

文章编号: 1000-0747(2021)06-1127-10 DOI: 10.11698/PED.2021.06.05

鄂尔多斯盆地三叠系长7段黑色页岩形成环境 及其对页岩油富集段的控制作用

张斌¹, 毛治国¹, 张忠义², 袁懿琳¹, 陈小亮³, 石雨昕¹, 刘广林², 邵晓州²(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710021;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05050); 中国石油勘探开发研究院科学研究与技术开发项目(2018ycq02)

摘要: 基于鄂尔多斯盆地西北缘钻探的三叠系延长组7段全取心井冯75井的地球化学分析, 结合区域地质特征, 对黑色页岩形成环境及其对页岩油富集的控制作用进行综合研究。自长7₃亚段到长7₁亚段黑色页岩中的有机碳含量从5.70%降至3.55%, 氢指数从345 mg/g降至269 mg/g, 而氧指数从6 mg/g逐渐增高至29 mg/g, 指示长7₂亚段和长7₃亚段沉积时期为严重缺氧环境。生物标志化合物出现规律性变化, 在长7₃亚段深度为2753~2777 m的井段出现明显“拐点”, 指示陆源有机质输入增多。但是, 在“拐点”附近出现有机碳同位素组成负向漂移, 偏差约为2%, 与生物标志化合物结果矛盾。古秦岭地区陆上火山活动所引起的极热和缺氧事件是造成其邻近的鄂尔多斯盆地黑色页岩中有机碳同位素组成负向漂移的主要原因。火山活动导致气温升高, 空气污浊, 引发极端天气, 洪水增多, 陆源有机质输入增多, 同时形成极度缺氧环境, 有利于有机质保存。陆源有机质比水生有机质更有利于形成轻质油, 是页岩油富集的重要“甜点”层段。图11参46

关键词: 黑色页岩; 三叠系; 沉积环境; 火山灰; 缺氧事件; 页岩油; 鄂尔多斯盆地; 长7段

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

Black shale formation environment and its control on shale oil enrichment in Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China

ZHANG Bin¹, MAO Zhiguo¹, ZHANG Zhongyi², YUAN Yilin¹, CHEN Xiaoliang³,
SHI Yuxin¹, LIU Guanglin², SHAO Xiaozhou²(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 2. *Institute of Petroleum Exploration and Development of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021, China*;
3. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*)

Abstract: Based on geochemical analysis results of core samples from the Triassic Chang 7 Member of Well Feng 75 drilled in the northwest margin of Ordos Basin, combined with geological characteristics of this region, the formation environment of the black shale and its control on shale oil enrichment are comprehensively studied. From Chang 7₃ to Chang 7₁ sub-members, the black shales have organic carbon contents decreasing from 5.70% to 3.55%, hydrogen indexes decreasing from 345 mg/g to 269 mg/g, while the oxygen indexes increasing gradually from 6 mg/g to 29 mg/g, indicating that the sedimentary environment during the depositional period of Chang 7₂ and Chang 7₃ sub-members was anoxic. Biomarkers in the black shales change regularly, and have an obvious “inflection point” at the depth of 2753–2777 m in Chang 7₃ sub-member, indicating that the input of terrigenous organic matter increased. However, there is a negative drift about 2% of organic carbon isotopic composition near the “inflection point”, which is in conflict with the results of biomarker compounds. This is because the extreme thermal and anoxic events caused by continental volcanic activity in the ancient Qinling region caused negative drift of carbon isotopic composition of the black shale in the Ordos Basin. The volcanic activity caused rise of temperature, polluted air, extreme weathers, more floods and thus more input of terrigenous organic matter, and gave rise to extremely anoxic environment conducive to the preservation of organic matter. Terrigenous organic matter is more conducive to the formation of light oil than aquatic organic matter, so these sections in Yanchang Formation are major “sweet spots” for shale oil enrichment.

Key words: black shale; Triassic; sedimentary environment; volcanic ash; anoxic event; shale oil; Ordos Basin; Chang 7 Member

引用: 张斌, 毛治国, 张忠义, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段黑色页岩形成环境及其对页岩油富集段的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1127-1136.

ZHANG Bin, MAO Zhiguo, ZHANG Zhongyi, et al. 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, 2021, 48(6): 1127-1136.

0 引言

鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段(后文简称长 7 段)发育优质湖相黑色页岩,其有机质丰度极高,TOC 值一般在 5%以上,最高大于 30%,成熟度适中,生成大量石油,不仅是鄂尔多斯盆地常规石油的主要来源,支撑了鄂尔多斯盆地快速增储上产,而且还含有丰富的页岩油资源,受到国内外学者的高度关注^[1-5]。为了明确这套黑色页岩的发育环境和页岩油有利勘探开发层段,2018 年在中晚三叠世湖盆西北缘钻探了一口延长组 7 段—9 段全取心井(冯 75 井),并对这套黑色页岩的岩石学和有机地球化学特征进行了系统分析。

有机碳同位素组成分析发现,长 7 段深度为 2 753~2 777 m 的井段存在一个明显的同位素组成“负漂移”现象。关于有机碳同位素组成负漂移,前人已经开展大量研究,认为主要有两种成因^[6-11]:一是与有机质来源有关,二是与有机质沉积环境有关。胡修棉等^[6]认为,有机碳同位素组成出现明显漂移被认为与极热事件有关,而极热事件通常都是由火山活动引起的。其中负向漂移指示火山活动发生在陆地,而正向漂移则指示火山活动发生在海洋。如果火山活动发生在陆地,喷发伴随着大量 CO₂、CH₄ 和 H₂S 等气体的释放,形成缺氧环境,大量轻有机碳同位素组成的气体进入大气-海洋系统,从而形成了有机碳同位素组成的负向漂移。当火山活动发生在深海环境,则由于释放的热量和营养物质直接进入海洋系统,海洋初级生产力增强,并形成海底缺氧环境,有机质大规模埋藏,碳无法返回大气-海洋系统,有机碳同位素组成正向漂移。两种不同的机制导致的生态效应不同,从而影响生物的繁盛程度和有机质的保存,进而影响烃源岩的发育和生烃潜力评价^[6-9]。由此可见,有机碳同位素组成漂移可作为火山活动的重要标志,而火山活动对烃源岩中有机质的富集具有重要的促进作用^[10-15]。

前人针对鄂尔多斯盆地三叠系湖相烃源岩的研究,主要从火山活动提供营养物质来论述了其对有机质富集的重要影响^[10-11],但对火山活动引发的气候变化、沉积水体氧化-还原环境、有机质的埋存及页岩油的富集方面的研究相对较少。本研究以冯 75 井为例,通过对长 7 段无机元素、生物标志化合物和碳同位素组成等高密度分析,揭示这套黑色页岩形成的气候条件及水体氧化还原环境、有机质保存和富集机理,确

定生烃母质来源及生油气特性,进而为页岩油富集层段选取提供科学依据。

1 样品与实验

冯 75 井位于鄂尔多斯盆地中晚三叠世湖盆西北缘(见图 1),岩心长度约 350 m。根据鄂尔多斯盆地地层划分方案,将 2 663~2 778 m 井段连续黑色页岩段确定为长 7 段,其中黑色页岩占比超过 95%,含少量灰色泥岩、泥质粉砂岩薄夹层和凝灰岩。通过与邻井对比,将长 7 段进一步划分出长 7₁、长 7₂和长 7₃共 3 个亚段(见图 1c)。

