

川东北元坝地区侏罗系大安寨段黑色页岩沉积及储层特征

金治光, 谢佳彤, 刘苗苗, 倪楷

中国石化勘探分公司物探研究院, 四川 成都

收稿日期: 2023年8月4日; 录用日期: 2023年9月12日; 发布日期: 2023年9月19日

摘要

侏罗系自流井组大安寨段是现阶段四川盆地湖相页岩勘探开发的热点层位, 本文通过岩石观察与特殊元素测井分析, 场发射扫描电镜观察、岩石孔隙度实验、X射线全岩衍射(XRD)、低温氮气吸附以等实验分析, 对川东北元坝地区侏罗系大安寨段二亚段湖相页岩的沉积环境及储层特征进行系统分析, 研究结果显示: 大安寨段页岩Sr/Cu介于2.50~8.34之间, Sr/Ba介于0.15~0.47之间, V/(V+Ni)在0.65~0.79之间, 指示温暖、潮湿环境及缺氧的淡水湖盆沉积, 发育滨湖、浅湖、半深湖3种沉积相, 发育层状泥岩夹介壳灰岩、砂-灰-泥三元混积、纹层-层状泥岩夹介壳灰岩、厚层状灰泥混积等四种岩性组合。页岩矿物类型以粘土矿物、石英、方解石为主, 含少量长石、白云石以及黄铁矿; 孔隙类型以无机孔隙发育为主, 尤其是粘土晶间孔隙, 有机质孔隙含量相对较少。纹层-层状泥岩夹介壳灰岩相及层状泥岩夹介壳灰岩相因“源-储”配置良好, 具有高脆性、高孔隙度及高含气量特点, 同时页理缝及介壳纹层发育, 成为大安寨段开发的主要层段。

关键词

元坝地区, 大安寨段, 沉积环境, 岩相, 储层特征

Sedimentary and Reservoir Characteristics of Black Shale in the Jurassic Da'anzhai Member in the Yuanba Area of Northeastern Sichuan

Zhiguang Jin, Jiatong Xie, Miaomiao Liu, Kai Ni

Geophysical Prospecting Institute, Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 4th, 2023; accepted: Sep. 12th, 2023; published: Sep. 19th, 2023

文章引用: 金治光, 谢佳彤, 刘苗苗, 倪楷. 川东北元坝地区侏罗系大安寨段黑色页岩沉积及储层特征[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(9): 1066-1078. DOI: 10.12677/ag.2023.139102

Abstract

Da'anzhai member of Ziliujing Formation in Jurassic is a hot zone for lacustrine shale exploration and development in Sichuan Basin at present. In this paper, through rock observation and logging analysis of special elements, field emission scanning electron microscope observation, rock porosity experiment, X-ray whole rock diffraction (XRD), cryogenic nitrogen adsorption and other experimental analysis, the sedimentary environment and reservoir characteristics of lacustrine shale in the second sub-member of Jurassic Da'anzhai Member in Yuanba area, northeast Sichuan Basin were systematically analyzed. The research results show that: The Sr/Cu, Sr/Ba, and V/(V+Ni) of the Da'anzhai Member shale range from 2.50 to 8.34, 0.15 to 0.47, and 0.65 to 0.79, indicating the warm and humid environment and anoxic freshwater lacustrine sedimentary facies, shallow lacustrine sedimentary facies and semi-deep lacustrine sedimentary facies. There are four lithologic assemblages: bedded mudstone intercalated shell limestone, sand-lime-mud ternary mixing, laminated-bedded mudstone intercalated shell limestone, thick bedded plaster mixing. Shale minerals are mainly clay minerals, quartz and calcite, with a small amount of feldspar, dolomite and pyrite. The pore types are mainly inorganic pores, especially intergranular clay pores, while the content of organic matter pores is relatively small. Laminate-bedded mudstone intercalated limestone facies and bedded mudstone intercalated limestone facies have the characteristics of high brittleness, high porosity and high gas content due to their good source-reservoir configuration. At the same time, cleavage fractures and intercalated laminae are developed, which become the main strata in the Development of Da'anzhai Member.

Keywords

Yuanba Area, Da'anzhai Section, Sedimentary Environment, Lithofacies, Reservoir Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为我国页岩气勘探开发的主要地区，四川盆地及周缘海相页岩气的开发取得了巨大成功，随着页岩气成藏理论及开发技术研究的进步，人们开始聚焦于海陆过渡相及湖相页岩的勘探。侏罗系自流井组大安寨段作为四川盆地湖相页岩开发的重点层位，国内外公司相继针对该层位进行了页岩气勘探，并取得一定的成果[1][2]，杨跃明等认为大安寨段“源-储”配置良好，具备优越的成藏基础[3][4]，但是早期的页岩气勘探主要集中于海相富含有机质页岩[5][6]，针对大安寨段湖相页岩研究起步晚，研究程度低，对湖相页岩成藏机理、资源评价、沉积及储层评价方面知之甚少。中石化在2021年开始对四川盆地大安寨段湖相页岩进行资源勘探，并先后在元坝地区布置多口页岩气井，但不同页岩气井取得的效果差异明显，这主要与大安寨段“源-储”条件有关[7][8][9]。优质沉积相带是保证充足烃源供应的物质基础，湖相沉积条件下，水体变化快，页岩纵向岩性变化较快[10][11]，不同岩相条件下发育的储层储集性能存在明显的差异，寻找优质储层是湖相页岩勘探的关键(图1)。

对比海相页岩，湖相页岩具有黏土矿物含量高、石英含量低、有机质低、单层厚度薄及纵向变化快的特点。储层有机质含量低，有机质热演化程度相对较低，有机孔含量偏低，储集空间主要为无机孔，

