

郑仰帝, 彭光荣, 肖张波, 等. 古近系文昌组湖盆古环境及其对烃源岩的控制作用——以珠江口盆地陆丰15洼为例[J]. 华南地震, 2024, 44(1): 11–24. [ZHENG Yangdi, PENG Guangrong, XIAO Zhangbo, et al. Lake Basin Paleoenvironment of Paleogene Wenchang Formation and Its Control Effect on Hydrocarbon Source Rocks—Taking Lufeng 15 Depression in the Pearl River Mouth Basin as an Example[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1):11–24]

古近系文昌组湖盆古环境及其对烃源岩的控制作用 ——以珠江口盆地陆丰15洼为例

郑仰帝^{1,2}, 彭光荣^{1,2}, 肖张波^{1,2}, 黄鑫^{1,2}, 何雁兵^{1,2}, 杨兴业^{1,2}

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054; 2. 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054)

摘要: 文昌组湖相泥岩是珠江口盆地陆丰15洼的主力源岩层段, 为了恢复文昌期湖盆的古环境, 进一步探索优质烃源岩的发育模式, 对洼陷内L15-1井的文昌组泥岩开展古生物、有机地球化学、有机岩石学和元素地球化学特征综合分析。研究表明: 文昌组各层段古环境差异显著, 文一~文三段及文五段沉积期水体相对较浅, 主要为充氧远源的滨浅湖环境, 古生产力水平一般; 文四段沉积期水体较深, 半深湖—深湖环境, 古生产力水平最高。陆丰15洼文昌期古湖盆在淡水—微咸水介质条件下, 烃源岩的质量与古水深、古生产力以及古氧相之间呈现较好的正相关关系, 文昌组沉积期古气候整体差异不大, 温暖湿润的气候对优质烃源岩发育有利。古生产力及古氧相是陆丰15洼文昌组有机质富集的主控因素, 实际上是古生产力与保存条件良好的匹配, 共同控制了有效烃源岩的发育。

关键词: 古氧相; 古生产力; 优质烃源岩; 文昌组; 陆丰15洼

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0011-14

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.02

Lake Basin Paleoenvironment of Paleogene Wenchang Formation and Its Control Effect on Hydrocarbon Source Rocks—Taking Lufeng 15 Depression in the Pearl River Mouth Basin as an Example

ZHENG Yangdi^{1,2}, PENG Guangrong^{1,2}, XIAO Zhangbo^{1,2}, HUANG Xin^{1,2},
HE Yanbing^{1,2}, YANG Xingye^{1,2}

(1. CNOOC China Ltd., Shenzhen, Shenzhen 518054, China; 2. CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen 518054, China)

Abstract: The lacustrine mudstone of Wenchang Formation is the main source rock section of Lufeng 15 depression in the Pearl River Mouth Basin. In order to restore the paleoenvironment of Wenchang Lake Basin and

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 中海油科研项目“陆丰13洼陡坡带构造—沉积响应及油气成藏规律研究”(SCKY-2023-SZ-06)

作者简介: 郑仰帝(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气成藏地球化学方面的研究工作。

E-mail: zhengyd3@enooc.com.cn

further explore the development model of high-quality hydrocarbon source rocks, a comprehensive analysis of paleontology, organic geochemistry, organic petrology and element geochemistry characteristics of Wenchang Formation mudstone in well L15-1 in the depression was carried out. The research results indicate that there are significant differences in the paleoenvironment of each layer of the Wenchang Formation, with relatively shallow water bodies during the sedimentary periods of the Wen-1 to Wen-3 and Wen-5 sections, mainly the shore-shallow lake environment with oxygenated distant sources, and average levels of paleoproductivity; during the sedimentary period of Wen-4 section, the water body was relatively deep, with a semi-deep lake to deep lake environment and the highest level of paleoproductivity. The quality of hydrocarbon source rocks in the Wenchang period paleo-basin of Lufeng 15 depression is positively correlated with paleowater depth, paleoproductivity, and paleo-oxygenation facies under the condition of freshwater and brackish water medium. The difference in paleoclimate during the sedimentation period of Wenchang Formation is not significant, and a warm and humid climate is favorable for the development of high-quality hydrocarbon source rocks. Paleoproductivity and paleo-oxygenation facies are the main controlling factors for the enrichment of organic matter in Wenchang Formation of Lufeng 15 Depression. In fact, paleoproductivity and preservation condition are well matched, which jointly control the development of effective source rocks.

Keywords: Paleo-oxygenation facies; Paleoproductivity; High-quality source rock; Wenchang formation; Lufeng 15 Depression

0 引言

烃源岩的时空展布对于油气资源的分布至关重要, 而古湖泊环境的变化往往造成烃源岩沉积有机相的差异, 使得烃源岩的发育具有很强的非均质性, 进而影响到资源潜力的评价及勘探方向的选择。近年来关于湖泊古环境的重建及其对烃源岩控制作用的研究受到了普遍关注, 古生物、微量元素和碳氧稳定同位素等参数陆续应用到古湖泊环境的反演中来。Koch和Diasty等利用孢粉相分析烃源岩的有机质类型和生烃能力, 同时还还原了有机质生源和沉积环境^[1-2]; Piper和Crusius等等普遍认为微量元素是追踪有机质沉积条件(如氧化还原条件、盐度等)的良好手段^[3-4]; Aharon和沈俊等将碳氧稳定同位素应用在大洋缺氧事件和古生产力等研究中^[5-6]。前人对陆丰凹陷烃源岩的研究已经取得了一些成果, 关注点在于烃源岩分布特征和油源对比等方面, 认为陆丰凹陷文昌组发育了一套沉积厚度大、分布广泛且有机质丰度高、类型好的半深湖-深湖相优质烃源岩^[7-8], 但是针对烃源岩发育时期的古湖泊环境缺乏相关研究, 忽略了湖泊古环境对烃源岩地球化学特征和时空展布的控制作用。

本文从紧邻陆丰15洼洼陷中心的L15-1井文昌组地层, 采集到41个泥岩样品, 开展了古生物、有机岩石学、有机地球化学及元素测试等实验分

析, 尝试综合不同类型的参数, 以更准确地反映古湖泊环境演化特征, 分别从古气候、水体盐度、古水深、古生产力和古氧相5个方面进行系统分析, 试图恢复文昌组的古湖泊环境, 寻找烃源岩有机质富集的主控因素, 进一步探讨优质烃源岩的发育模式。

1 区域地质概况

珠江口盆地地处华南大陆南缘, 构造上受欧亚板块、太平洋板块和印度洋板块交汇作用的影响, 呈NE—SW向展布, 是一个发育于燕山期花岗岩及前第三系褶皱基底之上的中—新生代大型沉积盆地^[9]。盆地自北向南依次划分为北部隆起带、北部坳陷带(珠一及珠三坳陷)、中央隆起带、南部坳陷带(珠二坳陷)和南部隆起带5个一级构造单元(图1a), 呈现出“隆坳相间、三隆两坳”的构造格局^[10-11]。陆丰凹陷是位于北部坳陷带珠一坳陷东北部的次级构造单元(图1b), 大致呈NE—SW向条带状展布, 凹陷面积约7760 km², 其北部为北部隆起带, 东接海丰凸起, 南临东沙隆起, 西靠惠陆低凸起^[12-13]。陆丰凹陷中部被陆丰中低凸起和惠陆低凸起分隔开来, 整体上形成“两凹夹一隆”的构造格局, 分为陆丰南地区和陆丰北次地区, 其中陆丰南属于珠江口盆地油气勘探程度较高地区之一, 内部又可分为多个洼陷, 由南到北依次为陆丰22洼、陆丰15洼、陆丰13洼、陆丰07

洼、惠州11洼和惠州05洼^[14], 研究区陆丰15洼位于陆丰南地区。

陆丰凹陷新生代盆地演化可划分为裂谷阶段、拗陷阶段和断层活化期三个阶段, 中间共发生过5次大型构造运动, 即珠琼运动I幕、珠琼运动II幕、南海运动、白云运动和东沙运动, 地震标志层分别对应T_g、T₈₀、T₇₀、T₆₀和T₃₂反射层。受构造活动的影响, 自下而上发育了始新世文昌组、恩平组, 渐新世珠海组, 中新世珠江组、韩江组和粤海组, 上新世万山组和第四系地层^[12, 15]。盆地裂谷阶段包括裂陷I幕和裂陷II幕, 分别沉积文昌

