

基于变尺度岩相组合的陆相页岩源-储耦合机理探讨 ——以四川盆地侏罗系页岩层段为例

胡宗全^{1,2,3}, 刘忠宝^{1,2,3}, 李倩文^{1,2,3}, 吴舟凡⁴

[1. 页岩油气富集机理与有效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083]

摘要: 中国陆相页岩层系沉积成因及岩相组合复杂多样, 陆相页岩源-储特征及耦合机理研究薄弱。以四川盆地侏罗系页岩层段为研究对象, 以岩石学、沉积学及非常规储层地质学等理论为指导, 综合运用岩矿、有机球化学及页岩储层表征等多种实验测试技术, 开展了基于变尺度岩相组合的陆相页岩源-储耦合机理研究。提出了宏观与微观结合定岩相、变尺度分析定岩相组合的研究思路与方法, 识别出陆源泥-砂沉积型、内源泥-灰沉积型和混源泥-砂-灰沉积型3种沉积成因岩相组合类型。研究发现: ①页岩夹介壳灰岩或粉砂岩大尺度组合页岩段中可发育较多纹层-薄层状方解石介壳层或粉砂层, 同一组合中不同尺度夹层类型具有较好的一致性; ②大尺度岩相组合中米级介壳灰岩或粉砂岩层储集物性较差, 对油气储集贡献有限, 而小尺度岩相组合中毫米级纹层与厘米级薄层状方解石介壳粒内孔较发育, 且内部有暗色有机质充填, 可为油气提供有效储集空间。建立了3种沉积成因岩相组合的源-储耦合发育模式, 提出由陆源型—混源型—内源型沉积岩相组合, 源(总有机碳含量 TOC)-储(孔隙度)参数相关性依次变好, 其相关性主要与热演化程度、有机显微组分及无机矿物差异密切相关。探讨了不同类型、不同尺度岩相组合形成的影响因素, 分析了从变尺度岩相组合角度认识陆相页岩油气源-储特征及耦合机理的必要性, 旨在探索陆相页岩油气富集机理研究的新思路。

关键词: 陆相页岩油气; 变尺度岩相组合; 介壳灰岩; 源-储耦合; 页岩储层; 侏罗系; 四川盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Exploring source rock-reservoir coupling mechanisms in lacustrine shales based on varying-scale lithofacies assemblages: A case study of the Jurassic shale intervals in the Sichuan Basin

HU Zongquan^{1,2,3}, LIU Zhongbao^{1,2,3}, LI Qianwen^{1,2,3}, WU Zhoufan⁴

[1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: China's lacustrine shale sequences exhibit complex sedimentary genesis and lithofacies assemblages, and studies on their source rock-reservoir characteristics and coupling mechanisms remain limited. Guided by theories of petrology, sedimentology, and unconventional reservoir geology, we investigate the Jurassic shale intervals within the Sichuan Basin. An integration of experimental and testing techniques such as rock and mineral analyses, organic geochemistry, and shale reservoir characterization is applied to explore the source rock-reservoir coupling mechanisms in the lacustrine shale based on varying-scale lithofacies assemblages. As a result, a methodology that combines macroscopic observations with microscopic analyses to identify lithofacies and uses varying-scale analysis to determine lithofacies assemblages is put forward in the study. Using this, we identify three types of lithofacies assemblage in terms of sedimentary genesis: terrestrial mud-sand sedimentary type, endogenetic mud-lime sedimentary type, and mixed source mud-sand-lime sedimentary type. Our findings indicate that many lamellar to thin-layered calcite-shell or silt layers tend to

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-07-12。

第一作者简介: 胡宗全(1971—), 男, 博士、教授级高级工程师, 非常规油气地质。E-mail: huzongquan_syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05036-004); 中国石油化工股份有限公司基础前瞻项目(P23240-3)。

occur in the shale intervals featuring large-scale lithofacies assemblages consisting of shale interbedded with shell limestone or siltstone, with varying-scale interlayers within the same lithofacies assemblage being of the same type. Meter-scale shell-limestone or siltstone layers within large-scale lithofacies assemblages display inferior reservoir physical properties, thus contributing minimally to hydrocarbon accumulation. In contrast, millimeter-scale laminae and centimeter-scale thinly-layered calcite shells within small-scale lithofacies assemblages feature well-developed intragranular pores filled with dark organic matter, providing effective storage spaces for hydrocarbons. The source rock-reservoir coupling models for the three types of lithofacies assemblages are established, revealing that the correlations between the source rock (total organic carbon, *TOC*) and reservoir (porosity) for these lithofacies assemblages show a gradual improvement from terrigenous to mixed and then to endogenetic assemblages. This finding is closely associated with their differences in maturity, organic macerals, and inorganic minerals. Additionally, we explore the factors affecting the formation of various lithofacies assemblages different in type and scale and analyze the necessity of understanding the source rock-reservoir characteristics and their coupling mechanisms of lacustrine shale oil and gas from the perspective of varying-scale lithofacies assemblage, aiming to develop a novel philosophy of research on the hydrocarbon accumulation mechanism of lacustrine shales.

Key words: lacustrine shale oil and gas, varying-scale lithofacies assemblage, shell limestone, source rock-reservoir coupling, shale reservoir, Jurassic, Sichuan Basin

引用格式:胡宗全,刘忠宝,李倩文,等. 基于变尺度岩相组合的陆相页岩源-储耦合机理探讨——以四川盆地侏罗系页岩层段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 893–909. DOI: 10. 11743/ogg20240402.

HU Zongquan, LIU Zhongbao, LI Qianwen, et al. Exploring source rock-reservoir coupling mechanisms in lacustrine shales based on varying-scale lithofacies assemblages: A case study of the Jurassic shale intervals in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 893–909. DOI: 10. 11743/ogg20240402.

非常规页岩油气勘探开发已成为全球油气资源接替的重要领域^[1-4]。目前中国四川盆地及周缘浅层海相页岩气已全面进入规模开发阶段,二叠系与寒武系海相页岩气勘探也取得突破性进展,但中国范围内可拓展的海相盆地与层系仍很局限^[5-6]。近几年,在四川盆地侏罗系、鄂尔多斯盆地三叠系、松辽盆地白垩系、渤海湾盆地及苏北盆地古近系等多个陆相泥页岩层系已获得页岩油气勘探突破^[7-9],陆相页岩油气已成为中国非常规油气资源的重要组成部分^[10]。但中国陆相页岩油气形成地质条件较国内外海相层系更具复杂性^[7],主要表现为中国陆相湖盆沉积在构造、气候、物源、水动力条件、水介质性质、生物活动等多种因素控制下,具有纵向上富有机质页岩与夹层频繁互层,夹层类型多样^[11],粉-细砂岩类、碳酸盐岩类(灰岩、白云岩)、凝灰岩等均有,夹层类型可以是其中一种或者多种,横向上岩相变化快;按储集层岩相的不同将陆相页岩层系中油气“甜点”划分为夹层型、混积型和页岩型3类,鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段为砂岩夹层型“甜点”,渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段和苏北盆地古近系阜宁组二段为混积型“甜点”,松辽盆地白垩系青山口组为页岩型“甜点”^[12]。随着研究的不断深入,已认识到陆相层系页岩矿物组成、岩相及组合类型的多样性,岩相的精细识别与分类及纵向组合特点研究已成为陆相页岩油气领域

的热点问题。

近几年,在借鉴国内外海相细粒岩相分类方案的基础上,中国学者对陆相细粒岩相和岩相组合的划分进行了有益的探索与发展^[13-17],主要形成了2个方面的共识:①矿物成分、沉积构造和有机碳含量3个要素是岩相划分的核心依据,尤其是纹层与层状等沉积构造对表征岩相差异至关重要;②陆相细粒岩相层段中富含砂岩和碳酸盐岩等多种类型夹层,按页(泥)岩与夹层类型垂向叠置关系可划分出多种岩相组合,岩相组合的划分对揭示沉积成因环境具有重要意义。尽管如此,仍存在4方面的问题:①由于不同盆地陆相细粒层系矿物成分存在较大差异(富黏土、富长英质、富碳酸盐、混积等),利用三段元全岩矿物图解进行岩相分区的方案仍具多样性(简化或降低方案的复杂性可以做到统一,但简化难以体现不同盆地的特点,难以做到精细划分,这可能是长期难以统一的症结);②岩相研究中宏观(岩心)与微观(薄片)相结合研究不够,如果仅通过岩心观察划分岩相,微观上非黏土矿物粒级或结构的差异在命名中就难以精确,而仅通过薄片鉴定划分岩相,宏观上大于薄片尺度的沉积构造在命名中就难以体现;③认识到了岩相组合研究的重要性,但仍缺乏易于借鉴操作的总结思路与分类方案,此外非页(泥)岩类夹层除了岩石类型多样,其厚度范围(毫米—

米级)跨度也大,从不同尺度分级研究岩相组合仍未得到重视;④对不同沉积成因陆相岩相组合类型中源、储特征及配置关系的研究仍较少。

为此,本文以四川盆地侏罗系页岩层段为例,从钻井岩心观察描述入手,采用全岩X射线衍射测试、薄片鉴定、总有机碳含量(TOC)、有机岩石学、干酪根碳同位素、氩离子抛光扫描电镜、高压压汞-低温氮气吸附联测及物性测试等多种实验测试技术,提出宏观与微观相结合定岩相、变尺度分析定岩相组合,强调遵循陆相岩相与岩相组合研究思路与方法的重要性,而非一味追求统一,开展了不同尺度页岩与夹层储集特征研究,探讨了3种沉积成因岩相组合类型不同尺度的源、储特征及耦合机理,这对于深入认识陆相页岩油气富集机理,指导甜点层评价与勘探开发部署具有重要的理论与实践意义。

1 研究区地质特征

中生代以来,四川盆地经历了印支、燕山和喜马拉雅3期构造活动,早侏罗世构造动力学环境经历了强、弱伸展的交替变化,构造沉降经历了快速—缓慢—稳定的变化特征,中-晚侏罗世(燕山运动早幕),是大陆

多向汇聚构造体系的形成和发展的主要时期,秦岭造山带的再生活动形成川北米仓山-大巴山前陆构造带;太平洋板块向西推挤形成了川东地区NW向突出的弧型构造和川南华蓥山帚状构造;多向挤压事件强烈改造了四川 T_3-J_{1-2} (上三叠世一早-中侏罗世)原型盆地,周缘褶皱构造带基本定型,尽管早白垩世晚期(燕山运动晚幕)挤压事件对四川盆地进一步改造,使得NW-SE向构造得到加强,但侏罗系整体仍保存比较完整,主要为河流-三角洲-湖泊沉积体系,具有沉积厚度大、分布面积广的特点^[18]。自下而上发育下侏罗统自流井组(细分为珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段和大安寨段4个岩性段)和中侏罗统凉高山组/千佛崖组(细分为凉一段/千一段-凉三段/千三段3个岩性段)^[14]。纵向上发育东岳庙段、大安寨段、凉二段/千二段3套富有机质页岩(图1)。近年来,针对3套富有机质页岩在不同地区部署的探井,均有不同程度页岩油气突破,如川东地区FY10井东岳庙段获日产气 $5.58 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产油 17.6 m^3 的工业油气流^[15];在川中地区LQ2井大安寨段二亚段(大二亚段)7 m段采用射孔加砂方式,测试日产气 $2\,659 \text{ m}^3$;川东地区TY1井试获日产气 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、日产油 9.8 m^3 ^[16],川北Y3井千佛崖组

