

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

朱毅秀^{1,2},金振奎^{1,2},金科³,郭芪恒^{1,2},王欢^{1,2},吕品^{1,2},王昕尧^{1,2},师源^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

3. 中国石油 辽河油田公司 勘探开发研究院,辽宁 盘锦 124010]

摘要:采用岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜和X射线衍射分析对四川盆地元坝地区下侏罗统大安寨段湖相细粒岩岩性及成岩作用特征进行了描述,探讨了有利岩石类型及成因。本段发育泥岩类(泥岩与页岩)、粉砂岩和灰岩3大类岩石,具体为泥岩与页岩、灰质泥岩,以及介壳页岩和介壳灰岩;矿物组分主要为石英、粘土矿物、方解石、长石和黄铁矿;粘土矿物包括伊蒙混层、伊利石、高岭石和绿泥石;发育介壳页岩和泥岩夹介壳灰岩的岩石组合类型为主。本段细粒岩经历压实作用、胶结作用、溶蚀作用、交代作用、粘土矿物的转化作用及有机质的生烃演化作用,目前处于中成岩阶段B亚期,压实作用和胶结作用是控制页岩和灰岩物性变化的主要因素。受沉积及成岩的控制,富有机质页岩和介壳页岩是最有利的储集岩。成岩影响导致常规储层的介壳灰岩与灰岩致密而没有储集油气,反而使相对致密的细粒介壳页岩成为页岩气藏的有利储层,导致了测试时介壳页岩大量出气而相邻的介壳灰岩无气泡。纹层与微纹层(显微镜下显示纹层)发育及硅质与灰质组分显微定向排列有利于优质储层形成。

关键词:成岩演化;岩石学特征;细粒沉积岩;大安寨段;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

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

Zhu Yixiu^{1,2}, Jin Zhenkui^{1,2}, Jin Ke³, Guo Qiheng^{1,2}, Wang Huan^{1,2}, Lyu Pin^{1,2}, Wang Xinyao^{1,2}, Shi Yuan^{1,2}

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Exploration and Development under Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China]

Abstract: Core observation, thin section identification, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction analysis were used to finely describe the petrological characteristics and diagenesis of fine-grained sedimentary rocks as well as to discuss rock types with hydrocarbon potential and their genesis in the Lower Jurassic Da'anzhai Member of Yuanba area in the Sichuan Basin. The results show that there are three types of rocks, namely mudstone (mudstone, conchoidal shale and calcareous mudstone), siltstone and limestone (conchoidal limestone). The main mineral components are quartz, clay minerals (dominated by illite/smectite (I/S) mixed layer, illite, kaolinite and chlorite), calcite, feldspar and pyrite; the rock assemblages are mainly conchoidal shale and mudstone interbedded with conchoidal limestone. The fine-grained rocks, currently at the B sub-stage of the mesodiagenesis, experienced compaction, cementation, dissolution, metasomatism, recrystallization of clay minerals and hydrocarbon generation from organic matters, of which, compaction and cementation were the major factors controlling the physical properties of shale and limestone. It also shows that, controlled by sedimentation and diagenesis, the organic-rich shale and the conchoidal shale are two most promising rock types for hydrocarbon reservoirs. Also as a result of diagenesis processes, the conventional reservoirs of conchoidal limestone and limestone are too tight to hold any oil or gas, but the fine-grained sedimentary rock and

收稿日期:2020-07-23;修订日期:2021-02-02。

第一作者简介:朱毅秀(1966—),男,博士、副教授,岩石学、储层地质学。E-mail: zhu yixiu@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05036-004-002)。

conchoidal shale of less tight are wonderful unconventional shale gas reservoirs. This assumption was verified in field tests during which large volume of gas flew out of conchoidal shale, but none from the adjacent conchoidal limestone. The result also suggests that rocks with well-developed laminae and micro-laminae (observed under microscope) or with siliceous and calcareous compositions of directional arrangement are potentially high-quality reservoir rocks.

Key words: diagenetic evolution, petrologic feature, fine-grained sedimentary rock, Da'anzhai Member, Yuanba area, Sichuan Basin

目前非常规的致密油和页岩油气为油气新增长点,将成为未来油气的主要生产领域^[1]。非常规致密储层普遍以细粒沉积岩储层为主,与常规碎屑岩和碳酸盐岩储层相比,在岩石学特征、物性特征和储集空间类型等方面存在着很大的不同^[2-5]。同时受超微观实验条件的限制,细粒物质的沉积和成岩作用为油气地质学研究相对薄弱的领域^[2]。国内外海相细粒沉积岩内发现丰富的油气资源,因而研究主要集中在海相细粒沉积岩中^[6-7]。随着勘探开发的不断深入,四川盆地侏罗系湖相细粒沉积岩显示出巨大的油气勘探潜力,因此针对湖相细粒沉积岩的研究意义重大。

四川盆地作为中国非常规油气的生产热点地区,细粒岩储层具有多领域、多层系和多类型的特点^[8-9]。古生界五峰组-龙马溪组海相页岩已成为当今页岩气勘探有利层系,已经相继在涪陵焦石坝、威远和长宁及相邻的昭通示范区实现海相页岩气商业开发^[10-11]。同时四川盆地侏罗系自流井组大安寨段湖相细粒沉积岩有利的成藏条件及丰富的油气资源已经得到证实^[12-15]。从最初的大安寨段一、三亚段以介壳灰岩为致密油主要储层到大安寨段二亚段高产页岩气的发现,证实了四川盆地大安寨段湖相细粒岩具有非常规油与气并举生产的潜力^[16-20],经历了认为此套层序介壳灰岩和灰岩为储层,页岩为烃源岩到灰岩为非储层而页岩为源储同层的认识过程。在四川盆地元坝地区大安寨段地层中,已经有 5 口井钻获中-高产工业气流^[21-22](表 1)。岩石学特征的分析研究对细粒沉积岩储层的勘探开发具有重要的指导意义^[23],岩石学研究证实了四川盆地五峰组和龙马溪组富有机质硅质页岩为最有利的页岩气储集岩。与海相细粒沉积岩储层相比,湖相细粒沉积岩受沉积环境影响更大,相变更快,岩性和成岩作用更加复杂,非均质性更强,有机质含量和成熟度也更低^[24-26]。因此开展对湖相细粒沉积岩的岩石学特征及成岩研究至关重要。本文旨在明确元坝地区大安寨段陆相细粒沉积岩储层的岩石学特征及成岩演化,为探寻细粒沉积岩作为非常规储层的储集机理及表征非均质性奠定基础,寻找元坝地区大

表 1 四川盆地元坝地区大安寨段二亚段页岩高产气井测试情况统计(据文献[21]修改)

Table 1 Test statistics of high-production gas wells in the second sub-member of Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin (modified from reference[21])

井号	测试情况气/10 ⁴ (m ³)	沉积相
YB11	14.44	半深湖
YB102	8.48	半深湖
YB5	14.08	半深湖
YB21	50.70	半深湖
YB101	13.97	半深湖
YB161	1.58	半深湖

安寨段非常规油气有利页区提供理论支撑及对类似层段非常规油气研究提供可借鉴的研究方法。

1 区域地质概况

元坝地区位于四川省广元市苍溪县和巴中市境内,面积达到 3 200 km²。此区地表为白垩系覆盖,构造上主要位于九龙山背斜构造带和苍溪-巴中低缓构造带内(图 1)。

四川盆地经历了早古生代克拉通拗陷、晚古生代克拉通裂陷和中新生代前陆拗陷多个演化阶段^[27]。晚二叠世-晚三叠世印支构造运动导致盆地海水退出,整体抬升,由海相沉积逐渐转变为陆相沉积。自流井组大安寨段沉积期为伸展作用最弱,造山带活动最稳定的时期。盆地整体的拗陷速率远大于陆源碎屑的堆积速率,导致了四川盆地早侏罗世最大湖盆的形成^[28]。大安寨段沉积时期湖盆经历了扩展期-极盛期-收缩期一个完整的旋回。湖盆基底不对称、南坡缓北坡陡,大安寨段从上而下分为大一亚段、大二亚段和大三亚段^[29]。大安寨段沉积早期(大三沉积期)开始湖侵,并达到早侏罗世最大的一次湖侵,岩石以深灰-褐灰色介屑灰岩为主,夹粉砂岩、泥岩及页岩;到大安寨段中期(大二沉积期),湖水范围达到最广,岩性为深灰-灰褐色页岩(泥岩)和介屑灰岩,有时页岩与灰岩呈互层状或条带状;大安寨段晚期(大一沉积期)

