

陆相页岩及其夹层储集特征对比与差异演化模式

胡宗全^{1,2,3}, 王濡岳^{1,2,3,4,5}, 路菁^{1,2,3}, 冯动军^{1,2,3}, 刘粤蛟⁴, 申宝剑^{1,2,3}, 刘忠宝^{1,2,3},
王冠平^{1,2,3}, 何建华⁵

(1. 页岩油气富集机理与高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. 重庆科技学院复杂油田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331;
5. 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059)

摘要:不同于海相页岩, 中国陆相页岩层系源-储配置与耦合关系复杂, 页岩与夹层储集特征差异显著, 明确其演化规律对陆相页岩油气的勘探具有重要指导意义。利用矿物组分、有机地球化学和物性资料, 结合岩心、薄片、扫描电镜观察分析, 对处于不同热演化程度的鄂尔多斯盆地三叠系延长组、四川盆地侏罗系自流井组和松辽盆地白垩系营城组陆相页岩开展系统研究。通过分析页岩层系内页岩与夹层的储集空间类型与物性特征, 探讨成岩-生烃协同作用下页岩与夹层孔隙形成演化过程, 建立了陆相页岩和夹层孔隙的差异演化模式。结果表明: ①中国陆相页岩岩相类型多样, 以混合质、黏土质和粉砂质页岩为主, 并常与碳酸盐岩、砂岩及凝灰岩等夹层频繁互层, 岩相组合类型复杂。页岩储集空间以无机孔为主, 有机孔次之, 局部发育微裂缝。夹层储集空间以残余粒间(溶)孔、粒内(溶)孔和微裂缝等无机孔缝为主。②陆相页岩及夹层孔隙演化受成岩-生烃作用共同控制, 页岩黏土矿物含量高、抗压实能力弱、生烃之前无机孔隙快速减少。进入生油窗后, 页岩有机孔、黏土粒间/晶间孔、溶蚀孔和微裂缝发育程度逐渐增加。晚成岩阶段之前, 以生油高峰为界, 页岩孔隙度具有先降后升的变化规律。夹层则在压实和胶结等作用下逐渐致密, 储集性逐渐变差。③延长组处于生油期, 有机孔发育程度低, 页岩储集条件差, 砂岩夹层页岩油富集条件更优; 自流井组处于成熟-高熟阶段, 油、气共存, 页岩有机、无机孔隙均较为发育, 页岩储集条件更优, 夹层主要为次要储层或隔层; 营城组已进入高熟-过熟阶段, 最利于页岩气和有机孔的形成, 页岩储集条件最优。

关键词:孔隙演化; 陆相页岩; 延长组; 自流井组; 营城组; 鄂尔多斯盆地; 四川盆地; 松辽盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Storage characteristic comparison of pores between lacustrine shales and their interbeds and differential evolutionary patterns

HU Zongquan^{1,2,3}, WANG Ruyue^{1,2,3,4,5}, LU Jing^{1,2,3}, FENG Dongjun^{1,2,3}, LIU Yuejiao⁴, SHEN Baojian^{1,2,3},
LIU Zhongbao^{1,2,3}, WANG Guanping^{1,2,3}, HE Jianhua⁵

(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. Chongqing Key Laboratory of Complex Oilfield Exploration and Development, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 5. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Unlike marine shales, lacustrine shale sequence in China exhibits intricate source rock-reservoir configuration and coupling relationships, as well as significantly different storage characteristics between shales and their interbeds. Therefore, it is necessary to ascertain the evolutionary patterns of shales and their interbeds, which will provide critical guidance on the exploration of lacustrine shale oil and gas. Using data on mineral compositions, organic geochemistry, and physical properties, as well as data from the analyses and observations of cores, thin sections, and scanning electron microscopy (SEM) images, we conduct a comprehensive study of the lacustrine shales in the Triassic

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-10-08。

第一作者简介: 胡宗全 (1971—), 男, 博士、教授级高级工程师, 沉积与油气储层、致密砂岩与页岩油气地质勘探。E-mail: huzongquan.syky@sinopec.com。

通信作者简介: 王濡岳 (1990—), 男, 博士、高级工程师, 非常规油气地质与油气勘探规划。E-mail: wry1990@vip.qq.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科技攻关项目 (P19017-2, P21078-9)。

Yanchang Formation of the Ordos Basin, the Jurassic Ziliujing Formation of the Sichuan Basin, and the Cretaceous Yingcheng Formation of the Songliao Basin, which vary in thermal evolution. By analyzing the storage space types and physical properties of shales and their interbeds in these formations, we explore the formation and evolutionary processes of pores in both shales and their interbeds and establish differential evolutionary patterns of the pores. The results are as follows: (1) The lacustrine shales in China are of diverse lithofacies types, primarily consisting of mixed, clayey, and silty shales, which tend to alternate with carbonate, sandstone, and tuff, suggesting complex lithofacies assemblages. The storage spaces in the shales are dominated by inorganic pores, followed by organic pores, with microfractures developed locally. In contrast, the storage spaces in the interbeds are dominated by inorganic pores such as residual intergranular (dissolved) pores, intragranular (dissolved) pores, and microfractures; (2) The evolution of pores in the lacustrine shales and their interbeds is influenced by both diagenesis and hydrocarbon generation. The shales, with high clay content and weak anti-compaction capacity, undergo a rapid decrease in inorganic pores before hydrocarbon generation. After entering the oil generation window, these shales experience a gradual increase in organic pores, clayey intergranular/intercrystalline pores, dissolved pores, and microfractures. Prior to the late diagenetic stage, the shale porosity tends to decrease before the peak oil generation and increase afterward. In contrast, the interbeds become increasingly tight under compaction and cementation, leading to a gradual decrease in their storage capacity; (3) The Yanchang Formation shale in the oil generation window, contains underdeveloped organic pores and thus exhibits poor storage capacity. In contrast, the sandstone interbeds in the formation present more favorable shale oil enrichment conditions. The Ziliujing Formation in the mature to highly mature stage, exhibits oil and gas coexistence, characterized by well-developed organic and inorganic pores in the shale, more favorable for storage, while the interbeds serve as secondary reservoirs or barriers. The Yingcheng Formation in the highly mature to overmature stage, is the most favorable for the formation of shale gas and organic pores, boasting the optimal storage conditions in shales.

Key words: porosity evolution, lacustrine shale, Yanchang Formation, Ziliujing Formation, Yingcheng Formation, Ordos Basin, Sichuan Basin, Songliao Basin

引用格式:胡宗全,王濡岳,路菁,等. 陆相页岩及其夹层储集特征对比与差异演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1393–1404. DOI: 10.11743/ogg20230605.

HU Zongquan, WANG Ruyue, LU Jing, et al. Storage characteristic comparison of pores between lacustrine shales and their interbeds and differential evolutionary patterns[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1393–1404. DOI: 10.11743/ogg20230605.

