

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05001

何江林,陈正辉,董大忠,孙莎莎,王志国,2022. 川东地区东岳庙段沉积环境演化及其页岩油气富集主控因素分析. 沉积与特提斯地质,42(3): 385-397. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05001

HE J L, CHENG Z H, DONG D Z, SUN S S, WANG Z G, 2022. The evolution of sedimentary environments of Dongyuemiao Member and key factors for enrichment of shale oil and gas, northeastern Sichuan Basin. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3):385-397. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05001

## 川东地区东岳庙段沉积环境演化及其页岩油气富集主控因素分析

何江林<sup>1,2</sup>, 陈正辉<sup>3\*</sup>, 董大忠<sup>4</sup>, 孙莎莎<sup>4</sup>, 王志国<sup>5</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610082; 3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第八采油厂地质研究所, 陕西 西安 710018; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 5. 中国石油天然气股份有限公司大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

**摘要:**川东地区下侏罗统自流井组东岳庙段富有机质泥页岩发育,且在局部地区已获工业页岩油气流,但尚未实现规模开发,其页岩油气富集机理研究滞后于生产实践。本文在野外调查和测试分析的基础上,对其沉积环境演化及页岩油气地质条件进行分析,并探讨其页岩油气富集主控因素,以期为实现东岳庙段页岩油气突破提供有益借鉴。结果显示:川东地区东岳庙段发育一个完整的水进水退沉积旋回,富有机质泥页岩主要发育于中部半深湖相,厚约15~30m,TOC平均为1.79%,以II型有机质为主,热演化程度较高,达凝析油—湿气阶段。以黏土矿物粒间孔和有机质孔为主,脆性矿物含量中等,脆性指数平均为62.1%。平均孔隙度为8.85%,而渗透率极低,均值仅0.239mD,呈现出“高孔低渗”特征,层内油气以侧向运移为主。其页岩油气的富集主要受富有机质泥页岩分布、热演化程度和裂缝发育条件的控制。推论垂向富有机质泥页岩连续发育的现今油气低势区是川东地区东岳庙段潜在的页岩油气高产区。

**关键词:**页岩气;页岩油;下侏罗统;湖相页岩;四川盆地

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

## The evolution of sedimentary environments of Dongyuemiao Member and key factors for enrichment of shale oil and gas, northeastern Sichuan Basin

HE Jianglin<sup>1,2</sup>, CHENG Zhenghui<sup>3\*</sup>, DONG Dazhong<sup>4</sup>, SUN Shasha<sup>4</sup>, WANG Zhiguo<sup>5</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, China; 3. The eighth Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710020, China; 4. Research Institute of Petroleum

收稿日期:2022-01-25; 改回日期:2022-04-29 责任编辑:郭秀梅 科学编辑:杨平

作者简介:何江林(1984—),男,高级工程师,主要从事页岩油气综合地质研究工作。E-mail:5hjl998@163.com;hjianglin@mail.cgs.gov.cn

通讯作者:陈正辉(1982—),男,工程师,主要从事致密油气勘探开发工作。E-mail:393464926@qq.com;chenzh\_h@petrochina.com.cn

资助项目:国家自然科学基金(41772126),中国地质调查局项目(DD20221661);中国石油勘探开发研究院课题(RIPED-2020-TS-50791,RIPED-CN-2021-JS-207)。

*Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 5. Research Institute of Exploration & Development, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163712, China)*

**Abstract:** The organic-rich mud shale develops in Dongyuemiao Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation in eastern Sichuan Basin. Although a few of industrial shale oil and gas flow has been obtained, the large-scale production of shale oil and gas hasn't started yet, and the understanding of the enrichment mechanism of shale oil and gas in the region is not enough. Based on the field investigation and test analysis, this paper analyzes the evolution of sedimentary environments of the Dongyuemiao Member and discusses the main control factors for enrichment of shale oil and gas, in order to provide scientific suggestions for the breakthrough of shale oil and gas in the region. The results show that: (1) The Dongyuemiao Member had experienced a whole retrogradation-progradation cycle, and the organic-rich shale, which is in the semi-deep lake facies, is located at the middle of the Dongyuemiao Member; (2) The thickness of organic-rich shale in the Dongyuemiao Member is from 15 m to 30 m and its average TOC is 1.79%, and the kerogen is mainly in II type; (3) The thermal evolution degree of the Dongyuemiao Member is high, reaching condensate-moisture stage; (4) The pores are mainly composed by the soil mineral intergranular pores and organic pores, and the content of brittle minerals is moderate and the average brittleness index is 62.1% and the average porosity is 8.85%; (5) The permeability is extremely low, with an average of 0.239 mD. It is concluded that the Dongyuemiao Member belongs to the "high porosity and low permeability". The hydrocarbon in the Dongyuemiao Member is mainly migrated along the bed plane in lateral directions. The enrichment of the shale gas and oil in Dongyuemiao Member is closely related to the distribution of organic-rich shale, the thermal evolution of the shale, and the distribution of fractures. The prolific zones for shale gas and oil in Dongyuemiao Member are characterized with thick organic-rich shale and low hydrocarbon accumulation potential.

**Key words:** shale gas; shale oil; Lower Jurassic; lacustrine shale; Sichuan Basin

## 0 引言

四川盆地东部地区下侏罗统自流井组发育多套富有机质泥页岩层段,与中国现今页岩气主产层——五峰组—龙马溪组海相页岩相比(朱彤等, 2012),其埋深相对较浅,开采技术难度和成本相对较低。相对鄂尔多斯盆地山西组等陆相页岩气主产层(赵帮胜等, 2019)具有介壳和粉晶灰岩条带发育,脆性矿物含量相对较高的特征。泥页岩顶与底邻层生物碎屑灰岩发育,具有一定的顶底板条件,是四川盆地“油气并举”的重点层位(Wang et al., 2020)。自1956年川中地区侏罗系油气钻探工作开始以来,四川盆地侏罗系油气勘探经历了早期勘探起步(1956—1979年)、滚动开发(1971—1988年)、30万吨原油上产(1989—1999年)、原油调整稳产(2000—2010年)、科技攻关试验(2011—2016)等五个阶段(杨跃明和黄东, 2019),发现5个油田、18个含油气区块,累计发现三级石油储量1.6亿吨。近年来,自流井组内致密型砂岩气、页岩油、页岩气

等非常规油气资源的勘探开发得到高度重视,在元坝(郭彤楼等, 2011)、涪陵(张快, 2015)、平昌(孙艳妮, 2018)、建南(朱彤等, 2016)等地钻获工业页岩油气流。尽管四川盆地自流井组内油气勘探开发已取得一系列进展,但仍有诸多实践问题尚待深入研究,如:(1)油气资源量大(10~16亿吨)与储量小不匹配(迄今探明储量仅0.8亿吨);(2)致密储层物性差与油气相对高产能不匹配(杨跃明和黄东, 2019)。同时,与海相页岩相比,陆相泥页岩具有较强的非均质性,岩性组合横向变化迅速(曹香妮等, 2019),极大地制约了陆相页岩展布规律预测的可靠性。陆相页岩油气富集机理的研究也远远滞后于生产实践(黎茂稳等, 2020)。为此,本文以川东地区下侏罗统自流井组东岳庙段湖相页岩为研究对象,在野外调查、样品测试和前人资料收集的基础上,对其沉积环境演化特征及页岩油气富集规律进行初步分析,以期对东岳庙段湖相页岩油气勘探开发提供有益借鉴。

成一个统一的陆内前陆盆地,形成两个沉积中心:一个位于现今川中地区的南充一带,另一个位于现今湖北荆门—当阳地区,且后者也是当时中扬子地区的沉降中心(许效松和刘宝珺,1994)。该时期四川盆地伸展作用强度交替变化,由下至上依次沉积形成自流井组珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段和大安寨段(图1b)。早期,在相对强烈的伸展作用下,盆地快速沉降形成珍珠冲段三角洲相与滨浅湖相沉积。东岳庙段沉积时期盆地的伸展作用相对减弱,盆地缓慢沉降,物质供应缓慢,大规模湖相沉积发育;马鞍山段沉积时期四川盆地再次进入另一强伸展期,盆地整体稳定沉降。期间松潘褶皱带隆升活动复苏,碎屑物质供应充足,湖域范围缩小,盆地周缘三角洲和河流相发育。进入到大安寨段沉积时期,盆地的伸展作用大幅减弱,盆地周缘的造陆、造山运动几乎停止,整个四川盆地保持稳定沉降,而来自盆外的陆源碎屑供给缺乏,盆地整体的拗陷速率大于陆源碎屑的堆积速率(李英强和何登发,2014),形成早侏罗世四川盆地第二次大规模的湖泛沉积(图1b)。

