

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.260



# 茂名盆地油柑窝组油页岩古环境恢复与有机质聚集机制

曹涛涛<sup>1</sup>, 刘虎<sup>2,3</sup>, 肖娟宜<sup>1</sup>, 潘安阳<sup>4</sup>, 邓模<sup>4</sup>

1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201
2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川成都 610091
3. 四川省地质调查研究院, 四川成都 610072
4. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

**摘要:** 查明油页岩的形成背景和高品质油页岩形成机制是开展油页岩原位改造的基础工作。利用有机碳、主微量元素、稀土元素、生物标志物等地球化学方法, 对茂名盆地油柑窝组油页岩的沉积环境进行恢复并探讨了有机质聚集机制。结果表明, 茂名盆地油柑窝组全段油页岩均富有机质, 底部为薄层碳质页岩、砂岩和褐煤层段。Mo 含量、Ba/Al、Ba<sub>bio</sub> 和生物标志物特征表明油柑窝组具有很高的初级生产力, 油柑窝组存在间断性的“藻类勃发”现象; V/(V+Ni)、Ce<sub>anom</sub>、Th/U、草莓体黄铁矿颗粒大小和 Pr/nC<sub>17</sub>-Ph/nC<sub>18</sub> 交汇图表明了沉积水体处于缺氧还原环境; Sr/Cu、Rb/Sr 和气候指数 C 指示油柑窝组为温暖湿润的古气候条件; Sr/Ba、Ba/Ga、Ca/(Fe+Ca)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO 以及伽马蜡烷等特征反映了古湖泊水体为淡水; Zr/Al、Rb/K 和 MnO 含量指示为半深湖—深湖沉积环境。通过各指标与 TOC 含量之间的相关性分析, 认为温暖湿润气候和淡水环境为藻类的繁盛提供了良好的环境, 具备很高的初级生产力, 直接影响了油页岩的品质和发育特征, 具有丰富有机质来源的表层生产力是油页岩形成的首要条件, 缺氧还原的半深湖—深湖环境有利于沉积有机质堆积和保存, 是有机质聚集的促进因素。综合各因素, 提出了茂名盆地油柑窝组优质油页岩有机质的聚集模式。

**关键词:** 油页岩; 古环境; 地球化学; 有机质聚集; 油柑窝组; 茂名盆地; 石油地质学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2024)04-1367-18

收稿日期: 2022-04-28

## Paleoenvironmental Reconstruction and Organic Matter Accumulation Mechanism for Youganwo Formation Oil Shale in Maoming Basin

Cao Taotao<sup>1</sup>, Liu Hu<sup>2,3</sup>, Xiao Juanyi<sup>1</sup>, Pan Anyang<sup>4</sup>, Deng Mo<sup>4</sup>

1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China
2. Sichuan Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploration, Chengdu 610091, China
3. Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610072, China
4. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi 214126, China

**Abstract:** To identify the formation background of oil shale and the enrichment mechanism of high-quality intervals are the

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos. 41802163; 42002136); 湖南省自然科学基金项目(Nos. 2021JJ30240; 2018JJ3152); 湖南省教育厅优秀青年基金项目(No. 21B048); 页岩气资源利用湖南省重点实验室开放基金项目(No. E22218)

**作者简介:** 曹涛涛(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事非常规油气地质与地球化学评价研究。ORCID: 0000-0003-2900-8690. E-mail: 515165359@163.com

**引用格式:** 曹涛涛, 刘虎, 肖娟宜, 潘安阳, 邓模, 2024. 茂名盆地油柑窝组油页岩古环境恢复与有机质聚集机制. 地球科学, 49(4): 1367-1384.

**Citation:** Cao Taotao, Liu Hu, Xiao Juanyi, Pan Anyang, Deng Mo, 2024. Paleoenvironmental Reconstruction and Organic Matter Accumulation Mechanism for Youganwo Formation Oil Shale in Maoming Basin. *Earth Science*, 49(4): 1367-1384.

fundamental works for in-situ upgrading of oil shale reservoir. In this paper, geochemical methods, e.g., TOC, major and trace element, rare earth element and biomarkers, were carried out to restore paleosedimentary environment as well as discuss organic matter accumulation mechanism. The results suggest that oil shale within the entire interval of Youganwo Formation is rich in organic matter, and the bottom is composed of thin carbonaceous shale, sandstone and lignite. Mo content, Ba/Al,  $Ba_{bio}$  and biomarkers all reflect that Youganwo Formation has high primary productivity, with intermittent “algal bloom” phenomenon.  $V/(V+Ni)$ ,  $Ce_{anom}$ , Th/U, pyrite framboids and  $Pr/nC_{17}-Ph/nC_{18}$  crossplot indicate that Youganwo Formation was anoxic environment. Sr/Cu, Rb/Sr and climate index C identify that the climate of Youganwo Formation was warm and humid. Sr/Ba, Ba/Ga,  $Ca/(Fe+Ca)$ ,  $Al_2O_3/MgO$  and gammacerane feature suggest that water of ancient lake is fresh. The ancient lake of Youganwo Formation was semi-deep to deep, proved by Zr/Al, Rb/K and MnO content. Through the correlations between paleo-environmental parameters with TOC content, it is deemed that the warm and humid climate and freshwater environment can provide good conditions for the flourishing of algae, forming high quality productivity, and therefore it determines the quality and development characteristics of Youganwo Formation oil shale. High primary productivity with abundant organic matter sources is the main condition for oil shale formation, and anoxic semi-deep to deep lake environment, as a promoting factor, is conducive to organic matter accumulation and preservation. To sum up, in this paper it proposes the accumulation model of organic matter in high-quality oil shale of Youganwo Formation in the Maoming Basin.

**Key words:** oil shale; paleo environment; geochemistry; organic matter accumulation; Youganwo Formation; Maoming basin; petroleum geology.

油页岩是一种典型的非常规油气资源,其资源潜力巨大,已有近 200 年的开发利用历史.油页岩的利用过程较为复杂,需对油页岩块体进行开采粉碎并经低温干馏后才能获得石油资源,这种利用方式对地层结构产生了破坏且对周边环境产生严重危害(刘德勋等, 2009).近年来,油页岩原位转化及开采技术列为国家重要支持方向,对油页岩进行地下原位干馏是目前大规模高效、绿色开发的唯一可行方案(康志勤等, 2021).因此,查明油页岩的品质、明确高品质油页岩形成的沉积背景和揭示油页岩分布规律,能为油页岩的原位开采区域优选提供参考(侯丽云等, 2021).

前人研究认为优质油页岩的形成主要受控于初级生产力和氧化还原条件等(Algeo *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2021),并提出了有机质聚集的两种模式:保存模式和生产模式(Kuypers *et al.*, 2002;李鹏等, 2021).保存模式认为有机质聚集是海洋/湖泊缺氧的结果,强调缺氧的沉积环境是有机质聚集的主要控制因素(Zhang *et al.*, 2017;李鹏等, 2021);生产模式则认为表层水体极高的初级生产力是有机质富集的主要条件(李鹏等, 2021).也有学者提出了生产力和缺氧环境共同控制有机质的聚集和优质烃源岩的形成(Xu *et al.*, 2022).除此之外,其他因素如沉积速率、陆源碎屑、碳酸盐沉淀率也会影响有机质聚集(Hou *et al.*, 2022).优质油页岩的形成过程涉及了多种物理化学作用,是多种因素共同作用的结果.多重地球化学指标相结合,对揭示优质油页岩形成过程、有机质

聚集机理和资源潜力评价均具有重要意义.近年来,国内外学者基于元素地球化学数据建立了一系列参数,可作为沉积背景识别的重要指标(Tribovillard *et al.*, 2006),如通过 Sr/Cu 比值判识古气候条件, Sr/Ba 比值反映古盐度,  $V/(V+Ni)$  和  $V/Cr$  比值可指示氧化还原环境等,也有学者利用生物标志物、Mo 元素等分析有机质来源及古生产力等(张国伟等, 2017; 乔世海等, 2019; 刘燕海等, 2020; 吴东旭等, 2023).这些判识指标对揭示油页岩有机质的聚集和保存至关重要,也是预测油页岩区域分布的关键(Li *et al.*, 2020).

茂名盆地是我国南方地区重要的含油页岩盆地之一,沉积了厚层优质油页岩,具有资源丰富、品质好、储量大等特点(孟庆涛等, 2020).前人对该地区油页岩的研究主要侧重于沉积特征、分布规律、有机质含量、类型、生物标志物和生烃演化特征等(李殿超等, 2006; 曹新星等, 2016; 孟庆涛等, 2020).对油页岩形成环境的综合表征及其对有机质聚集的影响尚未进行系统的研究.本文在对茂名盆地油页岩剖面和岩心系统观测的基础之上,以茂页 1 井油柑窝组油页岩为研究对象,开展系统的岩石矿物学、元素地球化学和有机地球化学研究,分析油页岩形成的古气候、古环境条件,揭示有机质的聚集条件和优质油页岩形成模式,为油页岩资源勘探开发提供参考.

## 1 区域地质概况

茂名盆地位于我国华南地区,是形成于新生代

的断陷盆地,呈北西—南东走向,长约44 km,宽为4~14 km,面积约400 km<sup>2</sup>(图1)。茂名盆地的形成和发育受西边的吴川正断层和东北向高棚岭断裂的控制。高棚岭断裂和吴川断裂是一组平面X型断裂组构,形成于加里东晚期,在燕山期复活,直到喜马拉雅期仍在活动,控制了茂名盆地的形成和展布(李殿超等,2006)。盆地内自下而上沉积了上桐组、油柑窝组、黄牛岭组、老虎岭组和高棚岭组,其中尚村组和油柑窝组为油页岩发育的主要层位(孟庆涛等,2020)。油柑窝组油页岩在全盆地内均有发育,岩心样品呈黑色或褐黑色,表面可见油迹,页理较为发育。

## 2 样品与实验

茂页1井位于茂南区山阁镇,钻深约860 m。油柑窝组的深度为811~857 m,上部为砂岩和碳质页岩,中间为厚度长达40 m的油页岩层段,下部为薄层劣质褐煤、碳质页岩、粉砂质页岩和砂岩(图2)。本次研究共采集24件油页岩及页岩样品,样品在实验室预先粉碎至150 μm以下,分置成若干份,分别开展TOC、岩石热解、饱和烃色质、矿物组成、主微量元素和稀土元素测试。对小块状样品表面磨平

后,开展扫描电镜和氩离子抛光扫描电镜测试。

TOC的测定采用美国LECO公司生产的Leco CS-230碳硫分析仪来完成,对粉碎后的样品放置于透水坩埚中经酸洗去除无机碳,然后用高纯水清洗若干次后,经恒温烘干处理后放入碳硫分析仪中检测。岩石热解测试采用的仪器为Rock eval-6热解仪,用来获取游离烃(S<sub>1</sub>)、热解烃(S<sub>2</sub>)、氢指数(HI)、氧指数(OI)和最高热解温度(T<sub>max</sub>)等参数。选取12件样品进行生物标志物检测,检测仪器为美国Agilent公司6890N-GC/5973-MSD气相色谱—质谱联用仪,测试程序包括有机质抽提、有机质组分分离和生物标志物鉴定等。

全岩矿物组成采用Bruker D8s型X-衍射仪进行测试,检测方法依据SY/T 5163-2018《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》。主量和微量元素是在VISTA MPX型电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)检测完成。粉末样品烘干后冷却至室温,称取0.5 g样品放置于聚四氟乙烯烧杯中,加入1 cm<sup>3</sup>去离子水湿润,用HNO<sub>3</sub>+HF混合酸分解后放入仪器中分析主量和微量元素。稀土元素测试采用过氧化钠熔融法分解样品,用HNO<sub>3</sub>溶解沉淀样品后采用X SERIES 2型号电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定,分析数