为了研究长 7 段黑色页岩有机质丰度及类型,对该井段进行了高密度采样,115 m 井段共采集样品 304 块,开展岩石热解、有机碳扫描,从而获取黑色页岩基本地球化学信息。在此基础上,遴选 73 块样品进行精细有机地球化学分析,分析项目包括有机碳同位素组成、生物标志化合物等。分析测试均按照相关国家和行业标准进行,在中国石油天然气集团有限公司油气地球化学重点实验室完成。此外,304 块样品的常量元素和微量元素分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

2 结果与讨论

2.1 有机质丰度及类型

冯 75 井长 7 段烃源岩指示有机质丰度的关键参数 TOC 和 S₂、TOC 和 (S₁+S₂) 均呈现很好的正相关关系,即有机碳含量越高,生烃潜力越大(见图 2)。304 块样品 TOC 值为 0.76%~9.42%,平均值为 4.63%,属优质烃源岩。但比湖盆中心长 7 段油页岩要低一些,后者 TOC 值最高可大于 30%^[10-12]。(S₁+S₂) 值为 2.84~39.75 mg/g,平均值为 17.39 mg/g。比较而言,长 7₃ 亚段有机质丰度最优,TOC 值平均为 5.40%;其次是长 7₂ 亚段,TOC 值平均为 4.55%;长 7₁ 亚段略低,TOC 值平均为 3.55%。

在相近成熟度条件下,HI 可反映有机质类型。冯 75 井长 7 段 HI 值总体在 250~400 mg/g,且长 7₃ 亚段烃源岩的 HI 值最大,长 7₂ 亚段的 HI 值次之,长 7₁ 亚段烃源岩的 HI 值最小(见图 3),指示鄂尔多斯盆地长 7 段湖相烃源岩有机质类型以 II₁ 型为主,而与同样形成于淡水湖盆的松辽盆地白垩系青山口组烃源岩有所差异,后者多以 I 型有机质为主^[16]。冯 75 井长 7 段