川东地区地处四川盆地东部(图1),包括川东高陡构造带、川南低缓背斜构造带北部、川中低平构造带东部与川北宽缓背斜构造带东部(刘树根等, 2008)。自晋宁运动形成结晶基底至今,四川盆地先后经历了扬子、加里东、海西、印支、燕山及喜山6个旋回。在下部扬子旋回至印支旋回早期,四川盆地主要发育以碳酸盐岩为主的海相沉积(范昱, 2011)。受扬子地块与松潘褶皱带、秦岭造山带发生陆内汇聚作用控制,自三叠世晚期四川盆地由雷口坡组海相沉积演变为须家河组陆相沉积。早侏罗世—中侏罗世早期(199.6 ~ 167.7Ma)随着龙门山逆冲推覆作用的减弱(王昕尧等, 2021),中上扬子地区处于构造活动相对宁静期,进入短暂的陆内伸展阶段(李英强和何登发, 2014)。虽然其整体上继承了晚三叠世瑞替晚期的沉积格局,但局部还是发生了较为剧烈的变化。晚三叠时期还处于分离状态的中扬子前陆盆地与上扬子前陆盆地已连

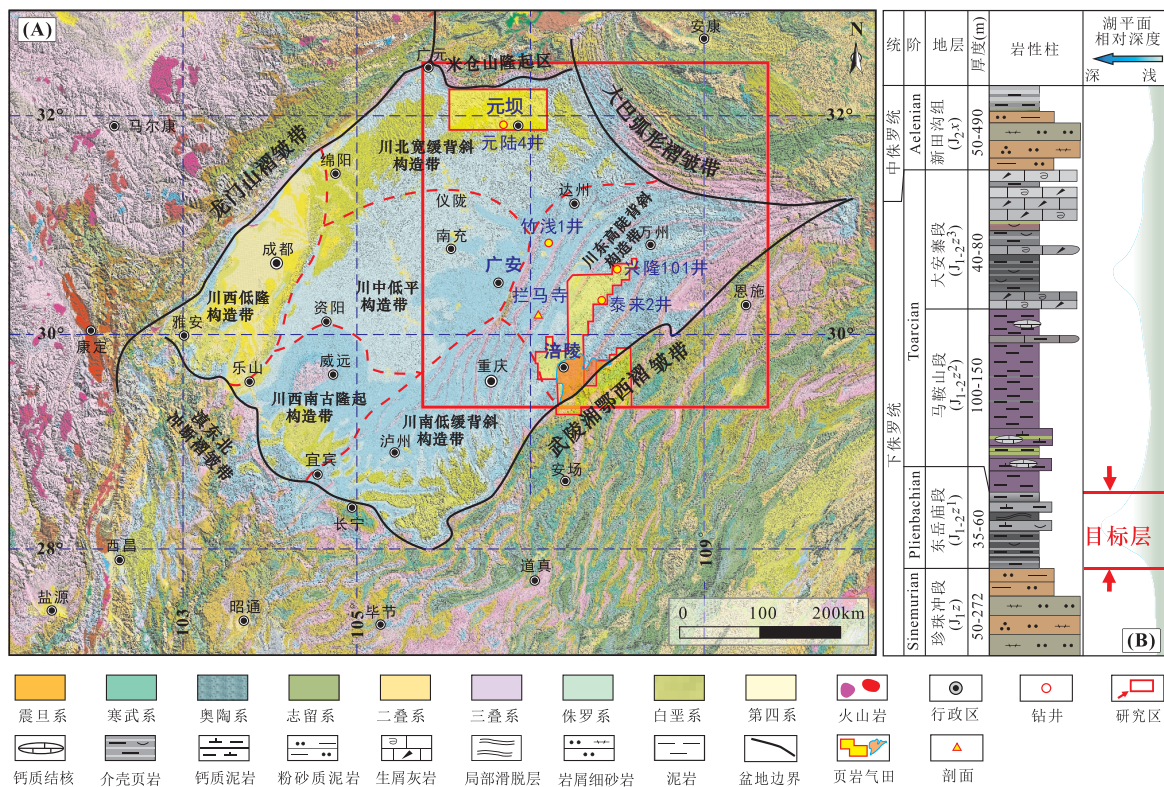


图1 研究区分布图(a)四川盆地构造纲要及研究区分布图(刘树根等, 2008);(b)四川盆地自流井组岩性综合柱状图(据1:20万地质图汇总修编)

Fig.1 The location of the study area. (a) The tectonic units of Sichuan Basin and the distribution of the study area, modified from the Liu et al., 2008; (b) The lithological column of the Ziliujing Formation in Sichuan Basin (edited from the geological survey of 1:200000)

早侏罗世,四川盆地处于欧亚大陆东南边缘(Xu et al., 2017),据古流向、陆源碎屑来源、底栖生物和藻类等资料对古地理格局和水体相对深度的指示作用显示,早侏罗世四川盆地的陆源碎屑主要来自于西部松潘褶皱带和北部大巴山褶皱带,其次是东部雪峰山褶皱带。在地形上,具有西陡东缓的特征,其西部龙门山断裂与大巴山褶皱带附近地形落差较大,东部雪峰山褶皱带方向地形相对平缓(图2a)。在早侏罗世珍珠冲段浅湖与三角洲相沉积的基础上,东岳庙段沉积时期,四川盆地的伸展作用逐渐减弱,盆地内分散的小湖盆几乎均被连通为统一的大型湖盆,发育早侏罗世四川盆地内第一次湖泛沉积。在四川盆地内,东岳庙段下部主要为灰、深灰色灰岩、介壳灰岩、泥灰岩,夹页岩,长寿一带夹透镜状菱铁矿,隆昌至江津一带底部普遍为介壳粉砂岩。与下伏珍珠冲段的界线清楚,两者呈整合过渡。上部主要由灰、灰绿夹暗紫色泥页岩组成,夹多层泥灰岩、介壳灰岩透镜体,含炭化植物化石。其顶部逐渐出现紫红、暗紫色泥页岩,与上覆马鞍山段呈渐变过渡关系。全盆内东岳庙段泥页岩总厚主体在35~60m之间。其沉积基底继承了晚三叠世末期的古地理格局,随着早期南侧泸州隆起、北东侧开江隆起和北部的天井山隆起逐渐演变为水下隆起区,四川盆地沉积基底形成具有多个次级洼陷的古地理格局(图2a),其中川东地区的次级洼陷中心位于涪陵地区北侧,以灰黑色泥页岩、含介壳泥岩偶夹少量薄层状灰岩透镜体、条带为特征的半深湖相沉积为主,东岳庙段整体厚度较薄,介于30~60m之间。川北元坝地区靠近秦岭山地,地形落差较大,陆源碎屑供给充足,以灰色—深灰色泥页岩与浅灰—灰白色粉砂岩不等厚互层为主(罗东东, 2019; Wang et al., 2020),较涪陵地区其沉积厚度明显变大(图2b),区内东岳庙段平均厚度多在70m以上(高健等, 2016)。

## 2 东岳庙段垂向沉积演化特征

东岳庙段沉积时期,广安市东部邻水县拦马寺地区位于四川盆地侏罗系湖盆东部沉积洼陷西侧(图2a),能较好地反映东岳庙段沉积时期四川盆地湖盆的垂向水体演化规律。该剖面底部珍珠冲段主要为浅灰—灰绿色薄—中层状岩屑细砂岩、粉砂质泥岩,其内石英含量约30%~60%,粒度大小较为均一,以粉砂至细砂级为主,磨圆中等,以次圆至