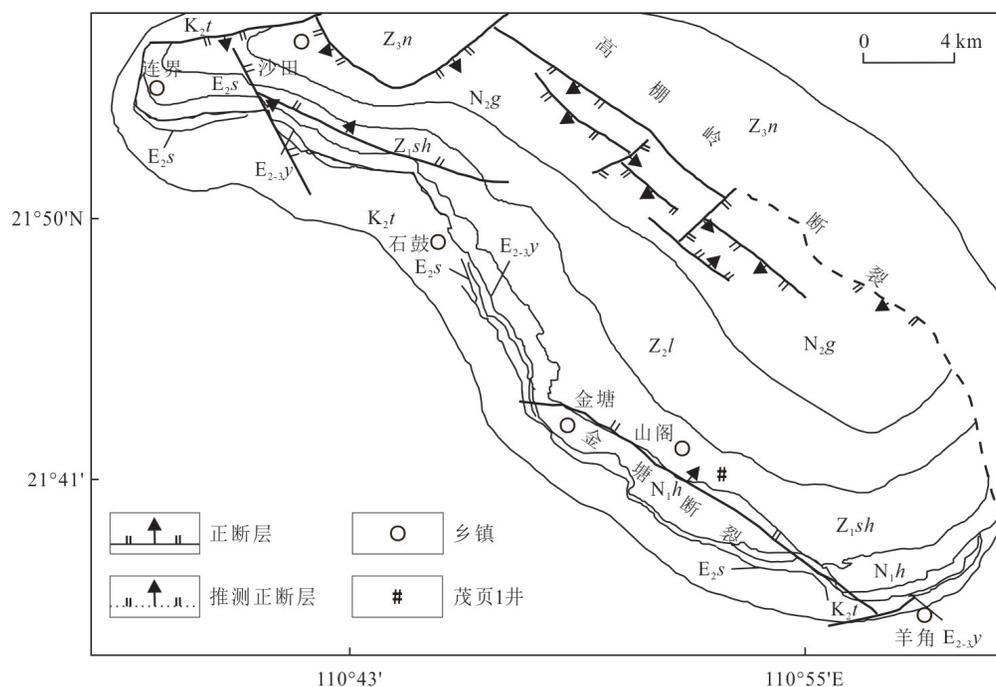


图1 茂名盆地构造地质简图

Fig.1 Simplified structural geological map of the Maoming basin

N<sub>1</sub>h. 黄牛岭组; N<sub>1</sub>sh. 尚村组; N<sub>2</sub>l. 老虎岭组; N<sub>1</sub>g. 高棚岭; Z<sub>3</sub>n. 震旦系; K<sub>2</sub>t. 铜鼓岭组; E<sub>2</sub>s. 上桐组; E<sub>2-3</sub>y. 油柑窝组

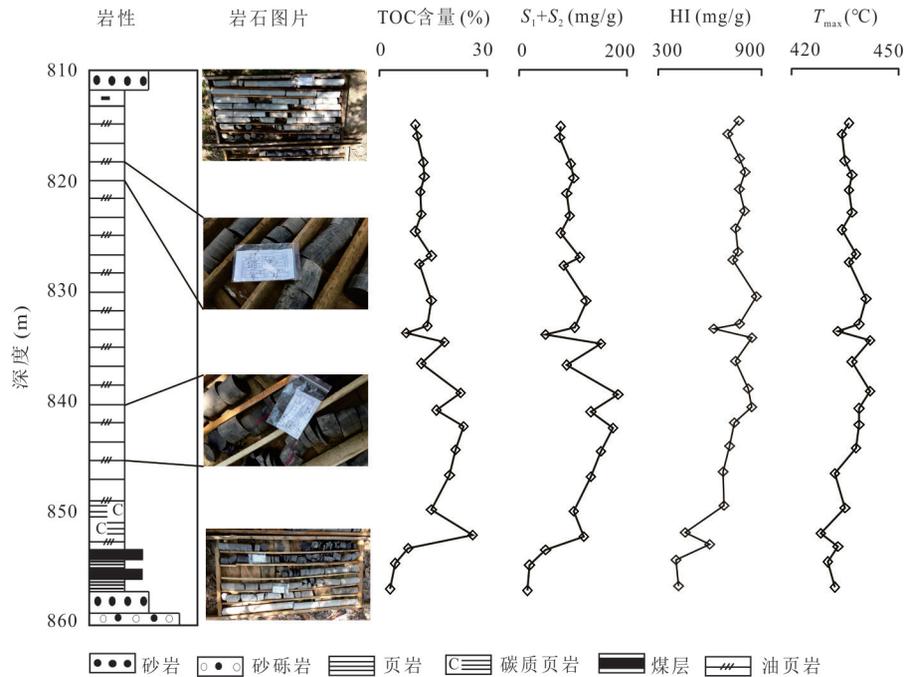


图2 茂页1井油柑窝组油页岩有机质垂向变化特征

Fig.2 Vertical variations of organic matter characteristics of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

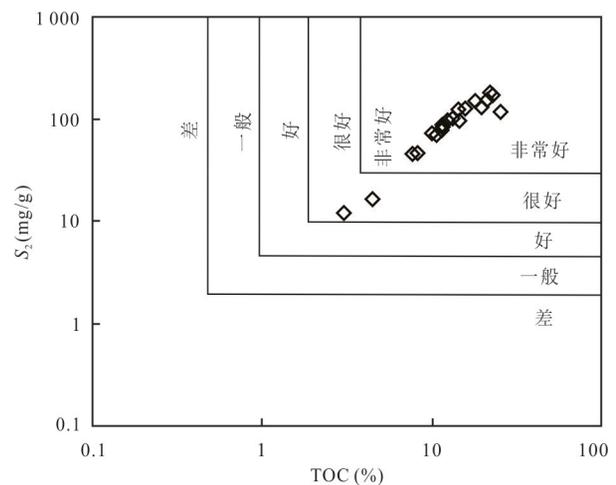
据相对误差小于6%。

选取小块样品,采用Quanta 200环境扫描电镜对垂直层理的新鲜断面进行观察,主要观察黏土矿物组成、形貌特征.除此之外,对油页岩样品进行氩离子抛光后,采用Helios 650聚焦离子束电镜对油页岩的有机质、矿物微观形态和共生组合关系进行观察.

### 3 油页岩基本特征

#### 3.1 油页岩品质

对茂页1井油柑窝组样品进行TOC含量测定,TOC含量主要分布在2.89%~25.82%,平均为13.58%(图2).在垂向上,TOC含量存在一定的变化,与其岩性特征密切相关.上段深褐色油页岩TOC含量分布在10.00%~14.53%;中下段部黑色油页岩TOC含量最高,介于11.53%~28.82%;底部油页岩的TOC含量逐渐降低,至碳质页岩和粉砂质页岩层段,TOC含量普遍仅为4.25%和2.89%.生烃潜力 $S_1+S_2$ 介于12.30~186.74 mg/g,平均为99.85 mg/g,绝大多数样品的 $S_1+S_2$ 高于100 mg/g.上段油页岩的生烃潜力相对较低,多在100 mg/g以下;中部油页岩的生烃潜力多在100 mg/g以上,最高达186 mg/g;下部油页岩的生烃潜力多高于100 mg/g,但整体低于中段.碳质页

图3 茂页1井油柑窝组油页岩TOC-S<sub>2</sub>交汇图Fig.3 Crossplot of TOC and  $S_2$  of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

岩和粉砂质页岩的 $S_1+S_2$ 较低,多在20 mg/g以下.根据陆相油页岩烃源岩评价标准,油柑窝组油页岩绝大部分属于非常好烃源岩类型.TOC与 $S_2$ 的相关图解也证实了随着TOC增加,裂解烃 $S_2$ 呈线性增加,生烃潜力越强,烃源岩类型越好(图3).

油柑窝组油页岩的氢指数(HI)为401~869 mg/g,平均为711.04 mg/g,同样反映了油柑窝组油页岩具有非常好的生烃潜力.在垂向上HI指数的变化规律与 $S_1+S_2$ 略有不同,随着TOC含量的增

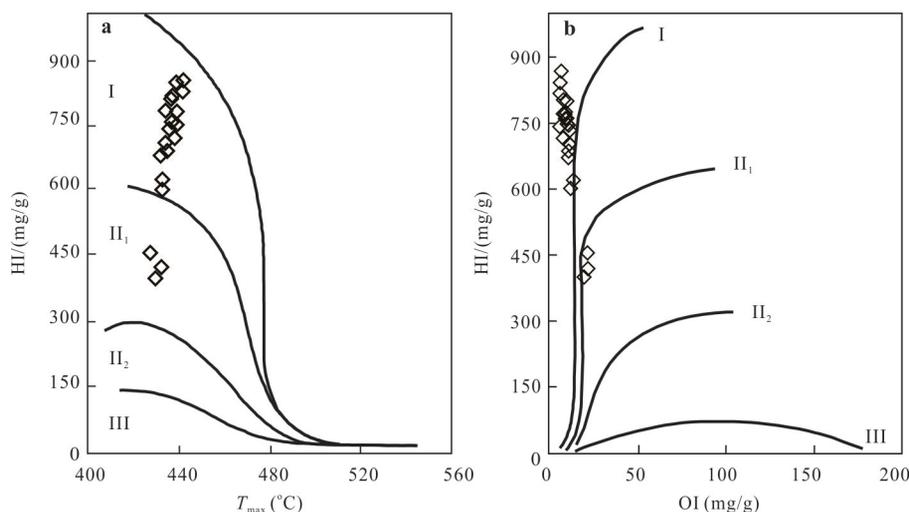


图 4 茂页 1 井油柑窝组油页岩有机质类型识别

Fig.4 Organic matter type identification of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

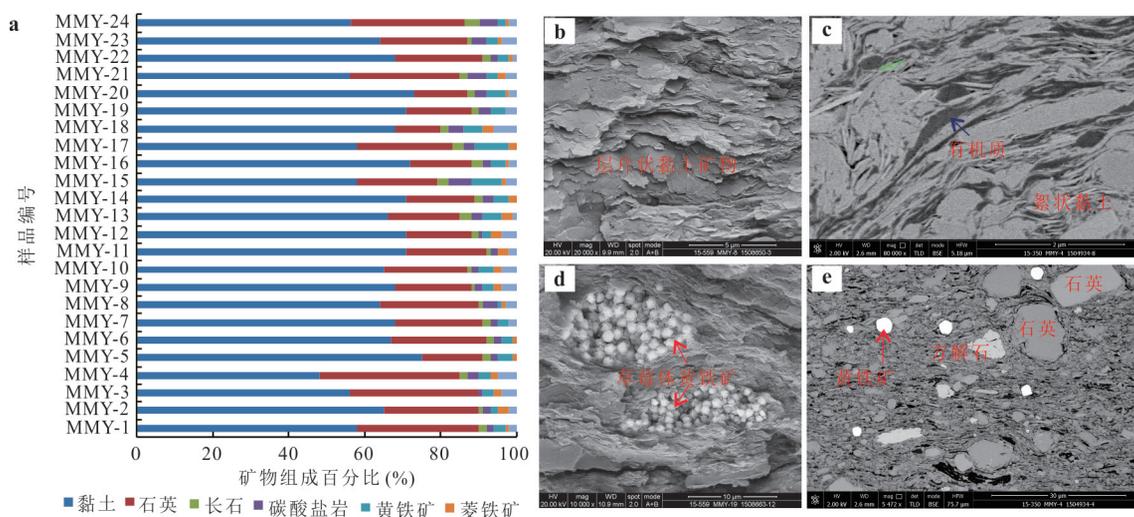


图 5 茂页 1 井油柑窝组油页岩矿物组成及形态特征

Fig.5 Mineral compositions and morphological characteristics of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

加, HI 指数呈降低的趋势, 可能反映了高丰度有机质中陆源贡献增多.  $T_{max}$ -HI 以及 OI-HI 关系图表明油柑窝组油页岩的有机质类型多数为 I 型, 少量为 II<sub>1</sub> 型 (图 4), 说明了油柑窝组页岩的母质来源以浮游生物为主, 含少量陆源输入.

