐山金石103HF探井、贵州丹地1井等的突破, 揭示了深层古老地层所蕴含的巨大页岩气潜力(沐雨, 2021; 袁鹏, 2023)。成冰纪(约720~635 Ma)是地质历史中的关键时期, 经历了两次全球性冰期事件(Sturtian和Marinoan), 被称为“雪球地球”时期。沉积在间冰期的大塘坡组, 记录了剧烈的气候变化、海洋氧化还原状态波动以及

收稿日期: 2025-10-27; 收修改稿日期: 2026-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(42272173, U24B6001); 贵州省科技支撑资助项目(黔科合支撑[2024]一般128)

生物演化等重要事件 (Hoffman *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2012; Brocks *et al.*, 2017)。南华系大塘坡组在华南地区保存良好, 黑色岩系 (含锰岩系和页岩系) 有机质含量高, 被视为优质烃源岩 (赵文智等, 2018; 李婷婷等, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。

关于富有机质页岩的成因一直是研究前沿, 其有机质的富集并非单一因素控制, 而是初级生产力与沉积保存条件共同作用的结果。一方面, 缺氧的沉积环境有利于有机质保存 (Kennedy *et al.*, 2014); 另一方面, 足够高的表层水体生产力是有机质供给的前提, 例如现代黑海虽整体缺氧却未形成富有机质沉积, 即受生产力限制 (Gallego-Torres *et al.*, 2007)。因此, 深入理解古生产力、氧化还原条件、古气候及盆地古地理等多因素的耦合关系, 是揭示有机质富集机制的关键 (Cheng *et al.*, 2021; Tan *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。近年来, 针对华南大塘坡组的古环境与有机质富集机制已取得一系列重要认识, 普遍认为其主要受初级生产力、氧化还原条件、热液活动及盆地演化等多因素协同控制 (Cheng *et al.*, 2021; Tan *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。然而, 这些研究多侧重于对特定层段或单一控制因素的探讨。对于黔东北武陵裂谷盆地内, 完整的间冰期沉积序列中, 多要素如何随时间演变并共同调控有机质差异富集的过程, 仍缺乏高分辨率的系统刻画。

为此, 本研究选取黔东北地区 KZ8 井全取心资料, 通过对大塘坡组全段 (I、II、III 段) 进行系统的地球化学分析, 旨在: (1) 重建该区域完整间冰期的连续古环境演化序列, 重点揭示气候、水文 (局限程度)、氧化还原条件及热液活动的演变过程; (2) 阐明上述多要素的耦合关系如何分阶段控制各层段的有机质富集行为。本研究旨在通过此高分辨率案例, 深化对裂谷盆地背景下古老烃源岩非均质性形成机制的理解, 以期为黔东北地区的页岩气勘探决策提供直接的地球化学依据。

1 地质背景

黔东北大塘坡组所在的华南地块, 其形成与新元古代四堡造山运动 (约 1 000~900 Ma) 密切相关。在这一时期, 扬子地块与华夏地块发生碰撞拼合, 最终形成了华南地块 (王剑等, 2001; Wang and Li, 2003)。约 820 Ma 时, 受 Rodinia 超大陆裂解的影响, 华南地块发生伸展运动, 南华盆地应运而生 (李献华等, 2008) (图 1a)。此后, 南华盆地历经多次裂谷活动, 内部形成了一系列北东—南西向 (现今方向) 的地堑—地垒构造, 这些构造的形成不仅控制了盆地的古地理格局, 还为沉积物的堆积创造了空间 (周琦等, 2016; 张予杰等, 2020; 余文超等, 2020) (图 1b)。

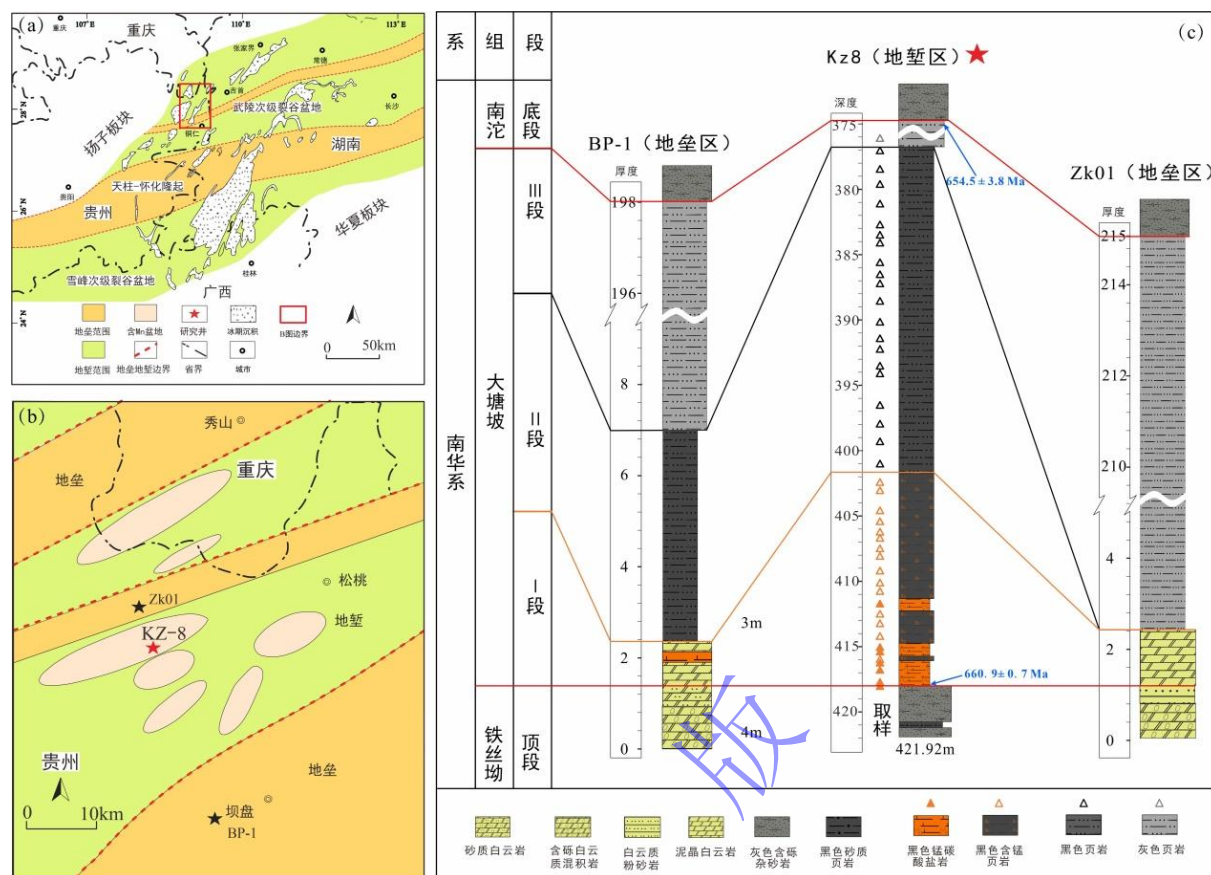


图1 (a) 南华纪南华盆地古地理图(据 Li *et al.*, 2022; 赵文璞等, 2023 修改); (b) 研究区大塘坡组构造简图和古地理简图(据 Cheng *et al.*, 2021; 赵文璞等, 2023 修改); (c) 大塘坡组地层划分、取样和沉积序列

Fig.1 (a) Paleogeographic map of the Nanhua Basin during the Cryogenian period (modified from Li *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2023); (b) structural and paleogeographic sketch map of the Datangpo Formation in the study area (modified from Cheng *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023); (c) stratigraphic division, sampling, and sedimentary sequence of the Datangpo Formation

南华盆地内保存了完整的成冰纪地层序列, 包括 Sturtian 冰期 (717~660Ma)、大塘坡间冰期和 Marinoan 冰期的沉积记录。其中, Sturtian 冰期的铁丝坳组(或称长安组)和 Marinoan 冰期的南沱组分别由冰海相混积岩、砂岩和粉砂岩构成 (Li *et al.*, 2012)。在两个冰川沉积序列之间, 沉积了一套气候回暖条件下以细粒沉积物为主的大塘坡组, 与上下地层呈整合接触 (图 1c) (汪正江等, 2015; 赵文璞等, 2023)。根据已有研究, 不同方法获得的年龄数据存在一定差异。高增地区大塘坡组底部的凝灰质层, 通过锆石 CA-ID-TIMS U-Pb 定年获得的年龄为 660.98 ± 0.74 Ma (Rooney *et al.*, 2020); 而茅坪洞地区紧邻马里诺冰期南沱组之下的凝灰质层, 通过 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得的年龄为 654.5 ± 3.8 Ma (Zhang *et al.*, 2008)。此外, 旋回地层学分析结果显示, 大塘坡组的沉积起始与结束时间约为 660 Ma 至 650 Ma, 持续约 9.8 Ma (Bao *et al.*, 2018)。

值得注意的是, 大塘坡组沉积显著受地堑—地垒构造控制, 表现为显著的相变与厚度差

异(周琦等, 2016; Yu *et al.*, 2022) (图 1c)。地垒区厚度较薄, 通常由三部分组成: I 段为厚 2~4 m 的盖层白云岩; II 段为厚 0.5~4 m 的黑色页岩(局部可缺失); III 段为厚约 160 m 的灰色页岩(Yu *et al.*, 2017)。相比之下, 在地堑区, 大塘坡组沉积厚度巨大, 同样细分为三段: I 段为厚 0.5~20 m 的含锰岩系, 包括锰碳酸盐岩和含锰页岩, 二者通常频繁互层(图 2a、b); II 段为厚 1~70 m 的富有机质黑色页岩(图 2c); III 段为厚 100~700 m 的缺乏有机质的灰色页岩层系(图 2d)(Yu *et al.*, 2016; 杜远生等, 2023)。放射性年代学数据(如第二段底部火山灰锆石 U-Pb 年龄 658.80 ± 0.50 Ma、 662.70 ± 6.20 Ma 等)支持地垒区的粉砂质白云岩沉积与地堑区的锰矿床为同期异相单元(周川明等, 2004; Zhang *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2016, 2017)。这一完整的沉积序列及空间分异, 清晰地记录了从 Sturtian 冰期经大塘坡间冰期至 Marinoan 冰期的古环境演变与盆地建造过程。