圆状为主。岩屑细砂岩与粉砂质泥岩层面平直,延伸稳定,夹少量单层厚约2~10cm的薄层状泥岩,砂岩内局部见小型沙纹交错层理,指示着间歇性波浪作用的水动力特征。

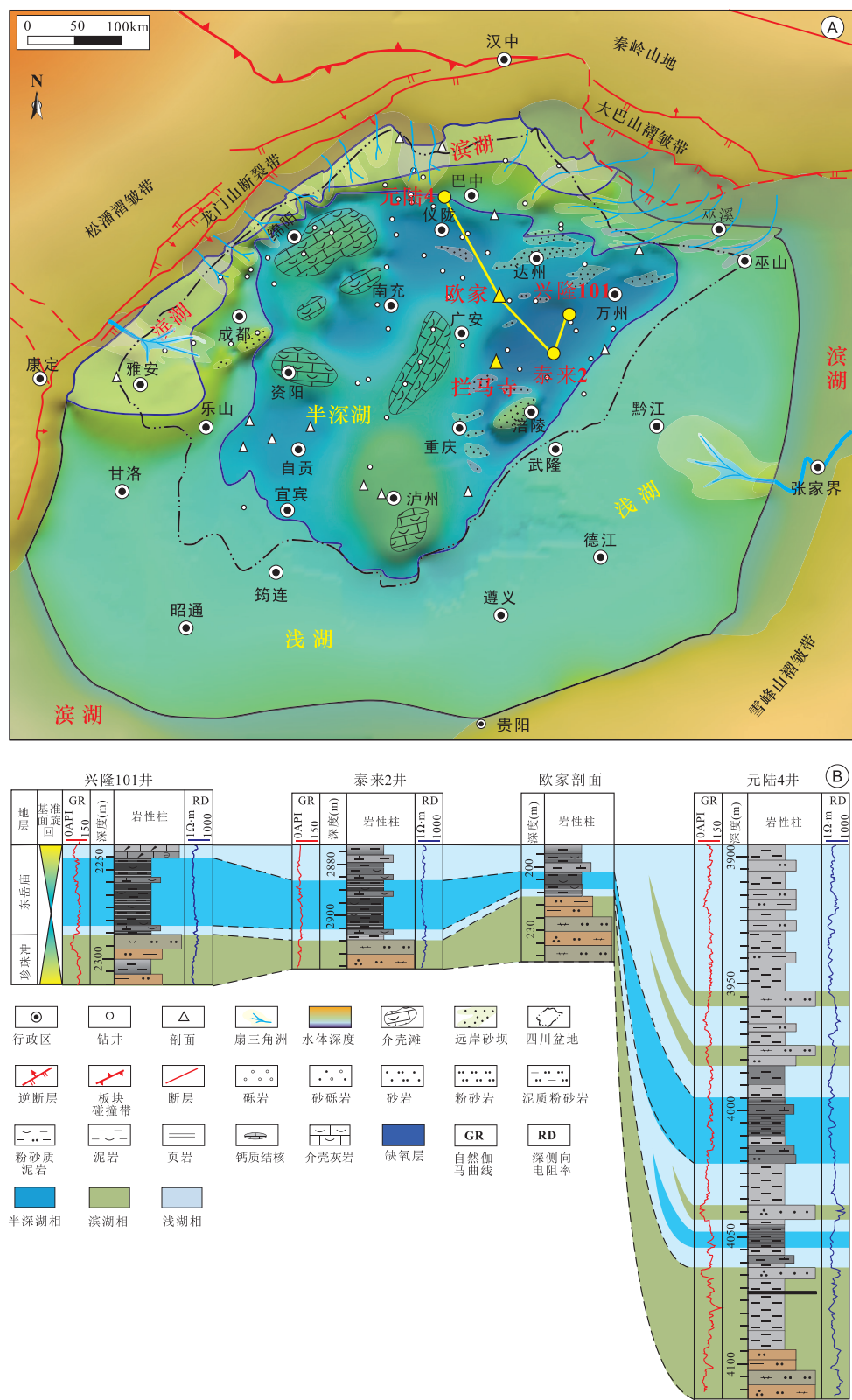
东岳庙段下部(深度23.27~30.64m段,图3)主要为灰色含泥质介壳灰岩层与灰—深灰色介壳泥岩不等厚互层,介壳以双壳和腹足为主,介壳含量大多在40%~90%,介壳大小主要在0.5~2.0cm之间,以同心圈层纹饰为主,纹饰较清晰,壳体厚度中等,长轴以顺层排列为主,显示存在间歇性牵引流作用。在深度30m附近,见一长约30cm厚约12cm的炭化植物碎屑顺层发育,植物碎屑边缘厚约1cm层炭化成煤线,显示其沉积时期偶尔有悬浮型陆源碎屑供给。而大量的介壳等底栖生物、浅灰至灰色中厚层状含介壳钙质泥岩显示水体含氧,水体深度相对较浅,以浅湖相为主(图3)。

东岳庙段上部(深度0.62~23.27m段,图3)主要为深灰—灰黑色泥页岩组成,夹少量灰色薄层状生物碎屑灰岩、灰岩透镜体与粉砂岩透镜体。其中深度8.3~18.55m段泥页岩内含介壳化石,壳薄,长轴顺层排列,经埋藏压实后呈薄层状,介壳多以同心圈层为主,其内夹大量浅灰—灰色薄层状生物碎屑灰岩。向上介壳夹层逐渐变少,在深度4.3~8.3m段深灰—灰黑色泥页岩相对较纯,页理极为发育,其内介壳钙质泥岩与生物碎屑灰岩不发育。泥页岩内偶见少量双壳化石,壳体较薄,纹饰清晰,以同心圈层纹饰为主,指示着沉积水体相对安静缺氧。向上在深度0.62~4.3m段粉砂质条带与泥质粉砂岩夹层发育,泥岩的颜色也逐渐由灰黑色向上渐变为灰至浅灰色,显示着水体逐渐变浅,砂质颗粒逐渐增多的特征。

东岳庙段顶部(0~0.62m段)为马鞍山段浅灰—灰色中层状钙质泥质粉砂岩,单层厚度>35cm,页理不发育,指示沉积速率相对较快,与下伏灰色薄层状页岩形成明显的对比。尤其是其下伏东岳庙段顶部页岩内滑脱层发育,形成厚约40cm的滑脱层,滑脱层内页岩层面挠曲断裂,形成一套天然裂缝层段。向上马鞍山段发育灰黄与紫红色泥岩夹少量钙质结核,指示着水体含氧量快速增加。

整体上,由下向上东岳庙段水体先逐步加深,从浅湖相渐变为半深湖相,深灰—灰黑色泥页岩逐渐发育。在上部再由半深湖相深灰—灰黑色泥页岩逐渐演变为浅湖相浅灰色泥质粉砂岩,发育一完





(A) 东岳庙段沉积时期四川盆地沉积基底古地理格局图;(B) 东岳庙段地层对比图,据 Qiu Z & He J L (2021) 修改

图2 四川盆地自流井组东岳庙段沉积环境示意图

Fig. 2 The depositional environment of the Dongyuemiao Member in Sichuan Basin. (a) The sedimentary basement of Sichuan basin during the Dongyuemiao Member was depositing, (b) The stratigraphic correlation map of Dongyuemiao Member, modified from Qiu Z & He J L (2021).