茂页 1 井油柑窝油页岩的  $T_{max}$  值介于 428~442°C (图 2), 显示了油页岩处于未成熟—低成熟阶段, 这比曹新星等 (2016) 研究的金塘镇油柑窝组油页岩  $T_{max}$  略高一些, 与茂页 1 井油柑窝组较大的埋藏深度有关.

### 3.2 矿物组成

茂页 1 井油柑窝组油页岩的主要矿物组成是黏土矿物和石英, 其中黏土矿物含量介于 48%~

75%, 平均为 64.92%, 石英含量为 14%~37%, 平均为 22.71% (图 5a). 黏土矿物主要呈层状分布 (图 5b), 为典型的片理结构. 微观形态上, 有机质多被吸附在黏土矿物颗粒表面, 反映了黏土矿物对有机质的富集作用和共生关系 (图 5c). 油页岩中普遍含有较高的草莓体黄铁矿 (图 5d), 黄铁矿含量多在 2% 以上, 最高可达 9%, 指示了油柑窝组油页岩形成于还原环境. 碳酸盐岩矿物含量普遍较低, 多在 5% 以下. 方解石和石英呈孤立状态分布在黏土矿物之间 (图 5e), 无次生加大等现象, 反映了石英等颗粒为陆源输入.

### 3.3 元素地球化学特征

目前常用富集系数 (EF) 对样品中元素富集程

度进行评价,计算公式为  $EF_{\text{元素}x} = (X/Al)_{\text{样品}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}$ ,  $(X/Al)_{\text{PAAS}}$  代表后太古宙澳大利亚页岩平均组分 (Taylor and McLennan, 1985; 郭伟等, 2021).  $EF_{\text{元素}x} > 1$ , 表明样品中的元素 X 相对富集,  $EF_{\text{元素}x} < 1$ , 表明元素 X 相对亏损. 油柑窝组油页岩主要主量元素为  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  和  $K_2O$  等, 含量分别为 12.39%~21.77%、3.19%~10.57% 和 1.43%~3.06%, 其他主量元素如  $TiO_2$ 、 $CaO$ 、 $MnO$ 、 $Na_2O$  和  $MgO$  含量较低 (附表 1). 从富集系数上看 (图 6), 元素 Na ( $EF=0.08$ ) 呈现显著亏损, Ca ( $EF=0.33$ )、Mg ( $EF=0.41$ ) 和 Mn ( $EF=0.45$ ) 呈明显的亏损, Fe ( $EF=0.73$ )、K ( $EF=0.53$ ) 和 Ti ( $EF=0.56$ ) 呈现一定的亏损.

茂页 1 井油柑窝组油页岩微量元素的富集特征显示如下 (图 6): Ga ( $EF=1.23$ )、Pb ( $EF=1.58$ ) 和 Zn ( $EF=1.12$ ) 呈中等程度的富集, Mo ( $EF=2.90$ )、Th ( $EF=2.59$ ) 和 Th ( $EF=2.35$ ) 呈显著的富集; Cr ( $EF=0.46$ )、Hf ( $EF=0.46$ ) 和 Zr ( $EF=0.36$ ) 呈显著的亏损, Ba ( $EF=0.80$ )、Co ( $EF=0.70$ )、Cu ( $EF=0.71$ )、Nb ( $EF=0.88$ )、Ni ( $EF=0.58$ )、Sr ( $EF=0.68$ ) 和 V ( $EF=0.56$ ) 呈中等程度的亏损.

稀土元素测试结果 (附表 2) 表明, 茂页 1 井油柑窝组油页岩的稀土元素总含量 ( $\sum REE$ ) 介于 233.66~689.26  $\mu\text{g/g}$ , 平均为 338.31  $\mu\text{g/g}$ , 高于上地壳 ( $\sum REE=146.4 \mu\text{g/g}$ )、PAAS 平均页岩 ( $\sum REE=183.0 \mu\text{g/g}$ ) 以及北美页岩 ( $\sum REE=173.2 \mu\text{g/g}$ ). 茂页 1 井油柑窝组油页岩轻稀土元素含量 ( $\sum LREE$ ) 为 186.02~546.98  $\mu\text{g/g}$ , 平均为

269.83  $\mu\text{g/g}$ ; 重稀土元素含量 ( $\sum HREE$ ) 为 20.04~63.12  $\mu\text{g/g}$ , 平均为 30.01  $\mu\text{g/g}$ . 轻重稀土元素含量比 ( $\sum LREE/\sum HREE$ ) 为 7.23~11.52, 平均为 9.15, 高于北美页岩的 7.44 (Haskin and Haskin, 1966), 表明轻稀土富集, 重稀土元素亏损.

$(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$  和  $(Gd/Yb)_N$  值为稀土元素球粒陨石标准化后图解中分布曲线的斜率, 分别用以反映轻稀土、轻重稀土和重稀土间的分馏程度 (赵晨君等, 2020). 茂页 1 井油柑窝组油页岩的  $(La/Yb)_N$  值为 8.89~13.64, 平均为 11.61;  $(La/Sm)_N$  值为 3.72~5.25, 平均为 4.34;  $(Gd/Yb)_N$  值为 1.81~2.57, 平均为 2.25. 该结果表明轻稀土元素之间分异明显, 重稀土元素之间分异不明显. Ce 元素受氧化还原条件和 pH 值影响, 存在 +3 和 +4 两种价态, 在氧化环境,  $Ce^{3+}$  被还原成  $Ce^{4+}$ ,  $Ce^{3+}$  浓度减小, Ce 发生亏损 (赵晨君等, 2020). Ce 异常 ( $\delta Ce$ ) 可以用来分析沉积环境和古水体介质条件, 样品的  $\delta Ce$  值为 0.92~1.08, 平均为 1.02, 无明显的异常.

对油柑窝组油页岩的稀土元素进行北美页岩标准化所得到的配分模式图 (图 7a), 显示从左至右, 呈轻微下倾的趋势. 表现出相对北美页岩, 轻稀土富集明显, 重稀土具有中等程度富集的特点. Gd 元素呈现明显的波峰, 表明了 Gd 元素具有显著的富集. 稀土元素球粒陨石标准配分模式图显示 (图 7b), 油柑窝组油页岩的稀土元素分布曲线中等程度右倾, 具体表现为轻重稀土分异明显, 轻稀土元素富集、重稀土含量稳定的特点, 反映了物源主要来自于上地壳 (马风华等, 2021).

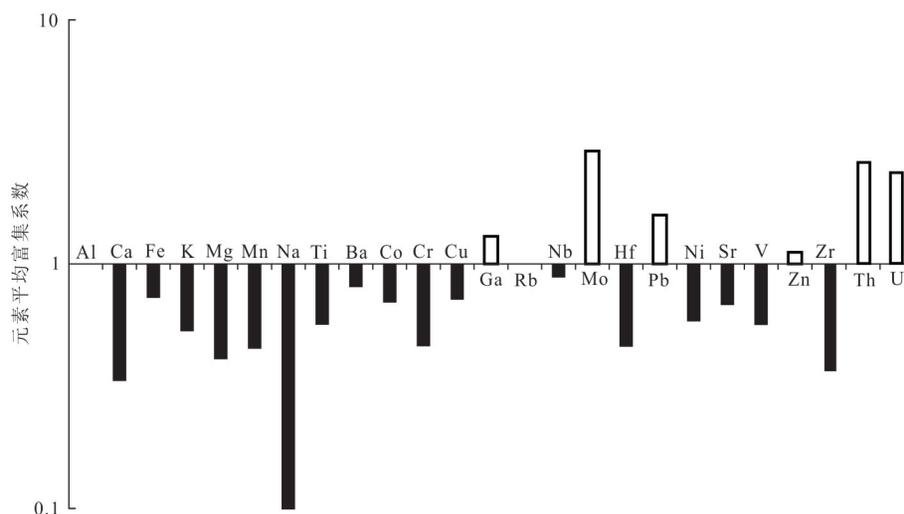


图 6 茂页 1 井油柑窝组油页岩主量及微量元素的平均富集系数

Fig.6 Average enrichment coefficient of major and trace elements of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

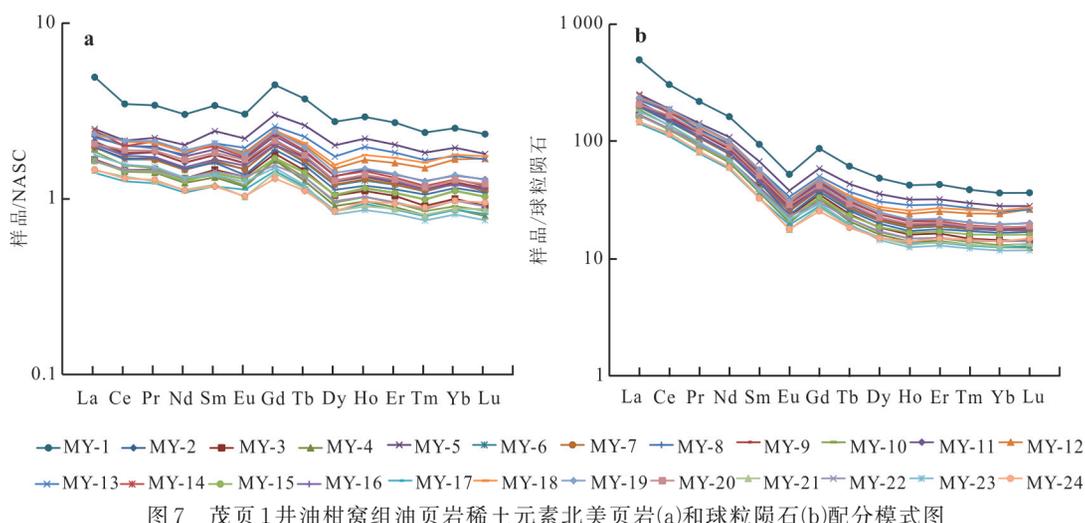


图7 茂页1井油柑窝组油页岩稀土元素北美页岩(a)和球粒陨石(b)配分模式图

Fig.7 Normal distributed pattern of REE normalized to NASC (a) and chondrite (b) of Youganwo Formation in MY1 well

## 4 讨论

### 4.1 古生产力

Ba是较早应用于古生产力判识指标之一(卢贤志等, 2021).生物Ba在生物体死亡后腐烂与水体中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 结合形成重晶石.因此,生物Ba(过量Ba)可以用来反映古生产力的高低.利用沉积物中的总Ba含量减去陆源Ba的含量,即可得到生物Ba( $\text{Ba}_{\text{bio}}$ )的含量(Dong *et al.*, 2018).生物Ba的计算公式为: $\text{Ba}_{\text{bio}} = \text{Ba}_{\text{样品}} - \text{Ti}_{\text{样品}} \times (\text{Ba}/\text{Ti})_{\text{PAAS}}$ (Francois *et al.*, 1995),  $\text{Ti}_{\text{样品}} \times (\text{Ba}/\text{Ti})_{\text{PAAS}}$ 代表陆源Ba的含量.经计算后,茂页1井油柑窝组油页岩中 $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 的含量为16.75~276.24  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,平均为153.34  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,反映了较高的初级生产力.从垂向变化规律来看(图8), $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 含量呈现先增加后降低的趋势,在粉砂质页岩中, $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 含量仅有16.75  $\mu\text{g}/\text{g}$ , $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 含量与TOC变化趋势基本一致,反映了古生产力高低对TOC含量的显著控制作用.Al元素几乎不受沉积物成岩作用的影响, $\text{Ba}/\text{Al}$ 值比TOC含量更能反映初级生产力的高低(邱振和王清晨, 2012).茂页1井油柑窝组油页岩 $\text{Ba}/\text{Al}$ 比值介于0.004 0~0.006 9,平均为0.0054. $\text{Ba}/\text{Al}$ 与 $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 值在垂向上具有相同的分布趋势,最高值发生在834.5~839.1 m,而非TOC最高层段,向下均表现出显著降低的趋势(图8).细粒沉积物对Mo元素具有较弱的“粒控效应”,Mo元素会产生沉淀并在沉积岩中聚集.研究表明,Mo元素与有机质的堆积速度一致,在缺氧的环境中,Mo元素可以用来指示古湖泊生产力的大小(孙莎莎等, 2015).茂页1井柑窝组油页岩Mo的含量介于

1.32~6.43  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,均值为2.85  $\mu\text{g}/\text{g}$ (图8),高于北美页岩中Mo含量,反映了油柑窝期水体具有很高的初级生产力.对比 $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 、 $\text{Ba}/\text{Al}$ 和Mo含量指标,Mo含量在垂向上的变化趋势与 $\text{Ba}/\text{Al}$ 和 $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 基本一致,但不如 $\text{Ba}/\text{Al}$ 和 $\text{Ba}_{\text{bio}}$ 值变化灵敏.总体上来讲,3个指标均反映了油柑窝组油页岩形成时水体具有很高的初级生产力,反映了古生产力对高丰度油页岩形成的控制作用.

