

引用格式: 宁婷, 柳蓉, 王旭等. 鄂尔多斯盆地南缘中一晚三叠世延长组古环境重建与有机质富集机制[J/OL]. 沉积学报, 2025, 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.019. [NING Ting, LIU Rong, WANG Xu, et al. Classification and organic provenance of microbialite peloids in the Lower Triassic[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.019.]

鄂尔多斯盆地南缘中一晚三叠世延长组古环境重建与有机质富集机制

宁婷^{1,2}, 柳蓉^{1,2}, 王旭^{1,2}, 何天鑫^{1,2}, 刘强³

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 吉林省页岩与共生能源矿产重点实验室, 长春 130061

3. 中国石油青海油田采气二厂, 甘肃敦煌 736200

摘要 【目的】卡尼期湿润幕事件(Carnian Pluvial Episode, CPE)对晚三叠世气候产生重大影响, 暖湿气候促进丰富细粒沉积物形成和有机质富集。拟通过对鄂尔多斯盆地厚层富有机质黑色页岩的研究, 揭示其延长组 7 段沉积期对 CPE 事件的响应特征。【方法】通过综合分析 ZK903 钻井资料, 以生物标志化合物数据为核心, 结合同位素、黏土矿物、主微量元素等多种分析手段, 深入探讨了延长组 7 段至 8 段的古湖泊环境特征和有机质来源, 建立了研究区该事件影响下的有机质富集模式。【结果】鄂尔多斯盆地长 7₃ 段岩性由砂岩向黑色页岩转变, 表明沉积期受到 CPE 事件的显著影响, 有机质富集逐渐增强。生物标志化合物、微量元素及黏土矿物含量的变化表明研究区在该事件的影响下, 气温升高降水增加, 湖泊水面升高, 水体稳定性提高加剧了水体分层, 湖泊呈现淡水还原环境, 同时湖泊生物群落结构发生变化, 有机质来源以低等水生生物为主。【结论】CPE 事件显著影响了研究区古气候背景及古湖泊水体沉积环境, 稳定的水体分层环境下细粒沉积发育, 也为该地区有机质富集提供了良好的生产力和保存条件, 促进富有机质黑色页岩即油页岩的沉积。

关键词 卡尼期湿润幕事件(CPE); 古环境; 有机质富集; 生物标志化合物; 延长组; 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 宁婷, 女, 1999 年出生, 硕士研究生, 非常规油气, E-mail: ningting23@mails.jlu.edu.cn

通信作者 柳蓉, 女, 教授, E-mail: liurong@jlu.edu.cn

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-0550(2025)00-0000-00

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.019

CSTR: 32268.14/cjxb.62-1038.2025.019

0 引言

晚三叠世卡尼期全球干热气候发生了突变, 表现为气温升高、降水增多、气候类型以湿热型为主, 这一时期地层有机质富集特征明显, 岩性上主要表现为向黑色泥页岩的突变。在奥地利北部阿尔卑斯(Calcareous Alps)地区, Schlager and Schöllnberger(1973)年首次观察到了这种显著的岩性变化, 并引入了“Reingraben 转折”这一概念。随后在 1989 年, Simms and Ruffell(1989)首次将此次事件命名为“Carnian Pluvial Episode”(卡尼期湿润幕事件, 下文简称 CPE)。该事件的发生以温度和降雨量的增加(Trotter *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016;

收稿日期: 2025-02-24; 收修改稿日: 2025-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(3A4205505422)

Dal Corso *et al.*, 2022)、碳同位素负偏 (Sun *et al.*, 2016; Dal Corso *et al.*, 2018, 2022)、碳酸盐岩沉积停止 (Hornung and Brandner, 2005; Jin *et al.*, 2020)、海洋与湖泊缺氧 (Lu *et al.*, 2021) 及大陆风化加剧 (Pecorari *et al.*, 2023) 等为主要特征, 从而影响了沉积环境和生物多样性, 促进了有机质的富集 (Li *et al.*, 2020)。前人对 CPE 事件影响下的古气候、古水体环境变化的研究手段主要集中于主微量元素、碳同位素、生物化石、孢粉分析等 (李相博等, 2023b; Lin *et al.*, 2024; Rahman *et al.*, 2024; 李建国等, 2025), 但近年来, 随着生物标志化合物研究手段的定量发展, 其组分及其相对丰度能够直接反映生态、地理和环境演化过程的精细信息 (Bray and Evans, 1961; Peters *et al.*, 2005; 周锡强等, 2017; 张参等, 2020), 这些信息是传统地质地球化学研究方法难以获得的。同时, 生物标志物具有来源单一、结构稳定的特点, 不易受物理化学作用的再改造, 能够较好地保存原始生物和环境的信息 (Powell and McKirdy, 1973; 傅家谟等, 1991; 李守军, 1999; 周锡强等, 2017), 而且对特定环境和生物过程的响应十分敏感, 成为定量或半定量重建高分辨率古环境变化的理想工具 (傅家谟等, 1991; Peters *et al.*, 2005; 张参等, 2020)。此外, 早期对 CPE 事件的相关研究主要集中在海相地层, 陆相地层的研究还存在区域对比薄弱、机制不清晰等不足 (Celia *et al.*, 2011; Jin *et al.*, 2020)。鄂尔多斯盆地作为特提斯东部华北板块典型的陆相沉积盆地, 其延长组地层处于中一晚三叠世, 地层连续, 古气候演化信息保存完整, 长 7₃ 段由砂岩转变为厚层的黑色页岩, 称为“张家滩页岩”, 有机质含量高, 是恢复古气候和古环境最理想的资料。因此, 本研究对 CPE 事件的陆相沉积响应研究具有重要补充意义 (Fu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021b)。

本文以鄂尔多斯盆地南部铜川地区 ZK903 钻井为例, 通过生物标志化合物、主微量元素、黏土矿物、有机碳同位素等综合指标, 重建研究区古气候并揭示 CPE 事件在鄂尔多斯地区的响应, 为进一步丰富富有机质页岩形成古环境的研究资料和完善陆相湖盆中的有机质富集模式提供科学依据。

1 区域地质概况

中晚三叠世时期, 鄂尔多斯盆地位于特提斯东部, 是一个大型多旋回克拉通盆地。从地理上看, 鄂尔多斯盆地处于华北板块的西部边缘, 北起阴山, 南抵秦岭造山带, 西临贺兰山, 东至吕梁山, 覆盖面积约为 $3.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。从构造上看, 鄂尔多斯盆地被划分为六个构造单元: 伊盟隆起、西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带和渭北隆起 (Zhang *et al.*, 2021a, b)。

盆地内部的地层记录了多旋回的沉积历史,其地质发展与周围造山带的构造活动密切相关。在三叠纪时期受印支运动的影响,华北板块与扬子板块碰撞拼合,鄂尔多斯盆地进入克拉通拗陷阶段,盆地整体缓慢沉降,形成大型内陆湖盆(Fu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021a, b), 导致盆地内延长组在沉积过程中,形成了一套河流—三角洲—湖相的陆源碎屑沉积体系。基于沉积旋回和岩性组合可将延长组自下而上分为10段(长10段—长1段),反映了湖盆形成、发展和消亡的全过程(Fu *et al.*, 2018)。其中长8段—长7段正处于湖盆扩张时期,并在长7段达到湖盆鼎盛期,该段厚度为100~120 m,沉积相以半深湖—深湖相为主,可根据岩相组合进一步分为长7₁、长7₂和长7₃共3个亚段,在长7₃段时期湖泊水位达到最高,岩性由砂岩转为富有机质油页岩,称为“张家滩页岩”(Zhang *et al.*, 2021a, b)。ZK903井位于鄂尔多斯盆地南缘,处于伊陕斜坡和渭北隆起过渡地带,本次研究系统选取了ZK903钻井岩心,长7段—长8段是主要目的层(图1)。

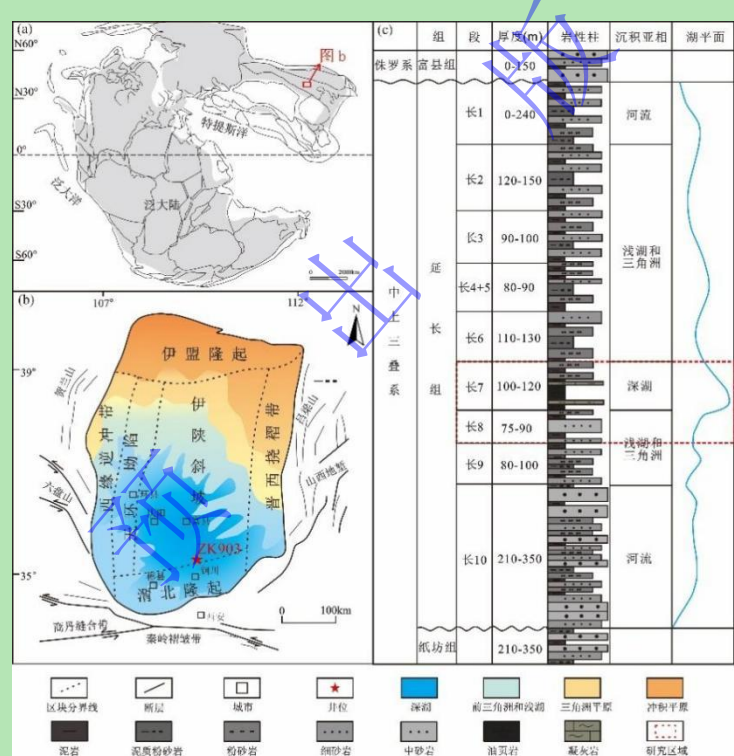


图1 鄂尔多斯盆地地质图

(a) 中—晚三叠世全球古地理图及鄂尔多斯盆地的位置(据曾建理等, 2022 修改); (b) 鄂尔多斯盆地主要构造单元和 ZK903 井位置(据 Zhang *et al.*, 2021b 修改); (c) 延长组综合柱状图(据文献 Zhang *et al.*, 2021b 修改)

Fig.1 Regional geological map of the Ordos Basin

2 实验样品和方法

本次研究系统选取了 ZK903 钻井岩心,以长8段上部及长7段作为目的层,利用生物标志化合物分析,结合微量元素、总有机碳(TOC)含量、有机碳同位素等多种测试手段进

进行研究。其中共采集 95 件样品进行 TOC 测试, 86 件样品进行微量元素测试, 63 件样品进行碳同位素分析 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$), 34 件样品进行黏土矿物测定, 27 件样品进行生物标志化合物 (GC-MS) 分析。

TOC 测试在吉林省油页岩与共生能源矿产重点实验室进行, 参照国标《沉积岩中总有机碳的测定》(GB/T 19145—2003) 使用 LECO CS-230 碳硫分析仪进行测试, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 测试在吉林大学国土资源部东北亚矿产资源评价重点实验室进行, 使用元素分析仪与同位素质谱仪联动装置进行测试。主微量元素和黏土矿物分析参照国标 (GB/T 14506.30—2010) 在北京核工业地质研究所完成。