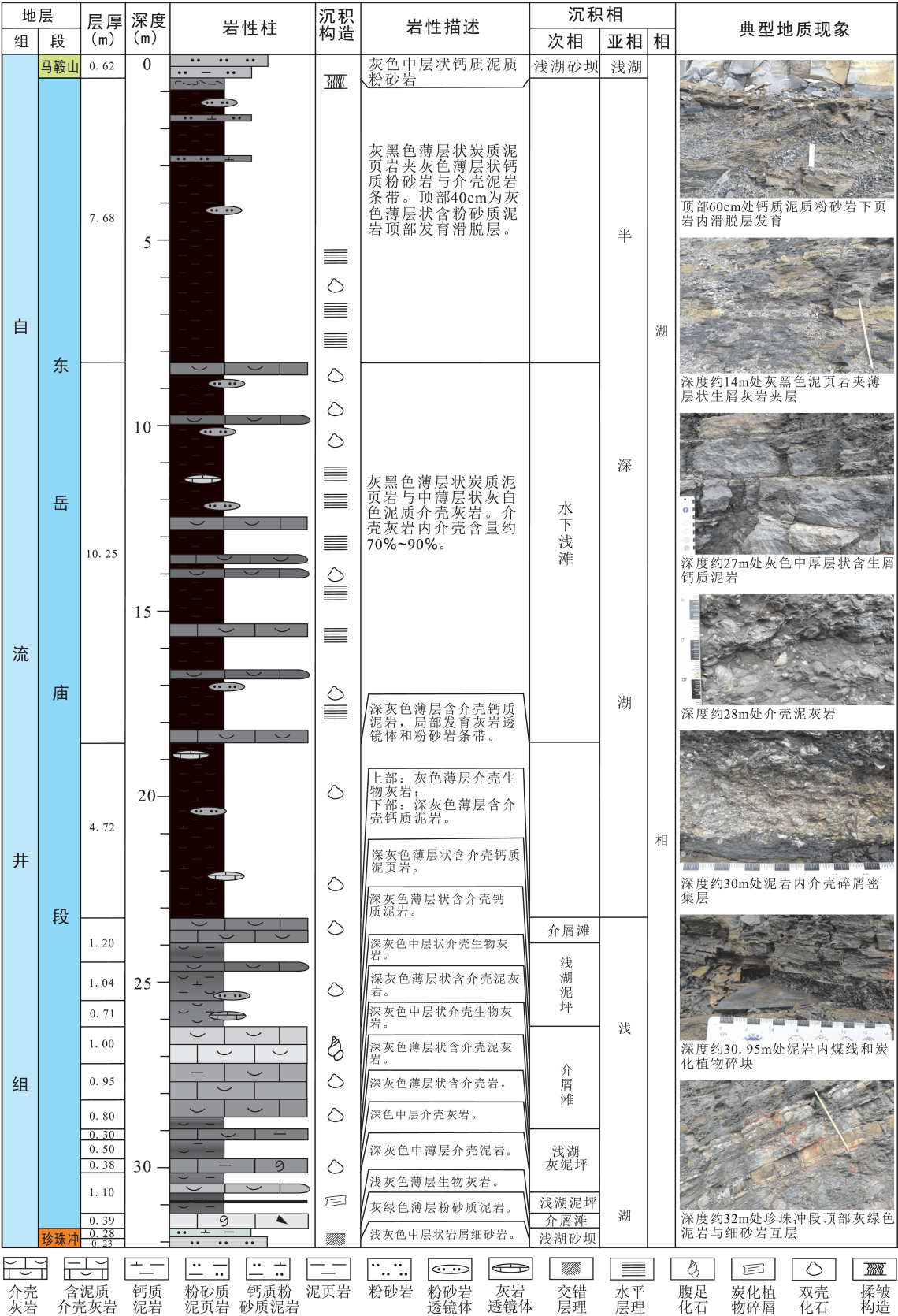


Fig. 3 The vertical evolution of deposited environment when the Dongyuemiao Member was deposited in the outcrops of Lanmasi in Linshui count, Guan'an City. The suborder facies are defined as Mou Chuanlong, 2022.

整的水进与水退沉积旋回。富有机质泥页岩主要发育于中上部半深湖相,连续厚度较大,力学强度较大的生物碎屑灰岩、介壳钙质泥岩主要发育下部浅湖相。

3 页岩油气地质条件

3.1 页岩的地球化学特征

泥页岩内有机质含量、类型、热演化程度是评价页岩油气资源潜力的3项重要参数。有机质含量越高,生烃潜力越大(杨跃明和黄东, 2019)。腐泥型干酪根以生油为主,而腐殖型为主的干酪根以生气为主。低热演化阶段气态烃易溶解于液态烃内,以页岩油为主;高热演化阶段液态烃占比逐渐降低,地层亲油性逐渐增强,游离态与吸附态的气态烃类都逐渐增大,以页岩气为主。受沉积环境和构造演化等地质条件影响,川东地区内东岳庙段泥页岩总体有机质含量和热演化程度均较区内志留系龙马溪组海相页岩低。

结合现有报道(Liu et al., 2020; Wang et al., 2020; 刘皓天等, 2020)和本次101件露头样品的测试结果,发现东岳庙段页岩 TOC 介于 0.19% ~ 5.38%,平均为 1.79%。其中本次测试结果中,TOC 大于 1.0% 的占比约 77.23%;TOC 大于 2.0% 占比约 30.69%。干酪根类型以 II<sub>1</sub> 型与 II<sub>2</sub> 型为主(曹香妮等, 2019; 付小平和杨滔, 2021),局部发育少量 I 型与 III 型干酪根(刘皓天等, 2020)。在平面上干酪根类型的组成略有差异,如:涪陵地区干酪根

类型以 II<sub>2</sub> 型为主,占比 88.9%,III 型干酪根占比 11.1%<sup>①</sup>。广安市邻水县以 II<sub>1</sub> 型与 I 型为主,而达州市欧家镇地区以 I 型为主。在川东地区其热演化程度中等,R<sub>0</sub> 介于 0.9% ~ 1.73%,主体处于生油窗(李登华等, 2017; 曹香妮等, 2019)。热演化程度与泥页岩的埋深存在一定的正相关性,现今埋深较大区域,其热演化程度亦相对较高。如:在华蓥山背斜两侧露头样品测试结果相对偏低,R<sub>0</sub> 介于 0.9% ~ 1.18%,而在涪陵地区 FY10 井内东岳庙井深 2750 ~ 2810m,R<sub>0</sub> 介于 1.52% ~ 1.58%;元坝地区东岳庙段主体埋深 3900 ~ 4200m,其 R<sub>0</sub> 介于 1.56% ~ 2.02%,处于凝析油—湿气的高成熟阶段(刘皓天等, 2020)。

泥页岩的矿物组成、储集空间类型、孔渗物性等不仅对油气储集、运移有重要的控制作用,而且对后期的压裂和排采具有重要的影响(贾爱林, 2018; 舒志国等, 2021)。综合前人的报道和本次 30 件露头样品的镜下观察、全岩与黏土矿物的 X 衍射分析,发现东岳庙段内泥页岩以石英和黏土矿物为主,其次为碳酸盐矿物,见少量长石和黄铁矿。其中黏土矿物含量在 8% ~ 47%,平均为 33.8%;石英含量为 14% ~ 56%,平均为 35.9%;方解石含量为 3% ~ 67%,平均为 28.8%;长石含量为 0% ~ 16%,平均为 8.4%,脆性指数介于 48% ~ 92%,平均为 62.1%(图 4)。整体上,脆性矿物含量中等,高于页岩气有利层段评价标准(GB/T 31483—2015)下限值(40%)。

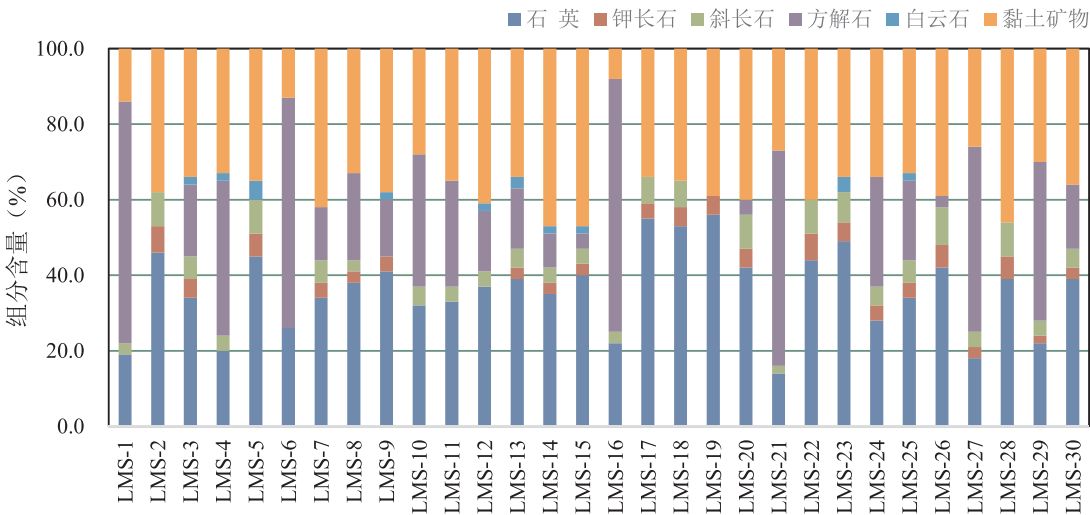
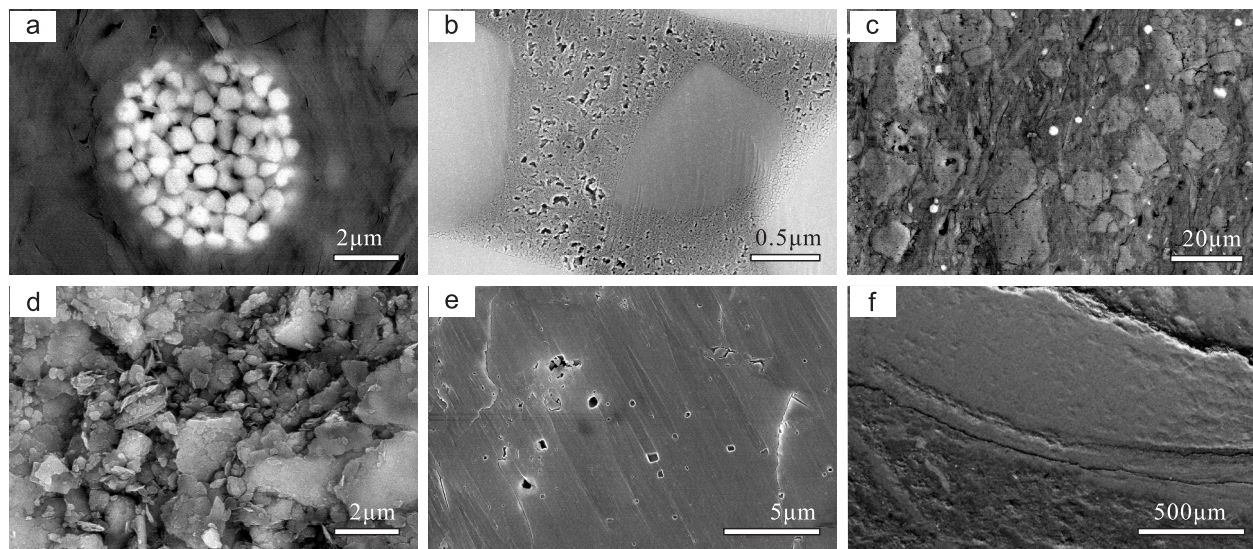