有机显微组成和生物标志物也能反映油页岩的母质来源和古生产力特征.大量繁盛的浮游藻类是水体富营养化和高生产力的重要标志(刘传联和徐金鲤, 2002).前人研究表明,茂名矿区油柑窝组油页岩的藻类体平均含量为75.16%,且藻类体含量与TOC含量之间存在一定正相关性,特别是高TOC样品中具有较大的藻类体富集层,证实了油柑窝组存在间断性的“藻类勃发”现象(徐川, 2018).茂页1井油柑窝组油页岩中发育了大量的甾类化合物,特别是 $\text{C}_{27} \sim \text{C}_{29}$ 呈“V”型分布(图9),反映了大量的藻类浮游生物,代表陆源输入的 $\text{C}_{29}$ 相对较少,也指示了有机质主要为藻类(徐新德等, 2013),进一步佐证了古生产力是优质油页岩形成的主控因素.

### 4.2 氧化还原条件

缺氧环境是形成高有机碳含量的关键因素之一,Co、Mo、U、Th、V等敏感性元素常用来判识古水体的氧化还原条件(张琴等, 2018; Wei *et al.*, 2023).Hatch and Leventhal(1992)指出 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.46$ 反映为氧化环境, $0.46 < \text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.57$ 为弱氧化环境, $0.57 < \text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) < 0.83$ 为缺氧环境,

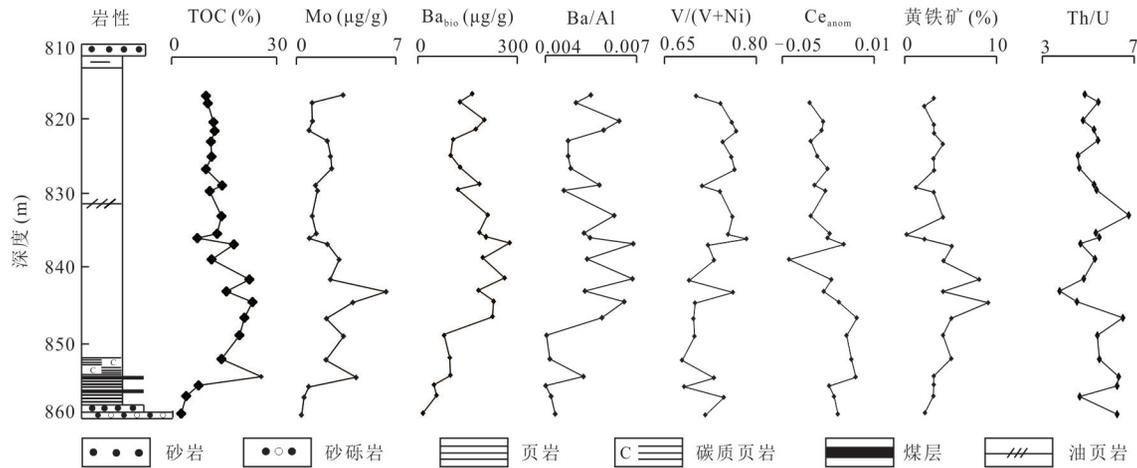


图8 茂页1井油柑窝组油页岩古生产力和古氧化还原指标垂向变化

Fig.8 Vertical variations of paleoproductivity and paleo-redox indexes of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

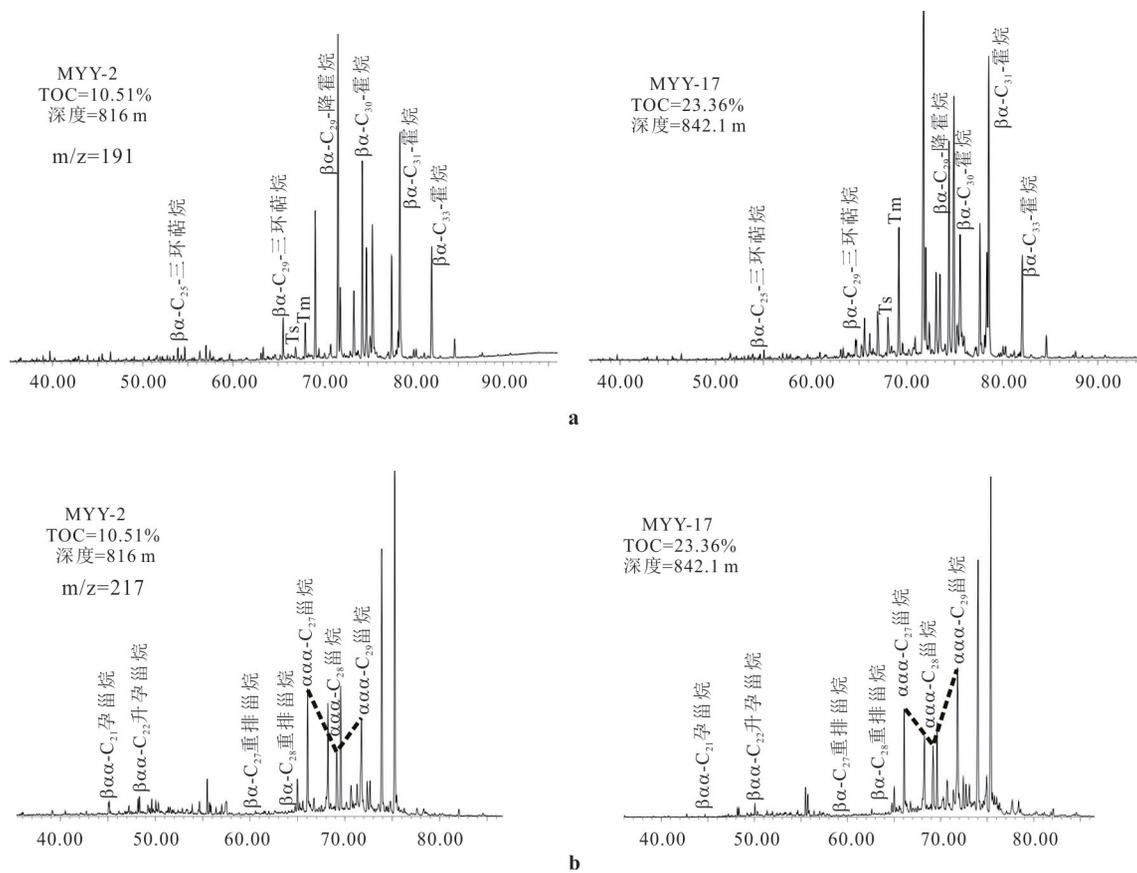


图9 茂页1井油柑窝组油页岩饱和烃气相色谱图

Fig.9 Gas chromatogram of saturated hydrocarbon of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

$V/(V+Ni) > 0.83$  为静海环境. Th 是一种相对惰性的元素, 通常富集在黏土碎屑中, 依据 U、Th 行为的差异, U/Th 值可表征古水体的氧化还原性,  $Th/U < 2$  指示缺氧环境,  $Th/U > 8$  指示氧化环境 (Pattan *et al.*, 2005). Ce 异常指数  $Ce_{anom}$  也是氧化还原条件的指标, 计算公式:  $Ce_{anom} = \lg[3Ce_n / (2La_n + Nd_n)]$ ,

$Ce_{anom}$  大于  $-0.1$  代表缺氧环境, 小于  $-0.1$  则指示含氧环境.

茂页1井油柑窝组油页岩的  $V/(V+Ni)$  值介于  $0.67 \sim 0.78$ , 平均值为  $0.73$ ;  $Ce_{anom}$  介于  $-0.100 \sim -0.008$ , 均  $\geq -0.1$ . 这两个指标均反映了油柑窝组油页岩形成于分层不强的还原环境, 有利于有机质

的堆积和保存。Th/U 值介于 3.75~6.76, 平均为 5.28, 反映了弱还原环境, 这与较高的 TOC 含量和 I 型干酪根的实际地质情况不符, 可能是断陷盆地湖泊水体较为局限、陆源物质的输入和高有机质沉积通量等综合影响下, Th/U 比值环境指示意义失真 (王东营等, 2007), 不能作为研究区油页岩形成时氧化还原的参考指标。指示性矿物草莓体黄铁矿颗粒大小也能反映古氧化还原条件。较大的草莓体黄铁矿 (平均  $>10 \mu\text{m}$ ), 反映了一定的氧气供应, 而较小粒度的草莓体黄铁矿 (平均  $<5 \mu\text{m}$ ) 反映其形成于强还原环境 (李琪琪等, 2021)。扫描电镜观察可知, 油柑窝组油页岩中黄铁矿草莓体的颗粒普遍在  $5 \mu\text{m}$  左右, 个别草莓体黄铁矿粒径较大, 可达  $10 \mu\text{m}$  (图 10a~10d), 据此可知, 油柑窝组油页岩主体上形成于还原环境。

Pr/ $n\text{C}_{17}$  和 Ph/ $n\text{C}_{18}$  交汇图能更加突出植烷或姥鲛烷优势, 也能很好地反映出沉积水体的氧化还原环境 (Liu *et al.*, 2023)。由图 11 可知, 茂页 1 井油柑窝组油页岩主要分布在海陆过渡环境, 与本文的湖泊环境稍有差异, 但也整体上反映有机质母质来源主要是低等水生浮游生物和还原性增强的沉积环境, 但该指标不如元素地球化学指标反映准确。

垂向上, 随着深度增加, V/(V+Ni) 呈先增加后降低的趋势, 至底部又轻微增加, 这与黄铁矿含量的变化和  $\text{Ce}_{\text{anom}}$  值不完全一致; 黄铁矿含量和  $\text{Ce}_{\text{anom}}$  值随深度增加整体呈增加的趋势, 至底部碳质页岩和粉砂质页岩段又明显降低。特别是在 830~850 m 之间存在强还原段, 该段 TOC 含量具有异常高的值, 与黄铁矿含量和  $\text{Ce}_{\text{anom}}$  值存在很好的对应, 但与 V/(V+Ni) 的对应较差。综合来看, 沉积水体氧化还原相对准确的指标为  $\text{Ce}_{\text{anom}}$  值和黄铁矿含量, V/(V+Ni) 指标受陆源输入影响, 敏感度变差, 可作为整体参考指标。

### 4.3 古气候

古气候条件影响了陆源碎屑输入、沉积速率、氧化还原条件、水体化学性质和初级生产力 (Shen *et al.*, 2017), 进而导致湖相盆地演化时沉积过程的差异 (Chen *et al.*, 2016)。微量元素地球化学参数 Sr/Cu 和 Rb/Sr 对气候变化比较敏感, 温暖潮湿的气候环境中, Sr/Cu 呈现为低值, 范围为 1.3~5.0; 干旱炎热的气候环境, Sr/Cu 值大于 5 (Sarki Yandoka *et al.*, 2015)。与 Sr/Cu 值相反, Rb/Sr 值为高值反映了温暖湿润的气候条件, Rb/Sr 值为低值反映了低