页岩油气革命扩展了油气资源领域,使页岩油气成为全球油气产量增长的重要组成部分。21世纪以来,美国在全球范围内掀起了一场“页岩革命”,并于2019年实现了能源独立。2021年,美国页岩油、气产量分别达 3.52×10^8 t和 7.572×10^8 m³,分别占当年美国原油和天然气产量的50%和81%,已成为美国油气产量的主要阵地^[1-2]。经过近年来的勘探开发实践,中国已成为继美国、加拿大之后第三个完全掌握页岩气勘探开发成套技术的国家。截至2022年底,中国页岩气产量达到 240×10^8 m³,累计探明页岩气地质储量 2.96×10^8 m³,页岩气已成为中国天然气储产量的重要增长点。目前中国页岩气产量绝大部分来自于海相页岩地层。

中国陆相盆地分布广泛,发育多套富有机质页岩层系,陆相页岩油气是未来重要的接替领域^[1-5]。目前,已在四川、鄂尔多斯、松辽和渤海湾等盆地等多个

地区的陆相页岩油气勘探中取得了重要的突破和发现,展示了中国陆相页岩油气巨大的勘探潜力^[3-4,6-13]。与海相页岩相比,陆相页岩与夹层频繁交互,岩相时空变化快,有机质含量较低,页岩及夹层储层非均质性强,页岩与夹层物性差异显著且演化过程复杂^[3-4,8],页岩油气有利富集层段评价优选难度大。为此,本文以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组、四川盆地侏罗统自流井组 and 松辽盆地梨树断陷下白垩统营城组陆相页岩层系为研究对象,系统分析了陆相页岩与夹层的储集空间类型与物性特征,探讨了成岩-生烃动态协同作用下页岩与夹层的孔隙形成演化特征及差异,最终建立了不同演化程度条件下陆相页岩和夹层的孔隙演化模式。研究成果对中国页岩层系常规-非常规一体化勘探与资源潜力评价、页岩油气甜点层段优选等方面具有理论意义和应用价值。

1 陆相含油气页岩层系基本地质特征

中国陆相沉积盆地普遍发育于二叠纪—新近纪,陆相富有机质页岩层位上主要分布于中—上二叠统、上三叠统、下侏罗统、白垩系和古近系,因不同时代不同地区发育不同的盆地原型,陆相页岩的发育和分布受沉积(微)相、古气候、古盐度、古生物、古生产率、有机质保存和物源条件等因素控制。陆相盆地富有机质页岩多以咸水—半咸水湖泊沉积环境为主,部分盆地为淡水湖泊,页岩层系厚度变化较大,从几十米到上千米均有分布,与海相页岩相比,具有时代新、盆地规模小、物源多、岩性杂、成烃生物组合复杂、演化程度低等特点^[4]。

中国陆相页岩岩相类型丰富,以鄂尔多斯盆地、四川盆地和松辽盆地为例,陆相富有机质页岩主要分布在三叠系、侏罗系和白垩系(图1a),页岩与碳酸盐岩及砂岩频繁互层,部分地区夹凝灰岩,岩相纵、横向相变快(图1b—d)。陆相页岩沉积环境类型多样,火山活动频繁、具有热液活动的咸水—半咸水湖泊沉积的页岩有机质含量普遍高于海相页岩,而淡水湖泊沉积的页岩有机质含量普遍低于海相页岩,陆相页岩有机质类型以Ⅱ₁—Ⅲ型为主,演化程度普遍较低,镜质体反射率(R_0)一般小于2.0%^[4]。中国典型盆地陆相页岩成熟度跨度区间相对较小,各盆地陆相页岩地质条件

存在明显的成岩演化阶段性差异。同时,由于陆相咸化湖盆页岩生烃演化过程与半咸水—淡水湖盆存在显著差异,导致不同咸化湖盆烃源岩生烃阶段的成熟度界线与半咸水—淡水湖盆存在差异^[11-12],难以进行有效对比。因此,本文选取岩相与有机质类型相似性高、可对比性较强且以微咸水—淡水湖盆沉积为主的鄂尔多斯盆地三叠系、四川盆地侏罗系和松辽盆地白垩系陆相页岩开展综合对比研究。

1.1 鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地上三叠统富有机质页岩主要发育于最大湖侵期的延长组7段(长7段)深湖微相。该套页岩沉积时期周缘火山活动强烈,古生产力高,为还原淡水环境。页岩层系岩性为半深湖—深湖相灰黑色页岩夹砂岩及凝灰岩,厚度分布于15~80 m,页岩总有机碳含量(TOC)分布于0.5%~38.0%,有机质类型多为Ⅱ₁型, R_0 分布在0.5%~1.2%。岩相主要有黏土质页岩、混合质页岩、粉砂质页岩夹细砂岩、粉砂岩、凝灰岩(图1b)。

1.2 四川盆地

四川盆地侏罗系自流井组可分为珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段和大安寨段,岩性及岩相组合横向变化大^[4,14]。以涪陵地区东岳庙段为例,岩性为页岩夹介壳纹层及薄层,地层厚30~80 m。页岩TOC分布于

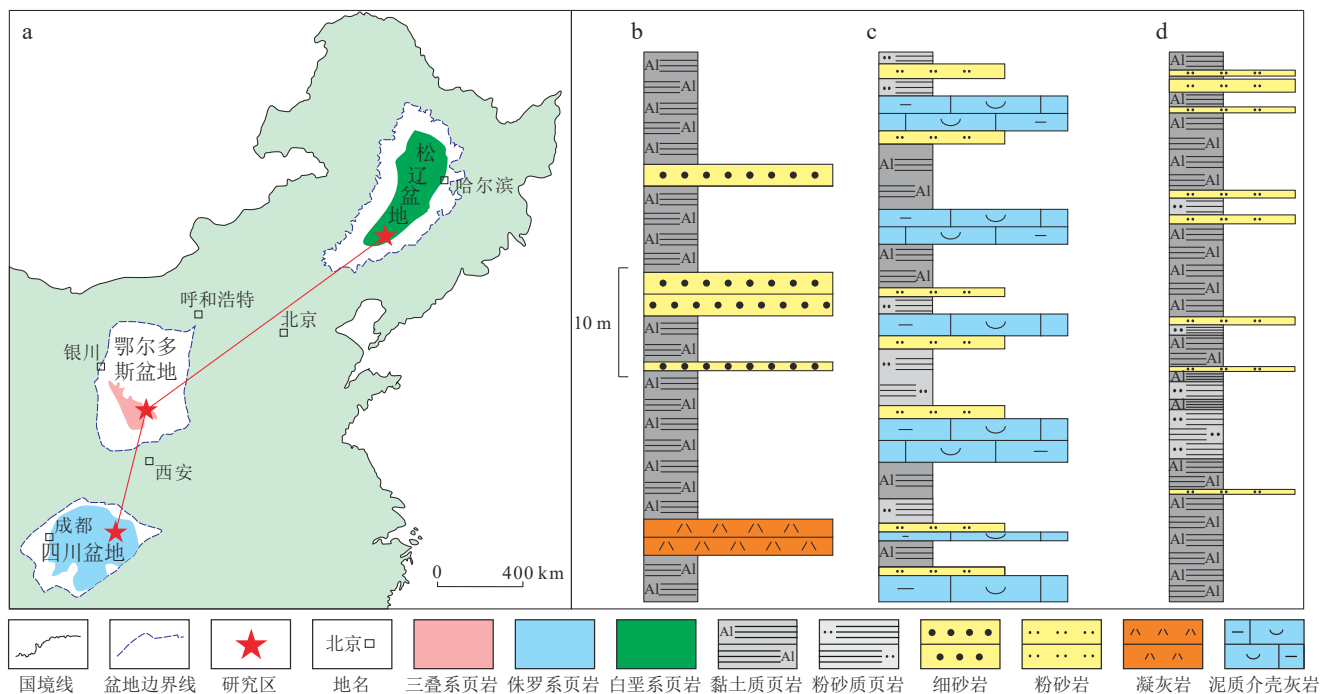


图1 中国三大盆地陆相富有机质页岩分布与岩相组合

Fig. 1 Distributions and lithofacies assemblages of lacustrine organic-rich shales in the Ordos, Sichuan, and Songliao basins, China

a. 三大盆地陆相页岩分布;b. 鄂尔多斯盆地JH37井延长组7段;c. 四川盆地YL303井自流井组大安寨段;d. 松辽盆地LY1井营城组一段

0.5%~2.2%,平均值为1.3%,显著低于海相五峰组-龙马溪组页岩(TOC 均值普遍大于2%);有机质类型变化较大^[15],从Ⅲ型至Ⅰ型均有分布,主体以Ⅱ₁-Ⅱ₂混合型为主,油气兼生; R_o 介于0.9%~1.8%,有机质处于成熟-高成熟演化阶段。岩相主要有黏土质页岩、粉砂质页岩、混合质页岩和黏土质粉砂岩夹介壳灰岩(图1c)。