组和恩平组地层, 整体为陆相湖盆沉积, 两幕裂陷都经历了构造活动由初始裂陷到强烈裂陷, 再到最后裂陷萎缩的过程(图2)。文昌组主要发育半深湖—深湖相泥岩, 夹杂着三角洲砂体沉积; 恩平期地形趋于平缓, 盆扩水浅, 发育浅水辫状河三角洲和滨浅湖沉积, 同时受热带湿润气候的影响, 部分发育含煤层系。采用前人沉积盆地划分方案, 陆丰凹陷文昌组自下而上划分为下文昌组(文六段、文五段和文四段)和上文昌组(文三段、文二段和文一段), 恩平组同样划分为下恩平组(恩四段和恩三段)和上恩平组(恩二段和恩一段)。

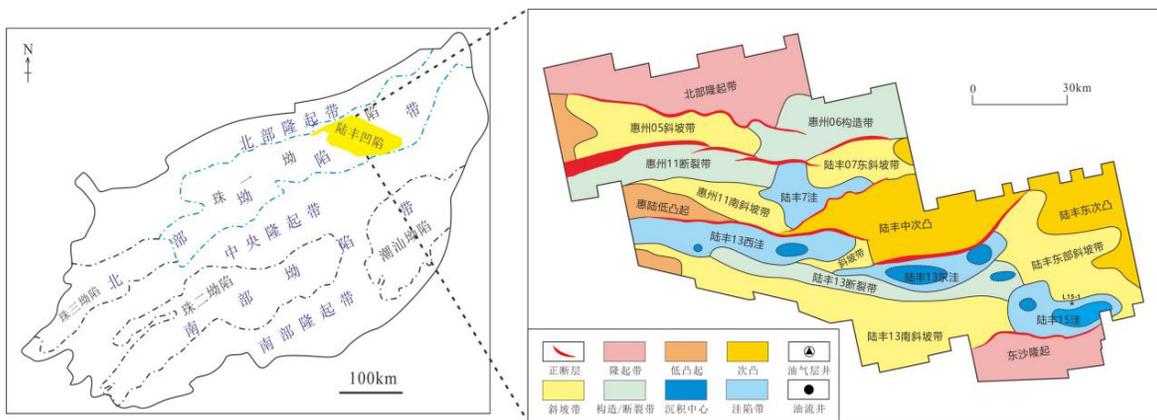


图1 珠江口盆地及研究区构造单元划分

Fig.1 Division of structural units in the Pearl River Mouth Basin and research area

地层/年代(Ma)				地震反射界面	三级层序	基准面旋回	构造演化	
古近系	渐新统	32	上恩平	恩一段	T70	EPSQ4	南海运动	
				恩二段	T71			EPSQ3
		33.9	下恩平	恩三段	T72	EPSQ2		裂陷II幕
				恩四段	T73			
	始新统	39	上文昌	文一段	T80	WCSQ6	裂陷I幕	
				文二段	T81			WCSQ5
				文三段	T82			WCSQ4
			下文昌	文四段	T83	WCSQ3		
				文五段	T84	WCSQ2		
				文六段	T85	WCSQ1		
	49	T _g				珠琼一幕		

图2 陆丰凹陷古近系层序地层划分表

Fig.2 Division table of Paleogene sequence stratigraphic in Lufeng Depression

2 实验方法

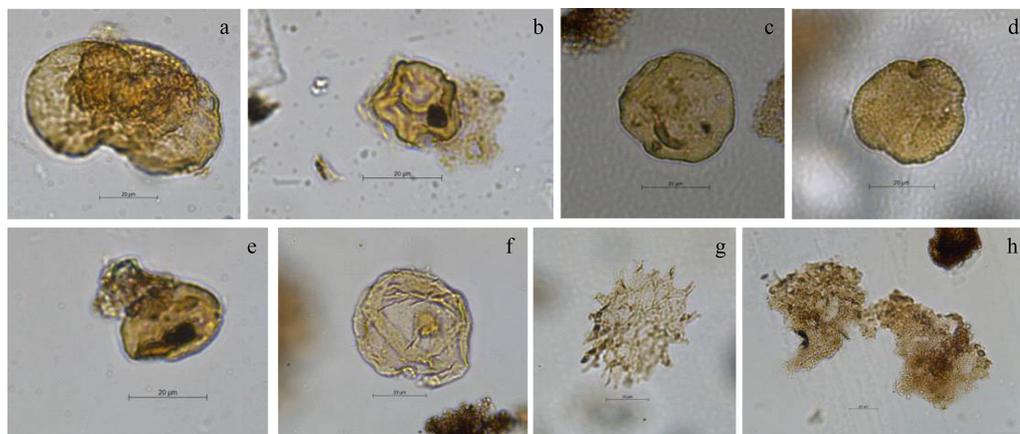
孢粉处理分析在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室进行,采用常规酸碱法及重液浮选法进行孢粉化石富集,依据石油行业SY/T 5915-2000分析标准。分析流程:称取10 g干重样品,加入石松孢子片一粒(内含石松孢子27 500粒),然后加入36%盐酸去除钙质,待反应完全后水洗,再加入20%氢氟酸去除硅质,水洗至中性后离心去水,加入重液(锌75 g,碘化钾645 g,氢碘酸655 ml)充分搅拌均匀后放入离心机内离心,然后将上层液体倒入装有5%的冰醋酸溶液的玻璃小烧杯中,取浑浊液体加蒸馏水离心,制片后在显微镜下观察;对孢粉的统计、鉴定工作在Olympus BX50生物显微镜下完成。最后将完成孢粉、藻类统计的剩余物充分稀释后进行有机屑鉴定统计。

元素测试由中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油实验中心深圳实验中心承担,其中主量元素使用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES)进行测试,采用国际单元素标准建立工作曲线,每个元素的工作曲线相关性均在0.999 99以上,相对标准偏差(RSD)控制在0.5%以内。雾化器压力18.0 PSI,辅助气流量0.51 pm,测试功率1150 W,进样速度1.39 mL/min。微量元素、稀土

元素使用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测试,采用国际多元素标准建立工作曲线,每个元素的工作曲线相关性均在0.999 99以上,相对标准偏差(RSD)均小于3%。测试过程中,用 0.01×10^{-6} 的内标溶液Rh对仪器的稳定性进行监控,测试功率1300 W,进样速度1.0 mL/min。

3 孢粉相特征

原始孢粉有机质在各种地质作用下会发生不同程度的降解、破坏,导致不易判断其来源,所以有关孢粉有机质的分类和命名至今仍存在争议^[16],然而孢粉相分析结果受孢粉有机质分类方案的影响相对较小,因此本次研究主要参考孢粉相分析结果。根据珠江口盆地烃源岩中主要的有机质类型,并参考李建国等^[17]的孢粉有机质分类方案,在L15-1井识别出以下组分:①无定形有机质(AOM, Amorphous Organic Matter),包括颗粒状和团块状,指示还原性水体沉积环境;②孢型(Palynomorphs),包括藻类体和孢粉体,然而不同组分之间生烃能力差异显著,如沟鞭藻、绿藻等主要对应干酪根显微组分中的腐泥组,而花粉、孢子化石多对应壳质组^[18];③植物碎屑(Phytoclasts),包括木质组织、角质体、木栓质体及丝炭,来源于高等植物,指示陆源水体环境(图3)。



(a)双束松,2550~2555 m;(b)变形桉木粉,3447~3450 m;(c)满点枫香粉,3447~3450 m;(d)细沟阔三沟粉,3522~3525 m;(e)小亨氏栎粉,3522~3525 m;(f)粒面球藻,3447~3450 m;(g)盘星藻,3603~3606 m;(h)无定形有机质,3420~3423 m。

图3 陆丰15洼L15-1井孢粉有机质镜下特征

Fig.3 Microscopic characteristics of sporopollen organic matter in well L15-1, Lufeng 15 depression

3.1 孢粉相划分

L15-1井2485~3708 m井段有孢粉机质百分含

量变化特征见图4,根据组分含量变化可以分为3个孢粉相:孢粉相A:文四—文五段(3420~3708 m),该井段以无定形有机质为主,含量为10.5%~

53.5%，其次为孢质，含量为21.0%~49.1%，降解木质和煤质含量较显著，分别为8.4%~33.5%和4.7%~21.4%，壳质、未降解木质和角质含量相对较低，三者分别是0.0%~7.7%、0.0%~4.2%和0.0%~1.8%。孢粉相B：恩平组、文一+二段及文三段(2784~3390 m)，该井段主要为降解木质、煤质和孢质，三者含量相当，分别为11.1%~69.7%、8.6%~50.9%和6.5%~54.3%，其次为无定形有机