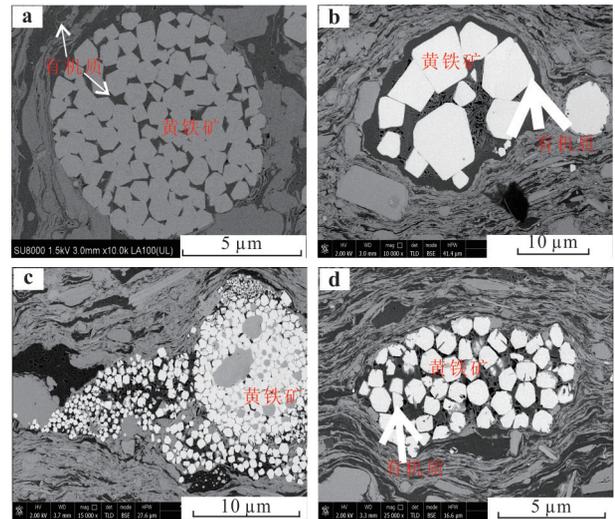


图 10 茂页 1 井油柑窝组油页岩草莓体黄铁矿分布特征  
Fig.10 Distribution characteristics of pyrite framboids of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

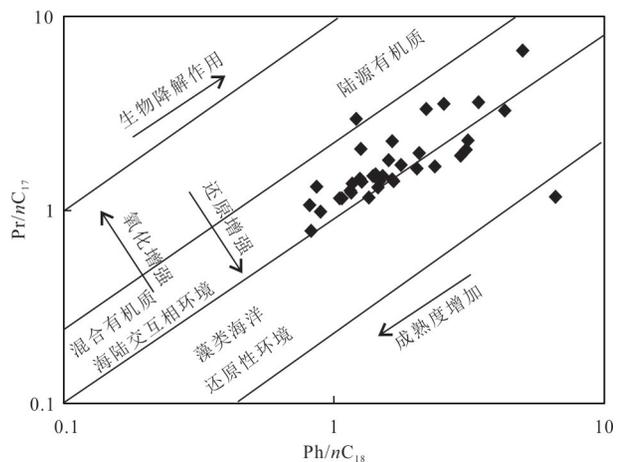


图 11 茂页 1 井油柑窝组油页岩 Pr/ $n\text{C}_{17}$ -Ph/ $n\text{C}_{18}$  交汇图  
Fig.11 Crossplot of Pr/ $n\text{C}_{17}$  and Ph/ $n\text{C}_{18}$  of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

风化率和干旱炎热的气候条件 (金章东和张恩楼, 2002)。气候条件会影响湿润气候型元素 (Fe、Mn、Cr、Ni、V 和 Co) 和干旱气候型元素 (Ca、Mg、Sr、Ba、K、Na) 的迁移和分布, 常用气候指数  $C = (\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{V} + \text{Co}) / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba} + \text{K} + \text{Na})$  反映古气候条件, 一般  $C < 0.2$  代表干热气候,  $C > 0.8$  代表潮湿气候,  $0.2 < C < 0.8$  代表半湿润气候 (Moradi and Akkaya, 2016)。

茂页 1 井油柑窝组油页岩 Sr/Cu 值介于 2.66~5.83, 多数低于 5.0, Rb/Sr 值为 0.80~1.61, 气候指数  $C$  值介于 0.67~2.72, 平均值为 1.46 (图 12), 这些指标均反映了温暖湿润的气候条件。Sr/Cu 值自上

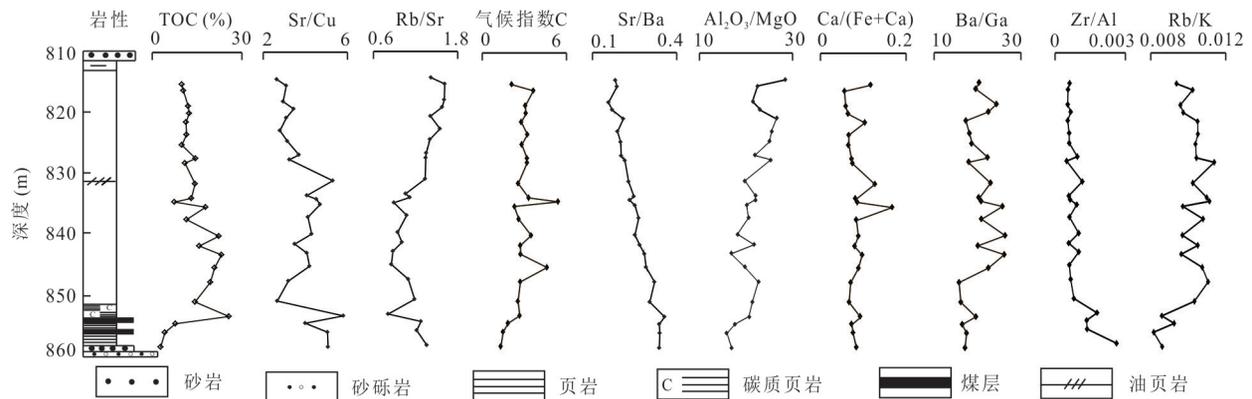


图 12 茂页 1 井油柑窝组油页岩古气候和古盐度指标垂向变化

Fig.12 Vertical variations of paleoclimate and paleosalinity indexes of Youganwo Formation oil shale in MY1 well

而下呈逐渐增加的趋势,反映上段油页岩比中下段形成时的气候更湿润,下部接近于砂砾岩段向炎热干旱环境过渡.气候指数  $C$  值在垂向上,除中间段个别数据点整体呈现异常高值外,整体呈现轻微降低的趋势,这些特征所反映的气候变化趋势为自上而下逐渐变的炎热,与  $Sr/Cu$  值具有很好的一致性.垂向上  $Rb/Sr$  值与  $Sr/Cu$  值和气候指数  $C$  值变化基本一致,但在底部呈现增加的趋势,略有差异.整体上看,油柑窝期为小幅波动的温湿气候,孢粉组合为亚热带—温带植物花粉(余金凤和吴作基, 1983),该气候条件有利于浮游生物的勃发,为厚层优质油页岩的形成提供了物质保障.

#### 4.4 古盐度

沉积水体的盐度是有机质保存的重要指标之一,常用来判断古水体盐度的指标有  $Sr/Ba$  值、 $Ba/Ga$  值、 $Ca/(Fe+Ca)$  值和伽马蜡烷(Wei and Algeo, 2020; 杨季华等, 2020).  $Sr$  和  $Ba$  元素在淡水水体中以重碳酸盐的形式赋存,当水体发生咸化,达到一定的盐度时,  $Ba$  会形成  $BaSO_4$  沉淀,湖水持续咸化,  $Sr$  才开始沉淀.一般情况下,  $Sr/Ba > 1$  指示海相咸水环境或者干旱条件下的湖水咸化环境,  $Sr/Ba < 0.6$  指示陆相淡水环境,  $0.6 < Sr/Ba < 1$  反映为半咸水环境.  $Ba/Ga$  值越高,表明沉积水体盐度相对较低,反之表明水体盐度相对较高(苗耀等, 2007).  $Ca/(Fe+Ca)$  也可判断水体盐度,一般  $Ca/(Fe+Ca) < 0.4$  反映淡水环境,  $Ca/(Fe+Ca) > 0.6$  为咸水环境(王子玉等, 1994).  $Mg$  和  $Al$  元素的含量和变化也是沉积水体古盐度的指标之一,  $Al_2O_3/MgO$  值大于 7 指示淡水环境,  $Al_2O_3/MgO$  小于 7 指示咸化环境(许中杰等, 2009). 除此之外,生物标志化合物也可以用来反映沉积时水体盐度,常用的指标有孕甾

烷、升孕甾烷和伽马蜡烷等.高盐环境中,孕甾烷和升孕甾烷等甾类化合物含量相对较高,一般认为指示了高盐度的沉积水体环境,反之,则指示沉积水体为淡水环境.较高含量的伽马蜡烷也反映了咸化的沉积水体环境,反之则为淡水环境(孟庆涛等, 2020).

茂页 1 井油柑窝组油页岩的  $Sr/Ba$  为 0.17~0.37,均值为 0.26,总体偏低;  $Ba/Ga$  比值的范围为 15.75~20.38,均值为 20.41;  $Ca/(Fe+Ca)$  比值介于 0.055~0.168,均值为 0.084;  $Al_2O_3/MgO$  比值介于 15.96~28.78,远高于 7(图 12). 据饱和烃  $m/z=191$  的质量色谱图(图 9),仅有极低的孕甾烷和升孕甾烷且未检测到伽马蜡烷的存在.这些元素比值和伽马蜡烷特征均反映了油柑窝组油页岩形成于淡水水体中.垂向上,  $Sr/Ba$  值和  $Ca/(Fe+Ca)$  值均随深度增加逐渐增加,但两者在局部的变化趋势稍有不同,反映了指标参数之间的差异.  $Al_2O_3/MgO$  值随着深度增加而减小,与  $Sr/Ba$  值趋势相反;  $Ba/Ga$  值在中上段变化不明显,在底部呈明显降低的趋势.这些特征总体上表示油柑窝组油页岩形成时水体为淡水环境,随着深度增加,水体盐度呈增加的趋势,与古气候随深度增加逐渐变的炎热相吻合.古气候指标  $Sr/Cu$ 、 $Rb/Sr$  与古盐度指标  $Sr/Ba$  之间存在较好的相关性(图 13),即古气候变化可能是控制古盐度变化的主要因素,温暖湿润的气候是油柑窝期淡水环境的控制因素.

#### 4.5 古水深

沉积过程中机械分异、化学分异和生物以及生物化学分异作用导致某些元素随着离岸距离的变化而发生变化,通过对这些元素的分析,可以反映古水深.其中  $Zr/Al$ 、 $Rb/K$  和  $MnO$  含量是古水深的

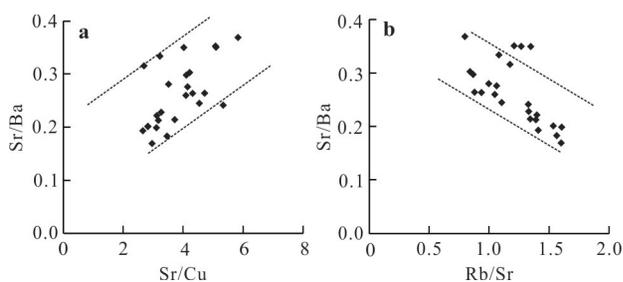


图13 茂页1井油柑窝组油页岩古盐度与古气候相关性  
Fig.13 Correlations of paleosalinity with paleoclimate parameters for Youganwo oil shale in MY1 well

常用判断指标。 $Zr/Al$  比值代表近距离搬运的陆源组分和水体深度变化,其值越小,表示离岸越远,水体更深; $Rb/K$  指示水体深度的变化,值越大,水体越深; $MnO$  含量 $<0.00094\%$  判识为滨湖, $0.00094\% \sim 0.00750\%$  为浅湖, $0.00750\% \sim 0.05100\%$  为半深湖, $>0.05100\%$  为深湖 (Das and Haake, 2003; 孙莎莎等, 2015; 郑一丁等, 2015)。研究区  $Zr/Al$  比值分布在  $0.46 \times 10^{-3} \sim 2.16 \times 10^{-3}$ , 平均值为  $0.77 \times 10^{-3}$ ;  $Rb/K$  比值分布在  $8.09 \times 10^{-3} \sim 11.33 \times 10^{-3}$ , 平均值为  $10.01 \times 10^{-3}$  (图 12);  $MnO$  含量为  $0.014\% \sim 0.210\%$ , 均值为  $0.050\%$  (附表 1)。对比三塘湖盆地芦草沟组深水油页岩 ( $Zr/Al$  均值为  $2.27 \times 10^{-3}$ ;  $Rb/K$  均值为  $2.90 \times 10^{-3}$ ) (徐银波等, 2022), 茂名盆地油柑窝组沉积时水体更深, 判断为半深湖—深湖环境。

## 5 有机质聚集机制

### 5.1 有机质聚集主控因素

油页岩中有机质的聚集是一个复杂的物理化学过程,无论是古生产力、氧化还原条件、或者是陆源碎屑的输入等任一变量都可能对其产生影响。茂名盆地油柑窝组油页岩具有丰富的有机质,为进一步厘清茂名盆地油柑窝组有机质的聚集机制,本文结合了古湖泊的氧化还原条件、盐度、气候条件和生产力等要素综合判断有机质聚集的主要控制因素。