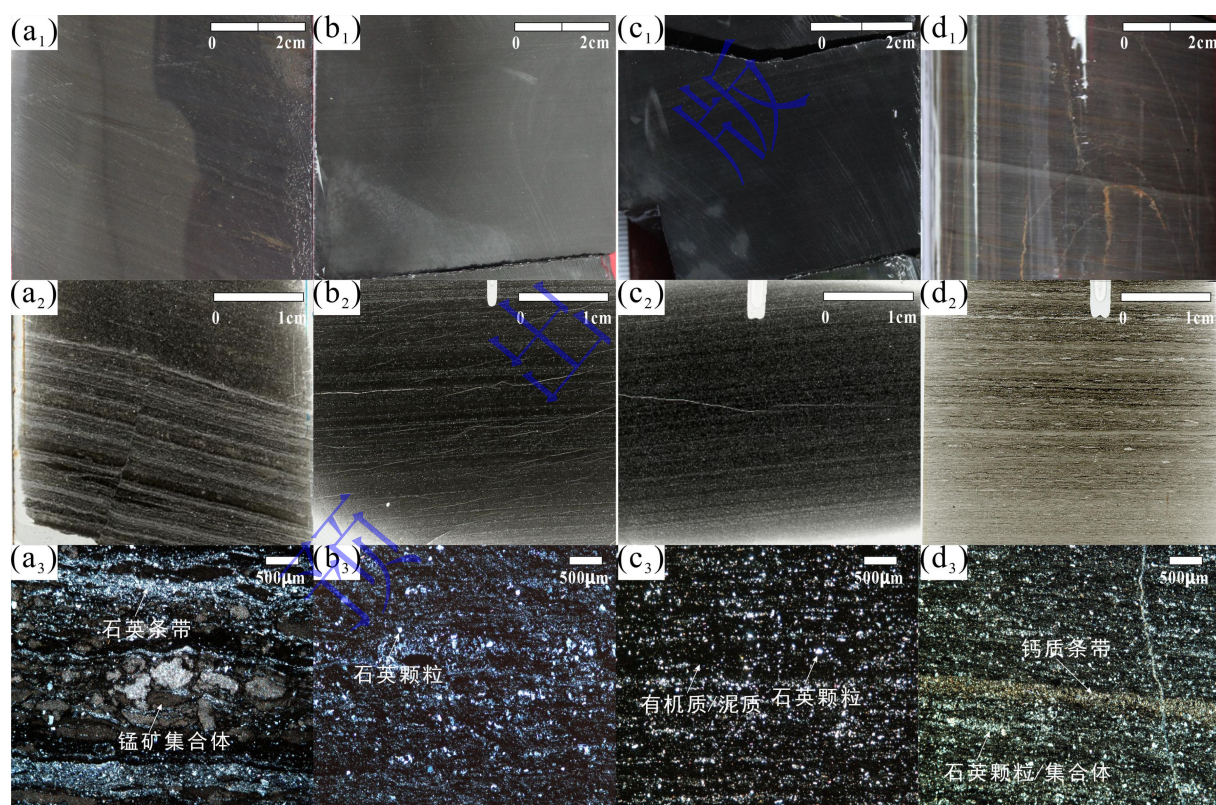


图 2 黔东北 Kz8 井大塘坡组岩心、薄片及镜下岩性特征

(a) 锰碳酸盐岩的岩心 (a₁) 薄片 (a₂) 正交光显微照片 (a₃); (b) 含锰页岩的岩心 (b₁) 薄片 (b₂) 正交光显微照片 (b₃); (c) 黑色页岩的岩心 (c₁) 薄片 (c₂) 正交光显微照片 (c₃); (d) 灰色页岩的岩心 (d₁) 薄片 (d₂) 正交光显微照片 (d₃)

Fig.2 Core, thin section, and microscopic lithological characteristics of the Datangpo Formation from well KZ8 in northeastern Guizhou

(a) core sample of manganese carbonate rock (a₁), thin section (a₂), and microphotograph under cross-polarized light (a₃); (b) core sample of manganese-bearing shale (b₁), thin section (b₂), and microphotograph under cross-polarized light (b₃); (c) core sample of black shale (c₁), thin section (c₂), and microphotograph under cross-polarized light (c₃); (d) core sample of gray shale (d₁), thin section (d₂), and microphotograph under cross-polarized light (d₃)

2 样品与测试方法

2.1 样品采集

本研究的岩心样品来自黔东北松桃苗族自治县乌罗镇 KZ8 井 ($108^{\circ} 47' 55.8230''$ E, $28^{\circ} 04' 40.0463''$ N)。该井总长 42.3 m, 涵盖大塘坡组三个岩性段。本次采样依据岩性特征及锰含量进行划分 (锰含量划分标准: $Mn > 10\%$ 为锰碳酸盐岩, $Mn > 1\%$ 为含锰页岩, 其中%为质量百分比 Wt%缩写; Tan *et al.*, 2021)。各层段采样情况如下: I 段 (富有机质含锰岩系) 长度为 15.54 m, 共采集 22 件样品, 包括 6 件锰碳酸盐岩 (图 2a) 和 16 件含锰页岩 (图 2b)。锰碳酸盐岩中可见明显的锰矿集合体与条带状石英脉; 含锰页岩则无明显锰矿集合体, 岩性以黑色富有机质泥岩为主, 石英颗粒条带特征减弱。该层段另有 2 件样品锰含量为 0.7%~1.0%, 因显著高于 II 段背景值, 亦归为含锰页岩。II 段 (富有机质黑色页岩) 长度为 23.86 m, 共采集 20 件黑色页岩样品 (图 2c), 石英颗粒分布均匀。III 段 (贫有机质灰色页岩) 因未见顶, 仅揭露 0.9 m, 采集 1 件灰色页岩样品 (图 2d), 其特征为有机质显著缺乏, 颜色明显变浅。

2.2 测试方法

本次研究的样品分析测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。首先, 总有机碳 (TOC) 含量测定依据核行业标准 EJ/T 20154—2018, 使用 CS-580A 高频红外碳硫分析仪, 经盐酸前处理去除无机碳后, 通过高温燃烧—红外吸收法进行, 仪器分析精度为 $\pm 0.5\%$ 。主量元素测定依据国家标准 GB/T 14506.28—2010, 采用波长色散 X 射线荧光光谱法 (WD-XRF) 进行。使用 Axios-mAX 光谱仪, 样品经四硼酸锂熔剂熔融制成均质玻璃熔片后上机测定, 此法能有效消除基体效应, 分析精度优于 2%。微量元素分析则依据国家标准 GB/T 14506.30—2010, 使用 NexION 300D 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行。在 ICP-MS 分析中, 样品前处理使用浓氢氟酸 (HF) 和硝酸 (HNO_3) 混合酸于 $190^{\circ}C$ 高温密闭消解 48 小时, 此步骤旨在利用 HF 的强配位能力彻底分解硅酸盐矿物晶格, 释放其中包裹的微量元素; 而 HNO_3 作为强氧化剂, 能有效将有机物和硫化物氧化, 并保持消解体系的氧化环境以防止某些元素形成挥发性氢化物。消解蒸干后, 采用盐酸 (HCl) 复溶, 以便更好地稳定多数金属离子 (特别是稀土元素), 形成稳定的氯基络合物, 防止其水解沉淀, 从而保障了溶液特别是稀土元素测定的稳定性和回收率。整个 ICP-MS 分析过程采用内标法校正并利用地质标准物质监控, 确保了分析质量, 绝大多数元素的分析精度 (RSD) 优于 4%。

3 有机质和地球化学特征

3.1 有机质特征

总有机碳 (TOC) 是评价沉积岩有机质丰度的关键指标。研究井大塘坡组 TOC 含量介于 0.12%~3.78% (表 1、图 3)。纵向分布上, TOC 在 I 段锰碳酸盐岩和 II 段黑色页岩中出現两个明显高值区。其中, II 段黑色页岩 TOC 含量最高, 平均值为 2.06%(介于 0.98%~2.78%); I 段锰碳酸盐岩 TOC 平均值也较高, 为 1.75% (0.76%~3.78%), 并出現全段最高单点值 (3.78%)。两者之间的 I 段含锰页岩 TOC 相对较低, 平均值为 1.09% (0.16%~1.48%); 而 III 段灰色页岩 (仅单一样品) TOC 含量最低, 仅为 0.12%, 显著低于其他层段 (表 1、图 3)。

表 1 黔东北 KZ8 井大塘坡组主微量元素和环境评价指标数据

Table 1 Major and trace elements and environmental evaluation indicators data of the Datangpo Formation from well KZ8 in northeastern Guizhou