1.3 松辽盆地

松辽盆地于早白垩世断陷期沉积了火石岭组、沙河子组、营城组和登娄库组4套烃源岩。梨树断陷是松辽盆地东南隆起区断陷持续时间最长、地层发育最齐全、沉积最厚、埋深最大、有机质演化程度较高的断陷。营城组发育半深湖-深湖相页岩,页岩厚度大,连续性好;干酪根以Ⅱ₂-Ⅲ混合型为主, R_o 介于1.3%~2.3%,已进入成熟-过成熟阶段。LY1井位于苏家屯次凹,营城组一段暗色泥岩厚度在200~250 m, TOC 介于0.4%~4.5%,平均值为2.0%, R_o 介于1.6%~2.1%。岩相主要有黏土质页岩、混合质页岩、粉砂质页岩夹粉砂岩(图1d)。

2 陆相页岩与夹层储集特征对比

2.1 储集空间

2.1.1 页岩储集空间类型

氩离子抛光-扫描电镜观察分析表明,陆相页岩中主要发育3大类7亚类孔隙(图2;表1)^[3-4]。其中,无机孔包括粒间(溶)孔、粒内(溶)孔和黏土矿物层间/晶间孔;有机孔可分为原地有机质(成烃生物)孔隙和迁移有机质(固体沥青)孔隙^[16];微裂缝则分为粒间微裂缝和层间微裂缝。

长7段、自流井组和营城组页岩岩相类型较为相似,均以混合质、黏土质和粉砂质页岩为主。鄂尔多斯盆地上三叠统长7段页岩孔隙类型主要以黏土矿物层间/晶间孔、黏土矿物与其他矿物之间的粒间孔为主^[4,9,17],长石和石英溶蚀孔中等发育,少量的迁移有机孔和微裂缝发育(图2a—c)。四川盆地侏罗统自流井组页岩孔隙类型主要以黏土矿物层间/晶间孔为主,发育少量有机孔,局部发育微裂缝(图2d—f)^[3-4]。松辽盆地白垩统营城组页岩无孔隙较有机孔更为发育,主要发育黏土矿物粒间孔、残留粒间孔和少量溶蚀孔,微裂缝发育程度较高(图2g—i),有机孔发育程度优于

延长组和自流井组页岩,但有机孔径较小,普遍小于50~100 nm。

整体上,随热演化程度的依次升高,3套陆相页岩有机孔发育程度逐渐增加;无机孔隙中,黏土矿物粒间/晶间孔和粒内(溶)孔发育程度逐渐升高;层间、粒间微裂缝发育程度也依次有所升高(表1)。

2.1.2 夹层储集空间类型

鄂尔多斯盆地长7段页岩层系中发育粉砂岩、细砂岩和凝灰岩3种夹层类型^[9,17-18]。页岩内夹层主要以细砂岩和粉砂岩为主,主要发育残余粒间孔、溶蚀孔、粒内孔和黏土矿物粒间孔,见少量微裂缝,储集空间以宏孔(孔径>50 nm)为主(图3a—c),直径4 μm以上的孔隙占总孔隙的70%以上。

四川盆地自流井组页岩层系中主要发育灰岩与砂岩两类夹层。灰岩类夹层以介壳灰岩和泥质介壳灰岩为主,岩石骨架由介壳组成,介壳呈密集、定向分布,主要成分为亮晶方解石。砂岩类夹层主要为粉-细砂岩和泥质粉-细砂岩,岩石骨架主要由石英颗粒组成,有少许长石、岩屑和云母类矿物,孔隙不发育(图3d—f)。

松辽盆地营城组一段页岩层系以厚层页岩为主,偶夹薄层型泥质粉砂岩夹层。夹层储集空间以残余粒间孔、溶蚀孔和微裂缝为主(图3g—i)。孔隙大小主要以介孔(孔径为2~50 nm)和宏孔为主,宏孔发育程度显著低于延长组砂岩夹层。

2.2 物性特征

2.2.1 三叠系延长组

鄂尔多斯盆地长7段页岩孔隙度主要分布在0.1%~5.8%,平均值为2.4%,孔隙度小于4%的样品占比超过85%,孔隙度大于4%的样品仅占13.6%。长7段页岩夹层物性显著优于页岩,粉砂岩和细砂岩夹层孔隙度主要分布在0.6%~12.2%,平均值为6.6%,孔隙度在8%以上样品占比达30%(图4a)。与页岩相比,延长组砂岩夹层储集空间与物性条件更优^[4,9],由于长7段处于生油窗内,石油比天然气对储层的要求更高,夹层比页岩更利于储集与富集液态烃。