古盐度是影响有机质保存和聚集的重要因素,为进一步明确古盐度对油柑窝组油页岩有机质聚集的影响,开展相关指标与 TOC 含量的相关性研究 (图 14)。古盐度参数  $Sr/Ba$  比值、 $Ba/Ga$  值与 TOC 之间呈现明显的正相关性,  $Al_2O_3/MgO$  值与 TOC 之间呈负相关性,个别页岩和粉砂质页岩不具备此规律,这些现象都反映了古盐度含量越高,越

有利于有机质的聚集。古气候的变化也是有机质聚集的重要因素,研究表明温暖湿润的气候更有利于有机质的富集。茂页 1 井油柑窝组油页岩  $Sr/Cu$  值、气候指数  $C$  值与 TOC 含量均呈现一定的正相关性,指示 TOC 含量随着气候湿润性增加,呈现有机质富集增加的趋势。 $Rb/Sr$  值与 TOC 含量之间呈弱负相关性,该现象反映了气候变得更加湿润,TOC 含量未表现出显著增加的趋势。因此,各指标之间与 TOC 含量之间的关系存在一定差异,反映了温暖湿润的气候能够促使藻类繁盛、生物勃发,显著提升水体的初级生产力,但小范围的温湿气候波动未能显著影响初级生产力的提高,古气候条件不是有机质聚集的关键性控制因素。

无论是古盐度还是古气候条件对有机质的聚集均起到一定的调控作用,对有机质富集起主导作用的是古生产力和古氧化还原条件 (何龙等, 2019)。古生产力模式强调高的初级生产力能够提高有机质通量,有机质消耗水柱中大量的氧气,导致水体变为缺氧环境,提升有机质的保存;保存模式则认为有机质富集与特殊的盆地构型有关 (如局限盆地),不依赖于古生产力而是缺氧环境提升了有机质的保存效率 (罗宏谓等, 2019)。

根据常用的古生产力指标,开展其与 TOC 含量之间的关联性研究,结果表明  $Mo$  含量、 $Ba/Al$  值和  $Ba_{in}$  值均与 TOC 含量呈明显的正相关性 (图 15a~15c)。这些特征表明了茂名油柑窝组油页岩形成时期,大量浮游生物的繁荣为湖泊高生产力提供了基础,促进了茂名高品质油页岩的形成,古生产力越高、有机质越富集。徐川 (2018) 通过扫描电镜观察藻类体也确定了藻类体含量与 TOC 含量之间的正相关性。由此可见,古生产力是茂名盆地油柑窝油页岩有机质聚集的主控因素。

开展古氧化还原指标与 TOC 含量之间的关联性研究对于揭示茂名盆地油柑窝组油页岩有机质的保存条件十分重要。 $Ce_{anom}$ 、黄铁矿含量均与 TOC 含量之间呈现良好的正相关性 (图 15d~15e),说明了强还原环境有利于有机质的聚集。但  $V/(V+Ni)$  与 TOC 含量之间的相关性并不明显 (图 15f),反映了在还原环境下,还原性增强对有机质聚集效应的增加不明显。总的来讲,湖泊底层缺氧的水体环境为沉积有机质提供了强有力的保存环境,使有机质免受氧化分解遭受抑制,容易形成富有机质的堆积和保存。

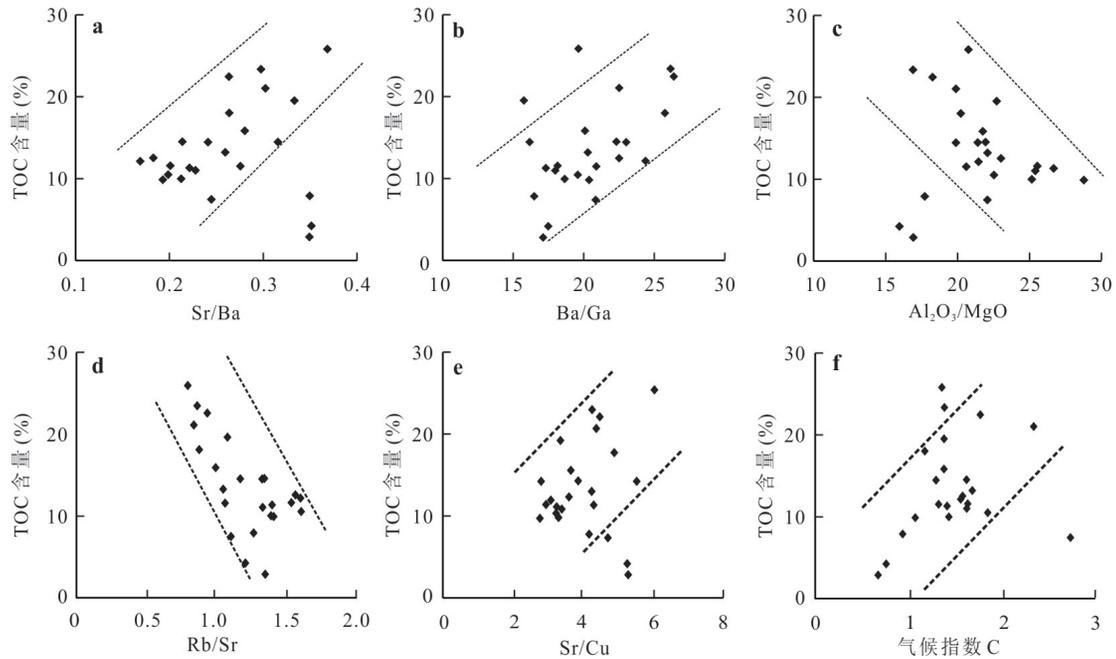


图 14 茂页 1 井油柑窝组油页岩古盐度 (a~c) 和古气候 (d~f) 指标与 TOC 相关性

Fig.14 Correlations of paleosalinity (a~c) and paleoclimate (d~f) parameters with TOC for Youganwo oil shale in MY1 well

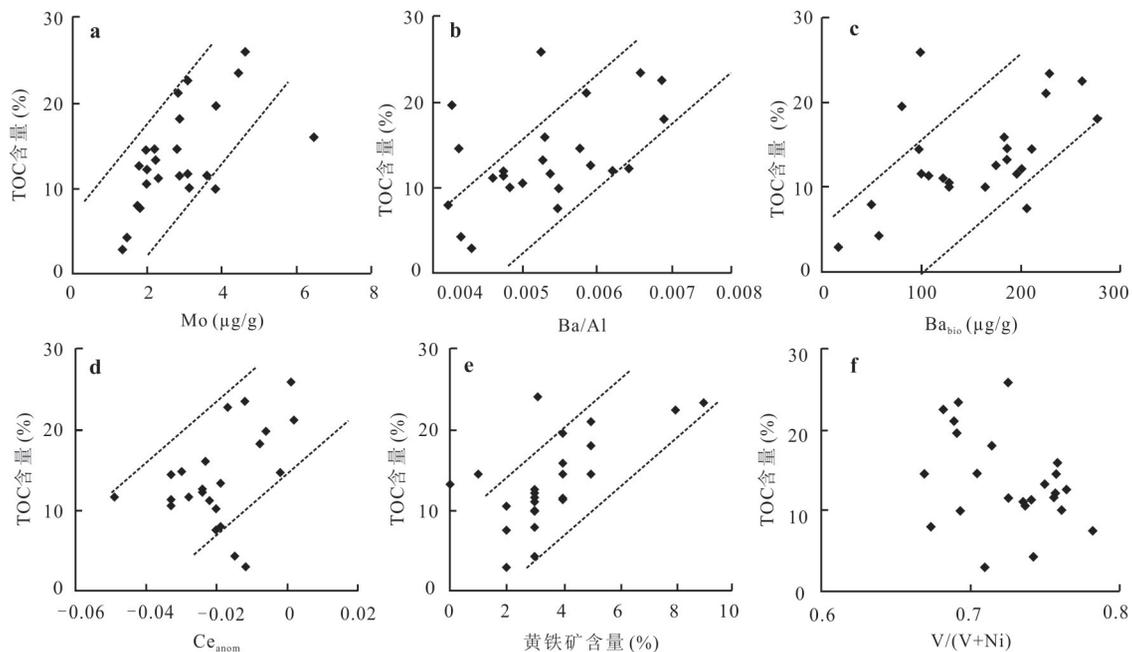


图 15 茂页 1 井油柑窝组油页岩古生产力 (a~c) 和古氧化还原 (d~f) 指标与 TOC 相关性

Fig.15 Correlations of paleoproductivity (a~c) and paleo-redox (d~f) parameters with TOC for Youganwo oil shale in MY1 well

综合各要素之间的关系可以看出,古氧化还原条件和古生产力与 TOC 含量具有很好的协同变化关系,反映了有机质的来源和保存是促进有机质聚集的要素,其中古生产力直接影响油页岩的品质和发育特征,具有丰富有机质来源的表层生产力是油页岩形成的首要条件,有机质堆积聚集的主要原因

是生产力的提高(孟庆涛等, 2012)。缺氧底层水的保存条件使有机质含量增加也不可忽视,在缺氧环境中有机质被分解的可能性很小,利于有机质保存,是有机质聚集的促进因素。

## 5.2 有机质富集模式

茂名盆地油柑窝组油页岩是古构造、古地理、

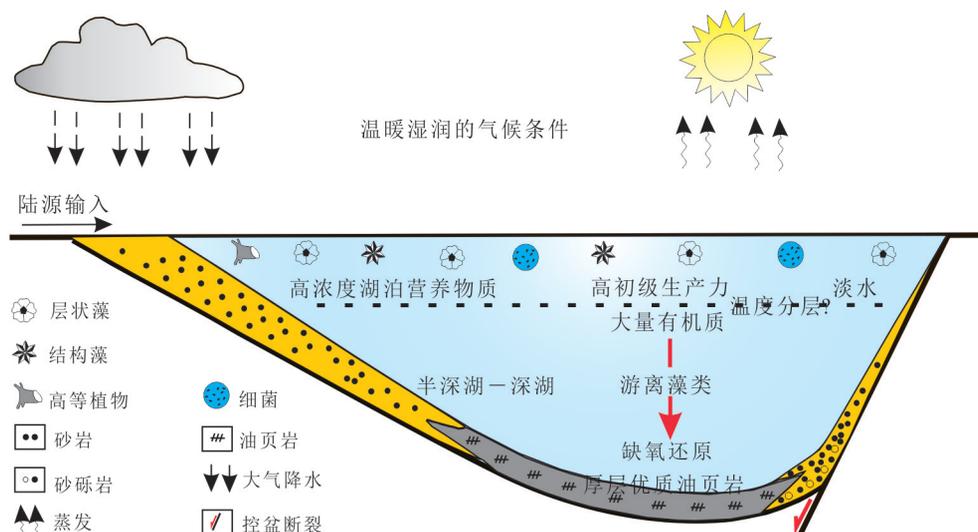


图16 茂名盆地油柑窝组有机质富集模式

Fig.16 Organic matter enrichment pattern of Youganwo Formation in Maoming basin

据孟庆涛等(2020)修改

古气候等多因素综合作用的结果.北西向高棚岭断裂对盆地的形成起着重要的控制作用,油页岩矿带的空间分布受南西缘次一级的金塘断裂、新圩断裂的控制.油柑窝时期,高棚岭断裂南西盘下降速度大于西南边缘区,温暖湿润的气候环境带来了充沛的降水量,使湖盆水体加深、为有机质的聚集提供了足够的空间.油柑窝早期为湖沼相,排水不良,为停滞的还原环境,在油柑窝底部形成一套灰色夹褐煤碳质页岩;至油柑窝组中晚期,为半深湖—深湖相沉积,地壳下沉、湖盆水域加宽,大量陆源碎屑输入进入湖泊,带来了丰富的影响物质,促进湖泊表面频发藻类勃发现象,极大地提高了初级生产力,为有机质的聚集提供了物质基础.油页岩沉积总体比较稳定、厚度较大,在盆地内具有广泛的可对比性.较低的盐度和淡水环境,为藻类的发育提供了良好的环境,这些浮游生物死亡后,进入到湖底沉积物中,堆积富集并演化成有机质,并在缺氧还原环境下,沉积有机质能很好地保存,形成了高品质油页岩(图16).茂名盆地油柑窝组油页岩的成因模式为:在温暖湿润气候条件下,陆源碎屑进入湖泊,促进表层生产力的极大提升,藻类大量繁盛,这是优质油页岩沉积的先决条件,初级生产力增大是有机质聚集的关键性因素,温暖潮湿气候下的温度分层形成的缺氧环境极大提升了有机质保存效率,是有机质聚集的有利因素.