图4 东岳庙段页岩矿物组成特征

Fig.4 The mineral composition of the shale in Dongyuemiao Member





a. 深度 5.6m 处, 原生黄铁矿内粒间孔; b. 深度 7.8m 处, 有机质孔发育; c. 深度 15.2m 处, 矿物溶蚀孔洞发育; d. 深度 11.2m 处, 伊利石粒间孔发育; e. 深度 16.1m 处, 矿物印模孔与微裂缝发育; f. 深度 24.7m 处, 泥岩内微裂缝发育

图 5 东岳庙段泥页岩内孔隙结构类型多样

Fig. 5 The various pore types observed in the shale in Dongyue Temple Member

### 3.2 页岩的储集性能特征

氩离子抛光扫描电镜显示泥页岩内孔隙类型多样, 粒间孔(图 5a、d)、有机质孔(图 5b)、次生溶蚀孔(图 5c)、矿物铸模孔(图 5e)、微裂缝(图 5f)等多种孔隙类型均有发育。有机质孔是泥页岩中有有机质在热裂解生烃过程中形成的孔隙(图 5b), 在东岳庙段中上部(如: 拦马寺剖面深度 5 ~ 18m 段)富有机质泥页岩内较为发育。晶间孔主要见于原生黄铁矿、石英颗粒与黏土矿物颗粒之间(图 5a、5d), 孔径多分布在 0.01 ~ 0.5  $\mu\text{m}$  之间。溶蚀孔隙主要发育于长石与碳酸盐岩等易溶蚀矿物颗粒内或颗粒间(图 5c), 粒内溶孔孔径相对较小, 主要分布在 0.05 ~ 2  $\mu\text{m}$  之间; 粒间溶孔孔径相对较大, 主要分布在 1 ~ 2  $\mu\text{m}$  之间, 在东岳庙段下部灰岩与页岩互层段的泥岩内较为发育。矿物铸模孔主要为泥页岩形成初期, 泥质沉积物混杂的矿物晶体(如黄铁矿)在成岩阶段压实作用下, 因晶体坚固, 其几何形态不易发生形变, 而在一定水动力或酸性流体介质条件下, 矿物晶体遭受流体的冲击或溶蚀而发生脱落, 留下与矿物晶形大体相仿的印坑, 其孔径多在 0.1 ~ 0.5  $\mu\text{m}$  之间(图 5e), 其偶见于东岳庙段上部少量的泥岩内。微裂缝主要见于泥页岩内脆性颗粒间(图 5c)与泥页岩内随机分布不规则的裂缝。总体上, 以黏土矿物粒间孔和有机质孔为主, 其孔径相对较小, 存在一定的颗粒支撑结构, 有助于泥页岩内孔隙不在埋藏压实过程中被压实破坏。

本次拦马寺剖面中采集的 38 件样品氮气孔隙度测试结果显示, 东岳庙段泥页岩孔隙度介于 2.38% ~ 23.83%, 平均为 8.85%, 储集空间发育, 其孔隙度与五峰组—龙马溪组海相页岩相近(黄金亮等, 2012; 郭旭升, 2014; 何江林等, 2017)。但其脉冲衰减法与稳态法测试的渗透率结果显示其页岩渗透率介于 0.001 ~ 1.23mD, 平均值仅 0.239mD, 其渗透率明显低于五峰组—龙马溪组海相页岩(郭旭升, 2014)。其显示东岳庙段页岩具有储集空间发育, 但孔隙等连通性相对较差的特征。

氮气( $\text{N}_2$ )吸附比表面积测试结果(表 1)显示, 东岳庙段泥页岩孔隙体积约 0.073 cc/g, 比表面积较佳, 高达 26.69  $\text{m}^2/\text{g}$ 。其内不同孔径对页岩总孔隙度和总比表面的贡献率不同(图 6)。其页岩的总孔隙体积主要由孔隙直径 > 20nm 的中孔至大孔贡献, 而其比表面积主要由 5nm 以下的微孔和 20 ~ 30nm 中孔、50 ~ 70nm 大孔贡献, 说明东岳庙段内页岩的储集空间主要由中大孔贡献, 而比表面积主要由微孔和 80nm 以下的孔隙贡献, 其吸附气量主要受 80nm 以下孔隙控制, 而页岩气储集空间主要受 20nm 以上孔隙控制。

### 3.3 页岩的含油气性特征

含油气性是评估泥页岩是否具备商业开采价值直接参数(肖继林等, 2018)。涪陵地区东岳庙段气测显示丰富, 目前钻遇东岳庙段的探井在泥页岩段均有气测异常显示, 尤其在涪陵区块南部个别井



气测异常显示厚度可达 40m, 占总地层厚度的 59%<sup>①</sup>, 涪页 10HF 井在东岳庙段泥页岩内也获测试日产气  $5.58 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 日产油  $17.6 \text{ m}^3$  的良好勘探成效(舒志国等, 2021)。元坝地区内针对陆相页岩油气的探井在东岳庙段内也几乎均见油气显示, 其页岩现场含气量测试结果平均达  $1.32 \text{ m}^3/\text{t}$ <sup>①</sup>, 个别高者现场解析气量可达约  $2.80 \text{ m}^3/\text{t}$ 。达州大竹地区, 竹浅 1 井在井深 694 ~ 732m 段的东岳庙段过路钻进中, 获日产天然气  $5.85 \times 10^4 \text{ m}^3$  天然气页岩气流(王世谦等, 2012), 均证实东岳庙段具有良好的含油气性。