包括晶间孔、粘土矿物粒间孔、粒内孔和微裂缝等[12] [13] [14] [15]。元坝地区大安寨段沉积时期水体动荡频繁,岩性纵向变化快,优质沉积相带及岩性组合控制着优质页岩展布及含气性[16] [17]。因此,本文采用元素地球化学的方式进行古气候、水体古盐度、古生产力及水体氧化还原环境分析,划分平面沉积相分布,通过岩心观察及电镜观察划分储层岩相及纵向典型的岩性组合,集合不同岩性组合下页岩含气性差异,对比不同岩性组合储层有效性,划分优质岩性组合及分布。

2. 区域地质背景

元坝地区位于四川省东北部广元、南充和巴中市境内,构造位置位于扬子板块北缘,川中隆起与川北坳陷的过渡带,与秦岭褶皱带相邻,区域构造上属于米仓山、大巴山弧形构造带与川东弧形褶皱带叠加区块[7] [18]。整体处于九龙山背斜构造带及池溪凹陷的南端,南为苍溪-巴中低缓构造带,东北与通南巴背斜构造带及通江凹陷相邻[19]。元坝区块位于九龙山、通南巴背斜构造带及苍溪-巴中低缓构造带等三个大型构造带的接触部分,构造形变弱、断裂相对不发育。印支运动以前,元坝地区处于海相沉积,受印支运动的影响,元坝地区结束海相沉积,进入陆相沉积阶段,侏罗系时期主要发育河流与湖泊相沉积,发育多套暗色泥页岩。

侏罗系自流井组大安寨段沉积时期,元坝地区构造造山运动弱,盆地拗陷速率远大于陆源碎屑堆积速率,湖盆面积快速扩大,大安寨段分布广泛,大安寨段向下与马鞍山段、向上与千佛崖组泥岩均呈整合接触[20]。根据岩性及沉积旋回的差异,大安寨段可以分为三段[21],其中大一段岩性主要为介壳灰岩夹灰色泥岩、粉砂岩;大二段岩性主要为深灰色泥岩、粉砂质泥岩,夹薄层介壳灰岩;大三段岩性主要为深灰色泥岩、粉砂质泥岩,夹薄层介壳灰岩、粉砂岩。

3. 大安寨段页岩沉积环境

水体环境的差异会造成沉积有机质干酪根类型、有机质含量及古生产力等[22] [23]。沉积古水体盐度及古氧相会造成水体沉积及氧化还原环境的差异,同时对储层岩性产生一定的影响。为分析元坝地区大安寨段沉积时期古环境,采用地球化学特殊元素分析手段从古气候、古水体盐度、氧化还原性及古生产力等四个方面进行探讨。

3.1. 古气候及古盐度

古气候主要通过影响沉积水体的变化进而造成有机质供给差异,对原始有机质富集及保存产生影响。前人对湖盆沉积研究中认为,纵向上,湖盆水体存在明显的密度分层,湖盆表层水温暖,是低等浮游生物的主要富集层,底部深盆水寒冷,有利于有机质的沉积保存。古盐度能有效指示水体的盐碱差异,常用于区分海相、过渡相及陆相沉积环境。元素地球化学研究认为,不同沉积水体环境下微量元素会存在明显的差异,因此,采用特征微量元素含量或比值可用于指数古氧相及古气候。

Sr、Cu、Ba 元素可以指示沉积温度、湿度及水体咸-淡差异,通常 Sr/Cu 比值用于古气候的分析, Sr/Ba 用于判断沉积水体古盐度(表 1)。前人研究认为 Sr/Cu 比值介于 1~10 之间时,指示温暖、湿润的气候;当 Sr/Cu 比值在 10 以上时,指示干燥炎热的气候[24]。淡水环境中, Sr 和 Ba 以重碳酸盐的形式存在,咸水条件下, Sr 和 Ba 以硫酸钡和硫酸锶形式沉淀,当 Sr/Ba < 0.6 代表淡水环境; Sr/Ba > 1 代表咸水环境, Sr/Ba 在 0.6~1.0 之间代表半咸水环境[25]。

结合本次 YY2 井的不同元素含量及纵向变化,大安寨段 Sr/Cu 介于 2.50~8.34 之间,其中一亚段 Sr/Cu 介于 5.03~7.65 之间,二亚段介于 2.65~8.34 之间,三亚段介于 2.54~2.64 之间, Sr/Ba 比值介于 0.1~0.47 之间,其中一亚段介于 0.2~0.35 之间,二亚段介于 0.1~0.47 之间,三亚段介于 0.11~0.13 之间,指示大安

寨段沉积时期气候温暖、潮湿。湖盆沉积水体环境为淡水沉积，这有利于低等微生物的繁盛，为有机质的富集提供了及基础。

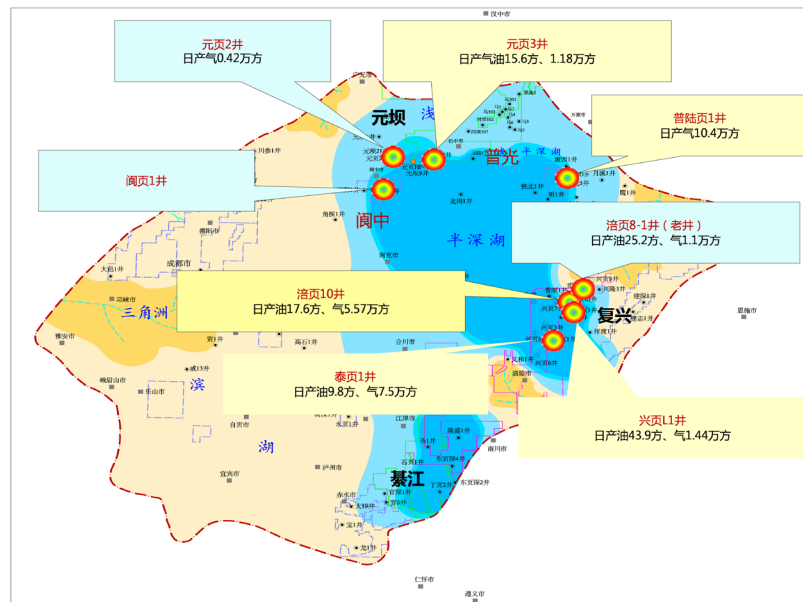


Figure 1. Diagram of sedimentary facies and key Wells in Yuanba area
图 1. 元坝地区沉积相和重点井示意图