2.2.2 侏罗系自流井组

四川盆地侏罗统自流井组富有机质页岩孔隙度主要分布在1.0%~8.4%,平均值为4.3%,孔隙度大

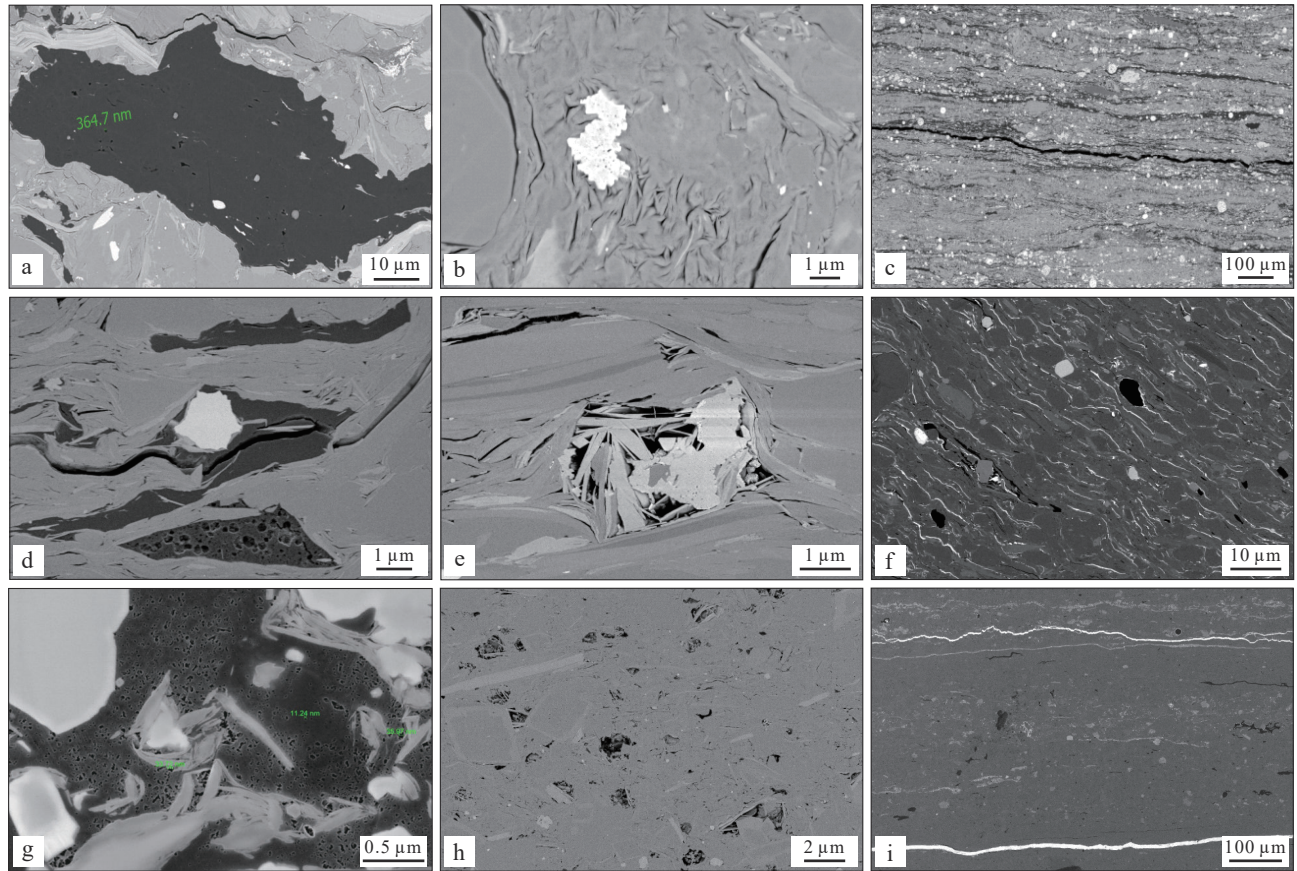


图2 陆相页岩主要储集空间扫描电镜微观特征照片

Fig. 2 SEM images showing the major storage spaces in lacustrine shales

a. 有机质内部有机孔发育程度普遍较低,延长组,JH60井,埋深1 260.35 m; b. 黏土矿物粒间孔、缝发育,延长组,LH3-2井,埋深926.62 m; c. 炭质页岩层理缝与层间微裂缝发育,JH75井,埋深1 276.40 m; d. 有机质内部有机孔发育程度差异大,总体发育程度低,固体沥青内有有机孔发育,自流井组大安寨段,FY1井,埋深2 600.50 m; e. 黏土矿物粒间孔等无机孔隙发育程度高,自流井组东岳庙段,YL4井,埋深4 004.70 m; f. 黏土质页岩微裂缝发育,熔融合金(图中高亮部分)注入显示裂缝连通性较好,自流井组大安寨段,XL101井,埋深2 154.80 m; g. 有机孔隙较为发育,营城组一段,LY1井,埋深3 212.30 m; h. 粒间孔等无机孔隙发育程度高,营城组一段,LY1井,埋深3 176.60 m; i. 熔融合金注入显示微裂缝发育程度较高,营城组一段,LY1井,埋深3 239.40 m (图中绿色数值为孔隙直径。)

表1 陆相页岩储集空间发育特征

Table 1 Characteristics of storage spaces in lacustrine shales

孔隙类型	孔隙发育程度		
	延长组	自流井组	营城组
无机孔	粒间(溶)孔	中等-高	中等
	粒内(溶)孔	低-中等	中等-高
	黏土矿物层间/晶间孔	中等-高	高
有机孔	原地有机孔	低	低
	迁移有机孔	低	低-中等
微裂缝	粒间微裂缝	低-中等	中等-高
	层间微裂缝	中等	高

注:基于镜下观察统计的孔隙发育程度与其占总孔隙比例对应关系为高(>25%)、中(10%~25%)和低(<10%)。

于4%样品占比达55%,页岩物性总体较好(图4b)。自流井组页岩层系夹层发育介壳灰岩、粉-细砂岩两类,总体以介壳灰岩为主,砂岩发育较为局限。介壳灰岩夹层的孔隙度总体较低,孔隙度介于0.2%~4.4%,平均值仅为1.9%,80%以上样品孔隙度均小于2%,夹层储集性能明显差于相邻页岩(图4b),夹层主要发挥次要储层或隔夹层作用^[3-4]。

2.2.3 白垩系营城组

松辽盆地梨树断陷白垩系营城组一段页岩孔隙度介于0.8%~8.3%,平均为4.5%,80%以上样品孔隙度大于4%,页岩物性总体较好(图4c),显著优于三叠系延长组与自流井组页岩。营城组一段粉砂岩夹层孔隙度介于1.9%~6.6%,平均为3.4%,夹层物性较页岩

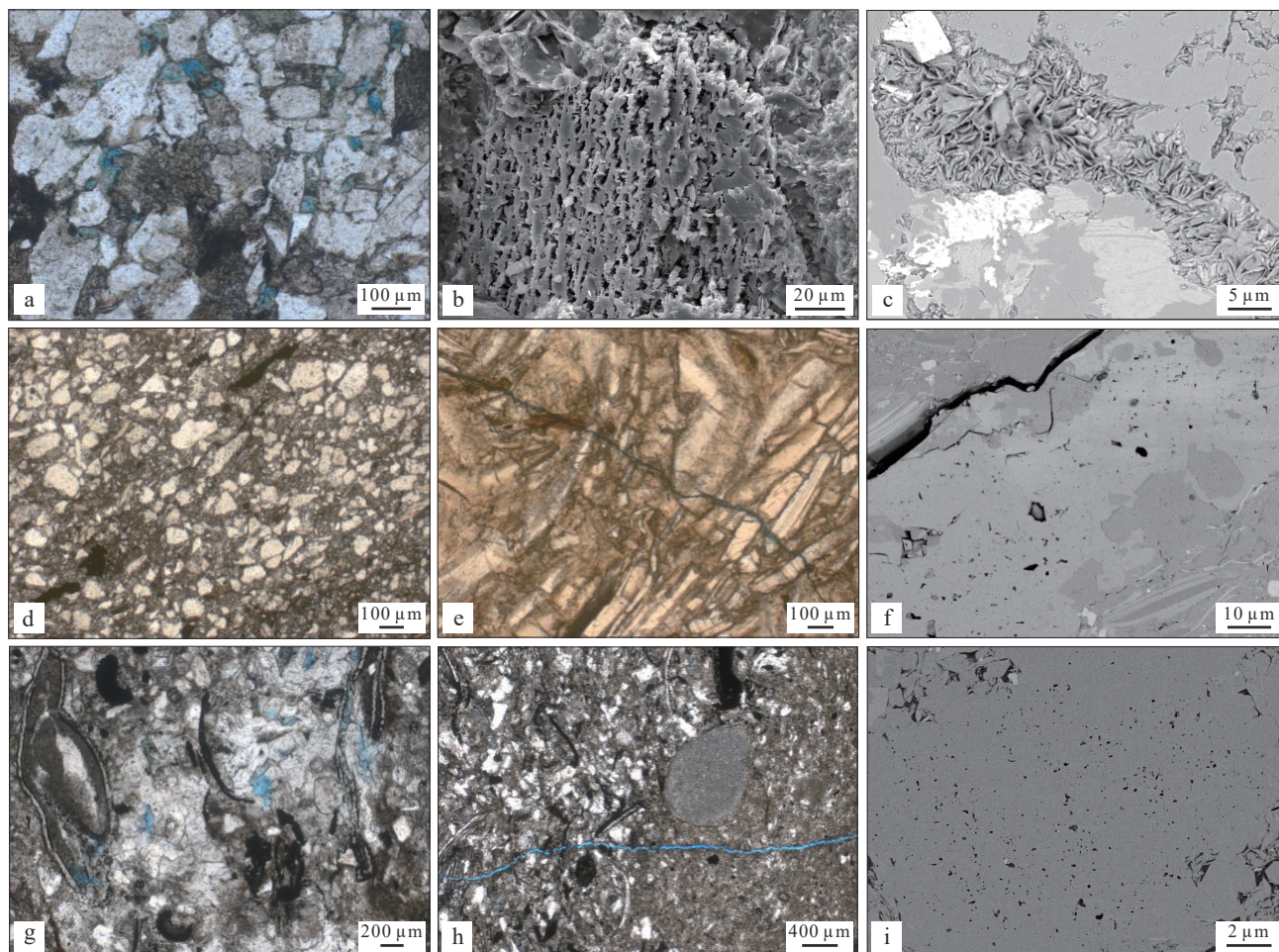


图3 陆相页岩夹层主要储集空间类型显微照片

Fig. 3 SEM images showing the primary storage space types of interbeds in lacustrine shales

a. 粉-细砂岩残余粒间孔与粒间溶孔, 延长组, LH5井, 单偏光, 埋深753.4 m; b. 细砂岩长石溶蚀孔, 延长组, BY2井, SEM, 埋深1472.1 m; c. 细砂岩绿泥石晶间孔, 延长组, FY1H井, SEM, 埋深608.4 m; d. 泥质细砂岩孔隙发育程度低, 自流井组东岳庙段, YL4井, 单偏光, 埋深4020.7 m; e. 介壳灰岩孔隙发育程度低, 微裂缝少量发育, 自流井组东岳庙段, XL101井, 单偏光, 埋深2271.2 m; f. 介壳内方解石溶孔, 自流井组大安寨段, YL4井, SEM, 埋深3785.4 m; g. 粉砂岩夹层生屑残余粒间孔, 营城组, LY1井, 单偏光, 埋深3304.1 m; h. 粉砂岩夹层内微裂缝, 营城组, S2井, 单偏光, 埋深3290.7 m; i. 粉砂岩夹层碳酸盐矿物粒内溶孔, 营城组, LY1井, SEM, 埋深3301.1 m