生物标志化合物分析在吉林省油页岩与共生能源矿产重点实验室采用气相色谱—质谱 (GC-MS) 联用仪完成, 分析流程参照国家标准 GB/T18606—2017 进行。该实验经历了有机质抽提、分离和生物标志化合物测定等步骤。先用二氯甲烷: 甲醇 (9:1) 溶液进行抽提, 接着对抽提所得溶液进行旋转蒸发, 加入正己烷 20 mL 静置 12 h, 之后进行离心除去极性物质。用层析法 (填充硅胶和氧化铝) 分离出饱和烃、芳香烃, 随后利用色谱—质谱仪 (GC-MS) 对饱和烃和芳香烃进行分析。气相色谱质谱仪采用 30 m HP-5MS 弹性石英毛细管柱 (内径: 0.25 mm; 0.25 μm 膜厚)。每个样品的温度在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下保持 2 min, 增加 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 在 320 $^{\circ}\text{C}$ 下保持 20 min。

3 结果

3.1 有机碳及其同位素特征

研究区目的层长 8 段 TOC 值介于 0.51%~7.91%, 平均值为 1.70%, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值介于 -27.7‰~-23‰, 平均值为 -25.1‰, TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值均较低; 长 7₃ 段 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值分别介于 0.88%~25.45%、-30.2‰~-24.4‰, 平均值为 8.53%、-28.2‰, 指示该段 TOC 值明显上升, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值负偏明显; 长 7₁₊₂ 段 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值分别介于 0.37%~18.10%、-29.6‰~-23.1‰, 平均值为 3.10%、-25.9‰, 指示该段 TOC 值下降, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值增大, 负偏趋势减小。

3.2 主微量元素特征

ZK903 井长 7 段主量元素主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 K_2O 和 CaO 组成, 其平均值分别为 55.27%、15.61%、6.44%、3.32%、2.36%。其他主量元素及其平均值分别为 2.29% (MgO)、1.72% (Na_2O)、0.58% (TiO_2)、0.23% (P_2O_5)、0.08% (MnO)。

样品中微量元素变化特征为: 长 8 段中 Sr/Cu 介于 2.37~16.74, 平均值为 8.67, Sr/Rb 介于 0.85~4.22, 平均值为 2.76, 而 V/Cr 和 δU 值相对较低, 分别介于 1.02~2.71 和 0.74~1.48,

平均值分别为 1.28、0.89；长 7₃ 段 Sr/Cu 和 Sr/Rb 值均明显下降，分别介于 0.70~16.96 和 0.28~5.92，平均值分别为 4.52、1.56，但 V/Cr 和 δU 值均明显增大，V/Cr 介于 1.17~6.87，平均值为 2.65， δU 介于 0.81~1.91，平均值为 1.49；长 7₁₊₂ 段表现为上升趋势，Sr/Cu 和 Sr/Rb 值分别为 1.40~7.54 和 0.79~2.52，平均值分别为 4.56、1.60，V/Cr 和 δU 值却相对减小，分别介于 0.99~2.63 和 0.74~1.84，平均值分别为 1.31、1.10。Sr/Ba 比值变化较小，长 8 段介于 0.27~0.63，平均值为 0.50，长 7₃ 段介于 0.22~1.07，平均值为 0.45，长 7₁₊₂ 段介于 0.19~0.52 之间，平均值为 0.36。

3.3 生物标志化合物特征

3.3.1 正构烷烃和无环类异戊二烯烃

生物标志化合物中正构烷烃的分布与有机质的来源和成熟度密切相关 (Zhang *et al.*, 2021c)。在分析饱和烃时，通过 m/z 57 对正构烷烃和无环类异戊二烯烃进行识别，可以观察到不同沉积阶段中正构烷烃分布模式的差异。短链正构烷烃 ($<n-C_{21}$) 占比高，即轻烃/重烃 ($\sum C_{21}/\sum C_{22+}$) 比值大，通常指示前峰型的分布特征，沉积有机质主要源自浮游藻类等低等水生生物；中链正构烷烃 ($n-C_{21-26}$) 代表水生大型挺水植物对有机质的贡献较为显著；而长链正构烷烃 ($>n-C_{26}$) 占比高，即 $\sum C_{21}/\sum C_{22+}$ 比值小，则反映出后峰型的分布特征，有机质主要来源于高等陆生植物 (Peters *et al.*, 2005; 张参等, 2020)。碳优势指数 (CPI) 和奇偶优势指数 (OEP) 也是表征有机质成熟度和来源的重要地球化学参数 (Bray and Evans, 1961)。通常而言，CPI 值与 OEP 值越接近 1，有机质成熟度越高。

在长 8 段 (图 2a)，正构烷烃的主峰位于 $n-C_{23}$ ，其碳数小于 $n-C_{21}$ 、 $n-C_{21-26}$ 和大于 $n-C_{26}$ 的比例分别为 20.3%~41.3%、42.9%~54.5%、15.8%~27.2%，平均值分别为 33.4%、46.1%、20.5%。 $\sum C_{21}/\sum C_{22+}$ 介于 0.69~1.63，平均值为 1.20 (表 1)。该段中链正构烷烃占据优势，指示沉积有机主要由水生大型挺水植物贡献，而浮游藻类和高等植物的贡献相对较少。

在长 7₃ 段 (图 2b)，正构烷烃的主峰转移至 $n-C_{17}$ ，碳数小于 $n-C_{21}$ 的比例显著上升，范围为 36.0%~70.0%，平均值为 56.1%，而 $n-C_{21-26}$ 与碳数大于 $n-C_{26}$ 的比例分别为 23.5%~42.2%和 3.1%~21.7%，平均值为 33.0%和 10.7%。 $\sum C_{21}/\sum C_{22+}$ 介于 1.07~6.29，平均值为 3.01 (表 1)。长 7₃ 段短链正构烷烃占比显著增加， $\sum C_{21}/\sum C_{22+}$ 值明显增大，反映了有机质来源以浮游藻类等低等水生生物为主。

在长 7₁₊₂ 段 (图 2c)，正构烷烃的主峰偏移至 $n-C_{19}$ ，碳数小于 $n-C_{21}$ 、 $n-C_{21-26}$ 与碳数大于 $n-C_{26}$ 的比例分别为 37.9%~59.8%、33.5%~44.1%、6.2%~19.9%，平均值为 46.7%、39.2%

和 14.1%， $\Sigma C_{21}/\Sigma C_{22+}$ 介于 1.37~3.92，平均值为 2.28（表 1）。短链正构烷烃和轻烃的比例减少， $\Sigma C_{21}/\Sigma C_{22+}$ 值显著降低，反映出以浮游藻类为代表的低等水生生物输入减少。

姥鲛烷（Pr）和植烷（Ph）是沉积有机质中重要的类异戊二烯烃化合物，其丰度和比例常用于指示沉积环境的氧化还原条件（Powell and McKirdy, 1973；李守军，1999）。长 8 段 Pr/Ph 值介于 0.57~1.53，平均值为 1.20，呈弱姥鲛烷优势，指示该阶段主要为弱氧化环境；长 7₃ 段和长 7₁₊₂ 段 Pr/Ph 值范围分别为 0.45~1.15 和 0.55~0.86，平均值均小于 1，呈弱植烷优势，指示该时期的沉积环境总体偏向于还原环境。

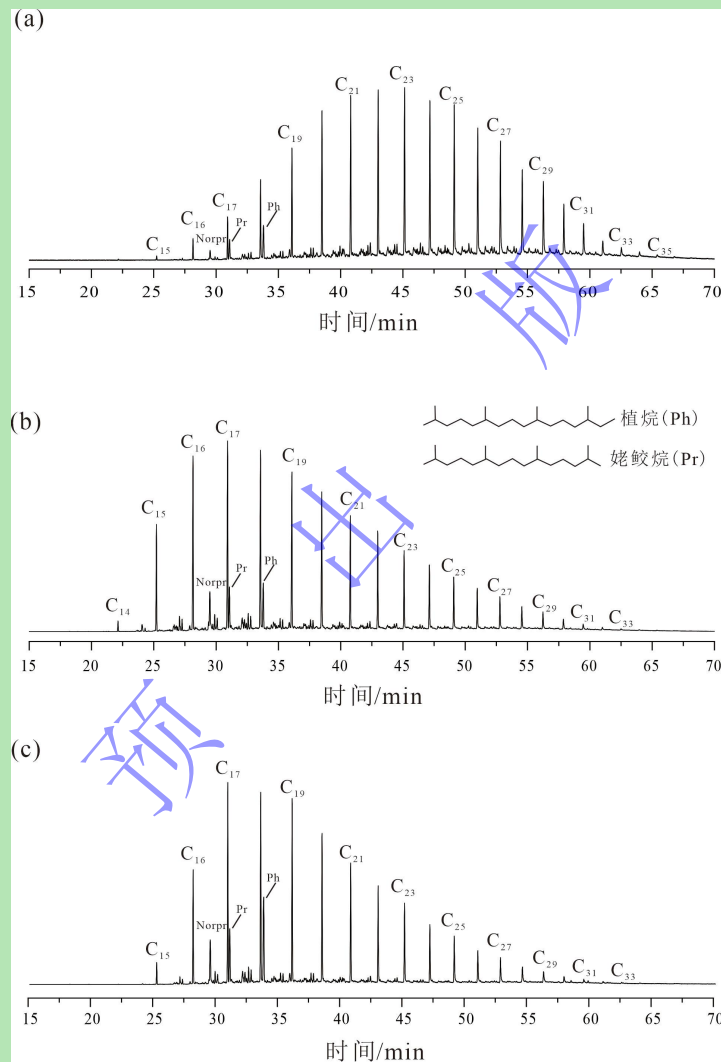


图 2 鄂尔多斯盆地长 7 段—长 8 段饱和烃（m/z 57）正构烷烃质量色谱图

(a) ZK903 井，长 8 段，806.95 m，TOC：5.81%；(b) ZK903 井，长 7₃ 段，754.50 m，TOC：9.06%；(c) ZK903 井，长 7₁₊₂ 段，689.81 m，TOC：10.45%

Fig.2 Mass chromatograms of saturated hydrocarbons (m/z 57) in the Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地长 7 段—长 8 段样品气相色谱质谱分析结果

Table 1 GC-MS analysis results of samples from the Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

段	本文样品数据/平均值									
	$<n-C_{21}/\sum n-C_{14-36}$	$n-C_{21-26}/\sum n-C_{14-36}$	$>n-C_{26}/\sum n-C_{14-36}$	$\sum C_{21-} / \sum C_{22+}$	CPI	OEP	Pr/Ph	Tm/Ts	GI	$C_{27}/C_{29}(\alpha\alpha\alpha)R$
长 7 ₁₊₂ 段	37.9~59.8	33.5~44.1	6.2~19.9	1.37~3.92	1.08~1.22	0.83~1.15	0.55~0.86	1.29~2.71	0.02~0.09	0.39~0.79
	46.7	39.2	14.1	2.28	1.15	0.98	0.75	1.8	0.05	0.64
长 7 ₃ 段	36.0~70.0	23.5~42.2	3.1~21.7	1.07~6.29	0.96~1.20	0.63~1.15	0.45~1.15	1.23~4.79	0.02~0.06	0.72~1.40
	56.1	33.0	10.7	3.01	1.12	0.98	0.75	2.44	0.04	1.04
长 8 段	20.3~41.3	42.9~54.5	15.8~27.2	0.69~1.63	1.02~1.29	0.72~1.01	0.57~1.53	0.53~3.16	0.02~0.11	0.53~1.38
	33.4	46.1	20.5	1.20	1.12	0.91	1.2	1.73	0.07	0.97