Table 1. Geochemical criteria of sedimentary environment in Da'anzhai Member, Yuanba area
表 1. 元坝地区大安寨段沉积环境地球化学判别指标

古环境	判别指标	判别标准	大安寨段	结果
古气候	Sr/Cu	温湿气候(≤ 10); 干热气候(> 10)	2.50~8.34	温暖潮湿气候
古盐度	Sr/Ba	咸水环境(> 1); 半咸水环境(0.6~1.0); 淡水环境(< 0.6)	0.15~0.47	淡水环境
古氧化还原性	V/(V+Ni)	氧化环境(< 0.46); 贫氧环境(0.46~0.6); 缺氧环境(> 0.6)	0.65~0.79	缺氧环境

3.2. 古氧化还原性及古生产力

水体古氧化还原性在有机质的沉积速率、水体氧化还原性及源岩矿物组成等方面都有一定的影响，决定了有机质的保存及生烃基础。页岩中沉积型黄铁矿为还原环境下的产物，可以有效指示水体的氧化还原环境，页岩黄铁矿含量与 V/(V + Ni) 比值之间具有良好的相关性，因此 V/(V + Ni) 值可以用于水体氧化还原性的量化评价指标，氧化环境中 V/(V + Ni) 比值小于 0.46；贫氧水体环境中 V/(V + Ni) 比值介于 0.46~0.6 之间；缺氧水体环境中 V/(V + Ni) 大于 0.6。YY2 井特殊元素分析结果显示页岩 V/(V + Ni) 比值介于 0.65~0.79 之间(表 1)，反映了大安寨段沉积时期湖泊水体处于缺氧环境。

古生产力是衡量页岩生烃潜力的重要指标，前人针对海相页岩研究中认为有机质含量与 Mo 和 Cu 含量具有明显的正相关关系，能够作为衡量古生产力大小的评价指标。一般而言，Mo 和 Cu 含量越高，页

岩石生产力越强。元坝地区大安寨二亚段②、④小层 TOC 及微量元素 Mo 与 Cu 含量较高, 古生产力高。

3.3. 沉积相展布

侏罗系大安寨段沉积时期, 元坝地区整体构造和环境稳定, 造山运动微弱, 陆源碎屑沉积较少, 温暖湿润环境造成水体清澈, 双壳、腹足类低等生物大量繁衍, 死亡后壳体在浅湖区沉积形成介壳滩。根据纵向岩性组合特征, 大安寨段经历了一个完整的湖进-湖退过程, 大安寨三亚段时期, 受湖侵时间的影响, 元坝地区发育滨湖-浅湖沉积, 持续时间短, 大安寨二亚段, 随着湖侵事件持续, 元坝地区最大湖泛面扩大, 发育浅湖-半深湖沉积, 元坝地区作为湖盆沉积中心, 结合典型的过井剖面, 湖盆中心分布于 YB16 井 - YL5 井 - YB9 井 - YL4 井一带(图 2), 为半深湖相沉积, 由湖盆中心向周围, 逐渐向浅湖、滨湖相过渡, 大安寨一亚段沉积时期, 元坝地区开始发生湖退事件, 主要发育滨湖-浅湖沉积。

元坝区块大安寨段大二亚段②小层沉积相平面展布图

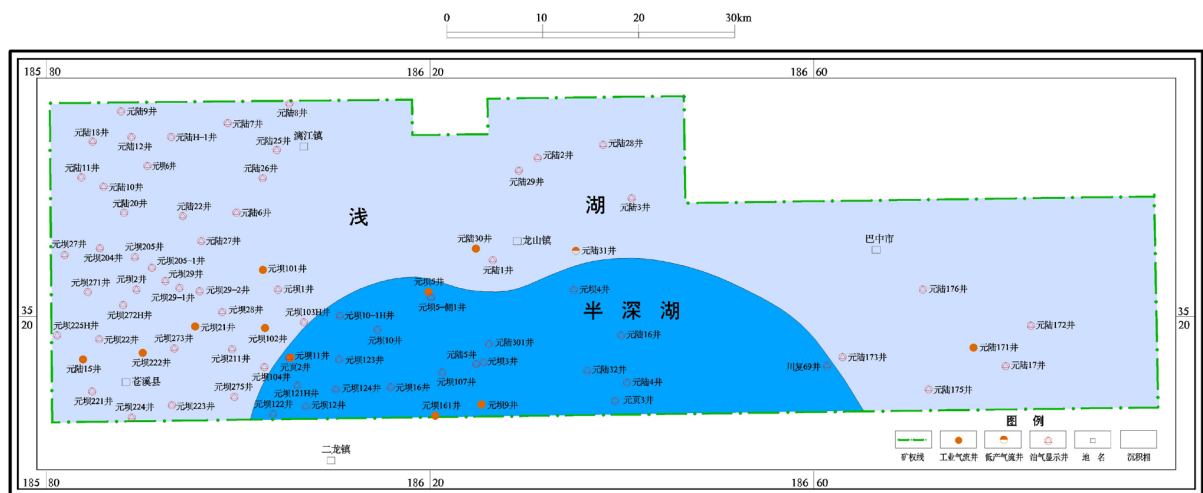


Figure 2. Planar distribution of sedimentary facies in the second member of Da'anzhai in Yuanba area

图 2. 元坝地区大安寨二亚段沉积相平面展布

4. 储层岩性组合及岩相特征

作为储层发育主要的层段, 大安寨二亚段沉积时期湖盆水体动荡频繁[26] [27], 物源碎屑输入的差异导致储层单层厚度薄、纵向变化快, 不同岩性叠置形成灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相、灰黑色介屑纹层型混合质页岩相、深灰色层状韵律型介屑泥岩相、深灰色块状含粉砂泥岩相等四种典型的岩性组合, 不同岩性组合泥地比及发育岩相存在明显差异(图 3)。