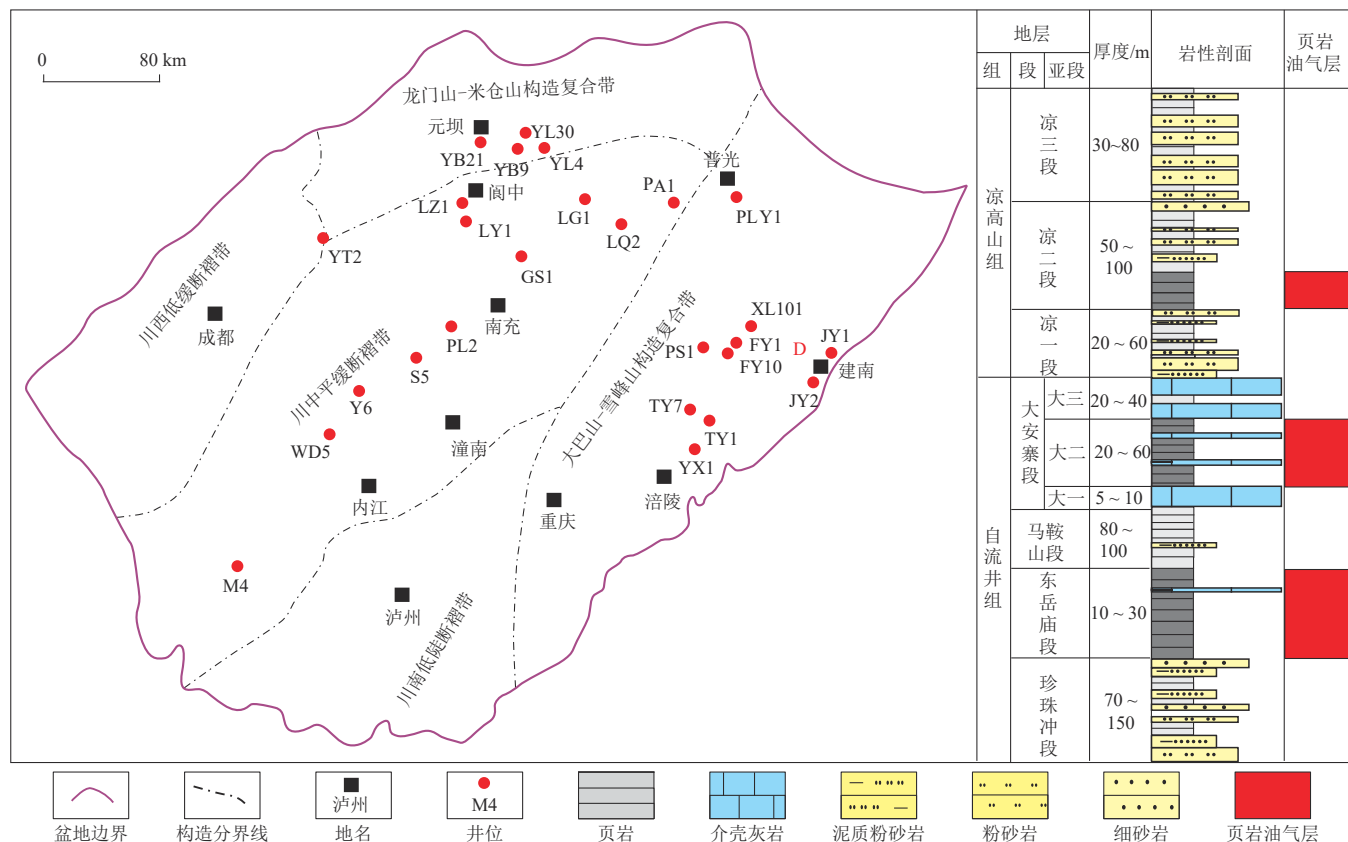


图1 四川盆地侏罗系重点页岩油气钻井与地层柱状图

Fig. 1 Map of key shale oil and gas wells and stratigraphic column for the Jurassic strata in the Sichuan Basin

测试日产气 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 日产油 15.6 m^3 ^[17], 川东北 PA1 井凉高山组测试获日产油 112.8 m^3 、日产气 $11.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[19], 充分展示了四川盆地侏罗系陆相页岩油气良好的勘探潜力^[20]。

2 变尺度陆相岩相组合特征

2.1 变尺度岩相组合识别与划分方法

录井岩性描述是认识钻井岩性的第一手资料, 基本能够确定泥页岩、砂岩、灰岩和白云岩等岩性纵向上的发育特征, 尤其是对砂岩类和碳酸盐岩类的识别准确性较好, 但对于泥页岩的识别目前已难以满足页岩油气勘探开发的实际需要, 需钻井取心开展样品实验测试进一步精细研究。对于页岩岩相的识别与划分方法, 国内外学者针对海相、陆相及海-陆过渡相不同类型的页岩均已开展过研究, 以矿物、沉积构造和有机质含量为岩相识别与划分的关键要素已基本达成共识^[21-22], 但由于不同盆地不同层段矿物成分、TOC 和沉积构造类型等存在差异性, 目前对于岩相的识别与划分方法仍难以统一(这也许将是长期存在的问题)。为此, 笔者结合多年对国内外不同类型页岩的研究, 提出宏观与微观结合定岩相、变尺度分析定岩相组合的研究思路与方法(图2), 详述如下。

1) 宏观上岩心描述要做到精细化(全面)与量化(突出重点)。具体来讲, 对于颜色与矿物成分相同或相近的厚度 $\geq 10 \text{ cm}$ 的岩心进行岩性分段, 对于各岩性段内的各类层理构造(重点是非层状难以定量测定)、含有物(黄铁矿、炭屑、油斑)、生物化石及裂缝等

进行系统的精细描述。要重视对于页岩中厚度 $\leq 10 \text{ cm}$ 的非泥页岩类成层性较好的夹层(砂岩类、碳酸盐岩类、凝灰岩类等)或非泥页岩类中厚度 $\leq 10 \text{ cm}$ 的成层性较好的泥页岩类夹层的定量化描述, 按薄层(厚度 $1 \sim 10 \text{ cm}$)和纹层(厚度 $< 1 \text{ cm}$)进行描述(深度必须精确, 如条件允许厚度能精确更好)。据此, 基于岩心岩性与沉积构造的识别, 可以初步确定宏观岩相命名, 如纹层状灰质页岩。

2) 按上述描述的宏观岩相段采集样品, 开展全岩矿物 X 射线衍射、岩石薄片和 TOC 等微观实验测试分析。如对于上述宏观岩心识别出的纹层状灰质页岩, 采用薄片镜下鉴定与全岩矿物组成进行微观岩相命名, 有纹层状灰质页岩、纹层状泥质灰岩、纹层状长英质灰质页岩、纹层状粉砂质灰质页岩等多种可能。因此, 基于实验测试结果从微观角度对于宏观岩相进行全岩矿物成分、含量、结构及有机质含量等校验与完善十分必要, 将宏观(岩性、沉积构造、有机质含量)和微观(矿物成分、含量、结构)参数与命名相结合, 建立基于“矿物组成+沉积构造+有机质含量”岩相命名方案。这里需要强调的是: 综合考虑上述 3 类参数是岩相命名方案的原则, 但对于不同盆地、不同沉积环境的湖相页岩(咸水、淡水等), 上述 3 类参数均可能存在差异, 因此在具体厘定标准与界限时可根据实际情况确定。

3) 基于陆相页岩层系中非泥页岩类夹层厚度从几毫米到几米不等, 可将夹层按照层厚划分为: 块状($\geq 1.00 \text{ m}$)、厚层($1.00 \sim 0.50 \text{ m}$)、中层($0.50 \sim 0.10 \text{ m}$)、薄层($0.10 \sim 0.01 \text{ m}$)和纹层($< 0.01 \text{ m}$)。基于此特点提出变尺度定岩相组合的研究思路: ①大尺度岩相组合, 即页岩与中层-块状夹层(分米-米级)组合, 一般

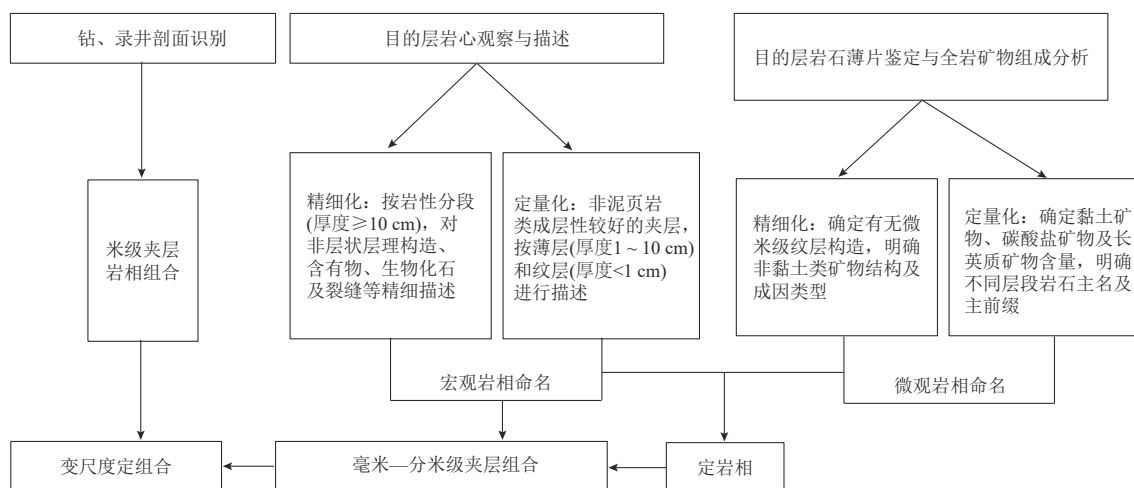


图2 变尺度陆相岩相组合研究方法与思路流程图

Fig. 2 Flow chart showing the research methodology of varying-scale continental lithofacies assemblages

情况下,可直接根据录(测)井资料识别与表征;②小尺度岩相组合,即页岩与纹层-薄层夹层(毫米-厘米级),需要通过岩心观察与样品岩矿测试精确识别与表征。针对同一研究对象可按大尺度(分米-米级)一小尺度(毫米-厘米级)开展岩相组合识别与表征,更深入地认识陆相页岩层系岩相组合的复杂性,更精准地分析不同类型、不同尺度的夹层对于页岩油气富集的影响至关重要。

2.2 侏罗系岩相类型及变尺度组合特征

2.2.1 典型井岩心精细化-定量化表征

以川北Y2井大二亚段页岩岩心观察与描述为例,描述过程遵循厚度大于5 cm进行岩性分段,对粉砂与介壳方解石纹层及薄层发育特征、擦痕面、微裂缝等发育情况进行描述,并在岩心室内剖开后,进行了复查统