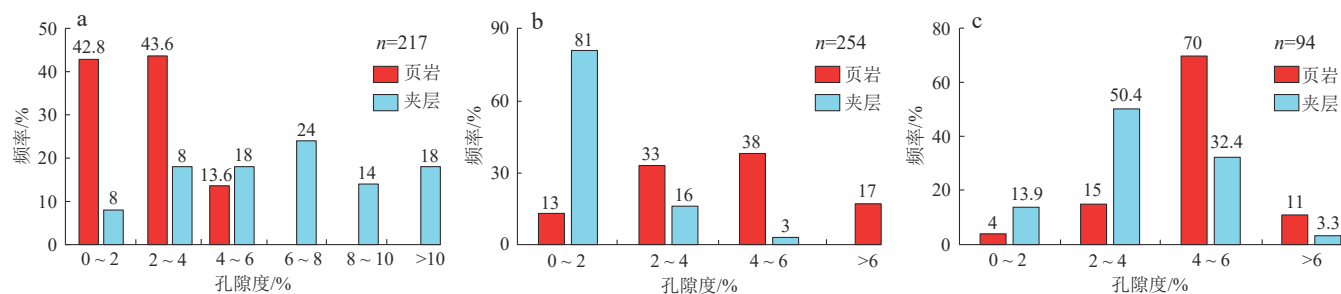


图4 中国三大盆地陆相页岩层系内页岩与夹层孔隙度频率分布直方图

Fig. 4 Porosity distributions in shales and interbeds in lacustrine shale sequence across the Ordos, Sichuan, and Songliao basins, China

a. 鄂尔多斯盆地延长组; b. 四川盆地自流井组; c. 松辽盆地营城组一段

岩差(图4c),与自流井组页岩和夹层物性关系类似,与延长组页岩和夹层物性关系则差异显著(图4),表

明在中成岩晚期—晚成岩阶段页岩物性有所改善,夹层物性逐渐转差。

3 陆相页岩与夹层差异演化规律

3.1 成岩作用与孔隙演化

延长组、自流井组和营城组陆相页岩层系中,页岩和夹层储层物性存在明显差异性,表现为自流井组和营城组页岩储集物性优于介壳灰岩与砂岩夹层,而延长组砂岩夹层储集物性明显优于页岩。造成这种差异的主要原因有两点:①沉积环境的不同造成页岩与夹层的原始沉积成分和结构的差异;②后期埋藏成岩演化过程中页岩与夹层孔隙演化规律的差异。后者对陆相页岩与夹层差异演化具有更为重要的影响。

陆相页岩层系是一个源-储共生系统,在埋藏过程中经历了压实、胶结、交代、黏土矿物转化等成岩作用和生烃演化过程,成岩-生烃演化过程控制了页岩及其夹层的孔隙演化(图5)。压实作用贯穿整个成岩过程,尤其在成岩作用早期和中-浅埋藏阶段,是造成储层孔隙降低的最主要因素。胶结作用也是造成页岩和夹层孔隙降低的重要成岩作用,不同于海相五峰组-龙马溪组页岩富含生物石英^[19-20],陆相页岩及其夹层硅质胶结较少,总体以黏土矿物和方解石胶结为主^[8,21-22]。交代作用对页岩储层孔隙演化的控制作用不明显,通常表现为硅质矿物交代不稳定矿物,一定程度上有利于刚性格架的形成与页岩脆性的增加^[8,21]。陆相页岩富含黏土矿物,黏土矿物转化是影响页岩孔隙演化的重要因素。随着埋藏深度的增加和温度、压力的上升,黏土矿物由高岭石、伊/蒙混层逐渐向伊利石和绿泥石的转化能够促进无机孔隙的发育^[19-20,23](图5)。在深埋藏、高演化和油气形成保存阶段,生烃作用对陆相页岩层系的储层孔隙形成和保持发挥重要作用,有机质进入生油期后,液态烃的充注有利于烃类的滞留与孔隙的保持,有机质演化中生成的有机酸促进了溶蚀孔隙的发育^[19-21,24]。

结合岩心样品分析与测井资料解释,对鄂尔多斯、四川和松辽3个盆地不同成熟度与埋深地区的典型井陆相页岩与夹层物性进行了统计分析(表2)。长7段页岩 R_v 由0.8%增加到生油高峰的0.9%^[25]并进一步增加到1.1%的过程中,页岩孔隙度由3.4%降至2.8%再回升至3.6%,存在先降后升的现象。页岩生油阶段及期间孔隙的形成过程中,普遍存在液态烃在源内的滞留现象^[26],页岩中有机质较强的吸附能力使早期可动性较低的液态烃滞留在有机孔内,使常规方法测量的页岩孔隙度降低(表2;图5)。结合成

岩-生烃作用综合分析,认为生油高峰前压实作用较强,有机质生烃增压强度和低熟页岩油可动性均较低,导致页岩物性(有效孔隙度)仍存在持续降低现象(图5)。而后,随着有机质进一步演化与压实作用影响逐渐减弱、生烃增压作用的增强和页岩油可动性的增加,成岩-生烃作用影响下的页岩有机无机孔隙发育程度增强,页岩物性逐渐变好^[19-21,24]。砂岩夹层孔隙度则具有单调递减的变化规律,即随着成岩演化与埋深的增加,夹层孔隙度逐渐降低(表2;图5)。在湿气-凝析气阶段,有机质与液态烃的裂解生气促进了固体沥青内有机孔的发育,四川盆地自流井组的 R_v 由1.4%,1.6%向1.8%增加的过程中,页岩的孔隙度有所升高而夹层孔隙度有所降低。松辽盆地营城组 R_v 由1.6%,1.8%向2.0%增加的过程中,营城组夹层的孔隙度进一步降低,但降幅较小且趋于缓慢,说明夹层已很致密,营城组页岩的孔隙度也有微弱的降低趋势,可能的原因是陆相页岩黏土矿物含量较高,应力敏感性强,脆性和抗压实能力明显差于海相硅质页岩^[8,27-29]。受埋深与压实作用影响,四川盆地YL4井、松辽盆地梨树断陷LS2井和LS2-1井页岩埋深已达3 800~4 400 m,导致深层页岩物性较中-浅层略微有所降低(表2)。

3.2 陆相页岩及夹层差异演化模式

以鄂尔多斯盆地南部延长组、四川盆地涪陵与元坝地区自流井组及松辽盆地梨树断陷营城组页岩层系埋藏史、生烃史及成岩演化史为基础,结合三大盆地目的层段页岩与夹层储层物性,利用三元线性拟合方法^[31]结合热演化模拟实验,分析页岩无机孔隙与有机孔隙发育特征与演化规律,开展了陆相页岩层系孔隙演化特征对比分析,建立了页岩与夹层成岩-生烃作用控制下的孔隙演化模式(图5)。

