

卢炳雄, 郑荣才, 梁西文, 等. 四川盆地东部地区大安寨段页岩气(油)储层特征[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1387-1398.

Lu Bingxiong, Zheng Rongcai, Liang Xiwen, et al. Characteristics analysis of Da'anzhai shale gas (oil) reservoirs in eastern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1387-1398(in Chinese with English abstract).

四川盆地东部地区大安寨段页岩气(油)储层特征

卢炳雄¹ 郑荣才¹ 梁西文² 徐文礼¹

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北 武汉 530000)

摘要:以岩心观察描述、野外剖面观测和薄片鉴定为基础,综合利用地质、钻井、孔渗等资料,深入探讨了四川盆地东部地区大安寨段沉积相和储层特征。提出研究区大安寨段沉积相的具体划分方案,认为浅湖生物滩、滩前湖坡和半深湖盆地的相邻产出的过渡部位,是大安寨段发育非均质储层和形成页岩气(油)藏的最佳相带位置;研究区大安寨段储层为特低孔-特低渗、孔隙-裂缝型储层,储集空间主要为裂缝、晶间孔、溶蚀微孔、溶孔及溶洞,其中裂缝对储层的贡献最大,溶蚀孔洞次之;认为压实作用、压溶作用、充填作用、硅化作用和胶结作用是破坏储层储集性能的主要因素,而溶蚀作用和破裂作用是提高和改善储层储集性能的重要因素。综合分析认为,研究区大安寨段储层的发育除了受沉积相、岩石类型、成岩作用及构造作用等因素控制外,还受到泥页岩的有机碳含量、有机质成熟度、脆性矿物含量、厚度和埋藏深度等因素控制。

关键词:沉积相;储集空间;成岩作用;有机碳含量;有机质成熟度

中图分类号:P618.130.2² **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)04-1387-12

1 地质概况

四川盆地东部地区(以下简称川东地区)构造位置隶属川东高陡构造带^[1],发育有一系列NE-SW向延伸和隔档式分布的大型复背斜和复向斜(图1),背斜核部主要出露下三叠统嘉陵江组,背斜两翼至向斜核部依次出露中三叠统雷口坡组、上三叠统须家河组,下侏罗统自流井组、中侏罗统新田沟组、沙溪庙组及上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组等地层。顺隔档式分布的背斜核部走向,发育有多条叠瓦状的逆断层,断面倾NW,被断层切割的断背斜SE翼陡,WN翼缓。川东高陡构造带也是四川盆地

最重要的天然气产地之一,从石炭系黄龙组至三叠系须家河组,于海相碳酸盐岩和陆相碎屑岩地层中发育有多套含气层系和众多大、中型气田,已开发气田多位于高陡背斜构造带^[1],而近期在梁平与万洲交界处的拔山寺向斜南段,于下侏罗统自流井组大安寨段湖相黑色页岩夹薄层介壳灰岩组合中,有多口钻井钻获商业油气流,是继川中和川北地区之后,于川东地区大安寨段非常规油气藏勘探取得的重大进展,不仅显示了川东地区大安寨段具备良好的页岩气(油)成藏条件和勘探潜力^[2-5],同时开拓了该地区高陡构造带向斜构造部位非常规页岩气(油)藏勘探新领域。

收稿日期:2013-11-05;改回日期:2014-04-21

基金项目:中国石油天然气总公司攻关项目(06-01A-02-01)资助。

作者简介:卢炳雄,男,1987年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail:10158258@qq.com。

通信作者:郑荣才,男,1950年生,教授,博士生导师,沉积学和石油地质学;E-mail:zhengrc@cdu.edu.cn。

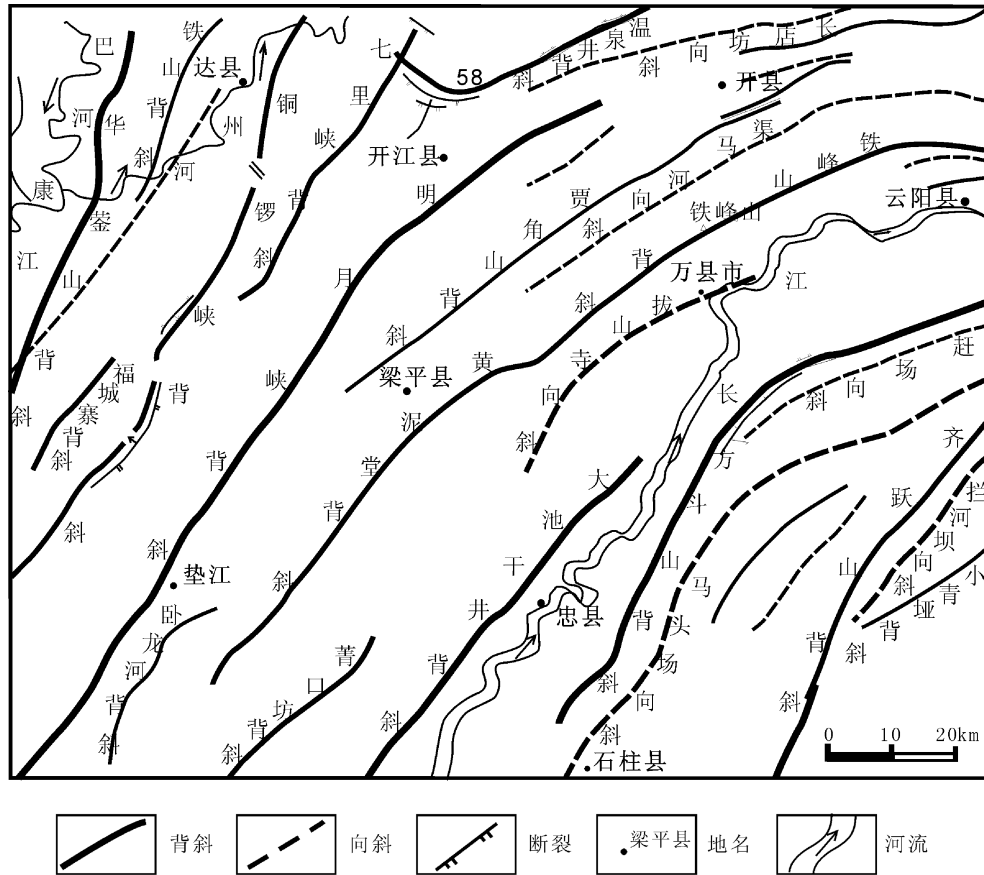


图1 川东地区区域构造略图
Fig.1 Overview of regional structure of eastern Sichuan

2 地层特征

下侏罗统自流井组大安寨段在川东地区分布较广泛,其层位、岩性和厚度都很稳定,以梁平县福绿镇剖面为例(图2),其底与自流井组马鞍山段砂岩和泥岩互层组合为连续沉积关系,顶与中侏罗统新田沟组底部厚层细砂岩为有早期暴露作用的侵蚀冲刷接触关系,自下而上被划分为大三、大二、大一和过渡层4个亚段^[6]及18个小层,沉积演化经历了滨湖、浅湖、湖坡、深-半深湖后,又折回湖坡、浅湖、滨湖和暴露状态的完整湖侵-湖退旋回^[6-8]。岩性在大三亚段主要为介壳灰岩与暗色页岩互层组合;大二亚段则为反映深水还原环境的大套暗色泥质岩夹薄层或纹层状介壳灰岩组合,以该亚段中、上部的暗色页岩颜色最深,连续沉积厚度较大和有机质含量最高,反映湖水位上升达最高点的最大湖泛面位置;大一亚段基本以介壳灰岩为主,偶夹少