注：表中数值为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ ； $CPI = \frac{1 \sum C_{25} \sim C_{33} \text{奇数}}{2 \sum C_{24} \sim C_{32} \text{偶数}} + \frac{\sum C_{25} \sim C_{33} \text{奇数}}{\sum C_{26} \sim C_{33} \text{偶数}}$ ； $OEP = \frac{C_i + 6C_{i+2} + C_{i+4}}{4C_{i+1} + 4C_{i+3}}^{-1+1}$ $i+2$ 为主峰碳数。

3.3.2 萜类化合物

在研究区长 7 和长 8 段中识别出 C₂₀~C₂₈ 三环萜烷、五环三萜烷，其中五环三萜烷的丰度显著高于三环萜烷（图 3）。这一结果表明五环三萜烷在陆相湖泊环境中的化学稳定性和保存潜力更高，可能与特定的湖泊生态系统和有机质来源相关（Kolaczowska *et al.*, 1990）。

17 α (H)-22,29,30-三降藿烷（Tm）与 18 α (H)-22,29,30-三降藿烷比值（Ts）比值是指示有机质成熟度的指标（Peters and Moldowan, 1993）。研究区 CPI 与 OEP 值在三段中变化不大（表 1），而藿烷中随着成熟度增加，Tm 会逐渐向 Ts 转化，比值越低，成熟度越高（Peters and Moldowan, 1993），因此借用 Tm/Ts 进行成熟度判识。长 8 段和长 7₁₊₂ 段样品 Tm/Ts 值分别为 0.53~3.16、1.29~2.71，平均值为 1.73 和 1.80；而长 7₃ 段 Tm/Ts 值介于 1.23~4.79，平均值为 2.44，显示了长 7₃ 段该值较高，指示较低的有机质成熟度。这种成熟度差异可能与湖泊沉积速率、湖泊水体深度和有机质输入类型的差异有关（Kolaczowska *et al.*, 1990；Peters and Moldowan, 1993）。

3.3.3 甾类化合物

甾类化合物较好地保留生物母质原始分子骨架信息，是判断沉积有机质母源和沉积环境演化的重要依据，一般来说，C₂₇ 规则甾烷来源于藻类等低等水生生物，C₂₉ 规则甾烷指示高等植物来源（Gelpi *et al.*, 1970；包建平等, 2024；张妍等, 2024）。根据 m/z 217 质谱图，研究区样品中甾类化合物主要包括 C₂₇~C₂₉ 规则甾烷、重排甾烷、孕甾烷和升孕甾烷（图 3）。

长 8 段规则甾烷分布特征为 C₂₉>C₂₇>C₂₈（图 3a），C₂₇/C₂₉($\alpha\alpha\alpha$)R 平均值为 0.97，指示了该段有机质来源主要以高等植物为主。长 7₃ 段甾烷分布 C₂₇>C₂₉>C₂₈（图 3b），C₂₇/C₂₉($\alpha\alpha$)R 平均值为 1.04，指示该段有机质来源中，高等植物的贡献减少，浮游藻类等低等水生

生物贡献明显增加。长 7_{1+2} 段甾烷分布 $C_{29}>C_{28}>C_{27}$ (图 3c), $C_{27}/C_{29}(\alpha\alpha\alpha)R$ 平均值为 0.64, 指示该段高等植物贡献再次增多。

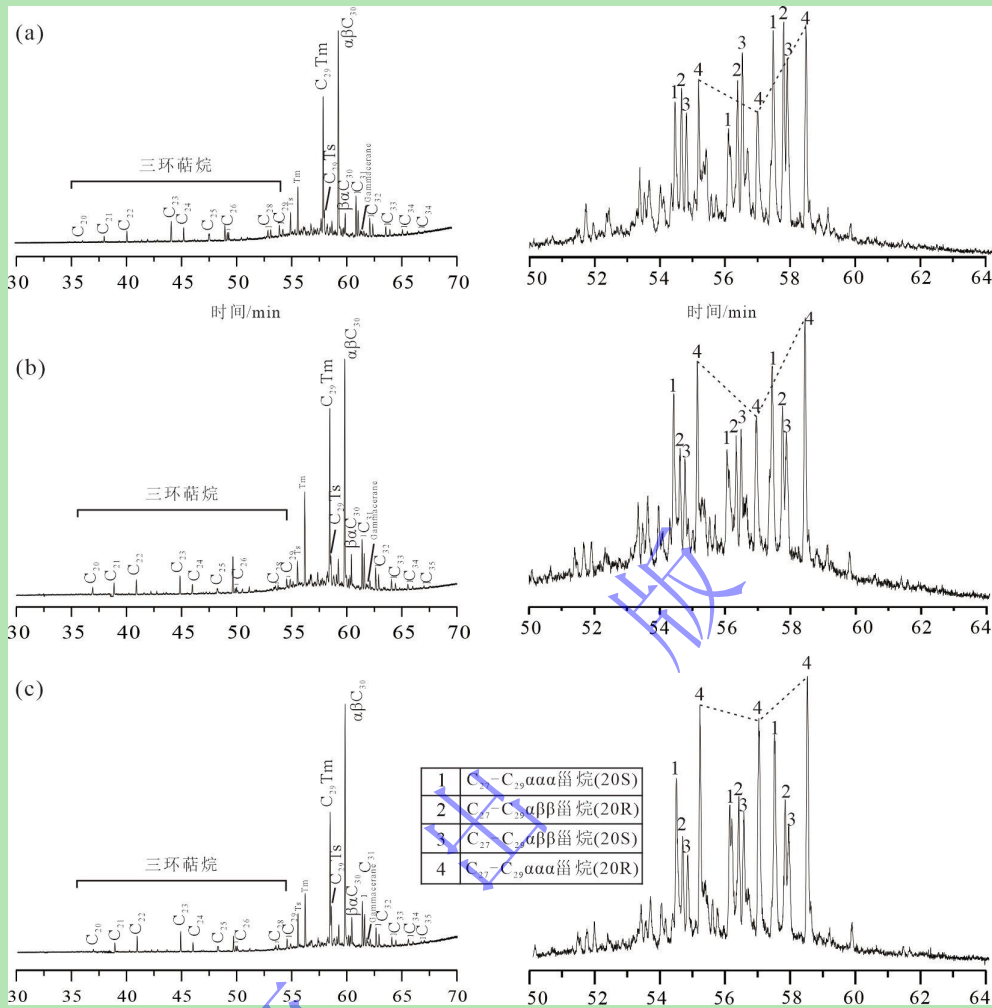


图 3 鄂尔多斯盆地长 7 段—长 8 段饱和烃 (m/z 191 及 217) 萜烷与甾烷质量色谱图

(a) ZK903 井, 长 8 段, 806.95 m, TOC: 5.81%; (b) ZK903 井, 长 7_3 段, 754.50 m, TOC: 9.06%; (c) ZK903 井, 长 7_{1+2} 段, 689.81 m, TOC: 10.45%;

Fig.3 Mass chromatograms of terpenes and steranes of saturated hydrocarbons (m/z 191 and 217) in the Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

4 讨论

4.1 黑色页岩对比与卡尼期界限厘定

卡尼期是晚三叠世第一个期 (237~227 Ma), 该时期的气候变化以降雨量增加、大洋缺氧、碳酸盐岩生产危机、黑色页岩沉积等为标志, 因此 CPE 事件也被称为“卡尼期黑色页岩事件” (Hornung and Brandner, 2005)。此外, 该事件发生伴随着有机碳同位素的强烈负偏, 反映了全球碳循环扰动 (Hornung and Brandner, 2005; Jin *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2021; 李相博等, 2023b; Lin *et al.*, 2024; 李建国等, 2025)。几乎全球范围内都有此事件相关

报道,如意大利、匈牙利 (Dal Corso *et al.*, 2015), 挪威 (Mueller *et al.*, 2016), 英国 (Miller *et al.*, 2017; Baranyi *et al.*, 2019), 中国 (Sun *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022) 等。匈牙利 Transdanubian 山脉 Met-1 钻孔在卡尼期显示出沉积相的显著变化: 自碳酸盐沉积之后迅速转变为泥灰岩沉积 (Dal Corso *et al.*, 2015); 在我国黔西南地区, 卡尼期沉积相由碳酸盐岩突变至深灰色页岩, 说明这些地区可能均受到卡尼期极端气候事件影响 (Zhao *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022)。随着沉积相突变, 这些地区黑色页岩层中均呈现出不同程度的碳同位素负偏。如 Dal Corso *et al.* (2015) 的研究中显示, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏移幅度达 6‰。Zhao *et al.* (2022) 对贵州瓦窑剖面有机碳同位素的分析显示, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 负偏幅度为 3‰ (图 4)。虽然卡尼期湿润幕事件在不同地点、不同沉积环境中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 负偏幅度不同, 但均有 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 负偏发生, 这恰好证明了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 负偏是 CPE 事件的标志特征之一。

鄂尔多斯盆地延长组沉积于中—晚三叠纪时期 (张辉等, 2014; 童金南等, 2019; Sun *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2023), 不少学者对于该地区进行了锆石定年研究, 如张辉等 (2014) 通过对长 7 段凝灰岩同位素年代学研究, 认为其年龄为 234 Ma 左右 ($234.3 \text{ Ma} \pm 2.8 \text{ Ma}$ 和 $234.9 \text{ Ma} \pm 2.6 \text{ Ma}$); Sun *et al.* (2020) 对铜川地区云梦剖面长 7₃ 段中凝灰岩进行锆石定年, 将年龄限定在 $234.1 \text{ Ma} \pm 1.2 \text{ Ma}$, $234.8 \text{ Ma} \pm 2.1 \text{ Ma}$ 及 $236.0 \text{ Ma} \pm 1.7 \text{ Ma}$, 认为长 7 段与长 8 段的分界线即为中—晚三叠世的界限; 生物地层学上, 李建国等 (2025) 通过对 ZH2 钻孔孢粉组合进行分析, 发现长 8 段为 *Punctatisporites-Verrucosisporites-Osmundacidites* 组合, 指示年代为中三叠世拉丁期, 而长 7 段为 *Asseretospora-Apiculatisporis* 组合, 地质时代为晚三叠世卡尼期; 沉积相记录显示, 长 8 段和长 7 段是明显的沉积相突变面, 同时也是干湿气候转变界限 (童金南等, 2019; 李相博等, 2023b; Cao *et al.*, 2023), 研究区 ZK903 井也呈现相同的特征 (图 4)。同时长 7 段底部的沉积特征与卡尼期湿润幕事件高度契合, 特别是鄂尔多斯盆地延长组 8 段至 7 段之间从砂岩到黑色页岩的沉积相突变, 并伴随着明显的有机碳同位素负偏, 其偏移幅度达 6‰, 其与贵州瓦窑剖面中 CPE 事件发生时的特征具有高度相似性 (图 4)。此外, 部分学者通过对古土壤层、生物化石等进行分析, 同样支持长 7 段厚层湖相泥岩是发生在晚三叠世的 CPE 事件在陆相地层的响应这一观点 (Zhang *et al.*, 2021b; 李相博等, 2023b)。因此本文认为长 7₃ 段在一定程度上与上述区域具有可对比性。