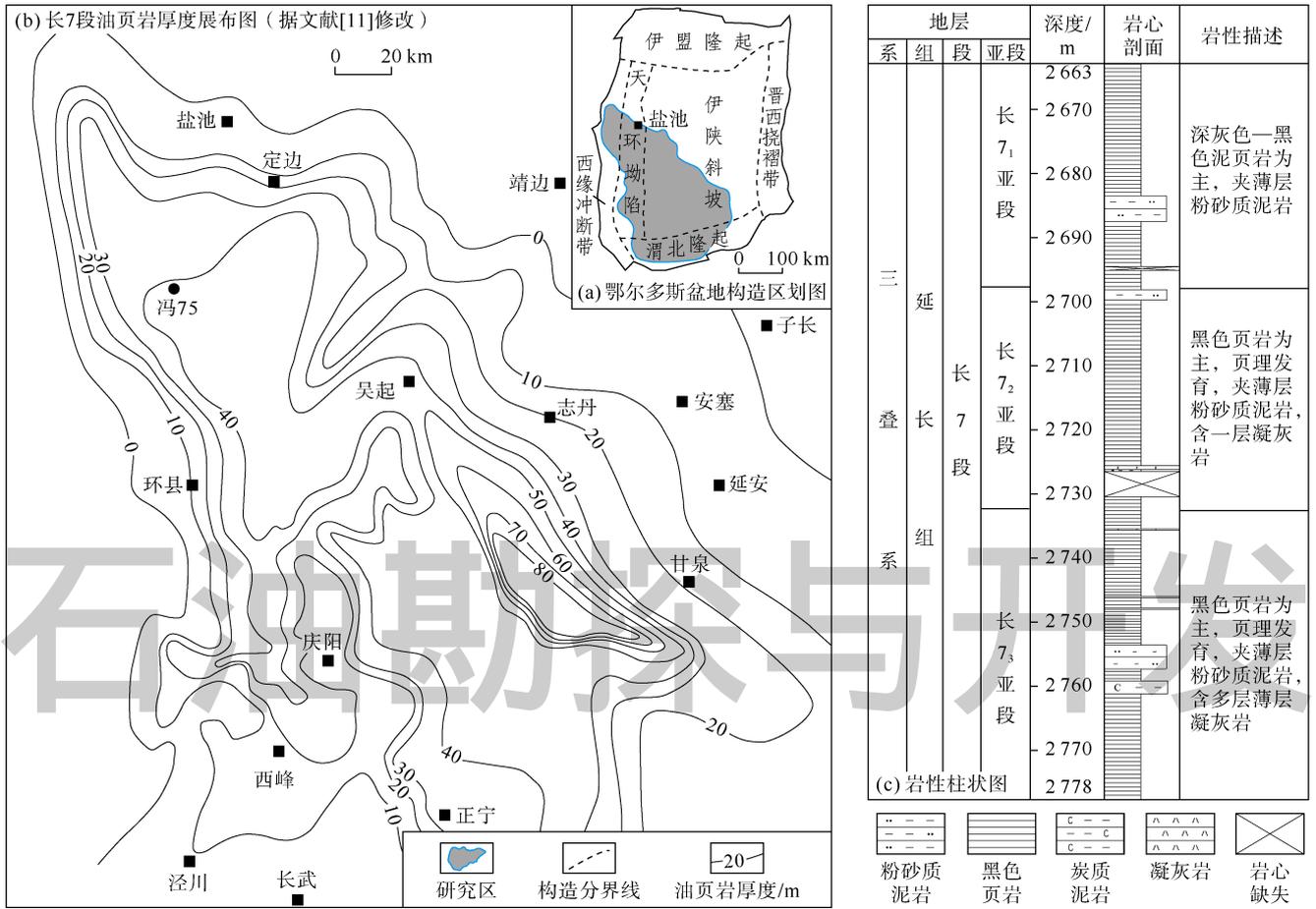


图1 冯75井位置及三叠系延长组长7段岩性柱状图

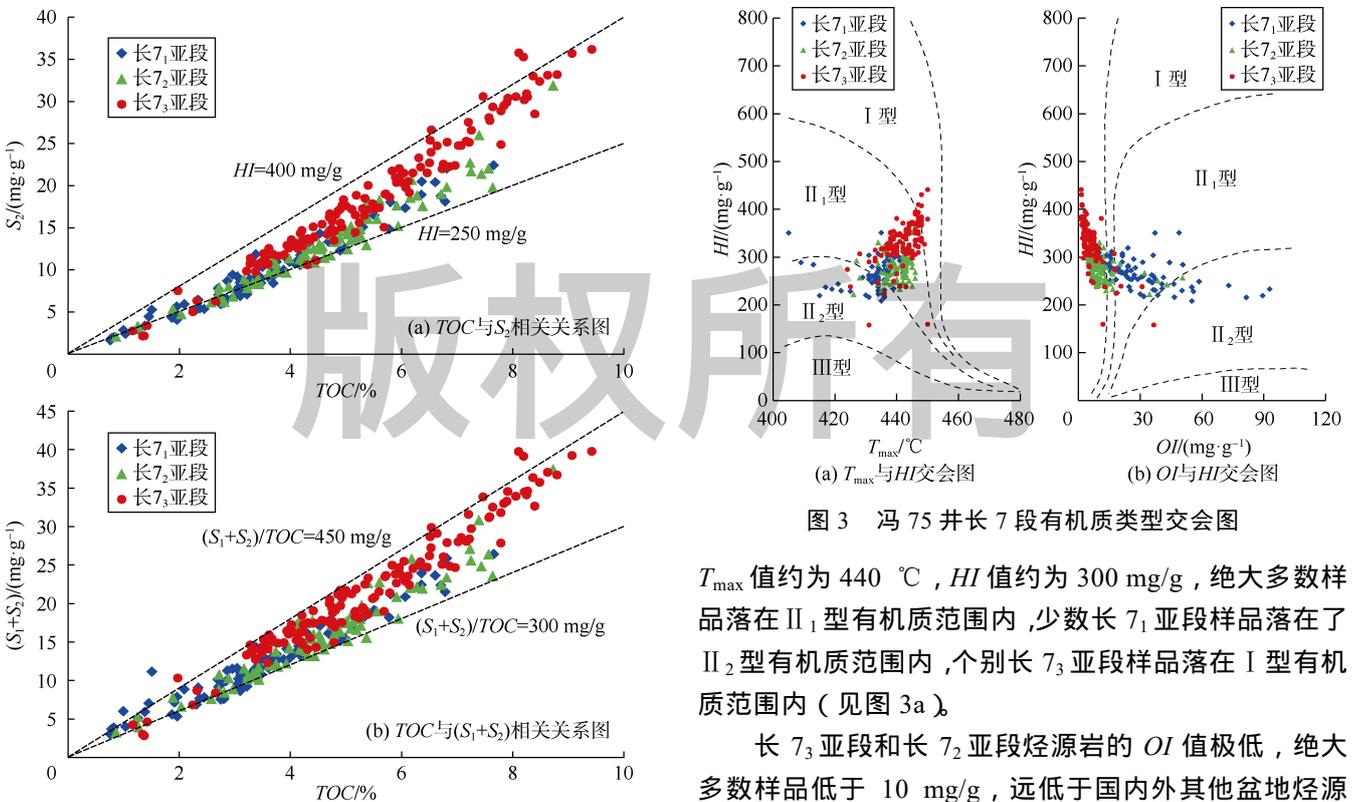


图2 冯75井长7段有机质丰度关系图

图3 冯75井长7段有机质类型交会图

T_{max} 值约为 440 °C, HI 值约为 300 mg/g, 绝大多数样品落在 II₁ 型有机质范围内, 少数长 7₁ 亚段样品落在了 II₂ 型有机质范围内, 个别长 7₃ 亚段样品落在 I 型有机质范围内 (见图 3a)。

长 7₃ 亚段和长 7₂ 亚段烃源岩的 OI 值极低, 绝大多数样品低于 10 mg/g, 远低于国内外其他盆地烃源岩, 甚至低于一般烃源岩交会图版左边界线, 长 7₁ 亚段

的 OI 值则大部分落在 II_1 型有机质范围内 (见图 3b)。过低的 OI 值与当时极度贫氧的沉积环境有关。

纵向上看,长 7 段自下而上有机质丰度逐渐降低,类型逐渐变差,与有机质保存环境有关。代表水体含氧程度的 OI 值自下而上逐渐增高 (见图 4)。长 7_3 亚段 TOC 值和 HI 值最高,平均值分别为 5.70% 和 345 mg/g , 而 OI 值最低,平均值仅为 6 mg/g ; 长 7_2 亚段 TOC 值和 HI 值有所降低, OI 值增高, OI 平均值达到 11 mg/g ; 而长 7_1 亚段 OI 值明显增高,最高可达 93 mg/g , 平均值为 29 mg/g , 对应的 TOC 值和 HI 值则进一步减少至 3.55% 和 269 mg/g , 反映沉积水体中的氧含量大幅增加,有机质保存条件逐渐变差。在长 7_3 亚段中部 2 755~2 758 m 井段出现 TOC 值和 HI 值显著降低、 OI 值升高的层段,主要原因是本段出现了岩性变化,由黑色页岩变为泥质粉砂岩夹层。

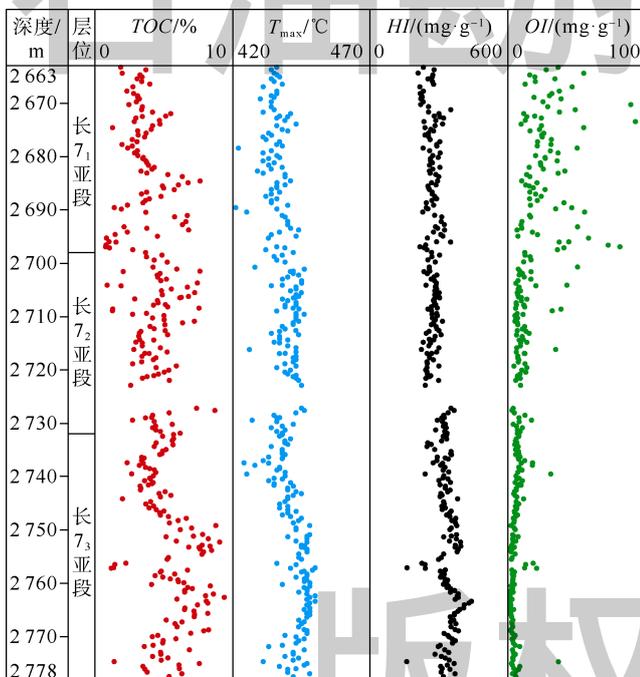


图 4 冯 75 井长 7 段黑色页岩岩石热解参数综合柱状图

无机元素分析结果可以指示有机质沉积时的水体环境。P、Ba 等与生物生长相关的营养元素总体呈现自下而上逐渐增高的趋势,表明营养物质自下而上逐渐增多,长 7_3 亚段局部出现营养元素的富集层段。指示水体氧化-还原环境的 U、Mo 等元素则呈现自下而上逐渐降低的趋势,表明水中含氧量向上逐渐增高;相对而言底部含氧量更低、有机质保存条件更优越 (见图 5)。结合图 4 岩石热解参数综合柱状图可以看出,有机质的保存条件对形成高有机质丰度烃源岩更重要。

元素交会图指示水体的缺氧程度^[17-19]。长 7_3 亚段

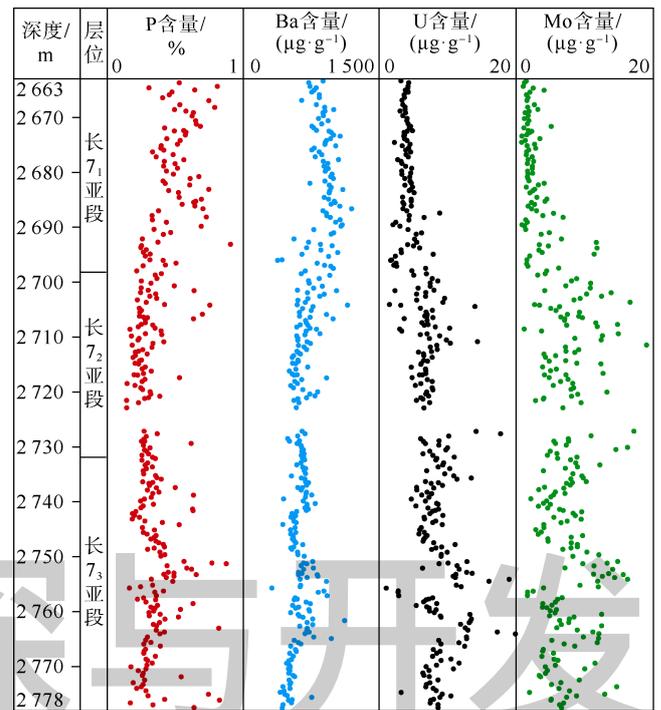


图 5 冯 75 井长 7 段部分无机元素纵向分布柱状图

缺氧程度更强一些,总体处于厌氧—贫氧环境。其次是长 7_2 亚段,多数处于贫氧环境,少数处于厌氧环境。而长 7_1 亚段则整体处于贫氧环境 (见图 6)。反映黑色页岩沉积过程中水体的还原程度自下而上逐渐减弱,与图 4 岩石热解 OI 值反映的结果一致。