量暗色页岩和泥灰岩;过渡层为泥岩与砂岩的互层组合,顶部为富钙结核的灰绿色、紫红色泥岩、钙质粉砂质泥岩互层组合,偶夹粉-细粒砂岩。

3 储层特征

3.1 储层沉积相特征

下侏罗统自流井组大安寨段为典型碳酸盐淡水湖泊沉积,湖盆是在淤塞的马鞍山期湖泊基础上,经稳定构造拗陷沉降而成,虽然继承了马鞍山期湖泊的古地理面貌,但以大安寨期湖侵更广、水体相对较深,并以淡水双壳类生物高速繁殖和快速堆积形成广泛分布的介壳灰岩为重要特征^[6-8]。平面上,围绕湖盆沉降-沉积中心,向湖盆周缘中心依次为厚度趋于减薄、上超和环带状分布滨湖、浅湖、湖坡和深-半深湖4个亚相8个微相(图3、表1),岩性组合半深湖亚相以黑色页岩为主,向湖坡亚相逐渐相变为黑色页岩与泥质介壳灰岩、介壳灰岩不等

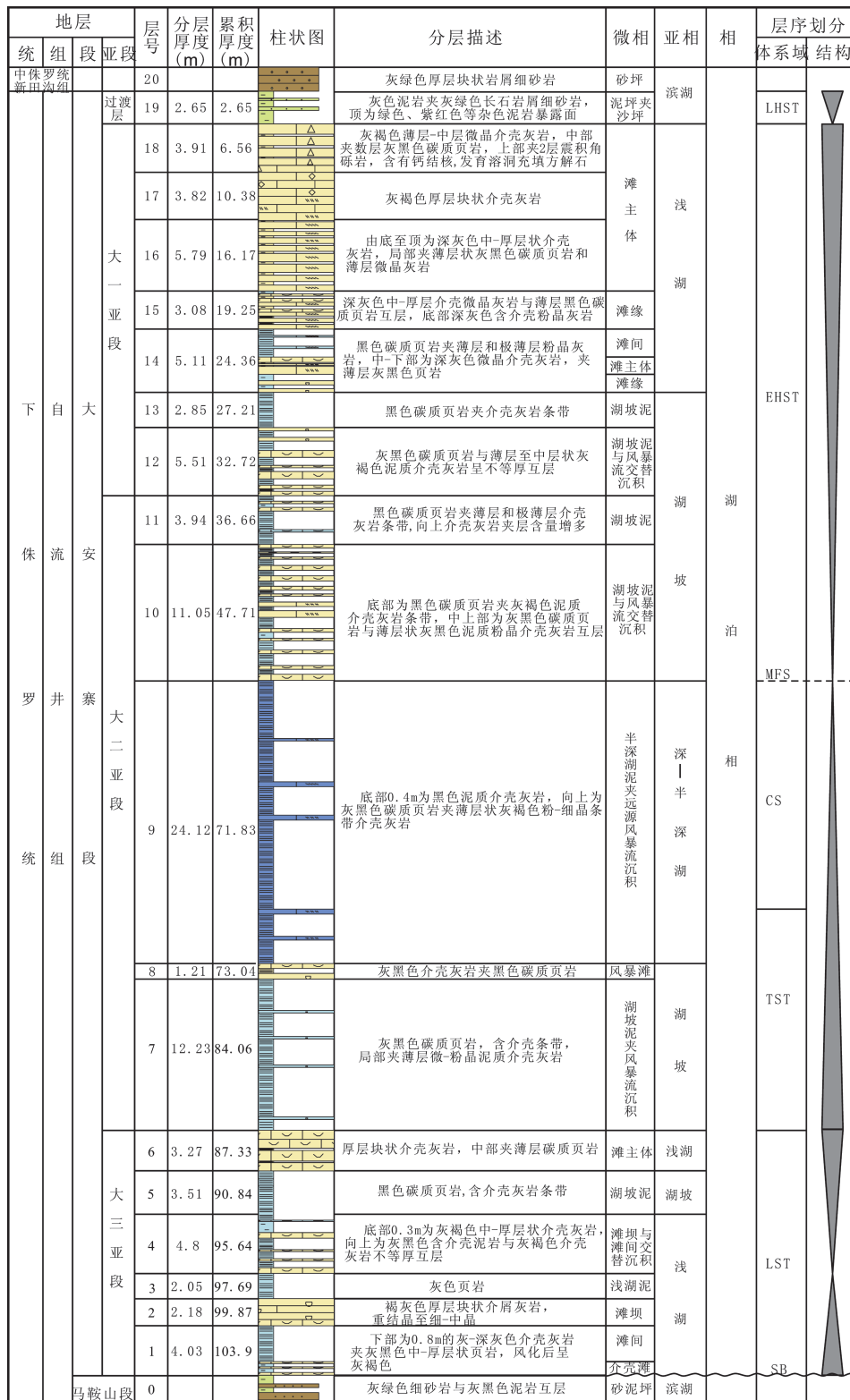


图2 梁平县福禄镇下侏罗统自流井组大安寨段沉积-层序综合柱状图

Fig.2 Comprehensive column of sedimentary facies and sequence stratigraphy of Da'anzhai member of Lower Jurassic Ziliujing Formation in Liangping County

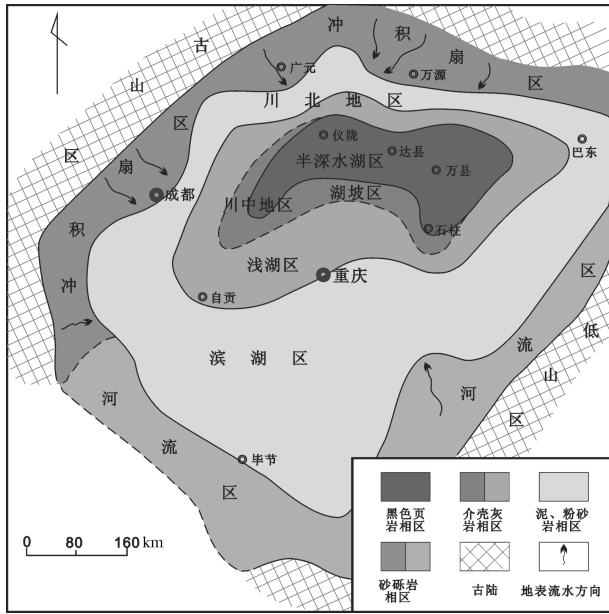


图3 四川盆地大安寨期古地理略图
Fig.3 Lithofacies palaeogeography of Da'anzhai period in eastern Sichuan Basin

厚互层组合、至浅湖亚相进一步相变为厚层块状介壳灰岩夹深灰色-灰黑色泥岩组合,而到了滨湖亚相,则变为灰绿、紫红等杂色钙质泥岩夹粉-细粒砂岩组合。各沉积亚相和微相不仅具有特定的岩性组合和沉积构造,而且往往具有较稳定的产出层位和分布范围。