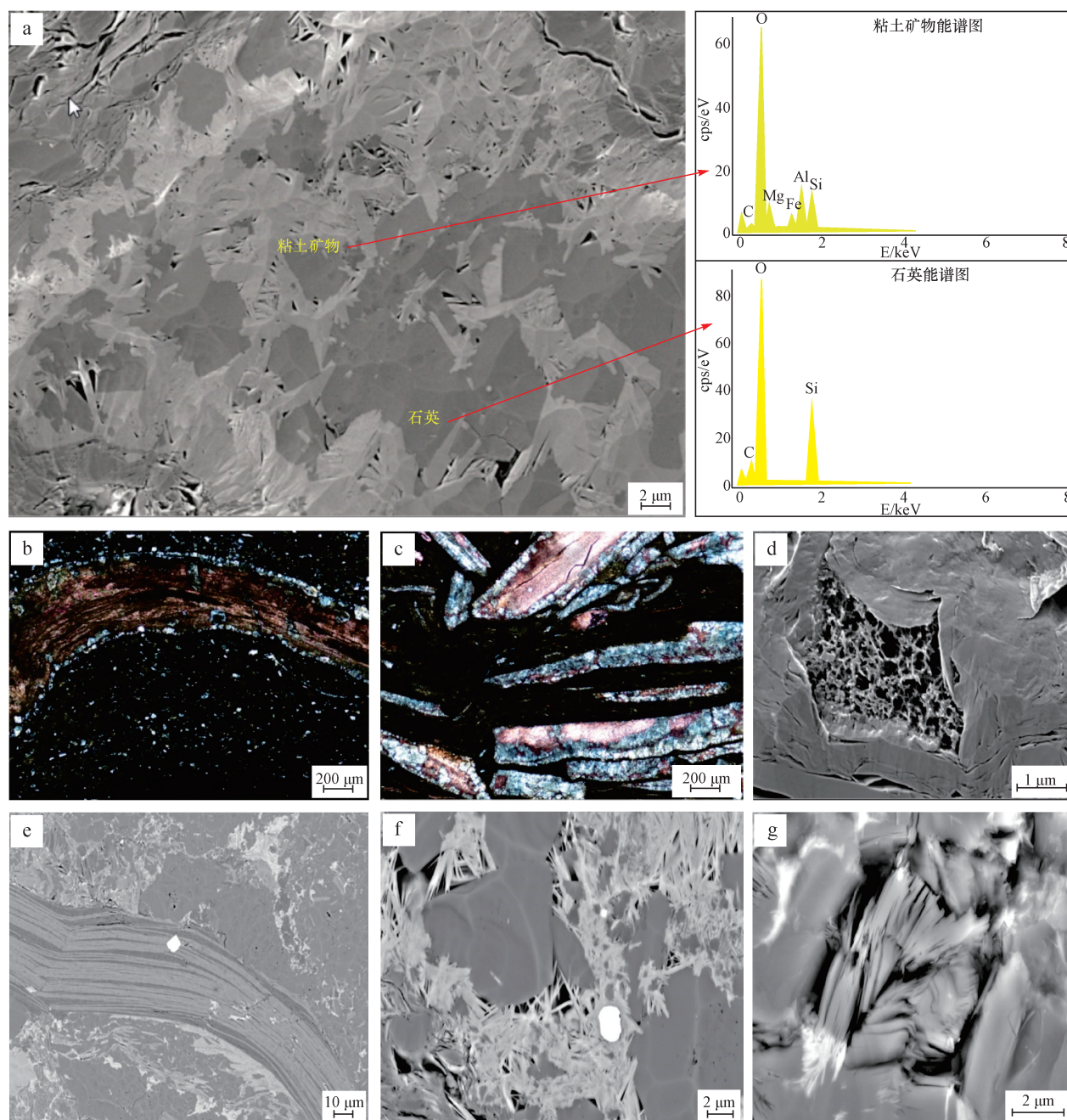


图2 四川盆地元坝地区大安寨段石英及粘土矿物特征

Fig. 2 Characteristics of quartz and clay minerals in the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. 石英颗粒嵌入粘土基质中, YL4 井, 埋深 3 758.20 m; b. 硅质交代钙质, 石英在介壳边缘向介壳内部生长形成齿状结构, 正交光, YB16 井, 埋深 3 966.89 m; c. 硅质和钙质互相交代, 介壳边缘硅化形成石英, 方解石交代石英、局部出现残留状, 正交光, YB16 井, 埋深 3 746.68 m; d. 粒间内蜂窝状伊蒙混层充填, YL4 井, 埋深 3 757.52 m; e. 重结晶的片状伊利石及夹于显微镜片状晶间的有机质, YL4 井, 埋深 3 766.05 m; f. 粒间孔内书页状高岭石, YL4 井, 埋深 3 780.50 m; g. 针状绿泥石, YL4 井, 3 766.05 m

2.3 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物主要为方解石(图 3a—g), 方解石含量介于 0~95%, 平均含量为 20.87%, 变化范围大, 在灰岩中含量高。在大安寨段沉积时期, 研究区发育多个生物介壳滩, 主要以腹足类和瓣鳃类生物为主, 这些生物的介壳为灰质, 是本区细粒沉积岩中碳酸盐岩

矿物的主要来源。生物介壳成岩时发生了碳酸盐矿物间的转化和重结晶, 早先的文石多转变为低镁方解石(图 3a)。

2.4 黄铁矿

草莓状黄铁矿是元坝地区大安寨段细粒沉积岩的重要矿物组分, 黄铁矿晶体紧密堆积形成似草莓状球

表 2 四川盆地元坝地区大安寨段细粒岩薄片分析组分

Table 2 Compositions of fine-grained sedimentary rocks from the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

编号	石英 + 长石/%	粘土矿物/%	碳酸盐/%	编号	石英 + 长石/%	粘土矿物/%	碳酸盐/%
YL4 - 1	40	60	0	YL4 - 24	40	50	10
YL4 - 2	10	50	40	YB10 - 1	30	70	0
YL4 - 3	10 *	90	10	YB10 - 2	30 *	100	0
YL4 - 5	30	55	15	YB10 - 3	15	70	15
YL4 - 6	40	50	10	YB10 - 4	28 *	98	2
YL4 - 7	30 *	95	5	YB16 - 1	30	60	10
YL4 - 8	5	10	85	YB16 - 2	25	70	5
YL4 - 9	10	15	75	YB16 - 3	75	25	0
YL4 - 10	10 *	80	20	YB21 - 1	30	70	0
YL4 - 11	2 *	10	90	YB21 - 2	30	70	0
YL4 - 12	20	20	60	YB102 - 1	30	50	20
YL4 - 13	20	30	50	YB104 - 1	35	64	1
YL4 - 14	50	45	5	YB104 - 2	40	57	3
YL4 - 15	35	60	5	YB122 - 1	30	68	2
YL4 - 16	50	48	2	YB122 - 2	30	68	2
YL4 - 17	50	45	5	YB273 - 1	2	3	95
YL4 - 18	40	50	10	YB273 - 2	5	5	90
YL4 - 19	30	55	15	YB273 - 3	30	68	2
YL4 - 20	30	35	35	YL30 - 1	20 *	100	0
YL4 - 21	20	20	60	YL30 - 2	15	80	0
YL4 - 22	20 *	80	20	YL30 - 3	25	70	5
YL4 - 23	35	50	15	YL30 - 4	25	60	15

注：* 表示此组分为粘土级长英质，统计上属粘土矿物组分。

形集合体、粒径介于几 ~ 几十微米。草莓状黄铁矿颗粒大小和形成的氧化还原环境密切相关，在含氧的环境中形成的草莓状黄铁矿生长速率慢，生长时间长，形成粒径较大颗粒^[32]，反之静水缺氧硫化环境中形成分布范围窄粒径小的黄铁矿颗粒。本段的草莓状黄铁矿普遍大于 10 μm，平均粒径较大（图 3h, i）。Wilkin 等^[33]提出了缺氧环境和含氧环境下草莓体黄铁矿的直径分别多在 1 ~ 18 μm（平均为 5 μm）和 1 ~ 50 μm（平均为 10 μm）。因此与龙马溪组海相深水陆棚相页岩中的黄铁矿（平均粒径 5 μm）相比^[34-35]，自流井组大安寨段的黄铁矿直径较大，反映了其形成于含氧的陆相深湖 - 半深湖环境。

泥页岩中的黄铁矿可以分为同沉积黄铁矿与成岩黄铁矿，草莓状黄铁矿颗粒多是同沉积期特有的黄铁矿类型，其一般形成于高硫化氢含量的还原闭塞的水体中^[36]。四川盆地龙马溪组页岩中黄铁矿就形成于这种水体环境。根据黄铁矿的粒径显示，大安寨段黄铁矿主要形成于含氧的水体中，而当含氧界面在沉积物/水界面以上，草莓状黄铁矿也可以在埋藏前形成，这主要与大安寨段湖盆面积扩大，沉积水体加深密切相关。

3 细粒沉积岩岩石类型与组合

细粒沉积岩是由粒径小于 62 μm 的细粒沉积物组成的岩石，也叫作泥状岩。矿物成分为粘土矿物、长英质矿物、碳酸盐矿物和有机质^[37]。根据元坝地区岩心和野外露头剖面为基础，结合薄片和 XRD 分析（表 2）结果，参考姜在兴等^[2]细粒沉积岩分类，以粘土矿物、粉砂级长英质矿物和碳酸盐矿物含量作为三端元，将元坝地区大安寨段细粒沉积岩分为泥岩、粉砂岩和灰岩 3 大类（图 4）。根据矿物含量，泥岩类可细分为泥岩、粉砂质泥岩和灰质泥岩；粉砂岩类分为粉砂岩、灰质粉砂岩和泥质粉砂岩；灰岩类可细分为灰岩、粉砂质灰岩和泥质灰岩；另有少量为混积岩。