岩性	I 段黑色锰碳酸盐岩			I 段黑色含锰页岩			II 段黑色页岩			III 段灰色页岩
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	单一值
TOC	0.76	3.78	1.75	0.16	1.48	1.09	0.98	2.77	2.06	0.12
Mn	12.59	27.84	17.56	0.70	9.64	4.24	0.09	0.29	0.16	0.02
Al ₂ O ₃	2.26	9.84	6.90	12.30	28.12	16.33	15.04	18.68	16.88	33.40
Fe ₂ O ₃	0.01	5.41	1.92	1.09	5.04	3.63	4.71	9.74	5.75	1.48
SiO ₂	4.22	42.64	26.12	42.43	62.78	54.20	57.54	65.33	61.59	48.28
MgO	2.18	3.51	2.73	1.36	2.45	1.86	1.31	1.81	1.59	1.26
CaO	5.20	14.23	8.78	0.43	4.32	2.01	0.21	0.89	0.38	0.15
TiO ₂	0.14	0.58	0.32	0.38	0.62	0.52	0.54	0.70	0.61	0.53
P ₂ O ₅	0.25	2.31	0.61	0.11	0.38	0.22	0.08	0.25	0.11	0.05
Mo	1.17	8.64	4.54	1.00	8.88	4.73	1.11	7.26	2.74	0.91
U	0.86	3.24	2.04	2.39	5.76	3.30	2.25	3.47	2.86	5.38
Cu	6.19	70.90	24.13	5.23	41.40	23.96	28.10	49.10	38.44	6.65
CIA	61.00	69.00	64.00	62.00	72.00	65.00	64.00	69.00	68.00	63.00
CIW	72.41	87.74	77.13	73.54	93.09	78.82	72.61	83.11	79.69	71.46
ICV	3.57	27.38	9.76	0.68	2.48	1.57	0.89	1.19	1.00	0.92
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	13.95	36.31	22.91	26.17	74.39	32.12	25.48	32.04	27.72	62.66
(La/Yb) _N	0.56	1.31	0.71	0.58	0.99	0.74	0.68	0.91	0.78	0.67
Sr/Ba	0.50	2.94	1.28	0.04	0.33	0.20	0.12	0.26	0.17	0.03
M _{0(EF)}	1.24	12.48	7.77	0.36	6.88	3.13	0.72	3.94	1.63	0.28
U _(EF)	0.89	3.92	1.88	0.79	1.52	1.10	0.81	1.01	0.92	0.87
Eu/Eu*	0.67	1.20	0.96	0.85	1.10	0.97	0.79	0.95	0.89	0.88
Ti/Al	0.031	0.081	0.056	0.015	0.043	0.037	0.035	0.044	0.041	0.018
Al/(Al+Fe+Mn)	0.04	0.29	0.17	0.39	0.88	0.57	0.55	0.74	0.68	0.88
P _(EF)	3.79	95.14	18.80	0.47	3.32	1.70	0.51	1.74	0.76	0.19
Cu _(EF)	0.61	3.36	1.43	0.08	1.21	0.65	0.68	1.12	0.96	0.08

注: TOC 和主量元素的单位为质量百分比 (%) 微量元素的单位为质量百万分比 (mg/kg)。

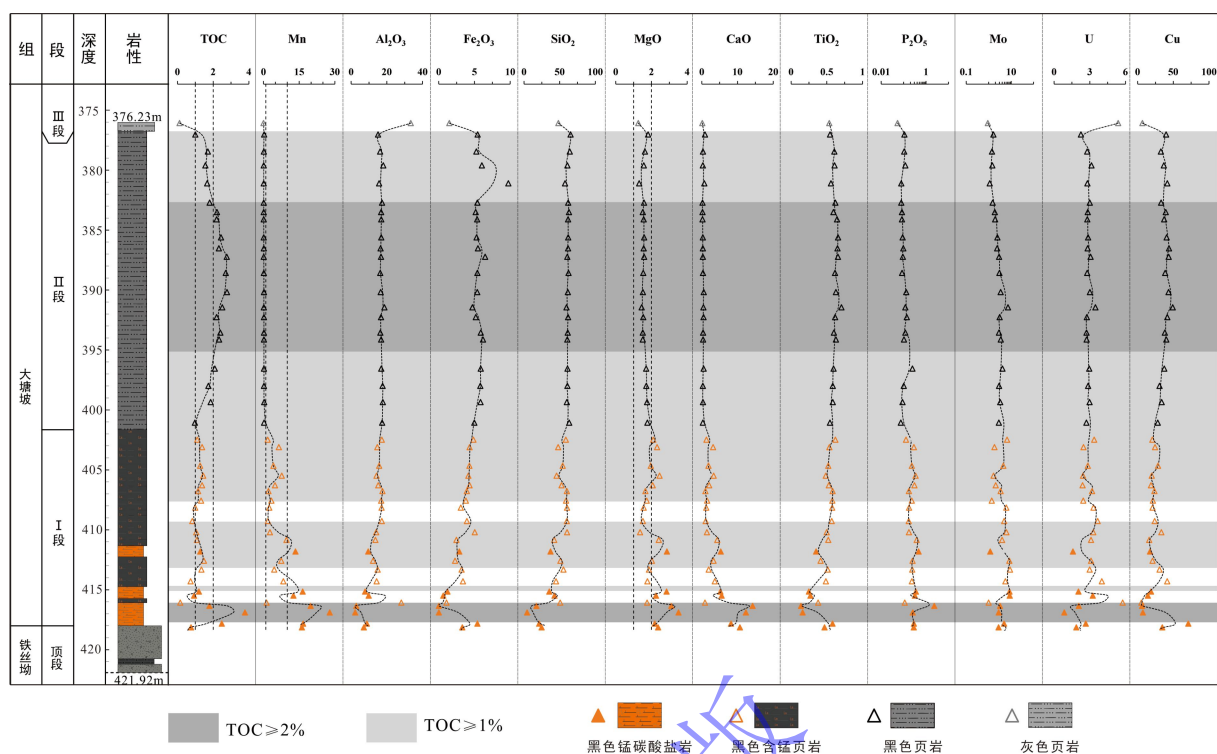


图3 黔东南 KZ8 井大塘坡组 TOC 和主量元素数据散点图

Fig.3 Scatter plot of TOC and major element data of the Datangpo Formation in well KZ8 in northeast Guizhou

3.2 地球化学数据特征

大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩以锰的显著富集为特征(Mn, 平均值为 17.56%),同时钙(CaO, 平均值为 8.78%)、镁(MgO, 平均值为 2.73%)和磷(P₂O₅, 平均值为 0.61%)含量也较高;而硅(SiO₂, 平均值为 26.12%)、铝(Al₂O₃, 平均值为 6.90%)、钛(TiO₂, 平均值为 0.32%)及铀(U, 平均值为 2.04 mg/kg)等组分含量较低(表 1、图 3)。大塘坡组 II 段转变为硅铝质主导的黑色页岩,锰含量急剧降低(Mn, 平均值为 0.16%),而硅(SiO₂, 平均值为 61.59%)和铝(Al₂O₃, 平均值为 16.88%)含量显著增高。同时,铁(Fe₂O₃, 平均值为 5.75%)和铜(Cu, 平均值为 23.96 mg/kg)含量也明显上升(表 1、图 3)。I 段含锰页岩的地球化学特征介于上述锰碳酸盐岩与黑色页岩之间,属过渡岩相(表 1、图 3)。至 III 段灰色页岩,锰含量进一步降低(Mn, 0.02%),硅(SiO₂, 48.28%)与铝(Al₂O₃, 33.40%)含量仍保持高位。然而,铁(Fe₂O₃, 1.48%)、钙(CaO, 0.15%)、镁(MgO, 1.26%)及钼(Mo, 0.91 mg/kg)含量均降至全段最低;与此相反,铀(U)含量则上升至全段最高值(5.38 mg/kg)(表 1、图 3)。

4 古环境特征

4.1 CIA 变化

化学蚀变指数 (CIA) 可用于反映源区化学风化强度与古气候条件 (Nesbitt and Young, 1982)。其计算公式为:

$$CIA = [(Al_2O_3) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

式中: 氧化物均为摩尔分数, $CaO^* = \text{Min}(n(Na_2O), n(CaO - 10/3 \times P_2O_5))$ 。

本研究首先评估了非风化因素对 CIA 值的潜在影响。成岩钾交代作用是影响 CIA 值的主要非风化因素之一 (Fedó *et al.*, 1995; Bahlburg *et al.*, 2011)。本研究样品在 A-CN-K 图解中分布于理想风化趋势区域内, 表明未受到显著钾交代影响 (图 4a)。进一步通过 CIA 与 CIW (化学风化指数) 的相关性检验, 两者呈显著正线性相关 ($R^2 = 0.78$, $R = 0.89$) (图 4b), 证实钾交代作用对研究区 CIA 值影响较弱。沉积再循环也可能改变元素组成进而影响 CIA 的可靠性。Th/Sc 与 Zr/Sc 交汇图显示, 样品沿母岩成分趋势线分布, 未出现 Zr/Sc 比值异常升高, 表明未经历显著沉积再循环 (图 4c), 这与区域研究结果一致 (McLennan, 1993; Cao *et al.*, 2024)。成分变异指数 (ICV) 进一步验证了这一认识: 研究井 28 个样品 $ICV > 1$, 15 个样品 $ICV < 1$, 且仅 4 个样品 $ICV < 0.95$ (表 1、图 5), 再循环作用整体不明显 (Cox *et al.*, 1995)。母岩成分方面, Al_2O_3/TiO_2 比值显示, 除大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩段 3 个样品指示铁镁质物源外, 其余样品均指示长英质物源 (表 1、图 5), 与前人认识一致 (Cao *et al.*, 2024), 表明大塘坡组沉积期物源基本稳定 (Girty *et al.*, 1996; Hayashi *et al.*, 1997; Keskin and Şeref, 2011)。综上, 研究区 CIA 值的变化主要受化学风化强度控制, 可用于反映古气候变化。

间冰期大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩 CIA 均值为 64 (61~69), 含锰页岩 CIA 平均值为 65 (62~72), 指示气候从冰期有限回暖, 其中含锰页岩略高的 CIA 值可能反映更温暖的气候条件; II 段黑色页岩 CIA 值进一步攀升, 平均值为 68 (64~69), 标志气候温暖程度与化学风化强度达到全组峰值, 这与前人通过锂同位素 (δ^7Li) 的研究结果一致 (Wei *et al.*, 2020); III 段灰色页岩 CIA 值为 63, 虽较 II 段下降, 但结合前人研究表明 III 段气候整体维持温暖未显著回冷 (道坨大塘坡组 III 段 CIA 平均值为 67), 可能受样本数量局限或局部沉积环境影响 (表 1、图 5) (齐靓等, 2015; 王萍等, 2020; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。从寒冷的 Sturtian 冰期至温暖间冰期的这种气候波动通过调控陆源物质化学风化强度与沉积物输入模式, 深刻影响有机质富集过程, 为揭示南华纪碳循环与烃源岩发育机制提供关键古气候约束。