3.2 储层岩石学特征

大安寨段的岩石类型主要为石灰岩(图4-A)、砂岩(图4-B)、泥质岩(图4-C)、角砾岩(图4-D)4大类,主体以泥岩和石灰岩为主,部分为泥质岩与石灰岩的过渡类型。在以往的研究中认为储集性较好的岩石类型主要为石灰岩类,然而从已钻井岩心的物性资料和试井资料来看,大安寨段储层并非为单一的石灰岩类,泥质岩也具有一定的储集性,

有效储集体在产状上往往为各类灰岩、特别是各类介壳灰岩与暗色泥质岩的不等厚互层组合。勘探实践进一步证实,无论是在剖面上还是平面上,有效储集体大都位于介壳滩与湖坡的过渡带,有较稳定的发育层位和较大的区域分布范围。

(1)石灰岩类,物质组分较为单一而结构类型较多,可细分为亮晶介壳灰岩、亮晶介壳灰岩、微晶介壳灰岩、晶粒灰岩、(含)泥质介壳灰岩和泥质灰岩等。其中介壳灰岩与介壳灰岩的区别主要在于前者的介壳往往被强烈破碎、磨蚀,有较好的分选性,填隙物中的泥粉砂含量低,单层厚度较大,一般都在0.5 m以上,局部可达2~3 m(图4-K),显示其形成于较高能的沉积环境中,浅湖生物滩的主体往往由此类灰岩组成。而后者的淡水双壳类结构保存完整,分选性差,填隙物中泥粉砂含量相对较高,多呈薄层状、条带状和纹层状产出(图4-L),为相对低能和间歇动荡沉积环境产物,浅湖生物滩的滩缘和湖坡中的风暴流沉积往往由此类型组成。晶粒灰岩主要为上述2类灰岩强烈重结晶作用产物,按重结晶强度可细分细晶、中晶、粗晶乃至巨晶灰岩等,都以具有残余介屑或介壳结构为主要特征。

(2)泥质岩类,大安寨段泥质岩类型较多,可细分为(含)粉砂钙质泥页岩、(含)粉砂质泥岩、含介壳泥岩、含介形虫泥岩、(含)介屑粉砂质泥岩、(含)钙质粉砂质泥岩及较纯的泥岩和页岩。

(3)砂岩类,可细分为钙泥质粉砂岩、钙质粉砂岩、钙质细粒岩屑砂岩等,大多为不利储层发育的致密砂岩。

(4)角砾岩类,研究区角砾岩主要有2种,包括震积角砾岩和岩溶角砾岩,其中震积角砾岩在全区分布较为广泛,而岩溶角砾岩仅在局部发育(有关此二类角砾岩的成因及其研究意义将另撰文讨论)。

表1 研究区大安寨段沉积相类型及岩性特征

Table 1 Sedimentary facies type and lithology of Da'anzhai member in the study area

相	亚相	微相	原生沉积构造	岩性组合
淡水碳酸盐湖	滨湖	泥坪	水平层理, 干裂, 钙结核	灰绿色、紫红色和杂色钙质泥岩
		砂坪	水平层理, 沙纹层理, 底冲刷构造	灰白色-灰黄色粉砂岩、细砂岩
湖	浅湖	浅湖泥	水平层理, 生物扰动构造	灰绿色、灰绿-灰黑色页岩、泥岩、粉砂质泥岩
		生物滩	块状层理、波状层理、浪成沙纹层理	浅灰-灰黄色介壳灰岩、介屑灰岩
		湖坡泥	水平层理	黑色泥岩与介壳灰岩不等厚互层
湖泊	深-半深湖	风暴滩	底冲刷构造、包卷层理	灰褐色、深灰褐色介壳灰岩、介壳灰岩
		半深湖泥	水平层理	黑色页岩
		远源风暴滩	袋状构造、微粒序层理	灰褐色、深灰褐色介壳灰岩、介壳灰岩

