

川西南地区中二叠统茅口组一段沉积微相特征及有机质富集模式

翟常博^{1,2}, 林良彪^{3,4}, 尤东华¹, 刘冯斌^{3,4}, 刘思雨^{3,4}

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室, 北京 102206; 3. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 4. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059]

摘要: 为了研究四川盆地中二叠统茅口组一段(茅一段)沉积微相和有机质富集规律, 开展了岩石学、沉积微相分析。将川西南乐山沙湾剖面茅一段划分为生物碎屑含灰泥岩(MF1)、生物碎屑泥灰岩(MF2)、生物碎屑含泥灰岩(MF3)、灰泥灰岩(MF4)、生物碎屑粒泥灰岩(MF5)、钙藻粒泥灰岩(MF6)、生物碎屑泥粒灰岩(MF7)和钙藻泥粒灰岩(MF8)共8个沉积微相。结合沉积古环境及地球化学分析认为: ①茅一段早、中期, 主要发育MF2沉积微相, 其次为MF7和MF8沉积微相。该期整体为海侵、缺氧环境, 发育上升洋流, 初级生产力较高。中、晚期主要发育MF6、MF7和MF8沉积微相, 为相对海退环境, 含氧量略有上升, 上升洋流强度减弱, 初级生产力下降。末期以MF2沉积微相为主, 含氧量略有上升, 初级生产力增强。②茅一段的有机质富集主要受海洋初级生产力与缺氧环境的调控, 同时受上升洋流的间接影响。较高的初级生产力与较低的含氧量有利于有机质富集与保存。上升洋流可带来深层营养成分, 从而增强海洋初级生产力。③MF2与MF7沉积微相在区域上稳定分布, 且具有较高初级生产力和较低含氧量沉积环境, 是茅一段有机质富集有利沉积微相。

关键词: 有机质富集; 地球化学特征; 古环境; 沉积微相; 茅口组一段; 中二叠统; 川西南地区

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sedimentary microfacies characteristics and organic matter enrichment pattern of the 1st member of the Middle Permian Maokou Formation, southwestern Sichuan Basin

ZHAI Changbo^{1,2}, LIN Liangbiao^{3,4}, YOU Donghua¹, LIU Fengbin^{3,4}, LIU Siyu^{3,4}

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas, Beijing 102206, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: This study aims to investigate the sedimentary microfacies and organic matter enrichment pattern of the 1st member of the Middle Permian Maokou Formation (hereafter referred to as the Mao 1 Member) in the Sichuan Basin. Based on petrological and sedimentary microfacies analyses, we summarize eight sedimentary microfacies (MF1-MF8) in the Mao 1 Member on the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin, encompassing bioclastic calcareous mudstone (MF1), bioclastic marl (MF2), bioclastic argillaceous limestone (MF3), marly limestone (MF4), bioclastic wackestone (MF5), calcareous algal wackestone (MF6), bioclastic packstone (MF7), and calcareous algal packstone (MF8). The sedimentary paleoenvironment and geochemical analyses result in the following conclusions. (1) In the early to middle stages of the Mao 1 Member's deposition, MF2 was predominantly formed, followed by MF7 and MF8. This period was characterized by a transgressive and anoxic environment overall, marked by the presence of upwelling ocean currents and high primary productivity. The middle to late stages of the Mao 1 Member's formation primarily witnessed the occurrence of MF6, MF7, and MF8. This period featured relative regression, with slightly increased oxygen content, weakened upwelling ocean currents, and decreased primary productivity. In the final stage of its deposition, the Mao 1 Member was dominated by MF2, with slightly increased oxygen content and enhanced primary productivity. (2) The organic matter

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2024-03-05。

第一作者简介: 翟常博(1979—), 男, 博士、高级工程师, 石油天然气地质综合研究。E-mail: zhaicb.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41872115)。

enrichment in the member was predominantly influenced by marine primary productivity and anoxic environment, while under the indirect influence of upwelling ocean currents. Specifically, a setting of higher primary productivity and lower oxygen content is conducive to the enrichment and preservation of organic matter. Furthermore, upwelling ocean currents facilitate the transport of nutrients from deeper parts, thus enhancing the marine primary productivity. (3) MF2 and MF7, characterized by stable regional distributions and depositional environments with higher primary productivity and lower oxygen content, represent favorable sedimentary microfacies for organic matter enrichment in the Mao 1 Member.

Key words: organic matter enrichment, geochemical characteristics, paleoenvironment, sedimentary microfacies, 1st member of the Maokou Formation, Middle Permian, southwestern Sichuan Basin

引用格式: 翟常博, 林良彪, 尤东华, 等. 川西南地区中二叠统茅口组一段沉积微相特征及有机质富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 440–456. DOI: 10. 11743/ogg20240210.

ZHAI Changbo, LIN Liangbiao, YOU Donghua, et al. Sedimentary microfacies characteristics and organic matter enrichment pattern of the 1st member of the Middle Permian Maokou Formation, southwestern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 440–456. DOI: 10. 11743/ogg20240210.

四川盆地中二叠统茅口组是目前勘探的热点层系之一^[1], 近年来, 四川盆地焦石1井、义和1井、潼探1井、大石1井、靖和1井、福宝1井等多口钻井在茅口组一段(简称茅一段)眼球状灰岩中试获工业气流, 表明其作为有效的储集层具有较大的勘探潜力^[2–3]。

针对四川盆地中二叠统沉积环境和古地理, 前人进行了详细研究。陈宗清等(2007)综合分析了四川盆地二叠系沉积相分布及茅口组的岩石物性特征, 认为四川盆地二叠系主要为碳酸盐台地相和碳酸盐缓坡相^[4]; 林良彪等(2008)综合分析了四川盆地石柱地区茅口组沉积特征及层序地层分析, 认为石柱地区茅口组主要发育碳酸盐台地相沉积^[5]; 周新平等(2009)研究了四川宣汉地区二叠系硅岩地球化学特征及成因, 认为茅口组主要为开阔台地沉积环境^[6]; 钟怡江等(2014)通过Wilson标准微相分析认为茅口组沉积期中国南方二叠纪盆地为海域扩大的突变期, 从碳酸盐缓坡向碳酸盐台地转变^[7]; 夏文谦等(2021)认为中上扬子地区茅口组为碳酸盐缓坡模式沉积^[8]; 赵培荣(2021)认为四川盆地茅一段整体为碳酸盐缓坡沉积^[9]。综上, 四川盆地茅一段目前有碳酸盐台地与缓坡两种截然不同的解释模式, 但缓坡模式正在逐渐成为主流观点^[10]。

随着近年来在茅一段眼球状灰岩中取得勘探突破, 诸多学者对其进行了细致的岩石学研究, 江青春等(2021)将四川盆地茅一段眼球状灰岩分为眼球灰岩相、含眼皮的眼球灰岩相、含眼球的眼皮灰岩相和眼皮灰岩相4类岩相, 并对其测井曲线特征进行了分析^[11]。田小彬等(2021)将茅一段划分为6种沉积微相用以识别“眼球”和“眼皮”^[12], 为茅口组非常规油气储层的进一步勘探与评价提供了理论基础。但是对于茅一段在垂向上连续的沉积微相变化以及沉积环境演变方面的

研究仍有所欠缺, 限制了对茅一段有机质富集规律与控制因素的进一步探讨。

在前人研究过程中一般认为, 影响有机质富集的地质因素主要有3个: 海洋初级生产力、水体氧化还原条件和碎屑输入^[13–15]。而其他相互联系的环境变化, 如海平面波动和水文变化, 也可能通过影响上述因素而促进有机质的富集^[16–17]。然而, 由于气候和海洋环境之间的复杂相互作用, 没有任何单一因素或模型能够提供完美的解释^[18]。一般认为在华南板块中二叠世, 扬子地台西北缘发育强烈且持久的上升流系统^[19], 前人在研究茅一段有机质富集的过程中忽视了上升洋流的作用。明确上升流在沉积环境中所起的作用, 对研究茅一段有机质富集模式具有重要的科学意义。

针对上述问题, 本文从沉积微相研究的角度出发, 基于野外及镜下岩石学观察, 结合地球化学分析测试, 对川西南地区乐山沙湾剖面茅一段沉积微相类型以及古环境特征演化进行了系统性研究, 明确了川西南地区茅一段有机质富集的有利沉积微相, 并在此基础上探讨茅一段有机质富集的控制因素, 为后续茅一段油气勘探开发提供理论依据。

1 区域地质背景

四川盆地属于上扬子地台西北缘, 是一个海相碳酸盐岩沉积、陆相碎屑岩沉积以及构造隆升改造的多旋回性叠合盆地^[20]。中二叠世早期, 四川盆地位于赤道范围, 以发育碳酸盐岩为主。茅一段沉积期, 四川盆地遭受区域海侵事件, 沉积水体加深, 以大面积地发育瘤状灰岩或“眼球状”灰岩为特征^[21]。根据四川盆地茅一段沉积时期无台缘带沉积的特征, 结合区域沉积背

景,认为四川盆地茅一段发育碳酸盐缓坡沉积环境(图1a)。对川西南地区乐山沙湾剖面进行精细的剖面实测及采样工作,实测茅一段真厚度为59.12 m(图1b)。茅一段上下界线明显,茅一段底部发育灰色中-厚层泥晶灰岩,栖霞组顶部发育浅黄灰色块状砂屑灰岩(图2a)。茅一段顶部发育灰色生屑灰岩夹灰黑色钙质泥岩,茅二段底部发育灰色块状含生屑灰岩,含少量生物碎屑(腹足、介壳)。露头上,乐山沙湾剖面茅一段可划分出3个亚段,茅一亚段(3—19层)主要发育中-薄层含泥灰岩、泥质灰岩,夹薄层灰质泥岩(图2b);可识别“瘤状构造”,或“透镜状灰岩”。茅一二亚段(20—32层)主要发育中-厚层含泥灰岩(图2c),可见燧石结核,层间偶夹灰质泥岩层;茅一三亚段(33层)主要发育

中-厚层含泥灰岩,夹多套薄层灰质泥岩,灰岩中“眼球状构造”发育较差,但在灰质泥岩层中可识别“小型眼球状灰岩”(图2d)。

2 采样与测试分析方法

分析测试以茅一段为研究层位,共采集新鲜未风化样品40件(图1b)。剔除遭受成岩蚀变以及发育明显脉体的样品,对剩余39件样品进行全岩主微量、稀土测试,挑选17件样品进行总有机碳含量测试,并挑选2件样品进行干酪根显微组分与类型的确定。