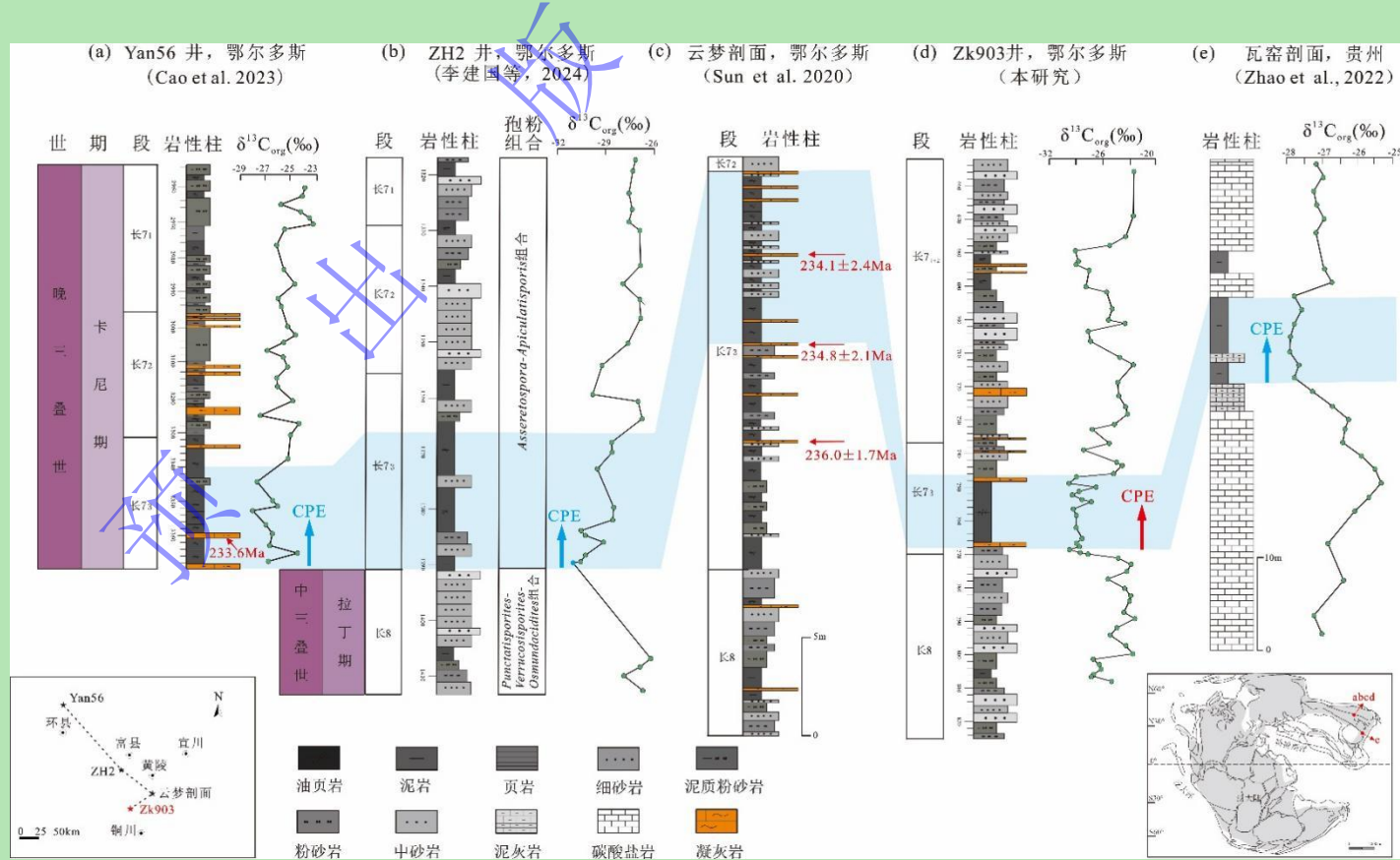


图 4 卡尼期地层对比图

(a) 鄂尔多斯盆地云梦剖面地层柱状图 (据 Sun *et al.*, 2020 修改); (b) 鄂尔多斯盆地 ZH2 井地层柱状图 (据李建国等, 2025 修改); (c) 鄂尔多斯盆地 Yan56 井地层柱状图 (据 Cao *et al.*, 2023 修改); (d) 鄂尔多斯盆地 ZK903 井地层柱状图 (本研究); (e) 贵州瓦窑剖面地层柱状图 (据 Zhao *et al.*, 2022 修改)

Fig.4 Stratigraphic correlation map of the Carnian Stage

4.2 卡尼期湿润幕事件在鄂尔多斯盆地的响应

4.2.1 古环境重建

1) 古气候特征

古气候在富有机质页岩的沉积中起着重要作用,温暖潮湿的气候条件更有利于有机质的保存和积累 (Yang *et al.*, 2016)。如 CPE 事件发生时,在特提斯西部日耳曼盆地,由于气温升高,径流增多,陆地硅质碎屑输入增加,导致碳酸盐岩沉积停止,富有机质的黑色页岩逐渐沉积下来 (Kozur and Bachmann, 2010)。但鄂尔多斯盆地作为陆相环境,具有一定封闭性,对气候变化的敏感性更强 (Hornung *et al.*, 2007; Jin *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2021),因此对鄂尔多斯盆地进行 CPE 事件影响下的古环境分析更有助于进行海陆相对比,同时分析长 7₃段油页岩富集与 CPE 时期气候—湖泊耦合机制,为非常规油气成藏研究提供新视角。

微量元素、黏土矿物含量等指标通常被认为是古气候分析的有效手段 (汤艳杰等, 2002)。如 $Sr/Cu > 10$ 指示干热气候, $5 < Sr/Cu < 10$ 表示半湿润—半干旱气候, $Sr/Cu < 5$ 表示温暖潮湿的气候; Sr/Rb 值越高,气候越干热 (施辉等, 2022)。黏土矿物中,伊利石向伊蒙混层矿物转化代表气候逐渐转为潮湿的环境 (邱振等, 2021)。

长 8 段 Sr/Cu 与 Sr/Rb 值均高于长 7₃和长 7₁₊₂,且黏土矿物中伊利石占比高,二者都指示了相对干热的气候环境。由于 CPE 事件发生,长 7₃段 Sr/Cu 与 Sr/Rb 值都出现了突然大幅下降的趋势,黏土矿物中伊蒙混层含量明显上升,指示气候环境逐渐转为温暖湿润。长 7₁₊₂段 Sr/Cu 与 Sr/Rb 值呈相对增加的趋势,同时伊利石含量有所上升,气候向半湿润半干旱转变 (图 5)。

2) 氧化还原特征

CPE 事件常伴随着缺氧事件的发生,该时期的缺氧事件在其他地区也可以得到对比。Hornung *et al.* (2007) 指出在奥地利地区,层状黑色页岩的存在明显指示了 CPE 事件发生期间为缺氧环境;Sun *et al.* (2016) 通过草莓状黄铁矿和 U/Th 值两项指标得出四川隆昌剖面瓦窑组在 CPE 事件期间,整体环境发生了由氧化向缺氧的转变。

沉积地层中氧化还原敏感元素的含量和富集因子是一种有效地重建古氧化还原环境的方法 (Algeo and Maynard, 2004; Tribovillard *et al.*, 2006)。如 $V/Cr > 4.25$ 、 $\delta U > 1$ 指示还原环境; $2 < V/Cr < 4.25$ 指示亚氧化环境; $V/Cr < 2$ 、 $\delta U < 1$ 指示氧化环境 (Tribovillard *et al.*, 2006)。生物标志化合物中 $Pr/Ph > 3$ 表示高陆源输入的氧化环境, $Pr/Ph < 1$ 代表还原环境 (Didyk *et al.*, 1978; 李红磊等, 2016); $Ts/(Ts+Tm)$ 中 Ts 含量高表示氧化环境,反之则指示还

原环境（王炳凯等，2017）。本文采用 V/Cr 、 δU 、 Pr/Ph 及 $Ts/(Ts+Tm)$ 进一步反映研究区古氧化还原特征。

长 8 段， V/Cr 、 δU 的平均值分别为 1.28 和 0.89， $Pr/Ph > 1$ ， $Ts/(Ts+Tm)$ 平均值为 0.41，表明该段偏氧化环境。长 7₃ 段油页岩沉积期， V/Cr 、 δU 平均值为 2.65 和 1.49， $Pr/Ph < 1$ ， $Ts/(Ts+Tm)$ 平均为 0.33，表示该段偏还原环境。长 8 段—长 7₃ 段沉积条件从氧化环境迅速向亚还原到还原环境的过渡，这种转变可能与 CPE 事件期间湖泊系统的水深增加或外界有机质输入导致的水体富营养化密切相关，进而引发缺氧条件的形成（Rahman *et al.*, 2024; 李建国等，2025）。长 7₁₊₂ 段， V/Cr 和 δU 比值明显下降，平均值为 1.31、1.10， $Ts/(Ts+Tm)$ 平均为 0.33，指示了以氧化为主但伴随局部还原现象的环境（图 5）。结合 $Pr/(n-C_{17})-Ph/(n-C_{18})$ 交会图（图 6a）及 Pr/Ph 与 GI 交会图（图 6b）来看，进一步证明研究区长 7 段还原性强于长 8 段，并在长 7₃ 段还原性表现更为突出，呈自下而上先增高后降低的趋势，与元素分析的结果一致。草莓状黄铁矿也可以反映氧化还原程度的变化，通常粒径越小越还原（Sun *et al.*, 2016; 李相博等，2023b）。研究人员对长 7 段草莓状黄铁矿的粒度进行了详细的统计分析（谢小敏等，2021; 李相博等，2023b），认为长 7₃ 段有大量草莓状黄铁矿且粒径较小（谢小敏等，2021），而其他层位少见，指示该段在 CPE 事件影响下，水体呈现强烈分层的还原环境。

3) 古盐度特征

元素比值（如 B 、 Sr/Ba 等）和生物地球化学数据（伽马蜡烷指数 $GI = \text{伽马蜡烷}/C_{30}$ 藿烷，与水体盐度呈正相关）均可以用来反映古水体的盐度特征（Xu *et al.*, 2015; 吴小奇等，2022）。当 $Sr/Ba < 0.6$ 、 $GI < 0.2$ 为淡水、 $0.6 < Sr/Ba < 1.0$ 、 $0.2 < GI < 0.5$ 为半咸水、 $Sr/Ba > 1.0$ 、 $GI > 0.5$ 则为咸水环境（吴小奇等，2022）。研究区内样品 Sr/Ba 和 GI 值变化趋势基本一致，长 8 段、长 7₃ 段和长 7₁₊₂ 段 Sr/Ba 平均值分别为 0.50、0.45 和 0.36； GI 平均值分别为 0.06、0.04 和 0.05，表明研究区样品大都属于微咸水—淡水环境，但长 7₃ 段盐度更低（图 5）。这是由于长 7₃ 段 CPE 事件发生，温暖湿润的古气候条件使湖泊水位上升，水体盐度降低。