计,快速编制了岩心剖面图(图3),重点对不同取心回次中方解石介壳薄层及介壳纹层的数量进行了精细描述与定量统计。整体而言,大二亚段自下而上分为①小层—④小层,各级别介壳层具增多的趋势,其中④小层介壳最为发育,不同级别介壳层均明显增多;相比而言,②小层页岩连续性好,页理更发育。从各小层描述结果来看:①小层整体自下而上颜色由浅变深再变浅,由泥质粉砂岩变为含介壳纹层的泥岩再变为泥质灰岩,泥页岩和介壳层在中、上层段较为发育,且多呈断续状分布,该层泥、砂、灰“三元混积”现象较为明显,反映水体较为动荡。②小层底部深灰色含介壳页岩夹灰色介壳灰岩,下部深灰色页岩,基本无介壳,页理及微裂缝较发育,中部为纹层状介壳页岩,介壳定向性相对好,反映为相对深水、静水沉积,上部为含泥粉砂岩、粉砂质泥岩不等厚互层,水体变浅。③小层上部以浅灰色含泥粉砂岩和深灰色含粉砂泥岩为主,下部介壳层

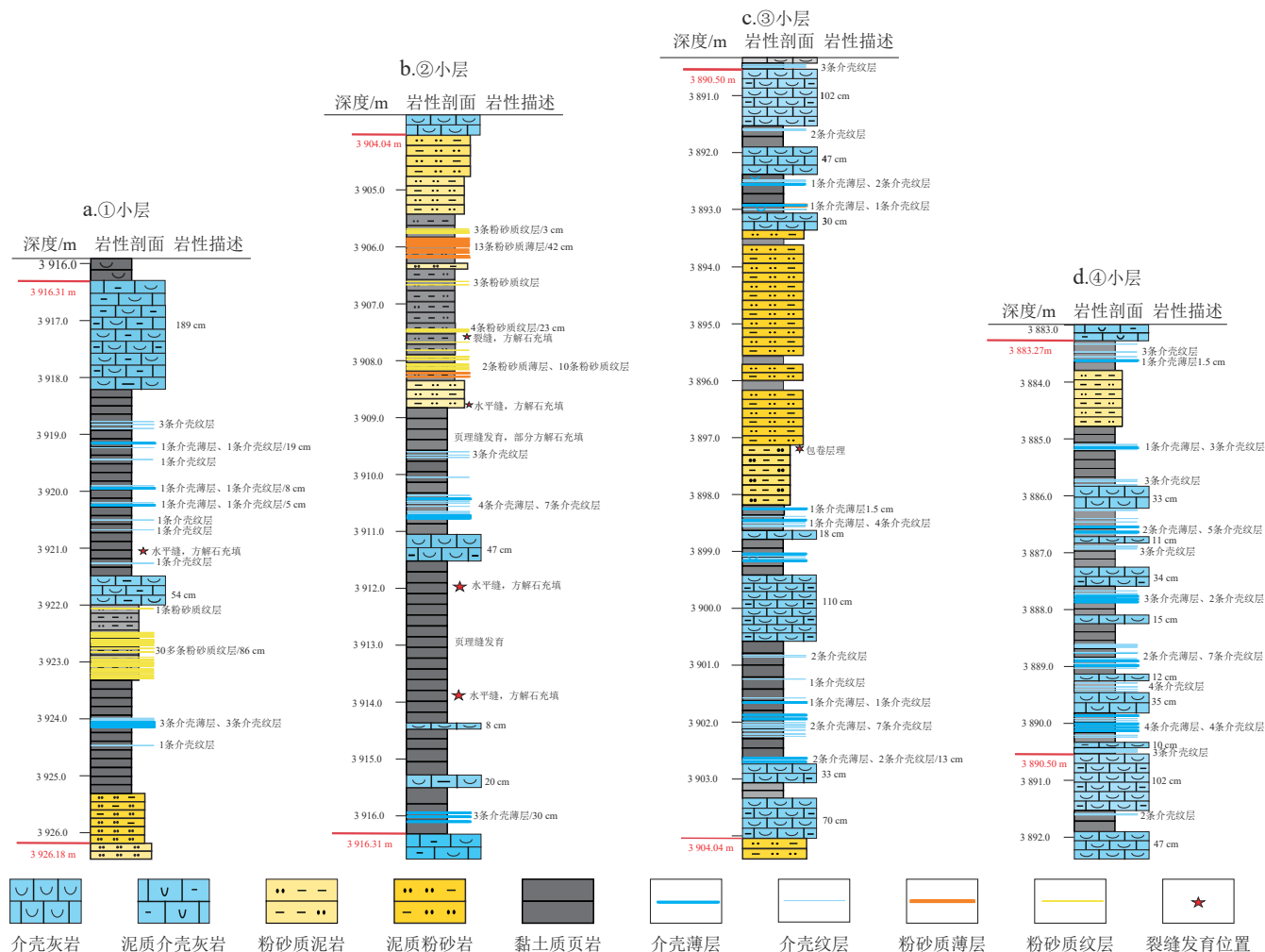


图3 四川盆地Y2井大二亚段各小层岩心剖面

Fig. 3 Core profiles of all the sublayers in the 2nd submember of the Da'anzhai Member in well Y2 in the Sichuan Basin

(图中红色横线和数字代表大二亚段各小层间划分线和对应深度;岩性描述中数值为纹层/薄层厚度。)

十分发育,介壳以断续纹层状为主,局部杂乱,页理发育一般,反映较②小层水力变强,水体变浅。④小层与②小层相比,介壳层明显增多,以纹层状介壳页岩夹泥质介壳灰岩、介壳灰岩为主,介壳以断续纹层状-纹层状为主,中部成层性最好,页理发育,反映沉积水动力相对弱,相对深水沉积。

2.2.2 侏罗系页岩矿物组成特征

全岩X射线衍射测试分析结果表明(图4a),四川盆地侏罗系3套富有机质页岩以黏土矿物与长英质矿物为主,方解石含量分布不均。其中东岳庙段页岩(样本数 $N=103$)黏土矿物含量介于19.80%~71.80%,平均为55.07%;石英+长石含量介于17.20%~60.10%,平均为30.88%;碳酸盐矿物含量介于0~45.30%,平均为10.90%;大安寨段页岩($N=95$)黏土矿物含量介于17.00%~60.60%,平均为42.29%;石英+长石含量介于27.40%~72.70%,平均为45.40%;碳酸盐矿物含量介于4.10%~39.20%,平均为12.31%;千二段页岩($N=116$)黏土矿物含量介于19.40%~66.60%,平均为49.05%;石英+长石含量介于26.50%~75.40%,平均为44.94%;碳酸盐矿物含量介于1.90%~19.30%,平均为6.00%。可见富黏土矿物是侏罗系页岩最显著的特点,黏土矿物X射线衍射测试分析及扫描电镜进一步分析来看,主要有伊利石、伊/蒙混层、绿泥石和高岭石。其中以伊/蒙混层(平均含量43%)和伊利石(平均含量30.97%)为主,绿泥石(平均含量13.40%)和高岭石(平均含量12.82%)含量较低,且分布不均。扫描电镜下可见大量的片状、鳞片状结构伊利石晶体,且往往具有顺层定向排列特征,局部见呈卷曲片状的绿泥石和书页状的高岭石。

扫描电镜下可见大量的片状、鳞片状结构伊利石晶体,且往往具有顺层定向排列特征,局部见呈卷曲片状的绿泥石和书页状的高岭石。

2.2.3 变尺度岩相组合类型及其特征

在上述岩心观察与描述的基础上,基于全岩“矿物含量+沉积构造+有机质含量”建立岩相命名方案,即:①以全岩矿物含量50%和25%为界线进行主名与主前缀的确定,将黏土矿物、长英质矿物和碳酸盐矿物含量均小于50%的统一命名为混合质页岩(图4b);②基于岩心沉积构造(主要为方解石介壳纹层-薄层、粉砂质纹层-薄层)及岩石薄片下石英(陆源碎屑粉-细砂、泥晶结构)、方解石等的结构(晶粒状、生物)进一步完善命名,如将纹层状作为主前缀的前修饰词;③开展页岩TOC分布范围及不同含量占比的统计分析,侏罗系富有机质页岩TOC($N=597$)主体以0.5%~1.0%和1.0%~2.0%两个区间为主,总占比可达61%,其次TOC≤0.5%的占比为33%,TOC≥2.0%的占比仅为6%,为达到细分岩相生烃品质差异,以TOC≤0.5%,0.5%~1.0%,1.0%~2.0%和≥2.0%为分级界线,分别定义为含碳、低碳、中碳和高碳作为岩相名前的次前缀。依据上述岩相划分方案,在侏罗系主要识别出6种典型岩相类型,各类岩相发育特征及分布详见表1。

1) 大尺度岩相组合类型及其特征

在实际页岩油气勘探研究过程中,取心井一般比较少,而目的层段能够连续取心的钻井就更少,因此,如何基于少量典型取心井,结合大量常规井的录(测)井资料开展岩相及组合特征研究,从沉积学的角度探

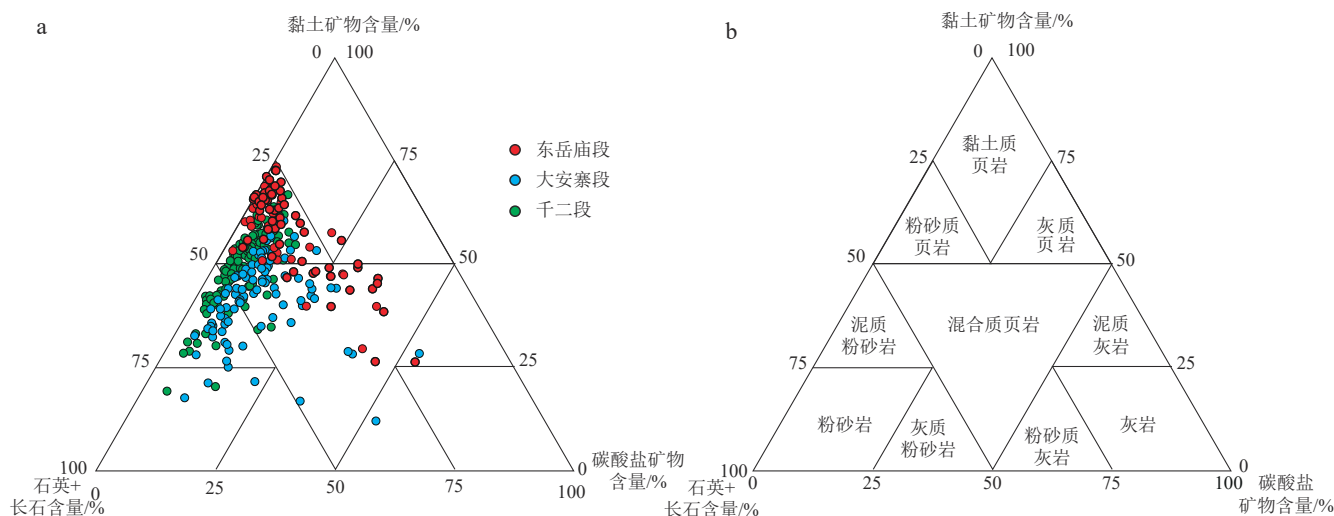


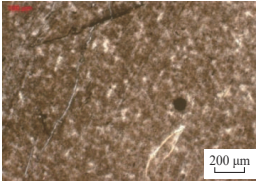
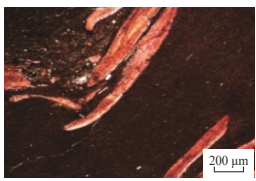
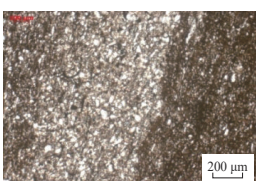
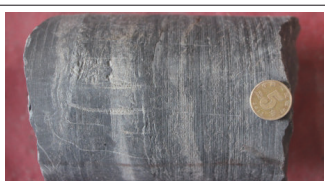
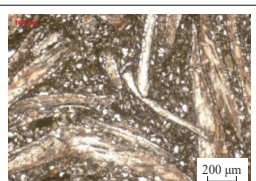
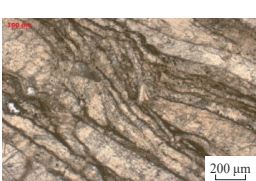
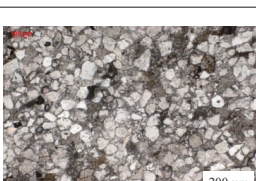
图4 四川盆地侏罗系页岩矿物组成与岩相分区命名方案