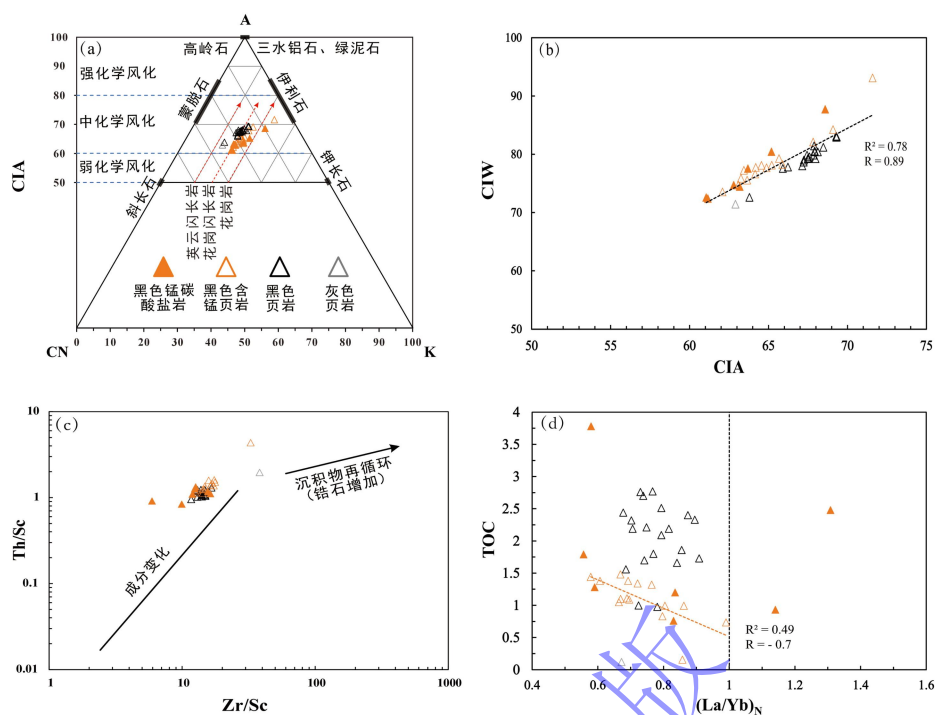
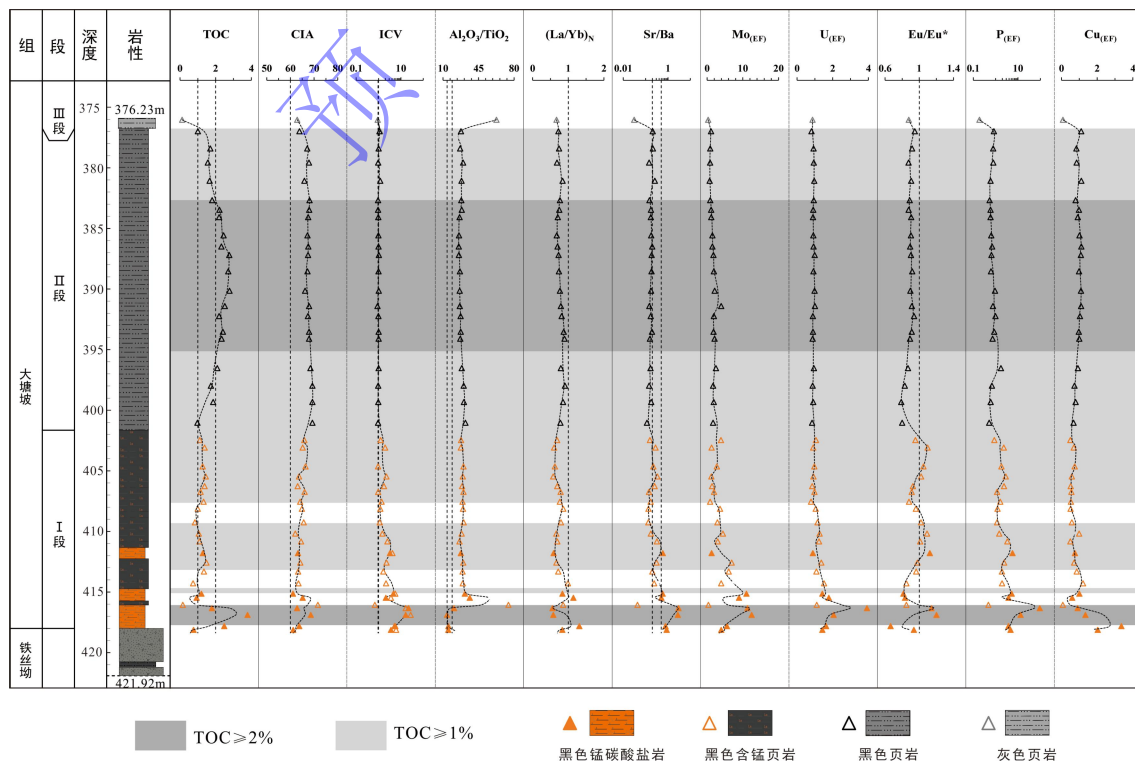


图 4 黔东北 KZ8 井古气候交汇图和有机质沉积速率交汇图

(a) A-CN-K 三元图; (b) 化学蚀变指数与化学风化指数交汇图 (c) Th/Sc 与 Zr/Sc 交汇图; (d) 沉积速率与有机质交汇图

Fig.4 Paleoclimate intersection map and organic matter sedimentation rate intersection map of well KZ8 in northeast Guizhou

(a) A-CN-K ternary diagram; (b) cross-plot of Chemical Index of Alteration (CIA) versus Index of Chemical Weathering (CIW); (c) cross-plot of Th/Sc versus Zr/Sc; (d) cross-plot of sedimentation rate versus total organic carbon (TOC) content



TOC ≥ 2%
 TOC ≥ 1%
 黑色锰碳酸盐岩
 黑色含锰页岩
 黑色页岩
 灰色页岩

图5 黔东北 KZ8 井大塘坡组 TOC 和各古环境指标散点图

Fig.5 Scatter plot of TOC and various paleoenvironmental indicators of the Datangpo Formation in well KZ8 in northeast Guizhou

4.2 沉积速率

沉积速率对有机质积累具有重要影响, 过高会稀释有机质, 过低则加剧暴露分解 (Ibach, 1982; Mort et al., 2007; Tyson, 2001)。稀土元素 $(La/Yb)_N$ 比值被广泛用于半定量评估沉积速率, 其原理是轻重稀土分馏程度与水体停留时间相关, 进而与沉积速率呈负相关 (Murray et al., 1991), $(La/Yb)_N$ 越接近 1 指示沉积速率越高。前人研究表明, 本组沉积物稀土元素体系未受显著碎屑污染或成岩蚀变, 原始信号保存良好 (Liao et al., 2025), 该指标已被成功用于南华盆地大塘坡组沉积速率研究 (Shen et al., 2022)。天文旋回计算显示大塘坡组整体沉积速率约 3 cm/kyr, 属较慢背景 (Bao et al., 2018)。

其中 I 段锰碳酸盐岩 $(La/Yb)_N$ 的范围为 0.56~1.31, 将两个超过 1 的数据根据与 1 偏离程度换算后整体的平均值为 0.71; 大塘坡组 I 段含锰页岩的 $(La/Yb)_N$ 的范围为 0.58~0.99, 平均值为 0.74, 表明大塘坡组 I 段沉积速率整体较低, I 段内部含锰页岩因其具有更强的陆源物质输入较锰碳酸盐岩具有更快的沉积速率 (表 1、图 5)。大塘坡组 II 段黑色页岩的 $(La/Yb)_N$ 的范围为 0.68~0.91, 平均值为 0.78, 整体高于大塘坡组 I 段, 表明 II 段陆源物质供给充足, 沉积速率较快; 大塘坡组 III 段灰色页岩的 $(La/Yb)_N$ 值为 0.67, 表明沉积速率显著下降, 其可能受土壤层形成和单样品偏差的影响, 因为道坨地区大塘坡组 III 段多样品的平均 $(La/Yb)_N$ 为 0.82 ± 0.05 (表 1、图 5) (Wei et al., 2020; Shen et al., 2022)。

TOC 与 $(La/Yb)_N$ 的相关性分析显示仅 I 段含锰页岩呈现弱负相关 ($R^2=0.49$, $R=-0.7$), 但该段 TOC 与沉积速率均低于 II 段, 表明负相关主要受有机质供给不足控制, 而非沉积速率的稀释效应; 其余层段无明显相关性 (图 4d)。因此, 沉积速率变化并非控制大塘坡组有机质富集差异的主因。

4.3 局限程度

盆地水体与开阔海域的连通性对营养供给、水体环境及有机质富集具有重要影响 (Algeo and Lyons, 2006; Chen et al., 2024)。Mo-TOC 协变关系可用于评估沉积水体的局限程度, 在受限盆地中, 开阔海洋钼补给不足导致 Mo/TOC 下降 (Algeo and Rowe, 2012)。Sr/Ba 比值可进一步约束水体盐度: Sr/Ba < 0.2、0.2~0.5 及 > 0.5 分别对应低盐、中盐及高盐水体, 反映盆地局限程度 (Wei and Algeo, 2020; Cheng et al., 2021)。尽管大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩中自生碳酸盐矿物可能富集 Sr 而影响 Sr/Ba 绝对值, 但邻近钻孔分析显示, Sr/Ba 所指示的盐度变化趋势与 B/Ga、S/TOC 等指标一致, 其相对变化仍可可靠反映水体局限程度的

纵向演化 (Liu *et al.*, 2025)。因此, 结合 Mo-TOC 与 Sr/Ba 可用于评估盆地水文与局限程度的演化。

Mo-TOC 交汇图 (图 6a) 显示大部分数据点低于黑海样品值, 表明中等—强局限水体环境, 大塘坡组 I 段 (平均 Mo/TOC=4.36) 局限程度相对较低, 大塘坡组 II 段 (平均 Mo/TOC=1.36) 局限程度较 I 段升高, III 段则表现为低 Mo 和低 TOC 含量, 这反映了水体变浅可能与全球海平面下降有关 (Li *et al.*, 2012), 我们的数据与前人 (Shen *et al.*, 2022) 大量的 Mo-TOC 的研究数据一致, 均表明大塘坡组局限性程度逐渐增加。大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩 Sr/Ba 值 0.5~2.94 (平均值为 1.28) 显著超过高盐阈值 (>0.5), 而同层位含锰页岩 Sr/Ba 介于 0.04~0.33 (平均值为 0.2) 处于中盐下限; 大塘坡 II 段碳质页岩 Sr/Ba 介于 0.12~0.26 (平均值为 0.17) 及 III 段含灰色页岩 0.03 均属低盐范畴 (表 1、图 5)。综合 Mo-TOC 图解与 Sr/Ba 定量指标, 证实大塘坡 I 段锰碳酸盐岩高 Sr/Ba 值 (>0.5) 对应高盐中—强局限环境, 反映盆地虽较为局限但依然与外海存在连通性; 大塘坡 I 段含锰页岩则指示水体盐度下降局限程度增加; 而大塘坡组 II 段和 III 段 Sr/Ba 均小于 0.2, 揭示低盐—极低盐的强局限盆地特征, 表明大塘坡组沉积时期南华裂谷盆地整体表现为逐渐封闭的演化趋势。