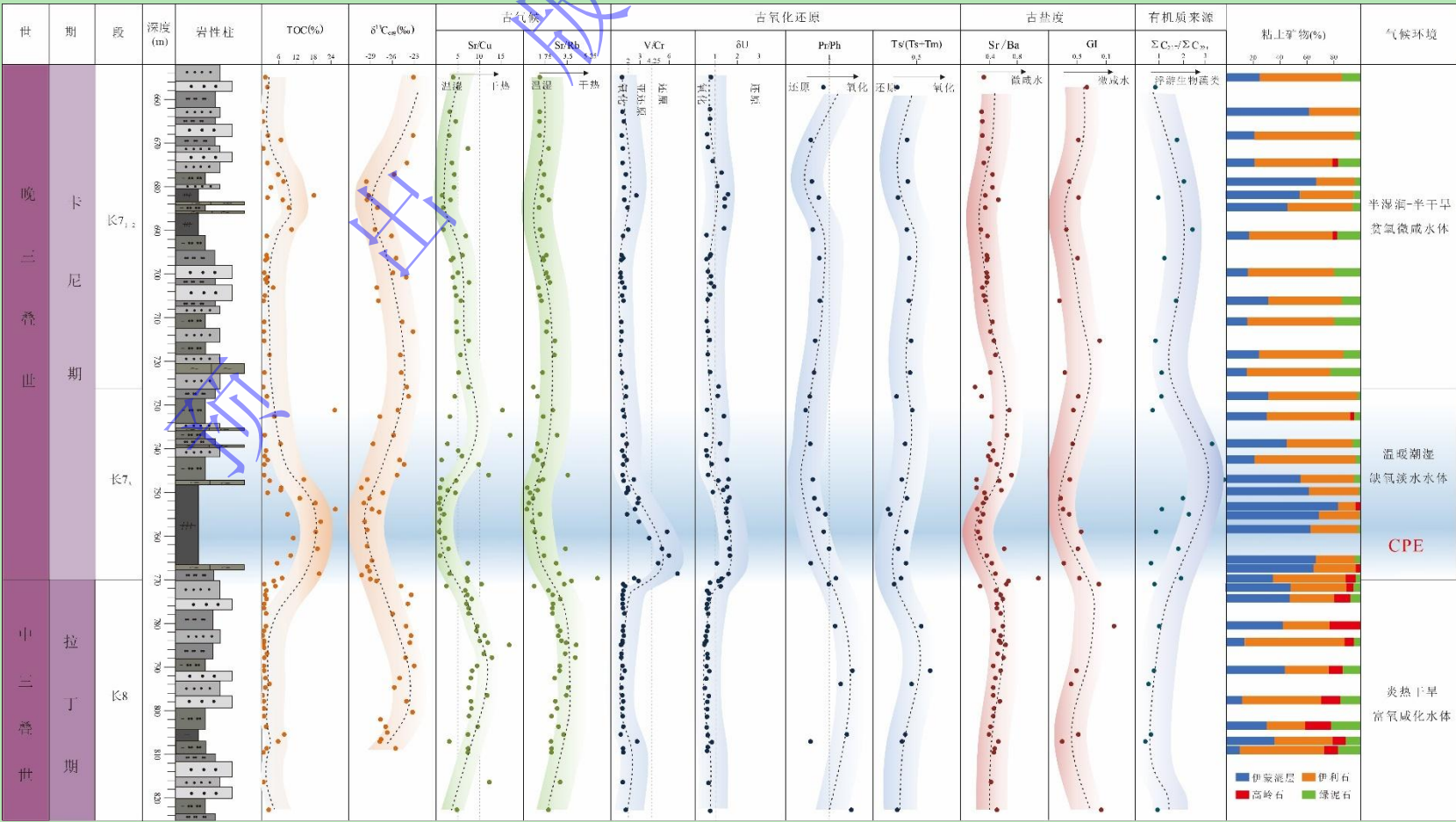


图 5 鄂尔多斯盆地长 7 段—长 8 段古气候与沉积环境综合柱状图

Fig.5 Comprehensive histogram of paleoclimate and sedimentary environment in the Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

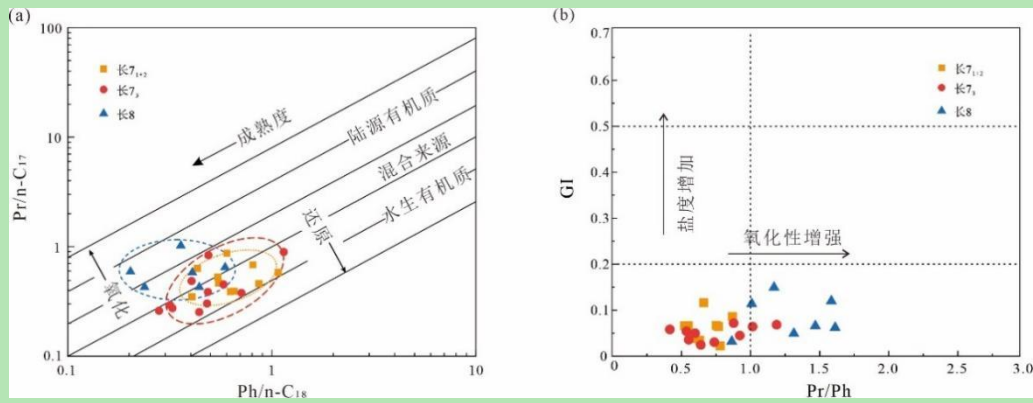


图6 鄂尔多斯盆地长7段—长8段氧化还原环境判别图（据孟庆涛等，2024 修改）

(a) $Pr/(n-C_{17})$ - $Ph/(n-C_{18})$ 交会图；(b) Pr/Ph -GI 交会图

Fig.6 Identification of redox environment in Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

4) 陆源碎屑输入与沉积速率

陆源碎屑输入对有机质富集具有双重效应。适当的陆源碎屑可以提升沉积速率，促进有机质快速保存，但过量的碎屑输入可能导致有机质被稀释（Henrichs and Reeburgh, 1987）。当 K_2O 和 TiO_2 与 Al_2O_3 含量呈正相关时，表明三者主要赋存于黏土矿物相，可作为陆源碎屑输入强度的指标（张慧芳等，2016）。由图 7a 可知研究区长 7 段 K_2O 和 TiO_2 含量与 Al_2O_3 呈正相关（ $R^2=0.52$ ），则可依据三者总和来判断陆源碎屑输入强度。在不同层位 $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 值与 TOC 呈负相关，特别在长 7₃ 段相关性更强，说明陆源碎屑输入的增加不利于有机质的富集和保存。与上文中该段陆源输入物质少，有机质类型以低等生物为主的分析一致（图 7b）。

沉积速率也是影响有机质富集的重要因素，作用机理与陆源输入相似（Hou *et al.*, 2023）。稀土元素的分异程度指标 $(La/Yb)_N$ （N 代表 NASC 标准化（McLennan, 1989）常用于反映沉积速率，当 $(La/Yb)_N$ 值为 1 左右时，代表沉积速率较高，分异程度弱； $(La/Yb)_N$ 值显著大于或小于 1 时，代表沉积速率较低，分异程度较强（McLennan, 1989；徐明慧等，2023）。研究区长 8 段 $(La/Yb)_N$ 平均值为 1.10、长 7₃ 段为 0.86、长 7₁₊₂ 段为 1.21，表明长 7 段沉积速率较低，分异程度强。当 $(La/Yb)_N < 0.64$ 时随着沉积速率增高，TOC 含量逐渐上升，且该趋势在长 7₃ 段表现得更加明显，当该值 > 0.64 时，沉积速率越来越高但 TOC 含量逐渐下降（图 7c, d）。

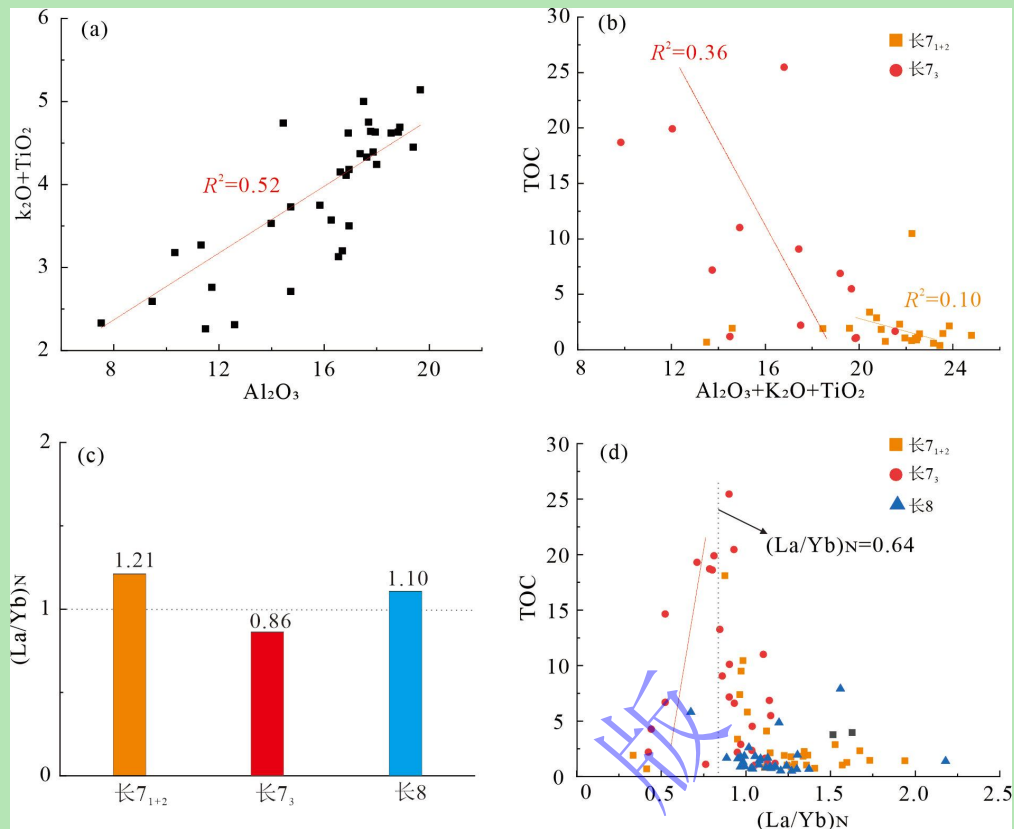


图 7 鄂尔多斯盆地长 7 段—长 8 段陆源输入和沉积速率与 TOC 关系图

(a) K_2O 和 TiO_2 与 Al_2O_3 含量相关性图；(b) 陆源碎屑输入指标 $Al_2O_3+K_2O+TiO_2$ 与 TOC 相关性图；(c) 长 7_{1+2} 、长 7_3 、长 8 段沉积速率 $(La/Yb)_N$ 平均值指示图；(d) 沉积速率指标 $(La/Yb)_N$ 与 TOC 相关图

Fig.7 Relationship between terrigenous input and sedimentation rate and TOC in the Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

4.2.2 有机质来源与古湖泊生物群落结构

生物标志化合物与 $\delta^{13}C_{org}$ 可用来指示有机质来源与古湖泊生物群落结构（王苏民和张振克，1999；Ando *et al.*, 2003）。长 8 段正构烷烃中链占比大， $\Sigma C_{21}/\Sigma C_{22+}$ 值较低，甾烷中 C_{29} 规则甾烷占比高，同时 $\delta^{13}C_{org}$ 值较大，指示有机质来源以陆源高等植物为主（王苏民和张振克，1999；张辉等，2014；李相博等，2023b）。长 7_3 段正构烷烃以短链为主， $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{22+}$ 值明显上升，甾烷中 C_{27} 规则甾烷占比高，在长 7_3 段 $\delta^{13}C_{org}$ 负偏 3.10‰，指示藻类低等水生生物来源明显增加且占据主导地位（王苏民和张振克，1999；张辉等，2014；李相博等，2023b）。长 7_{1+2} 段正构烷烃短链占比明显下降，中链和长链占比上升， $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{22+}$ 相较于长 7_3 段下降，甾烷中再次以 C_{29} 规则甾烷占主导， $\delta^{13}C_{org}$ 值再次增大，指示低等水生生物来源减少，陆源高等植物输入增加（王苏民和张振克，1999；张辉等，2014；李相博等，2023b）。