Fig. 4 Diagrams showing the mineral compositions and nomenclature of the lithofacies for the Jurassic shales in the Sichuan Basin

a. 全岩矿物组成三角图; b. 全岩矿物分区命名

表 1 四川盆地侏罗系页岩层段主要岩相类型及其特征

Table 1 Major lithofacies types and their characteristics of the Jurassic shale intervals in the Sichuan Basin

岩相类型	岩心照片	薄片显微照片	TOC 分级	发育特征及分布
黏土质页岩岩相			以中碳为主,其次为低碳、高碳,局部含碳、富碳	以泥质结构为主,少许粉砂碎屑星点分布。黏土矿物为隐晶状、显微鳞片状,部分呈拉长状,其长轴具定向分布。有机质呈斑点状、短细条状分散分布。主要发育于复兴地区东岳庙段,元坝及复兴地区大安寨段
纹层-薄层状介壳灰质页岩岩相			以中碳为主、其次为高碳	发育介壳纹层与薄层,镜下仍以泥质结构为主,隐晶状黏土矿物与有机质相混,岩心上可见介壳呈层状定向排列富集。主要发育于复兴地区东岳庙段,元坝、阆中及复兴地区大安寨段
(纹层状)粉砂质页岩岩相			以含碳、低碳为主,局部中碳、高碳	岩心上可见粉砂质纹层,镜下粉砂泥质结构,粉砂碎屑与隐晶状黏土矿物相混,粉砂碎屑以石英为主,次棱-次圆状,有机质呈斑点状、弯曲拉长状分散分布。主要发育于元坝地区东岳庙段、大安寨段与千佛崖组、复兴地区凉高山组
混合质页岩岩相			以低碳、中碳为主,局部高碳	发育泥质结构和粒屑结构,主要由隐晶状黏土矿物、介壳及粉砂碎屑组成,介壳由方解石颗粒组成,有重结晶现象。主要发育于复兴地区东岳庙段底部、复兴及元坝地区大安寨段局部层段
介壳灰岩岩相			低碳	发育粒屑结构和晶粒结构,主要由隐晶状黏土矿物、介壳组成,隐晶黏土矿物呈弯曲隙状、团粒状分布于粒间,多相混黑色有机质,介壳由纤柱状方解石组成,少许粒内具硅化作用。主要发育于复兴地区东岳庙段,复兴、阆中及元坝地区大安寨段
粉砂岩岩相			低碳	发育粉砂结构,主要由石英组成,含少许长石和岩屑。石英颗粒可见不规则溶蚀边;长石可见双晶,部分颗粒具碳酸盐化;粒间主要是隐晶质黏土矿物,分布不均匀。主要发育于元坝地区东岳庙段、复兴凉高山组及元坝千佛崖组

讨不同页岩岩相与夹层类型之间的组合关系,可根据夹层类型探索性推测不同组合内页岩岩相类型。依据川东复兴、川北元坝与阆中、川东北普光及川中龙岗等多个地区 100 多口钻井的录(测)井岩性剖面,以东岳庙段、大二亚段、千二段/凉二段等 3 套富有机质页岩段为重点,按沉积成因、沉积物类型及夹层占比差异,主要可识别出陆源泥-砂沉积型(A 型)、内源泥-灰沉积型(B 型)和混源泥-砂-灰沉积型(C 型)3 类 8 种岩相组合(图 5)。其中 A 型包括 3 种:连续页岩型(A1)、粉砂质页岩夹粉砂岩型(A2)和粉砂质页岩与粉-细砂岩互层型(A3);B 型包括 3 种:连续页岩型(B1)、黏土质

页岩夹介壳灰岩型(B2)和黏土质页岩与介壳灰岩互层型(B3);C 型包括 2 种:粉砂质(黏土质)页岩与(泥质)介壳灰岩夹粉砂岩型(C1)和粉砂质页岩与粉-细砂岩夹(泥质)介壳灰岩型(C2)。其中 A1 型和 A2 型组合类型主要发育于川北元坝东岳庙段与千二段、川东复兴凉二段、阆中和涪陵地区大安寨段;A3 型组合类型主要发育于川东北普光千二段;B1 型主要发育川东复兴东岳庙段、川中龙岗大二亚段,B2 型和 B3 组合类型在四川盆地大二亚段普遍发育;C1 型和 C2 型组合类型主要发育于川北元坝、川东复兴及川东北普光等(盆地边缘与湖盆中心的过渡地区)大二亚段。

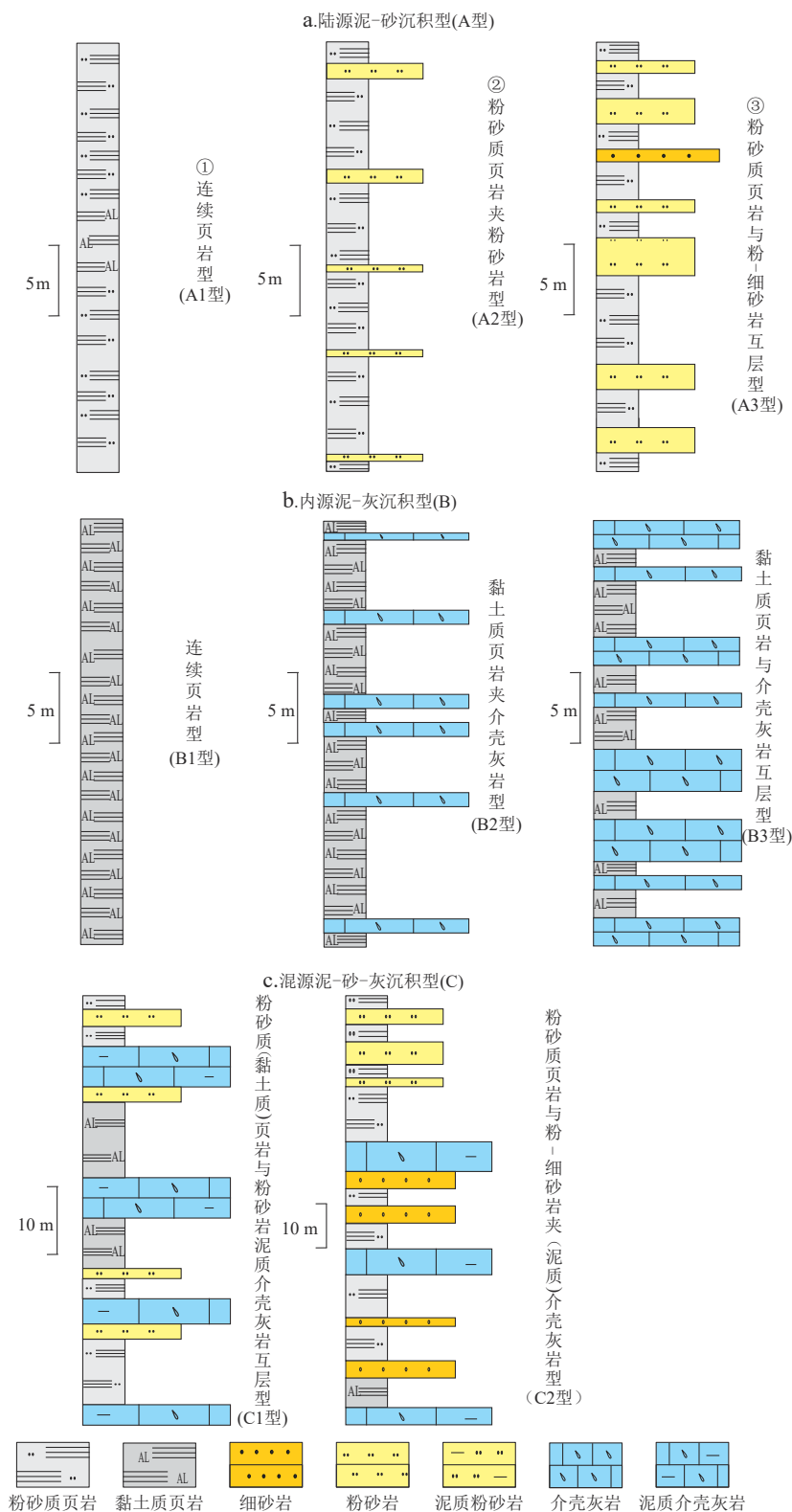


图5 四川盆地侏罗系页岩层段大尺度岩相组合类型及其特征

Fig. 5 Types and their characteristics of large-scale lithofacies assemblages of the Jurassic shale intervals in the Sichuan Basin

2) 小尺度岩相组合特征

基于典型钻井岩心观察与薄片鉴定发现,在米级尺度上连续页岩型或页岩夹灰岩、砂岩型组合的页岩层段中,仍发育大量的毫米级、厘米级及分米级夹层。

选取 B1, B2 和 A2 型进行毫米—分米级尺度表征研究,认为:①FY10 井东岳庙段 B1 连续页岩型组合(图 6a),在 2 791 ~ 2 798 m 深度段,岩心以灰黑色黏土质页岩和纹层状介壳灰质页岩为主,页岩层段共发育 48 条介