岩石制片遵照标准SY/T5913—2004,将25 mm×25 mm大小的岩样磨至厚约0.03 mm并用茜素红-S溶

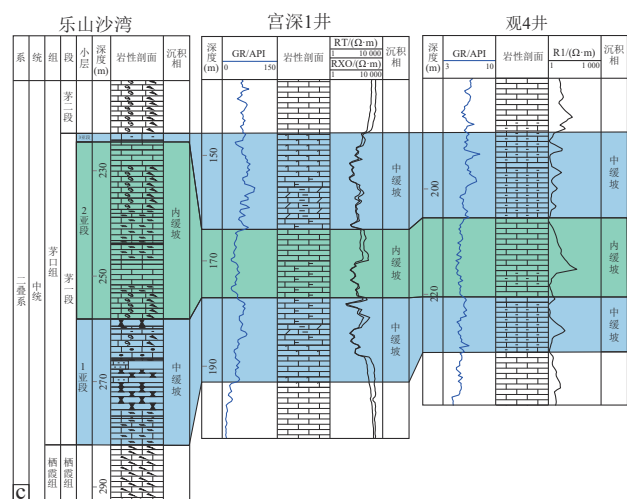
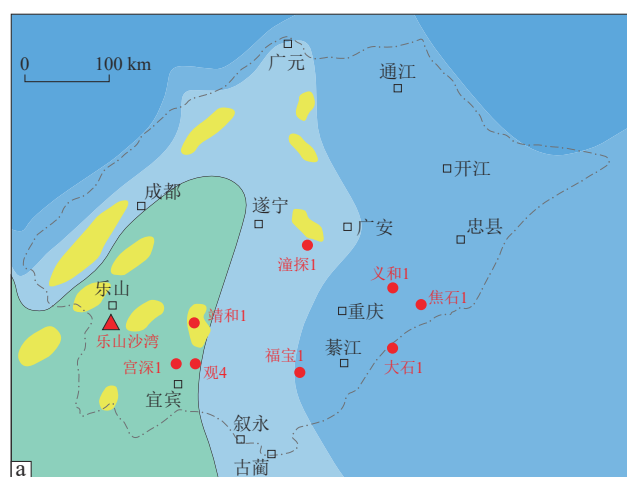


图1 四川盆地茅一段沉积相平面图(a)(据文献[3,22]改)、川西南地区乐山沙湾剖面茅一段地层综合柱状图(b)及岩性对比(c)

Fig. 1 Sedimentary facies map of the Mao 1 Member in the Sichuan Basin (a) (modified after references [3,22]) and the composite stratigraphic column (b) and lithological correlation (c) of the Mao 1 Member on the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

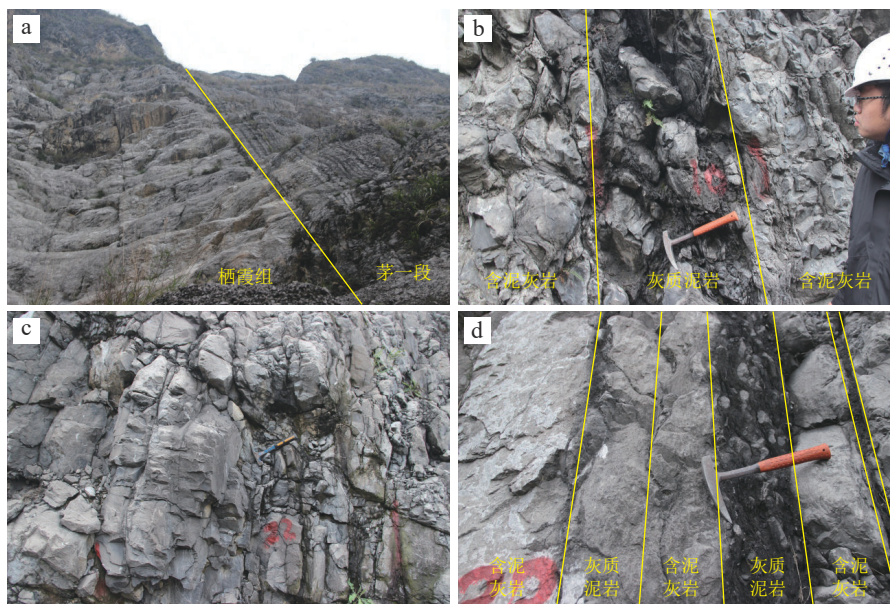


图2 川西南地区乐山沙湾剖面茅一段岩性特征野外照片

Fig. 2 Photos showing the field lithological characteristics of the Mao 1 Member on the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

a. 茅口组与栖霞组界线特征; b. 中-薄层含泥灰岩、泥质灰岩, 夹薄层灰质泥岩; c. 中-厚层含泥灰岩; d. 中-厚层含泥灰岩, 夹多套薄层灰质泥岩

液染色,然后置于偏光显微镜下观察岩石的矿物成分和组构特征。岩石薄片观察于成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室完成,设备采用Zeiss蔡司Axio 1偏光显微镜;主、微量及稀土元素分析在北京铨年领航科技有限公司测试完成,主量元素化合物采用岛津XRF-1800型X射线荧光光谱仪,微量元素和稀土元素分析采用等离子质谱仪(Anglient 7500 ICP-MS)上进行测定。总有机碳含量测定与干酪根类型分析委托四川省科源工程技术测试中心有限责任公司完成,设备采用碳硫测定仪测定。干酪根类型分析主要使用岩石热解分析仪,采用程序升温的方法,将样品中的烃类在不同的温度下热解或热蒸发成气态烃、液态烃和热解烃,由气相色谱氢火焰离子化检测器检测;热解后的残余有机质加热氧化成 CO_2 ,由气相色谱热导或红外检测器检测,从而得到热解参数,并确定干酪根类型。

3 沉积微相类型及特征

3.1 沉积微相类型及划分

经过薄片观察,参考曾允孚(1984)^[23]的碳酸盐岩成分分类标准,按照薄片镜下方解石与黏土矿物含量的相对变化,将茅一段岩石划分为:灰岩、含泥灰岩、泥灰岩、灰质泥岩以及含灰泥岩,并进一步采用Dunham(1962)^[24]灰岩分类标准,将灰岩进一步分为灰泥灰

岩、粒泥灰岩以及泥粒灰岩。在此分类的基础上,参考Flügel碳酸盐缓坡沉积微相划分标准^[25],将川西南地区乐山沙湾剖面茅一段共划分为8个沉积微相(表1)。

3.1.1 生物碎屑含灰泥岩(MF1)

该类微相岩石矿物成分以黏土为主,含量约占75%~90%。基质中含较多生物碎屑,种类以介形虫和棘皮类为主,多数情况下可见生物碎屑呈定向纹层排列分布,且纹层结构平行于层面(图3a)。野外岩性呈深灰色,层厚以中-薄层为主,含“眼球”状构造,具明显页理。常与“眼球”组合出现。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF2相当。

3.1.2 生物碎屑泥灰岩(MF2)

该类岩石矿物成分以方解石为主,含量约占50%~75%,黏土矿物含量低于MF1,约占25%~50%。基质中含较多生物碎屑,以介形虫和棘皮类为主,多数情况下可见生物碎屑呈定向纹层排列分布,且纹层结构平行于层面(图3b)。野外岩性多呈灰色,层厚以中厚层-块状为主,发育“眼皮”状构造,与椭圆状或近圆状“眼球”组合产出,具明显页理,污手。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF2相当。

3.1.3 生物碎屑含泥灰岩(MF3)

该类岩石矿物成分以方解石为主,含量介于75%~90%,含一定黏土矿物,含量介于10%~25%。基质

表1 川西南地区乐山沙湾剖面沉积微相划分方案及特征

Table 1 Classification scheme and properties of the sedimentary microfacies on the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

沉积微相代号	沉积微相类型	黏土矿物含量/%	灰泥含量/%	岩石类型	化石类型	沉积结构	野外沉积构造
MF1	生物碎屑含灰泥岩	75 ~ 90	—	含灰泥岩	介形虫、棘皮类	可见生物屑呈定向纹层	深灰色、中-薄层状
MF2	生物碎屑泥灰岩	25 ~ 50	—	泥灰岩	介形虫、棘皮类		灰黑色、薄层状、“眼皮”构造
MF3	生物碎屑含泥灰岩	10 ~ 25	—	含泥灰岩	介形虫、棘皮类		“眼皮”构造
MF4	灰泥灰岩	<10	>90	灰岩	介形虫、棘皮类, 含量<10 %	—	灰色、“眼球”构造
MF5	生物碎屑粒泥石灰岩		50 ~ 90		双壳、腹足、棘皮、藻类化石等, 含量10 % ~ 50 %	—	灰色、厚层状
MF6	钙藻粒泥石灰岩		50 ~ 90		钙藻为主, 少量双壳、腹足、棘皮, 含量10 % ~ 50 %	—	灰色、厚层-块状
MF7	生物碎屑泥粒灰岩		<50		双壳、腹足、棘皮、藻类化石等, 含量>50 %	—	灰色、厚层状
MF8	钙藻泥粒石灰岩		<50		钙藻为主, 少量双壳、腹足、棘皮等, 含量>50 %	—	灰色、厚层状

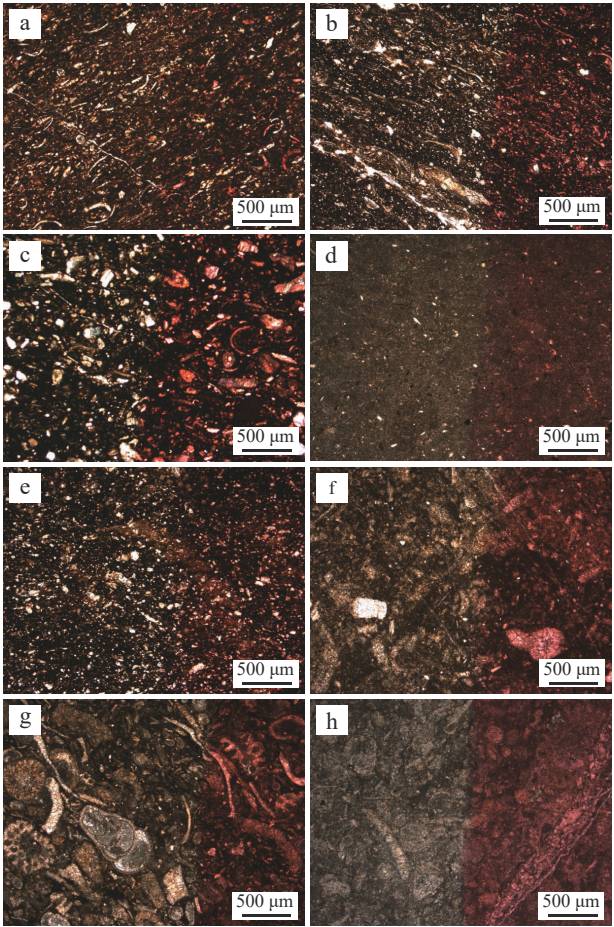


图3 川西南地区乐山沙湾剖面茅一段沉积微相特征薄片显微照片

Fig. 3 Thin section micrographs showing the sedimentary microfacies characteristics of the Mao 1 Member on the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

a. 生物碎屑含灰泥岩(MF1), 26层; b. 生物碎屑泥灰岩(MF2), 8层; c. 生物碎屑含泥灰岩(MF3), 5层; d. 灰泥灰岩(MF4), 20层; e. 生物碎屑粒泥灰岩(MF5), 17层; f. 钙藻粒泥灰岩(MF6), 6层; g. 生物碎屑泥粒石灰岩(MF7), 15层; h. 钙藻泥粒灰岩(MF8), 22层

中含较多生物碎屑,种类以介形虫和棘皮类为主,均为细小碎屑,或呈不规则长条状定向分布(图3c)。野外岩性多呈灰黑色,层厚以中-薄层为主,可见“眼皮”状构造发育,页理发育。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF2相当。

3.1.4 灰泥灰岩(MF4)