4.1. 灰黑色介屑纹层型混合质页岩相

该类岩性组合分布于二亚段的顶部, 对应二亚段④小层, 以发育泥岩、含介壳泥岩(图 4(b))与粉砂质泥岩, 夹薄层-中层介壳灰岩为特点, 介壳灰岩厚度通常在 0.4 m 以下。底部发育层状介壳页岩, 厚度相对较大, 中部为介壳灰岩(图 4(a))与介壳页岩互层(图 4(b)), 单层厚度薄, 上部岩性以介壳页岩夹粉砂质页岩, 泥地比为 0.83, 反映弱还原浅湖沉积环境。

4.2. 深灰色层状韵律型介屑泥岩相

发育于二亚段中上部, 对应③小层, 发育岩性包括粉砂岩(图 4(h))、泥岩(图 4(d))和介壳灰岩, 主体

呈层状，岩心观察可见水平层理以及平行纹层发育，发育岩相类型包括介壳灰岩夹介壳灰质页岩相、泥质粉砂岩(图 4(e))夹粉砂质泥岩相(图 4(i))、含泥介壳灰岩相及含泥粉砂质、泥质粉砂岩相，其中介壳灰岩在该段底部、中部及顶均有发育，单层厚度多在 1 m 以下，泥质粉砂岩分布于底部及中上部，具有总体及单层厚度大的特点，泥地比为 0.36，反映还原浅湖相沉积。

岩相类型	岩心照片	薄片照片	测井响应	FMI响应	矿物成分	TOC/%
灰黑色介屑纹层型混合质页岩相						
深灰色层状韵律型介屑泥岩相						
灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相						
深灰色块状含粉砂泥岩相						

Figure 3. YY2 well sedimentary facies identification comprehensive column chart
图 3. YY2 井沉积相识别综合柱状图

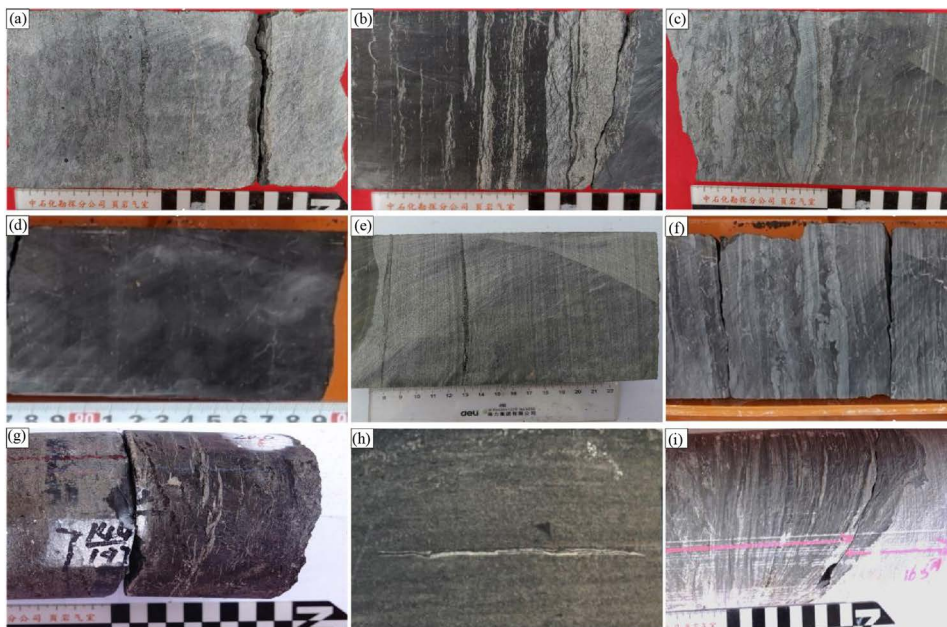


Figure 4. Different rock types of the second member of Da'anhai in Yuanba area
图 4. 元坝地区大安寨二段不同岩石类型

4.3. 灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相

灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相发育于二亚段中下部，对应②小层，岩性以深灰色页岩、含介壳泥岩(图 3(g))和粉砂质泥岩为主，夹粉砂岩/介壳灰岩薄层，厚度在 0.34~0.48 m 之间，为半深湖沉积。主要岩相包括含泥粉砂岩、泥质粉砂岩相；介壳灰质泥岩相；黏土质泥岩相、泥质粉砂岩相、含粉砂质页岩相及介壳灰岩相等。中部发育深灰色页岩及含介壳泥岩，底部发育薄层介壳灰岩及含介壳灰岩，上