鄂尔多斯盆地延长组页岩层系总体表现为砂岩等夹层物性明显优于页岩(表2)。延长组最大古埋深较浅(约3 000 m)^[32-33],有机质成熟度相对较低, R_v 主体介于0.5%~1.2%,有机质处于生油期,有机孔发育程度较低,页岩储集条件较差(图2a—c,图4),成岩阶段主体达到中成岩A期。由于压实和胶结作用相对较弱,砂岩夹层保持了一定的原生孔隙,并经历了一定的溶蚀改造和构造破裂作用,使砂岩夹层具有较好的储集条件(图3a—c,图4,图5)。

四川盆地自流井组页岩层系总体表现为页岩储层条件明显优于夹层(表2)。自流井组最大古埋深可达5 000~6 000 m, R_v 主体介于1.3%~1.8%^[4,8,21,34],成

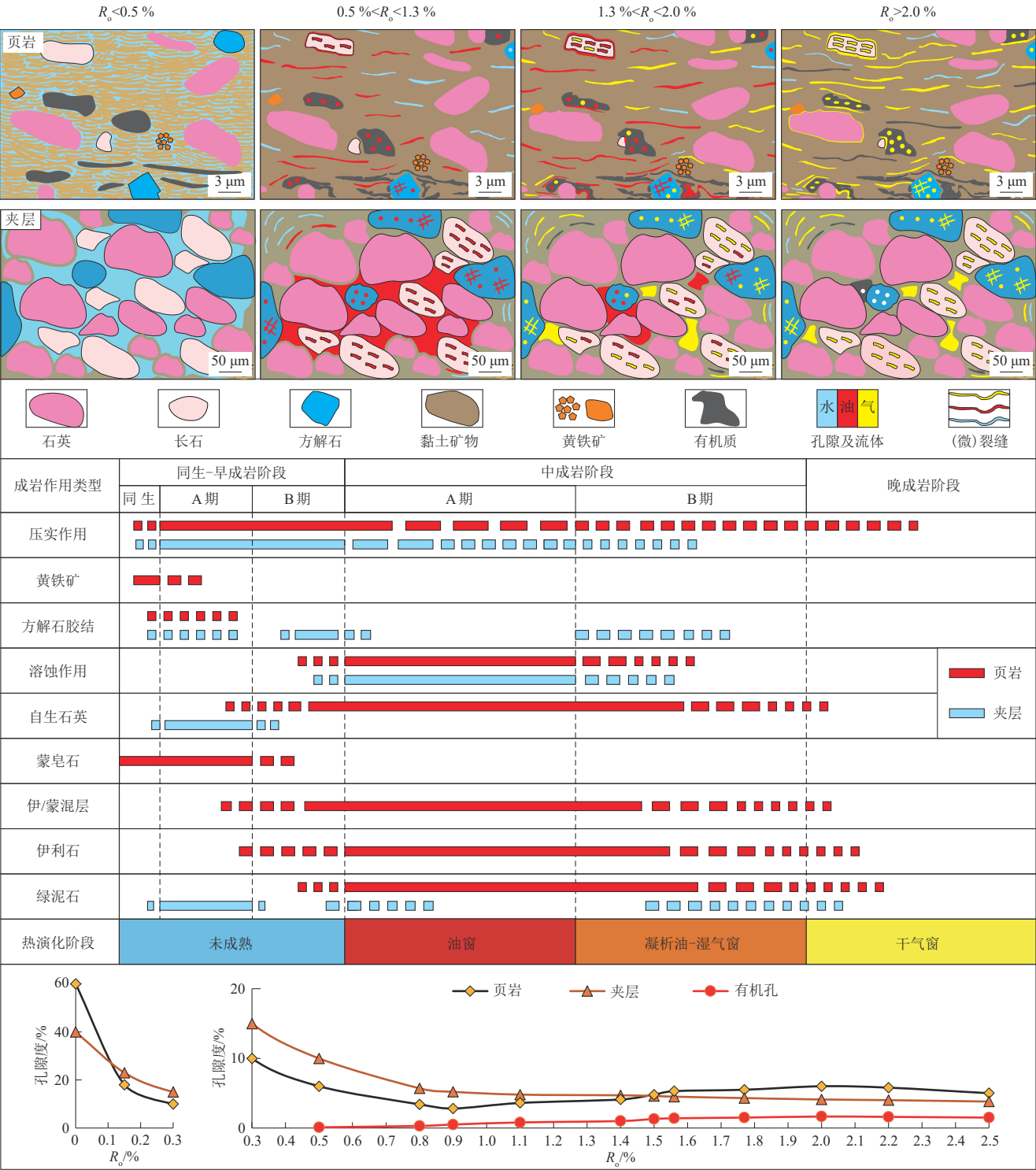


图5 成岩-生烃作用控制下的陆相页岩及夹层差异演化模式(据文献[19-24,30]修改)

Fig. 5 Differential evolutionary patterns of pores in lacustrine shales and their interbeds under the influence of both diagenesis and hydrocarbon generation (modified after references [19-24,30])

岩阶段总体进入中成岩阶段B期^[4,8,21],黏土矿物的进一步转化使黏土矿物层间/粒间孔缝成为页岩主要储集空间。在埋藏成岩过程中,随着热演化程度的不断升高,尤其是进入高成熟阶段($R_o>1.3\%$)后,有机孔逐渐发育,对页岩总孔隙度的贡献逐渐增加^[4,19-21,35-36]。由于

自流井组陆相页岩TOC较低,有机酸生成量相对较少,难以对夹层进行充分的溶蚀改造,加之夹层致密的原始结构,造成砂岩和介壳灰岩夹层在成岩过程中进一步致密化,夹层的储集条件明显差于页岩(表2;图5)。松辽盆地梨树断陷营城组页岩层系总体表现为

表2 典型陆相页岩层系地球化学参数与储层物性变化规律统计

Table 2 Statistics of geochemical parameters and reservoir physical properties of typical lacustrine shale sequence

地区	层系	典型井	埋深/m	页岩地化特征		页岩孔隙度/%		夹层孔隙度/%	
				TOC/%	R_o /%	分布范围	平均值	分布范围	平均值
鄂尔多斯盆地	三叠系延长组	总体	600~3 000	0.5~38.0	0.5~1.2	1.4~7.1	3.3	1.4~11.7	5.0
		R203井	650	0.5~7.5	0.8	1.5~4.2	3.4	1.5~11.7	5.7
		B2井	1 450	0.6~22.9	0.9	1.4~6.2	2.8	1.4~6.2	5.0
		CY1井	2 050	0.6~32.3	1.1	1.6~7.1	3.6	0.6~8.0	4.6
四川盆地	侏罗系自流井组	总体	1 500~4 000	0.4~4.0	0.9~1.8	1.0~8.4	4.3	0.2~4.4	1.9
		XL101井	2 200	1.4~2.9	1.4	1.3~8.2	4.2	1.4~4.4	2.5
		FY10井	2 800	0.4~4.0	1.6	1.6~7.7	5.2	0.8~4.7	2.0
		YL4井	3 800	0.4~3.6	1.8	1.1~8.3	5.1	0.8~4.1	1.9
松辽盆地梨树断陷	白垩系营城组一段	总体	2 500~5 000	0.3~4.9	1.3~2.3	0.8~8.3	4.5	1.9~6.6	3.4
		LY1井	3 300	0.7~4.9	1.6	0.8~8.3	4.8	2.3~6.6	3.5
		LS2井	3 900	0.3~3.8	1.8	2.3~7.7	4.6	1.9~6.4	3.4
		LS2-1井	4 400	0.3~1.8	2.0	1.7~6.3	4.0	2.4~5.6	3.2