该类岩石矿物成分主要为方解石。灰泥支撑,基质中含较少细小生物碎屑,含量一般小于10%(图3d)。生物碎屑类型主要为介形虫和棘皮类等。野外岩性一般呈灰色,层厚以中-厚层为主,层面平直,层内不含泥。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF5相当。

3.1.5 生物碎屑粒泥灰岩(MF5)

该类岩石矿物成分以方解石为主。灰泥支撑,基质中含颗粒,类型以生物碎屑为主,常见双壳、腹足、棘皮和藻类等生物碎屑(图3e)。野外一般呈灰黑色,块状构造。具有一定页理化,污手,发育一定水平纹层。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF17相当。

3.1.6 钙藻粒泥灰岩(MF6)

该类岩石矿物成分以方解石为主。灰泥支撑,基质中含颗粒,类型以生物碎屑为主,生物碎屑以二叠纪钙质藻类(粗枝藻)为主,较为破碎,见较明显泥晶化(图3f)。野外一般呈灰色,层厚以中-厚层为主。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF17相当。

3.1.7 生物碎屑泥粒灰岩(MF7)

该类岩石矿物成分以方解石为主。颗粒支撑,基质中含有不同含量的生物碎屑,混杂分布,常见双壳、

腹足、棘皮和藻类等生物碎屑,少量有孔虫(图3g)。野外一般呈灰色,层厚以中-厚层为主。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF20相当。

3.1.8 钙藻泥粒灰岩(MF8)

该类岩石矿物成分以方解石为主。颗粒支撑,含量一般大于50%。基质中可见生物碎屑,其中以钙质藻类(粗枝藻)为主(图3h),含量占绝大多数,泥晶化严重。其次也可见少量双壳、腹足和棘皮类生物碎屑等。野外一般呈灰色,层厚以中-厚层为主。大致与Flügel碳酸盐缓坡沉积微相RMF20相当。

3.2 沉积微相组合

基于区域地质背景,参考Flügel碳酸盐缓坡沉积微相组合划分标准,认为川西南地区茅一段符合浅水碳酸盐缓坡沉积特征,主要发育内缓坡与中缓坡亚相。

内缓坡亚相主要微相组合以MF6和MF8沉积微相为主,少量MF7和MF2,岩性以灰色中-厚层钙藻、生物碎屑粒泥灰岩和泥粒灰岩为主。生物种类丰富,钙藻普遍发育,局部可见有孔虫和棘皮类等生物碎屑。

中缓坡亚相主要微相可见MF1、MF2、MF3和MF4,偶见MF5和MF7,主要发育灰-深灰色中-薄层生物碎屑含灰泥岩、泥灰岩、含泥灰岩和灰泥灰岩,可见较明显“眼球状”构造,眼球直径较小,多呈“孤立状”。生物碎屑含量较高,主要以介形虫和棘皮类为主,颗粒较破碎,分选性差,多数颗粒并非原地沉积,而是从其他环境中通过波浪搬运作用,在水动能减弱后沉积下来的,可以看到较多生物碎屑呈定向排列,反映沉积水体能量并不稳定。

4 地球化学特征

4.1 矿物元素特征

乐山沙湾剖面主量元素化合物 SiO_2 含量介于0.32%~49.17%,均值11.75%,在茅一一亚段底部, SiO_2 含量相对较低,在茅一一亚段中部迅速升高至49.94%,随后至茅一段顶部逐渐降低; CaO 含量介于11.53%~55.15%,均值45.70%,变化特征与 SiO_2 相反,即在茅一一亚段底部相对较高,在茅一一亚段中部迅速降低,后至茅一段顶部呈逐渐升高; Al_2O_3 含量介于0.08%~6.07%,均值0.86%,除在茅一一亚段底部与茅一段顶部略有升高外整体含量较低(表2;图4)。

乐山沙湾剖面Mo元素含量介于 $(0.23 \sim 45.20) \times 10^{-6}$,均值 4.61×10^{-6} ,于茅一一亚段和茅一三亚段均呈现较稳定的低值,而在茅一二亚段显示突然升高;U元素含量介于 $(2.72 \sim 18.6) \times 10^{-6}$,均值 6.98×10^{-6} ,V元素含量介于 $(9.39 \sim 300) \times 10^{-6}$,均值 70.68×10^{-6} ,二者变化特征与Mo元素相一致;Cd元素含量介于 $(0.07 \sim 3.74) \times 10^{-6}$,均值 0.88×10^{-6} ,同样在茅一二亚段显示高值(图5);Co元素含量介于 $(0.67 \sim 3.03) \times 10^{-6}$,均值 1.56×10^{-6} (表2),整体变化幅度较小,在茅一一亚段和茅一三亚段略显高值。

4.2 烃源岩地球化学特征

川西南地区乐山沙湾茅一段烃源岩干酪根组分主要为腐泥质,少量镜质组分,类型为I型与II₁型(表3),参考川西南地区茅一段镜质体反射率(R_o)分布在2.0%~2.2%,认为其有机质处于成熟-高成熟阶段^[28]。据泥质岩、碳酸盐岩烃源岩不同类型干酪根的总有机碳含量(TOC)恢复系数图版(图6)^[29],经过投点,茅一段烃源岩TOC恢复系数(K)约为1.76~2.74,取平均值2.25。恢复后总有机碳含量(TOC_0)介于0.14%~3.53%。平均值1.96%(表4)。乐山沙湾剖面TOC变化(图4)显示,由下至上,茅一一亚段至茅一二亚段底部均显示较高的TOC,而茅一二亚段中、上部则呈现相对较低的TOC,至茅一三亚段又显示较高的有机质丰度(TOC)。

5 古环境演变及有机质富集模式

5.1 古环境演变

5.1.1 古氧化还原环境

氧化还原敏感微量元素如Mo,U和V已被广泛用于评估现代和古代氧化还原条件^[30-32]。除此以外,一些微量元素含量比值也可以用来反映古海洋氧化还原条件,如Th/U和V/Sc。Th/U<2指示缺氧环境,Th/U>8则指示氧化环境。V/Sc高值指示缺氧环境,低值指示氧化环境。

在对元素数据处理过程中,通常采用富集系数法(X_{EF}),采用元素Al作为标准化指标,以消除碎屑贡献和稀释效应的影响^[26]。元素富集系数(X_{EF})的计算公式(1)如下:

$$X_{\text{EF}} = \frac{(X/\text{Al})_{\text{样品}}}{(X/\text{Al})_{\text{PAAS}}} \quad (1)$$

式中: $(X/\text{Al})_{\text{样品}}$ 中X和Al代表样品中某一元素和Al的

表2 川西南地区乐山沙湾剖面主、微量元素含量及TOC测试数据

Table 2 Test data on the major and trace elements and TOC content in the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

地层	样品号	主量元素化合物含量/%					微量元素含量/ 10^{-6}					TOC/%
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Mo	U	V	Cd	Co	
茅 一 一 亚 段	SW-3-1	0.85	0.41	54.55	0.53	0.009	1.25	4.90	42.90	0.38	2.25	未测
	SW-4-1	0.75	0.26	54.80	0.49	0.002	0.95	3.03	66.40	0.37	1.87	0.52
	SW-4-2	1.03	0.31	54.71	0.56	0.003	5.36	7.02	52.30	0.26	1.58	未测
	SW-5-1	16.57	2.83	42.09	1.46	0.005	7.13	10.40	134.00	1.29	2.93	1.33
	SW-6-1	2.37	0.69	53.27	0.85	0.003	2.65	6.53	57.10	0.44	1.91	未测
	SW-6-2	12.37	6.07	41.51	1.58	0.006	5.53	8.89	155.00	1.33	3.03	1.04
	SW-6-3	13.73	1.68	45.07	1.79	0.005	2.50	6.89	80.30	0.68	1.99	未测
	SW-7-1	23.80	1.57	38.69	2.69	0.007	2.41	8.75	120.00	1.70	1.57	1.29
	SW-8-1	31.95	1.90	32.47	4.19	0.005	2.14	7.59	106.00	0.87	2.47	1.22
	SW-9-1	42.13	1.47	25.19	7.41	0.008	1.52	4.32	70.60	0.64	1.24	0.77
	SW-9-2	3.19	0.27	52.71	1.82	0.002	0.47	5.75	17.70	0.07	1.51	未测
	SW-10-1	49.17	1.12	11.53	23.22	0.007	1.18	4.80	103.00	0.68	0.67	1.35
	SW-11-1	27.23	0.69	34.58	7.74	0.003	0.34	2.72	40.70	0.27	0.84	0.58
	SW-12-1	36.03	0.74	24.38	16.11	0.002	1.84	4.45	48.30	1.51	0.93	0.97
	SW-13-1	4.00	0.34	52.25	1.79	0.002	1.87	5.90	14.80	0.40	1.38	未测
	SW-14-1	18.90	0.55	42.10	2.98	0.002	1.69	4.46	56.40	1.05	1.22	未测
	SW-15-1	6.66	0.61	50.26	1.43	0.005	5.39	5.79	43.40	0.99	1.94	0.97
	SW-16-1	0.88	0.22	54.64	0.54	0.004	0.90	2.75	61.50	1.03	1.40	未测
	SW-17-1	19.83	0.80	42.41	1.94	0.003	2.39	10.50	63.30	1.52	1.25	0.81
茅 一 二 亚 段	SW-18-1	4.25	0.26	52.45	1.18	0.003	0.49	5.97	15.20	0.45	1.28	未测
	SW-19-1	28.38	0.42	32.96	10.46	0.002	0.38	4.45	38.60	0.31	1.07	0.82
	SW-20-1	19.23	0.15	44.37	0.83	0.001	2.85	10.80	41.40	0.72	1.01	未测
	SW-20-2	10.63	2.00	43.48	6.66	0.002	0.34	5.37	54.80	1.85	1.07	0.29
	SW-20-3	0.91	0.22	54.20	1.12	0.002	0.23	10.00	9.39	0.17	1.46	未测
	SW-21-1	3.33	0.98	50.19	2.89	0.002	29.90	15.20	294.00	3.68	1.86	未测
	SW-21-2	2.33	0.56	52.07	1.85	0.003	12.70	8.54	166.00	2.51	1.58	1.57
	SW-22-1	3.12	0.49	52.16	1.40	0.002	2.46	9.99	59.50	1.12	1.43	未测
	SW-22-2	3.20	0.28	52.49	1.45	0.002	1.38	8.55	39.20	0.44	1.18	未测
	SW-23-1	3.13	0.89	50.61	2.66	0.004	45.20	18.60	300.00	3.74	2.26	未测
	SW-23-2	1.26	0.15	54.33	0.95	0.002	5.98	11.70	27.70	0.38	1.31	未测
	SW-24-1	15.33	0.56	32.14	13.68	0.003	5.75	5.41	47.00	0.69	1.08	未测
	SW-25-1	3.97	0.13	52.45	0.98	0.002	0.91	4.05	19.30	0.35	1.20	0.30
	SW-26-1	37.72	0.34	27.31	5.97	0.004	1.13	4.81	60.90	0.82	0.77	未测
	SW-28-1	1.04	0.08	54.85	0.53	0.003	0.38	7.04	12.30	0.24	1.22	未测
	SW-29-1	0.32	0.13	55.15	0.43	0.002	0.61	4.77	22.50	0.17	1.43	未测
	SW-31-1	0.34	0.24	55.11	0.61	0.002	2.16	4.50	23.30	0.14	1.47	0.06
	SW-32-1	0.46	0.20	54.84	0.58	0.003	1.19	4.56	39.30	0.24	1.46	未测
茅一三亚段	SW-33-1	6.27	2.26	49.84	0.72	0.007	13.40	9.65	117.00	0.64	2.95	未测
	SW-33-2	1.41	0.60	54.18	0.73	0.004	4.83	2.90	35.50	0.28	1.77	0.90