3.1 泥岩类

3.1.1 泥岩/页岩

泥岩中粘土矿物含量大于 50%，碳酸盐矿物含量小于 25%，长英质矿物含量小于 25%。泥岩颜色较深，一般为黑色或灰黑色，可发育植物化石和黄铁矿，

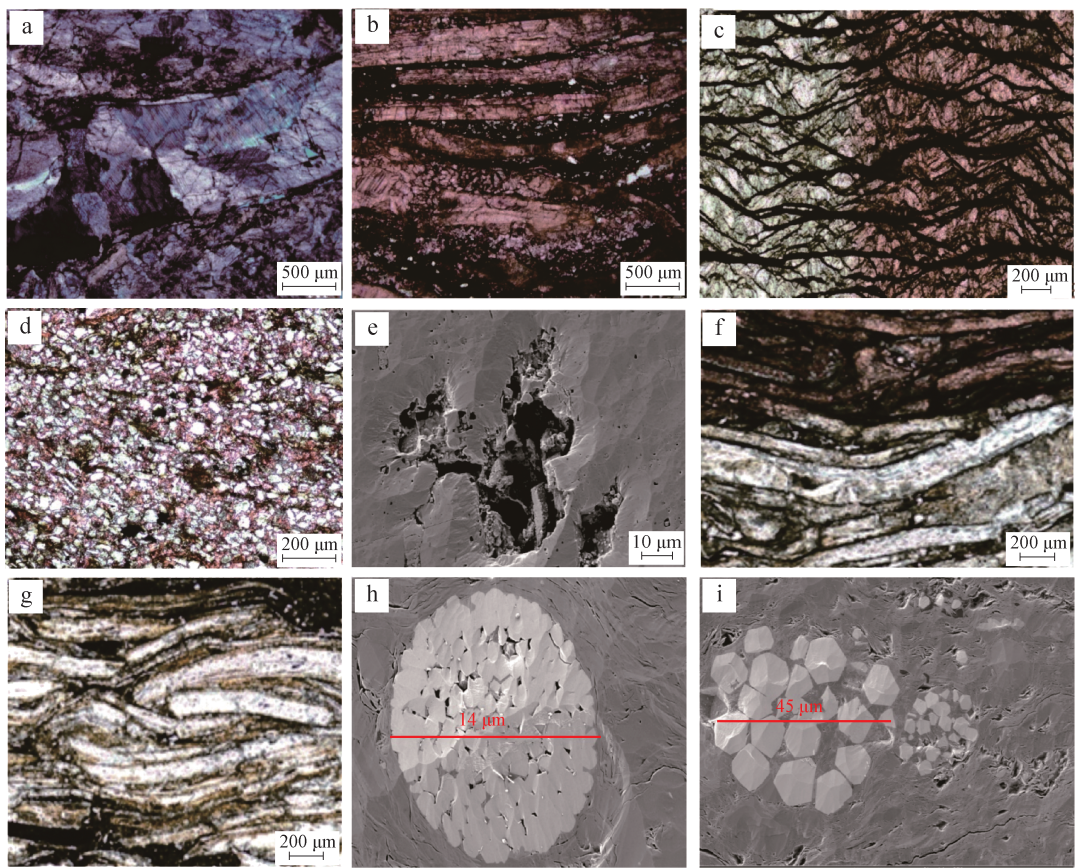


图 3 四川盆地元坝地区大安寨段岩石介壳和黄铁矿矿物微观特征

Fig. 3 Microscopic features of the conchoidal rocks and pyrite minerals from the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin
a. 方解石矿物的两组解理,正交光,元坝 273 井,埋深 4 071.83 m; b. 方解石矿物的两组解理和腹瓣鳃类生物化石,正交光,元坝 273 井,埋深 4 080.02 m; c. 方解石矿物,单偏光,元陆 4 井,埋深 3 787.59 m; d. 介壳泥岩,方解石胶结物,单偏光,元陆 4 井,埋深 3 759.52 m; e. 溶蚀孔隙,SEM,元陆 4 井,埋深 3 758.20 m; f, g. 介壳层受到压实作用顺层叠置,单偏光,元陆 4 井,埋深 3 758.88 m; h. 介壳泥岩中发育的草莓状黄铁矿,直径为 14 μm ,SEM,元陆 4 井,埋深 3 757.52 m; i. 草莓状黄铁矿,SEM,元陆 4 井,埋深 3 757.52 m

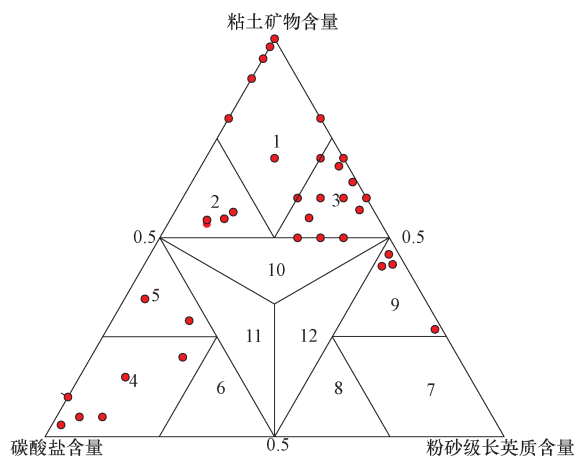


图 4 四川盆地元坝地区大安寨段细粒沉积岩分类
Fig. 4 Fine-grained sedimentary rock classification scheme of the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin
1. 泥岩/页岩; 2. 粉砂质泥岩; 3. 灰质泥岩/灰质页岩; 4. 灰岩;
5. 泥质灰岩; 6. 粉砂质泥岩; 7. 粉砂岩; 8. 灰质粉砂岩;
9. 泥质粉砂岩; 10. 泥质细粒混合岩; 11. 灰质细粒混合岩;
12. 粉砂质细粒混合岩

局部见粉砂质,具有水平层理。以毫米级或微米级水平纹理发育时称为页岩。大二段发育的泥岩中此水平纹理发育,其内可见生物介壳,介壳含量大于 10% 时,定名为介壳页岩(图 5a, b)。元坝地区 YL4 井大安寨段地层中泥岩中石英含量一般为 15% 左右,粒径约为 5 μm ,方解石含量在 5% 左右,主要出现在生物碎屑中,生物碎屑边界见石英微晶,粘土含量约为 80% (图 5c, d)。有机质含量大于 1% 的黑色页岩,称为富含有机质页岩。

3.1.2 粉砂质泥岩

粉砂质泥岩中粘土矿物含量大于 50%,碳酸盐含量小于 25%,粉砂级长英质矿物含量介于 25% ~ 50%。研究段发育的粉砂质泥岩为灰色或灰黑色,见植物碎屑化石。粉砂质泥岩中可见生物介壳,介壳颗粒的主要成分为方解石,铸体薄片可见方解石被茜素红染成红色,颗粒边缘可见石英颗粒,元陆