4.4 氧化还原

氧化还原条件是有机质保存的关键因素, 缺氧环境可显著降低有机质分解速率, 并促进有机质与硫化物结合形成稳定复合体, 有利于有机质埋藏 (Raiswell and Berner, 1985; Shen *et al.*, 2022)。钼 (Mo) 和铀 (U) 为典型氧化还原敏感元素, 在氧化环境中可溶, 在还原环境中沉淀富集。通过计算微量元素富集系数, 可评估水体氧化还原状态, $Mo_{(EF)}$ 和 $U_{(EF)}$ 越大表明还原程度越高, 二者交汇特征还可辅助判断盆地局限程度 (Algeo and Tribovillard, 2009; 李婷婷等, 2021; Shen *et al.*, 2022)。富集系数计算的可靠性取决于 Al 是否主要来源于陆源碎屑。研究井 Al 与 Th、Al 与 Zr 均呈良好线性关系 (图 6c、d), 证实 Al 主要受陆源碎屑控制, 可用于自生组分校正 (Taylor and McLennan, 1995)。综合 $Mo_{(EF)}$ 和 $U_{(EF)}$ 纵向变化 (图 5) 及其交汇特征 (图 6b), 结合前人铁组分研究成果 (I 段锰碳酸盐岩铁化, I 段含锰页岩和 II 段黑色页岩硫化) (Cheng *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022), 系统揭示了大塘坡组沉积期的古氧化还原演化序列。

大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩 $Mo_{(EF)}$ 介于 1.24~12.48 (平均值为 7.77)、 $U_{(EF)}$ 介于 0.89~3.92 (平均值为 1.88) 表明钼铀协同富集, 反映中—强局限海盆的强铁化还原环境 (Cheng *et al.*, 2021; 李婷婷等, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022); 而 I 段含锰页岩 $Mo_{(EF)}$ 介于 0.36~6.88 (平均值为 3.13)、 $U_{(EF)}$ 介于 0.79~1.52 (平均值为 1.1) 则对应硫化还原环境, 指

示局部硫酸盐还原作用增强 (Cheng *et al.*, 2021; 李婷婷等, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022); 大塘坡 II 段黑色页岩 $Mo_{(EF)}$ 介于 0.72~3.94 (平均值为 1.63)、 $U_{(EF)}$ 介于 0.81~1.01 (平均值为 0.92) 虽 $Mo_{(EF)}$ 值降低, 但其铁组分特征 (黄铁矿主导) 与持续硫化环境吻合 (Cheng *et al.*, 2021), 表明该阶段仍维持还原条件但水体局限化加剧; 至大塘坡 III 段灰色页岩 $Mo_{(EF)}$ 骤降至 0.28, $U_{(EF)}$ 为 0.87, 结合铁氧化物比例升高 (Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022), 明确记录氧化程度显著增强事件, 标志盆地最终转化为氧化的强局限环境 (表 1 图 5、图 6b)。盆地从大塘坡组 I 段铁化—硫化并存的中—强局限还原体系, 经 II 段硫化作用主导的强局限还原体系, 最终 III 段演变为完全氧化的强局限体系。

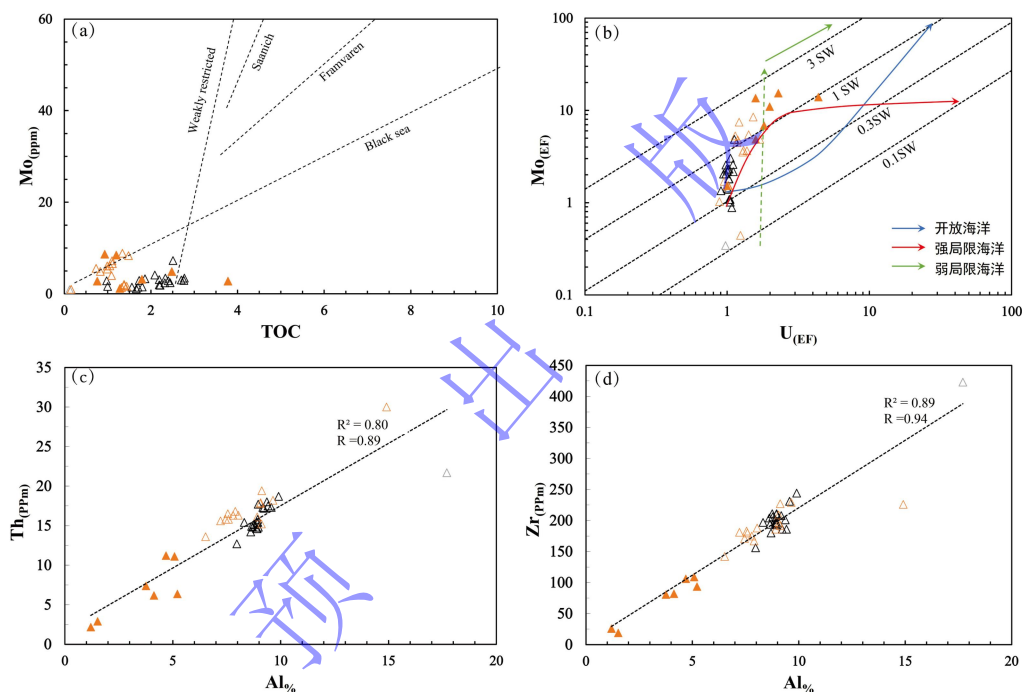


图 6 黔东南 KZ8 井局限程度和氧化还原交汇图

(a) 局限程度 TOC 与 Mo 交汇图; (b) 氧化还原和局限程度 $Mo_{(EF)}$ 与 $U_{(EF)}$ 交汇图; (c) 物源分析 Al 与 Th 交汇图; (d) 物源分析 Al 与 Zr 交汇图

Fig.6 Intersection Map of Restriction Degree and Redox in Well KZ8 in Northeast Guizhou

(a) intersection map of TOC of restriction degree and Mo; (b) intersection map of $Mo_{(EF)}$ and $U_{(EF)}$ of redox and restriction degree; (c) provenance analysis intersection map of Al and Th; (d) provenance analysis intersection map of Al and Zr

4.5 热液作用

热液活动是驱动大塘坡组, 特别是其底部锰矿层形成与早期沉积环境演化的关键地质要素。深部地球物理探测为这一认识提供了直接的构造证据, 揭示在南华裂谷 (武陵次级裂谷) 内存在一系列深部流体底辟通道, 其向上延伸至浅部 (<3 km) 形成分叉的低阻体, 对应地

表已观察到的同沉积断裂与底辟—漏斗构造，直接证实了大塘坡组沉积期存在活跃的、受同沉积断裂控制的深部热液上涌系统 (Yang *et al.*, 2025)。在地球化学记录上，热液活动亦留下了清晰的印记。热液流体富含营养物质，可为表层水体初级生产力提供重要补给 (Gernon *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2018)。前人研究已从矿物学与地球化学角度论证了大塘坡锰矿的热液沉积成因 (Yu *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。本研究利用铕异常 (Eu/Eu^*) 和 $\text{Fe}/\text{Ti}-\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 判别图解进行验证 (图 5, 图 7a)。大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩 Eu/Eu^* 值达 0.67~1.20 (平均值为 0.96), $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值介于 0.1~0.3, 显著趋近热液端元 (<0.5), 同时 Fe/Ti 值异常升高, 综合印证其热液成因; 同层位含锰页岩 Eu/Eu^* 平均值为 0.97 (0.85~1.10), $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值略高 (0.4~0.7), 反映热液活动强度较锰碳酸盐岩减弱, 但仍存在热液—水成混合作用 (表 1、图 5、图 7a,)。大塘坡 II、III 段黑色页岩 ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.89$)、灰色页岩 ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.88$) $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值均大于 0.6, 进一步确认其水成主导特征 (表 1、图 5、图 7a)。热液活动强度经历了从大塘坡 I 段锰碳酸盐岩期最强, 至同段含锰页岩期减弱为中等, 而在 II 段及 III 段则基本消失。该过程揭示研究区热液活动集中于大塘坡 I 段, 受同沉积期断裂活动驱动, 而后期盆地稳定导致热液通道中断。

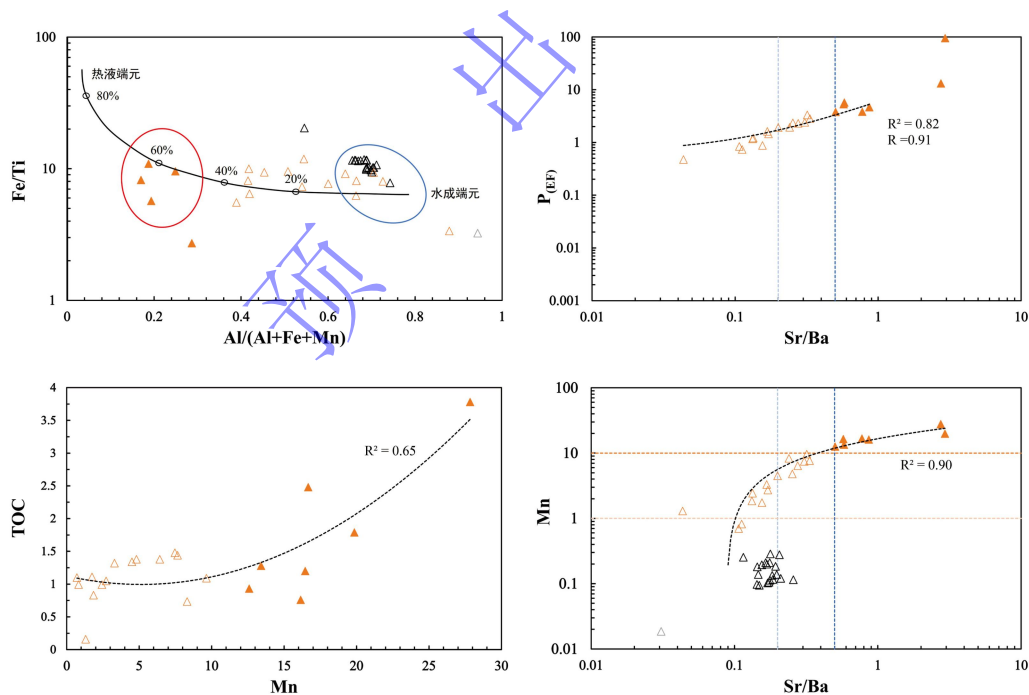


图 7 黔东北 KZ8 井局热液作用、(初级)生产力和富集模式交汇图

(a) 热液活动判别图; (b) 盐度与磷富集系数交汇图; (c) 锰与有机质交汇图; (d) 盐度与锰交汇图

Fig.7 Intersection map of hydrothermal activity, (primary) productivity and enrichment pattern in well KZ8 in northeast Guizhou