含量。 $(X/Al)_{PAAS}$ 中 X 和 Al 代表 PAAS(后太古宙澳大利亚页岩)中某一元素和 Al 的含量^[27]。如果 $X_{EF}>1$ 即表示该元素相对 PAAS 富集,反之即亏损。

川西南地区乐山沙湾剖面 Th/U 介于 0.03 ~ 0.60, 均值 0.18; V/Sc 介于 23.48 ~ 394.74, 均值 97.69; Mo_{EF}/U_{EF} 介于 0.04 ~ 930.16, 均值 105.28(表 5); 表明乐山沙湾茅一段整体属缺氧环境,茅一一亚段至茅一二亚段下部(3 ~ 23 层)氧含量略低,茅一二亚段上部至茅一三亚段氧含量略高(图 7a)。

5.1.2 古海洋盐度特征

Mo/TOC 比值也是一个广泛使用的指标,用于判别水体滞留程度, Mo/TOC 低值表明盆地局限程度强,水体更新缓慢, Mo/TOC 高表明盆地水体更新频繁^[33]。 Sr/Ba 元素含量比值可以反映古海洋古盐度变化,一般来说, Sr/Ba 值与海水盐度呈正相关^[34]。

乐山沙湾剖面 Mo/TOC 介于 0.46 ~ 35.88, 均值 6.55; Sr/Ba 介于 0.86 ~ 161.13, 均值 46.43(表 5)。

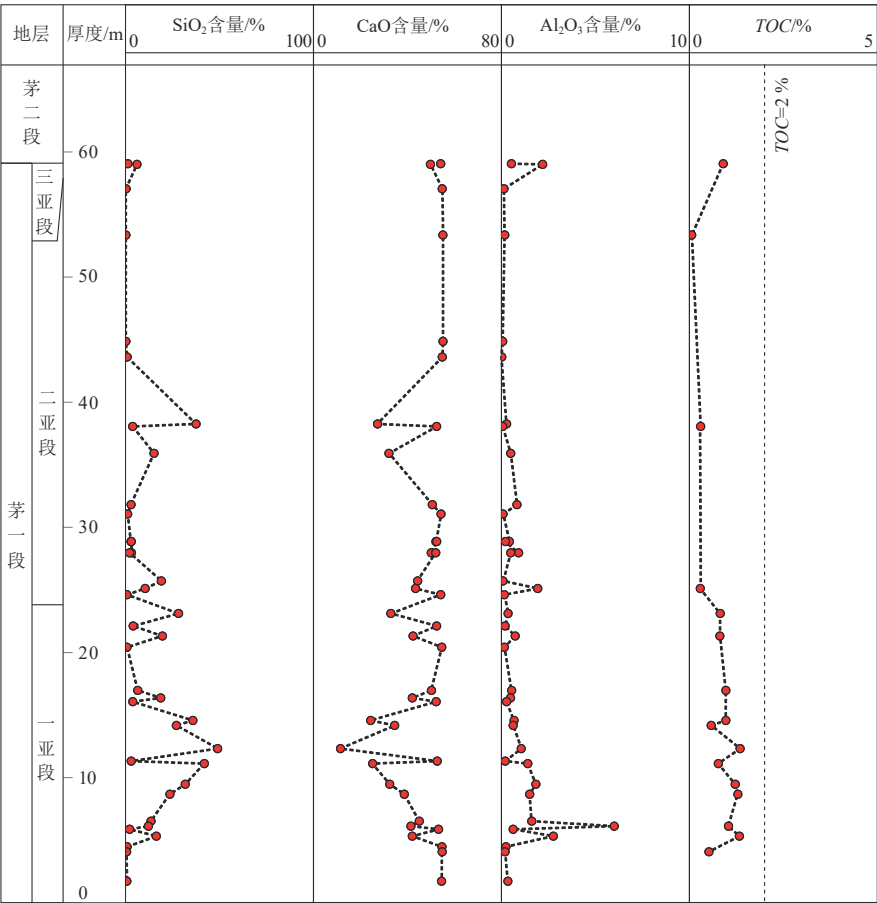


图 4 川西南地区乐山沙湾剖面主量元素化合物含量和 TOC 变化

Fig. 4 Variations in major-element compound contents and TOC content in the Shawan outcrop in Leshan , southwestern Sichuan Basin

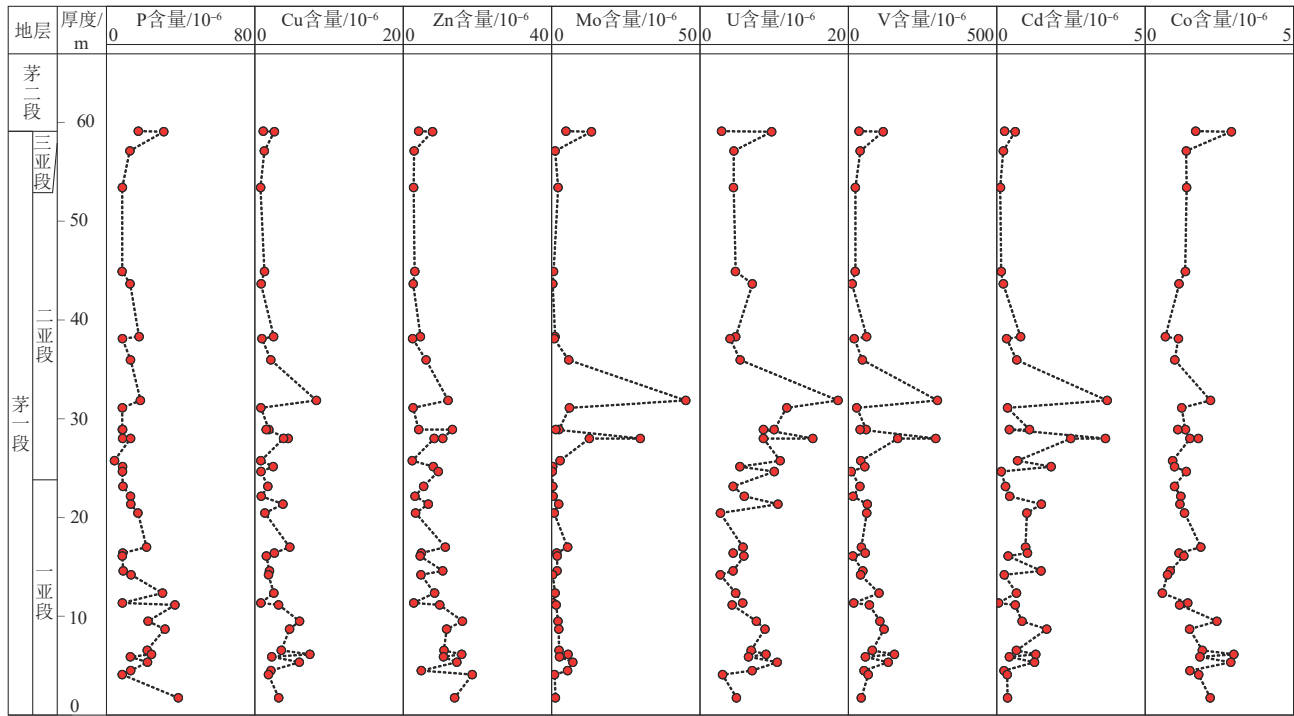


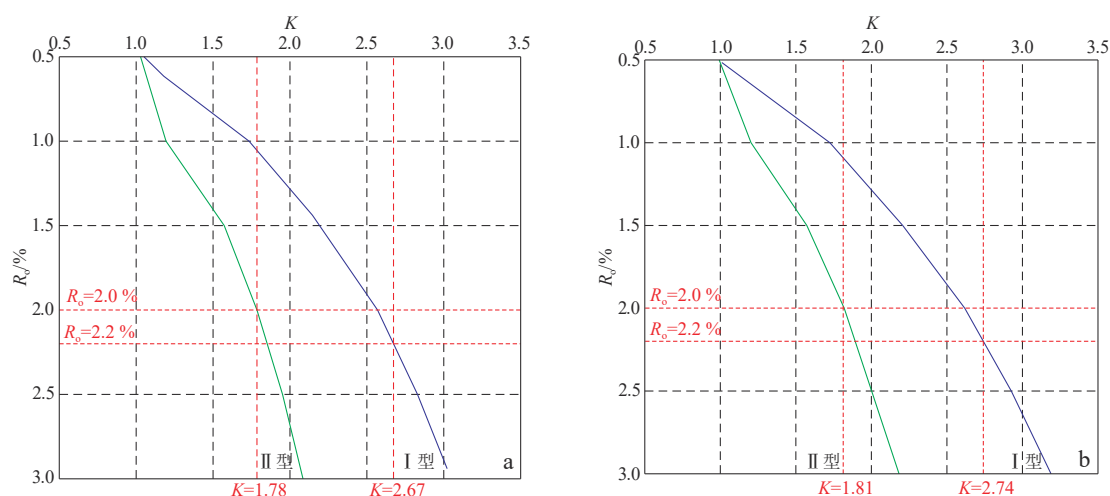
图 5 川西南地区乐山沙湾剖面微量元素含量变化

Fig. 5 Variations in trace element contents on the Shawan outcrop in Leshan , southwest Sichuan Basin

表3 川西南地区乐山沙湾剖面烃源岩干酪根显微组分鉴定及类型划分

Table 3 Maceral composition identification and classification for the source rock kerogen in the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

样品编号	腐泥组含量/%			镜质组含量/%			惰质组含量/%	干酪根类型	
	浮游藻类体	腐泥组无定形体	小计	富氢镜质体	正常镜质体	小计	丝质体	类型指数	类型
SW-15-1	6	85	91		9	9	0	84.25	I型
SW-23-1	5	80	85		15	15	0	73.75	II ₁ 型

图6 川西南地区乐山沙湾剖面茅一段烃源岩原始有机母质 TOC_0 恢复(底图据文献[29])Fig. 6 Reconstruction of original organic parent material abundance (TOC_0) in source rocks of the Mao 1 Member on the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin (base map after reference [29])

a. 泥质岩烃源岩; b. 碳酸盐岩烃源岩

Mo/TOC与Sr/Ba变化特征相似,均于茅一—亚段与茅一三亚段呈现低值,于茅一二亚段显示高值。即乐山沙湾剖面茅一—亚段与茅一三亚段古盐度较低,且水体更新频繁;茅二亚段古盐度较高,且水体更新较弱(图7b)。