页岩储层优于粉砂岩夹层(表2)。与四川盆地自流井组相比,其盆地古地温梯度更高^[37-38],页岩热演化程度更高,更利于有机孔的发育,有机孔对总孔隙度贡献更大。同时,由于梨树断陷白垩系营城组年代较侏罗系自流井组新,最大古埋深总体位于4 000~5 000 m^[39],浅于四川盆地侏罗系,因此虽然其热演化程度更高,但其储层压实与致密化程度总体低于自流井组,夹层物性保持程度较好,但总体不及页岩(表2;图5)。

整体上,较高的黏土矿物含量使陆相页岩具有抗压能力弱、生烃期之前无机孔隙快速减少等特点。生烃演化阶段进入生油窗后,有机孔、黏土粒间/晶间孔、溶蚀孔和微裂缝发育程度及其在总孔隙中占比逐渐增加。达到生油高峰($R_o=0.9\%$)前,压实作用较强,有机质生烃增压强度和低熟页岩油可动性均较低,页岩物性(有效孔隙度)仍持续降低(图5)。生油高峰至晚成岩阶段之前($0.9\%<R_o<2.0\%$),压实作用影响逐渐减弱,成岩-生烃作用影响下页岩有机和无机孔隙发育程度增强,页岩物性逐渐变好。三大盆地的差异性主要体现在页岩有机质成熟度和成岩演化阶段的不同所导致的有机孔、黏土矿物孔和溶蚀孔发育程度的不同。延长组处于成熟阶段,以生油为主,有机孔发育程度低,页岩储层条件差,砂岩夹层的页岩油富集条件更优;四川盆地自流井组处于成熟-高成熟阶段早期,油、气共存,页岩中有机、无机孔隙均较为发育,页岩储层条件较好,夹层主要为次要储层或隔层;松辽盆地梨树断陷营城组已进入高-过成熟阶段,更有利于页岩气和

有机孔的形成,页岩储层条件最好,粉砂岩夹层受沉积环境与成岩演化作用影响,储集性较差。

4 结论

1) 中国陆相页岩具有时代新、盆地规模小、物源多、岩相及其组合类型复杂、热演化程度低等特点。陆相页岩以混合质、黏土质和粉砂质页岩为主,并常与碳酸盐岩、砂岩及凝灰岩等夹层频繁互层,源-储配置与耦合关系复杂。以鄂尔多斯、四川、松辽盆地为代表的陆相页岩储集空间以无机孔为主,有机孔次之,局部发育微裂缝。夹层储集空间以残余粒间(溶)孔、粒内(溶)孔和微裂缝等无机孔缝为主。

2) 陆相页岩及夹层孔隙演化受成岩-生烃作用共同控制,较高的黏土矿物含量使页岩整体具有抗压能力弱、生烃期之前无机孔隙快速减少等特点。进入生油窗后,页岩有机孔、黏土粒间/晶间孔、溶蚀孔和微裂缝发育程度逐渐增加;达到生油高峰前,受压实作用、生烃增压强度与低熟油可动性影响,页岩有效孔隙度持续降低;生油高峰至晚成岩阶段之前,压实作用影响逐渐减弱,成岩-生烃作用影响下页岩物性逐渐变好。夹层演化规律则相对单一,在压实和胶结等作用下逐渐致密,物性与储集条件逐渐变差。

3) 延长组处于生油期,有机孔发育程度低,页岩储集条件差,砂岩夹层页岩油富集条件更优。自流井组处于成熟-高熟阶段($1.3\%<R_o<1.8\%$),油、气共存,页岩有机和无机孔隙均较为发育,页岩储集条件更

优,夹层主要为次要储层或隔层。营城组已进入高熟-过熟阶段($1.6\% < R_o < 2.3\%$),最利于页岩气和有机孔的形成,页岩储集条件最优,粉砂岩夹层受沉积环境与成岩作用共同影响,储集条件较差。

5 展望

陆相页岩层系具有页岩和夹层频繁交互的特征,其中页岩是生烃主体,页岩和夹层共同组成储集系统,宏观上具有源-储一体的特征,但是随着研究尺度的减小,页岩层系会出现源与储的分离。页岩层系中的源-储耦合关系、尤其是储集空间是以页岩占主导还是夹层占主导是一个基础性、关键性的地质认识问题,在分析不同地区、不同层系的陆相页岩油气形成和富集条件时至关重要。

陆相页岩的源-储耦合问题随着沉积时代、埋藏深度和演化程度的升高而呈现出规律性的变化,即有机生烃、无机成岩过程的时-空耦合关系既控制页岩的生烃相态和生烃潜力,也控制以无机孔为主的夹层物性,还控制着页岩中有机孔和无机孔的发育程度和配比关系。总体来说,在生油阶段,页岩层系内粗粒度夹层物性高于页岩,夹层更有利于富集和产出页岩油。随着热演化程度增高到生气高峰,页岩中有机与无机孔更为发育,有利于富集更严格意义上的“页岩”气,夹层则在成岩作用下逐渐致密化。中国含油气盆地陆相富有机质页岩层系分布广泛,如四川盆地三叠系须家河组、鄂尔多斯盆地上古生界、准噶尔盆地石炭系、二叠系和侏罗系、塔里木盆地三叠系和侏罗系、渤海湾盆地古近系、松辽盆地中生界均具备陆相页岩气的发育条件,值得在未来进一步加强评价研究与勘探力度。

选区评价中,应综合选取生气潜力大、页岩储集条件好、岩相组合可压性好、保存条件良好且地层超压、后期整体抬升幅度适中而使页岩埋深较浅的地区。在上述选区原则指导下,已在松辽盆地南部梨树断陷营城组实现陆相页岩气工业气流突破,建议持续加强勘探开发攻关力度以形成学习曲线,提升陆相页岩气勘探开发效果和经济效益,以“点”上突破示范引领陆相页岩气的“面”上展开和储量产量的规模增长。

致谢:成文中得到了中国石化勘探分公司、江汉油田分公司、西南油气分公司、华北油气分公司、东北油气分公司的协助和支持,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

[1] 郭旭升,胡东风,李宇平,等.海相和湖相页岩气富集机理分

析与思考:以四川盆地龙马溪组 and 自流井组大安寨段为例[J].地学前缘,2016,23(2):18-28.

GUO Xusheng, HU Dongfeng, LI Yuping, et al. Analyses and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas: A case study in shales of Longmaxi Formation and Da'anzhai Section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 18-28.

[2] 邹才能,朱如凯,董大忠,等.页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J].石油学报,2022,43(12):1675-1686.

ZOU Caineng, ZHU Rukai, DONG Dazhong, et al. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1675-1686.

[3] 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.

[4] 胡宗全,刘光祥.中国陆相页岩气富集规律与评价技术[M].北京:地质出版社,2021.

HU Zongquan, LIU Guangxiang. Enrichment regularity and evaluation technology of lacustrine shale gas in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.

[5] 胡宗全,杜伟,刘忠宝,等.页岩气源储耦合机理及其应用[M].北京:地质出版社,2018.

HU Zongquan, DU Wei, LIU Zhongbao, et al. Coupling mechanism of shale gas source and reservoir and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.

[6] 姚红生,云露,笱灵,等.苏北盆地溱潼凹陷阜二段断块型页岩油定向井开发模式及实践[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):141-151.

YAO Hongsheng, YUN Lu, ZAN Ling, et al. Development mode and practice of fault-block oriented shale oil well in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 141-151.

[7] 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 Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 212-223.

[8] 王濡岳,胡宗全,赖富强,等.川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素[J].石油与天然气地质,2023,44(2):366-378.