2.2 有机质来源与沉积气候-水体环境

生物标志化合物是指示有机质来源与沉积环境的重要手段。总体来看,长 7 段黑色页岩岩石抽提物表现为淡水湖相沉积特征。萜烷方面,三环萜烷 (tricyclic terpane, 简称 TT) 远低于五环三萜烷, $C_{19}TT$ 、 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 和 $C_{23}TT$ 含量依次升高, T_s 大于 T_m 、 $C_{29}Ts$ 和 C_{30} 重排萜烷含量中等,伽马蜡烷含量极低, C_{34} 和 C_{35} 萜烷含量低。甾烷方面,重排甾烷含量高, C_{27} 甾烷含量最高,其次是 C_{29} 甾烷, C_{28} 甾烷最低。以上特征指示有机质主要来自于湖相水生生物,同时含有少量陆源生物的贡献。此外, $\beta\beta$ 构型甾烷含量远高于 $\alpha\alpha$ 构型甾烷、 $20S$ 构型甾烷含量与 $20R$ 构型甾烷含量基本相当 (见图 7),表明有机质成熟度较高,达到生油高峰演化阶段^[20]。

不同层段生物标志化合物存在一定差异。纵向上,生物标志化合物表现出规律性变化趋势。Pr (姥鲛烷) 和 Ph (植烷) 最主要的来源是光合作用中叶绿素 a 以及紫硫细菌中细菌叶绿素 a 和 b 的植基侧链^[21], 还原或缺氧的环境有利于植基侧链的断裂形成植醇,最后形成植烷,而氧化条件则促进植醇优先形成姥鲛烷,

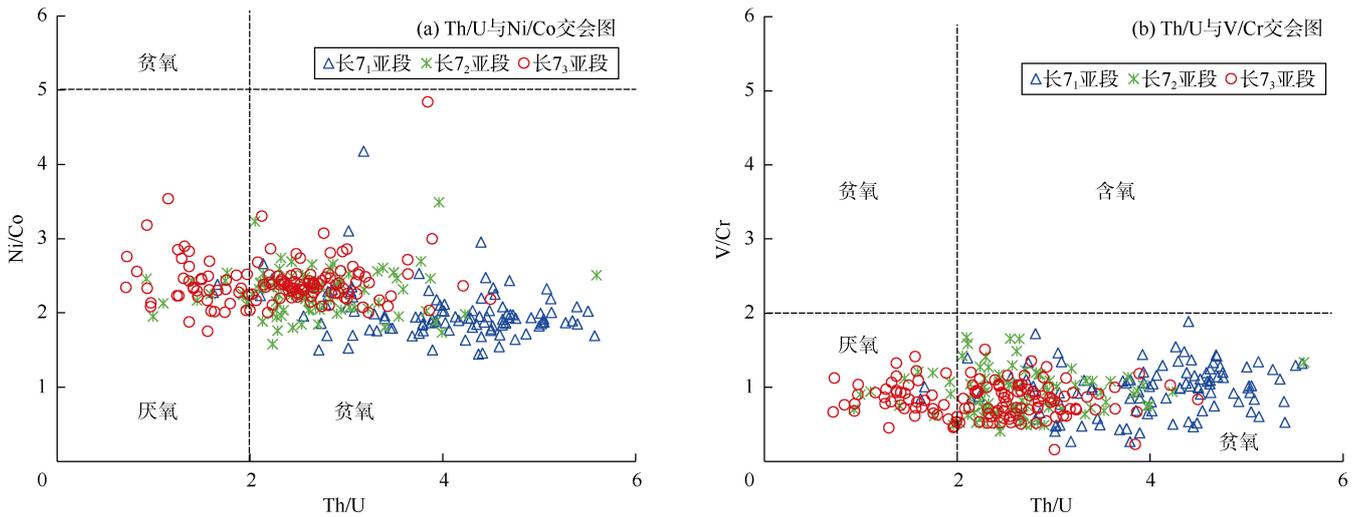


图6 冯75井长7段黑色页岩无机元素交会图(氧化-还原边界据文献[17])

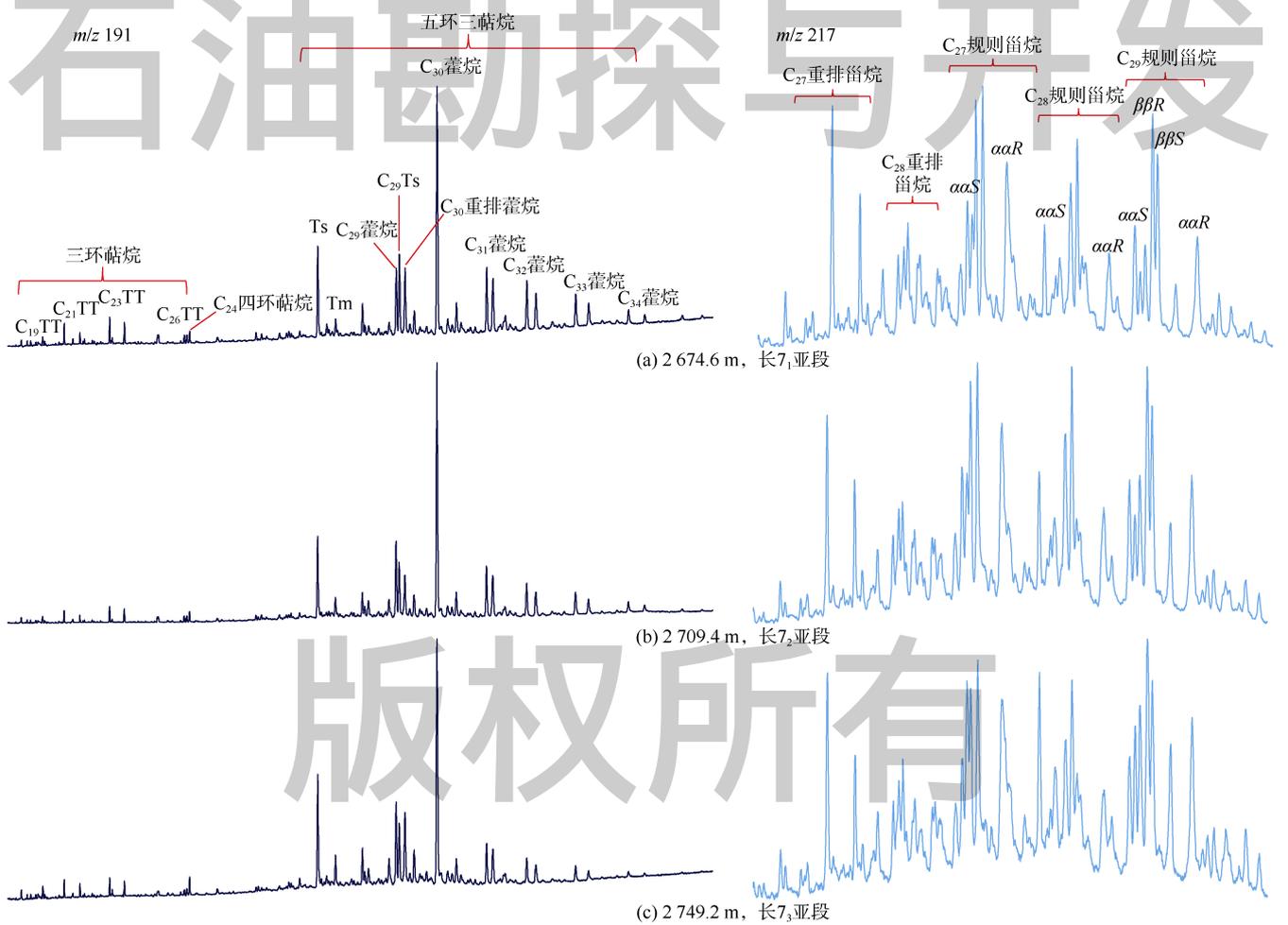


图7 冯75井长7段黑色页岩典型生物标志化合物图谱

因此姥植比是反映有机质形成环境的重要参数。当姥植比大于3时,主要反映有机质形成于氧化或弱氧化的陆相环境;而当姥植比小于1时,则反映有机质形成于典型的还原环境^[20]。长7段黑色页岩姥植比不高,均小于1,指示长7段黑色页岩中的有机质形成于强还