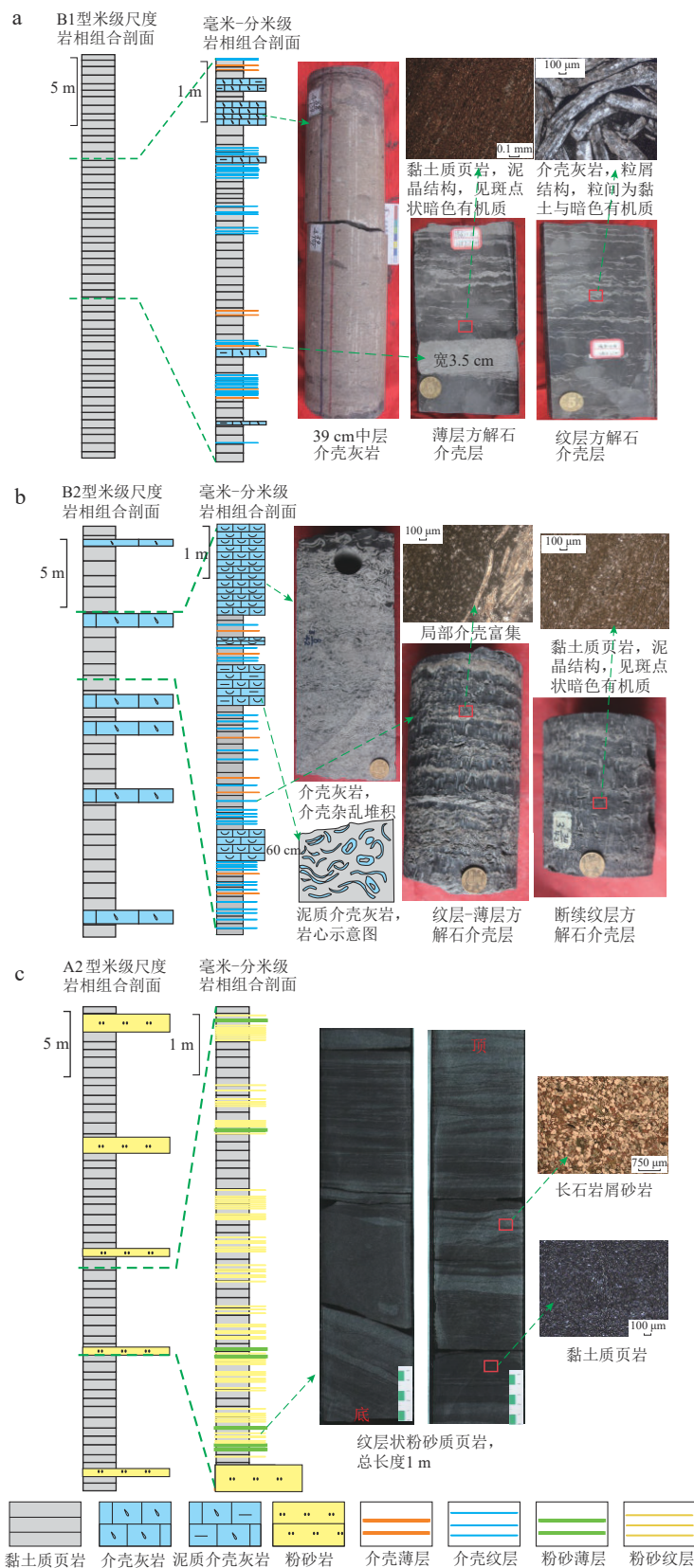


图6 四川盆地侏罗系内源泥-灰沉积型与陆源泥-砂沉积型页岩层段不同尺度下岩相组合特征

Fig. 6 Characteristics of lithofacies assemblages of the Jurassic shale intervals featuring endogenetic mud-lime and terrestrial mud-sand sedimentary types at multiple scales in the Sichuan Basin

a. FY10井, 东岳庙段, B1连续页岩型组合, 埋深2 791~2 798 m; b. XL101井, 大二亚段, B2型页岩夹介壳灰岩型组合, 埋深2 152~2 159 m; c. Z1井, 凉二段, A2型页岩夹砂岩型组合, 埋深2 532~2 541 m

壳层,其中纹层36条、薄层8条、中层1条(厚39 cm)。白色介壳层在岩石薄片下呈粒屑结构,粒间多为暗色有机质与黏土混合物。黑色页岩在岩石薄片下以泥晶结构为主,未见陆源碎屑颗粒,见斑点状暗色有机质,局部可见莓状黄铁矿发育,该组合中页岩TOC最高,最大可达3.13%,平均为1.67%,反映沉积水体相对深,为还原性较强的静水内源沉积;②XL101井大安寨段二亚段B2型页岩夹介壳灰岩型组合(图6b),在2152~2159 m深度段,岩心以纹层状介壳灰质页岩夹(泥质)介壳灰岩为主,页岩层段至少发育39条介壳层,与B1型组合相比,尽管数量相当,但薄层与中层数量更多、单层厚度也明显更大。介壳灰岩岩心上可见介壳主要呈杂乱堆积状,纹层状介壳灰质页岩断面可见完整的双壳结构,呈环边钙质包壳,内部多为泥质与有机质混合物,页岩岩石薄片下多为泥晶结构、局部可见粒屑结构(生物介壳)。该组合中页岩TOC也相对较高,最大为2.93%,平均为1.38%,同样反映其为沉积水体相对深的、相对安静的内源沉积;③Z1井凉高山组凉二段A2型页岩夹砂岩型组合(图6c),在2532~2541 m深度段,岩心以纹层状粉砂质页岩和黏土质页岩为主,页岩层段中粉砂质纹层密集发育,至少发育120条纹层与薄层,多呈水平状与波状。该组合中页岩TOC最高为3.03%,平均为1.21%,反映其主要发育于相对深水的、弱水动力条件下的陆源沉积环境。

综上所述,对于陆相页岩层段而言,在米级尺度(大尺度)上的连续页岩层段中仍可发育大量毫米—分米级(小尺度)方解石介壳层与粉砂质层,而这种小尺度夹层

类型与大尺度夹层类型的发育往往都具有较好的一致性,对于同时存在灰岩和砂岩两类大尺度夹层的层段,同样可以依据哪一类占比高及纵向上沉积序列,推测相邻页岩段的矿物组成、岩相及小尺度夹层类型。因此,对于中国各大盆地陆相页岩层系而言,多数地区前期已有大量常规钻井和录(测)井资料,总结大尺度岩相组合类型及其时空分布特点,并结合典型井取心段的变尺度岩相组合分析,通过夹层类型及岩相组合的纵向沉积序列,在一定程度上可以为预测页岩岩相类型、烃源品质等提供依据,具有较好的可操作性与实用性。

3 不同尺度岩相组合的储集特征

对于陆相页岩层系而言,分析页岩与夹层的储集性能优劣,对优选油气富集有利层段至关重要^[23-24]。为此,本次研究针对四川盆地侏罗系富有机质页岩层段中页岩与夹层(毫米—米级),从不同尺度岩相组合的角度进行储集特征的分析,明确不同尺度夹层对于油气储集的差异。

3.1 大尺度岩相组合中页岩与夹层宏观储集特征

物性是宏观表征不同岩石类型储集性能的最重要参数^[25]。通常情况下,对于页岩层段中分米—米级夹层具备采集小柱样进行物性测试的条件,因此研究中针对四川盆地侏罗系10口典型钻井大尺度岩相组合中的各类页岩与夹层类型,按不同页岩岩相与夹层类型开展孔隙度数据($N=512$)统计分析(图7),结果表明

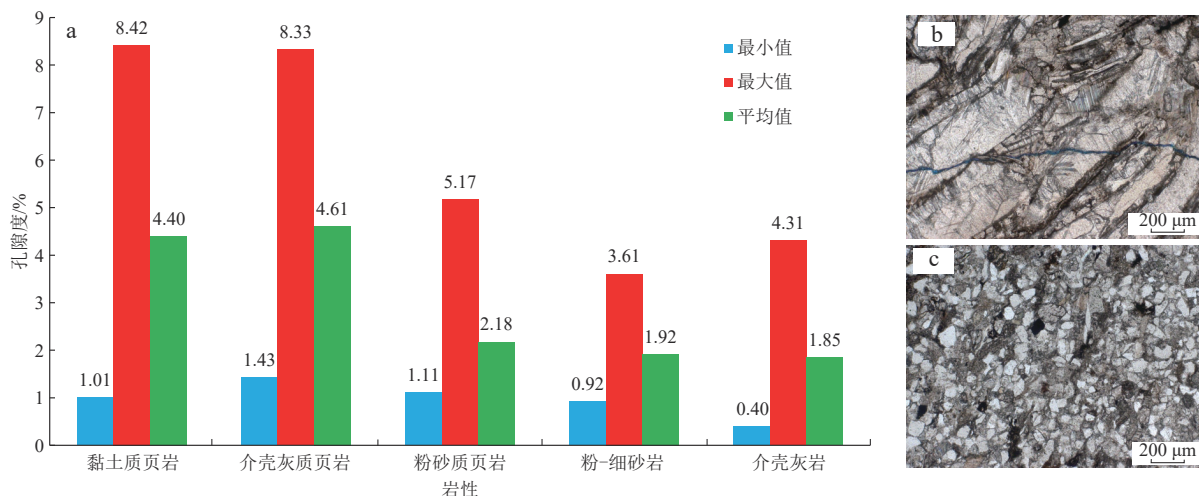


图7 四川盆地侏罗系不同页岩岩相与夹层储集特征

Fig. 7 Reservoir characteristics of different shale and associated interlayer lithofacies of the Jurassic strata in the Sichuan Basin
a. 不同页岩岩相与夹层的孔隙度特征; b. 介壳灰岩, 铸体薄片显微照片, YY2井, 埋深3 883.99 m; c. 粉砂岩, 铸体薄片显微照片, YY2井, 埋深3 891.92 m

页岩孔隙度介于1.01%~8.42%($N=419$),平均为3.76%;粉-细砂岩孔隙度介于0.92%~3.61%($N=31$),平均为1.81%;介壳灰岩孔隙度介于0.40%~4.31%($N=62$),平均为1.78%。从显微镜下孔隙的发育情况来看,各类页岩中普遍富含黏土矿物,氩离子抛光扫描电镜下可见大量的黏土矿物层间孔,部分样品中还可可见较好的有机质孔隙发育,而在铸体薄片下粉-细砂岩普遍发育泥质胶结,介壳灰岩具有不同程度重结晶作用,岩性致密,溶蚀改造弱,基本不发育孔隙(图7),储集性能普遍较差。

整体而言,页岩物性明显好于粉-细砂岩夹层与介壳灰岩夹层,其中以黏土质页岩、介壳灰质页岩孔渗性能最好,平均孔隙度可达4.0%以上,而粉砂质页岩相对略差,一定程度上可能与页岩中有机质孔的发育程度有关。侏罗系页岩有机质成熟度(镜质体反射率 R_o)介于1.3%~1.8%,已进入生气阶段,具备发育有机质孔的良好条件(氩离子抛光扫描电镜已证实),东岳庙段与大安寨段中黏土质页岩和介壳灰质页岩有机质类型普遍以Ⅱ₁型和Ⅱ₂型为主,相对有利于有机质孔发育,而粉砂质页岩以Ⅲ型和Ⅱ₂型为主,不利于有机质孔的发育。从上述3类不同页岩岩相TOC与孔隙度关系图中也可以看出(图8),黏土质页岩TOC与孔隙度相关性最好,其次为介壳灰质页岩,而粉砂质页岩相关性最差,也进一步反映出不同页岩岩相中有机质孔对于孔隙度的贡献。

3.2 小尺度岩相组合中页岩与夹层微观储集特征

对于页岩层段中相对小尺度的毫米-厘米级夹层运用常规的录(测)井手段,目前仍难以识别与表征,导致对于小尺度岩相组合的研究相对较少。研究区侏罗系东岳庙段与大安寨段页岩层段中富含大