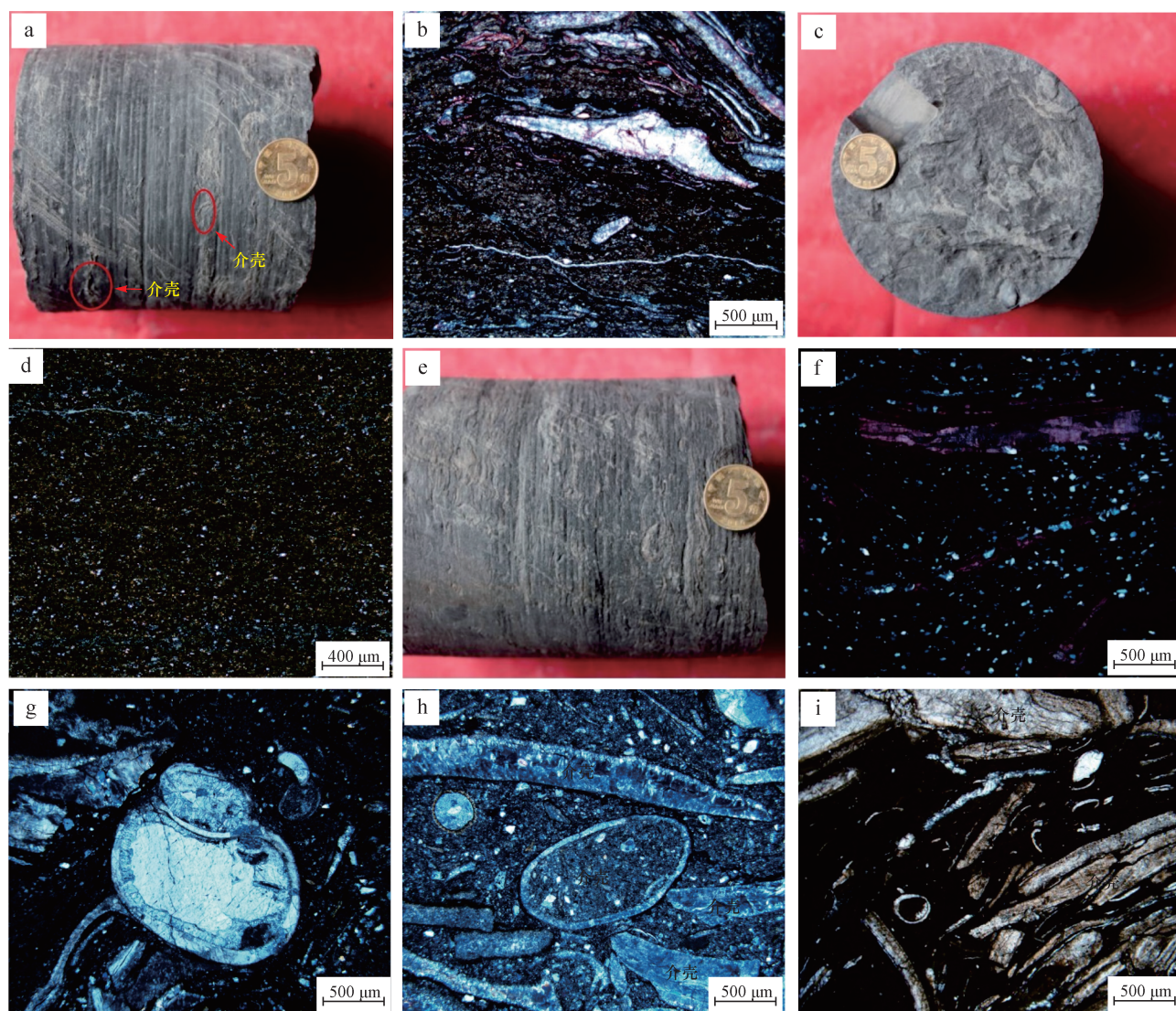


图5 四川盆地元坝地区大安寨段泥岩/页岩特征

Fig. 5 Characteristics of mudstone/shale from the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. 介壳页岩, Y14井, 埋深3 746.68 ~ 3 746.89 m; b. 介壳页岩, 可见腕足类动物化石, 介壳含量约为15%, 正交光, Y14井, 埋深3 746.68 ~ 3 746.89 m; c. 泥岩, 层面上发育介壳, Y14井, 埋深3 752.40 m; d. 泥岩, 正交光, Y14井, 埋深3 752.36 m; e. 纹层状粉砂质介壳页岩, Y14井, 埋深3 748.88 ~ 3 749.05 m; f. 粉砂质介壳泥岩, 正交光, Y14井, 埋深3 752.65 m; g. 介壳页岩中灰质纹层或介壳纹层, 腹足类生物, 正交光, 3 YB10井, 埋深963.94 m; h. 介壳页岩中灰质纹层或介壳纹层, 瓣鳃类生物化石, 正交光, 3 963.94 m, YB10井; i. 介壳页岩中灰质纹层或介壳纹层, 瓣鳃类生物化石, 正交光, Y14井, 埋深3 757.52 m

4井3 748.88 ~ 3 749.05 m处的粉砂质泥岩中, 介壳含量达到15%, 长英质矿物含量30%左右, 粘土矿物含量55%左右, 故定名为粉砂质介壳泥岩(图5e, f)。

3.1.3 灰质泥岩/介壳页岩

灰质泥岩中粘土矿物或非碳酸盐矿物泥粒级组分含量大于50%, 碳酸盐含量介于25% ~ 50%, 石英及粉砂级矿物含量小于25%。灰质泥岩中的碳酸盐矿物, 主要为生物介壳颗粒中的方解石, 因此也称为介壳泥岩; 当此类组份细粒沉积岩内毫米级或微米级水平纹理发育时就是介壳页岩, 大二段主要发育介

壳页岩。此介壳页岩中富含多种生物, 主要有瓣鳃类、腕足类、介形虫和腹足类(图5g—i)。部分介壳页岩中见大量显微纹层状微米级硅质(石英微晶, 石英微粒20 ~ 50 μm)组分, XRD显示硅质(石英)含量达40%以上。

3.2 粉砂岩类

粉砂岩类岩石在元坝地区大安寨段发育较少, 主要类型为含泥/泥质粉砂岩, 并且多与泥岩互层的形式发育。此处主要指长英质组分大于50%的岩石, 从粒级上主要包含细粉砂级和泥级2个细粒组分。含泥

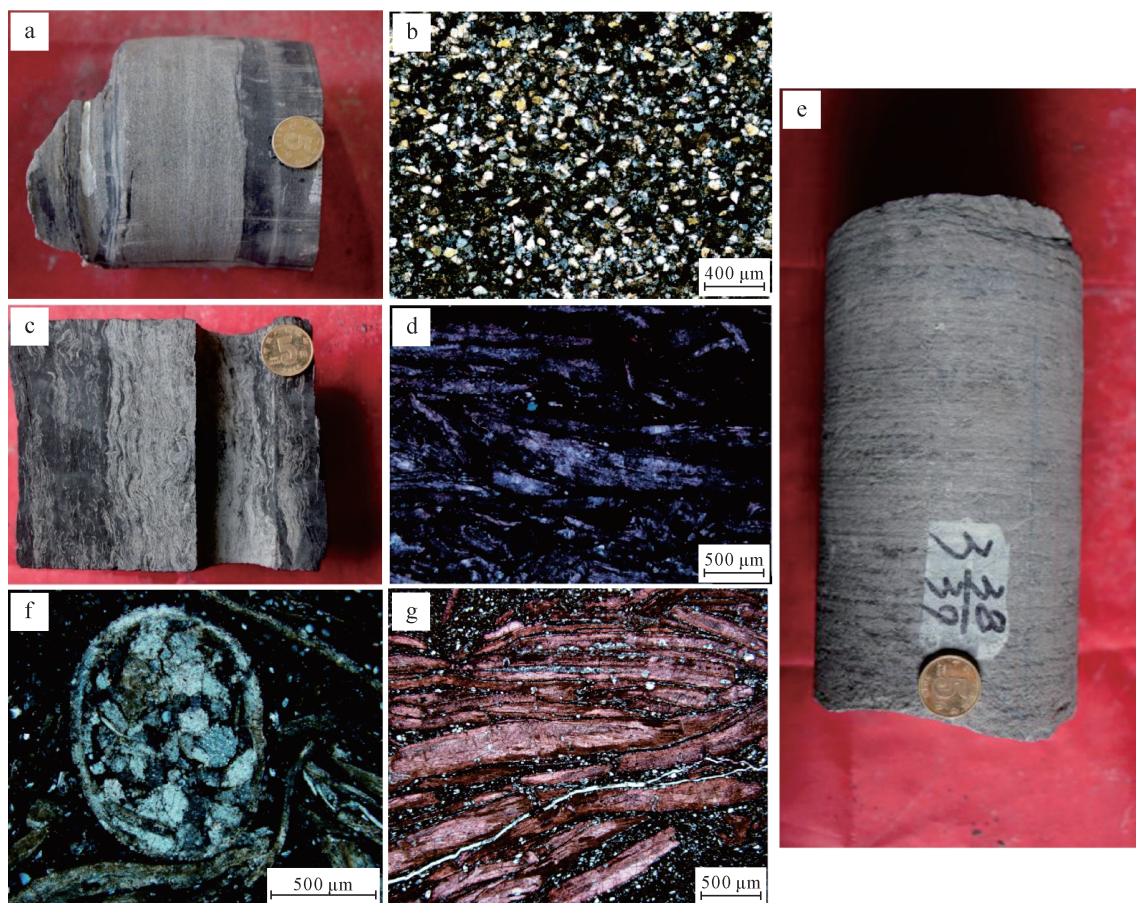


图6 四川盆地元坝地区大安寨段粉砂岩及灰岩特征

Fig. 6 Characteristics of siltstone and limestone from the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. 泥质粉砂岩与泥岩互层, YB16 井, 埋深 3 970.11 ~ 3 970.40 m; b. 含泥粉砂岩, 正交光, YB16 井, 埋深 3 970.11 m; c. 介壳灰岩与介壳页岩互层, YL4 井, 埋深 3 758.20 ~ 3 758.48 m; d. 介壳页岩, 介壳顺层叠置, 正交光, YL4 井, 埋深 3 758.20 m; e. 泥质介壳灰岩, YL4 井, 埋深 3 760.50 ~ 3 760.75 m; f. 泥质介壳灰岩, 正交光, YL4 井, 埋深 3 760.50 m; g. 泥质介壳灰岩, 介壳顺层叠置, YL4 井, 埋深 3 760.50 m

粉砂岩中石英等颗粒含量大于 50%, 颗粒大小均一, 粒度为 20 μm 左右, 分选好, 次棱角状, 颗粒之间以点接触为主, 结晶程度较高, 基底胶结, 杂基支撑; 方解石含量 5% 左右, 为生物碎屑的主要成分, 泥质含量介于 10% ~ 25% (图 6a, b)。

3.3 灰岩类

3.3.1 介壳灰岩

介壳灰岩中碳酸盐含量大于 50%, 粘土矿物含量小于 25%, 长英质含量小于 25%。介壳灰岩中灰岩的质地纯, 岩性致密; 矿物组分主要为方解石, 含量一般大于 90%, 生物介壳多为瓣鳃类、双壳类和腹足类; 生物介壳含量一般大于 60%, 介壳颗粒内大多被方解石充填, 边界多被石英颗粒交代。元陆 4 井大安寨段 3 758.20 ~ 3 758.48 m, 石英含量为 2% 左右, 颗粒细小, 主要分布在生物碎屑的边界, 方解石含量为 90%, 泥质含量为 8%, 部分成岩转化为细小的硅质颗粒。