(a) hydrothermal activity discrimination map; (b) intersection map of salinity and phosphorus enrichment coefficient; (c) intersection map

4.6 初级生产力

初级生产力是有机质积累的关键环节,其高低直接影响有机碳产量与沉积物中的富集程度 (Gallego-Torres *et al.*, 2007; Tribovillard *et al.*, 2006)。南华纪蓝细菌和早期真核藻类是海洋主要初级生产者 (李婷婷等, 2021)。南华盆地营养来源多样,包括陆源、开放海洋及热液输入,共同驱动初级生产和碳循环 (Wei *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2021; Tan *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。磷 (P) 和铜 (Cu) 是南华纪海洋关键营养物质。冰川融化后溶解磷酸盐增加,可促进光合微生物生长 (Planavsky *et al.*, 2010; Guilbaud *et al.*, 2020)。铜作为成烃生物重要营养物质,其可用性影响有机质合成与成烃潜力 (Francois *et al.*, 1995; Tribovillard *et al.*, 2006; Pinedo-González *et al.*, 2015)。本研究通过系统解析南华盆地大塘坡组各层段的磷富集系数 $P_{(EF)}$ 与铜富集系数 $Cu_{(EF)}$ 指标,结合热液—陆源—局限程度三元耦合演化机制,揭示古海洋初级生产力演化特征。

大塘坡组 I 段锰碳酸盐岩为极端富磷 ($P_{(EF)}$ 介于 3.79~95.74, 平均值为 18.8) 和中等铜富集 ($Cu_{(EF)}$ 平均值为 1.43) 特征,反映热液喷流释放高浓度溶解磷与生物可利用铜驱动蓝细菌与早期藻类生产力达到峰值 (Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022); I 段含锰页岩因铜富集程度较低导致光合效率受限 ($Cu_{(EF)}$ 介于 0.08~1.21, 平均值为 0.65), 生产力下降 (表 1、图 5); 此外 I 段 $P_{(EF)}$ 与 Sr/Ba 在无热液段 ($Eu/Eu^* < 1$) 表现为显著的正线性相关关系 ($R^2=0.82$, $R=0.91$), 表明开放海洋对盆地溶解磷的重要贡献 (图 7b)。II 段黑色页岩 ($P_{(EF)}$ 平均值为 0.76、 $Cu_{(EF)}$ 平均值为 0.96) 显示磷限制加剧,但温暖稳定的气候增强成烃生物活性弥补了营养物质的不足,使得生产力保持在中等水平; III 段灰色页岩 ($P_{(EF)}=0.19$ 、 $Cu_{(EF)}=0.08$) 则由于盆地封闭后营养源枯竭生产力跌至最低 (表 1、图 5)。通过对磷和铜的系统分析揭示生产力经历了大塘坡组 I 段开放海洋和热液共同作用的生产力爆发期 (高 P-Cu 协同)、II 段高温陆源过渡期 (生物活性增强、Cu 补充) 及 III 段营养源衰退期 (P-Cu 链断裂) 三个阶段。

5 有机质富集模式

有机质的积累是一个复杂的过程,受到多种因素的综合影响。生产力的高低决定了有机质的初始来源,较高的生产力能够为沉积环境提供丰富的有机物质 (Cheng *et al.*, 2021; 李婷婷等, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。保存条件则关乎有机质在沉积过程中能否避免被氧化分解,稳定的还原环境有利于有机质的保存 (Cheng *et al.*, 2021; 李婷婷等,

2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。此外, 沉积速率对有机质富集也起着重要作用, 适中的沉积速率既能保证陆源营养物质的持续供应, 又不会因稀释作用过强而降低有机质的相对含量。在研究区, 这些因素相互作用, 共同影响着大塘坡组有机质的富集程度 (Cheng *et al.*, 2021; 李婷婷等, 2021; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。

大塘坡组 I 段沉积于冰期后气候有限回暖的背景之下, 以锰碳酸盐岩与含锰页岩频繁互层为特征, 记录了古海洋氧化还原条件与物质输入的动态波动。尽管铁化 (锰碳酸盐岩沉积期) 与硫化 (含锰页岩沉积期) 的还原水体整体均有利于有机质保存, 但不同岩性层段的有机质丰度受控于差异化的主导机制。在锰碳酸盐岩沉积期, 热液活动与间歇性开放海水流入共同作用, 为表层水体输送了丰富的营养物质, 显著提升了初级生产力 (余文超等, 2020; Li *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。同时, 海水的输入也可能直接补充了溶解有机碳库 (Peng *et al.*, 2019)。因此, 该时期较高的 TOC (平均值为 1.75%) 主要得益于增强的生产力与铁化还原保存条件的协同作用 (图 8a)。在含锰页岩期, 热液活动与开放海水流入减弱, 同时由于气候回暖程度有限, 陆源风化释放的营养物质供应相对不足, 导致初级生产力下降。因此, 该时期相对较低的 TOC (平均值为 1.09%) 主要归因于生产力水平的制约, 而非陆源碎屑的稀释作用。值得指出的是, 该时期水体硫化还原程度增强, 从而使得有限的有机质得到有效保存, 避免了 TOC 因生产力下降而出现崩塌式降低。

尽管锰碳酸盐 (MnCO_3) 的形成过程 Mn(IV) 氧化物还原与有机质氧化耦合会消耗部分有机质, 然而本研究及前人数据分析揭示, 二者关系整体呈现复杂的“U”形相关 (图 7c, $R^2=0.65$, $R=0.65$) (Tan *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2026)。这种模式表明, 在含锰页岩低生产力背景下, Mn 含量与 TOC 常呈现负相关关系, 即锰矿化消耗效应占主导, 在锰碳酸盐岩高生产力条件下, 由热液与海水输入 (Mn 含量与 Sr/Ba 比值显著正相关, 图 7d, $R^2=0.9$, $R=0.84$) 所带来的充沛营养供给, 能够支撑极高的初级生产力, 其产生的有机质通量在整体上掩盖并超越了锰沉淀过程造成的局部消耗效应。此外, 锰氧化微生物活动可能通过生成细胞外聚合物 (EPS) 对有机质产生物理保护, 进一步促进了其埋藏与保存 (Tan *et al.*, 2021), 从而表现出微弱的正相关趋势 (图 7c)。因此, Mn 与 TOC 的关系并非单一机制控制, 而是反映了“有机质消耗”与“生产力驱动”两种对立过程在不同环境条件下的相对强弱转换 (图 8a)。

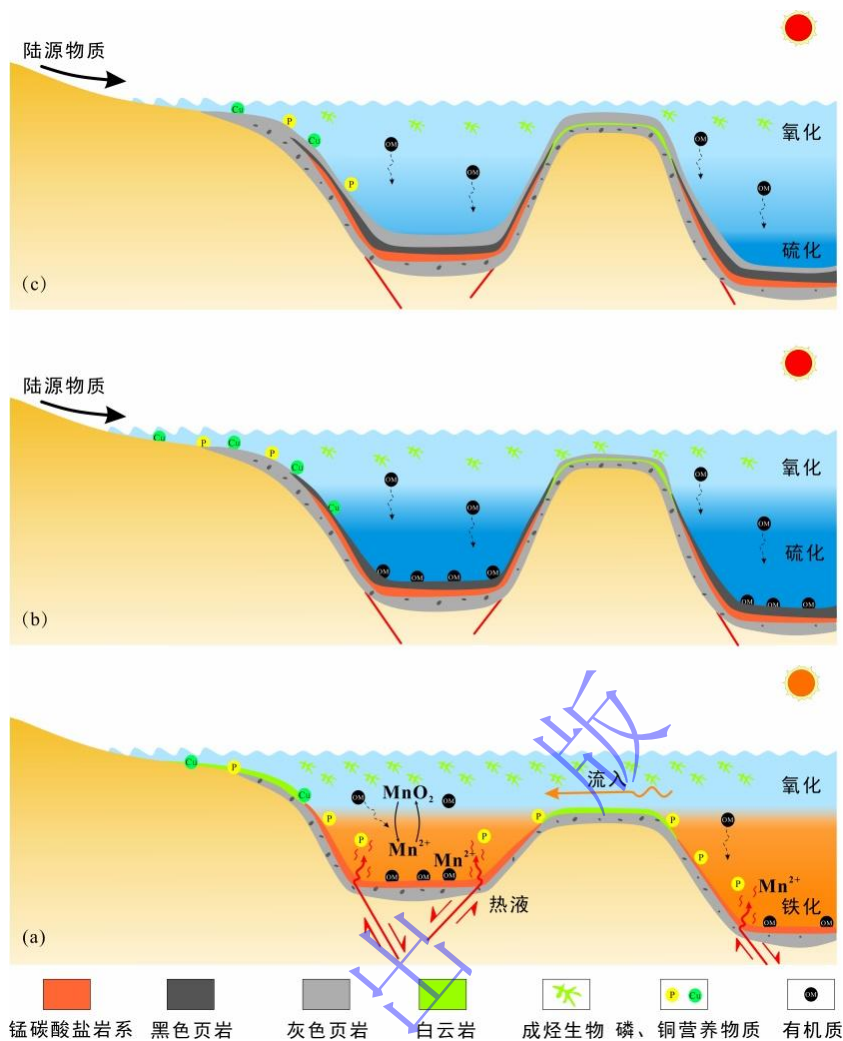


图8 黔东北大塘坡沉积环境演化与有机质富集模式图

(a) 大塘坡组 I 段; (b) 大塘坡组 II 段; (c) 大塘坡组 III 段

Fig.8 sedimentary environment evolution and organic matter enrichment pattern map of the Datangpo in northeast Guizhou