量的毫米-厘米级介壳方解石纹层-薄层,尤其是厚度小于1 cm的方解石纹层,多呈亮白色的单壳定向排列,局部也可见较完整的双壳,生物原始结构及形态保存较好,基本无重结晶改造作用,而中层-块状的介壳灰岩中,均有不同程度的重结晶作用,或以较细小的介屑形式存在,反映出分米-米级介壳灰岩中方解石与富有机质页岩中的毫米-厘米级方解石所处的成岩流体环境及后期改造作用上的明显差异。川东复兴东岳庙段和川北元坝大安寨段等多个地区的氩离子抛光扫描电镜鉴定可见,页岩中普遍广泛发育大量的黏土矿物层间孔(该套页岩黏土矿物平均含量可达50%),其形态受片状伊利石延展形态控制,多呈狭缝型,是页岩的主要储集空间类型,对储集物性贡献最大。而页岩中普遍发育的纹层状方解石介壳内可发育溶蚀孔与微裂缝,甚至可见介壳边缘缝发育。如在川东复兴FY10井东岳庙段(图9a—c)和川北元坝YY2井大安寨段(图9d—f)纹层中,方解石介壳在氩离子抛光-扫描电镜下可见内部发育较多的纳米-微米级大小不一的粒内溶蚀孔,通过不同尺度的局部放大,在较大的溶蚀孔内可见暗色有机质,且部分有机质内还可见有机质孔,说明介壳内溶蚀孔是油气储集的有利空间,推测这种介壳粒内溶蚀孔,应主要由相邻页岩生烃过程中形成有机酸溶蚀改造形成。川东复兴FY1井东岳庙段页岩中介壳内部还发育大量的网状微裂缝(图9g),此外川北元坝YL4井大安寨段介壳边缘缝发育,且缝内有暗色有机质充填(图9h)。上述现象均揭示出小尺度页岩与纹层组合中,页岩生成的油气在满足自身的情况下,通过微运移可以在相邻的介壳方解石纹层中储集赋存,从而形成页岩与纹层同时有效富集油气的有利岩相组合^[26]。

4 不同沉积成因岩相组合类型变尺度源-储耦合机理

陆相湖盆同一时期的多物源供给,湖盆不同部位水体深度、水体环境等的差异,不同时期湖平面升降沉积中心的横向迁移,导致沉积岩相非均质性极强,平面上岩相变化快,纵向上发育多类型岩相组合,最为显著的特点就是页岩层系中多类型、多尺度夹层的大量发育^[27-29]。这些特点必将导致陆相页岩层系“源”(有机质丰度、类型)与“储”(页岩、多尺度夹层)特征及配置关系更为复杂。为此,本次研究针对内源型、混源型及陆源型3种沉积成因岩相组合类型,从变尺度的角度开展宏观源(TOC)-储(孔隙度)参数

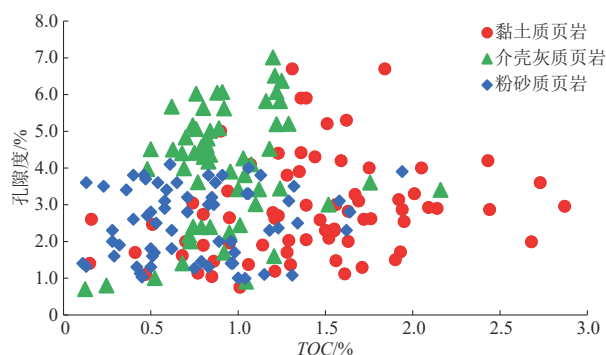


图8 四川盆地侏罗系典型页岩岩相有机碳含量与孔隙度关系

Fig. 8 TOC content vs. porosity of typical shale lithofacies of the Jurassic strata in the Sichuan Basin

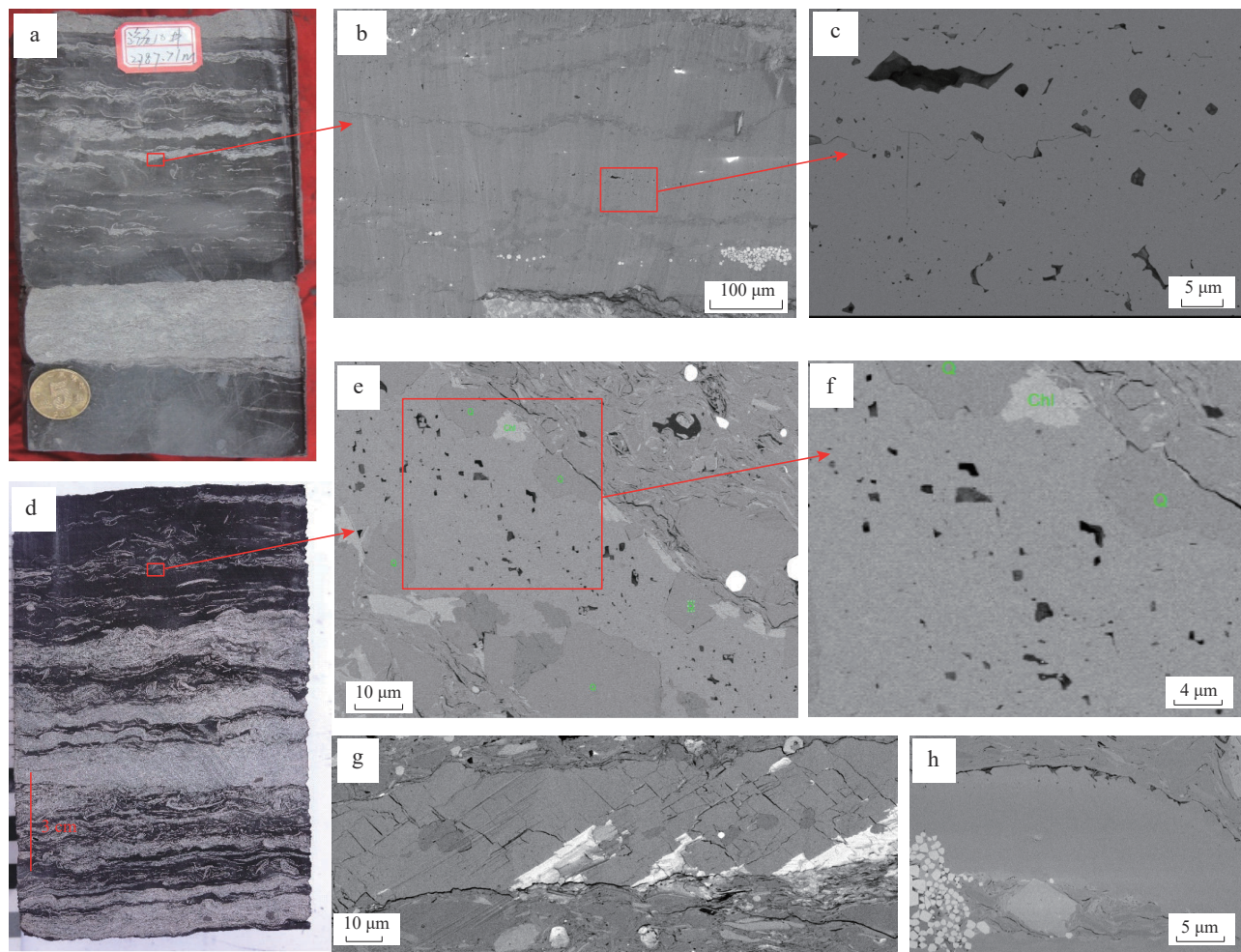


图9 四川盆地侏罗系典型小尺度岩相组合中纹层状介壳方解石粒内及粒缘孔缝发育特征

Fig. 9 Characteristics of intragranular and grain-edge pores and fractures in lamellar shell calcite in small-scale lithofacies assemblages of the Jurassic shales in the Sichuan Basin

a. 介壳灰质页岩, FY10井, 东岳庙段, 埋深2 787.71 m, 岩心照片; b. 介壳内溶蚀孔, 为a图中红框内样品氩离子抛光扫描电镜照片; c. 介壳内溶蚀孔, 孔内充填暗色有机质, 为b图中红框放大照片; d. 介壳灰质页岩, YY2井, 大安寨段, 埋深3 890.22 m, 岩心照片, 图中的3 cm为介壳层厚度; e. 方解石介壳粒内孔, 为d图中红框内样品氩离子抛光扫描电镜照片; f. 介壳内溶蚀孔, 孔内充填暗色有机质, 为e图中红框放大照片; g. 方解石介壳内微裂缝, FY1井, 东岳庙段, $TOC=0.92\%$, 埋深2 731.41 m, 氩离子抛光扫描电镜照片; h. 方解石介壳边缘缝, 充填暗色有机质, YL4井, 大安寨段, $TOC=1.23\%$, 埋深3 748.23 m, 氩离子抛光扫描电镜照片

配置关系与微观源(有机组分)-储(孔隙)组合模式的探索性研究,以期揭示陆相页岩油气源-储耦合及富集机理。

4.1 内源型岩相组合源-储耦合特征及成因机理

内源型岩相组合主要有两类:一是页岩型组合(多发育毫米-厘米级方解石介壳层),主要发育于远离湖盆边缘及生物介壳滩的相对深水沉积区;二是页岩夹介壳灰岩组合(分米-米级方解石介壳层),主要发育在远离湖盆边缘,靠近生物介壳滩的深水沉积区,介壳层数量与厚度主要取决于风暴频次及强度。以川东复兴地区FY10井东岳庙段($R_o=1.56\%$)页岩型组合为例

(图10a),整体上页岩 TOC 较高,最大为4.04%,平均为1.86%;有机质类型好,主要为腐泥混合型(II_1)和腐殖混合型(II_2),孔隙度较高,平均可达5.86%,宏观源(TOC)-储(孔隙度)参数相关性较好;氩离子抛光扫描电镜观察鉴定发现,微观孔隙以黏土矿物层间缝形无机孔为主,有机质有两种类型:一类是个体较大的有形态的有机质,内部无孔;另一类是个体相对小的无固定形态的沥青,内部普遍发育孔,且 II_1 型层段较 II_2 型层段有机质孔略发育。此外纹层状介壳方解石粒内孔较发育,且孔隙内可见暗色有机质充填,个体较大的有机质内部还可见有机质孔发育,揭示出页岩生成的液态原油短距离运移至邻近的介壳纹层方解石粒内孔中