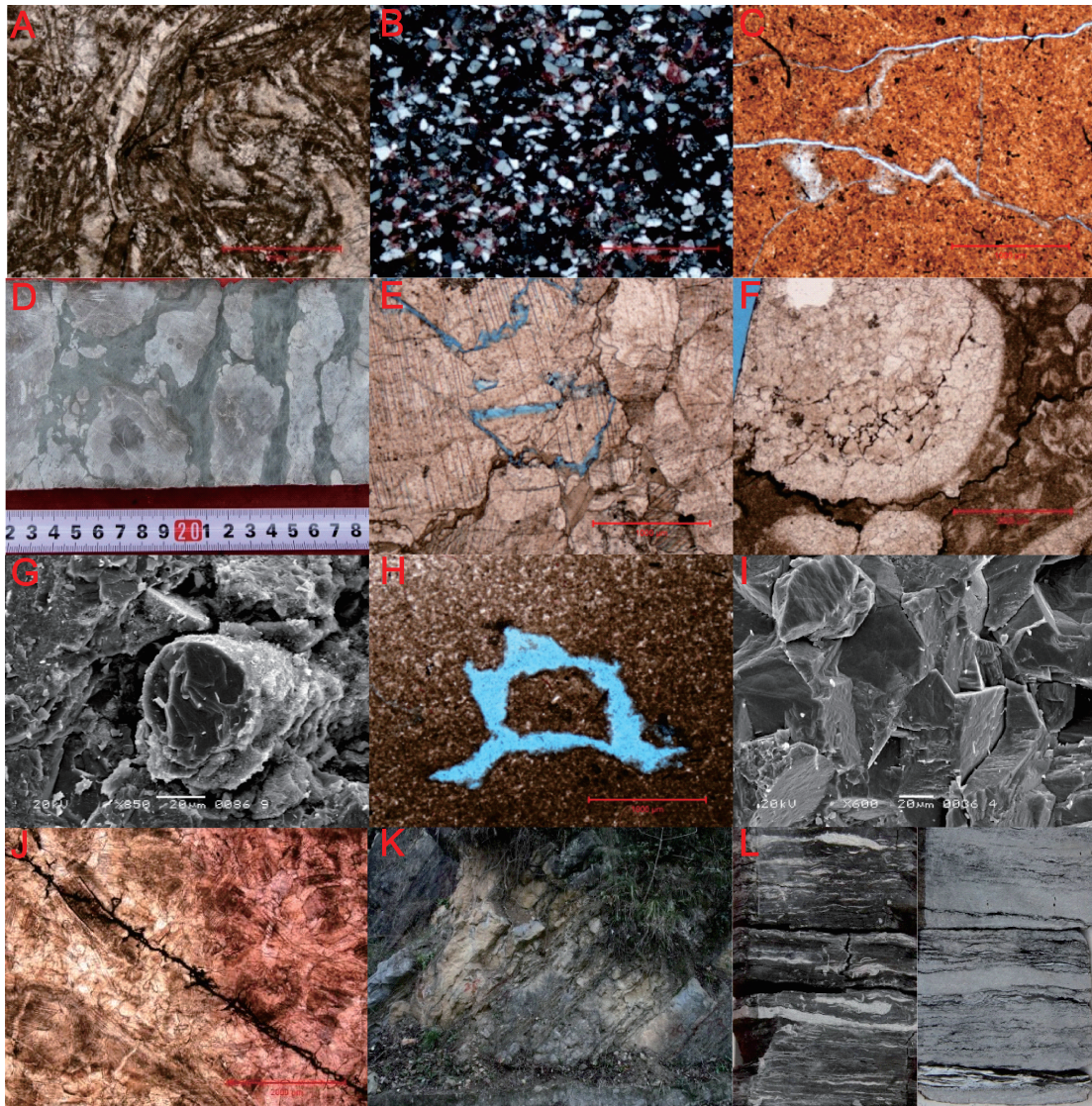


图4 川东地区大安寨段特征

A—泥质介壳灰岩,介壳体被强烈压实变形和破裂,裂缝中充填有沥青;B—钙质细粒岩屑砂岩 C—泥岩,裂缝周围发生溶蚀形成溶孔; D—震积角砾状灰岩,角砾不规则的塑性变形,砾间被灰绿色泥质物充填胶结;E—粗晶灰岩,裂缝及其周围有溶蚀扩大和发育有溶孔的现象; F—粉晶介壳灰岩,壳体重结晶明显且内部有成岩压裂缝,裂缝中充填有沥青;G—含介壳钙质泥岩,沿方解石质生物化石碎屑边缘发育有环形微裂缝和溶蚀微孔; H—泥岩,由强烈溶蚀形成的较大溶孔;I—介壳灰岩,方解石晶体之间呈镶嵌状接触,晶间发育微孔隙;J—介壳灰岩,裂缝中充填有残余沥青; K—自下而上浅湖生物滩微相块状介壳灰岩增多加厚,而暗色泥页岩减薄的沉积序列;L—左为黑色页岩夹条带状和纹层状介壳灰岩,风暴流沉积,右为介壳灰岩夹条带状黑色页岩,岩心孔径为10 cm

Fig.4 Descriptions of Da'anzhai member in eastern Sichuan Basin

A—Argillaceous shell limestone, the shell bodies are strongly compacted and ruptured, and fractures are filled with asphalt; B—Calcarenous fine-grained lithic sandstone; C—Mudstone, around the crack corrosion dissolved pore; D—Seismite brecciated limestone, With irregular plastic deformation of breccia, the spaces between breccia are cemented by pelitic material; E—Macro-grained limestone, corrosion expansion and dissolution pores are prevalently developed around fractures; F—Crystal powder shell limestone, recrystallization occurs in shell body presently with diagenesis fractures inside, which are filled with asphalt; G—Shell calcareous mudstone, on the boundary of calcite broken-fossils develop circular micro-fracture and dissolution pores; H—Mudstone, larger dissolution pores formed by strong corrosion; I—Shell limestone, calcite crystals contacted in mosaic type, where are developed micro-pores; J—Shell limestone, residual asphalt filling in the cracks; K—Block shell limestone of shallow lake biological beach microfacies increases and thickens, while dark mudstone becomes thin from the bottom upward; L—Shell limestone has a banding and lamella distribution in black shale, belonging to storm current deposits (left). Black shale has a banding distribution in shell limestone (right). Diameter: 10 cm

3.3 储集空间类型

从地表露头、岩心、薄片和扫描电镜的观察描述结果,发现川东地区大安寨段微米级以上的原生孔隙已基本上消失,无疑与大安寨段经历了强烈的压实、压溶和新生变形等破坏性成岩作用有关。就宏观的储集空间特征而言,主体以裂缝为主,含少量溶蚀孔、洞(包括晶洞),微观的储集空间则以发育重结晶形成的晶间微孔和溶蚀作用形成的溶蚀微孔为主。

(1) 裂缝

川东地区大安寨段各类岩石中的裂缝非常发育且具有多期次多成因的特点,不仅是重要的储集空间,而且也是油气运移的主要通道^[9-12],对研究区大安寨段储层而言,以裂缝研究最为关键,其类型包括成岩压裂缝(图4-F)、构造裂缝(图4-J)、构造期后溶蚀缝(图4-C、E)3种基本类型,以及由此3种基本类型叠加发育构成的4种复合类型:①成岩压裂缝叠加构造缝;②成岩压裂缝叠加构造期后溶蚀缝、洞;③构造裂缝叠加构造期后溶蚀缝、洞;④成岩压裂缝叠加构造裂缝再叠加构造期后溶蚀缝、洞。在此4个复合类型中,以①型、③型和④型最常见,往往为油气主要运移通道和储集空间,是大安寨段储层最主要的储集空间类型。

(2) 溶蚀微孔

指沉积过程及成岩后由于溶解作用所形成的、孔径 $< 10 \mu\text{m}$ 的孔隙(图4-G)。地下水的溶解作用往往在沉积过程中就已开始进行,并延续到成岩作用结束。成岩作用结束后,溶蚀孔隙仍可在孔隙水条件下继续发育。川东地区大安寨段由孔隙水溶蚀作用形成的微孔比较发育,属一类较为重要的储集空间类型,主要发育在介壳灰岩、含介壳泥岩以及重结晶灰岩中。

(3) 溶孔和溶洞

溶蚀洞孔是在早期孔隙和裂缝基础上,在埋藏成岩过程中经深部热液进一步溶蚀扩大而成^[13,14],孔径介于0.01~2 mm的为溶孔(图4-C),孔径大于2 mm以上的则称之为溶洞(图4-H),个别可达10 mm以上,往往为环边生长有方解石晶簇的晶洞。溶蚀孔洞在各层段的各类岩性中均有分布,但主要分布在裂缝较发育的介壳灰岩、含介壳泥岩和重结晶晶屑灰岩中,数量较少,面孔率在1%左右,大多

数被亮晶方解石、沥青等物质半充填。

(4) 晶间孔

晶间孔是指重结晶形成的晶粒之间的孔隙(图4-I),此类孔隙连通性较差,但仍属于有效储集空间类型。晶间孔在溶蚀作用下仍可继续发育成溶蚀孔,成为重要的储集空间发育在介壳灰岩、含介壳泥岩以及重结晶灰岩中。

综上所述,对大安寨段储层贡献最大的无疑是裂缝及沿裂缝周边溶蚀形成的溶缝、溶洞和溶孔,其次为晶间孔,而溶蚀微孔贡献最小。需强调的是,发育于大二亚段中的大套暗色泥质岩中的溶蚀微孔也较为发育,此特征对于非常规的页岩气藏勘探来说,具有非常重要的油气地质意义。

3.4 储层物性特征

通过岩石薄片分析、压汞资料、物性资料等多种手段来全面展现储层的储集物性,对159个样品实测孔渗进行统计分析结果表明:研究区大安寨段储层的孔隙度最大值为5.92%,最小值为0.02%,平均值为1.47%。其中46%的样品孔隙度小于1%,26%的样品孔隙度为1%~2%,28%的样品孔隙度大于2%;储层的渗透率最大值为 $12.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小值为 $0.057 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,90%的样品渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中30%的样品小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。上述孔、渗特征表明大安寨段储层具有特低孔-特低渗性质。结合岩心观察、铸体薄片及扫描电镜鉴定等分析化验资料和孔隙与裂缝共生的特点,可确定大安寨段储层属于典型的、非均质性极强的致密储层。

4 储层控制因素分析

研究区就大安寨段介壳灰岩储层而言,其类型属于特低孔、低渗-特低渗的裂缝型和孔隙-裂缝型储层,而由介壳灰岩与暗色页岩互层构成的储集组合体在定义上仍属于非常规的页岩气(油)储层的概念范畴。储层的发育除了受沉积环境、岩石类型、成岩作用、构造等常规因素控制外,还受到泥质岩的有机碳含量、有机质成熟度、脆性矿物含量、厚度和埋藏深度等因素控制。