生物颗粒长度主要在 4 mm 左右, 部分长达 15 mm, 呈板条状叠置, 顺层分布 (图 6c, d)。

3.3.2 泥质介壳灰岩

泥质 (含泥) 介壳灰岩与介壳灰岩相比, 泥质介壳灰岩中灰岩的质地不纯, 岩性较为疏松, 主要为薄层或条带状与介壳泥岩互层共生, 厚度介于几厘米到几十厘米不等。矿物成分也以方解石和泥质为主, 方解石体积分数为 50% ~ 80%, 低于介壳灰岩中方解石体积分数。泥质体积分数比介壳灰岩高, 为 10% ~ 40%。生物介壳呈水平定向叠置, 类型与介壳灰岩中基本一致, 介壳间主要被泥质和方解石充填, 介壳体积分数介于 35% ~ 65% (图 6e—g)。

3.4 细粒沉积岩岩石组合

元坝地区大安寨段主要岩石组合类型为页岩与介壳灰岩互层 (图 7a)、介壳灰岩夹薄层泥岩 (图 7b)、泥

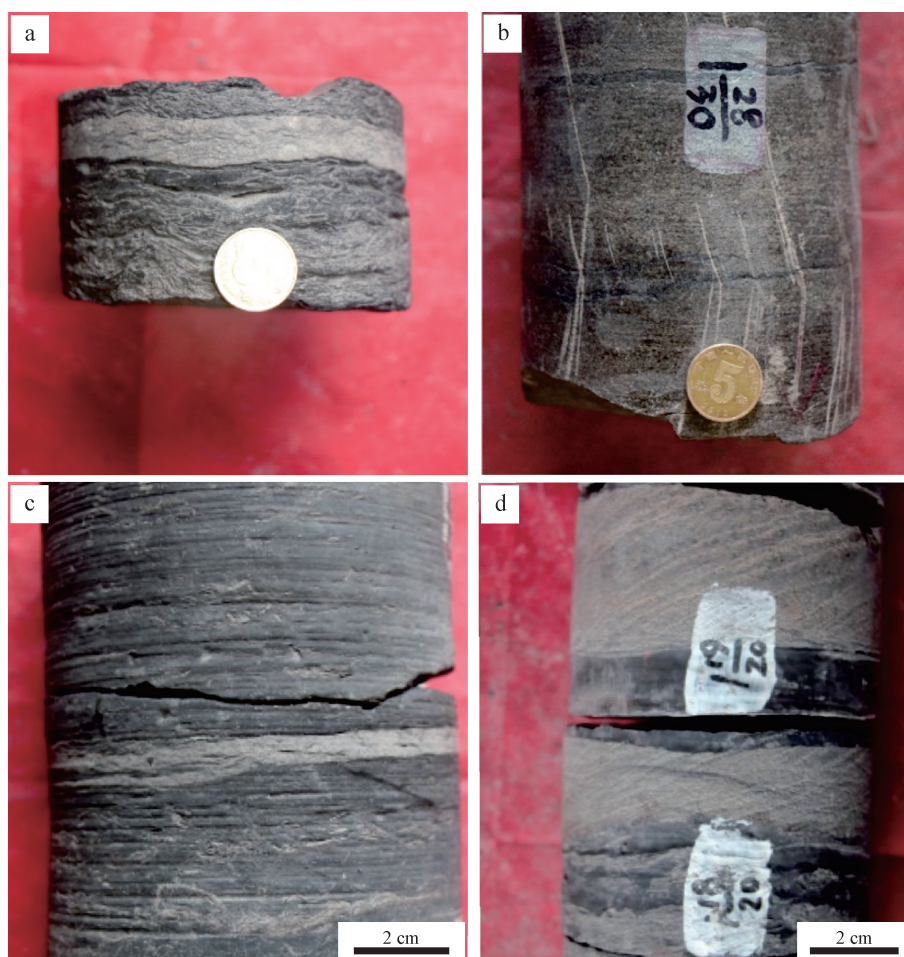


图7 四川盆地元坝地区大安寨段地层岩石组合类型

Fig. 7 Rock assemblage types of the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. 页岩与介壳灰岩互层, 元陆4井, 埋深3 763.08 ~ 3 763.18 m, 大二亚段; b. 介壳灰岩夹薄层泥页岩, 元陆4井, 埋深3 793.28 ~ 3 793.60 m, 大三亚段; c. 泥页岩夹薄层介壳灰岩, 元陆4井, 埋深3 740.22 ~ 3 740.50 m, 大一亚段; d. 泥岩与泥质粉砂岩互层, YB16井, 埋深3 970.11 ~ 3 970.50 m, 大二亚段

岩夹薄层介壳灰岩(图7c)和泥岩与泥质粉砂岩互层4种类型(图7d)。

3.4.1 泥岩与介壳灰岩互层

此种岩性组合中,泥地比(岩心层段中泥岩和页岩所占长度比)介于50%~70%,页岩中介壳富集,页岩层的厚度大于灰岩厚度,反映沉积环境为碳酸盐湖坡风暴滩微相沉积,在元陆4井大二亚段3 762.05 ~ 3 784.70 m发育。页理、水平裂缝和高角度裂缝均发育,孔隙连通性和渗透率较好。脆性矿物的含量高,有利于压裂改造。

3.4.2 厚层介壳灰岩夹薄层介壳泥岩

薄层介壳泥岩中介壳层密集,灰岩的厚度远大于泥岩厚度,泥地比小于50%,沉积环境为浅湖亚相的介壳滩微相,元陆4井大一亚段3 735.00 ~ 3 746.60 m发育。

3.4.3 厚层泥岩/页岩夹薄层介壳灰岩

泥岩的厚度远大于介壳灰岩厚度,泥地比介于70%~90%,沉积环境为半深湖亚相半深湖泥微相,在大三亚段3 793.00 ~ 3 804.00 m和大一亚段3 711.00 ~ 3 735.00 m发育。粘土矿物含量高,脆性矿物含量低,可压性较差。

3.4.4 泥岩与粉砂质泥岩互层

泥质粉砂岩厚度大于泥岩厚度,泥地比小于50%,沉积环境为浅湖亚相砂泥坪微相,元陆4井大二亚段3 746.60 ~ 3 752.20 m发育。

4 成岩演化

研究区细粒岩经历了压实作用、胶结作用、溶蚀作

用、重结晶作用及交代作用、粘土矿物的转化及自生矿物形成作用以及有机质演化作用的共同改造,最终形成特低孔-低渗致密储层。不同类型岩石致密受改造的成岩作用类型不同,灰岩类主要经受胶结作用改造,粉砂岩类主要经受压实作用改造,泥岩或页岩压实作用改造强。页岩为主的细粒岩,岩性组合存在多种正常碎屑岩(粉砂岩和灰岩)夹层或互层,这种粗细岩性组合具有相同的、整体的成岩温压场,近于相似的成岩流体演化历程和成岩环境,因而对其成岩阶段划分可依据《碎屑岩成岩阶段划分》(SY/T5477—2003)中淡水-半咸水水介质成岩阶段划分标志,依据大安寨段细粒沉积岩伊蒙混层比、有机质镜质体反射率(R_o)、最高热解峰温(T_{max})和粘土矿物组合类型和孔隙发育状况(表 3),认为研究区内自流井组大安寨段储层经历了早成岩阶段和中成岩阶段,现今处于中成岩阶段 B 亚期(图 8)。

研究区大安寨段 R_o 反映其处于凝析油-湿气的高成熟阶段, T_{max} 值和有序混层比都反映其处于高成熟阶段,对应中成岩 B 期。大安寨段原生孔隙少,发育重结晶和自生形成的粘土矿物自生晶间孔(复杂线状微孔)、微裂缝和溶蚀孔隙。这些成岩特征与指标显示,元坝地区大安寨段细粒沉积岩成岩演化经历早成岩阶段 A 期和 B 期、中成岩阶段 A 期和 B 期(图 8)。本段伊蒙混层经历过无序到有序,高岭石出现与转化,

无机酸与有机酸先后出现,孔隙由原生到次生,沉积物由疏松到固结再到致密,目前处于中成岩阶段 B 期。

大安寨段经过同生期—早成岩期—中成岩期的演化,经历早成岩阶段 A 期的压实作用,孔隙度大幅度降低;相对砂岩和灰岩,泥页岩压实作用更强,是最主要的成岩作用,泥岩原始孔隙由近 70% 到 10%~15%;页岩纹层缝为主的页理缝强烈压缩而致密。到早成岩阶段 B 期,压实作用仍是页岩减少孔隙的主要因素(减少孔隙 5% 左右),细粒岩开始出现次生溶蚀孔隙,此时页岩总孔隙度约 5%~10%。中成岩阶段 A

表 3 四川盆地元坝地区大安寨段成岩阶段划分依据
Table 3 Basis for diagenetic stage division of the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

样品数/个	划分标志	分布范围	平均值	最高成岩阶段
10	$R_o/\%$	1.44 ~ 1.83	1.67	中成岩阶段 B 期
25	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	371 ~ 501	468	中成岩阶段 B 期
35	粘土矿物组合	伊蒙混层 + 伊利石 + 绿泥石 + 高岭石	—	中成岩阶段 B 期
35	蒙皂石含量比/ $\%$	4.00 ~ 30.00	15.53	中成岩阶段 B 期
50	孔隙类型	晶间孔、溶蚀孔、有机孔和微裂缝为主	—	中成岩阶段 B 期