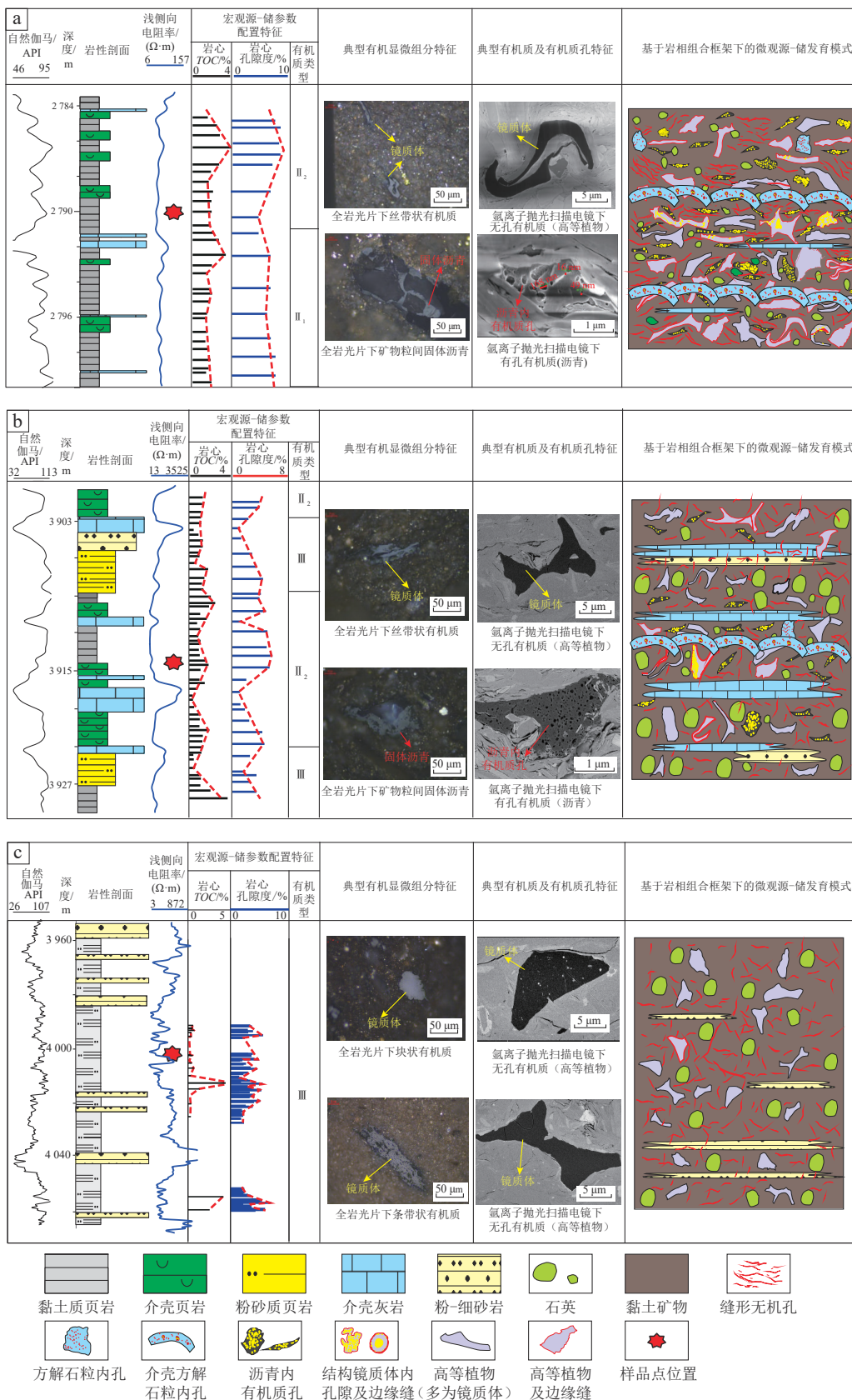


图10 四川盆地侏罗系不同沉积成因岩相组合类型源-储耦合特征及发育模式

Fig. 10 Source rock-reservoir coupling characteristics and development models of lithofacies assemblages differing in sedimentary genesis of the Jurassic shales in the Sichuan Basin

a. 内源型岩相组合; b. 混源型岩相组合; c. 陆源型岩相组合

保存,进入高成熟阶段后裂解生气,内部形成富气有机质孔。整体而言,内源型岩相组合中宏观源(TOC)-储(孔隙度)参数耦合相关性最好,究其原因主要是由于内源较深水沉积环境控制下页岩,有机质丰度相对高、且生烃母质类型相对好,在埋藏生烃演化过程中生油能力强,进入高成熟度阶段后,液态油裂解固化生气成孔,即氩离子抛光扫描电镜中可见的无固定形态的有孔沥青,这种页岩内部微观上的源-储一体,是宏观上源(TOC)高、储(孔隙度)高及耦合相关性好的根本原因,此外,小尺度岩相组合中邻近黏土质页岩的毫米-厘米级介壳纹层方解石发育的粒内孔也可以储集油气,有利于形成较好的宏观源-储耦合关系。

4.2 混源型岩相组合源-储耦合特征及成因机理

混源型岩相组合主要为页岩夹介壳灰岩与砂岩型组合,其沉积受盆地边缘陆源碎屑物源与盆内灰岩介壳滩共同控制,通常发育于两者之间的过渡地区,以陆源与内源混合沉积为特点。以川北元坝YY2井大安寨段(R_o 为1.6%)为例(图10b),整体上页岩 TOC 相对较高,最大为2.2%,平均为1.1%;有机质类型腐泥混合型(II_1)、腐殖混合型(II_2)及腐殖型(III)均有,页岩孔隙度相对较高,平均为3.95%,从剖面上可以看出,厚层(米级)介壳灰岩与砂岩孔隙度较低,基本小于2.0%,整体上该类型组合宏观源(TOC)-储(孔隙度)参数相关性中等,这主要与陆源砂质输入影响了烃源品质有关,岩相组合中粉砂质页岩段 TOC 明显较低,且有陆源碎屑输入的层段有机质类型较差,以 III 型为主,腐殖型有机质在埋藏生烃演化过程中以生气为主,由固体有机质直接生成气态烃,基本不发育有机质孔隙,大部分生成的气态烃只能运移进入无机孔缝中储集或散失,微观上源-储共存,源对储没有直接贡献,源(TOC)-储(孔隙度)参数没有实质性的相关关系;而岩相组合中页岩段或页岩夹介壳灰岩层段宏观-微观源储特点与内源型岩相组合基本相当,页岩内部可发育相对较多的有孔沥青有机质,微观上源-储一体,本质上源对储能够形成一定的直接贡献,源(TOC)-储(孔隙度)耦合相关性也相对好,且内部的毫米-厘米级介壳纹层方解石粒内孔也较发育,可为油气储集提供有效空间,形成相对较好的宏观源-储耦合关系^[30]。

4.3 陆源型岩相组合源-储耦合特征及成因机理

陆源型岩相组合主要为页岩夹粉-细砂岩(米级)型组合,主要发育于不同时期靠近湖盆边缘碎屑物源

的相对浅水沉积区。以川北元坝YL4井东岳庙段($R_o=1.8\%$)为例(图10c),整体上 TOC 普遍偏低,多小于1%,有机质类型以腐殖型(III)为主,孔隙度平均小于3%,宏观源(TOC)-储(孔隙度)参数相关性较弱,主要是由于陆源型岩相组合靠近物源供给区,沉积水体相对浅,较多的陆源碎屑输入不利于有机质保存,丰度低且有机质基本为均质、致密无孔,个体较大的有形态有机质,全岩光片鉴定有机显微组分主要为镜质体。氩离子抛光扫描电镜下以黏土矿物层间孔为主,但含量明显不如内源型页岩,因此,受沉积环境控制陆源型岩相组合宏观源(TOC)-储(孔隙度)参数均相对低,微观上源-储共存,但非一体,源对储基本无直接贡献,是该岩相组合源-储耦合关系差的本质原因。

5 讨论

5.1 不同类型、不同尺度陆相页岩岩相组合形成影响因素

中国陆相页岩发育具有盆地类型多(坳陷型、断陷型、挤榨前渊型等)、层系多(中-上二叠统、上三叠统、下侏罗统、白垩系和古近系)、夹层类型多(砂岩类、碳酸盐岩类、凝灰岩类、膏盐岩类等)、沉积厚度差异大等复杂的地质特点。在认识到湖相细粒岩沉积发育复杂性的同时,也应看到不同类型岩相、不同尺度岩相组合均是湖盆不同部位构造-沉积环境差异的产物,有规律可循。一般由盆缘—盆地中心成因类型上均遵循从由陆源型(夹砂)组合—混源型(砂、灰或云或凝灰等)组合—内源型(灰、云、膏、盐等)组合沉积演化序列,只是受湖盆面积、单(多)陆源碎屑区、古地貌、相对湖平面变化等因素的影响,不同类型岩相组合的发育程度及时空分布范围有所差异。陆源型不同尺度岩相组合发育主要受牵引流作用影响,离碎屑物源供给区距离决定了砂岩类夹层厚度的大小;内源型不同尺度岩相组合主要与沉积水体深浅及古气候环境有关;而混源型不同尺度组合的受控因素较为复杂,可受古地貌、碎屑物源供给、水体环境及古气候等多种因素控制。以四川盆地侏罗系为例,目前研究认为主要为陆内弱拉张环境下形成的坳陷型淡水湖盆沉积,宽缓面积广大,受3期湖侵控制,沉积发育了东岳庙段、大安寨段及凉二段3套富有机质页岩,主体为河流-(扇)三角洲-湖泊沉积体系,因此陆源型页岩夹砂岩型岩相组合中砂岩层的厚薄与多少,主要与距离盆地周缘三角洲前缘砂

体的远近及沉积水动力条件有关,混源型页夹砂夹灰岩型组合,发育于盆缘三角洲前缘砂体与盆地内部生物介壳滩之间的沉积过渡区,而内源型页岩夹介壳灰岩型组合,沉积发育于距离湖盆陆源碎屑供给区较远的湖盆中心部位。从岩相组合的尺度上来看,东岳庙段与大安寨段页岩沉积期湖盆内部均发育介壳滩(古地貌高部位),这种介壳滩为浅水原地沉积(岩相组合上为介壳灰岩夹页岩,页岩 TOC 低,不属于富有机质页岩层段的范畴),而相对深水沉积的大尺度页岩夹介壳灰岩组合中分米-米级介壳灰岩与页岩之间多为突变接触(事件性沉积),且介壳杂乱堆积(沉积速率快),而小尺度页岩夹介壳灰岩组合中毫米-厘米级介壳层多呈水平纹层与层状(间歇性风暴事件后快速转为相对稳定静水沉积、速率相对慢)发育,介壳灰岩层厚度大小主要受距离介壳滩距离与风暴作用强弱控制,数量的多少反映风暴作用发生的频次。

5.2 从变尺度岩相组合角度探究源、储特征及耦合机理的必要性

目前已认识到陆相页岩中夹层对于储集油气的贡献存在差异^[12],但从变尺度的角度认识不同厚度夹层储集油气能力差异仍较少,开展宏观-微观一体角度研究源-储耦合特征及机理的就更少。本次四川盆地侏罗系陆相页岩油气研究发现,宏观岩相组合成因类型控制了宏观源储参数相关性,内源型沉积组合最好,其次为混源型,陆源型最差;微观上有机显微组分与各类无机矿物差异受控于沉积岩相组合及环境,源-储发育模式明显存在差异。此外,研究发现大尺度岩相组合中分米-米级介壳灰岩重结晶作用普遍较强烈,除个别层段发育一些微裂缝外,基质孔隙基本不发育,很难对油气储集形成贡献,在页岩油气水平井穿行甜点层段优选过程中,由于侏罗系页岩黏土含量(平均50%,最高可达60%)高,塑性强,针对页岩的压裂工艺,纵向上难以压开分米-米级介壳灰岩,作为封隔层限制了压裂改造效果与提产,但有利于油气的原地滞留富集,有机碳含量(TOC)与热解游离烃含量(S_1)、生烃潜量(S_1+S_2)具较好的正相关性,一定程度上可以证实这一结论,可见普遍发育的封隔层对于页岩油气的富集与高产具多方面的影响,仍需不断的深入研究;而小尺度岩相组合中毫米-厘米级的介壳方解石层,介壳保存相对完整,介壳内可见溶蚀孔发育(可能与有机质生烃排酸有关),且孔内不同程度充填暗色有机质或者油膜(与 R_o 大小有关),部分个体相对较大的粒内孔中明显可见固体沥青,且固体沥青内发育有机质孔,这