在拦马寺等剖面的露头中, 东岳庙段内沥青等

表 1 东岳庙段页岩氮气吸附测试孔径分布统计表

Table 1 The distribution of the pores in the Dongyuemiao shale

| 序号 | 孔隙直径区间<br>(nm) | 平均孔隙直径<br>(nm) | 孔隙体积<br>(cc/g) | 贡献率<br>(%) | 比表面积<br>(m <sup>2</sup> /g) | 贡献率<br>(%) |
|----|----------------|----------------|----------------|------------|-----------------------------|------------|
| 1  | 150 ~ 170      | 160            | 0.00079        | 1.08       | 0.01974                     | 0.07       |
| 2  | 130 ~ 150      | 140            | 0.005269       | 7.19       | 0.1506                      | 0.56       |
| 3  | 110 ~ 130      | 120            | 0.005116       | 6.98       | 0.1705                      | 0.64       |
| 4  | 90 ~ 110       | 100            | 0.003677       | 5.01       | 0.1471                      | 0.55       |
| 5  | 70 ~ 90        | 80             | 0.003677       | 5.01       | 0.1839                      | 0.69       |
| 6  | 50 ~ 70        | 60             | 0.01101        | 15.01      | 0.734                       | 2.75       |
| 7  | 45 ~ 50        | 47.5           | 0.002853       | 3.89       | 0.2403                      | 0.90       |
| 8  | 40 ~ 45        | 42.5           | 0.002853       | 3.89       | 0.2685                      | 1.01       |
| 9  | 35 ~ 40        | 37.5           | 0.002853       | 3.89       | 0.3043                      | 1.14       |
| 10 | 30 ~ 35        | 32.5           | 0.003337       | 4.55       | 0.4107                      | 1.54       |
| 11 | 25 ~ 30        | 27.5           | 0.004429       | 6.04       | 0.6443                      | 2.41       |
| 12 | 20 ~ 25        | 22.5           | 0.004429       | 6.04       | 0.7875                      | 2.95       |
| 13 | 19 ~ 20        | 19.5           | 0.000886       | 1.21       | 0.1817                      | 0.68       |
| 14 | 18 ~ 19        | 18.5           | 0.000886       | 1.21       | 0.1915                      | 0.72       |
| 15 | 17 ~ 18        | 17.5           | 0.000882       | 1.20       | 0.2017                      | 0.76       |
| 16 | 16 ~ 17        | 16.5           | 0.000877       | 1.20       | 0.2126                      | 0.80       |
| 17 | 15 ~ 16        | 15.5           | 0.000877       | 1.20       | 0.2263                      | 0.85       |
| 18 | 14 ~ 15        | 14.5           | 0.000877       | 1.20       | 0.2419                      | 0.91       |
| 19 | 13 ~ 14        | 13.5           | 0.000877       | 1.20       | 0.2598                      | 0.97       |
| 20 | 12 ~ 13        | 12.5           | 0.000856       | 1.17       | 0.2738                      | 1.03       |
| 21 | 11 ~ 12        | 11.5           | 0.000829       | 1.13       | 0.2882                      | 1.08       |
| 22 | 10 ~ 11        | 10.5           | 0.000829       | 1.13       | 0.3156                      | 1.18       |
| 23 | 9 ~ 10         | 9.5            | 0.000881       | 1.20       | 0.3708                      | 1.39       |
| 24 | 8 ~ 9          | 8.5            | 0.001036       | 1.41       | 0.4877                      | 1.83       |
| 25 | 7 ~ 8          | 7.5            | 0.001032       | 1.41       | 0.5502                      | 2.06       |
| 26 | 6 ~ 7          | 6.5            | 0.000998       | 1.36       | 0.6141                      | 2.30       |
| 27 | 5 ~ 6          | 5.5            | 0.001036       | 1.41       | 0.7531                      | 2.82       |
| 28 | 4.5 ~ 5        | 4.75           | 0.000575       | 0.78       | 0.4845                      | 1.82       |
| 29 | 4 ~ 4.5        | 4.25           | 0.000748       | 1.02       | 0.7041                      | 2.64       |
| 30 | 3.5 ~ 4        | 3.75           | 0.000821       | 1.12       | 0.8759                      | 3.28       |
| 31 | 3-3.5          | 3.25           | 0.001025       | 1.40       | 1.262                       | 4.73       |
| 32 | 2.5-3          | 2.75           | 0.001207       | 1.65       | 1.755                       | 6.58       |
| 33 | 2-2.5          | 2.25           | 0.001361       | 1.86       | 2.419                       | 9.06       |
| 34 | 1.5-2          | 1.75           | 0.001869       | 2.55       | 4.273                       | 16.01      |
| 35 | 1-1.5          | 1.25           | 0.001777       | 2.42       | 5.686                       | 21.30      |
| 合计 |                |                | 0.073333       |            | 26.68994                    |            |

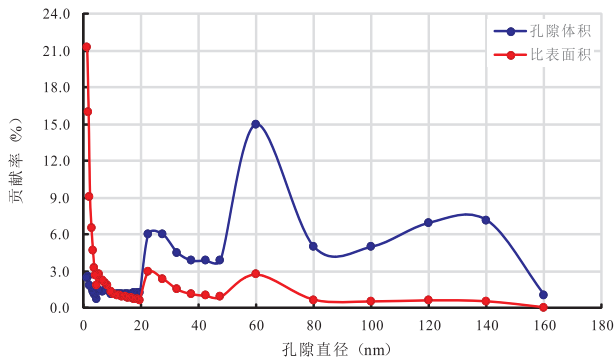


图6 东岳庙段页岩内不同孔径对其孔隙体积及比表面积的贡献率

Fig. 6 The contribution of the different diameter pores to the total volume and area surface in the Dongyuemiao shale

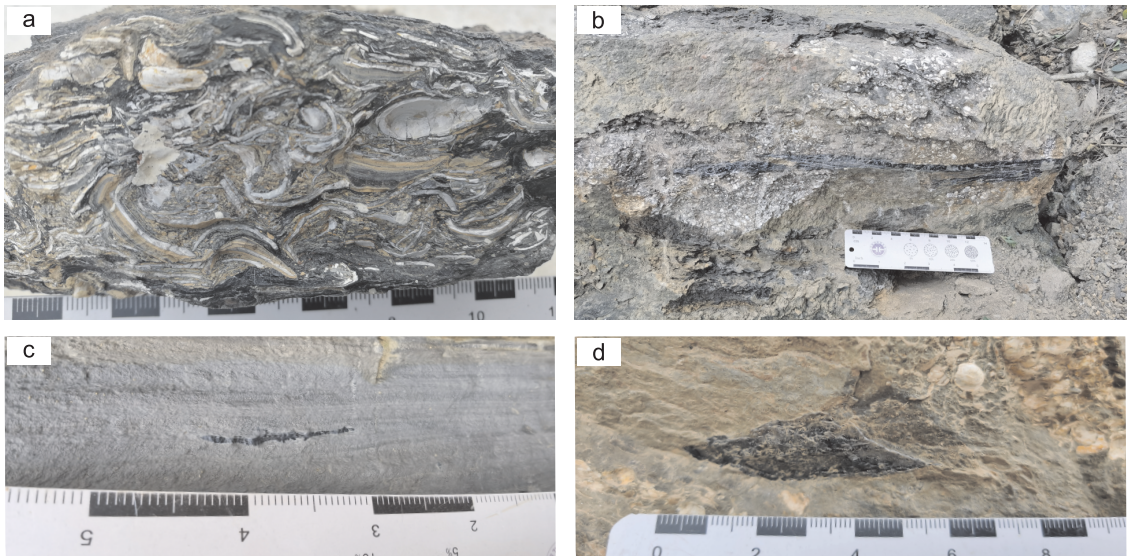
油气显示也较为丰富,沥青脉产出的围岩岩性种类也较为多样,如:在拦马寺剖面中沥青呈浸染状分布于介壳层内,沥青脉顺层延伸较为连续(图7a);在肖家沟剖面中沥青呈脉状主体沿顺层方向发育于介壳泥质灰岩内(图7b);在华蓥山铁厂沟剖面中见有沥青脉顺层发育于钙质泥岩内(图7c);在邻水县大桥村剖面中见沥青顺层发育于含介壳泥岩内(图7d)。沥青的出现不仅直接证实东岳庙段内油气运移和聚集的存在,而且也指示着,东岳庙段内油气以顺层侧向运移为主,在没有断裂等条件下,其油气垂向运移和散失量可能相对较少。

4 页岩气富集主控因素分析

页岩油气富集的主控因素分析直接决定着勘探思路和勘探部署。在上述分析的基础上,结合元坝、涪陵等已获东岳庙段页岩油气钻井显示,可以初步得出如下认识:

4.1 沉积格局控制着富有机质泥页岩分布

富有机质泥页岩作为东岳庙段内油气生成的物质基础和储集空间,富有机质泥页岩层段的分布规律及其顶底板岩性条件,决定了页岩油气甜点层的分布及可开发程度。东岳庙段沉积时期四川盆地为一陆相湖盆,其主体为半深湖—浅湖相沉积(图2),在其沉积时期水体低洼处,水深相对较大,在水下隆起的障壁作用下,其沉积水体不仅低能缺氧易于有机质的保存,同时,其接受沉积充填时间相对较长,较水下隆起等受湖浪作用区域泥页岩连续厚度相对较大,易于形成厚套连续的富有机质泥页岩。同时,东岳庙沉积时期,四川盆地发育了一次完整的水进—水退沉积旋回,其富有机质层段主要集中于中部湖泛发育段。而涪页10HF井(舒志国等, 2021)等气测异常显示含气性最好段也出现于东岳庙段中部最大湖泛面发育段。由此可推论,古地理格局控制着水动力条件差异,沉积基底低洼处易于富有机质泥页岩发育。东岳庙段中部最大湖泛面发育层段,泥页岩相对连续沉积厚度最大,



a. 广安市邻水县拦马寺剖面中沥青浸染介壳层;b. 广安市肖家沟剖面中沥青呈脉状分布与介壳层内;c. 华蓥山市铁厂沟剖面中东岳庙段上部钙质泥岩内沥青脉顺层发育;d. 广安邻水县大桥村剖面中含介壳泥岩内沥青顺发育