5.1.3 有机质初级生产力

沉积物中营养元素(P, Cu和Zn等)的含量和富集程度被广泛用于古生产力的研究。虽然TOC在一定程度上也能反映海洋生产力。但沉积物中有机质的保存受底层水体的氧化还原条件、有机质的堆积速率和生物扰动等因素的制约,因此,很难简单地利用沉积岩的TOC含量来估计沉积时的海洋生产力。TOC/P比值可以指示海洋环境下氧化还原依赖性磷埋藏和再循环的过程。高TOC/P比值反映出低P埋藏效率和/或增强的P循环。据此,结合海水氧化还原条件和TOC/P比值可以更准确的判断沉积物中P所反映的初级生产力水平。

乐山沙湾剖面P元素含量介于 $(4.35 \sim 38.75) \times 10^{-6}$,均值 15.44×10^{-6} ,Cu元素含量介于 $(0.76 \sim 8.28) \times 10^{-6}$,均值 2.61×10^{-6} ,Zn元素含量介于 $(4.85 \sim 37.2) \times 10^{-6}$,均值 15.44×10^{-6} ,TOC/P介于0.01 ~ 0.20,均值

0.06(表5)。P, Cu和Zn显示类似的地球化学变化特征,即:茅一—亚段P, Cu和Zn元素含量显示较高的特征,茅一二亚段在其底部呈现短暂高值、整体均处于极低的初级生产力条件,茅一三亚段也显示较高的初级生产力条件。TOC/P则于茅一二亚段处于高值,茅一—亚段与茅一三亚段均处于低值。乐山沙湾剖面茅一二亚段海洋初级生产力条件局部呈现高值,但茅一二亚段总体仍处于较低的初级生产力条件,茅一—亚段与茅一三亚段显示略高的海洋初级生产力的特征(图7c)。

5.1.4 古洋流上升特征

Sweere等(2016)^[35]提出 $Co(10^{-6}) \times Mn(\%)$ 和Cd/Mo值的综合利用可以帮助区分上升流环境与其他海洋环境(如局限盆地),并重建古环境。高Cd/Mo比值(>0.1)和低 $Co(10^{-6}) \times Mn(\%)$ 值(<0.4)是现代沿海上升流环境中沉积物的代表性化学特征。此外,上升流强度可由Cd/Mo值反映, Cd/Mo值越高指示上升流强度越强。据Cd/Mo变化(图7),茅一—亚段至茅一二亚段下部(3—23层)Cd/Mo总体呈现高值,显示上升洋流较强的特点,同时在沉积微相方面主要发育MF2,可见

表4 川西南地区乐山沙湾剖面 *TOC* 测试数据及
原始有机母质 *TOC₀* 恢复测算

Table 4 Tested *TOC* content and recovered original organic
parent material abundance (*TOC₀*) of the Shawan outcrop in
Leshan, southwestern Sichuan Basin

地层	样品编号	岩性	<i>TOC</i> /%	<i>TOC₀</i> /%
茅一—亚段	SW-4-1	生屑含灰泥岩	0.52	1.17
	SW-5-1	生屑含泥灰岩	1.33	2.99
	SW-6-2	生屑含泥灰岩	1.04	2.34
	SW-7-1	生屑泥灰岩	1.29	2.90
	SW-8-1	生屑泥灰岩	1.22	2.75
	SW-9-1	生屑含泥灰岩	0.77	1.73
	SW-10-1	生屑含灰泥岩	1.35	3.04
	SW-11-1	生屑泥灰岩	0.58	1.31
	SW-12-1	生屑泥灰岩	0.97	2.18
	SW-15-1	生屑粒泥灰岩	0.97	2.18
	SW-17-1	生屑粒泥灰岩	0.81	1.82
茅一二亚段	SW-19-1	生屑粒泥灰岩	0.82	1.85
	SW-20-2	灰泥灰岩	0.29	0.65
	SW-21-2	生屑泥粒灰岩	1.57	3.53
	SW-25-1	钙藻粒泥灰岩	0.3	0.68
茅一三亚段	SW-31-1	钙藻粒泥灰岩	0.06	0.14
	SW-33-2	生屑泥灰岩	0.9	2.03

生物碎屑种类较多,但大量破碎并呈定向排列分布,指示明显的上升流发育。同时,明显更高有机质丰度也在一定程度上证明了存在上升洋流。而茅一二亚段至茅一三亚段 *Cd/Mo* 显示低值,显示上升洋流较弱的特征(图7b),主要沉积微相为 MF6、MF7 和 MF8,生物碎屑相对完整,个体较大,未见明显定向排列,指示水动力作用明显减弱。

基于地球化学指标,可以将乐山沙湾茅一段古洋流上升演化划分为3个阶段。

1) 茅一段早、中期(茅一—亚段、茅一二亚段下部,3—23层),整体处于海侵背景之下,沉积水体相对较深,海洋的含氧量相对较低,整体处于缺氧环境(*Th/U* 均值 0.18, *V/Sc* 均值 101.20)。而上升洋流的发育可以将深部的物质携带而来[*Cd/Mo* 均值 0.59, *Co* (10^{-6}) $\times$ *Mn*(%) 均值 0.09],增加了研究区的营养物质,使初级生产力处于较高水平(*P*, *Cu*, *Zn* 均值分别为 15.75×10^{-6} , 2.95×10^{-6} , 17.62×10^{-6}),这与茅一—亚段岩石生物碎屑与泥质含量均相对较高的特征相一致,主要发育 MF2,其次为 MF7 和 MF8。

2) 茅一段中、晚期(茅一二亚段上部,24—32层),随着海平面的下降,上升洋流强度明显减弱[*Cd/Mo* 均值 0.34, *Co* (10^{-6}) $\times$ *Mn*(%) 均值 0.03],水体氧含量虽然

略有升高(*Th/U* 均值 0.11, *V/Sc* 均值 95.16),但受限于营养物质明显减少,使海洋初级生产力同样显示明显减弱的趋势(*P*, *Cu*, *Zn* 均值分别为 11.66×10^{-6} , 1.38×10^{-6} , 7.09×10^{-6})。这一现象与茅一二亚段上部主要发育 MF6、MF7 和 MF8 的特征相一致。其中,古生物种类主要为粗枝藻,其余生物则少见或未见。粗枝藻属自养型底栖生物,需要的含氧量略低,而其余生物如棘皮类、有孔虫等均为异养型底栖或浮游生物,所需含氧量相对较高。因此,虽然这一时期氧含量有所上升,但仍仅能满足底栖自养型生物的需求。

3) 茅一段末期(茅一三亚段,33层),含氧量略有上升(*Th/U* 均值 0.47, *V/Sc* 均值 53.90),上升洋流强度略有减弱[*Cd/Mo* 均值 0.05, *Co* (10^{-6}) $\times$ *Mn*(%) 均值 0.06],海洋初级生产力显示增强(*P*, *Cu*, *Zn* 均值分别为 24.06×10^{-6} , 1.86×10^{-6} , 12.05×10^{-6})。但由于茅一段末期海侵持续时间较短,导致茅一段末期沉积厚度较小,主要发育 MF2。

综上,川西南地区乐山沙湾茅一段沉积环境主要受到海水升降变化影响,而随着海侵与海退会导致氧含量变化与上升洋流强度的变化,其中上升洋流强度变化尤为明显,较强的上升洋流可以带来更多的深部物质,增加的营养物质可以促进植物以及浮游生物的生长和繁殖,进一步加强海洋的初级生产力。

5.2 有机质富集因素

现在人们普遍认识到富有机物沉积物的形成不能由一个单一的控制因素来解释,而是不同古气候和古海洋条件的综合影响,通常与海洋初级生产力和水体氧化还原条件等因素密不可分^[36-40]。

基于以上认识,对 *TOC* 以及古环境相关指标进行相关性分析。由 *TOC*-古环境指标相关性系数表(表6)可以看出, *TOC* 含量变化与初级生产力指标 *Cu*、*Zn* 含量以及古氧相指标 *V/Sc*、*Mo_{EF}*/*U_{EF}* 均显示明显正相关。初级生产力指标(*Cu*、*Zn* 含量)与上升洋流指标[*Co* (10^{-6}) $\times$ *Mn*(%)]显示较好的相关性($R^2>0.6$),而与各古氧相指标的相关性均显示较差的相关性,即海洋的初级生产力主要受控于上升洋流强度。地球化学特征(表7)显示各沉积微相沉积环境存在差异。初级生产力:MF1、MF2 和 MF3 初级生产力较强(*P* 含量 >20 , *Cu* 含量 >2.5 , *Zn* 含量 >13);MF5、MF6 和 MF7 次之(*P* 含量 >10 , *Cu* 含量 >2.5 , *Zn* 含量 >13);MF4 与 MF8 最差(*P* 含量 >10 , *Cu* 含量 >1.5 , *Zn* 含量 >12)(表7)。古氧相:MF7 氧含量最低(*Th/U* <0.1 , *V/Sc* >150);MF1、MF2 和 MF8 次之(*Th/U* <0.3 , *V/Sc* >100);其余沉积微相氧含量相对较

表5 川西南乐山沙湾剖面古环境指标特征

Table 5 Summary of paleoenvironmental indicators of the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