不同盆地油页岩形成的古环境不同,主控因素也存在一定的差异,进而会造成油页岩展布和品质

的差异.相比较于茂名盆地,抚顺和桦甸盆地油页岩有机质富集机制已开展较为细致的研究工作.茂名与抚顺、桦甸地区油页岩存在较多相似之处,均形成于断陷盆地半深湖—深湖环境,古水体环境均为还原条件.不同之处在于,茂名和抚顺盆地有机质以淡水湖泊的水生生物为主,气候条件温暖湿润,形成了巨厚层的优质油页岩(刘招君等,2009);桦甸盆地有机质以淡水—半咸水藻类和高等植物混合来源为主,气候条件干湿交替、盐度分层明显,形成了多层薄层油页岩(胡晓峰等,2012).茂名和抚顺盆地优质油页岩是以初级生产力主控,缺氧还原条件起保存促进作用;桦甸盆地半咸水的盐度分层和缺氧还原条件能够更好地保存有机质,是主要控制因素.优质油页岩形成的模式不同,油页岩的品质也存在较大差异,茂名和抚顺油页岩为巨厚层中含油率,桦甸盆地为品质更好的高含油率薄层油页岩,这些差异也为油页岩的原位热改造提供了参考.

## 6 结论

(1) 茂名盆地油柑窝组发育厚层优质油页岩,具有较高的有机质丰度、有机质类型为I—II<sub>1</sub>型,有机质成熟度为未成熟—低成熟演化阶段.矿物组成以黏土矿物和石英为主,黄铁矿亦是主要的矿物类型,多以草莓体黄铁矿形态产出.

(2) 古气候指标C、Sr/Cu和Rb/Sr等指示油柑

窝组沉积于温暖湿润的水体环境; Sr/Ba、Ba/Ga、Ca/(Fe+Ca)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO 以及缺少伽马蜡烷等反映古水体为淡水环境。Mo 含量、Ba/Al 和 Ba<sub>bio</sub> 和生物标志物特征显示茂名盆地油柑窝组具有很高的初级生产力; V/(V+Ni)、Ce<sub>anom</sub>、Th/U、草莓体黄铁矿特征和 Pr/nC<sub>17</sub>-Ph/nC<sub>18</sub> 交汇图表明油柑窝组为还原环境; Zr/Al、Rb/K 和 MnO 含量指示油柑窝组时期水体为半深湖—深湖环境。

(3) 综合各要素, 提出了茂名盆地油柑窝组油页岩有机质聚集模式: 在温暖湿润气候条件下, 风化形成的陆源碎屑进入淡水湖泊, 为浮游生物的繁盛和勃发提供了良好的环境, 促进水体表层生产力极大地提升, 是有机质聚集和优质油页岩形成的首要因素, 半深湖—深湖的缺氧还原条件提高了有机质保存效率、有机质被很好地保存下来, 是有机质聚集的有利因素。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

## References

- Algeo, T. J., Henderson, C. M., Tong, J. N., et al., 2013. Plankton and Productivity during the Permian-Triassic Boundary Crisis: An Analysis of Organic Carbon Fluxes. *Global and Planetary Change*, 105(6): 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.02.008>
- Cao, X.X., Song, Z.G., Li, Y., et al., 2016. The Characteristics of Organic Matter in Maoming Oil Shales and Their Paleoclimate Significance. *Earth Science Frontiers*, 23(3): 243–252 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C., Mu, C.L., Zhou, K.K., et al., 2016. The Geochemical Characteristics and Factors Controlling the Organic Matter Accumulation of the Late Ordovician-Early Silurian Black Shale in the Upper Yangtze Basin, South China. *Marine and Petroleum Geology*, 76(9): 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.04.022>
- Das, B. K., Haake, B. G., 2003. Geochemistry of Rewalsar Lake Sediment, Lesser Himalaya, India: Implications for Source-Area Weathering, Provenance and Tectonic Setting. *Geosciences Journal*, 7(4): 299–312. <https://doi.org/10.1007/BF02919560>
- Dong, T., Harris, N. B., Ayranci, K., 2018. Relative Sea-Level Cycles and Organic Matter Accumulation in Shales of the Middle and Upper Devonian Horn River Group, Northeastern British Columbia, Canada: Insights into Sediment Flux, Redox Conditions, and Bioproductivity. *GSA Bulletin*, 130(5/6): 859–880.
- Francois, R., Honjo, S., Manganini, S. J., et al., 1995. Biogenic Barium Fluxes to the Deep Sea: Implications for Paleoproductivity Reconstruction. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 289–303. <https://doi.org/10.1029/95gb00021>
- Guo, W., Feng, Q. L., Khan, M.Z., 2021. Organic Matter Enrichment Mechanism of Black Shale in Wufeng-Longmaxi Formations: A Case Study from Jiaoye 143-5 Well at Chongqing. *Earth Science*, 46(2): 572–582 (in Chinese with English abstract).
- Haskin, M. A., Haskin, L. A., 1966. Rare Earths in European Shales: A Redetermination. *Science*, 154(3748): 507–509. <https://doi.org/10.1126/science.154.3748.507>
- Hatch, J.R., Leventhal, J.S., 1992. Relationship between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A.. *Chemical Geology*, 99(1/2/3): 65–82. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90031-Y](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90031-Y)
- He, L., Wang, Y.P., Chen, D.F., et al., 2019. Relationship between Sedimentary Environment and Organic Matter Accumulation in the Black Shale of Wufeng-Longmaxi Formations in Nanchuan Area, Chongqing. *Natural Gas Geoscience*, 30(2): 203–218 (in Chinese with English abstract).
- Hou, H.H., Shao, L.Y., Li, Y.H., et al., 2022. Effect of Paleoclimate and Paleoenvironment on Organic Matter Accumulation in Lacustrine Shale: Constraints from Lithofacies and Element Geochemistry in the Northern Qaidam Basin, NW China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208: 109350. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109350>
- Hou, L.Y., Sun, P.C., Liu, Z.J., et al., 2021. Qingshankou Formation Oil Shale Exploitation In-Situ Pilot Test Demonstration Area Optimization. *Coal Geology of China*, 33(8): 9–16 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X.F., Liu, Z.J., Liu, R., et al., 2012. Clay Mineral and Inorganic Geochemical Characteristics of Eocene Huadian Formation in Huadian Basin and Their Paleoenvironment Implications. *Journal of China Coal Society*, 37(3): 416–423 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.D., Zhang, E.L., 2002. Paleoclimate Implication of Rb/Sr Ratios from Lake Sediments. *Science Technology and Engineering*, 2(3): 20–22 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Kang, Z. Q., Zhao, Y. S., Yang, D., et al., 2021. Pilot Test of In-Situ Steam Injection for Oil and Gas Production from Oil Shale and Applicability of Multi-Mode In-Situ Thermal Recovery Technology. *Acta Petrolei Sinica*, 42(11): 1458–1468 (in Chinese with English abstract).
- Kuypers, M. M. M., Pancost, R. D., Nijenhuis, I. A., et al., 2002. Enhanced Productivity Led to Increased Organic Carbon Burial in the Euxinic North Atlantic Basin during the Late Cenomanian Oceanic Anoxic Event. *Paleoceanography*, 17(4): 3–1–3–13. <https://doi.org/10.1029/2000pa000569>
- Li, D.C., Zhu, J.W., Yan, H.R., et al., 2006. Sedimentary Characteristics and Distribution Rule of Oil Shale in Maoming Basin in Guangdong Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(6): 938–943 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., Liu, Q.Y., Bi, H., et al., 2021. Analysis of the Difference in Organic Matter Preservation in Typical Lacustrine Shale under the Influence of Volcanism and Transgression. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 632–642 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Wu, S.H., Xia, D.L., et al., 2020. Major and Trace Element Geochemistry of the Lacustrine Organic-Rich Shales from the Upper Triassic Chang 7 Member in the Southwestern Ordos Basin, China: Implications for Paleoenvironment and Organic Matter Accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 111(1): 852–867. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.09.003>
- Li, Q.Q., Lan, B.F., Li, G.Q., et al., 2021. Element Geochemical Characteristics and Their Geological Significance of Wufeng-Longmaxi Formation Shales in North Margin of the Central Guizhou Uplift. *Earth Science*, 46(9): 3172–3188 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C.L., Xu, J.L., 2002. Estimation Method on Productivity of Oil-Producing Lake and a Case Study. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 144–150 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D.X., Wang, H.Y., Zheng, D.W., et al., 2009. World Progress of Oil Shale In-Situ Exploitation Methods. *Natural Gas Industry*, 29(5): 128–132, 148 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. M., Jiang, L., Liu, B. J., et al., 2023. Investigation of Organic Matter Sources and Depositional Environment Changes for Terrestrial Shale Succession from the Yuka Depression: Implications from Organic Geochemistry and Petrological Analyses. *Journal of Earth Science*, 34(5): 1577–1595. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1617-1>
- Liu, Y.H., Li, K.J., Liu, D.N., et al., 2020. Evaluation and Analysis of Paleoenvironments of the Neogene Oil Shale of Zhangcun Formation, Qinshui Basin. *Coal Geology & Exploration*, 48(5): 16–25 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.J., Meng, Q.T., Liu, R., et al., 2009. Geochemical Characteristics of Oil Shale of Eocene Jijuntun Formation and Its Geological Significance, Fushun Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2340–2350 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X.Z., Shen, J., Guo, W., et al., 2021. Influence of Mercury Geochemistry and Volcanism on the Enrichment of Organic Matter near the Ordovician Silurian Transition in the Middle and Upper Yangtze. *Earth Science*, 46(7): 2329–2340 (in Chinese with English abstract).
- Luo, H.W., Hou, M.C., Liu, Y., et al., 2019. Geochemical Characteristics and Organic Matter Enrichment of the Lower Section of Luzhai Formation in Luzhai Area, Guangxi, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46(2): 227–239 (in Chinese with English abstract).
- Ma, F. H., Zhang, Y., Pan, J. L., et al., 2021. Geochemical Characteristics of Rare Earth Element and Their Geological Significance of Mud-Shale in Cretaceous Madoangshan Formation, Liupanshan Basin. *Geological Review*, 67(1): 209–217 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Q. T., Li, J. G., Liu, Z. J., et al., 2020. Organic Geochemical Characteristics and Depositional Environment of Oil Shale of Eocene of Paleocene Youganwo Formation in Yangjiao Mining Area of Maoming Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(2): 356–367 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Q. T., Liu, Z. J., Hu, F., et al., 2012. Productivity of Eocene Ancient Lake and Enrichment Mechanism of Organic Matter in Huadian Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(5): 38–44 (in Chinese with English abstract).
- Miao, Y., Sang, S.X., Lin, H.X., et al., 2007. Trace Element Signatures of the Carboniferous-Permian Deposits in the Bohai Gulf Basin and Their Facies Significance.

- Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(4): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Moradi, A. V., Akkaya, A. S., 2016. Geochemistry of the Miocene Oil Shale (Hançili Formation) in the Çankırı–Çorum Basin, Central Turkey: Implications for Paleoclimate Conditions, Source–Area Weathering, Provenance and Tectonic Setting. *Sedimentary Geology*, 341(7): 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.sed-geo.2016.05.002>
- Pattan, J.N., Pearce, N.J.G., Mislankar, P.G., 2005. Constraints in Using Cerium–Anomaly of Bulk Sediments as an Indicator of Paleo Bottom Water Redox Environment: A Case Study from the Central Indian Ocean Basin. *Chemical Geology*, 221(3/4): 260–278. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.06.009>
- Qiao, S. H., Li, Y. H., Guo, W., et al., 2019. Inorganic Geochemical Characteristics and Paleoenvironment of Chang 7 Oil Shale in Yanchang Formation, Tongchuan Area, Shaanxi Province. *Petroleum Geology & Experiment*, 41(1): 121–126 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Z., Wang, Q. C., 2012. Main Factors Controlling the Deposition of the Middle–Upper Permian Source Rocks in Laibin Area and Its Tectonic Setting. *Chinese Journal of Geology*, 47(4): 1085–1098 (in Chinese with English abstract).
- Sarki Yandoka, B. M., Abdullah, W. H., Abubakar, M. B., et al., 2015. Geochemical Characterisation of Early Cretaceous Lacustrine Sediments of Bima Formation, Yola Sub-Basin, Northern Benue Trough, NE Nigeria: Organic Matter Input, Preservation, Paleoenvironment and Palaeoclimatic Conditions. *Marine and Petroleum Geology*, 61(3): 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.12.010>
- Shen, Y. L., Qin, Y., Wang, G. G. X., 2017. Sedimentary Control on the Formation of a Multi–Superimposed Gas System in the Development of Key Layers in the Sequence Framework. *Marine and Petroleum Geology*, 88(12): 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.08.024>
- Sun, S. S., Yao, Y. B., Lin, W., 2015. Elemental Geochemical Characteristics of the Oil Shale and the Paleolake Environment of the Tongchuan Area, Southern Ordos Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 642–645 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Black Well Scientific Publications, Oxford, 28–30.
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., et al., 2006. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, 232(1/2): 12–32. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>
- Wang, D. Y., Tang, D. Z., Gou, M. F., et al., 2007. Oil–Shale Geology of Lucaogou Formation in Fukang Area on Southern Margin of Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 12(6): 18–22, 71 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Y., Cheng, A. J., Zhuo, E. J., et al., 1994. Paleosalinity Index of Holocene Sediments in Taihu Lake and Its Environmental Significance. *Journal of Stratigraphy*, 18(3): 196–202 (in Chinese with English abstract).
- Wei, H., Feng, Q. L., Yu, J. X., et al., 2022. Characteristics and Sources of Organic Matter from the Early Cambrian Niutitang Formation and Its Preservation Environment in Guizhou. *Journal of Earth Science*, 33(4): 933–944. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1371-1>
- Wei, W., Algeo, T. J., 2020. Elemental Proxies for Paleosalinity Analysis of Ancient Shales and Mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287(10): 341–366. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.06.034>
- Wu, D. X., Zhou, J. G., Ren, J. F., et al., 2023. Reconstruction of Depositional Environment and Source–Reservoir Configuration Relationship of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin. *Earth Science*, 48(2): 553–567 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. Y., Zhao, X. Z., Wang, E. N., 2021. Sedimentary Environment and Organic Enrichment Mechanisms of Lacustrine Shale: A Case Study of the Paleogene Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 573: 110404. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110404>
- Xu, C., 2018. Geochemical Characteristics of Oil Shale in Youganwo Formation and Its Aggregation Factors of Organic Matter, Maoming Basin (Dissertation). Jinlin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. D., Zhang, Y. Z., Huang, Y. W., et al., 2013. Main Controlling Factors of Oil Shale Development in Liushang Formation, Wushi Depression, Beibu Gulf Basin. *Acta Petroli Sinica*, 34(S2): 66–73 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. B., Li, F., Zhang, J. Q., et al., 2022. Enrichment

- Characteristics of Organic Matter in the Permian Lucaogou Formation in Shitoumei Area, Santanghu Basin. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 4010—4022 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. J., Cheng, R. H., Wang, L. L., et al., 2009. Paleosalinity Records to Sea Level Change of the Northern Margin of the South China Sea in Early Jurassic. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1147—1154 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. J., Wang, Y., Jiang, S., 2022. Impact of Input, Preservation and Dilution on Organic Matter Enrichment in Lacustrine Rift Basin: A Case Study of Lacustrine Shale in Dehui Depression of Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 135: 105386. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105386>
- Yang, J. H., Luo, C. G., Du, S. J., et al., 2020. Discussion on the Applicability of Paleoenvironmental Index for Sedimentary Rocks with High Clay Content. *Acta Mineralogica Sinica*, 40(6): 723—733 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. F., Wu, Z. J., 1983. Sporopollen Assemblage and Its Geological Age in Maowu Well, Maoming Basin, Guangdong Province. *Journal of Stratigraphy*, 7(2): 112—118, 163—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Tao, S., Tang, D. Z., et al., 2017. Geochemical Characteristics of Trace Elements and Rare Earth Elements in Permian Lucaogou Oil Shale, Santanghu Basin. *Journal of China Coal Society*, 42(8): 2081—2089 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Liang, F., Wang, H. Y., et al., 2018. Elements Geochemistry and Paleo Sedimentary Significance: A Case Study of the Wufeng-Longmaxi Shale in Southeast Chongqing. *Journal of China University of Mining & Technology*, 47(2): 380—390 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. J., Kang, Z. H., Hou, Y. H., et al., 2020. Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements and Their Geological Significance of Permian Shales in Lower Yangtze Area. *Earth Science*, 45(11): 4118—4127 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. D., Lei, Y. H., Zhang, L. Q., et al., 2015. Characteristics of Element Geochemistry and Paleo Sedimentary Environment Evolution of Zhangjiatan Shale in the Southeast of Ordos Basin and Its Geological Significance for Oil and Gas. *Natural Gas Geoscience*, 26(7): 1395—1404 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 曹新星, 宋之光, 李艳, 等, 2016. 茂名油页岩沉积有机质特征及古气候意义. *地学前缘*, 23(3): 243—252.
- 郭伟, 冯庆来, Maliha Zareen Khan, 2021. 重庆焦页143-5井五峰组—龙马溪组黑色页岩有机质富集机理. *地球科学*, 46(2): 572—582.
- 何龙, 王云鹏, 陈多福, 等, 2019. 重庆南川地区五峰组—龙马溪组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系. *天然气地球科学*, 30(2): 203—218.
- 侯丽云, 孙平昌, 刘招君, 等, 2021. 松辽盆地扶余—长春岭矿区青山口组油页岩原位开采中试示范区优选. *中国煤炭地质*, 33(8): 9—16.
- 胡晓峰, 刘招君, 柳蓉, 等, 2012. 桦甸盆地始新统桦甸组黏土矿物和无机地球化学特征及其古环境意义. *煤炭学报*, 37(3): 416—423.
- 金章东, 张恩楼, 2002. 湖泊沉积物Rb/Sr比值的古气候含义. *科学技术与工程*, 2(3): 20—22.
- 康志勤, 赵阳升, 杨栋, 等, 2021. 油页岩原位注蒸汽开采油气中试与多模式原位热采技术的适用性分析. *石油学报*, 42(11): 1458—1468.
- 李殿超, 朱建伟, 严焕榕, 等, 2006. 广东省茂名盆地油页岩的沉积特征及分布规律. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(6): 938—943.
- 李鹏, 刘全有, 毕赫, 等, 2021. 火山活动与海侵影响下的典型湖相页岩有机质保存差异分析. *地质学报*, 95(3): 632—642.
- 李琪琪, 蓝宝锋, 李刚权, 等, 2021. 黔中隆起北缘五峰—龙马溪组页岩元素地球化学特征及其地质意义. *地球科学*, 46(9): 3172—3188.
- 刘传联, 徐金鲤, 2002. 生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例. *沉积学报*, 20(1): 144—150.
- 刘德勋, 王红岩, 郑德温, 等, 2009. 世界油页岩原位开采技术进展. *天然气工业*, 29(5): 128—132, 148.
- 刘燕海, 李琨杰, 刘东娜, 等, 2020. 沁水盆地新近纪张村组油页岩评价及古环境分析. *煤田地质与勘探*, 48(5): 16—25.
- 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 等, 2009. 抚顺盆地始新统将军屯组油页岩地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 25(10): 2340—2350.
- 卢贤志, 沈俊, 郭伟, 等, 2021. 中上扬子地区奥陶纪—志留纪之交火山作用对有机质富集的影响. *地球科学*, 46(7): 2329—2340.
- 罗宏谓, 侯明才, 刘宇, 等, 2019. 桂中鹿寨地区鹿寨组下段地球化学特征及有机质富集因素. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 46(2): 227—239.
- 马风华, 张勇, 潘进礼, 等, 2021. 六盘山盆地白垩系马东山

- 组泥页岩稀土元素地球化学特征及地质意义. 地质论评, 67(1): 209—217.
- 孟庆涛, 李金国, 刘招君, 等, 2020. 茂名盆地羊角含矿区始新统油柑窝组油页岩有机地球化学特征及沉积环境. 吉林大学学报(地球科学版), 50(2): 356—367.
- 孟庆涛, 刘招君, 胡菲, 等, 2012. 桦甸盆地始新世古湖泊生产力与有机质富集机制. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(5): 38—44.
- 苗耀, 桑树勋, 林会喜, 等, 2007. 渤海湾盆地石炭—二叠系微量元素特征及其指相意义. 沉积与特提斯地质, 27(4): 27—32.
- 乔世海, 李玉宏, 郭望, 等, 2019. 陕西铜川地区延长组长 7 油页岩无机地球化学特征及古环境恢复. 石油实验地质, 41(1): 121—126.
- 邱振, 王清晨, 2012. 来宾地区中晚二叠世之交烃源岩沉积的主控因素及大地构造背景. 地质科学, 47(4): 1085—1098.
- 孙莎莎, 姚艳斌, 吝文, 2015. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区油页岩元素地球化学特征及古湖泊水体环境. 矿物岩石地球化学通报, 34(3): 642—645.
- 王东营, 汤达祯, 苟明福, 等, 2007. 准噶尔南缘阜康地区芦草沟组油页岩地质特征. 中国石油勘探, 12(6): 18—22, 71.
- 王子玉, 程安进, 卓二军, 等, 1994. 太湖全新世沉积物的古盐度指标及其环境意义. 地层学杂志, 18(3): 196—202.
- 吴东旭, 周进高, 任军峰, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积环境恢复与源储配置关系. 地球科学, 48(2): 553—567.
- 徐川, 2018. 茂名盆地古近系油柑窝组油页岩地球化学特征及有机质聚集条件(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 徐新德, 张迎朝, 黄义文, 等, 2013. 北部湾盆地乌石凹陷流沙港组油页岩发育的主控因素. 石油学报, 34(增刊 2): 66—73.
- 徐银波, 李锋, 张家强, 等, 2022. 三塘湖盆地石头梅地区二叠系芦草沟组有机质富集特征. 地质学报, 96(11): 4010—4022.
- 许中杰, 程日辉, 王嘹亮, 等, 2009. 南海北部陆缘早侏罗世海平面变化的古盐度记录. 沉积学报, 27(6): 1147—1154.
- 杨季华, 罗重光, 杜胜江, 等, 2020. 高黏土含量沉积岩古环境指标适用性讨论. 矿物学报, 40(6): 723—733.
- 余金凤, 吴作基, 1983. 广东茂名盆地茂五井的孢粉组合及其地质时代的探讨. 地层学杂志, 7(2): 112—118, 163—164.
- 张国伟, 陶树, 汤达祯, 等, 2017. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组油页岩微量元素和稀土元素地球化学特征. 煤炭学报, 42(8): 2081—2089.
- 张琴, 梁峰, 王红岩, 等, 2018. 页岩元素地球化学特征及古环境意义: 以渝东南地区五峰—龙马溪组为例. 中国矿业大学学报, 47(2): 380—390.
- 赵晨君, 康志宏, 侯阳红, 等, 2020. 下扬子二叠系泥页岩稀土元素地球化学特征及地质意义. 地球科学, 45(11): 4118—4127.
- 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义. 天然气地球科学, 26(7): 1395—1404.