(a) member I of Datangpo Formation; (b) member II of Datangpo Formation; (c) member III of Datangpo Formation

大塘坡组 II 段有机质含量达到峰值。该段沉积期，盆地进入强局限阶段，开放海水流入与热液活动停滞，外源营养供应模式发生转变。尽管海水来源的营养物质减少，但持续温暖稳定的气候显著增强了化学风化作用，导致陆源营养物质输入通量增加，从而维持了中等水平的初级生产力。同时，温暖气候也提升了成烃生物的活动效率。丰富的陆源输入带来了大量硫酸盐，与持续还原的条件结合，促进了微生物硫酸盐还原作用，造就并维持了广泛且稳定的硫化还原水体。此外，该阶段锰碳酸盐沉积作用停止，消除了有机质被氧化的一个潜在消耗途径。因此，较高的生产力与优越的保存条件（强还原、无锰矿化消耗）高效耦合，共同促使该段 TOC 达到全组最高值（图 8b）。大塘坡组 III 段有机质含量极低。此时盆地维持强局限状态，且陆源输入带来的营养物质也显著减少，导致初级生产力大幅降低。同时，水体氧化性显著增强，有机质在沉积前即遭受强烈降解。生产力的衰竭与氧化性水体的破坏性

保存条件共同导致了该段 TOC 降至极低水平（图 8c）。

6 结论与展望

(1) 黔东北地区 KZ8 井揭示了大塘坡组从冰期末期至间冰期完整的沉积环境演化序列：I 段为气候有限回暖背景下的中—强局限盆地，水体氧化还原状态在铁化还原（锰碳酸盐岩期）与硫化还原（含锰页岩期）之间高频波动，并伴有显著的热液活动与间歇性海水流入；II 段气候持续温暖，盆地转化为强局限环境，发育广泛稳定的硫化还原水体；III 段则进一步演化为强局限的氧化环境。沉积环境的演变受气候、热液活动、氧化还原条件及盆地局限程度等多因素协同控制。

(2) 有机质富集机制随环境演化呈现阶段性差异，主要受“生产力—保存条件”双因素耦合控制。I 段有机质富集以热液与海水输入驱动的高生产力为主导，但受到锰矿化过程的部分消耗；互层的含锰页岩虽生产力受限，却凭借高效的硫化保存条件维持了有机质丰度。II 段 TOC 达到峰值源于增强的陆源营养输入所维持的生产力与强局限硫化水体提供的优越保存条件的有效耦合，且该阶段无锰矿化消耗。III 段则因生产力衰竭与水体完全氧化导致有机质含量极低。

(3) 本研究建立的“气候—水文—热液—氧化还原”耦合演化模型，揭示了裂谷盆地背景下有机质差异富集的主控因素，为深入认识南华纪优质烃源岩形成机制及黔东北地区页岩气勘探提供了重要的地质依据。但本认识主要基于单井高分辨率分析，结论的区域代表性需通过跨构造单元（地垒/地堑）的钻孔对比进一步验证。此外，当前研究对各环境要素在有机质富集中的定量贡献率尚未能精确厘定。未来工作可结合多元同位素示踪、生物标志化合物等定量手段，以及盆地模拟方法，进一步量化不同营养源和古环境参数的相对贡献，从而建立更具普适性和预测性的有机质富集模型。

数据可用性声明

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行（Science Data Bank）ScienceDB 平台公开发布，访问地址为 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.39797> 和 <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.39797>。

参考文献（References）

- 杜远生, 余文超, 周琦, 等. 2023. 超大陆裂解与中国大规模成锰作用的耦合关系探讨[J]. 古地理学报, 25(6): 1211-1234. [Du Yuansheng, Yu Wenchao, Zhou Qi, et al. 2023. Discussion about the coupling relationship between the breakup of supercontinent and the large-scale manganese accumulation in China[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(6): 1211-1234.]
- 李婷婷, 朱光有, 赵坤, 等. 2021. 华南地区南华系大塘坡组黑色岩系地质地球化学特征与有机质富集机制[J]. 石油学报, 42(9): 1142-1162. [Li Tingting, Zhu Guangyou, Zhao Kun, et al. 2021. Geological, geochemical characteristics and organic matter

- enrichment of the black rock series in Datangpo Formation in Nanhua system, South China[J]. *Acta Petroli Sinica*, 42(9): 1142-1162.]
- 李献华, 王选策, 李武显, 等. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷[J]. *地球化学*, 37(4): 382-398. [Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, et al. 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting[J]. *Geochimica*, 37(4): 382-398.]
- 沐雨. (2021-02-28). 油企有望切分贵州千亿方级页岩气大“蛋糕” [EB/OL]. 中国工业新闻网. <https://www.cinn.cn/hg/2021/02-28/XkJO3vv1.html>. [Mu Yu. (2021-02-28). Oil companies expected to share Guizhou's trillion-cubic-meter shale gas "cake"[EB/OL]. *China Industry News*. <https://www.cinn.cn/hg/2021/02-28/XkJO3vv1.html>.]
- 齐靛, 余文超, 杜远生, 等. 2015. 黔东南华纪铁丝坳期—大塘坡期古气候的演变: 来自 CIA 的证据[J]. *地质科技情报*, 34(6): 47-57. [Qi Liang, Yu Wenchao, Du Yuansheng, et al. 2015. Paleoclimate evolution of the Cryogenian Tiesi'ao Formation-Datangpo Formation in eastern Guizhou province: Evidence from the chemical index of alteration[J]. *Geological Science and Technology Information*, 34(6): 47-57.]
- 汪正江, 王剑, 江新胜, 等. 2015. 华南扬子地区新元古代地层划分对比研究新进展[J]. *地质论评*, 61(1): 1-22. [Wang Zhengjiang, Wang Jian, Jiang Xinsheng, et al. 2015. New progress for the stratigraphic division and correlation of Neoproterozoic in Yangtze Block, South China[J]. *Geological Review*, 61(1): 1-22.]
- 王剑, 刘宝珺, 潘桂荣. 2001. 华南新元古代裂谷盆地演化: Rodinia 超大陆解体的前奏[J]. *矿物岩石*, 21(3): 135-145. [Wang Jian, Liu Baojun, Pan Guitang. 2001. Neoproterozoic rifting history of South China significance to Rodinia breakup[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(3): 135-145.]
- 王萍. 2020. 黔东南地区南华纪裂谷型盆地锰矿成矿环境及其控矿作用: 硫循环与古气候记录[D]. 武汉: 中国地质大学. [Wang Ping. 2020. Metallogenic environment and ore control of manganese deposits in the Cryogenian Nanhua rift basin, east Guizhou province: Records of sulfur cycle and paleoclimate[D]. Wuhan: China University of Geosciences.]
- 余文超, 杜远生, 周琦, 等. 2020. 华南成冰纪“大塘坡式”锰矿沉积成矿作用与重大地质事件的耦合关系[J]. *古地理学报*, 22(5): 855-871. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, et al. 2020. Coupling between metallogenesis of the Cryogenian Datangpo-type manganese deposit in South China and major geological events[J]. *Journal of Palaeogeography*, 22(5): 855-871.]
- 袁鹏. 2023-02-15(08). 西南石油局: 打造深地技术品牌 探寻清洁能源宝藏[N]. *中国石化报*. [Yuan Peng. 2023-02-15(08). Southwest petroleum bureau: Building deep earth technology brand and exploring clean energy treasures[N]. *China Petrochemical News*.]
- 张予杰, 安显银, 刘石磊, 等. 2020. 黔东南地区大塘坡组早期含锰沉积充填、岩相古地理与锰矿的关系[J]. *中国地质*, 47(3): 607-626. [Zhang Yujie, An Xianyin, Liu Shilei, et al. 2020. The lithofaces, Mn-bearing sedimentary filling and palaeogeographic pattern of early Datangpo stage and implied for manganese in the northeastern Guizhou province[J]. *Geology in China*, 47(3): 607-626.]
- 赵文璞, 李一凡, 赵爽, 等. 2023. 黔东南地区铁丝坳组—大塘坡组细粒沉积岩高精度层序地层特征和充填演化模式[J]. *沉积与特提斯地质*, 43(4): 871-891. [Zhao Wenpu, Li Yifan, Zhao Shuang, et al. 2023. High-resolution sequence stratigraphic characteristics and organic matter enrichment mechanism of fine-grained sedimentary rocks in the Tiesiao-Datangpo Formations in northeastern Guizhou[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(4): 871-891.]
- 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 2018. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. *石油勘探与开发*, 45(1): 1-13. [Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. 2018. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 1-13.]
- 周琦, 杜远生, 袁良军, 等. 2016. 黔湘渝毗邻区南华纪武陵裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. *地球科学*, 41(2): 177-188. [Zhou Qi, Du Yuansheng, Yuan Liangjun, et al. 2016. The structure of the Wuling rift basin and its control on the manganese deposit during the Nanhua period in Guizhou-Hunan-Chongqing border area, South China[J]. *Earth Science*, 41(2): 177-188.]
- Algeo T J, Lyons T W. 2006. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions[J]. *Paleoceanography*, 21(1): PA1016.
- Algeo T J, Rowe H. 2012. Paleoceanographic applications of trace-metal concentration data[J]. *Chemical Geology*, 324-325: 6-18.