地层	样品号	Th/U	V/Sc	Mo _{EF} /U _{EF}	Mo/TOC	Sr/Ba	P含量/ 10 ⁻⁶	Cu含量/ 10 ⁻⁶	Zn含量/ 10 ⁻⁶	TOC/P	Cd/Mo	Co(10 ⁻⁶)× Mn(%)
茅一亚段	SW-3-1	0.26	62.17	12.37	未测	36.09	38.75	3.19	27.70	未测	0.30	0.024
	SW-4-1	0.35	138.33	28.58	1.83	71.33	8.52	1.81	37.20	8.38	0.39	0.002
	SW-4-2	0.07	217.92	284.96	未测	84.41	13.06	2.14	9.74	未测	0.05	0.024
	SW-5-1	0.33	50.19	4.06	5.36	17.93	22.14	5.97	28.90	0.81	0.18	0.288
	SW-6-1	0.19	54.38	15.06	未测	46.26	12.90	2.26	21.70	未测	0.17	0.017
	SW-6-2	0.39	64.32	0.62	5.32	22.60	24.28	7.40	31.50	0.93	0.24	0.799
	SW-6-3	0.25	48.08	2.13	未测	31.81	22.00	3.55	22.00	未测	0.27	0.132
	SW-7-1	0.16	100.84	1.79	1.87	20.86	31.59	4.66	23.40	0.66	0.71	0.149
	SW-8-1	0.29	51.46	1.11	1.75	11.08	22.44	6.01	31.90	0.49	0.41	0.305
	SW-9-1	0.38	40.81	1.65	1.97	10.38	36.96	3.17	19.70	0.28	0.42	0.109
	SW-9-2	0.11	32.78	3.61	未测	58.19	8.61	0.79	5.66	未测	0.16	0.012
	SW-10-1	0.26	86.55	1.53	0.87	5.20	30.23	2.54	16.90	0.17	0.58	0.110
	SW-11-1	0.28	67.83	0.60	0.59	23.04	13.27	1.82	9.54	1.74	0.79	0.065
	SW-12-1	0.20	49.29	9.36	1.90	11.58	9.05	1.95	21.30	1.28	0.82	0.129
	SW-13-1	0.10	27.41	33.56	未测	10.53	8.55	1.53	9.13	未测	0.21	0.012
	SW-14-1	0.14	79.44	13.86	未测	19.59	8.80	2.61	9.77	未测	0.62	0.070
	SW-15-1	0.15	73.56	88.59	5.59	94.95	21.62	4.69	22.70	4.39	0.18	0.050
	SW-16-1	0.15	161.84	39.27	未测	92.76	16.97	1.33	6.64	未测	1.14	0.001
	SW-17-1	0.09	75.36	5.62	2.95	13.68	13.15	3.77	13.50	1.04	0.64	0.083
茅二亚段	SW-18-1	0.06	43.43	4.03	未测	52.84	12.98	0.84	6.31	未测	0.92	0.023
	SW-19-1	0.14	80.42	1.23	0.46	13.03	8.91	1.73	11.00	1.46	0.82	0.096
	SW-20-1	0.03	133.55	0.74	未测	88.10	4.35	0.78	4.85	未测	0.25	0.040
	SW-20-2	0.57	46.05	0.04	1.18	0.86	8.70	2.45	16.20	0.10	5.44	0.023
	SW-20-3	0.06	23.48	224.06	未测	22.16	8.64	0.81	18.90	未测	0.74	0.017
	SW-21-1	0.06	326.67	405.80	17.38	4.08	8.74	4.47	21.30	0.47	0.12	0.043
	SW-21-2	0.08	204.94	406.66	8.09	9.14	13.02	3.85	16.70	0.70	0.20	0.028
	SW-22-1	0.08	104.39	19.06	未测	101.63	8.60	1.86	8.35	未测	0.46	0.021
	SW-22-2	0.07	93.33	16.65	未测	144.31	8.70	1.51	26.50	未测	0.32	0.022
	SW-23-1	0.05	394.74	930.16	23.06	39.55	18.30	8.28	24.20	2.16	0.08	0.128
	SW-23-2	0.03	102.59	921.61	未测	161.13	8.61	0.79	5.32	未测	0.06	0.012
	SW-24-1	0.21	73.44	127.82	未测	54.47	12.96	2.13	12.30	未测	0.12	0.067
	SW-25-1	0.10	64.33	82.42	3.07	100.24	8.63	0.93	5.06	11.61	0.38	0.023
	SW-26-1	0.11	121.80	15.01	未测	30.66	17.62	2.50	9.23	未测	0.73	0.059
	SW-28-1	0.05	53.48	22.60	未测	29.07	12.72	0.83	5.38	未测	0.63	0.005
	SW-29-1	0.06	125.00	32.92	未测	50.78	8.44	1.28	6.23	未测	0.28	0.008
	SW-31-1	0.12	101.30	123.97	35.88	53.13	8.58	0.76	5.57	6.19	0.06	0.016
	SW-32-1	0.09	126.77	50.22	未测	45.30	12.65	1.25	5.87	未测	0.20	0.010
茅三亚段	SW-33-1	0.35	53.18	24.35	未测	35.78	30.91	2.61	15.80	未测	0.05	0.107
	SW-33-2	0.60	54.62	148.30	5.37	92.19	17.20	1.11	8.30	5.36	0.06	0.014

高(表7)。上升洋流;各沉积微相均受到了上升洋流影响[Cd/Mo>0.1, Co(10⁻⁶)×Mn(%)<0.4]。其中, MF4受上升洋流影响程度明显[Cd/Mo>1, Co(10⁻⁶)×Mn(%)<0.05]; MF1与MF5次之[Cd/Mo>0.6, Co(10⁻⁶)×Mn(%)<0.08];其余沉积微相受上升洋流影响相对较弱。

各沉积微相有机质丰度存在差异,其中MF1、MF2和MF7具有较高的有机质丰度,恢复后的原始有机母质TOC₀平均值分别为3.38%、2.88%和3.55%, MF4与MF8具有最低的有机质丰度,恢复后的原始有机母质TOC₀平均值仅为0.72%和0.74%(表7)。结合各

沉积微相沉积环境差异, MF1、MF2和MF7均显示较高初级生产力以及较低含氧量的特征, MF4和MF8则显示较低初级生产力以及较高含氧量。

结合川西南地区乐山沙湾剖面主要处于内、中缓坡相带,以及地球化学结果(Cd/Mo均值0.37)显示上升洋流强度相对较弱,而海洋初级生产力相对较强。所以认为在川西南地区,海洋初级生产力为茅一段TOC富集的主要控制因素,其次古氧化还原条件也在一定程度上影响了TOC的富集。其中, MF1、MF2和MF7的古环境条件明显有利于有机质富集。

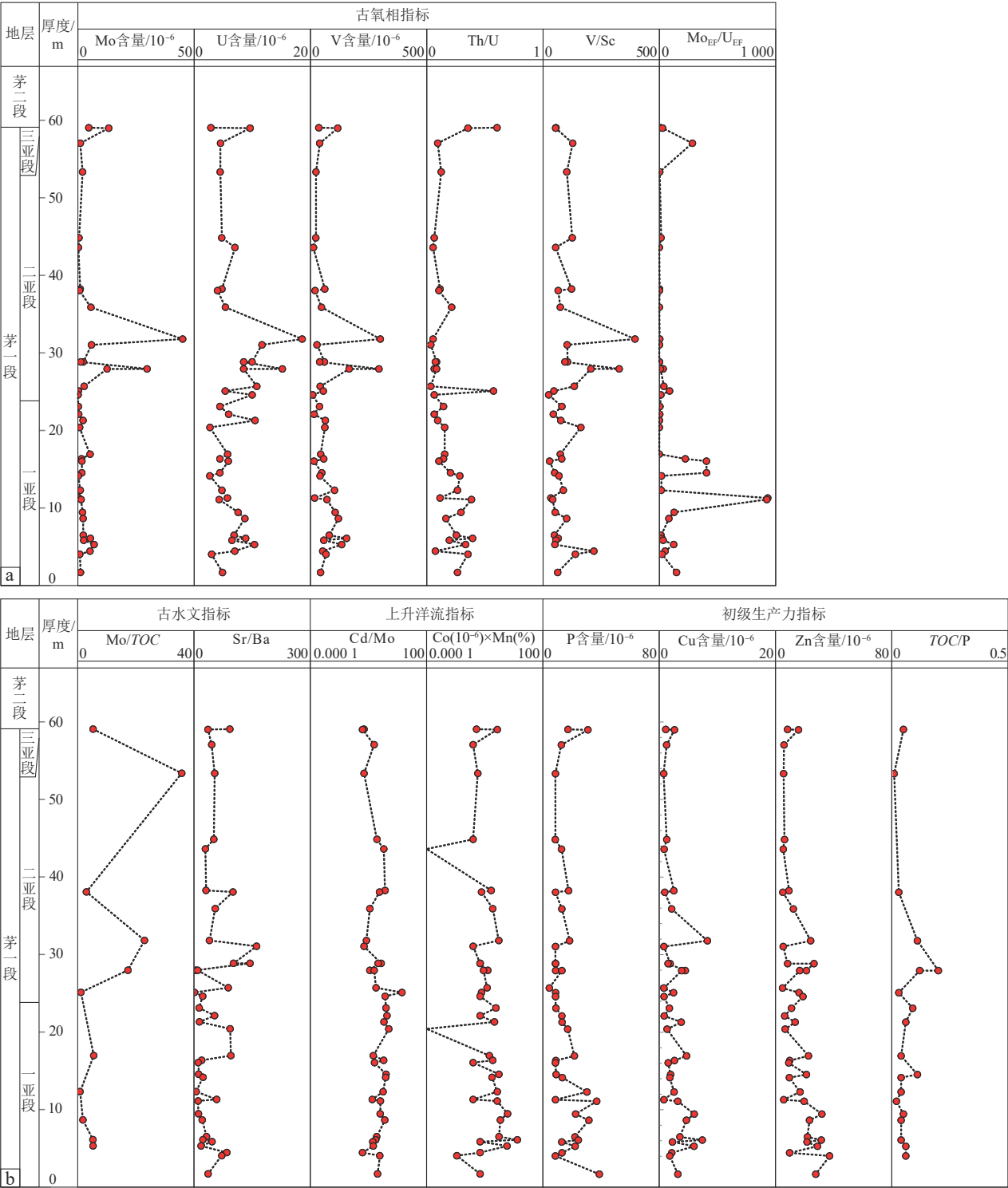


图7 川西南地区乐山沙湾剖面地球化学指标变化

Fig. 7 Plots showing variations in the geochemical indicators of the Shawan outcrop in Leshan , southwestern Sichuan Basin

a. 古氧相指标;b. 古水文指标、上升洋流指标和初级生产力指标

根据各古环境指标的变化趋势,建立了川西南地区乐山沙湾剖面的古环境变化曲线(图8),茅一—亚段、茅一二亚段底部、茅一三亚段含氧量较低,上升洋流强度略有增加,初级生产力同样有升高趋势,有利于有机质富集。结合沉积厚度来看,茅一—亚段与茅一

三亚段在区域上延伸较广,MF2和MF7稳定沉积,MF1则沉积厚度较薄。所以综合认为茅一—亚段和茅一三亚段为有机质富集有利部位,MF2和MF7为有机质富集

的有利沉积微相,这与 TOC_0 在茅一—亚段和茅一三亚段呈现高值的特征具有一致性。

表6 川西南地区乐山沙湾剖面TOC-古环境指标相关性系数

Table 6 Correlation coefficients between TOC content and paleoenvironmental indicators of the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin													
参数	TOC/%	Ga/Al	Sr/Ba	Mo/TOC	Th/U	V/Sc	Mo _{EF} /U _{EF}	Cd/Mo	Co(10 ⁻⁶)×Mn(%)	P含量/10 ⁻⁶	Cu含量/10 ⁻⁶	Zn含量/10 ⁻⁶	
TOC/%	1												
Ga/Al	-0.41	1											
Sr/Ba	-0.37	0.71	1										
Mo/TOC	-0.03	0.21	0.04	1									
Th/U	-0.30	-0.36	-0.09	-0.49	1								
V/Sc	0.67	0.03	-0.22	0.54	-0.59	1							
Mo _{EF} /U _{EF}	0.57	0.17	0.02	0.56	-0.46	0.93	1						
Cd/Mo	-0.39	-0.23	-0.38	-0.33	0.52	-0.25	-0.25	1					
Co(10 ⁻⁶)×Mn(%)	0.20	-0.55	-0.30	-0.18	0.18	-0.14	-0.18	-0.18	1				
P含量/10 ⁻⁶	0.49	-0.57	-0.22	-0.46	0.05	-0.18	-0.23	-0.28	0.43	1			
Cu含量/10 ⁻⁶	0.73	-0.57	-0.36	0.01	-0.21	0.48	0.45	-0.20	0.63	0.43	1		
Zn含量/10 ⁻⁶	0.67	-0.78	-0.52	-0.23	-0.03	0.21	0.10	-0.07	0.68	0.56	0.91	1.00	