部发育泥质粉砂岩及粉砂质泥岩，泥地比为 0.87。反映半深湖相沉积。

4.4. 深灰色块状含粉砂泥岩相

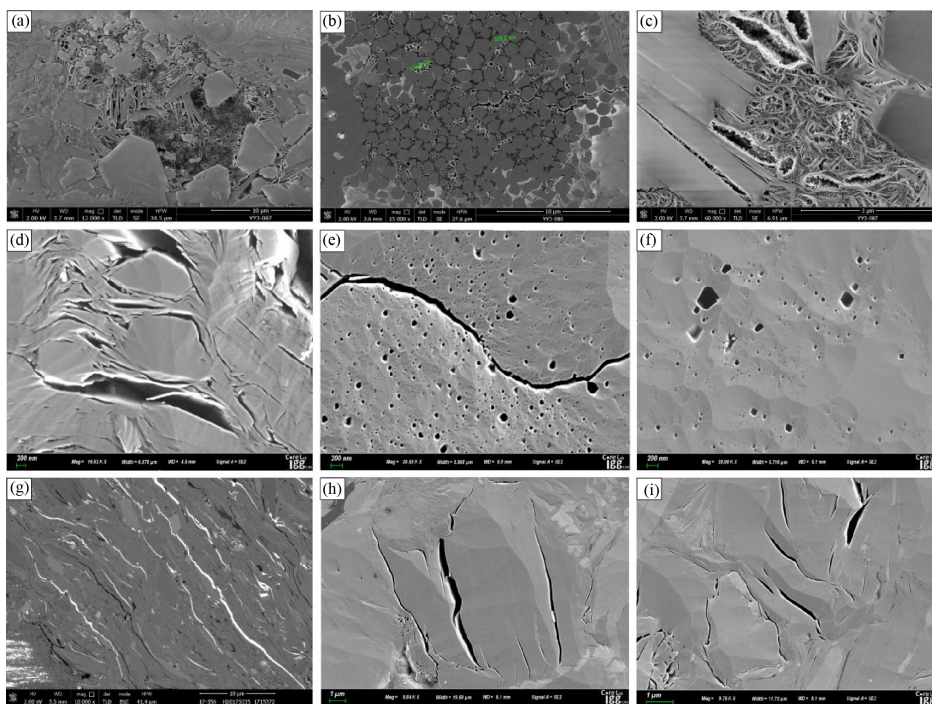
深灰色块状含粉砂泥岩相发育于二亚段底部，对应①小层，底部发育钙质泥岩(图 4(f))、中部发育碳质泥岩，含介壳泥岩及介壳灰岩，顶部发育厚层状介壳灰岩，厚度在 2 m 以上，呈层状构造，发育交错层理，主要岩相包括介壳灰岩相、含介壳泥岩相、粉砂质泥岩相及碳质泥岩相等。泥地比为 0.72，显示处于弱还原环境的浅湖相沉积。

5. 不同岩相储层特征

5.1. 孔隙空间类型

结合氩离子抛光-扫描电镜及岩石薄片观察结果，元坝地区大安寨段储集空间与海相龙马溪组页岩孔隙类型相似，主要包括有机孔、粒间孔、黏土矿物层间孔及微裂缝等四类，但不同类型孔隙含量存在明显的差异。

大安寨段有机质含量相对较低，存在原生有机质、固态沥青及矿物沥青基质等三种类型，处于高成熟演化阶段。原生有机质及矿物沥青基质内部均质致密，孔隙少量发育(图 5(c))；固体沥青内部发育大量气孔(图 5(a))，孔隙形态包括蜂窝状、椭圆形、不规则状等，孔径大小不一，几十到几百纳米均有发育(图 5(b))。



(a) YY3 井, 3565.1 m, 固态沥青内有机质孔隙; (b) YY3 井, 3565.7 m, 黄铁矿晶间有机质孔; (c) YY3 井, 3565.1 m 粘土矿物与固体沥青复合体内孔隙; (d) YL4, 3788.60 m, 伊利石间孔; (e) YB21, 4026.12 m, 方解石内溶孔; (f) YB102, 3562.63 m, 粒内孔; (g) YL4 井, 3758.9 m, 顺层构造微裂缝; (h) YB21, 4025.00 平行裂缝; (i) YB21 井, 4025.00 m 石英中微裂缝

Figure 5. Micropore types of shale in Da'anzhai Member

图 5. 大安寨段页岩微观孔隙类型

大安寨段粒间孔主要发育于粘土矿物与石英颗粒或长石间、粘土矿物晶片间及局部石英颗粒间，发育形态多呈三角形、多边形等，孔径范围较大，纳米级和微米级孔隙均有发育，约占无机孔的 20%；大安寨段页岩储层中还发育少量的粒内孔，主要分布于方解石内(图 5(f))。

黏土矿物是大安寨段主要矿物类型，扫描电镜结果显示页岩中发育大量的粘土矿物层间孔，占无机孔总量的 70%左右，主要发育在伊利石片层间(图 5(d))、伊利石与云母片层间，孔隙形状不规则，孔隙尺度差异巨大，部分孔隙被沥青全充填或半充填。

大安寨段页岩中裂缝发育程度低，岩心中可见近水平缝，局部发育页理缝，纵向上集中于纹层状-层状泥岩夹介壳灰岩及层状泥岩夹介壳灰岩岩性组合中集中发育，裂缝形态多为波浪状、微齿状，且不连续，大多顺层分布，部分可见被少量沥青充填。扫描电镜结果显示微裂缝纳米-毫米级发育较少，裂缝形态通常平直且切穿矿物颗粒，主要为构造成因缝(图 5(g)~(i))。通过统计 YY2 井大安寨段页岩不同类型孔隙类型及含量，大安寨段页岩以无机孔发育为主，约占孔隙总量的 87%，有机孔发育较少，约占孔隙总量的 13%，无机孔中黏土矿物(主要是伊利石)片间孔约占总孔数量的 70%，颗粒间孔(主要是石英及方解石)约占 20%，粒内孔(主要是方解石)约占 10%。

5.2. 储层孔隙度

通过对元坝地区大安寨段二亚段暗色泥页岩进行孔隙度测试分析，结果显示，YY2 井大二亚段页岩的孔隙度适中，介于 0.7%~5.4%之间，平均为 2.69%。纵向上不同岩性组合段平均孔隙度存在明显的差异，其中底部厚深灰色块状含粉砂泥岩相岩性组合储层孔隙度介于 0.7%~4.1%之间，平均为 2.04%；深灰色层状韵律型介屑泥岩相岩性组合储层孔隙度介于 0.7%~4.1%之间，平均孔隙度为 2%，为研究区孔隙度最低储层，灰黑色介屑纹层型混合质页岩相岩性组合储层孔隙度介于 0.7%~5.4%之间，平均孔隙度为 3.34%，灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相储层孔隙度介于 1%~5.2%之间，平均孔隙度为 3.68%，孔隙度相对较高(图 6)。