4.1 沉积环境与储层发育关系

大安寨段为典型的大型淡水碳酸盐湖泊沉积,已有的油气地质资料,也已证明大安寨段油气藏主

要赋存在大一亚段和大三亚段^[2-5],油气储层主要出现在各亚段间歇向湖坡推进的浅湖生物滩的滩缘和湖坡风暴流沉积微相的介壳灰岩、含泥质介壳灰岩与暗色泥页岩互层组合中。由此可见,浅湖亚相的高能生物滩微相与湖坡风暴流沉积微相是大安寨段最为有利的储层发育相带,而半深湖—深湖亚相沉积的大二亚段的大套暗色泥质岩夹条带状和纹层状介壳灰岩组合也有油气显示。

需指出的是,在碳酸盐浅湖生物滩、滩缘、滩前湖坡和半深湖等沉积微相的过渡带,不仅成岩压裂缝和构造破裂缝最为发育,而且伴随有较强的溶蚀作用,为有利储层发育的相带部位。更重要的是该部位处在烃源岩(黑色泥页岩)最发育的半深湖—深湖盆地上倾方向,来自半深湖—深湖盆地的压释水和烃类化合物在地层压力梯度或构造力驱动下,优先选择成岩压裂缝和构造缝发育的部位多期次地向浅湖生物滩相带方向运移和排泄^[15]。正如矿物包裹体研究所证明的^[12-13],在成岩埋藏期和构造早期以排放盆地压释水为主,压释水沿各类裂缝侧向运移过程中有强烈溶蚀和充填作用,而构造晚期和构造期后则以运移载有烃类的油田水为主,虽然也有较强的溶蚀作用,但溶蚀孔、洞、缝很快被油气占居而阻碍了孔、洞、缝中次生矿物的沉淀^[13]。致使储集空间得到保存而有利于储层的发育及形成油气藏。由此可见,浅湖生物滩、滩前湖坡和半深湖盆地的相邻产出的过渡部位,是大安寨段发育非均质储层和形成油气藏的最佳相带位置。

4.2 岩石类型与储层发育关系

按不同岩性分别统计大安寨段储层特征(表2),岩石类型与储层有如下关系:砂岩的平均孔隙度相对较好为2.47%,渗透率最差仅为 $0.327 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;泥质岩平均孔隙度为1.9%,渗透率为 $1.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;灰岩平均孔隙度为1.14%,渗透率为 $0.352 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中介壳灰岩的物性与泥质含量有密切关系,随着灰岩中泥质含量增加,孔隙度虽然变化不大,但渗透率

有上升趋势,原因可能与渗入介壳灰岩的泥质有利于破裂和溶蚀作用的发生,可形成粘土矿物颗粒间的微裂缝和溶蚀孔隙有关。

4.3 成岩作用与储层发育关系

成岩作用对大安寨段储层发育影响极大,据岩心观察和薄片鉴定资料,成岩作用与孔隙发育和演化关系可划分为破坏性和建设性两种主要方式。其中,破坏性成岩作用计有压实作用、压溶作用、胶结充填作用和硅化作用;建设性成岩作用主要为破裂作用和溶蚀作用。另外,在前人的研究中早已注意到大安寨段油气富集成藏具很强的非均质性,并认为储层中作为油、气主要运移通道和各种溶蚀孔、洞、缝系统分布的不均一性是导致储层强非均质性的主要因素,而造成溶蚀孔、洞、缝系统不均匀分布的原因与不同沉积微相和岩性组合的层段及差异性成岩作用有关,尤其是受到岩性和岩相差异性组合控制的破裂作用和溶蚀作用,是造成储层强非均质性的关键因素所在。

4.3.1 压实与破裂作用

不同沉积微相和岩性组合的地质体抗压实性和压实过程中体积收缩率的明显差异,是造成压裂作用,以及沿成岩压裂缝发生的溶蚀作用有明显差别的最重要原因(图5),并直接影响到复合储集体中介壳灰岩与暗色泥质岩的组成比值,即不同沉积微相的介壳灰岩与泥质岩互层组合比列所控制的压实破裂作用和溶蚀孔、洞、缝系统的发育状况和分布规律,主要有如下3个特点:

(1)单一的厚层块状浅湖生物滩微相的介壳或介壳灰岩因抗压实性强,体收缩率低($\leq 10\%$),由差异压实造成的成岩压裂缝相对不发育,一般以发育水平压溶缝合线为主,偶见不规则的高角度斜裂缝和直立裂缝,且溶蚀作用弱而充填作用强,大多为无效孔隙;

(2)陆源碎屑浅湖和半深湖盆地相的泥质岩和粉砂质泥岩可压实性最强,体积收缩率最高(\geq

表2 大安寨段各类岩石孔、渗性统计

Table 2 Porosity and permeability statistics of different lithologies in Da'anzhai member

岩性	样品数 /件	孔隙度 最大值/%	孔隙度 最小值/%	平均 孔隙度/%	渗透率最大值 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率最小值 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	平均渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$
灰岩	98	3.22	0.13	1.14	3.102	0.057	0.352
泥岩	57	5.92	0.02	1.9	9.79	0.084	1.76
砂岩	4	0.36	4.80	2.47	0.775	0.19	0.327

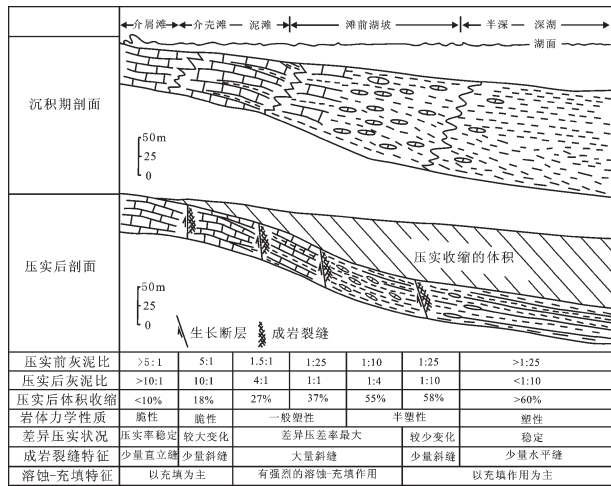


图5 不同沉积微相和岩性组合相变带由差异压实造成的成岩裂缝成因模式图

Fig.5 Combination of different sedimentary facies and lithologies with a phase transition caused by the differential compaction diagenetic cracks

50%), 压实过程中各部位压实率均匀, 可塑性强, 在层内不易产生由差异压实造成的错位和破裂, 相关的成岩压裂缝也就不甚发育。

(3) 灰岩与泥岩的互层组合的岩层中, 随泥质岩的夹层增多和灰岩的减少, 岩体的抗压实性下降而体积收缩率加大, 在两种不同岩性互层组合的过渡带, 势必出现偏向泥岩比例较高的一侧有更大的剪切应力和向下位移的错断距离, 从而在过渡带产生变形、错位和破裂作用, 利于成岩压裂缝的发育, 且在同一互层组合中破裂往往发生在抗压性较强而可塑性较差的灰岩中。因此, 在浅湖生物滩与含泥质的生物滩缘, 生物滩与滩间水道间、生物滩与滩前湖坡过渡带, 以及湖坡与半深湖—深湖盆地之间的几个相变带, 均为易于产生成岩压裂缝的有利部位, 而且无论是剖面上还是平面上, 成岩压裂缝总是相对密集地出现在灰、泥岩比值有明显变化的、偏向灰岩含量较高的部位。特别是浅湖生物滩的滩缘与湖坡过渡带, 随着灰/泥岩互层比值逐渐下降(由 $\geq 4:1$ 变为 $\leq 1:4$), 不仅为有利成岩压裂缝发育部位, 而且由压裂缝提供了盆地压释水排泄通道, 溶蚀作用也更为强烈。