原环境。但是,比较而言,长7₃亚段黑色页岩姥植比明显高于长7₂亚段和长7₁亚段,长7₃亚段则呈现自下而上先增高后降低的趋势(见图8)。姥植比指示的有机质形成环境与前文所述水体严重缺氧的沉积环境并不一致,表明有机质不完全是水生生物形成的,少量

有机质来自于陆源高等植物, 经过了一定的搬运过程在强还原的水体环境中聚集而成。

其他生物标志化合物也指示长₇亚段具有相对较多的陆源有机质输入。三环萜烷通常被用来作为有机质来源的重要指示化合物^[22-23]。前人在库车坳陷陆相烃源岩的研究中发现, 水生生物为主的有机质, 三环萜烷含量相对较低, 且碳数越低, 含量越少; 而陆源高等植物来源的有机质, 则含有较高的三环萜烷, 且易出现碳数越低含量越高的特征^[24-25]。在冯75井长7段的生物标志化合物, 整体表现为C₁₉TT、C₂₀TT、C₂₁TT、C₂₃TT含量依次增高的趋势, 反映有机质主要来自湖相水生生物, 但是C₁₉TT与C₂₃TT的比值自下而上呈现逐渐降低趋势, 指示长₇亚段具有相对偏多的陆源有机质输入(见图8)。

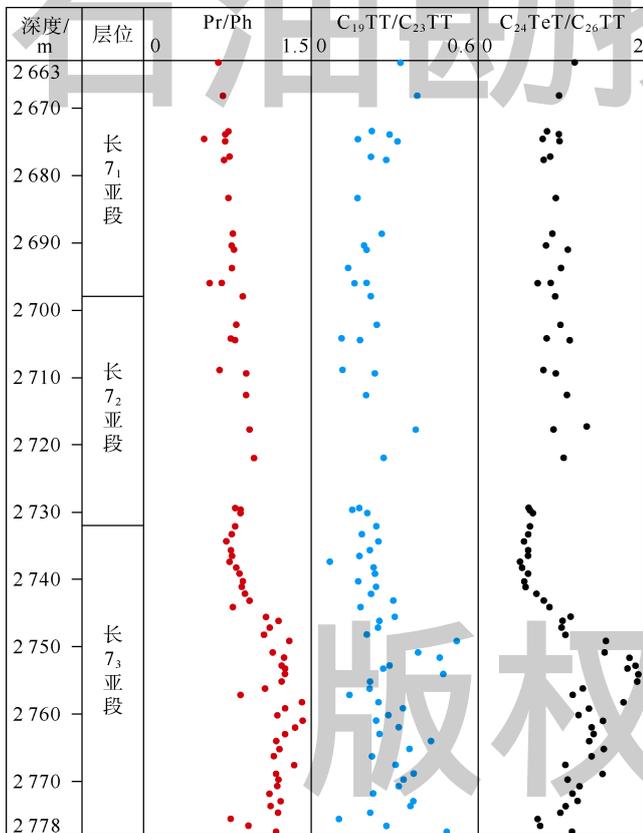


图8 冯75井指示陆源有机质输入的生物标志化合物参数纵向分布柱状图

C₂₄四环萜烷(tetracyclic terpane, 简称C₂₄TeT)通常用于指示碳酸盐岩和蒸发岩的沉积环境, 在澳大利亚陆相原油中也发现丰富的C₂₄TeT^[20, 26]。鄂尔多斯盆地长8段以陆源有机质为主的烃源岩中也存在丰富的C₂₄TeT, C₂₄TeT含量远高于其出峰附近的C₂₆TT, 二者的比值均在2以上, 部分样品超过10。因此, C₂₄TeT

与C₂₆TT的比值可作为陆源有机质输入的指标, 长7段黑色页岩中该比值的分布范围在0.7~1.9, 表明陆源有机质输入总体较少。长7₃亚段呈现先增大后减小的趋势, 显著增高的层段与姥植比、C₁₉TT与C₂₃TT比值增高的层段基本一致(见图8)。

2.3 有机碳同位素组成负漂移及沉积水体环境

受古气候条件等因素影响, 不同时代、不同沉积环境有机碳同位素组成有一定差异。张大江等^[27]对中国陆上大量烃源岩样品有机碳同位素组成分析数据统计发现, 有机碳同位素组成整体呈现随着地层时代由老到新逐渐变重的趋势, 下寒武统一泥盆系海相地层有机碳同位素组成普遍轻于-29‰, 其中震旦系为-31.67‰, 寒武系为-29.30‰, 奥陶系为-28.90‰。而石炭系—二叠系海陆过渡相以及中生界陆相地层有机碳同位素组成平均值约为-24‰。但不同时代有机碳同位素组成分布范围较宽, 尤其是中生界陆相地层, 该值为-30‰~-20‰, 呈现双峰甚至多峰分布形态, 与其沉积环境密切相关。

有机碳同位素组成常被用来指示有机质来源和沉积水体环境^[27-34]。一般来说, 来自水生生物的有机质碳同位素组成偏轻, 而陆源高等植物来源的有机质碳同位素组成偏重, 如煤系烃源岩碳同位素组成明显重于湖相烃源岩。从大量测试数据来看^[28-34], 淡水湖相烃源岩(如松辽盆地白垩系、渤海湾盆地古近系、库车坳陷三叠系等)有机碳同位素组成普遍为-31‰~-29‰; 塔里木盆地和四川盆地海相烃源岩与湖相烃源岩相近, 寒武系烃源岩碳同位素组成要更轻一些, 一般约为-32‰; 咸水湖相烃源岩(如柴达木盆地古近系和江汉盆地古近系)有机碳同位素组成明显偏重, 一般在-26‰~-24‰; 煤系烃源岩有机碳同位素组成一般重于-27‰(如鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系、四川盆地三叠系须家河组、西北地区侏罗系等)。

冯75井长7段有机碳同位素组成分布为-30.6‰~-28.4‰, 平均值为-29.3‰, 表现为典型淡水湖相烃源岩特征。其中, 长7₃亚段存在一个明显的有机碳同位素组成负向漂移趋势, 从井深2777 m的-28.4‰偏移至井深2753 m的-30.6‰, 偏差约为2‰, 随后又逐渐正向偏移, 至2730 m的-29.2‰, 之后总体保持稳定(见图9)。根据前文生物标志化合物研究结果, 长7₃亚段烃源岩有机质中存在相对偏多的陆源有机质输入, 但却表现为更轻的碳同位素组成特征, 二者存在矛盾; 分析认为, 重大地质事件是造成这一矛盾的主要原因。