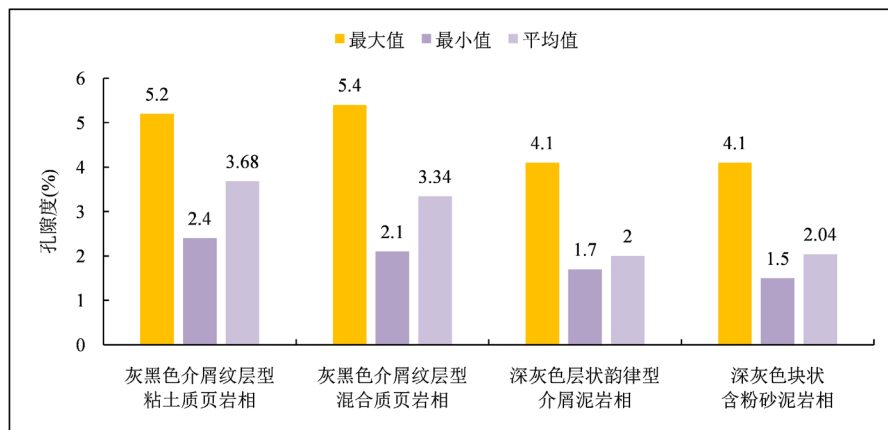


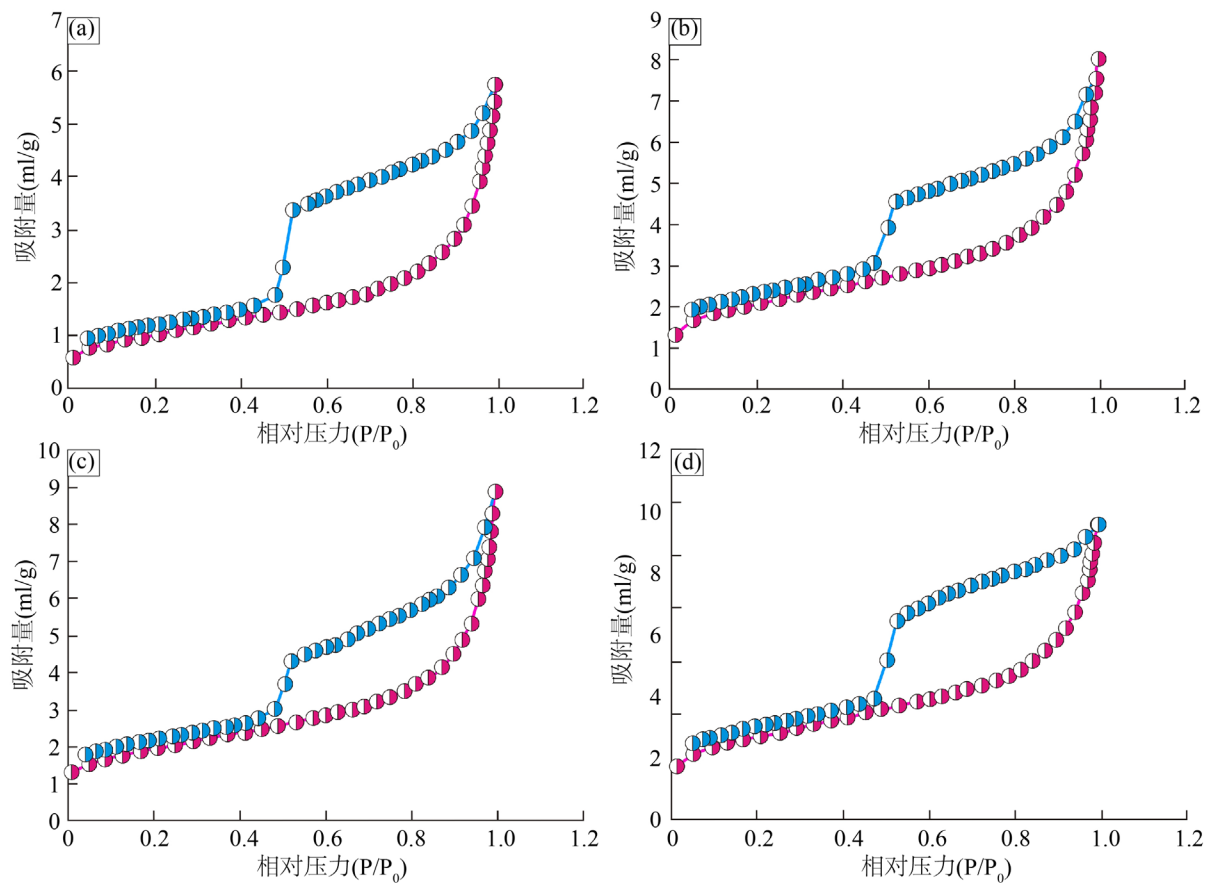
Figure 6. Pore histogram of different lithofacies in YY2 well

图 6. YY2 井不同岩相孔隙度柱状图

5.3. 孔隙结构评价

孔径大小及孔喉类型决定储层的储集性能，通过对大安寨二亚段页岩进行低温氮气吸附实验得到大安寨段泥页岩低温氮气吸附曲线(图 7)，根据国际理论和应用化学联合会(IUPAC)对吸附曲线划分结果，大安寨二亚段页岩吸附曲线属于 IV 型，滞后环类似于 H₂、H₄，指示页岩孔吼结构具有片状孔隙及墨水

瓶状特点, 反映了泥页岩中以微孔及介孔发育为主。



(a) YY2 井, 3883 m; (b) YY2 井, 3913.82 m; (c) YY2 井, 3916.33 m; (d) YY2 井, 3920.59 m