4.3.2 构造破裂作用

如同抗压实性差异, 不同沉积微相和岩性组合

的岩体抗构造破裂强度也有明显差别^[10-12]。岩性单一的灰岩和泥质岩层段中不仅成岩压裂缝较少, 而且构造裂缝也相对不发育, 而在灰、泥岩互层组合中两类裂缝都较发育, 其原因为层面和成岩压裂缝构成的薄弱力学结构面多, 降低了岩体抗压强度和加大了可塑性, 加上成岩压裂缝的发育, 在侧向构造挤压作用下在追踪成岩压裂缝的基础上更易发生破裂有关, 此特征与岩石力学实验的分析结果一致(表3)。由此可见, 大一亚段上部和大三亚段下部除个别层段灰岩或泥岩所占比例过高(>90%), 都存在追踪叠层面缝和成岩压裂缝发育的构造裂缝条件, 在大一亚段下部及其与大二亚段上部的过渡带, 只要有数量较多的介壳灰岩夹层出现, 裂缝发育段就会出现。

4.3.3 溶蚀作用

粘土矿物有很强的抗溶性, 而化学性质活跃的方解石易于溶解。因此, 在相同酸性水介质条件下的溶蚀过程中, 灰岩更容易被溶蚀和形成溶蚀孔、洞、缝。在已钻井岩心和地表露头中, 由溶蚀作用形成的次生孔、洞、缝主要发育在灰岩中, 而在泥岩和粉砂岩中极少见, 显然是溶蚀作用优选灰岩的结果。由于灰岩性脆和抗溶性差, 在成岩过程中易于被压裂破碎和溶蚀形成相通的次生孔、洞、缝系统, 因此, 在储层发育过程中由灰岩的易溶性对储层的发育起着重要的控制作用。

需指出的是, 成岩压裂缝的发育部位, 往往也是岩体最易破裂的薄弱部位, 在同等受力条件下, 由构造期叠加破裂作用和构造期后的溶蚀作用优先选择这些薄弱部位进行, 这就造成了大安寨段沉积—成岩期、构造期、构造期后的多期次破裂和溶蚀作用依次追踪和叠加发育的显著特点。平面上, 这一继承性发展和演化的破裂—溶蚀带往往位于岩性组合有明显差别的相变带, 并围绕低缓隆起的沉积高部位轴部分布, 形成以多期次破裂和溶蚀为主导因素的非常规储层最佳发育位置和展布规律。

4.4 构造形变与储层发育关系

燕山晚期—喜山期发生的构造形变和破裂作用是 大安寨段非常规储层形成作用的至关重要因素, 构造裂缝不仅在灰、泥岩互层组合的剖面中密度相对较高, 平面分布也有类似的特点。仅就现有的钻孔裂缝统计资料来看, 隆起(背斜)或坳陷(向

表3 大安寨段不同岩性及岩性组合的岩石力学参数

Table 3 Rock mechanics parameters of different lithologies and lithologic associations in Da'anzhai member

样品编号	岩性	取样深度/m	地层	块体密度/(g/cm ³)	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
Y20	粉砂岩	2173.2	过渡层	2.68	35.64	0.93
Y19	介屑灰岩	2190.8	大一段	2.69	102.12	5.29
Y15	介屑灰岩	2195.74	大一段	2.68	51.41	1.53
Y16	介屑灰岩	2201.47	大一段	2.69	48.13	2.33
Y5	含介壳泥岩	2212.72	大二段	2.67	52.59	3.18
Y17	含介壳泥岩	2217.6	大二段	2.61	11.32	0.35
Y9	含介壳泥岩	2220.27	大二段	2.61	41.21	1.42
Y8	含介壳泥岩	2222.56	大二段	2.66	22.82	0.57
Y18	含介壳泥岩	2225.12	大二段	2.61	28.28	1.15
Y10	介壳泥岩	2227.5	大二段	2.70	33.78	1.57
Y11	介屑灰岩	2237.53	大二段	2.66	16.97	0.43
Y12	介屑灰岩	2252.56	大三段	2.68	35.45	1.26
Y13	介屑灰岩	2255.76	大三段	2.68	30.32	1.26
Y14	介屑灰岩	2259.9	大三段	2.67	48.86	2.09
Y1	介屑灰岩	同2-2	大三段	2.80	103.0	5.93
Y2	粉砂岩	长3-1	大三段	2.64	49.81	1.63
Y3	介屑灰岩	长5-2	大三段	2.72	95.26	2.45
Y4	介屑灰岩	长9-1	大二段	2.63	48.49	1.90
Y6	介屑灰岩	福15-1	大一段	2.75	34.81	1.57
Y7	介屑灰岩	黄2-2	大一段	2.67	54.02	3.30

斜)构造近轴部的两侧裂缝的发育密度都要更大一些,显然与构造轴部应力集中,其两侧剖面剪切破裂作用相对较强有关,因而是构造裂缝相对发育和密度较高的部位,由此显示出构造对储层的位控作用。针对9个野外剖面进行的裂缝调查工作,发育有NE、近SN、NW和近东西向4个裂缝组系(图6)。区域上,构造变形强烈的背斜区以发育NE向断裂和中-高角度的斜交裂缝组系为主,而构造相对较平缓的向斜区以发育NW向的低-中角度斜交缝裂缝组系为主,表明构造形变与裂缝发育特征有密切的关系,其中低-中角度斜交缝裂缝组系更有利于裂缝型储层的发育,川东地区已钻获商业性页岩气(油)流的井主要位于构造相对较平缓的向斜区,与该部位更有利于裂缝型储层的发育密切相关。

5 成藏条件综合评价

在2013年AAPG年会上,富有机质的泥页岩-碳酸盐岩混合沉积体系成为被高度关注的热点,理论上,页岩气是以吸附和游离状态赋存于具有生烃能力的泥、页岩地层中的天然气,储层往往为富含有机质的暗色高碳泥页岩。对照页岩气所具有的集烃源岩、储集岩、盖层为一体的,以隐蔽聚集、吸

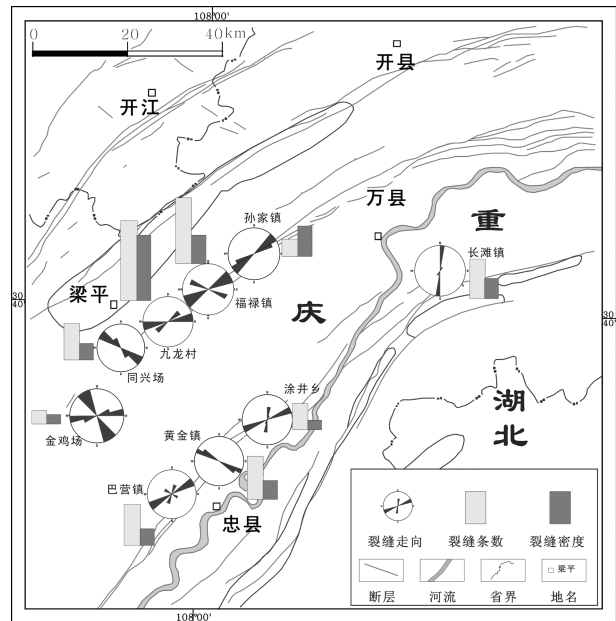


图6 大安寨野外裂缝走向与密度分布图
Fig.6 Fracture orientation and density distribution of Da'anzhai member