质，含量为0.5%~45.9%，壳质、未降解木质和角质含量较低，分别为0.0%~9.0%、0.0%~5.9%和0.0%~4.5%。孢粉相C，珠海组(2485~2754 m)，该井段以煤质为主，含量为38.4%~74.5%，其次为降解木质，含量为17.7%~45.7%，孢质含量显著，为2.0%~11.3%，无定形有机质含量相对较低，为1.5%~6.5%，未降解木质、壳质和角质含量极低，分别为0.0%~3.2%、0.0%~2.3%和0.0%~1.8%。

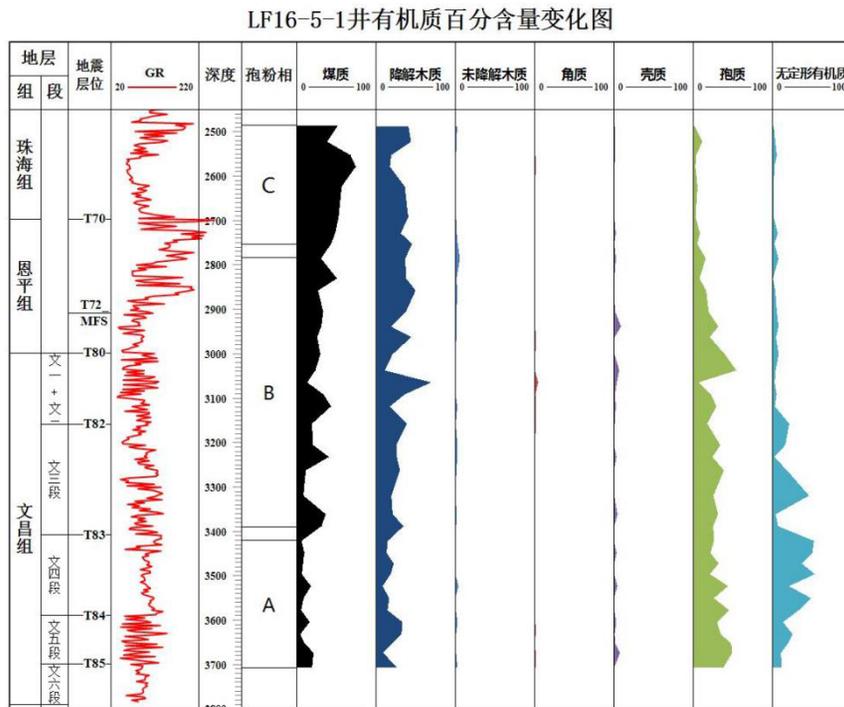


图4 L15-1井有机质百分含量变化图示

Fig.4 Schematic diagram of organic matter content change in Well L15-1

3.2 孢粉相古环境解释

L15-1井文昌组检测出高含量的淡水、半咸水浮游藻类，占比8.3%~88.7%，以粒面球藻为主，盘星藻含量也较显著，指示了水位整体较高的湖泊环境。将研究区文昌组孢粉有机质组成投至Tyson^[19]提出的孢粉相A-P-E三元图中(图5)，结果发现文四段和文三段部分样品落在相对远源贫氧或缺氧的VI区，文昌组其它层段样品整体落在充氧远源的近E端，表明陆丰15洼文昌组文一~文三段沉积期水体相对较浅，主要为充氧远源的滨浅湖环境，文四段沉积期水体较深，为半深湖—深湖环境。

综合L15-1井孢粉和孢粉相分析结果，该井文四段和文三段中部同时出现了较高含量的淡水、半咸水藻类和无定形有机质，具好的生油潜力。

4 古湖盆环境

孢粉相分析结果表明，陆丰15洼在文昌组沉积时期水体环境差异明显，文一~文三段及文五段水体相对较浅，主要为充氧远源的滨浅湖环境，文四段沉积期水体相对较深，为半深湖—深湖环境。在此认识基础之上，本文进一步结合元素地球化学以及有机地球化学手段，对陆丰15洼古近系文昌组沉积时期的古气候、古水深、古盐度、古氧相及古生产力水平进行恢复，进而明确古湖盆的环境演化与有机质富集规律之间的关系。

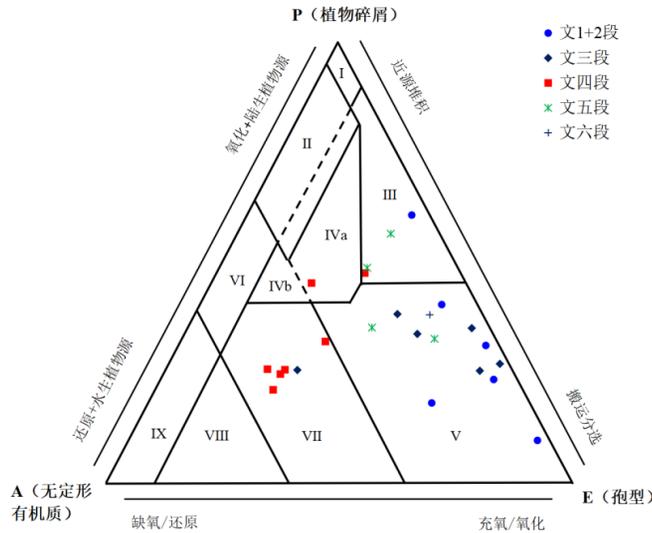
4.1 古气候

古气候对生物的生长、分布具有显著影响，进而影响古湖盆演化特征，因此恢复文昌组沉积

时期古气候特征对明确陆丰 15 洼烃源岩纵向演化具有重要意义。古气候通常可以借助岩石颜色与岩性、古生物化石、黏土矿物以及地球化学等多种手段进行分析。孢粉鉴定在古气候研究方面应用效果显著，通过对 L15-1 井孢粉鉴定分析发现文昌组 (3000 ~ 3708 m 井段) 的植被类型为以常绿和落叶阔叶树为主的热带、亚热带常绿阔叶、落叶阔叶混交林，指示气候温暖。元素地化方面由于元素的性质和迁移能力具有一定差异，一些元素的比值也能较好地反映气候的变化特征。Lerman^[20]认为 Sr/Cu 值为 1.3 ~ 5.0 时代表温湿气候，大于 5.0 时指示干热气候。由于湖泊水体中含钙 (Ca) 盐类的溶解度相对较低，在早期就会沉淀析出，而含锶 (Sr) 的盐类溶解度相对较大，因此 Sr/Ca 比值上升表明湖水

盐度增加、气候干旱、蒸发强烈，比值下降则表明气候湿润，降雨增加^[21]。

文五段 Sr/Cu 均值 5.43，文四段 Sr/Cu 平均值为 2.88，文三段、文一+二段 Sr/Cu 平均值分别为 2.97、3.10 (图 6a)，指示文昌组整体处于温暖、湿润的气候，其中文五段偏干热环境，文四段温湿程度最高，进入上文昌组温湿程度则有微弱降低。文五段 Sr/Ca 均值 0.04，文四段 Sr/Ca 均值最低为 0.02，文三段 Sr/Ca 均值略有回升为 0.03，文一+二段 Sr/Ca 均值最高为 0.06 (图 6b)。Sr/Cu 与 Sr/Ca 值变化规律呈现良好的一致性，结合孢粉分析结果，统一认为文昌组整体为温暖潮湿的古气候，其中主力烃源岩发育层段文四段温暖湿润程度最高，文五段及上文昌组沉积期，气候温湿程度略微降低。



I 代表高能的近陆架或盆地；II 代表边缘贫氧—厌氧盆地；III 代表砂质沉积的充氧近陆架；IV 代表陆架到盆地的过渡 (a 为贫氧, b 为准厌氧—厌氧)；V 代表多泥质沉积的充氧陆架；VI 为近的准厌氧—厌氧陆架；VII 代表远的贫氧—常氧陆架；VIII 代表远的贫氧—充氧陆架；IX 代表近的准厌氧—厌氧盆地

图5 陆丰 15 洼 L15-1 井文昌组孢粉有机质组成 A-P-E 三元图
Fig.5 A-P-E ternary diagram of spore and pollen organic matter composition of Wenchang Formation in Well L15-1 of Lufeng 15 Depression