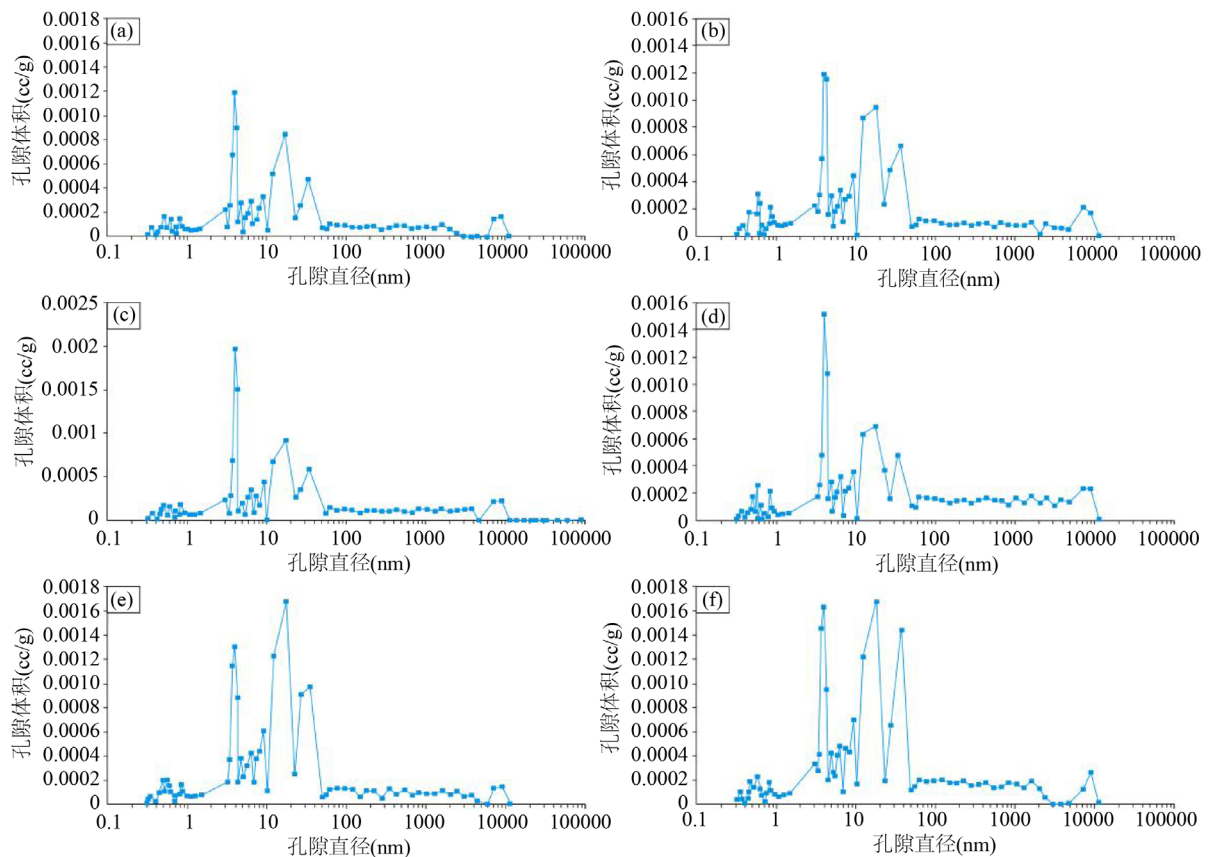
Figure 7. Nitrogen adsorption curve of shale in Da'anzhai Member of Ziliujing Formation, Yuanba area
图 7. 元坝地区自流井组大安寨段页岩氮气吸附曲线

对不同岩相页岩孔隙进行全孔径分布刻画分析, 结果显示, 不同岩相页岩孔隙孔径分布具有相似性, 主峰值均分布于介孔范围内, 显示大安寨二亚段页岩孔隙以微孔 - 介孔为主, 其中微孔占比约为 15% 左右, 介孔平均占比可达 64.8%, 宏孔占比约为 20% (图 8)。

6. 优势页岩岩相与勘探方向

6.1. 不同岩相含气性差异

YY2 井大二亚段灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相有机质干酪根类型为 II₂ 型, TOC 含量介于 0.45%~2.16% 之间, 平均含量为 1.04%, 孔隙度介于 1%~5.2% 之间, 平均为 3.68%, 页岩解析气含量为 0.21 m³/t, 总含气量最高, 平均为 1.22 m³/t, 是最有利的岩性组合。灰黑色介屑纹层型混合质页岩相储层有机质干酪根类型为 II₁ 型, TOC 含量介于 0.21%~2.2% 之间, 平均含量为 1.16%, 孔隙度介于 0.7%~5.4% 之间, 平均孔隙度为 3.34%, 解析气含量为 0.24 m³/t, 总含气量为 0.95 m³/t; 深灰色层状韵律型介屑泥岩相储层有机质干酪根类型为 III 型, TOC 含量介于 0.13%~2.25% 之间, 平均含量为 0.87%, 储层孔隙度介于 0.7%~4.1% 之间, 平均孔隙度为 2%, 解析气含量为 0.17 m³/t, 总含气量为 0.77 m³/t; 深灰色块状含粉



(a) 纹层状硅质页岩; (b) 纹层状混合质页岩; (c) 介壳纹层混合质页岩; (d) 介壳纹层黏土质页岩; (e) 块状混合质页岩; (f) 块状黏土质页岩

Figure 8. Full aperture characterization of shale reservoirs with different lithofacies
图 8. 不同岩相页岩储层全孔径表征

砂泥岩相有机质干酪根类型为 III 型, TOC 含量介于 0.12%~1.63% 之间, 平均含量为 0.65%, 孔隙度介于 0.7%~4.1% 之间, 平均孔隙度为 2.04%; 解析气为 $0.18 \text{ m}^3/\text{t}$, 总含气量为 $0.71 \text{ m}^3/\text{t}$ (图 9、表 2)。

6.2. 优质储层评价及分布

湖相沉积水体动荡频繁, 同时陆源碎屑输入的影响较大, 这会造成页岩储层矿物组分差异大, 黏土矿物含量高, 同时沉积环境的频繁变化造成页岩单层厚度薄, 纵向上分布不均的特点, 同时有效压裂的是页岩成功开发的关键[28] [29]。因此, 页岩脆性矿物含量及可压性是储层评价的重要环节。受矿物结构差异, 矿物的相对含量将直接影响页岩的岩石力学性质、物性、吸附能力以及页岩气的产能。