附成藏等独立含油气系统的特点^[15-17],研究区大二亚段大套暗色页岩夹薄层状、条带状和纹层状介壳灰岩组合体无疑已具备优越的页岩气成藏条件。

在大二亚段采集的40件介壳灰岩样品中,有37件TOC含量高于灰岩烃源岩的0.1%下限值,其中24件大于0.25%,属于最好的碳酸盐岩烃源岩。另外,大二亚段介壳灰岩含少量泥质,含有少量泥质的碳酸盐岩往往具有较好的生油潜力^[18]。与介壳灰岩相比较,暗色页岩生烃能力强,基于浓度差的存在,生成的油气由浓度相对较高的泥质岩被运移到相对较低的介壳灰岩中,在浓度差产生的毛细管压力封闭作用下被封存起来,同时可作为也成为了页岩气(油)藏的盖层或隔层,并随生烃量增加,可产生异常高压而出现局部的超压封闭作用,由此在大二亚段介壳灰岩与暗色页岩的互层组成体中形成自生、自储、自盖的页岩气(油)成藏系统。

有关页岩气(油)藏的成藏条件评价,本项目研究以美国Barnett页岩和Ohio页岩气藏勘探经验为指导^[19],结合川东地区大安寨段页岩TOC含量高、类型较好,演化程度适中、累积厚度较大、分布范围较广且较稳定、埋藏深度适中、脆性矿物含量高和具有较好的烃源岩性质等特点,与美国众多页岩气盆地和中国南方页岩气勘探近期取得突破性进展的志留系龙马溪页岩的各项参数进行对比(表4),同时考虑川东地区大安寨段页岩分布面积都在2000 km²以上,地质历史中始终深埋地腹而未被剥蚀,地表条件以地形高差相对较小丘陵和中山为主,大、小江河密集分布,水资源丰富及交通便利等

相关的辅助条件,认为川东地区大安寨段页岩具备非常优越的页岩气(油)成藏条件^[21-23]。

6 结 论

(1)川东地区大安寨段为淡水湖泊沉积体系,发育有滨湖、浅湖、湖坡和深—半深湖4个亚相,对应完整的湖侵—湖退旋回过程,浅湖生物滩、滩缘、湖坡和半深湖盆地的相邻产出的过渡部位,是大安寨段非均质储层和形成页岩气(油)藏的最佳相带位置。

(2)川东地区大安寨段为特低孔—特低渗、孔隙—裂缝型储层,储层岩石类型主要为介壳灰岩、泥质介壳灰岩、介壳泥质灰岩和暗色泥页岩等,有效的储集体并非为单一的灰岩,而是在产状上往往为各类灰岩与暗色泥页岩的不等厚互层组合,有较大和较稳定的区域分布范围和层位。

(3)非常规的储层(或储集体)主要发育于大一亚段和大三亚段,储集空间包括裂缝、溶蚀微孔、晶间孔和溶孔、溶洞,其中对储集性能贡献最大的是裂缝,储层(或储集体)发育受岩石类型、沉积环境、成岩作用及构造作用等因素的复合控制。

(4)大二亚段的大套暗色页岩夹条带状和纹层状介壳灰岩组合体,具备优越的页岩气成藏条件。通过与美国众多页岩气盆地和中国南方页岩气勘探近期取得突破性进展的志留系龙马溪页岩各项参数进行对比,确定川东地区大安寨段页岩具备非

表4 川东地区大安寨段页岩与美国各页岩气藏和中国南方龙马溪页岩评价参数对比

Table 4 Evaluation parameter comparison between shale of Da'anzhai member of eastern Sichuan, shale gas reservoirs in United States and shale in Longmaxi area of southern China

评价参数	页岩名称						
	Barnett	Ohio	New Albany	Antrim	Lewis	龙马溪页岩	大安寨页岩
所在盆地	德克萨斯州福特沃斯盆地	肯塔基州阿巴拉契亚盆地	印第安纳州伊利诺斯盆地	密歇根州 Otsego 盆地	新墨西哥州圣胡安盆地	四川盆地	四川盆地
盆地类型	前陆盆地	山前拗陷	复合盆地	内克拉通盆地	山前拗陷	前陆盆地	前陆盆地
层位	石炭系	泥盆系	泥盆系	泥盆系	白垩系	志留系	侏罗系
岩性组合	含硅 炭质页岩、灰岩和少量白云岩	炭质页岩和粉-细粒岩互层	褐色页岩、灰色页岩	薄层状富黄铁矿和有机质的粉砂质页岩	富含石英的泥岩	炭质页岩、粉砂质泥页岩、泥灰岩	炭质页岩、泥质介壳灰岩
有机碳含量/%	1.8~4.5	0~4.7	1.0~25.0	0.3~24.0	0.45~2.5	0.2~6.0	0.16~2.16
成熟度 Ro/%	1.0~1.3	0.3~1.3	0.3~1.0	0.3~0.6	1.60~1.88	2.4~3.6	1.1~1.46
页岩厚度/m	15~61	9~30	15~30	21~37	61~91	20~120	40~60
埋藏深度/m	1981~2591	610~1524	183~1494	183~32	913~1829	2000~4000	2180~2720
脆性矿物含量/%	35~50	45~60	46~50	20~41	50~52	51.5	60.4
成因类型	热解气	热解气	生物气	热解气、生物气	热解气	热解气	热解气
干酪根类型	II型	I型、IIA型	I型	I型	I型	I型、IIA型	I型、IIA型、
总孔隙度/%	4.0~5.0	4.7	10.0~14.0	9.0	3.0~5.5	<2.0	0.2~5.92