图7 东岳庙段内沥青分布特征

Fig. 7 Bituminous is observed in different types in the Dongyuemiao Member

是川东地区东岳庙段页岩油气有利层发育的潜在层段。

#### 4.2 高热演化有助于页岩油气富集与高产

如上所述,东岳庙段泥页岩内干酪根以  $\text{II}_1$  型与  $\text{II}_2$  型为主,同时具备生油和生气潜力。元坝地区东岳庙段泥页岩  $R_o$  处于 1.56% ~ 2.02% (平均 1.76%);涪陵地区  $R_o$  介于 1.26% ~ 2.12% 之间(平均 1.64%)<sup>①</sup>;涪页 10HF 井东岳庙段泥页岩  $R_o$  也介于 1.23% ~ 2.09%;现油气显示较好的钻井中,东岳庙段页岩均已达到高成熟阶段,主要处于生凝析油—湿气阶段。尤其是通过 P-T 相图和烃类组分鉴定证实涪页 10HF 井为典型的页岩凝析气藏(舒志国等, 2021)。可见,热演化程度对东岳庙段页岩油气富集具有重要的影响,当热演化达到生凝析油—湿气阶段时,其不仅原油密度和粘度较小,相对于低熟原油易于流动,而且凝析油气在地伏呈气态,气态烃类在浮力的作用下,更易于向地表浅层流动,形成高产。当其运移至浅层,随着温度和压力的降低,逐渐冷凝为液态烃类,在一定程度上可以减缓烃类的漏失速率,进而有助于深部页岩油气的富集保存。

#### 4.3 裂缝的连通作用控制着页岩气的高产

由上文分析可知,实验测试显示川东地区东岳庙段具有“高孔低渗”的储集物性特征,其内黏土矿物粒间孔和有机质孔等不易被压实的孤立孔隙较发育,孔隙间连通性较差,渗透率极低,而生产实践显示,东岳庙段个别页岩油气井可日产气  $5.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、产油  $17.6 \text{ m}^3/\text{d}$ (舒志国等, 2021),而其比邻的页岩油气井可能不具工业产能,呈现明显的储层非均质性。

露头中(图 7)东岳庙段内泥页岩内沥青丰富,以顺层产出为主,指示着东岳庙段内页岩油气主要沿顺层横向运移,而沥青多以脉状产出,显示其运移的主要通道为裂缝。同时,在露头尺度(图 3)与微观扫描电镜尺度(图 5)下东岳庙段泥页岩内均可见裂缝发育密集段,尤其是剖面中可见长度上百米的低角度滑脱层发育,滑脱层内泥页岩破碎,裂缝极为发育,其为短距离页岩油气运移和富集提供了通道。而在微观上,泥页岩内微裂缝与矿物粒间孔或溶蚀孔洞相连(图 5c),将孤立的储集空间连通,从而有助于泥页岩内油气的流动,在局部区域形成富集,呈现出显著的非均质性。此外,与致密的泥页岩相比,裂缝常具有较高的渗透率,扮演者“高速

运移通道”的角色,易于压力传导。为此,东岳庙段内由不同尺度规模裂缝构成的裂缝输导体系对泥页岩内孤立孔隙的连通作用决定着其储层的非均质性,进而控制着页岩油气的高产。

#### 4.4 东岳庙段页岩油气富集模式

前人研究显示,川东地区普遍发育 3 套区域性滑脱层,由下至上依次为寒武系、五峰组、雷口坡组—嘉陵江组(邹玉涛等, 2015; 何江林等, 2018)。其中上部最浅一套区域性滑脱层为雷口坡组—嘉陵江组滑脱层,其不仅是川东地区的一套重要的构造层划分标志,而且其内裂缝极为发育,对川东地区内油气的横向运移具有重要控制作用,在局部与高角度断层连通,为上覆须家河组、自流井组等地层内油气聚集提供了深部烃类来源和压力传导的可能,有助于上三叠统须家河组常规气和珍珠冲段致密型砂岩气的成藏。同时,川东地区上三叠统须家河组至下侏罗统自流井组,整体发育一大型的水进沉积旋回,东岳庙段作为须家河组与珍珠冲段上覆第一套区域性细粒沉积岩,其不仅为四川盆地侏罗系下部第一套区域性烃源岩(Li et al., 2017; Pang et al., 2019; 胡东风等, 2021),而且作为区域盖层控制着下伏游离气的运移与聚集(肖富森等, 2019)。如:张本健等(2022)发现四川盆地金秋气田上侏罗统沙溪庙组致密气主要来源于三叠系须家河组腐殖型烃源岩与侏罗系腐泥型烃源岩,证实东岳庙段与高角度断层控制着下伏油气的运聚和浅层致密气的成藏。在特定的构造部位,东岳庙段具备一定闭合高度时,其对下伏的油气具有封盖和聚集作用,有助于其内超压的形成和烃类的富集。进而川东地区内东岳庙段页岩气钻井几乎均有页岩气异常显示,且普遍发育异常高压(李登华等, 2017)。在东岳庙段页岩内部,有机质富集段位于中部,随着热演化的增大,其生烃作用不仅为其内页岩油气富集提供了烃类物质基础,增大了地层压力、促进有机质孔的发育,而且对下伏天然气形成烃浓度封闭,进而有助于提高其内气油比,增强其内页岩气与页岩油的流动性。同时,泥页岩内页理发育,易于顺层形成微裂缝,有助于短距离内油气的侧向运移。在局部褶皱强烈区,东岳庙段顶部泥页岩内滑脱层发育,形成致密泥页岩内的高渗输导层,进而有助于页岩油气顺层向低流体势部位运移,在油气低势区形成页岩油气相对富集区(图 8)。当低势区富有机质泥页岩连续厚度发育较大时,其



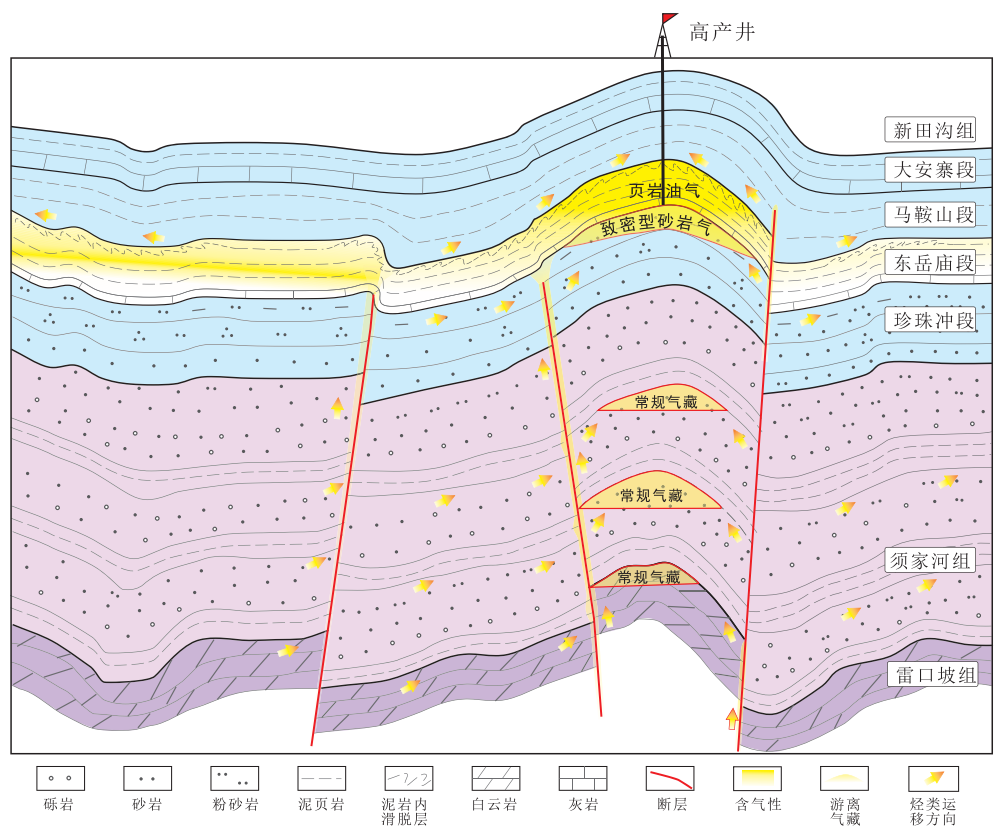


图8 川东地区东岳庙段页岩油气富集模式示意图

Fig.8 The enrichment model of the shale gas and oil in the Dongyuemiao Member in the northeast of Sichuan Basin