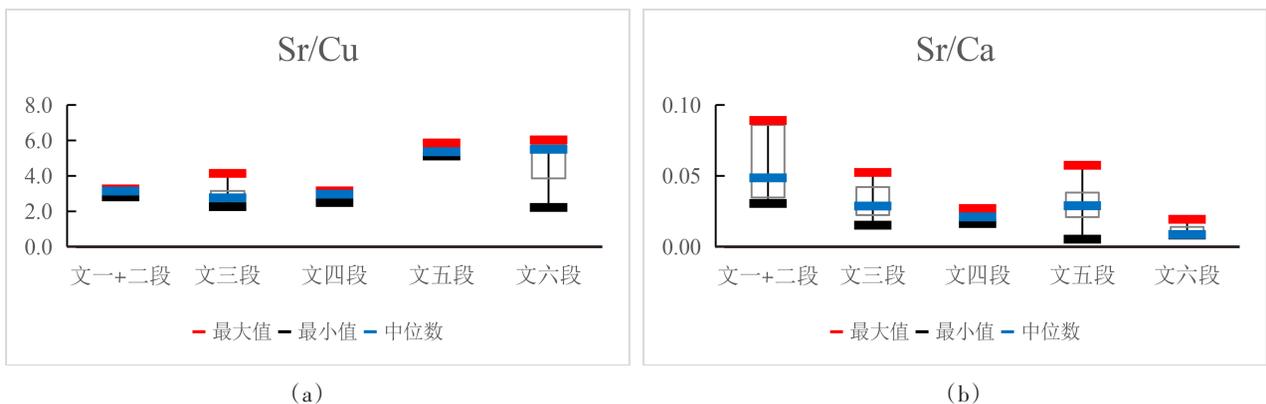


图6 陆丰 15 洼文昌组各段古气候指标
Fig.6 Paleoclimate index of each section of Wenchang Formation in Lufeng 15 Depression

4.2 古水深

古水深对有机质的影响与湖泊类型有关,湖盆类型则受控于构造沉降与沉积充填速率,二者共同控制着水体深浅,平衡充填及欠补偿湖盆形成的沉积岩中有机质含量普遍较高。在沉积物搬运过程中,不同元素稳定性不同,Fe、Al、Ti等稳定性相对较弱,在滨岸带富集,Mn、Ca、Mg等元素可以长距离运移, MnO/TiO_2 、 Fe/Mn 比值可作为离岸远近判别的定性指标^[22-23]。当 $MnO/TiO_2 < 0.5$ 时,为距陆地较近的偏浅水环境, MnO/TiO_2 比值介于 $0.5 \sim 3.5$,代表远离大陆的深水环境^[24]。 Fe/Mn 值小于100被认为是属于深湖环境,比值在100~150之间属于半深湖,比值大于150属于浅湖

环境^[25]。

L15-1井文五段 MnO/TiO_2 值为0.07~0.15(均值为0.09),文四段 MnO/TiO_2 值为0.08~0.22(均值为0.16),文三段 MnO/TiO_2 为0.00~0.11(均值为0.07),文一+二段 MnO/TiO_2 为0.03~0.06(均值为0.04)(图7a),文四段 MnO/TiO_2 值最大,指示沉积期水深最大。文五段 Fe/Mn 平均值为72.3,文四段 Fe/Mn 平均值为60.9,属于深湖环境,文三段 Fe/Mn 平均值为101.7,半深湖环境,文一+二段 Fe/Mn 平均值为186.7,属于浅湖环境(图7b),文四段 Fe/Mn 均值最小,水体深度最大。 MnO/TiO_2 、 Fe/Mn 值均指示文四段沉积期水深最大,文五段和文三段次之,文一+二段水深最小。

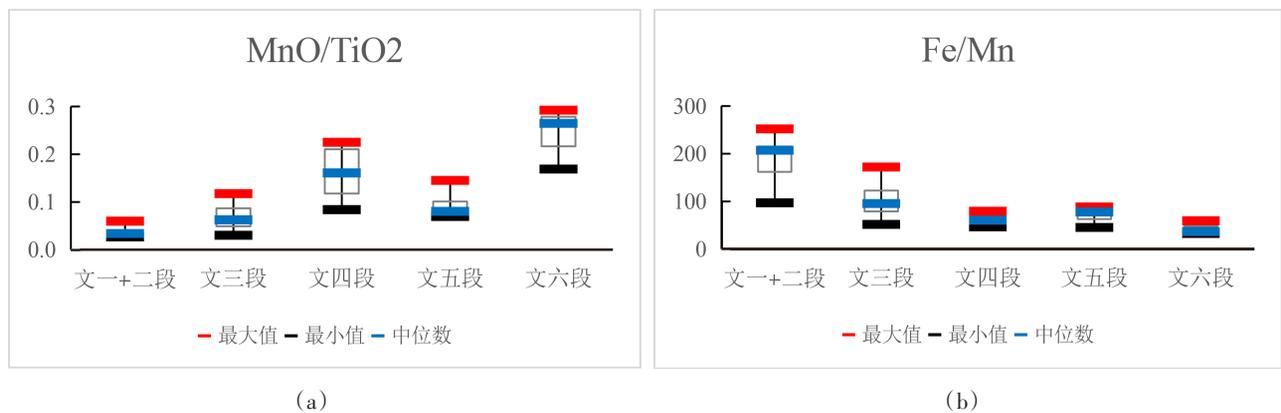


图7 陆丰15洼文昌组各段古水深指标

Fig.7 Paleowater depth index of each section of Wenchang Formation in Lufeng 15 Depression

生物标志化合物也是沉积环境分析的有效手段之一,关于 $C_{30}4$ -甲基甾烷的成因,普遍认为其主要来自藻类或细菌,且丰度与藻类或细菌的含量成正相关,可作为指示烃源岩生源和沉积环境的指标^[26]。文五、文四及文三段泥岩 $C_{30}4$ -甲基甾烷含量相对丰富,表明具有大量低等水生生物的生源输入^[27],源自陆源高等植物的奥利烷(OL)和源自被子植物的W、T树脂化合物含量极低,说明陆源高等植物的供给有限,认为是半深湖—深湖相沉积,其中文四段泥岩 $C_{30}4$ -甲基甾烷含量最丰富,意味着低等水生生物最发育,沉积水体最深。文一+二段泥岩基本不含奥利烷、树脂T化合物,含有微量的 $C_{30}4$ -甲基甾烷,预示着文二段沉积期泥岩低等水生生物不发育,伽马蜡烷(G)含量高,指示水体逐渐咸化,与沉积水体变浅有关,属于浅湖相沉积。

4.3 古盐度

适宜的盐度有利于湖泊微生物的生长发育,可提高湖泊生产力,古盐度判别方法主要有古生物方法、元素地球化学方法、同位素法和生物标志化合物法等。其中元素地球化学方法是最常用的判别手段之一,镁铝比值($m=100 \times MgO/Al_2O_3$)是判别古盐度变化的良好指标,当 $m < 1$ 代表淡水环境, $1 < m < 10$ 指示海陆过渡沉积环境, $10 < m < 500$ 为代表海水咸水环境, $m > 500$ 则为陆表海环境或潟湖沉积环境^[24-25]。L15-1井文五段 m 值为6.82~7.40,平均为7.03;文四段 m 值为6.34~9.38,平均为7.66;文三段 m 值为6.35~7.69,平均为6.97;文一+二段 m 值为4.74~7.45,平均为6.46(图9a)。L15-1井文五段—文一+二段 m 值全部处于1~10内,指示水体以淡水—微咸水为主。