同时 C_{27} 、 C_{28} 、 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 交会图（图 8a）与 $C_{27}/C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R-Pr/Ph$ （图 8b）也可以用来指示有机质来源（Zhang *et al.*, 2021c），长 8 段、长 7_{1+2} 段主要投点在混合物质来源区

域，长 7₃段投点较为分散，混合物质来源为主，但藻类等低等水生生物输入分布明显增多，指示该段沉积环境发生了变化。

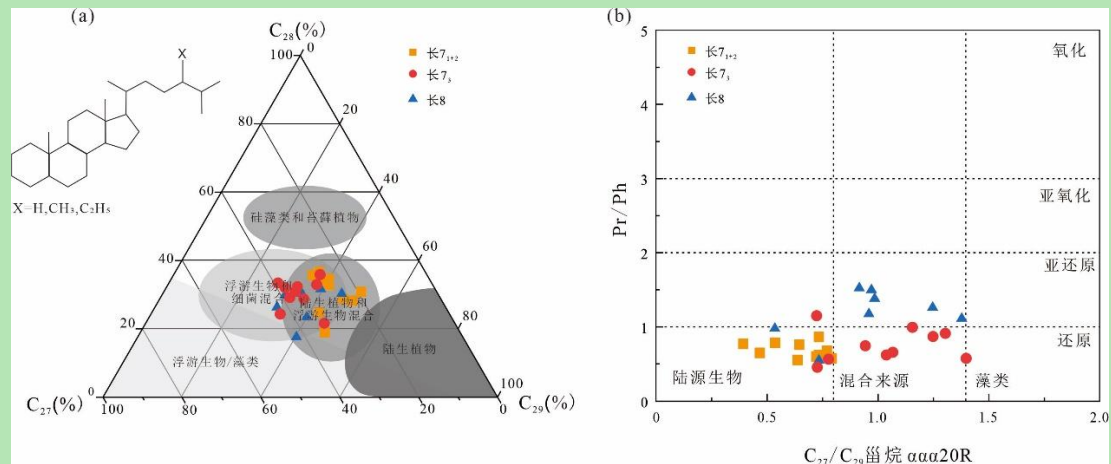


图 8 鄂尔多斯盆地长 7 段—长 8 段有机质来源判别图

(a) C₂₇-C₂₈-C₂₉ $\alpha\alpha\alpha$ 20R 规则甾烷三元图 (据 Zhang *et al.*, 2021c 修改); (b) C₂₇/C₂₉ $\alpha\alpha\alpha$ 20R 规则甾烷-Pr/Ph 交会图 (据 Jiang and George, 2018 修改)

Fig.8 Identification of organic matter sources in the Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

4.3 有机质富集模式

有机质的积累过程受到古气候、古水体条件、古生产力、沉积速率等多种因素的影响(刘翰林等, 2022; 李相博等, 2023a)。通过对各种判别指标与 TOC 含量的相关性分析, 综合判断影响研究区有机质富集的因素。结果显示(图 9), 长 7₃段 TOC 与古气候、古盐度、氧化还原条件及古生产力的相关性 (R^2) 分别为 0.04、0.25、0.69 和 0.39, 说明该段主要受到古生产力和氧化还原条件的影响, 属于高生产—高保存模式。长 7₁₊₂段 TOC 与各指标的相关性分别为 0.03、0.02、0.54、0.26, 同时 TOC 随着沉积速率增大而减小, 属于高沉积速率—中等保存模式。长 8 段 TOC 与各指标的相关性分别为 0.04、0.17、0.25, TOC 与沉积速率呈负相关, 属于较高沉积速率—低保存模式。基于上述分析, 建立本研究区 CPE 事件影响下的有机质富集模式(图 10)。

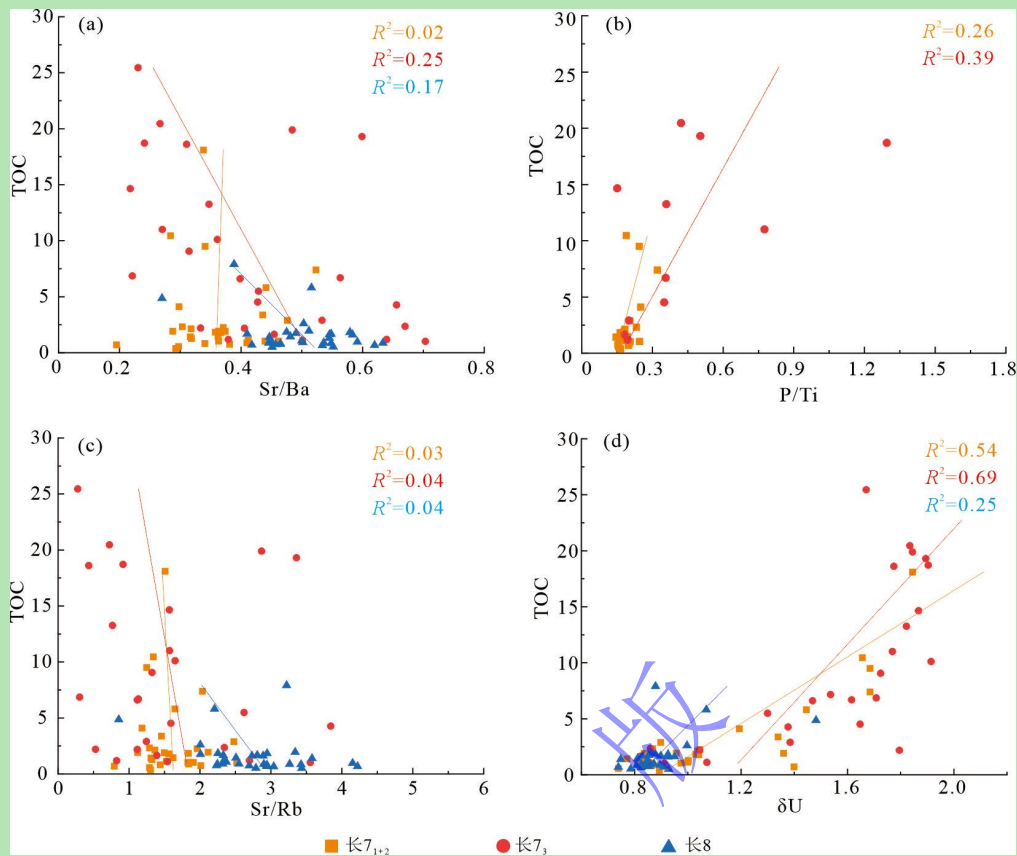


图9 鄂尔多斯盆地长7段—长8段样品 TOC 与各环境指标的相关性图

(a) 古盐度指标 Sr/Ba 与 TOC 相关性图；(b) 古生产力指标 P/Ti 与 TOC 相关性图；(c) 古气候指标 Sr/Rb 与 TOC 相关性图；(d) 氧化还原指标 δU 与 TOC 相关性图。

Fig.9 Correlation between TOC and environmental indicators in Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin

长8段沉积于CPE事件之前，古气候相对干热，湖盆水位较低，以三角洲前缘和浅湖相为主(Zhang *et al.*, 2021b)。蒸发作用强导致湖泊水体盐度较高，盐度的升高不利于湖泊生物的生存(Zhang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024)，这与低的 $\Sigma C_{21}/\Sigma C_{22+}$ 及 $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷交会图指示陆源输入物质一致。降雨量减少导致湖平面较低，水体溶解氧含量增加，呈现氧化环境，陆源物质输入较多但保存力差，导致总有机碳含量较低，TOC平均值为1.70%，沉积岩性以砂岩为主(图10a)。

长7₃段沉积期间，CPE事件发生导致温暖湿润的气候形成，该气候背景下降水增多，同时构造运动导致湖盆加深，湖盆水位上升，处于湖盆扩张的鼎盛阶段。暖湿气候下促进植被生长，起到了“生物坝”作用，导致陆源物质输入减少(刘翰林等，2023；郑瑞辉，2023)。此外，火山喷发形成的火山灰为湖泊提供了丰富的营养元素(Lu *et al.*, 2021)，导致藻类等浮游生物繁盛，高生产力为有机质富集提供了充足的物质来源。浮游生物的光合作用消耗了湖泊中的大量氧气，水体逐渐呈现淡水还原环境，强还原环境加剧了水体分层，促进了藻

类勃发,加强了有机碳的保存。此外,相对较低的沉积速率避免了有机质的稀释,提高了有机质丰度。因此,高的古生产力和有利的保存条件使该阶段厚层富含有机质($\text{TOC}=8.53\%$)油页岩沉积在湖泊底部(图 10b)。

长 7_{1+2} 段沉积期间,CPE 事件结束,该时期湖盆处于由扩张鼎盛向萎缩过渡的关键阶段,其有机质富集模式受半湿润一半干旱气候与微咸水贫氧环境的共同制约。在气候干湿交替背景下,降水驱动地表径流携带陆源高等植物碎屑及黏土矿物向湖盆输入,陆源碎屑输入增多,沉积速率加快,水体含氧量增加对有机质起到一定稀释作用,有机质丰度降低,导致藻类等浮游生物减少。此时湖盆水体逐渐咸化,呈现贫氧环境,有机质保存效率降低。因此高沉积速率和中等保存模式造成总有机碳含量降低,TOC 平均值为 3.10% ,沉积岩性泥质粉砂岩为主(图 10c)。

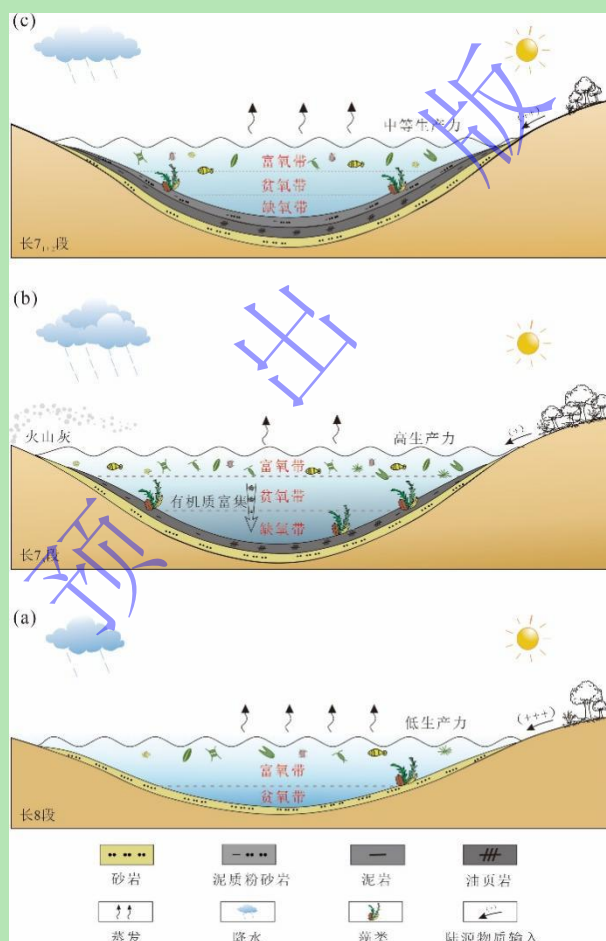


图 10 CPE 事件影响下的鄂尔多斯盆地长 7 段—长 8 段有机质富集模式图

Fig.10 Organic matter enrichment patterns in the Chang 7 to Chang 8 Members of the Ordos Basin under the influence of CPE events