易于形成页岩油气的高产区。

5 结论

川东地区下侏罗统自流井组东岳庙段形成于四川盆地演化为陆内盆地的第一次湖泛时期,该时期四川湖盆内存在多个次级洼陷,在水下隆起的障壁作用下,平面上水动力条件差异巨大,低能安静水体主要分布于其洼陷区域。而垂向上,东岳庙段也发育了一个完整的水进退沉积旋回,连续的富有机质泥页岩主要发育于中部半深湖相,厚度在15~30m。其页岩TOC含量中等,平均约1.79%;有机质类型较好,以II型为主;热演化程度与埋深存在一定的正相关性,除地层出露区外,其主体处于凝析油—湿气的高成熟阶段。

其页岩储集空间类型多样,以黏土矿物粒间孔和有机质孔为主;脆性矿物含量中等,脆性指数平均为62.1%;其孔隙度与海相泥页岩相近,平均为8.85%,而渗透率极低,平均值仅约0.239 mD,呈现“高孔低渗”特征。泥页岩内油气显示丰富,且沥青等产出围岩岩性种类多样,沥青以脉状顺层分布为主,指示其内油气以侧向顺层运移为主。

基于川东地区东岳庙段页岩地质条件、裂缝发育特征以及东岳庙段泥页岩在川东地区含油气系统的特殊角色,发现其页岩油气的富集主要受富有机质泥页岩分布、热演化程度和裂缝发育条件的控制,初步形成了川东地区东岳庙段页岩油气富集模式,认为垂向富有机质泥页岩连续厚度较大的现今油气低势区是东岳庙段潜在的页岩油气高产区。

注释:

①据中石化勘探南方分公司内部报告,2014年。

参考文献 (References):

Li D H, Li J Z, Zhang B, et al., 2017. Formation characteristics and resource potential of Jurassic tight oil in Sichuan Basin [J]. Petroleum Research, 2(4): 301–314.

Liu Z, Liu G, Hu Z, et al., 2020. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their implications for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry B, 7(4): 358–369.

Pang Z L, Tao S Z, Zhang Q, et al., 2019. Enrichment factors and sweep spot evaluation of Jurassic tight oil in central Sichuan Basin,

- SW China[J]. *Petroleum Research*, 4(4):1–14.
- Qiu Z, He J L, 2021. Depositional environment changes and organic matter accumulation of Pliensbachian-Toarcian lacustrine shales in the Sichuan Basin, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105035.
- Wang X, Jin Z, Zhao J, et al., 2020. Depositional environment and organic matter accumulation of Lower Jurassic nonmarine fine-grained deposits in the Yuanba Area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 116:104352.
- Xu W, Ruhl M, Jenkyns H C, et al., 2017. Carbon sequestration in an expanded lake system during the Toarcian oceanic anoxic event[J]. *Nature Geoscience*, 10(2):129–134.
- 曹香妮,姜振宇,朱德宇,等,2019. 川东北地区自流井组陆相页岩岩相类型及储层发育特征[J]. *天然气地球科学*, 30(12):1782–1793.
- 范昱,2011. 川东北地区下侏罗统自流井组层序地层及沉积充填特征研究[D]. 成都:成都理工大学.
- 付小平,杨滔,2021. 川东北地区下侏罗统自流井组陆相页岩储层孔隙结构特征[J]. *石油实验地质*, 43(4):589–598.
- 高健,林良彪,任天龙,等,2016. 川北地区下侏罗统东岳庙段页岩气富集主控因素研究[J]. *岩性油气藏*, 28(5):67–75.
- 郭彤楼,李宇平,魏志红,2011. 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J]. *天然气地球科学*, 22(1):1–7.
- 郭旭升,2014. 涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术[M]. 北京:科学出版社.
- 何江林,刘伟,杨平,等,2017. 四川盆地西南缘五峰组—龙马溪组页岩气形成条件与有利区优选[J]. *沉积与特提斯地质*, 37(3):50–58.
- 何江林,王剑,余谦,等,2018. 外源补给型页岩气的发现及油气地质意义[J]. *石油学报*, 39(1):12–22.
- 胡东风,魏志红,刘若冰,等,2021. 湖相页岩油气富集主控因素与勘探潜力——以四川盆地涪陵地区侏罗系为例[J]. *天然气工业*, 41(8):113–120.
- 黄金亮,邹才能,李建忠,等,2012. 川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J]. *煤炭学报*, 37(5):782–787.
- 贾爱林,2018. 中国天然气开发技术进展及展望[J]. *天然气工业*, 38(4):77–86.
- 李登华,李建忠,张斌,等,2017. 四川盆地侏罗系致密油形成条件、资源潜力与甜点区预测[J]. *石油学报*, 38(7):740–752.
- 黎茂稳,金之钧,董明哲,等,2020. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. *石油实验地质*, 42(4):489–505.
- 李英强,何登发,2014. 四川盆地及邻区早侏罗世构造—沉积环境与原型盆地演化[J]. *石油学报*, 35(2):219–232.
- 刘皓天,李雄,万云强,等,2020. 陆相页岩气形成条件及勘探开发潜力——以川东涪陵北地区侏罗系东岳庙段为例[J]. *海相油气地质*, 25(2):148–154.
- 刘树根,汪华,孙玮,等,2008. 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*, 29(6):781–792.
- 罗东东,2019. 川东北陆相页岩气形成条件及富集主控因素[D]. 中国石油大学(北京).
- 牟传龙,2022. 关于相的命名及其分类的建议[OL]. *沉积与特提斯地质*, 42(3):331–339. DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.03001.
- 舒志国,周林,李雄,等,2021. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景[J]. *石油与天然气地质*, 42(1):212–223.
- 孙艳妮,2018. 川中地区公山庙油田大安寨段致密油成藏特征[D]. 成都:西南石油大学.
- 王世谦,胡素云,董大忠,2012. 川东侏罗系——四川盆地亟待重视的一个致密油气新领域[J]. *天然气工业*, 32(12):22–29.
- 王昕尧,金振奎,朱毅秀,等,2021. 四川盆地自流井组陆相页岩石英成因研究[J]. *沉积学报*, doi: org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.053.
- 肖富森,黄东,张本健,等,2019. 四川盆地侏罗系沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义[J]. *石油学报*, 40(5):568–576.
- 肖继林,魏祥峰,李海军,2018. 涪陵海相页岩气和元坝—兴隆场湖相页岩气富集条件差异性分析[J]. *天然气勘探与开发*, 41(4):8–17.
- 许效松,刘宝珺,1994. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京:科学出版社.
- 杨跃明,黄东,2019. 四川盆地侏罗系湖相页岩油气地质特征及勘探开发新认识[J]. *天然气工业*, 39(6):22–33.
- 张本健,潘珂,吴长江,等,2022. 四川盆地金秋气田侏罗系沙溪庙组多期砂组天然气复合成藏机理及模式[J]. *天然气工业*, 42(1):51–61.
- 张快,2015. 涪陵区块下侏罗统页岩气形成条件分析及有利层系优选[D]. 成都:成都理工大学.
- 赵帮胜,李荣西,覃小丽,等,2019. 鄂尔多斯盆地中部上古生界山西组页岩储层特征[J]. *沉积学报*, 37(6):1140–1151.
- 朱彤,包书景,王烽,2012. 四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景[J]. *天然气工业*, 32(9):16–21.
- 朱彤,龙胜祥,王烽,等,2016. 四川盆地湖相泥页岩沉积模式及岩石相类型[J]. *天然气工业*, 36(8):22–28.
- 邹玉涛,段金宝,赵艳军,等,2015. 川东高陡断褶带构造特征及其演化[J]. *地质学报*, 89(11):2046–2052.