- Algeo T J, Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation[J]. *Chemical Geology*, 268(3/4): 211-225.
- Bahlburg H, Dobrzinski N. 2011. A review of the Chemical Index of Alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions[M]//Arnaud E, Halverson G P, Shields-Zhou G. The geological record of Neoproterozoic glaciations. London: Geological Society, Memoirs, 81-92.
- Bao X J, Zhang S H, Jiang G Q, et al. 2018. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 483: 52-63.
- Brocks J J, Jarrett A J M, Sirantoine E, et al. 2017. The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals[J]. *Nature*, 548(7669): 578-581.
- Cao G Y, Liu Y, Li C, et al. 2023. Salinity variations of the Inner Yangtze Sea during the Ordovician-Silurian transition and its influences on marginal marine euxinia[J]. *Global and Planetary Change*, 225: 104129.
- Cao G Y, Zhang G L, Zhao Y Y, et al. 2024. Climatic-hydrologic influence on redox condition in the Cryogenian interglacial Nanhua Basin: Insights from the Datangpo Formation in the northwestern Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 412: 107557.
- Chen H, Fan H F, Khan D, et al. 2024. Precipitation mechanism of Mn ore deposits in the Datangpo Formation, Nanhua Basin, South China[J]. *Global and Planetary Change*, 239: 104499.
- Cheng M, Zhang Z H, Algeo T J, et al. 2021. Hydrological controls on marine chemistry in the Cryogenian Nanhua Basin (South China)[J]. *Earth-Science Reviews*, 218: 103678.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919-2940.
- Fedo C M, H. Wayne Nesbitt H, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921-924.
- Francois R, Honjo S, Manganini S J, et al. 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleoproductivity reconstruction[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 289-303.
- Gallego-Torres D, Martínez-Ruiz F, Paytan A, et al. 2007. Pliocene-Holocene evolution of depositional conditions in the eastern Mediterranean: Role of anoxia vs. productivity at time of sapropel deposition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 246(2/3/4): 424-439.
- Gernon T M, Hincks T K, Tyrrell T, et al. 2016. Snowball Earth ocean chemistry driven by extensive ridge volcanism during Rodinia breakup[J]. *Nature Geoscience*, 9(3): 242-248.
- Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107-118.
- Guilbaud R, Poulton S W, Thompson J, et al. 2020. Phosphorus-limited conditions in the Early Neoproterozoic ocean maintained low levels of atmospheric oxygen[J]. *Nature Geoscience*, 13(4): 296-301.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth[J]. *Science*, 281(5381): 1342-1346.
- Ibach L E J. 1982. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments[J]. *AAPG Bulletin*, 66(2): 170-188.
- Kennedy M J, Löhr S C, Fraser S A, et al. 2014. Direct evidence for organic carbon preservation as clay-organic nanocomposites in a Devonian black shale; from deposition to diagenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 388: 59-70.
- Keskin Ş. 2011. Geochemistry of Çamardı Formation sediments, Central Anatolia (Turkey): Implication of source area weathering, provenance, and tectonic setting[J]. *Geosciences Journal*, 15(2): 185-195.
- Li C, Love G D, Lyons T W, et al. 2012. Evidence for a redox stratified Cryogenian marine Basin, Datangpo Formation, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 331/332: 246-256.

- Li T T, Zhu G Y, Zhao K, et al. 2022. Geochemical characteristics of organic-rich intervals within the Cryogenian non-glacial Datangpo Formation in southeastern Yangtze Block-implications for paleoenvironment and its control on organic matter accumulation[J]. *Precambrian Research*, 378: 106777.
- Liao Z W, Xu Z J, Zhang Y, et al. 2025. Controls on Mn carbonate precipitation in the formation of Cryogenian Datangpo manganese deposits, southeastern Chongqing, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 294: 106810.
- Liu Z H, Algeo T J, Brocks J J, et al. 2025. Salinity reconstruction in Proterozoic depositional systems[J]. *GSA Bulletin*, 137(1/2): 447-464.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295-303.
- Mort H, Jacquat O, Adatte T, et al. 2007. The Cenomanian/Turonian anoxic event at the Bonarelli Level in Italy and Spain: Enhanced productivity and/or better preservation?[J]. *Cretaceous Research*, 28(4): 597-612.
- Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Gerlach D C, et al. 1991. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(7): 1875-1895.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715-717.
- Peng, X., Zhu, X.-K., Shi, F., Yan, B., Zhang, F., Zhao, N., Peng, P., Li, J., Wang, D., Shields, G. A., 2019. A Deep Marine Organic Carbon Reservoir in the Non-Glacial Cryogenian Ocean (Nanhua Basin, South China) Revealed by Organic Carbon Isotopes. *Precambrian Research* 321, 212-220. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.12.013>
- Pinedo-González P, West A J, Tovar-Sánchez A, et al. 2015. Surface distribution of dissolved trace metals in the oligotrophic ocean and their influence on phytoplankton biomass and productivity[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(10): 1763-1781.
- Planavsky N J, Rouxel O J, Bekker A, et al. 2010. The evolution of the marine phosphate reservoir[J]. *Nature*, 467(7319): 1088-1090.
- Raiswell R, Berner R A. 1985. Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments[J]. *American Journal of Science*, 285(8): 710-724.
- Rooney A D, Yang C, Condon D J, et al. 2020. U-Pb and Re-Os geochronology tracks stratigraphic condensation in the Sturtian Snowball Earth aftermath[J]. *Geology*, 48(6): 625-629.
- Schoepfer S D, Shen J, Wei H Y, et al. 2015. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity[J]. *Earth-Science Reviews*, 149: 23-52.
- Shen W B, Zhu X K, Li J, et al. 2022. Mechanism of organic matter accumulation in black shale of the Datangpo Formation: Insights from paleo-environmental variation during the Cryogenian non-glaciation[J]. *Precambrian Research*, 383: 106889.
- Sun J, Zhu X K, Li Z H. 2018. Confirmation and global significance of a large-scale Early Neoproterozoic banded iron formation on Hainan Island, China[J]. *Precambrian Research*, 307: 82-92.
- Tan Z Z, Jia W L, Li J, et al. 2021. Geochemistry and molybdenum isotopes of the basal Datangpo Formation: Implications for ocean-redox conditions and organic matter accumulation during the Cryogenian interglaciation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 563: 110169.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241-265.
- Tribouillard 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.
- Tyson R V. 2001. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: Some results of a modelling study[J]. *Organic Geochemistry*, 32(2): 333-339.
- Wang J, Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 122(1/2/3/4): 141-158.
- Wei G Y, Wei W, Wang D, et al. 2020. Enhanced chemical weathering triggered an expansion of euxinic seawater in the aftermath of the Sturtian glaciation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 539: 116244.
- Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 341-366.

- Yang B N, Hu X Y, Gao L F, et al. 2025. Discharge and deposition metallogenic model of "Datangpo-type" manganese deposits in China: Geophysical evidence from deep electrical structure of manganese-bearing grabens[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 292: 106732.
- Yu W C, Algeo T J, Du Y S, et al. 2016. Genesis of Cryogenian Datangpo manganese deposit: Hydrothermal influence and episodic post-glacial ventilation of Nanhua Basin, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 459: 321-337.
- Yu W, Algeo T J, Du Y, et al. Newly discovered Sturtian cap carbonate in the Nanhua Basin, South China[J]. *Precambrian Research*, 2017, 293: 112-130.
- Yu W C, Algeo T J, Zhou Q, et al. 2022. Evaluation of alkalinity sources to Cryogenian cap carbonates, and implications for cap carbonate formation models[J]. *Global and Planetary Change*, 217: 103949.
- Zhang S H, Jiang G Q, Han Y G. 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China[J]. *Terra Nova*, 20(4): 289-294.
- Zhao W P, Li Y F, Lash G, et al. 2026. Paleoenvironmental changes and their controls on organic matter accumulation during the Late Cryogenian: New elemental insights from the Tiesiao and Datangpo Formations, Nanhua Basin, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 681: 113398.

Evolution of Paleoenvironment and Mechanism of Organic Matter Enrichment of the Datangpo Formation in Northeastern Guizhou

ZHAO Shuang¹, ZHAO WenPu², LI YiFan²

1. No. 103 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tongren, Guizhou 554300, China

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: [Objective] The evolution of the sedimentary environment and the mechanisms of organic matter enrichment in the Datangpo Formation in northeastern Guizhou remain underexplored. This study aims to reconstruct the paleoenvironmental evolution sequence and clarify the primary controls on organic matter enrichment through high-resolution geochemical analysis. [Methods] A total of 43 core samples from the entire Datangpo Formation in well KZ8 in northeastern Guizhou were systematically analyzed for total organic carbon (TOC) and major and trace element geochemistry. The samples span Members I (manganese carbonate rocks and manganese-bearing shales), II (black shales), and III (gray shales). [Results] The study reveals that Member I of the Datangpo Formation was deposited during a period of limited post-glacial climatic warming, within a moderately to strongly restricted basin. This interval is marked by high-frequency alternations between ferruginous and sulfidic reducing conditions, accompanied by significant hydrothermal activity and intermittent marine incursions. The relatively high TOC content in the manganese carbonate sub-member was primarily controlled by high productivity driven by hydrothermal and seawater-derived nutrient inputs. In contrast, productivity in the manganese-bearing shales sub-member declined due to limited nutrient supply, yet its TOC content did not decrease significantly owing to effective preservation under sulfidic conditions. Additionally, some organic matter in Member I was consumed during manganese mineralization. Member II was deposited in a strongly restricted

Foundation: National Natural Science Foundation of China (42272173, U24B6001); Guizhou Provincial Science and Technology Support Program (Qian Ke He Zhi Cheng [2024] General 128)

Corresponding author: LI YiFan, E-mail: liyifan@cugb.edu.cn

environment under warm climatic conditions, featuring persistent sulfidic reduction and high terrigenous input. The efficient coupling between productivity sustained by enhanced terrigenous nutrients and superior preservation conditions within the strongly restricted sulfidic water column led to peak TOC content. Member III, however, exhibits very low TOC content due to collapsed productivity and completely oxic water conditions. **[Conclusion]** This study clarifies the pattern of organic matter enrichment mechanisms co-controlled by “productivity-preservation conditions” and their evolution alongside environmental changes in the study area, providing direct insights for regional shale gas exploration. These findings are based on data from a single well; thus, their regional representativeness requires further verification through additional drilling. Moreover, the quantitative contributions of various environmental factors to TOC have not been precisely determined. Future work should focus on establishing a more universal enrichment model.

Key words: Cryogenian; Datangpo Formation; paleoclimate; redox; primary productivity; organic matter enrichment