WANG Ruyue, HU Zongquan, LAI Fuqiang, et al. Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44

- (2): 366–378.
- [9] WANG Ruyue, WANG Guanping, ZHAO Gang, et al. Geological characteristics and resources potential of shale oil in Chang 7 Member of Upper Triassic Yanchang Formation in Fuxian area, southern Ordos Basin, western China[J]. *Unconventional Resources*, 2023, 3: 237–247.
- [10] 何文渊, 冯子辉, 张金友, 等. 松辽盆地北部古龙凹陷古页8HC井地质剖面特征[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(1): 1–9.
- HE Wenyuan, FENG Zihui, ZHANG Jinyou, et al. Characteristics of geological section of Well-GY8HC in Gulong Sag, Northern Songliao Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1): 1–9.
- [11] 张林峰, 张守春, 黄开权, 等. 半咸水湖相未熟油成因机理模拟实验研究[J]. *科学通报*, 1999, 44(4): 361–368.
- ZHANG Linye, ZHANG Shouchun, HUANG Kaiquan, et al. Simulation experiment on genetic mechanism of immature oil in semi-saline water lacustrine source rock [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(4): 361–368.
- [12] 石亚军. 晚期构造运动对柴达木盆地西部地区古近系咸化湖盆油气成藏的影响[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- SHI Yajun. The late tectonic movement affects hydrocarbon reservoir of Paleogene saline lacustrine lake deposit in the western Qaidam Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [13] HU Tao, WU Guanyun, XU Zhi, et al. Potential resources of conventional, tight, and shale oil and gas from Paleogene Wenchang Formation source rocks in the Huizhou Depression[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2022, 6(5): 402–414.
- [14] PENG Junwen, HU Zongquan, FENG Dongjun, et al. Sedimentology and sequence stratigraphy of lacustrine deep-water fine-grained sedimentary rocks: The Lower Jurassic Dongyuemiao Formation in the Sichuan Basin, Western China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 146: 105933.
- [15] PENG Junwen, HU Zongquan, FENG Dongjun, et al. Variations of organic matter content and type within the sequence stratigraphic framework of the lacustrine deep-water Dongyuemiao Formation, Sichuan Basin, Western China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 149: 106104.
- [16] 胡宗全, 杜伟, 彭勇民, 等. 页岩微观孔隙特征及源-储关系——以川东南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 1001–1008.
- HU Zongquan, DU Wei, PENG Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale—A case study from the Wufeng and Longmaxi formations in Southeast Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 1001–1008.
- [17] WANG Guanping, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Geological controls on the pore system of lacustrine unconventional shale reservoirs: The Triassic Chang 7 member in the Ordos Basin, China [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 221: 111139.
- [18] WANG Guanping, JIN Zhijun, LIU Guangxiang, et al. Pore system of the multiple lithofacies reservoirs in unconventional lacustrine shale oil formation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 273: 104270.
- [19] 王濡岳, 胡宗全, 龙胜祥, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 353–364.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LONG Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 353–364.
- [20] 王濡岳, 胡宗全, 包汉勇, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩关键矿物成岩演化及其控储作用[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(6): 996–1005.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, BAO Hanyong, et al. Diagenetic evolution of key minerals and its controls on reservoir quality of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale of Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(6): 996–1005.
- [21] 朱毅秀, 金振奎, 金科, 等. 中国陆相湖盆细粒沉积岩岩石学特征及成岩演化表征——以四川盆地元坝地区下侏罗统大安寨段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 494–508.
- ZHU Yixiu, JIN Zhenkui, JIN Ke, et al. Petrologic features and diagenetic evolution of fine-grained sedimentary rocks in continental lacustrine basins: A case study on the Lower Jurassic Da'anzhai Member of Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 494–508.
- [22] 李向军, 罗静兰, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩系孔隙特征及其演化规律[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(4): 19–28.
- LI Xiangjun, LUO Jinglan, LUO Xiaorong, et al. Pore characteristics and evolution of the Chang 7 mud shale in Ordos Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2017, 36(4): 19–28.
- [23] 赵杏媛, 何东博. 黏土矿物与页岩气[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(6): 643–647.
- ZHAO Xingyuan, HE Dongbo. Clay minerals and shale gas [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(6): 643–647.
- [24] FU Qiang, HU Zongquan, QIN Tingting, et al. Diagenesis and pore formation evolution of continental shale in the Da'anzhai Lower Jurassic section in the Sichuan Basin [J]. *Minerals*, 2023, 13(4): 535.
- [25] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 116–127.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, et al. Lacustrine medium-high maturity shale oil in onshore China: Enrichment conditions and occurrence features [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 116–127.
- [26] ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 563–572.
- [27] 王濡岳, 胡宗全, 刘敬寿, 等. 中国南方海相与陆相页岩裂缝发育特征及主控因素对比——以黔北岑巩地区下寒武统为例

- [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 631-640.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LIU Jingshou, et al. Comparative analysis of characteristics and controlling factors of fractures in marine and continental shales: A case study of the Lower Cambrian in Cengong area, northern Guizhou Province[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 631-640.
- [28] 胡宗全, 朱彤, 杜伟, 等. 细粒沉积研究与页岩岩相编图[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- HU Zongquan, ZHU Tong, DU Wei, et al. Fine-grained sedimentary research and shale petrographic mapping[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [29] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, ZHOU Tong, et al. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [30] 胡文瑄, 姚素平, 陆现彩, 等. 典型陆相页岩油层系成岩过程中有机质演化对储集性的影响[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 947-956, 1047.
- HU Wenxuan, YAO Suping, LU Xiancai, et al. Effects of organic matter evolution on oil reservoir property during diagenesis of typical continental shale sequences[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 947-956, 1047.
- [31] 曾韬, 俞凌杰, 夏文谦, 等. 元坝地区吴家坪组沉凝灰岩及凝灰质泥岩储层微观孔隙结构特征研究[J]. 矿物岩石, 2022, 42(4): 83-93.
- ZENG Tao, YU Lingjie, XIA Wenqian, et al. Pore structure characteristics of tuff and tuffaceous mud-stone reservoirs in Wujiaping Formation, Yuanba area[J]. Mineralogy and Petrology, 2022, 42(4): 83-93.
- [32] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(S1): 23-32.
- REN Zhanli, ZHANG Sheng, GAO Shengli, et al. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2007, 37(S1): 23-32.
- [33] 田涛, 任战利, 韩伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组埋藏史、成藏期次与致密油储层演化关系[J]. 地质论评, 2013, 59(S1): 1261-1262.
- TIAN Tao, REN Zhanli, HAN Wei, et al. Relationship between burial history, accumulation periods, and evolution of tight sandstone reservoirs in the Yanchang Formation of the Ordos Basin[J]. Geological Review, 2013, 59(S1): 1261-1262.
- [34] 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.
- [35] 孔祥晔, 曾溅辉, 罗群, 等. 川中地区大安寨段陆相页岩岩相对孔隙结构的控制作用[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(4): 392-403.
- KONG Xiangye, ZENG Jianhui, LUO Qun, et al. Controls of continental shale lithofacies on pore structure of Jurassic Da'anzhai member in central Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(4): 392-403.
- [36] 周永, 吴伟, 张琳, 等. 基于热模拟的页岩矿物及孔隙演化特征研究——以东营凹陷利页1井沙三下亚段为例[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(6): 49-56.
- ZHOU Yong, WU Wei, ZHANG Lin, et al. Evolution characteristics of shale minerals and pores based on thermal simulation—by taking the lower Es3 member of Shahejie Formation in Well Liye 1 of Dongying Sag an example[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2022, 36(6): 49-56.
- [37] 刘耀光. 松辽盆地地热场特征与油气勘探的关系[J]. 石油勘探与开发, 1982, 9(3): 26-31.
- LIU Yaoguang. Relationship between characteristic of geothermal field and hydrocarbon occurrence in Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1982, 9(3): 26-31.
- [38] 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1052-1060.
- XU Ming, ZHU Chuanqing, TIAN Yuntao, et al. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 1052-1060.
- [39] 李洪波, 张敏, 李红磊. 松南地区梨树断陷深层油气成藏历史分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(6): 839-846.
- LI Hongbo, ZHANG Min, LI Honglei. History of hydrocarbon accumulations in the deep of the Lishu fault depression, southern Songliao Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(6): 839-846.

(编辑 张玉银)