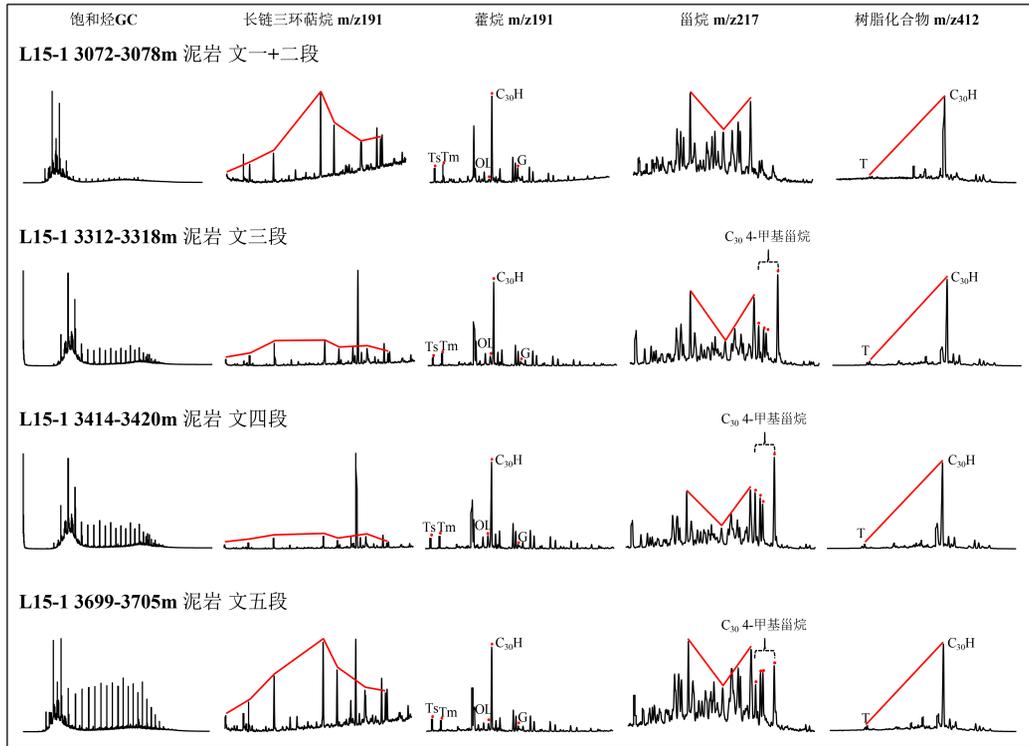


图8 陆丰15洼文昌组烃源岩饱和烃色谱—质谱图

Fig.8 Saturated hydrocarbon chromatogram-mass spectrum of source rocks of Wenchang Formation in Lufeng 15 Depression

Ca/(Ca+Fe)也是一个反映水体盐度的良好指标, 当值小于0.2为低盐度, 0.2~0.5为中等盐度, 大于0.5为高盐度^[28]。L15-1井文五段Ca/(Ca+Fe)值为0.11~0.21, 平均为0.17; 文四段Ca/(Ca+Fe)值为0.08~0.13, 平均为0.11; 文三段Ca/(Ca+Fe)

值为0.05~0.14, 平均为0.09; 文一+二段Ca/(Ca+Fe)值为0.03~0.09, 平均为0.05(图9b)。L15-1井文五段一文一+二段Ca/(Ca+Fe)值均小于0.2内, 指示水体盐度较低。

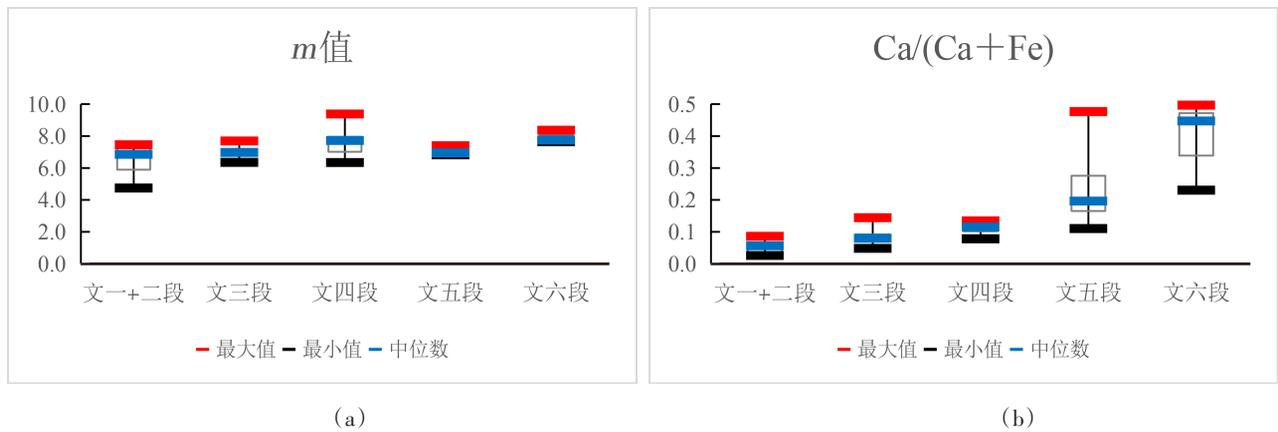


图9 陆丰15洼文昌组各段古盐度指标

Fig.9 Paleosalinity index of each section of Wenchang Formation in Lufeng 15 Depression

4.4 古氧相

底水的氧化还原条件是有机质保存最关键的因素, 沉积水体的氧化还原性影响了微量元素的富集程度, V和Cr在氧化环境中均易溶于水, 还原环境时则在沉积物中富集, 但V的还原出现在反硝化作

用界线的下部, Cr的还原出现在界线的上部, 因此, V/Cr值可作为判别水体氧化还原环境的一个参数^[29], V/Cr<2.00代表富氧环境, 2.00<V/Cr<4.25指示中等还原环境, V/Cr>4.25代表贫氧和缺氧环境^[30]。L15-1井文五段V/Cr值为1.38~2.28(均值为1.76), 文四段V/Cr值为1.90~2.87(均值为2.29),

文三段 V/Cr 值为 1.00~1.98(均值为 1.55), 文一+二段 V/Cr 值为 1.40~2.09(均值为 1.80)(图 10a), V/Cr 值指示陆丰 15 洼文四段还原性最强, 其次为文五段和文一+二段, 文三段还原性最弱。

元素铀 U 在氧化性水体中常以 $UO_2(CO_3)_3$ 形式存在, 且溶解度高, 在还原环境中 $UO_2(CO_3)_3$ 则还原成 UO_2 、 U_3O_7 等固定在沉积物中, 造成沉积物中 U 元素的富集, 因此 U 可作为古氧相可靠的替代指标^[31]。L15-1 井文五段元素铀 U 含量为 7.75~9.45

ppm(均值为 8.48 ppm), 文四段 U 含量最高, 8.60~10.63 ppm(均值为 10.02 ppm), 文三段 U 含量为 5.80~13.02 ppm(均值为 8.16 ppm), 文一+二段 U 含量为 7.12~9.57 ppm(均值为 7.99 ppm)(图 10b)。V/Cr 值与元素 U 均指示陆丰 15 洼文昌组沉积期水体整体为弱还原—中等还原环境, 纵向上文四段水体还原性最强, 其次为文五段和文一+二段, 文三段还原性最弱。

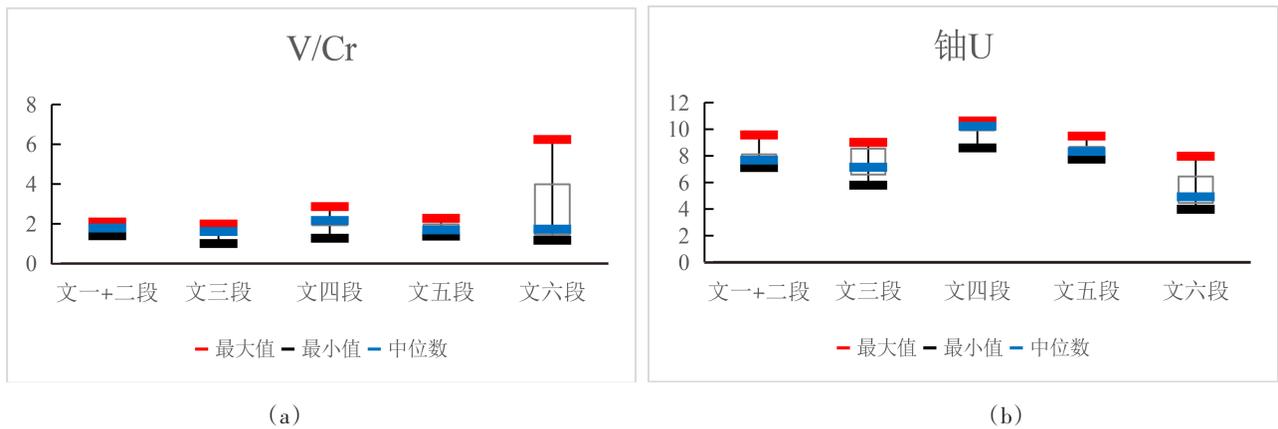


图 10 陆丰 15 洼文昌组各段古氧相指标

Fig.10 Paleo-oxygen facies index of each section of the Wenchang Formation in Lufeng 15 Depression