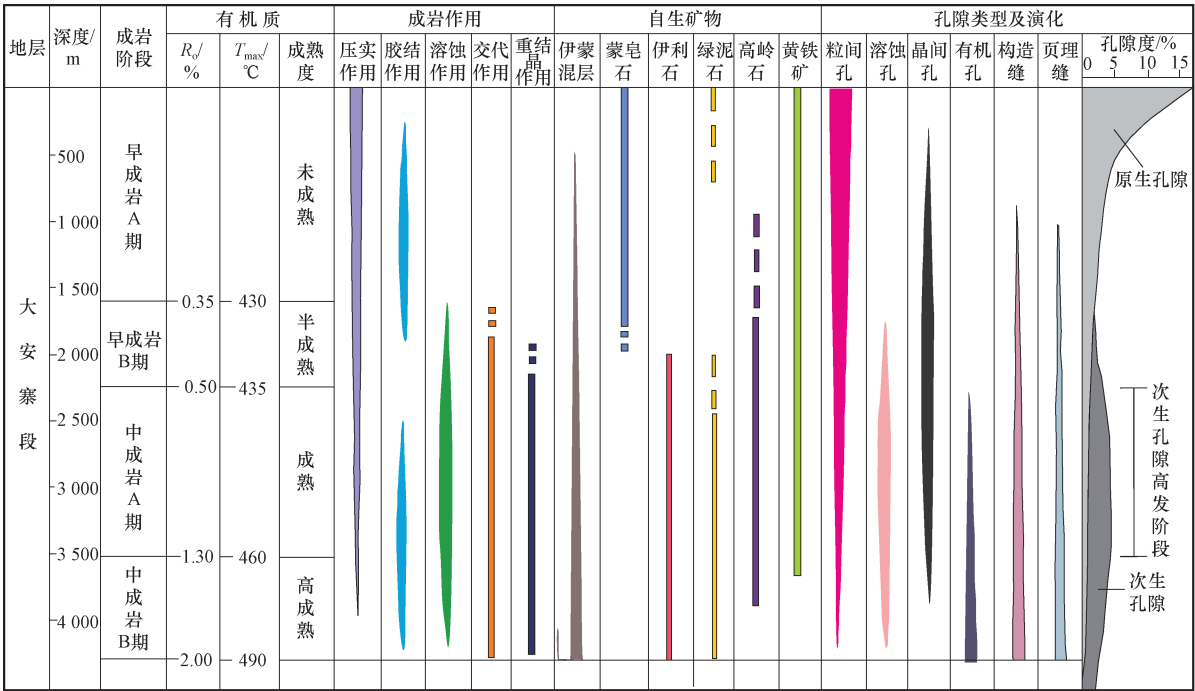


图 8 四川盆地元坝地区大安寨段成岩演化阶段与序列
Fig. 8 Diagenetic evolution stages and sequences of the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

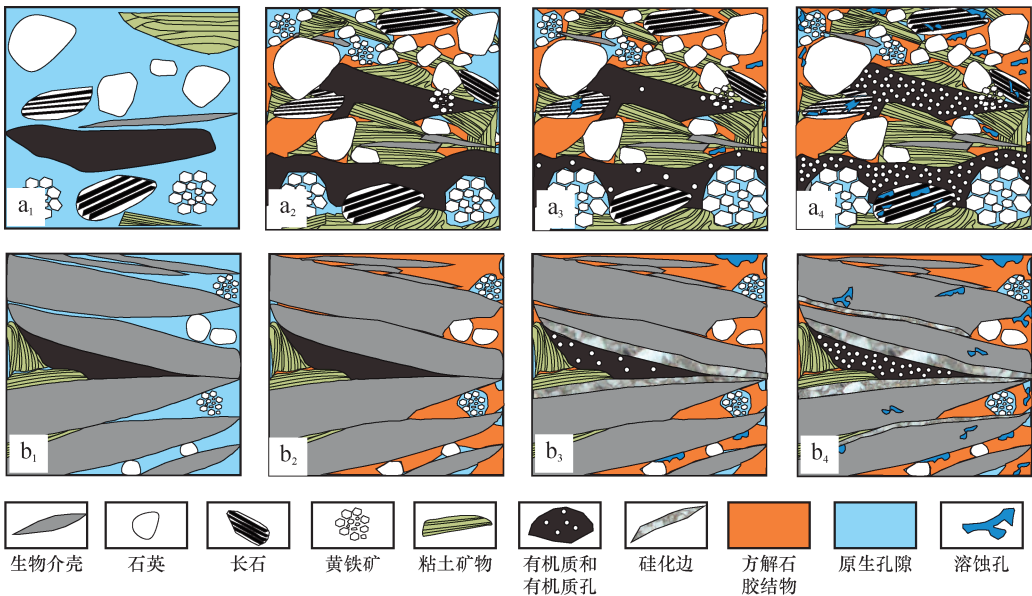


图 9 四川盆地元坝地区大安寨段细粒岩成岩演化模式

Fig. 9 Diagenetic evolution model of the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin
a₁—a₄. 介壳页岩(泥岩)和粉砂岩; b₁—b₄. 介壳灰岩和灰岩

期,有机酸大量生成,有机质孔和溶蚀孔大量发育,页理缝局部因溶蚀而稍微扩宽,此时孔隙度总体保持不变;局部有机物不发育区域,压实作用仍存在,页岩孔隙缓慢减少、减孔达 1%~2%;中成岩阶段 B 期,页岩中各种成岩作用仍不均匀进行,岩石脆性增强,岩石易破裂,形成微裂缝,页岩孔隙度基本保持不变,总孔隙度约 5% 左右。经过以上成岩阶段,形成了晶间孔、溶蚀孔、有机质孔、页理缝和微裂缝等次生孔缝类型,粉砂岩和介壳灰岩经历压实作用和强胶结作用几乎不保存原生孔隙而致密。本研究段细粒岩经历一系列成岩作用,主要以粘土矿物晶间孔及有机质演化孔隙为主,发育少量的溶蚀孔隙,介壳灰岩由于发生强烈的胶结作用,物性普遍比泥页岩差(图 9)。

5 有利储层

统计显示大安寨段不同岩性的储层物性不同,泥岩和介壳页岩物性整体较好,粉砂岩和灰岩相对致密,孔渗(氦气法)相对更差(表 4)。大二亚段密闭取心试气实验显示页岩与介壳灰岩互层、厚层页岩夹薄层介壳灰岩 2 种岩性组合中,产气的是页岩和介壳页岩,而不是灰岩与介壳灰岩,5~10 m 厚的介壳页岩层产气量好于中薄层介壳页岩层;厚层介壳灰岩夹薄层介壳页岩组合段,产气很少或不产气。细粒岩有利储层主要受到沉积和成岩的双重控制,沉积对细粒岩储层物性的影响归结于矿物组分及有机质对储层物性的影

表 4 四川盆地元坝地区大安寨段不同岩性孔渗特征
Table 4 Porosity and permeability features of different lithologies in the Da'anzhai Member in Yuanba area, Sichuan Basin

岩石类型	平均孔隙度/%	平均渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	平均 TOC/%
泥岩	3.63	1.83	1.32
介壳页岩			1.15
介壳灰岩	1.78	0.06	0.20
泥质粉砂岩			0.26

响,成岩作用对细粒岩储层孔隙的保存、发展和演化具有重要影响,二者共同作用形成的富有机质页岩和富有机质介壳页岩为本区有利储层。

5.1 矿物组分及有机质对有利储层的影响

元坝地区大安寨段细粒岩的孔隙度与粘土矿物及 TOC(总有机碳)含量呈现出很好的正相关性(图 10a—d),而与方解石及长英质矿物含量相关性不大(图 10e,f),反映粘土矿物及有机质含量是控制大安寨段细粒岩储层质量的重要因素之一。大安寨段陆相页岩的平均 TOC 较低为 1.05%,有机质孔隙较少,但粘土矿物结晶度高,伊利石片发育,粘土矿物晶间孔缝发育,出现含中高碳介壳页岩孔渗普遍高于介壳灰岩。海相页岩硅质多为自生石英,此种高脆性矿物含量有利于后期压裂改造,容易形成产能;而陆相页岩中的硅质—石英为沉积成因矿物,多以棱角状不规则状散布