种发育于小尺度岩相组合中的页岩(滞留油气)与毫米-厘米级介壳方解石层(微运移油气)均有利于油气储集与富集。究其原因,强风暴作用沉积成因的分米-米级介壳方解石沉积物在成岩过程中受黏土矿物转化过程中脱水影响,内部快速胶结致密化,重结晶作用也较强烈,使得后期页岩生成的烃类流体难以运移进入,而弱风暴作用沉积毫米-厘米级介壳,介壳保存相对完整,直接与页岩接触,页岩生烃过程中产生的有机酸可直接对其溶蚀改造,形成溶蚀孔,生成的油气经微运移便可进入并储集下来。因此,对于四川盆地侏罗系而言,整体多为超高压、裂缝欠发育,油气保存条件相对较好,页岩夹纹层-薄层小尺度岩相组合的源-储耦合性及含油气性均相对好,但含油性的优劣还受到有机质成熟度与压力系数高低、裂缝发育程度等诸多条件影响,因此,对于中国其它盆地陆相层系,不同岩相组合与含油气性的关系,仍需考虑多种因素,但从变尺度岩相组合角度,认识源-储耦合机理,充分认识不同尺度夹层对油气储集贡献的差异,是判识目的层段页岩油类型的关键,小尺度毫米-厘米级夹层有利于滞留型页岩油发育,而近源聚集型页岩油受大尺度米级以上厚层夹层物性控制。

6 结论

1) 提出了宏观与微观结合定岩相-变尺度分析定岩相组合的研究思路与方法,识别出陆源泥-砂沉积型、内源泥-灰沉积型、混源泥-砂-灰沉积型3种沉积成因岩相组合类型,发现页岩夹介壳灰岩或粉砂岩大尺度组合页岩段中可发育较多纹层-薄层状方解石介壳层或粉砂层,同一组合中不同尺度夹层类型具有较好的一致性。

2) 大尺度岩相组合中米级介壳灰岩或粉砂岩层储集物性较差,对油气储集贡献有限,而小尺度岩相组合中毫米级纹层与厘米级薄层状方解石介壳粒内孔较发育,且内部有暗色有机质充填,可为油气提供有效储集空间。

3) 建立了3种沉积成因岩相组合的源-储耦合发育模式,提出由陆源型-混源型-内源型沉积岩相组合,源(TOC)-源(孔隙度)参数相关性依次变好,其主要与热演化程度、有机显微组分及无机矿物差异密切相关。探讨了不同类型、不同尺度岩相组合形成的影响因素,分析了从变尺度岩相组合角度认识陆相页岩油气源-储特征及耦合机理的必要性,为陆相页岩油气富集机理研究提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 128-142.
ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 128-142.
- [2] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.
- [3] 唐令, 宋岩, 陈晓智, 等. 页岩气选区评价关键参数及上下限——以四川盆地五峰组—龙马溪组为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(1): 153-168.
TANG Ling, SONG Yan, CHEN Xiaozhi, et al. Key parameters and the upper-lower limits of shale gas selection evaluation: Case study from the Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(1): 153-168.
- [4] 唐令, 宋岩, 赵志刚, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气藏超压成因及演化规律[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 37-53.
TANG Ling, SONG Yan, ZHAO Zhigang, et al. Origin and evolution of overpressure in shale gas reservoirs of the Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 37-53.
- [5] 武瑾, 李玮, 刘鑫, 等. 四川盆地海相页岩气碳同位素特征及指示意义[J]. 特种油气藏, 2022, 29(5): 36-41.
WU Jin, LI Wei, LIU Xin, et al. Characteristics and indicative significance of carbon isotopes of marine shale gas in Sichuan Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 36-41.
- [6] TANG Ling, WANG Pengfei, ZHAO Zhigang, et al. Overpressure origin and evolution during burial in the shale gas plays of the Wufeng-Longmaxi formations of southern Sichuan Basin [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 236: 212729.
- [7] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.
- [8] 高波, 武晓玲, 张英, 等. 鄂尔多斯盆地南部张家滩油页岩生烃演化特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 24-32.
GAO Bo, WU Xiaoling, ZHANG Ying, et al. Hydrocarbon generation and evolution characteristics of Triassic Zhangjiantan oil shale in southern Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(1): 24-32.
- [9] 马存飞, 孙文静, 曾令鹏, 等. 沧东凹陷孔二段页岩中基于岩心裂缝观测的构造裂缝规模解析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 1-11.
MA Cunfei, SUN Wenjing, ZENG Lingpeng, et al. Mathematical analysis of structural fracture scale in shale based on core fracture observation of the second member of Kongdian Formation in Cangdong Sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(4): 1-11.
- [10] 王小军, 宋永, 郭旭光, 等. 陆相咸化湖盆细粒沉积岩分类及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 303-317.
WANG Xiaojun, SONG Yong, GUO Xuguang, et al. Classification of fine-grained sedimentary rocks in saline lacustrine basins and its petroleum geological significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 303-317.
- [11] 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 等. 四川盆地侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 261-272.
HU Zongquan, WANG Ruyue, LIU Zhongbao, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluations for the Lower Jurassic lacustrine shale gas reservoir in the Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 261-272.
- [12] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1067-1078.
JIAO Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1067-1078.
- [13] 邹才能, 杨智, 董大忠, 等. 非常规源层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1517-1533.
ZOU Caineng, YANG Zhi, DONG Dazhong, et al. Formation, distribution and prospect of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China [J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1517-1533.
- [14] 王小军, 宋永, 郭旭光, 等. 陆相咸化湖盆细粒沉积岩分类及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 303-317.
WANG Xiaojun, SONG Yong, GUO Xuguang, et al. Classification of fine-grained sedimentary rocks in saline lacustrine basins and its petroleum geological significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 303-317.
- [15] 张顺, 刘惠民, 陈世悦, 等. 中国东部断陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案探讨——以渤海湾盆地南部古近系细粒沉积岩为例[J]. 地质学报, 2017, 91(5): 1108-1119.
ZHANG Shun, LIU Huimin, CHEN Shiyue, et al. Classification scheme for lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in faulted basins of eastern China: Insights from the fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(5): 1108-1119.
- [16] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 828-838.
LIU Bo, SHI Jiaxin, FU Xiaofei, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and

- Development, 2018, 45(5): 828-838.
- [17] 刘惠民, 王勇, 杨永红, 等. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合: 以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3543-3555.
- LIU Huimin, WANG Yong, YANG Yonghong, et al. Sedimentary environment and lithofacies of fine-grained hybrid sedimentary in Dongying Sag: A case of fine-grained sedimentary system of the Es₄[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3543-3555.
- [18] 易娟子, 张少敏, 蔡来星, 等. 川东地区下侏罗统凉高山组地层-沉积充填特征与油气勘探方向[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 795-815.
- YI Juanzi, ZHANG Shaomin, CAI Laixing, et al. Strata and sedimentary filling characteristics of the Lower Jurassic Lianggaoshan Formation and its hydrocarbon exploration in eastern Sichuan Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 795-815.
- [19] 杨帅. 四川盆地侏罗系沉积演化与相控储层预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- YANG Shuai. Sedimentary evolution during Jurassic and faces-controlling reservoir prediction in Sichuan Basin, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [20] LI Qianwen, LIU Zhongbao, CHEN Feiran, et al. Behavior and controlling factors of methane adsorption in Jurassic continental shale, northeastern Sichuan Basin [J]. Energy Geoscience, 2023, 4(1): 83-92.
- [21] 舒志国, 周林, 李雄, 等. 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, 2021, 42(1): 212-223.
- SHU Zhiguo, ZHOU Lin, LI Xiong, et al. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemia Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 212-223.
- [22] 李楚楚, 洪秀娥, 韩登林, 等. 湖相混积岩有利储层岩性测井识别方法——以大王庄油田沙三上亚段为例[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(4): 37-44.
- LI Chuchu, HONG Xiue, HAN Denglin, et al. Identification method of lithology by logging in favorable reservoir of lacustrine mixed rock——A case study of the small layer 2 of the upper part of the member 3 of Shahejie Formation in Dawangzhuang Oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2023, 37(4): 37-44.
- [23] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 四川盆地拔山寺向斜泰页1井页岩油气重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 21-32.
- HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Major breakthrough of shale oil and gas in Well Taiye 1 in Bashansi syncline in the Sichuan Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 21-32.
- [24] 徐田武, 张成富, 李红磊, 等. 不同环境下陆相页岩油气富集关键要素下限研究——以中原油田探区为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 721-728, 743.
- XU Tianwu, ZHANG Chengfu, LI Honglei, et al. Research on lower limits of key factor controlling hydrocarbon accumulation of continental shale in different environments: taking exploratory area of Zhongyuan Oilfield as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 721-728, 743.
- [25] 郭旭升, 赵永强, 张文涛, 等. 四川盆地元坝地区千佛崖组页岩油气富集特征与主控因素[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 749-757.
- GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, ZHANG Wentao, et al. Accumulation conditions and controlling factors for the enrichment of shale oil and gas in the Jurassic Qianfoya Formation, Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 749-757.
- [26] 曾花森, 霍秋立, 张晓畅, 等. 松辽盆地古龙页岩油赋存状态演化定量研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 80-90.
- ZENG Huasen, HUO Qiuli, ZHANG Xiaochang, et al. Quantitative analysis on occurrence evolution of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(3): 80-90.
- [27] 何文渊, 何海清, 王玉华, 等. 川东北地区平安1井侏罗系凉高山组页岩油重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 40-49.
- HE Wenyuan, HE Haiqing, WANG Yuhua, et al. Major breakthrough and significance of shale oil of the Jurassic Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1 in northeastern Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 40-49.
- [28] 彭军, 曾垚, 杨一茗, 等. 细粒沉积岩岩石分类及命名方案探讨[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 106-115.
- PENG Jun, ZENG Yao, YANG Yiming, et al. Discussion on classification and naming scheme of fine-grained sedimentary rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 106-115.
- [29] 郭旭升, 魏志红, 魏祥峰, 等. 四川盆地侏罗系陆相页岩油气富集条件及勘探方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 14-27.
- GUO Xusheng, WEI Zhihong, WEI Xiangfeng, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Jurassic continental shale oil and gas in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 14-27.
- [30] 刘雨林, 范凌霄, 房大志, 等. 源-储分类新方法在川东地区页岩气井产量分析中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 429-436.
- LIU Yulin, FAN Lingxiao, FANG Dazhi, et al. Application of a new source-reservoir classification method in production analysis of shale gas wells in Eastern Sichuan [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 429-436.

(编辑 张玉银)