4.5 古生产力

生物繁盛是形成富有机质烃源岩的必要条件, 因此高古生产力水平是形成富有机质烃源岩的基础条件^[30], 湖水中营养元素的丰度决定了水体中藻类的繁盛程度。元素 P 是浮游生物生长所需的重要营养元素之一, 营养物质供应越充足, 生物光合作用就越强, 生物生产力水平也就越高, 在地质时期中

P 的变化可以很大程度上影响初级生产力的大小, 但为了消除沉积有机质或自生矿物的影响, 一般用 P/Ti 值来表征古沉积水体的初始生产力^[32-33]。L15-1 井文五段 P/Ti 值为 1.38~2.28(均值为 1.76), 文四段 P/Ti 值为 1.90~2.87(均值为 2.29), 文三段 P/Ti 值为 1.00~1.98(均值为 1.55), 文一+二段 P/Ti 值为 1.40~2.09(均值为 1.80)(图 11a), P/Ti 值指示陆丰 15 洼文四段古生产力最高。

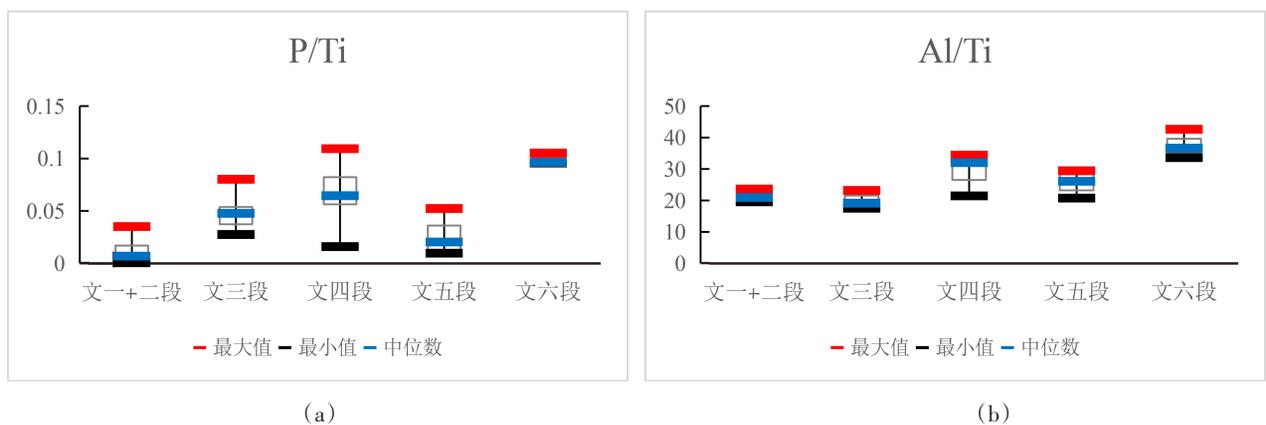


图 11 陆丰 15 洼文昌组各段古生产力指标

Fig.11 Paleoproductivity index of each section of the Wenchang Formation in Lufeng 15 Depression

李得路等研究表明 Al/Ti 值与古生产力有着良好的正相关关系^[34]。L15-1 井文五段 Al/Ti 值为 20.76~29.44 (均值为 25.60)，文四段 Al/Ti 值为 21.47~34.44 (均值为 29.58)，文三段 Al/Ti 值为 17.56~23.22 (均值为 19.91)，文一+二段 Al/Ti 值为 19.59~23.63 (均值为 21.26) (图 11b)，纵向上文四段 P/Ti 与 Al/Ti 值均最大，指示陆丰 15 洼文四段古生产力最高。

5 有机质富集机制

5.1 有机质富集特征

陆丰 15 洼为南断北超的箕状断陷，可分为东、西两个次洼，洼陷规模较大，其中文昌组厚度大于 800 m 的洼陷面积超过 200 km²，具有很大的生烃潜力。文昌组沉积期，由于控制湖泊演化的构造、气

候条件等均发生了明显变化，导致不同时期的古湖泊环境差异显著，文昌组各层段有机质的富集程度也着显著不同。具体表现为文五段有机质丰度极低，TOC 仅为 0.38%，生烃潜力(S1+S2)=2.57 mg/g，属于非烃源岩的范畴；文四段机质丰度高，TOC 主要分布在 1.7%~2.73% 之间，平均值 2.13%，生烃潜力(S1+S2)主要分布在 7.4~20.61 mg/g 之间，平均值 11.65 mg/g，氯仿沥青“A”含量介于 0.58%~0.81% 之间，总烃含量均值为 2718×10⁻⁶，达到好烃源岩的级别；上文昌组 TOC 含量和 S1+S2 明显低于文四段，其中文三段 TOC=0.57%~1.4%，平均值 0.91%，生烃潜力(S1+S2)为 2.62~8.62 mg/g，平均值 4.67 mg/g，达到差一中等烃源岩的级别；文一+二段则属于较差烃源岩，TOC 最高不超过 0.76%，生烃潜力(S1+S2)最高不超过 4.04 mg/g (图 12，表 1)。

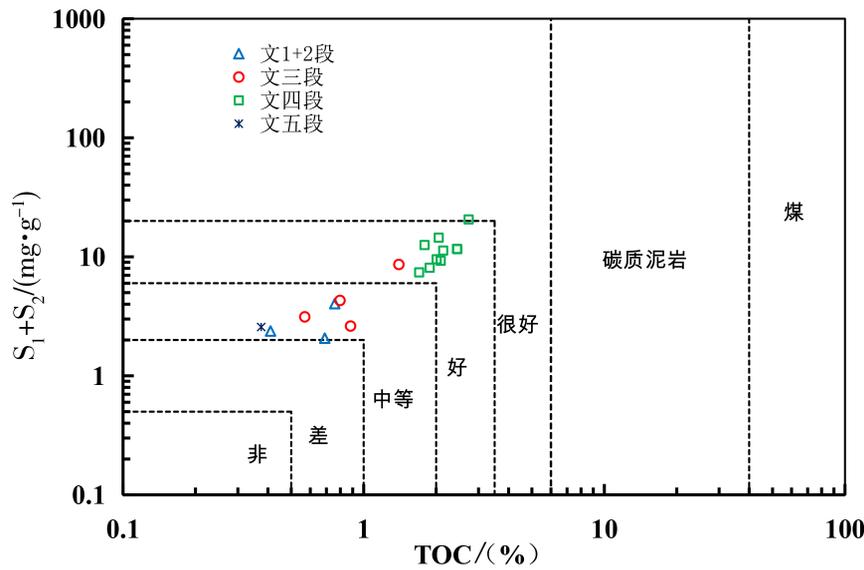


图 12 陆丰 15 洼文昌组泥岩有机质丰度评价图

Fig.12 Evaluation of organic matter abundance of mudstones in Wenchang Formation in Lufeng 15 Depression

表 1 研究区文昌组烃源岩有机质丰度指标

Table1 Organic matter abundance index of source rocks in Wenchang Formation in the study area

井名	深度/m	层段	TOC/(%)	S1/(mg·g ⁻¹)	S2/(mg·g ⁻¹)	S1+S2/(mg·g ⁻¹)	氯仿沥青“A”/(%)	总烃/10 ⁻⁶
L15-1	3072~3078	文 1+2 段	0.41	0.59	1.79	2.38	0.27	241
L15-1	3111~3117	文 1+2 段	0.76	0.78	3.26	4.04	0.22	434
L15-1	3153~3159	文 1+2 段	0.69	0.43	1.64	2.07	0.19	331
L15-1	3213~3219	文 三段	0.57	0.61	2.52	3.13	0.20	329
L15-1	3261~3267	文 三段	0.88	0.50	2.12	2.62	0.29	671
L15-1	3270~3276	文 三段	0.80	0.77	3.53	4.30	0.25	706

(转下表)

(接表1)

井名	深度/m	层段	TOC/(%)	S1/(mg·g ⁻¹)	S2/(mg·g ⁻¹)	S1+S2/(mg·g ⁻¹)	氯仿沥青“A”/(%)	总烃/10 ⁻⁶
L15-1	3312~3318	文三段	1.40	1.49	7.13	8.62	0.44	943
L15-1	3414~3420	文四段	1.88	1.27	6.83	8.10	0.59	1730
L15-1	3423~3429	文四段	1.70	1.13	6.27	7.40	0.66	2358
L15-1	3453~3459	文四段	2.45	1.84	9.75	11.59	0.70	2470
L15-1	3471~3477	文四段	1.79	2.18	10.38	12.56	0.67	3153
L15-1	3489~3495	文四段	2.09	1.88	7.39	9.27	0.64	3035
L15-1	3513~3516	文四段	2.01	1.59	7.95	9.54	0.69	1804
L15-1	3528~3534	文四段	2.14	2.07	9.22	11.29	0.71	3067
L15-1	3543~3549	文四段	2.44	2.21	9.46	11.67	0.81	4143
L15-1	3558~3564	文四段	2.73	3.59	17.02	20.61	0.78	3774
L15-1	3573~3579	文四段	2.05	2.71	11.79	14.50	0.58	1650
L15-1	3699~3705	文五段	0.38	0.55	2.02	2.57	0.23	267