重大地质事件不仅记录在海相地层中, 陆相湖盆

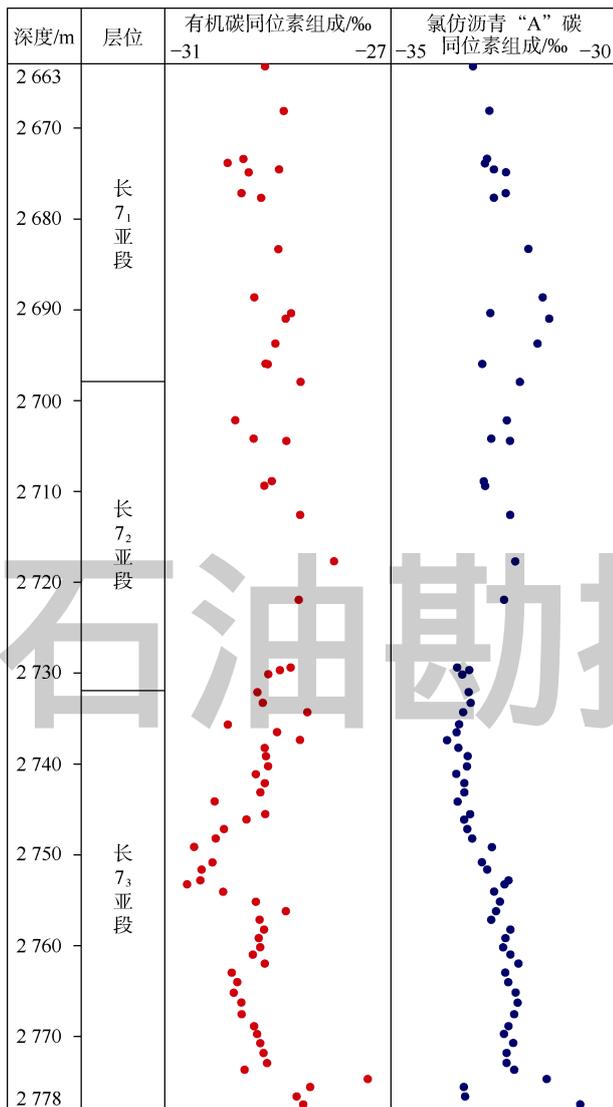


图9 冯75井干酪根有机碳和氯仿沥青“A”碳同位素组成纵向分布柱状图

也有重要记录，有机碳同位素组成偏移就是对重要地质事件的直接响应。Xu等^[35]发现四川盆地侏罗系自流井组大安寨段存在明显的有机碳同位素组成负向漂移，认为是对早侏罗世 Toarcian 大洋缺氧事件的响应，与全球火山活动和碳循环密切相关；Jones等^[36]发现松辽盆地白垩系青山口组烃源岩有机碳同位素组成正向漂移，是对晚白垩世大洋缺氧事件第三幕 OAE3 (Oceanic Anoxic Event 3) 的响应。鄂尔多斯盆地冯75井黑色页岩存在有机碳同位素组成漂移，其形成机理与四川盆地侏罗系和松辽盆地白垩系类似，发生在古秦岭地区的火山活动引起的极热和缺氧地质事件是主要原因^[37-39]。由于火山活动发生在陆地，火山灰在空气中漂浮进入鄂尔多斯盆地，这种陆上的火山活动造成了有机碳同位素组成负向漂移。同位素的负向漂移幅度与火山灰的厚度也是一致的。纵向上，长7段黑

色页岩中存在多套火山灰，主要集中在长7₃亚段，长7₂亚段页岩有少量薄层火山灰，长7₁亚段几乎未见火山灰，表明火山强度自下而上逐渐减弱。

由火山活动引起的极热事件对有机质的沉积和保持具有重要的影响。发生在晚三叠世卡尼期的洪积幕 (Carnian Pluvial Episode, CPE) 事件，就是由于火山活动诱发极热事件，从而产生长时期大规模降雨，地表洪流远高于正常时期^[40-43]。长7段黑色页岩顶、底沉积年龄分别为(241.06±0.12)Ma和(241.558±0.093)Ma^[44]，属于中生代 Ladinian 期 (拉丁期)，早于卡尼期洪积幕，其对地层沉积具有类似的影响。冯75井长7₃亚段细粒沉积中夹杂少量粉砂岩和炭质泥岩，这些都与地表洪流有关。此外，火山活动导致空气中CO₂、H₂S、CH₄等气体含量增多，造成大气浑浊，O₂含量降低，形成严重缺氧环境。这一机制可以合理解释前文所提出的矛盾问题，一方面长7₃亚段沉积时由于极端天气导致相对偏多的陆源有机质输入，另一方面由于保存环境更缺氧，有机质更富氢，使得长7₃亚段有机质OI值更低，而HI值更高。

2.4 黑色页岩形成环境与页岩油富集

除鄂尔多斯盆地长7段外，松辽盆地白垩系青山口组发现多层火山灰，准噶尔盆地和三塘湖盆地二叠系芦苇沟组中存在丰富的沉凝灰岩，这说明优质烃源岩的形成在一定程度上与火山活动密切相关。火山活动对有机质的富集主要体现在以下两个方面：①火山喷发形成大量营养物质，对湖中的水生生物具有“施肥”效应，有利于生物繁盛；②生物的繁盛和快速埋藏形成缺氧环境，加上火山灰的快速掩埋，有利于有机质的保存。

页岩含油性分析表明，明显受到火山活动影响较为强烈的层段烃类含量要低于其他层段，无论是岩石热解参数游离烃S₁、氯仿沥青“A”，还是Jarvie^[45]和Li等^[46]提出的岩石含烃指数(S₂抽提前减去S₂抽提后再加上S₁)，但这并非是含烃量的真实结果，因为这一段轻组分含量高，在分析测试过程中挥发而导致含烃量被低估了(见图10)。

这一点从岩石中烃类组成可以明显看出来。这里选取全油气相色谱图饱和和烃化合物质量比 nC_{21-22}/nC_{28-29} 、 $\sum_{i=0}^2 nC_{15+2i}/\sum_{i=0}^2 nC_{27+2i}$ 、 $\sum_{i=0}^2 nC_{23+2i}/\sum_{i=0}^2 nC_{27+2i}$ 3组参数，分别代表中等相对分子质量与高相对分子质量、低相对分子质量奇数碳与高相对分子质量奇数碳、中相对分子质量奇数碳与高相对分子质量奇数碳正构烷烃质量之比，反映轻质组分或中质组分与重质组分的含量比值。从图11