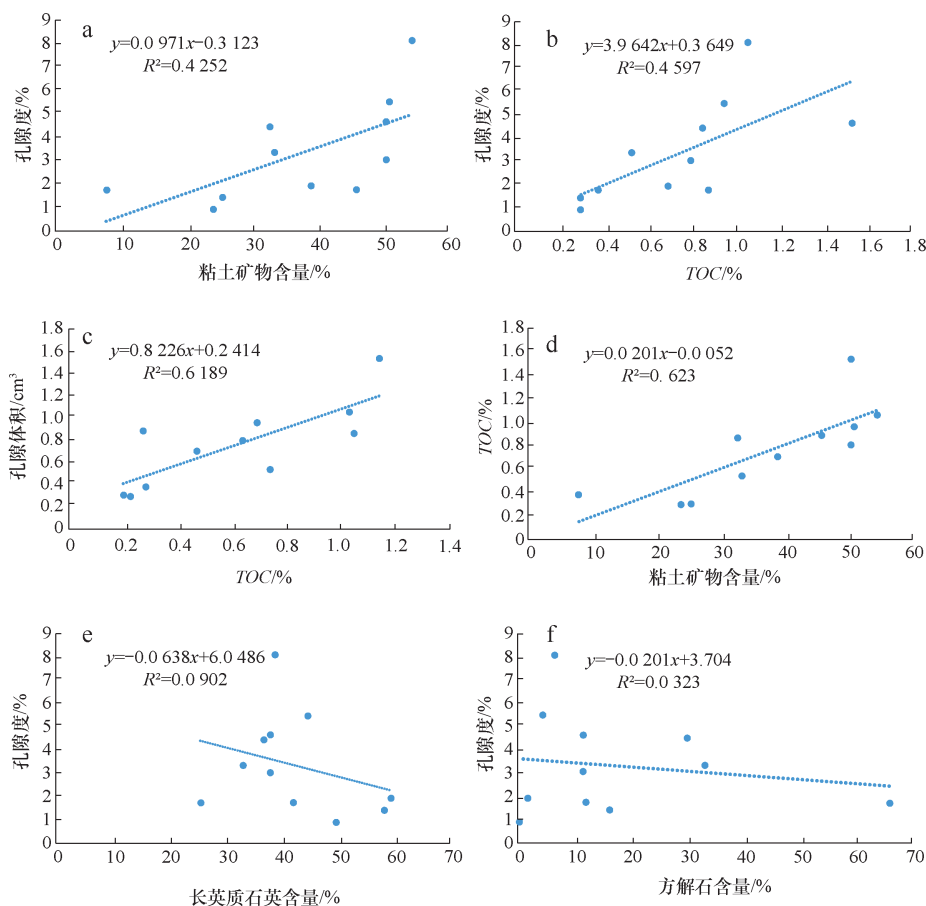


图10 四川盆地元坝地区大安寨段细粒岩矿物类型与物性关系

Fig. 10 Relationship between mineral types and physical properties of the fine-grained sedimentary rocks in the Da'anzhai Member of Yuanba area, Sichuan Basin

a. 粘土矿物含量与孔隙度关系; b. TOC 含量与孔隙度关系; c. TOC 含量与孔隙体积关系; d. 粘土矿物含量与 TOC 关系; e. 长英质矿物与孔隙度关系; f. 方解石与孔隙度关系

于粘土矿物之中,较高的长英质含量并不能直接作为工程压裂形成工业性产能的有利指标,具有层状或纹层状构造、压裂薄弱面发育的介壳页岩才可能成为相对有利非常规储层。大安寨段页岩及介壳页岩页理发育,同时沉积型泥粒级石英颗粒多呈现微米级纹层平行状排列,容易形成微裂缝,有利于后期压裂,因此受原始沉积环境控制的中高有机质丰度、高片状粘土含量、页理面发育的页岩及介壳页岩成为研究区大安寨段有利的非常规油气储集层。相同矿物成分和含量的细粒沉积岩,相同组分具不同微排列和微聚集方式形成的微孔缝不同,后期改造效果也不同。因而在细粒沉积岩显微镜观察时一定要关注是否有显微纹层存在。

5.2 成岩作用类型对有利储层的影响

5.2.1 压实作用

压实作用伴生细粒沉积物在固结成岩过程的各个阶段,粘土矿物组成的纯泥岩和页岩原始孔隙 90% 减

少由此造成。它是控制本段页岩和泥岩储集空间是否保留的最重要成岩作用。大安寨段粉砂质泥岩和泥质粉砂岩受到压实作用改造也很明显,这是由于沉积和成岩原因形成的以石英为主的碎屑多以分散状分布于粘土中,石英质和粘土质相互穿插和混合,压实固结更强,后期改造也更难。

5.2.2 胶结作用

胶结作用会造成脆性矿物为主的细粒沉积岩储层的孔隙度和渗透率降低,大安寨段主要有钙质胶结和硅质胶结。硅质胶结主要表现为石英的自生加大和自生石英晶充填。大安寨段石英自生加大仅在泥质粉砂岩中出现,自生石英微晶在泥页岩和介壳灰岩中可见,多为粘土矿物的成岩转化晶出和石英对方解石质介壳交代结晶,少量见自生石英晶体充填微孔。介壳灰岩和介壳页岩中粒间普遍发育方解石胶结物呈亮晶状和嵌晶状产出,部分交代介壳。强烈胶结作用是本区介

壳灰岩致密的主要因素,中等程度胶结保证了本区介壳页岩可以储集油气。

5.2.3 溶蚀作用

大安寨段碳酸盐质介壳和填隙物溶蚀作用发育,存在早期溶蚀和晚期溶蚀,以早期溶蚀为主。介壳灰岩主要发育在浅湖亚相的介壳滩微相中,波浪作用强烈造成其渗透性好,成岩流体丰富。早期介壳灰岩溶蚀强烈,形成早期次生孔隙及其内易于流动的成岩流体,出现多期的溶蚀与充填,但后期孔隙多被充填物愈合,孔隙不易保存而致密。晚期介壳灰岩很难和邻近泥页岩构成更大的渗透循环体系,含有机酸等成岩流体很难渗入介壳灰岩中,很难见到介壳灰岩的晚期溶蚀,而这些成岩流体只能在近酸源、显微纹层发育的介壳页岩中局部小范围内循环。细粒沉积岩孔隙比常规储层的孔隙小、渗透率低且流体交换不明显,是一个相对细小且网格化的封闭成岩系统,而有机酸引起的溶蚀作用在介壳页岩较普遍。

5.2.4 交代作用

研究区大安寨段介壳泥岩和介壳灰岩中,普遍可以见到石英交代方解石(图2d,e)。早期石英对碳酸盐介壳的交代,形成一个相对更不易溶蚀和抗压实的介壳外壳,对介壳是一种保护,此类被保护的介壳也不易被溶蚀。方解石和 SiO_2 的溶解度随温度和pH值的变化呈现相反的变化规律,石英交代方解石主要发生在浅埋藏条件下。本段交代作用降低了细粒沉积岩的孔隙度。

5.2.5 粘土矿物的转化作用

随埋藏深度增加,温度和压强也相应升高,层状粘土矿物会发生粘土矿物之间的转化作用,无序混层向有序粘土矿物转化,形成了本段含蒙脱石小于10%的有序混层,强烈的转化也形成了高结晶度和高有序度的厚片状伊利石,伴生大量粘土矿物片状孔与收缩缝;转化排出大量层间水及含铁镁物质,有利于细粒沉积岩微观孔隙的形成和生烃催化。粘土矿物转化及重结晶增强了抗压实能力,改善了微孔隙结构并稍增加了微孔隙,对改善本段页岩微孔隙储集具建设性意义。

5.2.6 有机质的成岩演化

本段细粒沉积岩中,剩余有机碳含量(TOC)介于0.15%~3.52%,平均含量为1.05%,含量大于0.5%的占比76.9%;有机质类型主要为腐泥-腐殖型

(Ⅱ₂),兼有腐殖型-腐泥型(Ⅱ₁)和腐殖型(Ⅲ);R_o处于成熟-高成熟演化阶段(表2),这些有机质特征为本段有机孔发育奠定了基础。随着成熟度增加,有机质大量排烃也有助于微裂缝的发育,溶蚀孔隙的产生也主要受控于有机质成熟过程中产生的有机酸。因此,大安寨段细粒岩有利的有机质类型和热成熟度,提供了丰富的纳米孔隙,也改善了细粒沉积岩的储层物性。

综上所述,页岩及介壳页岩储层物性较好主要是因为这类岩石拥有微纹层、高有序的粘土矿物及较高有机质含量,再加上成岩演化过程中粘土矿物转化及有机质的演化对储层孔隙度的建设性作用,导致其储集性能优于相同层段的灰岩及泥质粉砂岩。本段压实作用和胶结作用是细粒沉积岩储层物性变差的最主要的成岩作用,溶蚀作用对储层有一定影响,交代作用和重结晶作用对储层物性影响较小。

6 结论

1) 元坝地区大安寨段细粒沉积岩主要为泥岩或页岩、介壳泥岩或介壳页岩和介壳灰岩,有机质含量不均匀,相对含量较高,脆性矿物含量较高,处于中成岩B期。

2) 岩性和成岩作用控制了细粒沉积岩的储集性。本区地层中纹层与微纹层发育程度和脆性矿物(石英和方解石等)是否有序排列成显微纹层状对细粒沉积岩储层影响重大;压实作用是页岩改造中最主要成岩作用,胶结作用是灰岩类储层致密的主要原因。富有机质的页岩和介壳页岩为本段有利储集岩。

致谢:感谢研究过程中得到专项课题承担方中国石化勘探开发研究院胡全、刘光祥、冯动军、朱彤、刘忠宝和王鹏威等领导专家的大力支持与指导,感谢研究过程中先后参与工作的研究生李新、肖劲光、李众、李硕和刘振宇等同学,感谢前期工作的赵建华博士后,特别感谢后期论文审稿专家和编辑的辛勤劳动。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报,2013,34(6):1031-1039.
Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary

- rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1031–1039.
- [3] 张文伟. 细粒沉积岩储层微观特征研究方法及应用——以大民屯凹陷安福屯地区 S352 井为例[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(4): 11–15.
- Zhang Wenwei. Microcosmic characteristics of fine-grained sedimentary reservoirs and its application——By taking S352 well in Anfutun area of Damintun Sag as an example[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2019, 33(4): 11–15.
- [4] 林小兵, 田景春, 刘莉萍, 等. 四川盆地川西坳陷须家河组硅质碎屑颗粒溶蚀作用及机理[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 404–410.
- Lin Xiaobing, Tian Jingchun, Liu Liping, et al. Dissolution mechanism of siliciclastic particles in Xujiahe Formation, West Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 404–410.
- [5] 周立宏, 蒲秀刚, 陈长伟, 等. 陆相湖盆细粒沉积岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3625–3639.
- Zhou Lihong, Pu Xiugang, Chen Changwei, et al. Concept, Characteristics and prospecting significance of fine-grained sedimentary oil gas in Terrestrial lake basin: A case from the second member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3625–3639.
- [6] 高波, 刘忠宝, 舒志国, 等. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 284–294.
- Gao Bo, Liu Zhongbao, Shu Zhiguo, et al. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 284–294.
- [7] 赵建华, 金之钧, 林畅松, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 701–715.
- Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Lin Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 701–715.
- [8] 朱彤, 王峰, 俞凌杰, 等. 四川盆地页岩气富集控制因素及类型[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(3): 399–407.
- Zhu Tong, Wang Feng, Yu Lingjie, et al. Controlling factors and types of shale gas enrichment in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(3): 399–407.
- [9] 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 等. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义——以四川盆地中下侏罗统为例[J]. *天然气工业*, 2019, 39(12): 10–21.
- Liu Zhongbao, Liu Guangxiang, Hu Zongquan, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic Strata in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(12): 10–21.
- [10] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 1–10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 1–10.
- [11] 郭旭升, 胡东风, 魏祥峰, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩裂缝发育主控因素及对产能的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 799–808.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Xiangfeng, et al. Main controlling factors on shale fractures and their influences on production capacity in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 799–808.
- [12] 郭彤楼, 李宇平, 魏志红. 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*, 2011, 22(1): 1–7.
- Guo Tonglou, Li Yuping, Wei Zhihong. Reservoir-forming conditions of shale gas in Ziliujing Formation of Yuanba Area in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(1): 1–7.
- [13] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 四川盆地元坝气田发现与理论技术[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 14–26.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yuping, et al. Discovery and theoretical and technical innovations of Yuanba gas field in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 14–26.
- [14] 王玮, 黄东, 易海永, 等. 淡水湖相页岩小层精细划分及地球化学特征: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(5): 724–730.
- Wang Wei, Huang Dong, Yi Haiyong, et al. Stratigraphic division and geochemical characteristics of freshwater lacustrine shale: A case study of Jurassic Da'anzhai Section, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(5): 724–730.
- [15] 杨跃明, 黄东, 杨光, 等. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气形成地质条件及勘探方向[J]. *天然气勘探与开发*, 2019, 42(2): 1–12.
- Yang Yueming, Huang Dong, Yang Guang, et al. Geological conditions to form lacustrine facies shale oil and gas of Jurassic Da'anzhai Member in Sichuan Basin and exploration directions [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2019, 42(2): 1–12.
- [16] 刘殊, 许红梅. 四川大安寨段薄层灰岩油气富集区预测[J]. *中国石油勘探*, 2001, 6(2): 44–50.
- Liu Shu, Xu Hongmei. Favorable area predication of Da'anzhai thin-bedded limestone in Sichuan [J]. *China Petroleum Exploration*, 2001, 6(2): 44–50.
- [17] 陈世加, 张焕旭, 路俊刚, 等. 四川盆地中部侏罗系大安寨致密油富集高产控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(2): 186–193.
- Chen Shijia, Zhang Huanxu, Lu Jungang, et al. Controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member tight oil accumulation and high production in central Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 186–193.
- [18] 王玮, 沈忠民, 裴森奇, 等. 致密砂岩气藏油气轻烃特征及其地质意义: 以四川盆地西北部须家河组气藏为例[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(6): 818–827.
- Wang Wei, Shen Zhongmin, Pei Senqi, et al. Light hydrocarbon characteristics of petroleum in a tight sandstone gas reservoir and its geological significance: A case study of the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoir in the northwestern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(6): 818–827.
- [19] 何志勇, 刘海涛, 肖伟, 等. 四川盆地元坝地区下侏罗统介壳灰岩储层分布预测[J]. *现代地质*, 2017, 31(1): 142–149.

- He Zhiyong, Liu Haitao, Xiao Wei, et al. Distribution prediction of Lower Jurassic shell limestone reservoir in Yuanba area of Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 2017, 31(1): 142–149.
- [20] 杨光, 黄东, 黄平辉, 等. 四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油高产稳产主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 817–826.
- Yang Guang, Huang Dong, Huang Pinghui, et al. Control factors of high and stable production of Jurassic Da'anzhai Member tight oil in central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 817–826.
- [21] 周德华, 孙川翔, 刘忠宝, 等. 川东北地区大安寨段陆相页岩气藏地质特征[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(5): 38–48.
- Zhou Dehua, Sun Chuanxiang, Liu Zhongbao, et al. Geological characteristics of continental shale gas reservoir in the Jurassic Da'anzhai member in the northeastern Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(5): 38–48.
- [22] 彭嫦姿, 彭俊, 陈燕辉, 等. 四川盆地元坝地区大安寨段页岩气“甜点”地震预测[J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 42–47.
- Peng Changzi, Peng Jun, Chen Yanhui, et al. Seismic prediction of sweet spots in the Da'anzhai Shale Play, Yuanba area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 42–47.
- [23] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 岩石学方法区分页岩中有机质类型[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(4): 514–520.
- Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Jin Zhenkui, et al. Petrographic methods to distinguish organic matter type in shale[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(4): 514–520.
- [24] 李昌伟, 陶士振, 董大忠, 等. 国内外页岩气形成条件对比与有利区优选[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 986–1000.
- Li Changwei, Tao Shizhen, Dong Dazhong, et al. Comparison of the formation condition of shale gas between domestic and abroad and favorable areas evaluation[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(5): 986–1000.
- [25] 管全中, 董大忠, 王淑芳, 等. 海相和陆相页岩储层微观结构差异性分析[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(3): 524–531.
- Guan Quanzhong, Dong Dazhong, Wang Shufang, et al. Analyses on differences of microstructure between marine and lacustrine facies shale reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(3): 524–531.
- [26] 左如斯, 杨威, 王乾右, 等. 川西坳陷须家河组陆相页岩岩相控制下的微观储集特征[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(6): 22–28.
- Zuo Rusi, Yang Wei, Wang Qianyou, et al. Lithofacies-control microscopic reservoir characterization of the continental shale in the Xujiahe Formation of western Sichuan Depression[J]. *Special oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(6): 22–28.
- [27] 周德华, 焦方正, 郭旭升, 等. 川东北元坝区块中下侏罗统页岩油气地质分析[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(6): 596–600.
- Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geologic analysis of Middle-Lower Jurassic shale reservoirs in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2013, 35(6): 596–600.
- [28] 李英强, 何登发. 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*, 2014, 35(2): 219–232.
- Li Yingqiang, He Dengfa. Evolution of tectonic-depositional environment and prototype basins of the Early Jurassic in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(2): 219–232.
- [29] 黄东, 段勇, 李育聪, 等. 淡水湖相页岩油气有机碳含量下限研究——以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(6): 38–45.
- Huang Dong, Duan Yong, Li Yucong, et al. Study on the TOC lower limit of shale oil and gas of freshwater lake facies: A case study on the Jurassic Da'anzhai member in the Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(6): 38–45.
- [30] 刘达望, 张文济, 任康绪, 等. 川东地区大安寨段岩石类型及其组合特征的勘探意义[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(6): 73–80.
- Liu Dawang, Zhang Wenji, Reng Kangxu, et al. Rock types and their association characteristics and significance for exploration in the Da'anzhai Member, Eastern Sichuan[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(6): 73–80.
- [31] 朱彤, 胡宗全, 刘忠宝, 等. 四川盆地湖相页岩气源-储配置类型及评价[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1146–1153.
- Zhu Tong, Hu Zongquan, Liu Zhongbao, et al. Types and evaluation of the source-reservoir configuration of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1146–1153.
- [32] 韩盛博, 李伍. 上扬子区龙马溪组页岩中黄铁矿成因[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(11): 1608–1618.
- Han Shengbo, Li Wu. Study on the genesis of pyrite in the Longmaxi Formation shale in the Upper Yangtze area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(11): 1608–1618.
- [33] Wilkin R T, Arthur M A, Dean W E. History of water-column anoxia in the Black Sea indicated by pyrite framboid size distributions[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1997, 148(3–4): 517–525.
- [34] 曹涛涛, 邓模, 宋之光, 等. 黄铁矿对页岩油气富集成藏影响研究[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(3): 404–414.
- Cao Taotao, Deng Mo, Song Zhiguang, et al. Study on the effect of pyrite on the accumulation of shale oil and gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(3): 404–414.
- [35] 张光荣, 聂海宽, 唐玄, 等. 页岩中黄铁矿类型及其对页岩气富集的影响——以四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩为例[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(3): 459–466.
- Zhang Guangrong, Nie Haikuan, Tang Xuan, et al. Pyrite type and its effect on shale gas accumulation: A case study of Wufeng-Longmaxi Shale in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(3): 459–466.
- [36] 赵迪斐, 郭英海, 朱炎铭, 等. 龙马溪组页岩黄铁矿微观赋孔特征及地质意义[J]. *沉积学报*, 2018, 36(5): 864–876.
- Zhao Difei, Guo Yinghai, Zhu Yanming, et al. Micropore characteristics and geological significance of pyrite in shale rocks of Longmaxi Formation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(5): 864–876.
- [37] Aplin A C, Macquaker J H. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2031–2059.