有机质类型也是衡量烃源岩质量的重要指标,不同类型的有机质生烃潜力差异大且生成的产物明显不同,同时生烃过程也有明显差别,这主要与有机质的化学组成和结构有关。由于干酪根不同显微组分对成烃贡献有显著差异,可以通过测定各组分的相对百分含量,用有机质类型指数(TI)来划分有机质类型^[35]:

$$TI=(100A+50B-50C-100D)/(A+B+C+D) \quad (1)$$

式(1)中,A、B、C、D分别代表:A(腐泥组)——无定型有机质、均质体;B(壳质组)——孢子花粉粒、沟鞭藻孢囊、其他藻类、角质层;C(镜质组)——木

质组织、其他组织、动物屑;D(惰质组)——丝炭及其他黑色不透明团块、真菌的繁殖体。当TI>80为I型, TI=80~40为II₁型, TI=40~0为II₂型, TI<0为III型。

根据L15-1井干酪根显微组分统计结果计算的类型值来看(表2),文一+二段、文三段有机质类型主要为III型,不利于生烃,仅文三段底部为II₁型有机质;文四段有机质类型最好,腐泥组含量高达63.6~97.2%, TI介于45.4~95.8之间,以腐泥型(I-II₁型)干酪根为主,生油能力强;文五段为II₁型有机质。

表2 陆丰15洼L15-1井文昌组泥岩干酪根显微组分含量

Table 2 Content of Kerogen maceral of mudstones in Wenchang Formation of L15-1 Well in Lufeng 15 Depression

井号	井深/(m)	层位	岩性	显微组分相对含量/(%)				TI
				镜质组	惰质组	壳质组	腐泥组	
L15-1	2973~2979	文一+二段	泥岩	100.00	0.00	0.00	0.00	-50.00
L15-1	3072~3078	文一+二段	泥岩	100.00	0.00	0.00	0.00	-50.00
L15-1	3111~3117	文一+二段	泥岩	90.91	0.00	0.00	9.09	-36.36
L15-1	3153~3159	文一+二段	泥岩	88.89	0.00	0.00	11.11	-33.33
L15-1	3213~3219	文三段	泥岩	92.31	0.00	7.69	0.00	-42.31
L15-1	3261~3267	文三段	泥岩	85.71	0.00	0.00	14.29	-28.57
L15-1	3270~3276	文三段	泥岩	66.67	0.00	0.00	33.33	0.00
L15-1	3312~3318	文三段	泥岩	14.29	0.00	5.71	80.00	75.71
L15-1	3414~3420	文四段	泥岩	22.22	0.00	0.00	77.78	66.67
L15-1	3423~3429	文四段	泥岩	5.88	0.00	0.00	94.12	91.18
L15-1	3453~3459	文四段	泥岩	4.35	0.00	0.00	95.65	93.48
L15-1	3471~3477	文四段	泥岩	12.50	0.00	0.00	87.50	81.25

(转下表)

(接表2)

井号	井深/(m)	层位	岩性	显微组分相对含量/(%)				TI
				镜质组	惰性组	壳质组	腐泥组	
L15-1	3489~3495	文四段	泥岩	36.36	0.00	0.00	63.64	45.45
L15-1	3513~3516	文四段	泥岩	11.11	0.00	2.78	86.11	81.94
L15-1	3528~3534	文四段	泥岩	5.66	0.00	0.00	94.34	91.51
L15-1	3543~3549	文四段	泥岩	8.33	0.00	0.00	91.67	87.50
L15-1	3558~3564	文四段	泥岩	2.82	0.00	0.00	97.18	95.77
L15-1	3573~3579	文四段	泥岩	7.41	0.00	0.00	92.59	88.89
L15-1	3699~3705	文五段	泥岩	33.33	0.00	0.00	66.67	50.00

5.2 有机质富集影响因素

本文通过依次分析烃源岩有机碳含量(TOC)与各种古环境指标之间的关系,来探讨文昌组烃源岩有机质富集主控因素。TOC含量与古水深指标(Fe/Mn 、 MnO/TiO_2)具有较好的正相关性,相关系数(R^2)分别为0.549、0.615(图13a、图13b),表明水深较大有利于烃源岩中有机质的富集。TOC与古生产力指标(Al/Ti)呈现较高的正相关性($R^2=0.613$)(图13c),表明古生产力水平主导着文昌组有机质的富集, Al/Ti 比值能较好地表征古生产力水平。TOC含量与古盐度指标($Ca/(Ca+Fe)$ 、 $MgO/Al_2O_3 \times 100$)相关性较差,相关系数(R^2)仅为0.136、0.202

(图13d、图13e),表明整体在淡水—微咸水环境下,水体盐度的微弱变化对有机质富集作用并不明显。TOC与古氧相指标(元素铀U)正相关性较好,相关系数(R^2)=0.575(图13f),表明水体还原性越强,有机质保存条件越好,有机质生成后能被有效保存,文昌组烃源岩有机质的富集程度受控于古氧相变化,元素铀U能很好地表征氧化—还原条件。TOC含量与古气候指标(Sr/Ca 、 Sr/Cu)相关性一般,相关系数(R^2)分别为0.291、0.006(图13g、图13h),表明整体温暖、湿润的气候条件下,文昌组烃源岩有机质的富集程度受古气候微弱变化的影响程度较小。

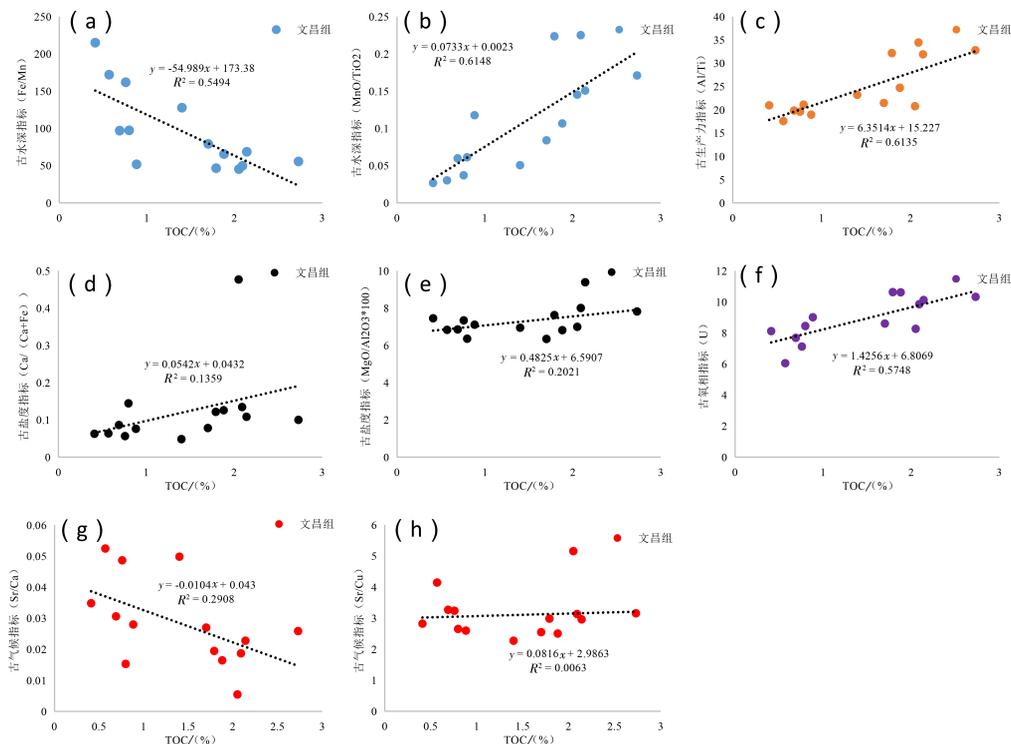


图13 珠江口盆地陆丰15洼文昌组泥岩有机碳含量(TOC)与古环境指标相关性分析图

Fig.13 Correlation analysis of organic carbon content (TOC) of mudstones in Wenchang Formation, Lufeng 15 Depression, the Pearl River Mouth Basin and paleoenvironmental index