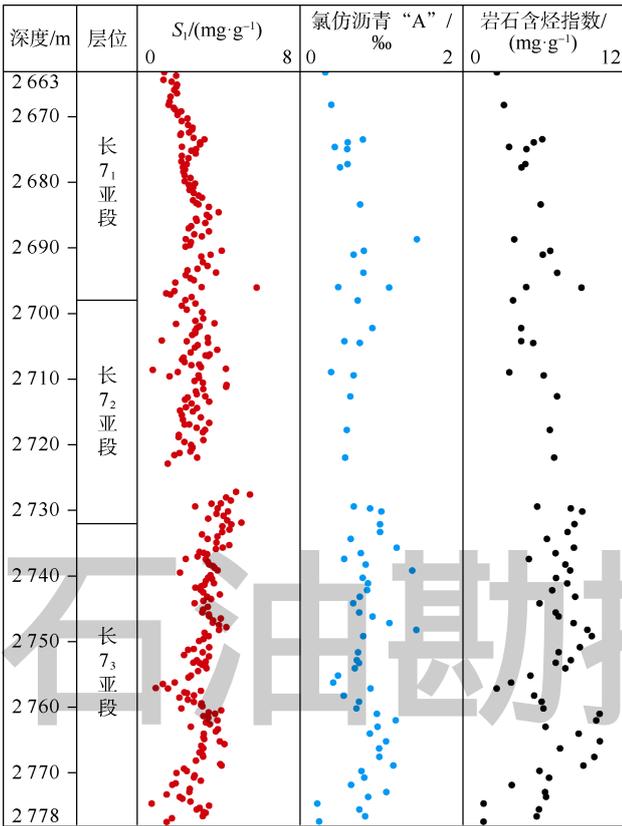


图 10 冯 75 井黑色页岩中烃类含量纵向分布柱状图

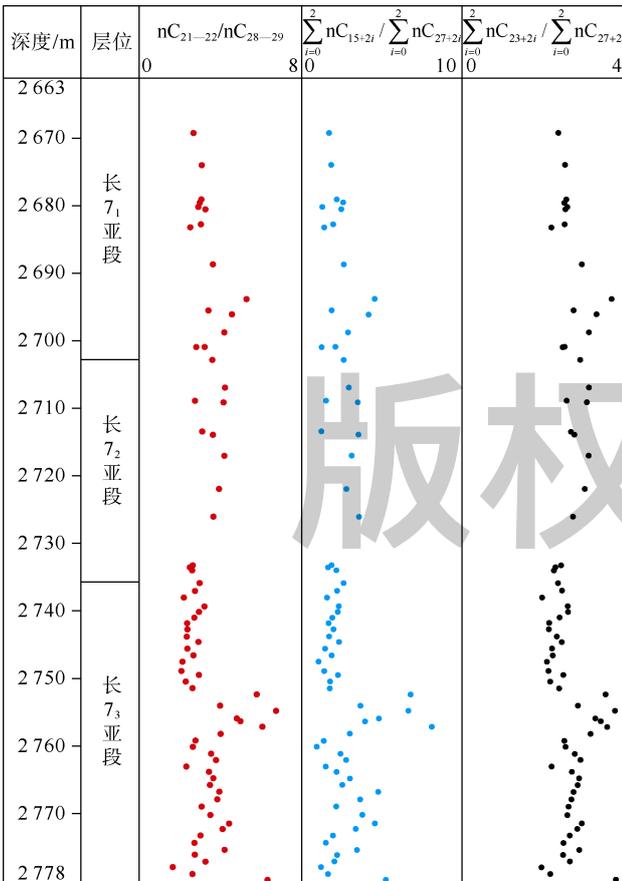


图 11 冯 75 井正构烷烃轻、中、重组分相对含量纵向分布柱状图

来看，这 3 组参数变化趋势几乎完全相同，与有机碳同位素组成漂移趋势具有良好的对应关系，尤其是在有机碳同位素组成最小值附近（2 750~2 754 m 井段），轻质组分和中质组分含量要远高于重质组分。这与陆源有机质的输入较多有关，因为陆源有机质更有利于形成轻质烃类组分。由此可见，受缺氧事件影响，形成的烃源岩中含有更高的轻质组分和中质组分，有利于油气的流动，可成为页岩油的重要“甜点”层段。

此外，火山活动带来的火山灰，以石英和长石为主，脆性强，有利于工程压裂。前人已经报道了大量相关研究成果^[32-33]，在此不再赘述。

3 结论

鄂尔多斯盆地三叠系湖盆西北缘的冯 75 井长 7 段岩性以黑色页岩为主，夹少量泥质粉砂岩和凝灰岩。有机质丰度高，以 II₁ 型有机质为主，处于生油窗。黑色页岩 OI 值极低，远低于其他湖盆烃源岩，与极度的贫氧沉积环境有关。纵向上，OI 值自下而上逐渐增高，反映沉积水体氧含量逐渐增高。

生物标志化合物出现规律性变化，在长 7₃ 亚段深度为 2 753~2 777 m 的井段出现明显“拐点”，指示陆源有机质输入增多。但是，在“拐点”附近却出现了有机碳同位素组成负向漂移，与生物标志化合物结果矛盾，古秦岭地区陆上火山活动诱发的极热和缺氧事件是造成这一现象的主要原因。受极热和缺氧事件影响，形成的烃源岩中含有更高的轻质组分和中质组分，有利于油气的流动，可成为页岩油富集的重要“甜点”层段。

符号注释：

HI——氢指数，mg/g；OI——氧指数，mg/g；S₁——岩石中的游离烃含量，mg/g；S₂——岩石中的热解烃含量，mg/g；T_{max}——岩石热解最高峰温度，℃；TOC——总有机碳，%。

参考文献：

[1] 杨华, 牛小兵, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 590-599.
 YANG Hua, NIU Xiaobing, XU Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang 7 Member, Upper Triassic Yangchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 590-599.

[2] 蒯克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7₃ 亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1244-1255.
 XI Kelai, LI Ke, CAO Yingchang, et al. Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang 7₃ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1244-1255.

- [3] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.
- [4] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870-883.
FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 870-883.
- [5] 张斌, 于聪, 崔景伟, 等. 生烃动力学模拟在页岩油原位转化中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1212-1219.
ZHANG Bin, YU Cong, CUI Jingwei, et al. Kinetic simulation of hydrocarbon generation and its application to in-situ conversion of shale oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1212-1219.
- [6] 胡修棉, 李娟, 韩中, 等. 中生代两类极热事件的环境变化、生态效应与驱动机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(8): 1023-1043.
HU Xiumian, LI Juan, HAN Zhong, et al. Two types of hyperthermal events in the Mesozoic-Cenozoic: Environmental impacts, biotic effects, and driving mechanisms[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2020, 63(8): 1041-1058.
- [7] BRAZIER J M, SUAN G, TACAIL T, et al. Calcium isotope evidence for dramatic increase of continental weathering during the Toarcian oceanic anoxic event (Early Jurassic)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 411: 164-176.
- [8] JOACHIMSKI M M, PANCOST R D, FREEMAN K H, et al. Carbon isotope geochemistry of the Frasnian-Famennian transition[J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2002, 181: 91-109.
- [9] 邓胜徽, 卢远征, 樊茹, 等. 早侏罗世 Toarcian 期大洋缺氧事件及其在陆地生态系统中的响应[J]. 中国地质大学学报, 2012, 37(S2): 23-38.
DENG Shenghui, LU Yuanzheng, FAN Ru, et al. Toarcian (Early Jurassic) oceanic anoxic event and the response in terrestrial ecological system[J]. Earth Science-Journal of China University of Geoscience, 2012, 37(S2): 23-38.
- [10] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64.
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, YANG Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59-64.
- [11] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
YANG Hua, ZHANG Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [12] 韩刚, 张文婧, 黄清华, 等. 松辽盆地晚白垩世青山口组缺氧事件层的地质地球化学特征[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 741-746.
HAN Gang, ZHANG Wenjing, HUANG Qinghua, et al. Geological and geochemical characteristics of anoxic event bed in the Qingshankou Formation of Late Cretaceous in Songliao Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(4): 741-746.
- [13] 王书荣, 宋到福, 何登发. 三塘湖盆地火山灰对沉积有机质的富集效应及凝灰质烃源岩发育模式[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1077-1087.
WANG Shurong, SONG Daofu, HE Dengfa. The enrichment effect of organic materials by volcanic ash in sediments of the Santanghu Basin and evolutionary pattern of tuffaceous source rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1077-1087.
- [14] 蒋宜勤, 柳益群, 杨召, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷凝灰岩型致密油特征与成因[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 741-749.
JIANG Yiqin, LIU Yiqun, YANG Zhao, et al. Characteristics and origin of tuff-type tight oil in Jimsar Depression, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 741-749.
- [15] 李登华, 李建忠, 黄金亮, 等. 火山灰对页岩油气成藏的重要作用及其启示[J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 56-65.
LI Denghua, LI Jianzhong, HUANG Jinliang, et al. An important role of volcanic ash in the formation of shale plays and its inspiration[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 56-65.
- [16] 冯子辉, 霍秋立, 王雪. 松辽盆地松科1井晚白垩世沉积地层有机地球化学研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 181-191.
FENG Zihui, HUO Qiuli, WANG Xue, et al. Geochemical research on the Late Cretaceous strata of Well SK1 in Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(5): 181-191.
- [17] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111: 111-129.
- [18] ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. Applying sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of organic-rich shale deposition in the Sichuan Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 163: 52-71.
- [19] ZENG Shengqiang, WANG Jian, FU Xiugen, et al. Geochemical characteristics, redox conditions, and organic matter accumulation of marine oil shale from the Changliang Mountain area, northern Tibet, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 64: 203-221.
- [20] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: Volume 2: Biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [21] MOLDOWAN J M, DAHL J, MCCAFFREY M A, et al. Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by-products[J]. Energy & Fuels, 1995, 9(1): 155-162.
- [22] NOBEL R A, ALEXANDER R, KAGI R I, et al. Identification of some diterpenoid hydrocarbons in petroleum[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10: 825-829.
- [23] BARNES M A, BARNES W C. Oxic and anoxic diagenesis of diterpenes in lacustrine sediments[C]//BJOROY M. Advances in organic geochemistry. Chichester: John Wiley, 1983: 289-298.
- [24] 包建平, 朱翠山, 张秋茶, 等. 库车坳陷前缘隆起带上原油地球化学特征[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(4): 40-45.
BAO Jianping, ZHU Cuishan, ZHANG Qiucha, et al. Oil geochemical characters in the frontier Uplift of Kuqa Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 40-45.
- [25] ZHANG Shuichang, ZHANG Bin, ZHU Guangyou, et al. Geochemical evidence for coal-derived hydrocarbons and their