表7 川西南地区乐山沙湾剖面各沉积微相TOC-古环境指标特征值

Table 7 Summary of the TOC content and paleoenvironmental indicator values of the various sedimentary microfacies in the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin													
沉积微相代号	沉积微相类型	样品数/个	TOC ₀ 平均值/%	古氧相指标			上升洋流指标		初级生产力指标				
				Th/U	V/Sc	Mo _{EF} /U _{EF}	Cd/Mo	Co(10 ⁻⁶)×Mn(%)	P含量/10 ⁻⁶	Cu含量/10 ⁻⁶	Zn含量/10 ⁻⁶	TOC/P	
MF1	生物碎屑含灰泥岩	1	3.38	0.19	104.18	8.27	0.65	0.08	23.93	2.52	13.07	0.04	
MF2	生物碎屑泥灰岩	5	2.88	0.27	110.28	158.16	0.42	0.13	20.39	3.78	19.21	0.07	
MF3	生物碎屑含泥灰岩	3	2.62	0.31	58.69	5.05	0.37	0.32	23.04	4.79	22.47	0.04	
MF4	灰泥灰岩	1	0.72	0.20	35.09	9.59	1.83	0.02	9.72	1.41	12.64	0.03	
MF5	生物碎屑粒泥灰岩	1	2.03	0.09	75.36	5.62	0.64	0.08	13.15	3.77	13.50	0.06	
MF6	钙藻粒泥灰岩	2	1.38	0.20	63.19	35.81	0.16	0.21	13.59	2.80	16.11	0.02	
MF7	生物碎屑泥粒灰岩	3	3.55	0.08	152.25	170.10	0.24	0.03	12.94	2.93	14.28	0.12	
MF8	钙藻泥粒灰岩	1	0.74	0.10	117.58	100.51	0.26	0.02	13.51	1.58	12.28	0.03	

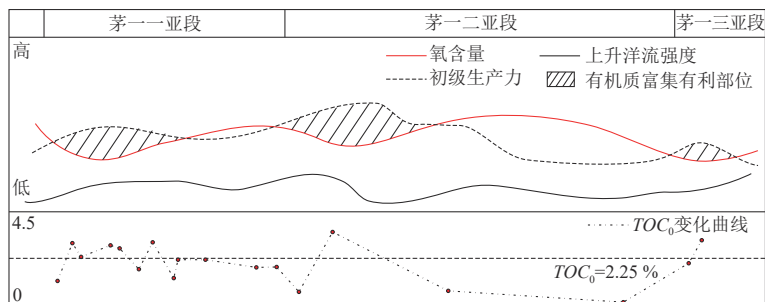


图8 川西南地区乐山沙湾剖面沉积环境与TOC变化曲线

Fig. 8 Curves showing variations in the sedimentary environment with TOC content in the Shawan outcrop in Leshan, southwestern Sichuan Basin

5.3 有机质富集模式

综上所述,中二叠世有机质富集沉积物的形成不能简单地用“埋藏模式”或“生产力模式”来评价,而是在古气候-古海洋耦合作用下海洋生产力和氧化还原

条件等古水文条件综合作用下的结果。前人对四川盆地茅一段沉积环境及沉积相做了大量的研究,对四川盆地茅一段古地貌格局以及沉积相分布已经有了较为一致的认识,即:在茅一段沉积期,四川盆地主要为“西高东低”的古地貌格局,由西南往东北依次发育内缓

坡、中缓坡、外缓坡和陆棚等沉积相^[3,41]。结合乐山沙湾剖面岩性特征,认为川西南地区乐山沙湾整体发育内-中缓坡相沉积。

多个学者通过对川东地区众多钻井、剖面的同位素以及矿物学研究,认为茅一段的“三段式”特征在四川盆地可以广泛识别^[11],而岩性的差异可以代表不同的沉积环境。眼球状灰岩沉积期陆源碎屑输入大,营养物质输入增加,初级生产力增加,同时水体含氧量降低,有利于

有机质富集,而泥晶灰岩沉积期陆源碎屑输入和营养物质输入减少,古生产力降低^[42-44]。这一认识与上文对乐山沙湾剖面的古环境分析一致,由此建立川西南地区茅一段古环境与TOC富集模式图(图9)。

川西南乐山沙湾茅一段沉积环境受到海平面升降变化影响导致一系列因素发生变化,因此,根据古气候-古环境变化和这些控制因素,将川西南地区乐山沙湾茅一段划分了3个不同的阶段,以此来解释川西

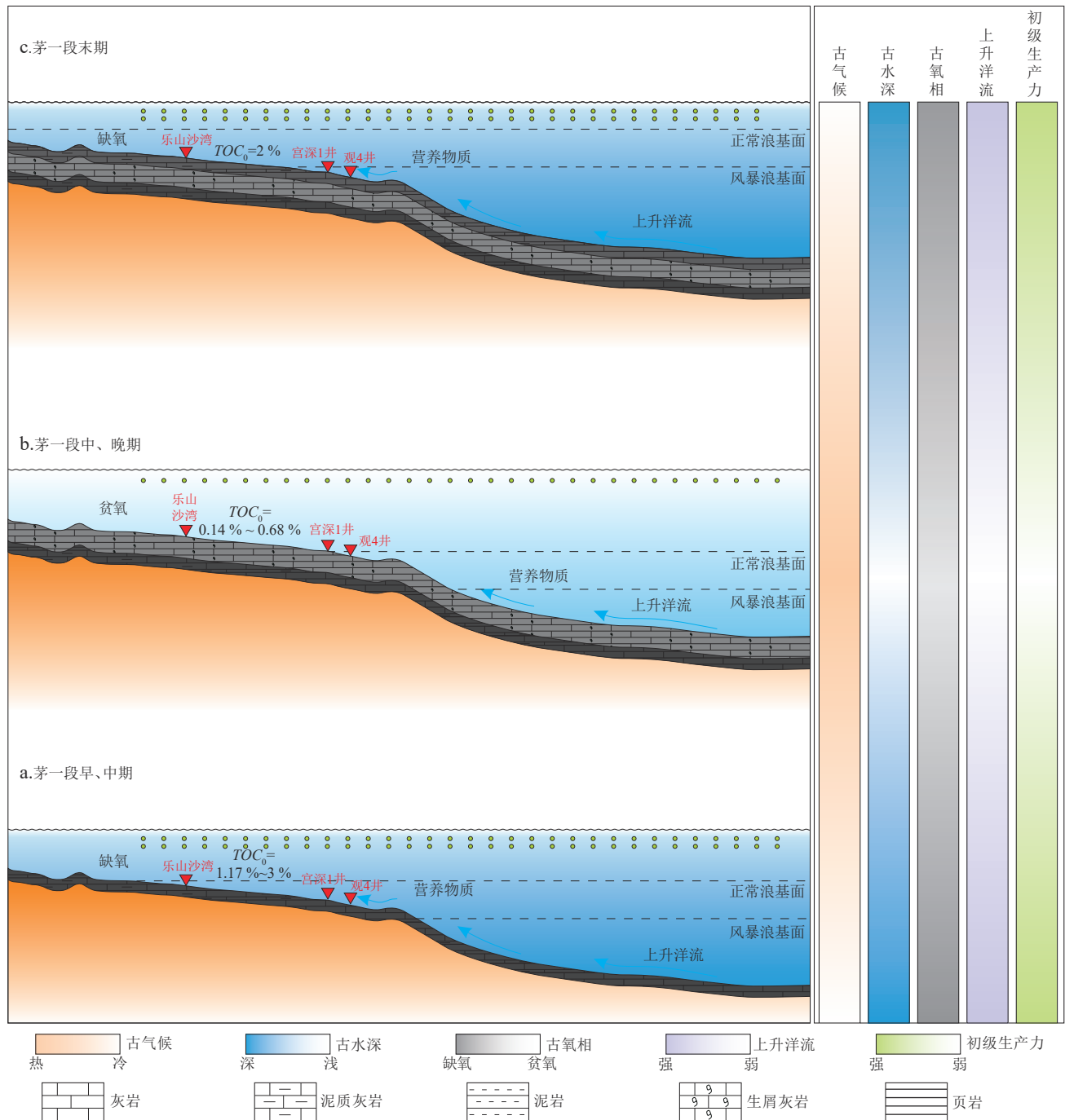


图9 川西南地区茅一段古环境与TOC富集模式

Fig. 9 The TOC enrichment patterns in different sedimentary paleoenvironments of the Mao 1 Member, southwestern Sichuan Basin

南地区乐山沙湾茅一段有机质富集过程及原理。

茅一段早、中期(茅一—亚段至茅一二亚段下部,3—23层),整体仍处于海侵背景之下,沉积水体相对较深,海水含氧量相对较低,整体处于缺氧环境。上升洋流将深部物质携带而来,增加了研究区的营养成分,使初级生产力处于较高水平。较高的初级生产力有利于有机质的进一步富集,缺氧环境则可以保证有机质较好的保存并逐渐积累下来(图9a)。这一时期各微相均有不同程度的发育,其中,主要沉积微相为MF2,其次为MF7和MF8,其中MF2(TOC_0 均值2.71%)与MF7(TOC_0 均值2.86%)有机质丰度较高。

茅一段中、晚期(茅一二亚段上部,24—32层),随着海平面的下降,上升洋流强度明显减弱,水体氧含量虽然略有升高,但受限于营养物质明显减少,使海洋初级生产力同样显示明显减弱的趋势。在此环境中不利于有机质的富集与保存(图9b)。这一时期主要沉积微相为MF6、MF7和MF8,有机质丰度较低, TOC_0 均值仅为0.4%。

茅一段末期(茅一三亚段,33层),含氧量略有上升,是海洋初级生产力有所增强。但受限于茅一段末期沉积时间较短,有机质富集厚度较小(图9c)。这一时期主要沉积微相为MF2(TOC_0 均值2.02%),有机质含量较高。

6 结论

1) 川西南地区乐山沙湾剖面茅一段发育碳酸盐缓坡,可识别8类沉积微相,分别为生物碎屑含灰泥岩(MF1)、生物碎屑含灰泥岩(MF2)、生物碎屑含泥灰岩(MF3)、灰泥灰岩(MF4)、生物碎屑粒泥灰岩(MF5)、钙藻粒泥灰岩(MF6)、生物碎屑泥粒灰岩(MF7)和钙藻泥粒灰岩(MF8)。

2) 川西南地区乐山沙湾茅一段沉积环境受到海水升降变化影响,并伴随氧含量与海洋初级生产力等变化。茅一段早、中期,整体处于海侵背景之下,主要发育MF2,显示沉积水体较深,含氧量相对较低,整体处于缺氧环境,发育上升洋流,初级生产力处于较高水平。茅一段中、晚期,主要沉积微相为MF6、MF7和MF8,显示沉积水体变浅,转为海退环境,水体含氧量略有上升,上升洋流强度明显减弱,海洋初级生产力降低;茅一段沉积末期,发育MF2,指示水体再次加深,含氧量略有上升,海洋初级生产力增强。

3) 川西南地区乐山沙湾茅一段有机质富集直接受控于海洋初级生产力与缺氧环境,间接受上升洋流

影响。较高的初级生产力与较低的含氧量有利于有机质富集。较强的上升洋流可以带来更多的深部营养物质,从而加强海洋的初级生产力。MF2与MF7为有机质富集的有利沉积微相,均受控于较高初级生产力以及较低含氧量,且在区域上具有稳定的沉积厚度。