从古环境指标与有机碳含量(TOC)的相关性(图13)可以看出,陆丰15洼文昌期古湖盆淡水—微咸条件下,烃源岩质量与古水深、古生产力及还原性呈较好的正相关关系,文昌组沉积期古气候差异不大,温暖湿润的气候有利于优质烃源岩发育。

5.3 有机质富集模式

有机质富集的控制因素包括生产力条件、氧化还原性、古水深、古气候等,有机质的富集要求水体初级生产力高,这是优质烃源岩发育的物质基础,保存条件对有机质富集也极为重要,底部水体氧化还原条件决定着有机质生成后能否被有效保存,因此存在“保存模式”和“生产力模式”两种不同观点^[36]。古生产力水平和保存条件这两个因素之间的相互作用,进一步增加了对烃源岩形成机制认识的难度。

如前文所述,陆丰15洼文昌期在古湖盆淡水—微咸水条件、温暖湿润的气候下,烃源岩质量与古水深、古生产力及还原性呈较好的正相关关系,深水条件、高古生产力、强还原环境利于优质烃源岩发育。根据洼陷文昌组烃源岩形成的构造、沉积作用,结合古环境特征,总结出研究区优质烃源岩的发育模式:文四段沉积期,湖盆处于裂陷高峰期,构造沉降大,水体深,形成了欠补偿湖盆,低等水生生物繁盛,同时受周缘陆源碎屑输入影响较弱,湖泊古生产力水平高,此外,较强的还原条件有利于有机质的保存,因此,文四段发育了最优质的烃源岩;上文昌期,控洼断裂活动性持续减弱,沉积及沉降速率逐渐减小,水体深度相较文四段而言显著减小,湖泊古生产力水平降低,陆源输入程度有所增强,还原程度有所减弱,有机质富集程度中等,从而发育中等烃源岩。综合研究认为:古生产力、氧化—还原条件与有机碳含量(TOC)呈现出较一致的正相关关系,古生产力及水体缺氧都是有机质富集的主控因素,单纯强调单个因素不能完全解释高有机质丰度烃源岩形成的机理,实际上是古生产力与保存条件之间良好的匹配,共同控制了陆丰15洼文昌组有效烃源岩的发育。

6 结论

(1)通过孢粉相、无机元素、有机地化分析等手段恢复陆丰15洼文昌期湖盆古环境,认为该时

期湖盆形成于温暖潮湿的古气候条件,水体介质整体为淡水—微咸水,发育半深湖—深湖相,整体表现为还原—强还原的环境,对有机质的保存和优质烃源岩的发育极为有利。

(2)陆丰15洼文昌组整体在温暖潮湿的古气候、低水体盐度条件下,各层段古水深、古氧相及古生产力水平差异显著,其中文一~文三段及文五段沉积期水体相对较浅,主要为充氧远源的滨浅湖环境,古生产力水平一般;文四段沉积期水体较深,还原性最强,发育半深湖—深湖环境,古生产力水平最高,最有利于优质烃源岩的发育。

(3)文昌组烃源岩质量与湖盆古水深、古生产力及水体还原性呈较好的正相关关系,古水深、古生产力及水体缺氧是陆丰15洼文昌组烃源岩有机质富集的主控因素,古水深较大对应着水体强还原性,古生产力与保存条件共同控制了有效烃源岩的发育。

参考文献:

- [1] Koch G, Prtoljan B, Husinec A, et al. Palynofacies and paleoenvironment of the Upper Jurassic mud-supported carbonates, southern Croatia: preliminary evaluation of the hydrocarbon source rock potential[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2017(80):243-253.
- [2] Diasty W S E, Beialy S Y E, Mostafa A R, et al. Hydrocarbon source rock potential in the south western Gulf of Suez graben: insights from organic geochemistry and palynofacies studies on well samples from the Ras El Bahar Oil field[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2017(80):133-153.
- [3] Piper D Z. Seawater as the source of minor elements in black shales, phosphorites and other sedimentary rocks[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(1-2):95-114.
- [4] Crusius J, Calvert S, Pedersen T, et al. Rhenium and molybdenum enrichments in sediments as indicators of oxic, suboxic and sulfidic conditions of deposition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996(145):65-78.
- [5] Aharon P, Fu B S. Sulfur and oxygen isotopes of coeval sulfate-sulfide in pore fluids of cold seep sediments with sharp redox gradients[J]. *Chemical Geology*, 2003, 195(1-4):201-218.
- [6] 沈俊, 施张燕, 冯庆来. 古海洋生产力地球化学指标的研究[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(2):69-77.
- [7] 柳广弟, 牛子铖, 陈哲龙, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷在洼陷迁移控制下的油气成藏规律[J]. *石油学报*, 2019, 40(S1):26-41.
- [8] 丁亮. 陆丰凹陷西南部文昌组资源潜力及油气成藏主控因素分析[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(4):46-56.

- [9] 刘海伦. 珠江口盆地珠一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [10] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-10.
- [11] 朱伟林, 崔早云, 吴培康, 等. 被动大陆边缘盆地油气勘探新进展与展望[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1099-1109.
- [12] 朱定伟, 张向涛, 雷永昌, 等. 陆丰北地区构造特征及恩平组勘探方向[J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 44-53.
- [13] 代一丁, 牛子铨, 汪旭东, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 41-52.
- [14] 施和生. 油气勘探“源汇聚”评价体系及其应用: 以珠江口盆地珠一坳陷为例[J]. 中国海上油气, 2015, 27(5): 1-12.
- [15] 葛家旺, 朱筱敏, 雷永昌, 等. 多幕裂陷盆地构造—沉积响应及陆丰凹陷实例分析[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 77-89.
- [16] Ercegovac M, Kostić A. Organic facies and palynofacies: nomenclature, classification and applicability for petroleum source rock evaluation[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 68(1-2): 70-78.
- [17] 李建国, Batten D J. 孢粉相: 原理及方法[J]. 古生物学报, 2005, 44(1): 138-156.
- [18] 曹庆英. 透射光下干酪根显微组分鉴定及类型划分[J]. 石油勘探与开发, 1985(5): 14-23+81-88.
- [19] Tyson R V. Sedimentary organic matter: Organic facies and palynofacies[M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [20] Lerman A, Imboden D M, Gat J R. Physics and Chemistry of Lakes[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995.
- [21] 谢世文, 王宇辰, 舒誉, 等. 珠一坳陷湖盆古环境恢复与优质烃源岩发育模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 159-169.
- [22] 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1774-1786.
- [23] 周江羽, 陈建文, 张玉玺, 等. 下扬子地区幕府山组古环境和构造背景: 来自细粒混积沉积岩系元素地球化学的证据[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1693-1711.
- [24] 孙小勇, 牟传龙, 葛祥英, 等. 四川广元—陕西镇巴地区上奥陶统五峰组地球化学特征及沉积环境意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(1): 46-54.
- [25] 李圯, 刘可禹, 蒲秀刚, 等. 沧东凹陷孔二段混合细粒沉积岩相特征及形成环境[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3779-3796.
- [26] 傅宁. 论4-甲基C30甾烷丰度与烃源岩质量的关系——基于北部湾盆地勘探实践[J]. 中国海上油气, 2018, 30(5): 11-20.
- [27] 李友川, 陶维祥, 孙玉梅, 等. 珠江口盆地惠州凹陷及其邻区原油分类和分布特征[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 830-834.
- [28] 雷卞军, 阙洪培, 胡宁, 等. 鄂西古生代硅质岩的地球化学特征及沉积环境[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(2): 70-79.
- [29] 韦恒业. 古海洋生产力与氧化还原指标——元素地球化学综述[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(2): 76-88.
- [30] 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(1-4): 111-129.
- [31] Tribouillard N, Algeo T, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. Chemical Geology, 2006(232): 12-32.
- [32] 史冀忠, 崔海峰, 许伟, 等. 银额盆地巴隆乌拉白垩系巴音戈壁组黑色页岩沉积环境及有机质富集模式[J]. 地质通报, 2022, 41(8): 1430-1444.
- [33] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 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, 2022, 43(11): 1520-1541.
- [34] 李得路. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组长7油页岩地球化学特征及古沉积环境分析[D]. 西安: 长安大学, 2018: 12-17.
- [35] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978: 1-362.
- [36] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 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, 2022, 43(11): 1520-1541.