注:★脆性矿物组合包括石英、斜长石、方解石、白云石和少量菱铁矿、黄铁矿等非黏土矿物组合。

常优越的页岩气(油)成藏条件。

致谢:审稿专家及编辑部杨艳老师对文章提出了宝贵修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] 李忠权,冉隆辉,陈更生,等.川东高陡构造成因地质模式与含气性分析[J].成都理工大学学报,2002,29(6):605-609.
Li Zhongquan, Ran Longhui, Chen Gengsheng, et al. Genetic geologic model and gas-bearing analysis of high and steep structures in east Sichuan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(6): 605-609(in Chinese with English abstract).
- [2] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156.
Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156(in Chinese with English abstract).
- [3] 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 Su, Xu Hongmei. The oil-rich area prediction of thin limestones in Da'anzhai member, Sichuan[J]. China Petroleum Exploration, 2001, 6(2): 44-50(in Chinese with English abstract).
- [4] 邓康龄.四川盆地柏垭—石龙场地区自流井组大安寨段油气成藏地质条件[J].油气地质与采收率,2001,8(2):9-13.
Deng Kangling. Geological conditions of Da'anzhai oil-gas reservoir forming in artesian well group of Baiya-Shilongchang region in Sichuan basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(2): 9-13(in Chinese with English abstract).
- [5] 罗啸泉,张涛.川西回龙地区大安寨段成藏条件分析[J].天然气技术,2007,1(6):15-16.
Luo Xiaoquan, Zhang Tao. Analysis of reservoir-forming condition of Da'anzhai member in Huilong area of west Sichuan[J]. Natural Gas Technology, 2007, 1(6): 15-16(in Chinese with English abstract).
- [6] 郑荣才.四川盆地侏罗统大安寨段高分辨率层序地层学[J].沉积学报,1998,16(2):42-49.
Zheng Rongcai. High resolution sequence stratigraphy of Daanzhai Formation, lower Jurassic in Sichuan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(2): 42-49(in Chinese with English abstract).
- [7] 胡宗全,郑荣才,熊应明.四川盆地侏罗统大安寨组层序分析[J].天然气工业,2000,20(3):34-37.
Hu Zongquan, Zhen Rongcai, Xiong Yingming. Sequence analysis of Da'anzhai Formation of lower Jurassic in Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(3): 34-37(in Chinese with English abstract).
- [8] 马如辉.利用层序地层学方法预测川东北大安寨段介屑滩分布[J].天然气工业,2005,25(02):58-60.
Ma Ruhui. Predicting the distribution of bio-fragmental beaches in Da'anzhai member in northeast Sichuan by sequence stratigraphic method[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(02): 58-60(in Chinese with English abstract).
- [9] 郑荣才.顺磁共振测年和包裹体在大安寨段成藏模式研究中的应用[J].矿物岩石,1997,17(4):47-53.
Zheng Rongcai. Application of ESR dating and fluid inclusion in study on the forming models for of petroleum accumulation in the Da'anzhai formation, lower Jurassic from Sichuan basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1997, 17(4): 47-53(in Chinese with English abstract).
- [10] 郑荣才.四川盆地大安寨段储层裂缝的声发射实验[J].成都理工大学学报,1997,24(4):1-8.
Zheng Rongcai. Acoustic emission experiment of reservoir fracture of the Da'anzhai formation, lower Jurassic in Sichuan basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997, 24(4): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [11] 赵辉,司马立强,颜其彬,等.川中大安寨段裂缝评价及储层产能预测方法[J].测井技术,2008,32(3):277-280.
Zhao Hui, Sima Liqiang, Yan Qibin, et al. Assessment of fracture and method of production forecast of Daanzhai reservoir[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(3): 277-280(in Chinese with English abstract).
- [12] 胡宗全,童孝华,王允诚.川中大安寨段灰岩裂缝分形特征及孔隙结构模型[J].成都理工大学学报,1999,26(1):31-33.
Hu Zongquan, Tong Xiaohua, Wang Yuncheng. Fractal characteristic of fractures and model of pore structure, Daanzhai shelly limestone, lower Jurassic, central Sichuan field[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(1): 31-33(in Chinese with English abstract).
- [13] 郑荣才,陈洪德,刘文均,等.川北大安寨段储层深部热水溶蚀作用[J].石油与天然气地质,1996,17(4):293-301.
Zheng Rongcai, Chen Hongde, Liu Wenjun, et al. Deep hydrothermal dissolution of Da'anzhai reservoirs in north Sichuan[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(4): 293-301(in Chinese with English abstract).
- [14] 郑荣才,刘文均,李安仁.川北下侏罗统自流井组大安寨段灰岩非常规储层包裹体研究[J].地质论评,1997,43(5):264-275.
Zheng Rongcai, Liu Wenjun, Li Anren. Fluid inclusion study of unconventional reservoirs in limestone of the Da'anzhai member of the lower Jurassic Ziliujing formation in northern Sichuan[J]. Geological Review, 1997, 43(5): 264-275(in Chinese with English abstract).
- [15] 王祥,刘玉华,张敏,等.页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J].天然气地球科学,2010,21(2):350-356.
Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356(in Chinese with English abstract).

- [16] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 27-32.
Li Xinjing, Lv Zonggang, Dong Dazhong, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 27-32(in Chinese with English abstract).
- [17] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Contributions in petroleum geology and engineering[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [18] 郝石生. 对碳酸盐生油岩的有机质丰度及其演化特征的讨论[J]. 石油实验地质, 1984, 6(1): 67-68
Hao Shisheng. Richness of organic matter and its evolutionary characteristics in carbonate source rocks[J]. Experimental Petroleum Geology, 1984, 6(1): 67-68(in Chinese with English abstract)
- [19] 李大荣. 美国页岩气资源及勘探历史[J]. 石油知识, 2004, 104(3): 61.
Li Darong. American shale gas resources and their exploration history[J]. The Knowledge of Oil, 2004, 104(3): 61(in Chinese with English abstract)
- [20] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491(in Chinese with English abstract).
- [21] 黄羚, 徐政语, 王鹏万, 等. 桂中坳陷上古生界页岩气资源潜力分析[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 497-506.
Huang Ling, Xu Zhengyu, Wang Pengwan, et al. An analysis of resource potential of Upper Paleozoic shale gas in Guizhong depression[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 497-506(in Chinese with English abstract).
- [22] 汪凯明. 桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件浅析[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 430-438.
Wang Kaiming. Shale gas accumulation conditions of Devonian strata in Guizhong depression[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 430-438(in Chinese with English abstract).
- [23] 姜呈馥, 王香增, 张丽霞, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1880-1888.
Jiang Chenfu, Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, et al. Geological characteristics of shale and exploration potential of continental shale gas in 7th member of Yanchang Formation, southeast Ordos Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1880-1888(in Chinese with English abstract).

Characteristics analysis of Da'anzhai shale gas (oil) reservoirs in eastern Sichuan Basin

LU Bing-xiong¹, ZHENG Rong-cai¹, LIANG Xi-wen², XU Wen-li¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Exploration & Development Research Institute of Jiangnan Oilfield Branch Company, Sinopec, Wuhan 530000, Hubei, China)

Abstract: Based on the core and field section observation and microscopic section in combination with analysis of geology, drilling and physical properties data, this paper discusses in detail sedimentary facies and reservoir characteristics of Da'anzhai member in eastern Sichuan Basin. The division scheme of sedimentary facies in Da'anzhai member is put forward, which argues that the transitional parts at the edge, on the slope and on the semi-deep lake biasing deep lake side are favorable for developing heterogeneity and shale gas (oil) reservoirs, that reservoirs of Da'anzhai member in the study area belong to ultra-low porosity and permeability pore fracture type reservoirs, whose reservoir space comprises of fracture, intracrystalline pore, eroded micro-pores, solution openings and dissolved caves, dominated by fractures, with solution openings and dissolved caves taking the second place. In addition, compaction, pressure solution, cavity filling, silicification and cementation are main factors adversely affect reservoir quality, while dissolution and rupture process improve reservoir quality. Therefore, The development of reservoirs in Da'anzhai member is not only controlled by sedimentary facies, rock type, diagenesis and tectonics but also affected by content of organic carbon, maturity of organic, brittle mineral content, thickness and buried depth of shale in the study area.

Key words: sedimentary facies; reservoir space; diagenesis; content of organic carbon; maturity of organic matter

About the first author: LU Bing-xiong, male, born in 1987, doctor, majors in mineralogy, petrology and economic geology; E-mail: 10158258@qq.com.

About the corresponding author: ZHENG Rong-cai, male, born in 1950, professor, supervisor of doctor candidates, engages in study and teaching of sedimentology and petroleum geology; E-mail: zhengrc@cdut.edu.cn.