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地延长组 8 段与 7 段界限即为中一晚三叠世的分界线, 该时期经历了显著的沉积相突变, 并伴随着明显的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 负偏, 这一现象与全球其他地区记录的卡尼期湿润幕事件相吻合, 具有较好的对比性。

(2) 通过对生物标志化合物、主微量元素及黏土矿物分析, 重建了研究区延长组 7 段至 8 段古环境。受 CPE 事件影响, 在湖泊的不同阶段, 生物群落结构和水体沉积环境都发生了明显变化, 导致了不同古气候条件下有机质富集的差异。

(3) 建立了鄂尔多斯盆地延长组在 CPE 事件影响下有机质聚集模式。长 8 段属于较高沉积速率—低保存模式; 长 7₃段受到古生产力和氧化还原条件的影响, 属于高生产—高保存模式。长 7₁₊₂段属于高沉积速率—中等保存模式。

参考文献 (References)

- 包建平, 朱翠山, 杨茜, 等. 2024. 原油中 C₁₉₋₄₉ 长链三环萜烷系列及其地球化学意义: 以柴达木盆地西部英西地区原油为例[J]. 沉积学报, 42 (5): 1765-1783. [Bao Jianping, Zhu Cuishan, Yang Qian, et al. 2024. C₁₉₋₄₉ Extended tricyclic terpanes and their geochemical significance in crude oils: A case of crude oils from the Yingxi area in the western Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(5): 1765-1783.]
- 傅家谟, 盛国英, 许家友, 等. 1991. 应用生物标志化合物参数判识古沉积环境[J]. 地球化学, 20(1): 1-12. [Fu Jiamo, Sheng Guoying, Xu Jiayou, et al. 1991. Application of biomarker compounds in assessment of paleoenvironments of Chinese terrestrial sediments[J]. Geochimica, 20(1): 1-12.]
- 李红磊, 张敏, 姜连, 等. 2016. 利用芳烃参数研究煤系烃源岩中重排藿烷成因[J]. 沉积学报, 34 (1): 191-199. [Li Honglei, Zhang Min, Jiang Lian, et al. 2016. Application of aromatics on genesis of rearranged hopanes in coal-bearing source rocks[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(1): 191-199.]
- 李建国, 韦一, 杨兵, 等. 2025. 卡尼期雨幕事件在鄂尔多斯盆地南部地区的响应[J]. 地质学报, 99 (2): 365-381. [Li Jianguo, Wei Yi, Yang Bing, et al. 2025. Response of Carnian pluvialeventin southern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 99(2): 365-381.]
- 李守军. 1999. 正烷烃、姥鲨烷与植烷对沉积环境的指示意义: 以山东济阳坳陷下第三系为例[J]. 石油大学学报 (自然科学版), 23 (5): 14-16, 23. [Li Shoujun. 1999. Sedimentary environmental significance of normal alkane and the ratio of pristane to phytane[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 23(5): 14-16, 23.]
- 李相博, 刘化清, 黄军平, 等. 2023a. 干湿气候交替与内陆湖盆河流扇砂体的形成与分布: 以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 地质学报, 97 (3): 822-838. [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Huang Junping, et al. 2023a. Alternation of arid-humid climate, and Formation and distribution of fluvial fan sand in the central area of inland lake Basin: A case study of the Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 97(3): 822-838.]
- 李相博, 朱如凯, 惠潇, 等. 2023b. 晚三叠世卡尼期梅雨事件 (CPE) 在陆相盆地中的沉积学响应: 以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 沉积学报, 41 (2): 511-526. [Li Xiangbo, Zhu Rukai, Hui Xiao, et al. 2023b. Sedimentological response of a Lacustrine Basin to the Late Triassic Carnian Pluvial Episode (CPE): Case study from the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(2): 511-526.]
- 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 2022. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段 3 亚段异常高有机质沉积富集因素[J]. 石油学报, 43 (11): 1520-1541. [Liu Hanlin, Zou Caineng, Qiu Zhen, et al. 2022. Sedimentary enrichment factors of extraordinarily high organic matter in the sub-member 3 of member 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 43(11): 1520-1541.]
- 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 2023. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制: 以鄂尔多斯盆地长 7 段为例[J]. 沉积学报, 41 (6): 1810-1829. [Liu Hanlin, Zou Caineng, Qiu Zhen, et al. 2023. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment

- mechanism of lacustrine black shales: A case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1810-1829.]
- 孟庆涛, 张训, 杨亮, 等. 2024. 陆相拗陷湖盆细粒沉积有机质富集机制研究: 以松辽盆地长岭凹陷青山口组为例[J]. *古地理学报*, 26(2): 401-415. [Meng Qingtao, Zhang Xun, Yang Liang, et al. 2024. Mechanism study of organic matter enrichment in fine-grained sediments in continental Depression lacustrine Basin: An example from the Qingshankou Formation in Changling Sag, Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(2): 401-415.]
- 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等. 2021. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 42(4): 931-948. [Qiu Zhen, Wei Hengye, Liu Hanlin, et al. 2021. Accumulation of sediments with extraordinary high organic matter content: Insight gained through geochemical characterization of indicative elements[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 931-948.]
- 施辉, 李宗星, 彭博, 等. 2022. 柴东欧南凹陷上石炭统克鲁克组构造背景、物质来源及沉积环境: 来自细粒沉积岩元素地球化学的证据[J]. *天然气地球科学*, 33(10): 1554-1570. [Shi Hui, Li Zongxing, Peng Bo, et al. 2022. The tectonic setting, material source and paleoenvironment of the Upper Carboniferous Keluke Formation in the Ounan Depression of the eastern Qaidam Basin: Evidence from element geochemistry of fine-grained sedimentary rocks[J]. *Natural Gas Geoscience*, 33(10): 1554-1570.]
- 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 粘土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 9(2): 337-344. [Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. 2002. Environment significance of clay minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337-344.]
- 童金南, 楚道亮, 梁蕾, 等. 2019. 中国三叠纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(1): 194-226. [Tong Jinnan, Chu Daoliang, Liang Lei, et al. 2019. Triassic integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 49(1): 194-226.]
- 王炳凯, 冯乔, 田方正, 等. 2017. 新疆准噶尔盆地南缘二叠系芦草沟组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. *地质通报*, 36(2/3): 304-313. [Wang Bingkai, Feng Qiao, Tian Fangzheng, et al. 2017. The characteristics and significance of biomarker compounds in the Permian Lucaogou Formation hydrocarbon source rock on the southern margin of the Junggar Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(2/3): 304-313.]
- 王苏民, 张振克. 1999. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. *科学通报*, 44(6): 579-587. [Wang Sumin, Zhang Zhenke. 1999. New progress of lake sediments and environmental changes research in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(6): 579-587.]
- 吴小奇, 周小进, 陈迎宾, 等. 2022. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩分子地球化学特征[J]. *石油实验地质*, 44(5): 854-865. [Wu Xiaoqi, Zhou Xiaojin, Chen Yingbin, et al. 2022. Molecular characteristics of source rocks in Upper Triassic Xujiahe Formation, western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(5): 854-865.]
- 谢小敏, 李利, 袁秋云, 等. 2021. 应用TIMA分析技术研究Alum页岩有机质和黄铁矿粒度分布及沉积环境特征[J]. *岩矿测试*, 40(1): 50-60. [Xie Xiaomin, Li Li, Yuan Qiuyun, et al. 2021. Grain size distribution of organic matter and pyrite in Alum shales characterized by TIMA and its paleo-environmental significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(1): 50-60.]
- 徐明慧, 王峰, 田景春, 等. 2023. 湖相富有机质泥页岩岩相划分及沉积环境: 以鄂尔多斯盆地长7₃亚段为例[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.076>. [Xu Minghui, Wang Feng, Tian Jingchun, et al. 2023. Classification of lacustrine organic-rich mud shale petrography and the depositional environment: An example from the Chang 7₃ sub-member in the Ordos Basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.076>.]
- 曾建理, 张廷山, 杨巍, 等. 2022. 卡尼期湿润幕: 气候-环境变化与海洋生态效应研究新进展[J]. *地质学报*, 96(3): 729-743. [Zeng Jianli, Zhang Tingshan, Yang Wei, et al. 2022. Carnian Pluvial Episode: Advances in climate-environment change and marine ecological effects[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(3): 729-743.]
- 张参, 阳宏, 王飞龙, 等. 2020. 渤中凹陷南洼东营组烃源岩有机地球化学特征[J]. *海洋地质前沿*, 36(11): 35-44. [Zhang Can, Yang Hong, Wang Feilong, et al. 2020. Organic geochemistry of the source rocks in the Dongying Formation of the South Bozhong Subsalt[J]. *Marine Geology Frontiers*, 36(11): 35-44.]
- 张辉, 彭平安, 张文正, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地延长组长7段凝灰岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 30(2): 565-575. [Zhang Hui, Peng Ping'an, Zhang Wenzheng, et al. 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characterization and their geological significance of Chang 7 tuff of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 565-575.]