- charge history in the Dabei Gas Field, Kuqa Thrust Belt, Tarim Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(7): 1364-1375.
- [26] PHILIP R P, GILBERT T D. Unusual distribution of biological markers in Australian crude oil[J]. *Nature*, 1982, 299(5880): 245-247.
- [27] 张大江, 王大锐, 章聆. 我国不同地质时期沉积有机质中稳定碳同位素组成特征及其意义[J]. *科学通报*, 1994(4): 302-305.
ZHANG Dajiang, WANG Darui, ZHANG Ling. Stable carbon isotopic composition of sedimentary organic matter in different geological periods in China and its significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994(4): 302-305.
- [28] 张林晔, 孔祥星, 张春荣, 等. 济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J]. *地球化学*, 2003, 32(1): 35-42.
ZHANG Linye, KONG Xiangxing, ZHANG Chunrong, et al. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang Depression[J]. *Geochemica*, 2003, 32(1): 35-42.
- [29] 苏爱国, 陈志勇, 梁狄刚, 等. 青藏高原油气形成: 柴达木盆地西部新生界[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
SU Aiguo, CHEN Zhiyong, LIANG Digang, et al. Oil-gas formation in Qinghai-Tibet Plateau-Cenozoic of Western Qaidam, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [30] 张斌, 何媛媛, 陈琰, 等. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩地球化学特征及成藏意义[J]. *石油学报*, 2017, 38(10): 1158-1167.
ZHANG Bin, HE Yuanyuan, CHEN Yan, et al. Geochemical characteristics and oil accumulation significance of the high quality saline lacustrine source rocks in the western Qaidam Basin, NW China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10): 1158-1167.
- [31] 张斌, 胡健, 杨家静, 等. 烃源岩对致密油分布的控制作用: 以四川盆地大安寨为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(1): 45-55.
ZHANG Bin, HU Jian, YANG Jiajing, et al. Controlling effect of source rocks on the occurrence of tight oil: Taking the Da'anzhai reservoir of Sichuan Basin as an example[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 45-55.
- [32] HOU Lianhua, MA Weijiao, LUO Xia, et al. Characteristics and quantitative models for hydrocarbon generation retention-production of shale under ICP conditions: Example from the Chang 7 member in the Ordos Basin[J]. *Fuel*, 2020, 279: 118497.
- [33] HOU Lianhua, MA Weijiao, LUO Xia, et al. Hydrocarbon generation-retention-expulsion mechanism and shale oil producibility of the permian lucaogou shale in the Junggar Basin as simulated by semi-open pyrolysis experiments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 125(1): 104880.
- [34] HOU Lianhua, LUO Xia, HAN Wenxu, et al. Geochemical evaluation of the hydrocarbon potential of shale oil and its correlation with different minerals: A case study of the TYP shale in the Songliao Basin, China[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34: 11998-12009.
- [35] XU Weimu, RUHL M, JENKINS H C. Carbon sequestration in an expanded lake system during the Toarcian oceanic anoxic event[J]. *Nature Geosciences*, 2017, 10(2): 129-134.
- [36] JONES M M, IBARRA D E, GAO Y, et al. Evaluating Late Cretaceous OAEs and the influence of marine incursions on organic carbon burial in an expansive East Asian paleo-lake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 484(8): 41-52.
- [37] 梁庆韶. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 事件沉积特征及其耦合关系[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- LIANG Qingshao. Characteristics of event deposition and coupling relationship in the Chang 7 oil member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [38] 李森, 朱如凯, 崔景伟, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段细粒沉积岩特征与古环境: 以铜川地区瑶页 1 井为例[J]. *沉积学报*, 2020, 38(3): 554-569.
LI Sen, ZHU Rukai, CUI Jingwei, et al. Sedimentary characteristics of fine-grained sedimentary rock and paleo-environment of Chang 7 Member in the Ordos Basin: A case study from Well Yaoye 1 in Tongchuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 554-569.
- [39] 袁伟, 柳广弟, 罗文斌, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 段富有机质页岩中磷灰石类型及其成因[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(8): 1399-1408.
YUAN Wei, LIU Guangdi, LUO Wenbin, et al. Species and formation mechanism of apatites in the 7th member of Yanchang Formation organic-rich shale of Ordos Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(8): 1399-1408.
- [40] 金鑫, 时志强, 王艳艳, 等. 晚三叠世中卡尼期极端气候事件: 研究进展及存在问题[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 105-115.
JIN Xin, SHI Zhiqiang, WANG Yanyan, et al. Mid-Carnian (Late Triassic) extreme climate event: Advances and unsolved problems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 105-115.
- [41] 赵向东, 薛乃华, 王博, 等. 三叠纪卡尼期湿润幕事件研究进展[J]. *地层学杂志*, 2019, 43(3): 306-314.
ZHAO Xiangdong, XUE Naihua, WANG Bo, et al. Carnian (late Triassic) Pluvial Episode: Current status and future challenges[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(3): 306-314.
- [42] CORSO J D, MIETTO P, NEWTON R J, et al. Discovery of a Major negative $\delta^{13}\text{C}$ spike in the Carnian (Late Triassic) linked to the eruption of Wrangellia flood basalts[J]. *Geology*, 2012, 40(1): 79-82.
- [43] SUN Yadong, WIGNALL P B, JOACHIMSKI M M, et al. Climate warming, euxinia and carbon isotope perturbations during the Carnian (Triassic) Crisis in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 444: 88-100.
- [44] ZHU Rukai, CUI Jingwei, DENG Shenghui, et al. High-precision dating and geological significance of Chang 7 Tuff Zircon of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin in Central China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2019, 93(6): 1823-1834.
- [45] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2: Shale oil resource systems[C]//BREYER J A. Shale reservoirs: Giant resources for the 21st century. Tulsa: AAPG, 2012: 89-119.
- [46] LI Maowen, CHEN Zhuoheng, MA Xiaoxiao, et al. A numerical method for calculating total oil yield using a single routine rock-eval program: A case study of the Eocene Shahejie Formation in Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 191: 49-65.

第一作者简介: 张斌 (1978-), 男, 湖北长阳人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事石油地质与油气地球化学研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: zhangbin01@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-03-17 修回日期: 2021-09-23

(编辑 谷江锐)