参 考 文 献

- [1] 刘树根,汪华,孙玮,等.四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析[J].石油与天然气地质,2008,29(6):781-792,818.
LIU Shugen, WANG Hua, SUN Wei, et al. Analysis on special features of petroleum geological conditions of marine facies in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 781-792, 818.
- [2] 夏文谦,刘瑾,俞凌杰,等.川东南涪陵地区二叠系茅口组一段泥质灰岩储层特征及主控因素[J].矿物岩石,2023,43(4):100-108.
XIA Wenqian, LIU Jin, YU Lingjie, et al. Characteristics and main controlling factors of argillaceous limestone reservoir in the first member of Permian Maokou Formation in Fuling area, southeast Sichuan Basin [J]. Mineralogy and Petrology, 2023, 43(4): 100-108.
- [3] 张庄,宋晓波,苏成鹏,等.四川盆地中二叠统茅口组一段岩石微相特征及储层成因——以华蓥山二崖剖面为例[J].断块油气田,2023,30(3):405-414.
ZHANG Zhuang, SONG Xiaobo, SU Chengpeng, et al. Characteristics of rock microfacies and reservoir genesis of the first Member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin: A case study of Erya section of Huaying Mountain [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(3): 405-414.
- [4] 陈宗清.四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J].中国石油勘探,2007,12(5):1-11,78.
CHEN Zongqing. Exploration for natural gas in Middle Permian Maokou Formation of Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(5): 1-11, 78.
- [5] 林良彪,陈洪德,朱利东,等.重庆石柱中上二叠统沉积特征与层序地层[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(6):648-654.
LIN Liangbiao, CHEN Hongde, ZHU Lidong, et al. Sedimentary characteristics and sequence stratigraphy of the Middle-Upper Permian in Shizhu, Chongqing, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(6): 648-654.
- [6] 周新平,何幼斌,杜红权,等.四川宣汉地区二叠系硅岩地球化学特征及成因研究[J].古地理学报,2009,11(6):670-680.
ZHOU Xinping, HE Youbin, DU Hongquan, et al. Geochemical characteristics and origin of the Permian siliceous rocks in Xuanhan region of Sichuan Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(6): 670-680.
- [7] 钟怡江,侯梅生,夏杰,等.重庆石柱中二叠统栖霞组和茅口组沉积微相[J].成都理工大学学报(自然科学版),2014,41

- (4): 458-467.
- ZHONG Yijiang, HOU Meisheng, XIA Jie, et al. Microfacies of Qixia Formation and Maokou Formation in Shizhu, Chongqing, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(4): 458-467.
- [8] 夏文谦, 张汉荣, 刘瑾, 等. 川东南地区茅口组第一段灰泥灰岩储层储集空间构成定量分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 435-444.
- XIA Wenqian, ZHANG Hanrong, LIU Jin, et al. Quantitative analysis of the space composition of marlite reservoir in the first member of Maokou Formation in southeastern Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(4): 435-444.
- [9] 赵培荣. 焦石坝地区茅一段储层特征及天然气勘探潜力[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(5): 772-781, 792.
- ZHAO Peirong. Reservoir characteristics and gas exploration potential of Permian Mao-1 Member of Maokou formation in Jiaoshiba Area [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 772-781, 792.
- [10] 张培先, 何希鹏, 高全芳, 等. 四川盆地东南缘二叠系茅口组一段页岩气藏地质特征及富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 146-157.
- ZHANG Peixian, HE Xipeng, GAO Quanfang, et al. Geological characteristics and enrichment pattern of Permian Mao 1 Member shale gas reservoirs at the southeastern margin of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 146-157.
- [11] 江青春, 汪泽成, 苏旺, 等. 四川盆地中二叠统茅口组一段泥灰岩源内非常规天然气成藏条件及有利勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 82-97.
- JIANG Qingchun, WANG Zecheng, SU Wang, et al. Accumulation conditions and favorable exploration orientation of unconventional natural gas in the marl source rock of the first member of the Middle Permian Maokou Formation, Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 82-97.
- [12] 田小彬, 师江波, 董景海, 等. 川中地区茅口组一段沉积相新认识——基于最新钻井资料[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(11): 1646-1655.
- TIAN Xiaobin, SHI Jiangbo, DONG Jinghai, et al. New understanding of sedimentary facies of the first Member of Maokou Formation based on the latest drilling in central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(11): 1646-1655.
- [13] CAPLAN M L, BUSTIN R M. Palaeoceanographic controls on geochemical characteristics of organic-rich Exshaw mudrocks: Role of enhanced primary production[J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(2/3): 161-188.
- [14] TYSON R V. Sedimentary organic matter: Organic facies and palynofacies[M]. Dordrecht: Springer, 1995: 615.
- [15] SAGEMAN B B, MURPHY A E, WERNE J P, et al. A tale of shales: The relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian basin[J]. Chemical Geology, 2003, 195(1/4): 229-273.
- [16] ZHANG Bolin, YAO Suping, WIGNALL P B, et al. Widespread coastal upwelling along the Eastern Paleo-Tethys Margin (South China) during the Middle Permian (Guadalupian): Implications for organic matter accumulation [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 113-126.
- [17] WEI Chao, DONG Tian, HE Zhiliang, et al. Major, trace-elemental and sedimentological characterization of the upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations, Sichuan Basin, south China: Insights into the effect of relative sea-level fluctuations on organic matter accumulation in shales[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 126: 104905.
- [18] RIMMER S M, THOMPSON J A, GOODNIGHT S A, et al. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: Geochemical and petrographic evidence [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 215(1/2): 125-154.
- [19] BEAUCHAMP B, BAUD A. Growth and demise of Permian biogenic chert along northwest Pangea: Evidence for end-Permian collapse of thermohaline circulation [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 184(1/2): 37-63.
- [20] 刘昇, 范存辉, 张本健, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组孤峰段展布特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 993-1008.
- LIU Sheng, FAN Cunhui, ZHANG Benjian, et al. Distribution characteristics of Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin and its petrogeological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 993-1008.
- [21] 范建平, 宋金民, 江青春, 等. 川东地区中二叠统茅口组一段储层特征与形成模式[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1413-1430.
- FAN Jianping, SONG jinmin, JIANG Qingchun, et al. Reservoir characteristics and development model of the Middle Permian Mao-1 Member in eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1413-1430.
- [22] 郭彤楼. 四川盆地碳酸盐岩源岩气地质特征与勘探前景[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 1-16.
- GUO Tonglou. Geological characteristics and exploration prospect of carbonate source rock gas in Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(1): 1-16.
- [23] 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- ZENG Yunfu, XIA Wenjie. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [24] DUNHAM R J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture [M]//HAM W E. Classification of Carbonate Rocks—A Symposium. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1962: 108-121.
- [25] FLÜGEL E. Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application [M]. Berlin: Springer, 2010: 1-984.
- [26] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [27] ZHANG Bolin, YAO Suping, HU Wenxuan, et al. Middle Permian palaeoclimatic-palaeoceanographic evolution and its controls on organic matter accumulation in the Lower Yangtze upwelling region [J]. International Journal of Coal Geology,

- 2022, 264: 104132.
- [28] 李珊. 四川盆地二叠系茅口组烃源岩发育分布及成藏模式[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- LI Shan. The distribution of source rocks and hydrocarbon accumulation model of the Permian Maokou Formation in Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.
- [29] 庞雄奇, 李倩文, 陈践发, 等. 含油气盆地深部高过成熟烃源岩古 TOC 恢复方法及其应用[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 769-789.
- PANG Xiongqi, LI Qianwen, CHEN Jianfa, et al. Recovery method of original TOC and its application in source rocks at high mature-over mature stage in deep petroliferous basins[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(6): 769-789.
- [30] 韦恒叶. 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.
- WEI Hengye. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: An overview of elementary geochemistry[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(2): 76-88.
- [31] ALGEO T J, LYONS T W. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions[J]. Paleoclimatology, 2006, 21(1): PA1016.
- [32] ALGEO T J, INGALL E. Sedimentary C_{org} : P ratios, paleocean ventilation, and Phanerozoic atmospheric pO_2 [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 256(3/4): 130-155.
- [33] MÄRZ C, POULTON S W, BECKMANN B, et al. Redox sensitivity of P cycling during marine black shale formation: Dynamics of sulfidic and anoxic, non-sulfidic bottom waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(15): 3703-3717.
- [34] 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 633-642.
- FAN Mengmeng, BU Jun, ZHAO Xiaoyan, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 633-642.
- [35] SWEERE T, VAN DEN BOORN S, DICKSON A J, et al. Definition of new trace-metal proxies for the controls on organic matter enrichment in marine sediments based on Mn, Co, Mo and Cd concentrations[J]. Chemical Geology, 2016, 441: 235-245.
- [36] 王鹏威, 刘忠宝, 张殿伟, 等. 川东地区二叠系海相页岩有机质富集对有机质孔发育的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 379-392.
- WANG Pengwei, LIU Zhongbao, ZHANG Dianwei, et al. Control of organic matter enrichment on organic pore development in the Permian marine organic-rich shale, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 379-392.
- [37] 姚天星, 李忠诚, 郭世超, 等. 川南自贡地区海相页岩沉积环境及有机质富集主控因素研究[J]. 特种油气藏, 2023, 30(4): 79-86.
- YAO Tianxing, LI Zhongcheng, GUO Shichao, et al. Study on the sedimentary environment and main controlling factors of organic matter enrichment of marine shale in Zigong Area of the Southern Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(4): 79-86.
- [38] 梁超, 刘雨迪, 操应长, 等. 扬子地区奥陶纪—志留纪转折期多事件耦合关系及有机质富集[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 1-12.
- LIANG Chao, LIU Yudi, CAO Yingchang, et al. Coupling relationship of multiple events and enrichment of organic matter during Ordovician-Silurian transition period in Yangtze region[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(6): 1-12.
- [39] 王瑶琳, 徐胜林, 侯明才, 等. 云南保山地区下仁和桥组页岩特征、有机质富集因素及富集模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(5): 37-46.
- WANG Yaolin, XU Shenglin, HOU Mingcai, et al. Shale characteristics, organic matter enrichment factors and enrichment model of Xiarenheqiao Formation in Baoshan area in Yunnan [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(5): 37-46.
- [40] 于浩, 张朋霖, 孙平昌, 等. 建昌盆地五家子地区下白垩统九佛堂组页岩有机质富集条件及机制[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(5): 36-46.
- YU Hao, ZHANG Penglin, SUN Pingchang, et al. Organic matter enrichment conditions and mechanism of oil shale in Lower Cretaceous Jiufotang Formation of Wujiazi area in Jianchang Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(5): 36-46.
- [41] 张宇, 曹清古, 罗开平, 等. 四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 610-620.
- ZHANG Yu, CAO Qinggu, LUO Kaiping, et al. Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and enlightenment obtained [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 610-620.
- [42] SU Chengpeng, LI Fei, TAN Xiucheng, et al. Recognition of diagenetic contribution to the formation of limestone-marl alternations: A case study from Permian of South China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 111: 765-785.
- [43] 范建平, 宋金民, 刘树根, 等. 四川盆地中二叠统茅一段灰岩—泥质灰岩韵律层古温度演化及驱动机制[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 726-738.
- FAN Jianping, SONG Jinmin, LIU Shugen, et al. Paleotemperature evolution and its driving mechanism during the formation of limestone-marl alternations in first member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(4): 726-738.
- [44] 姜智利, 朱祥. 四川盆地元坝地区二叠系茅口组油气成藏特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 639-646.
- JIANG Zhili, ZHU Xiang. Hydrocarbon accumulation characteristics and main controlling factors for Permian Maokou Formation in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(4): 639-646.