- 张慧芳, 吴欣松, 王斌, 等. 2016. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展[J]. 沉积学报, 34 (3): 463-477. [Zhang Huifang, Wu Xinsong, Wang Bin, et al. 2016. Research progress of the enrichment mechanism of sedimentary organics in Lacustrine Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(3): 463-477.]
- 张妍, 吴欣松, 康积伦, 等. 2024. 准东吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩有机质富集机制[J]. 天然气地球科学, 35 (9): 1574-1589. [Zhang Yan, Wu Xinsong, Kang Jilun, et al. 2024. Mechanism of organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation, Ji'nan Sag, eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 35(9): 1574-1589.]
- 郑瑞辉. 2023. 鄂尔多斯盆地长 7 油层组页岩油形成条件与富集模式[D]. 北京: 中国石油大学(北京). [Zheng Ruihui. 2023. Formation conditions and enrichment models of shale oil in the Chang-7 oil layer of Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing).]
- 周锡强, 陈代钊, 刘牧, 等. 2017. 中国沉积学发展战略: 沉积地球化学研究现状与展望[J]. 沉积学报, 35 (6): 1293-1316. [Zhou Xiqiang, Chen Daizhao, Liu Mu, et al. 2017. The future of sedimentology in China: A review and perspective of sedimentary geochemistry[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35(6): 1293-1316.]
- Algeo T J, Maynard J B. 2004. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems[J]. Chemical Geology, 206(3/4): 289-318.
- Ando A, Kakegawa T, Takashima R, et al. 2003. Stratigraphic carbon isotope fluctuations of detrital woody materials during the Aptian Stage in Hokkaido, Japan: Comprehensive $\delta^{13}\text{C}$ data from four sections of the Ashibetsu area[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 21(8): 835-847.
- Baranyi V, Miller C S, Ruffell A, et al. 2019. A continental record of the Carnian Pluvial Episode (CPE) from the Mercia Mudstone Group (UK): Palynology and climatic implications[J]. Journal of the Geological Society, 176(1): 149-166.
- Bray E E, Evans E D. 1961. Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 22(1): 2-15.
- Cao J J, Gang W Z, Yang S R. 2023. Pyritization and preservation model of chrysophyte cyst fossils in shales during the Triassic Carnian Pluvial Episode, Ordos Basin, China: Evidence from cyclostratigraphy, radiometric dating and geochemical analyses[J]. Minerals, 13(8): 991.
- Celia, Martín-Puertas, Blas, et al. 2011. Geochemical processes in a Mediterranean Lake: A high-resolution study of the last 4,000 years in Zoñar Lake, southern Spain[J]. Journal of Paleolimnology, 46(3): 405-421.
- Dal Corso J, Gianolla P, Newton R J, et al. 2015. Carbon isotope records reveal synchronicity between carbon cycle perturbation and the "Carnian Pluvial Event" in the Tethys realm (Late Triassic)[J]. Global and Planetary Change, 127: 79-90.
- Dal Corso J, Gianolla P, Rigo M, et al. 2018. Multiple negative carbon-isotope excursions during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic)[J]. Earth-Science Reviews, 185: 732-750.
- Dal Corso J, Mills B J W, Chu D L, et al. 2022. Background Earth system state amplified Carnian (Late Triassic) environmental changes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 578: 117321.
- Didyk B M, Simoneit B R T, Brassell S C, et al. 1978. Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation[J]. Nature, 272: 216-222.
- Fu J H, Li S X, Xu L M, et al. 2018. 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, 45(6): 998-1008.
- Gelpi E, Schneider H, Mann J, et al. 1970. Hydrocarbons of geochemical significance in microscopic algae[J]. Phytochemistry, 9(3): 603-612.
- Henrichs S M, Reeburgh W S. 1987. Anaerobic mineralization of marine sediment organic matter: Rates and the role of anaerobic processes in the oceanic carbon economy[J]. Geomicrobiology Journal, 5(3/4): 191-237.
- Hornung T, Brandner R. 2005. Biochronostratigraphy of the Reingraben Turnover (Hallstatt Facies Belt): Local black shale events controlled by regional tectonics, climatic change and plate tectonics[J]. Facies, 51(1/2/3/4): 460-479.
- Hornung T, Krystyn L, Brandner R. 2007. A Tethys-wide mid-Carnian (Upper Triassic) carbonate productivity crisis: Evidence for the Alpine Reingraben Event from Spiti (Indian Himalaya)?[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 30(2): 285-302.

- Hou L H, Pang Z L, Luo X, et al. 2023. Sedimentary features of the gravity flow influenced shale deposit: A case study of Chang 7 member in the Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 153: 106277.
- Jiang L, George S C. 2018. Biomarker signatures of Upper Cretaceous Latrobe Group hydrocarbon source rocks, Gippsland Basin, Australia: Distribution and palaeoenvironment significance of aliphatic hydrocarbons[J]. *International Journal of Coal Geology*, 196: 29-42.
- Jin X, Gianolla P, Shi Z Q, et al. 2020. Synchronized changes in shallow water carbonate production during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic) throughout Tethys[J]. *Global and Planetary Change*, 184: 103035.
- Kolaczowska E, Slougui N E, Watt D S, et al. 1990. Thermodynamic stability of various alkylated, dealkylated and rearranged 17 α - and 17 β -hopane isomers using molecular mechanics calculations[J]. *Organic Geochemistry*, 16(4/5/6): 1033-1038.
- Kozur H W, Bachmann G H. 2010. The Middle Carnian Wet Intermezzo of the Stuttgart Formation (Schilfsandstein), Germanic Basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 290(1/2/3/4): 107-119.
- Li L Q, Wang Y D, Kürschner W M, et al. 2020. Palaeovegetation and palaeoclimate changes across the Triassic – Jurassic transition in the Sichuan Basin, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 556: 109891.
- Li Q, Ruhl M, Wang Y D, et al. 2022. Response of Carnian Pluvial Episode evidenced by organic carbon isotopic excursions from western Hubei, South China[J]. *Palaeoworld*, 31(2): 324-333.
- Lin M R, Xi K L, Cao Y C, et al. 2024. Palaeoenvironmental changes in the Late Triassic lacustrine facies of the Ordos Basin of Northwest China were driven by multistage volcanic activity: Implications for the understanding the Carnian Pluvial Event[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 637: 112012.
- Liu G F, Liu R, Wang N, et al. 2024. Response to palaeoclimate by Early Cretaceous terrestrial organic-rich shales in the Yin'e Basin: Evidence from sporopollen, n-alkanes and their compound carbon isotopes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 637: 112031.
- Lu J, Zhang P X, Dal Corso J, et al. 2021. Volcanically driven lacustrine ecosystem changes during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(40): e2109895118.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169-200.
- Miller C S, Peterse F, Da Silva A C, et al. 2017. Astronomical age constraints and extinction mechanisms of the Late Triassic Carnian crisis[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 2557.
- Mueller S, Hounslow M W, Kürschner W M. 2016. Integrated stratigraphy and palaeoclimate history of the Carnian Pluvial Event in the Boreal realm; new data from the Upper Triassic Kapp Toscana Group in central Spitsbergen (Norway)[J]. *Journal of the Geological Society*, 173(1): 186-202.
- Pecorari M, Caggiati M, Dal Corso J, et al. 2023. Weathering and sea level control on siliciclastic deposition during the Carnian Pluvial Episode (southern Alps, Italy)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 617: 111495.
- Peters K E, Moldowan J M. 1993. *The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*[M]. London: Prentice Hall.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2005. *The biomarker guide, volume 1: Biomarkers and isotopes in the environment and human history. Volume 2: Biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Powell T G, McKirdy D M. 1973. Relationship between ratio of pristane to phytane, crude oil composition and geological environment in Australia[J]. *Nature Physical Science*, 243(124): 37-39.
- Rahman N U, Xian B Z, Fang L H, et al. 2024. Volcanically driven terrestrial environmental perturbations during the Carnian Pluvial Episode in the eastern Tethys[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 98(3): 753-770.
- Schlager V W, Schöllnberger W. 1973. Das Prinzip stratigraphischer Wenden in der Schichtfolge der Nördlichen Kalkalpen[J]. *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, 66-67: 165-193.
- Simms M J, Ruffell A H. 1989. Synchronicity of climatic change and extinctions in the Late Triassic[J]. *Geology*, 17(3): 265-268.

- Sun Y D, Wignall P B, Joachimski M M, et al. 2016. Climate warming, euxinia and carbon isotope perturbations during the Carnian (Triassic) Crisis in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 444: 88-100.
- Sun Y W, Li X, Liu Q Y, et al. 2020. In search of the inland Carnian Pluvial Event: Middle-Upper Triassic transition profile and U-Pb isotopic dating in the Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. *Geological Journal*, 55(7): 4905-4919.
- 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.
- Trotter J A, Williams I S, Nicora A, et al. 2015. Long-term cycles of Triassic climate change: A new $\delta^{18}\text{O}$ record from conodont apatite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 165-174.
- Xu J J, Liu Z J, Bechtel A, et al. 2015. Basin evolution and oil shale deposition during Upper Cretaceous in the Songliao Basin (NE China): Implications from sequence stratigraphy and geochemistry[J]. *International Journal of Coal Geology*, 149: 9-23.
- Yang H, Niu X B, Xu L M, et al. 2016. Exploration potential of shale oil in Chang7 member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4): 560-569.
- Zhang B, Mao Z G, Zhang Z Y, et al. 2021a. Black shale Formation environment and its control on shale oil enrichment in Triassic Chang 7 member, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1304-1314.
- Zhang K, Liu R, Liu Z J, et al. 2021b. Geochemical characteristics and geological significance of humid climate events in the Middle-Late Triassic (Ladinian-Carnian) of the Ordos Basin, central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 131: 105179.
- Zhang K, Liu R, Liu Z J. 2021c. Sedimentary sequence evolution and organic matter accumulation characteristics of the Chang 8–Chang 7 members in the Upper Triassic Yanchang Formation, southwest Ordos Basin, central China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 107751.
- Zhang K, Liu R, Bai E, et al. 2023. Biome responses to a hydroclimatic crisis in an Early Cretaceous (Barremian-Aptian) subtropical inland lake ecosystem, Northwest China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 622: 111596.
- Zhao H, Grasby S E, Wang X D et al. 2022. Mercury enrichments during the Carnian Pluvial Event (Late Triassic) in South China[J]. *GSA Bulletin*, 134(9/10): 2709-2720.

Paleoenvironment Reconstruction and Organic Matter Enrichment Mechanisms of the Middle to Upper Triassic Yanchang Formation at the Southern Edge of the Ordos Basin

NING Ting^{1,2}, LIU Rong^{1,2,✉}, WANG Xu^{1,2}, HE TianXin^{1,2}, LIU Qiang³¹. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Key Laboratory of Oil Shale and Coexistent Energy Minerals of Jilin Province, Changchun 130061, China

3. PetroChina Qinghai Oilfield Gas Production Plant No. 2, Dunhuang, Gansu 736200, China

Abstract: [Objective] The Carnian Pluvial Episode (CPE) was a critical climatic perturbation in the Upper Triassic, marked by a pronounced transition to warmer and more humid conditions. These environmental changes substantially facilitated the accumulation of fine-grained sediments and the enrichment of organic matter. This

study aims to elucidate the sedimentary and geochemical responses of the Chang 7 Member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin to the CPE, by examining thick successions of organic-rich black shales. **[Methods]** A multi-proxy analytical approach was employed using core samples from Well ZK903. Biomarker compounds serve as the principal dataset, supported by analyses of organic carbon isotopes, trace element geochemistry, and clay mineral assemblages. These proxies were used to reconstruct the paleoclimatic conditions, redox environment, paleosalinity, and organic matter sources across Members Chang 7 to Chang 8. On this basis, an organic matter enrichment model was developed to interpret the basin's response to the CPE. **[Results]** In the Ordos Basin, the Chang 7₃ submember records a distinct lithological transition from sandstone to black shale, signaling intensified influence from the CPE and progressively increasing organic matter accumulation. Geochemical proxies, including Sr/Cu and Sr/Rb ratios, together with clay mineral data, indicate a climatic shift from arid-hot to warm-humid conditions. Redox-sensitive parameters such as V/Cr and U/Th, along with biomarker ratios (Pr/Ph and Ts/(Ts+Tm)), point to a significant reduction in bottom-water oxygen levels during this interval. Additionally, increased Sr/Ba ratios and a higher gammacerane index (GI) suggest elevated precipitation and lake-level rise, which led to enhanced water column stratification and diminished vertical mixing. These conditions promoted the development of a freshwater, anoxic environment conducive to the preservation of organic matter. Notably, elevated values of $\Sigma C_{21-} / \Sigma C_{22+}$ and C_{27}/C_{29} (aaa)R ratios in the Chang 7₃ interval indicate a shift in the biotic community structure, with a dominance of lower aquatic organisms, particularly algae, as the primary contributors to the organic matter pool. **[Conclusions]** The CPE exerted a profound influence on the paleoclimate and depositional dynamics of the study area. Enhanced thermal and hydrological conditions, in conjunction with lake stratification, promoted the accumulation of fine-grained sediments and created favorable conditions for both primary productivity and the preservation of organic matter. These factors jointly facilitated the formation of organic-rich black shales (oil shales) in the Yanchang Formation, underscoring the role of global climatic events in shaping regional hydrocarbon potential.

Key words: Carnian Pluvial Episode (CPE); paleoenvironment; organic matter enrichment; biomarkers; Yanchang Formation; Ordos Basin