通过对元坝地区 YY2 井大安寨段二亚段不同深度段页岩样品进行全岩 X 衍射实验分析, 结果显示, 大安寨二亚段页岩矿物组分复杂, 矿物组分及含量与海相页岩存在较大差异, 大安寨二亚段页岩矿物组分以石英矿物及黏土矿物含量为主, 二者含量之和可达 80% 以上, 其中黏土矿物含量介于 8.7%~60.6% 之间, 平均含量为 45.1%; 石英含量介于 6%~57.4% 之间, 平均含量为 38.3%, 同时含一定量的方解石、白云石以及长石, 但含量在 10% 以下, 结合扫描电镜观察, 黏土矿物是页岩孔隙发育的主要载体, 因此, 黏土矿物类型及含量差异对优质储层发育分布的影响不可或缺, 结合页岩样品黏土矿物 X 衍射分析结果显示大二亚段黏土矿物主要以伊利石和伊-蒙混层为主, 其中伊利石含量介于 27%~48% 之间, 平均含量

为 35.3%；伊/蒙混层含量介于 27%~42%，平均为 34.2%，其次是高岭石和绿泥石，含量相对较少，其含量分别为 13.5%与 16.9%，未见蒙脱石和绿 - 蒙混层。

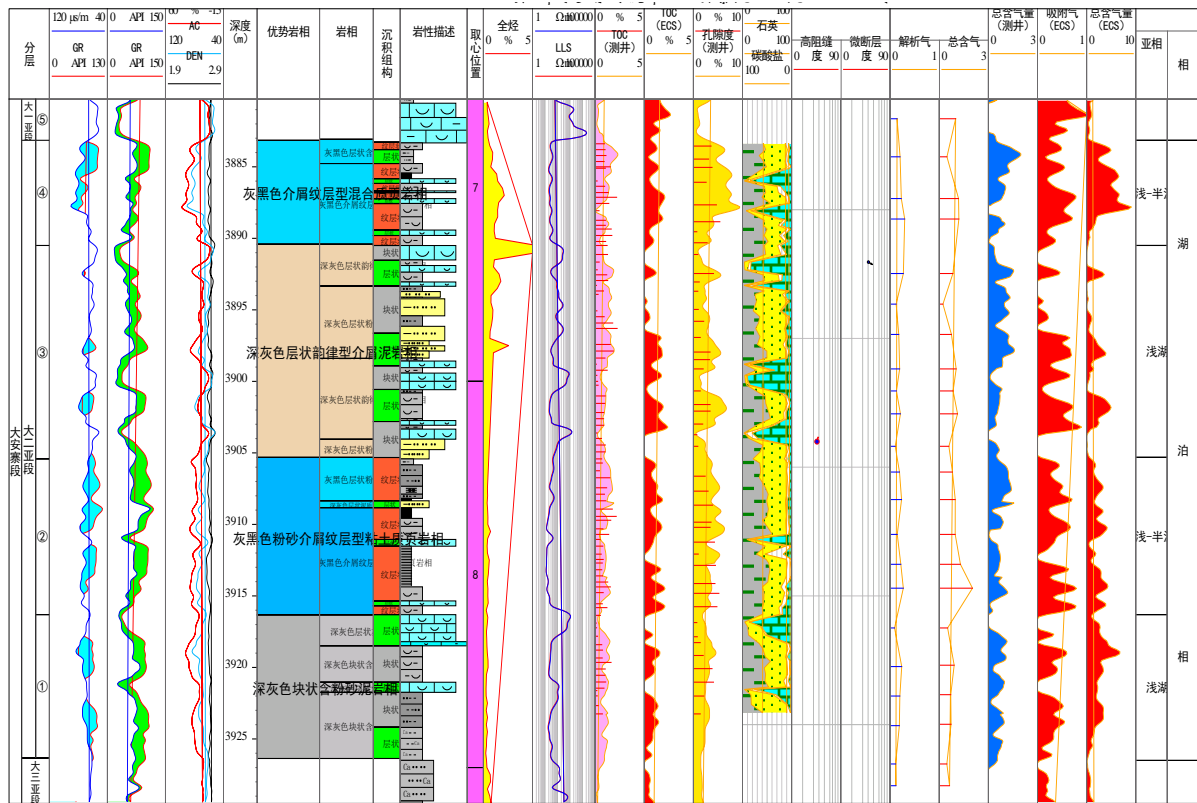


Figure 9. YY2 well content comprehensive column chart
图 9. YY2 井含气性综合柱状图

Table 2. Comparison table of gas bearing properties of different lithologic combinations in YY2 well
表 2. YY2 井不同岩性组合含气性对比表

岩性组合	解析气	总含气量
灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相	0.21	1.22
灰黑色介屑纹层型混合质页岩相	0.24	0.95
深灰色层状韵律型介屑泥岩相	0.17	0.77
深灰色块状含粉砂泥岩相	0.18	0.71

随着压裂技术的进步，碳酸盐岩矿物在计算过程中并入脆性矿物计算页岩脆性指数，统计 YY2 井不同深度段储层脆性矿物组分含量，结合不同矿物组分中脆性矿物含量的差异，不同岩相组合中矿物类型无明显差异，但深灰色块状含粉砂泥岩相及深灰色层状韵律型介屑泥岩相中脆性矿物含量高于灰黑色介屑纹层型混合质页岩相及灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相，表明可压性较强。同时，对湖相页岩而言，纹层及页理缝的发育密度直接影响其储集性能，通过对 YY2 井大二亚段不同岩相纹层及页理缝数量统计(图 10)，灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相粉砂质纹层密度为 83.1 条/m，介壳纹层密度为 57.4 条/m，页理缝密度为 79.2 条/m；灰黑色介屑纹层型混合质页岩相不发育粉砂质纹层，介壳纹层密度为 48.2

条/m, 页理缝密度为 47.7 条/m; 深灰色层状韵律型介屑泥岩相砂质纹层密度为 30.3 条/m, 介壳纹层密度为 7.3 条/m, 页理缝密度为 14.2 条/m; 深灰色块状含粉砂泥岩相不发育粉砂质纹层, 介壳纹层密度为 11.6 条/m, 页理缝密度为 10.1 条/m。结合 TOC 含量、储集性能、矿物组分、可压性及含气性, 灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相及灰黑色介屑纹层型混合质页岩相具有较高的勘探潜力。

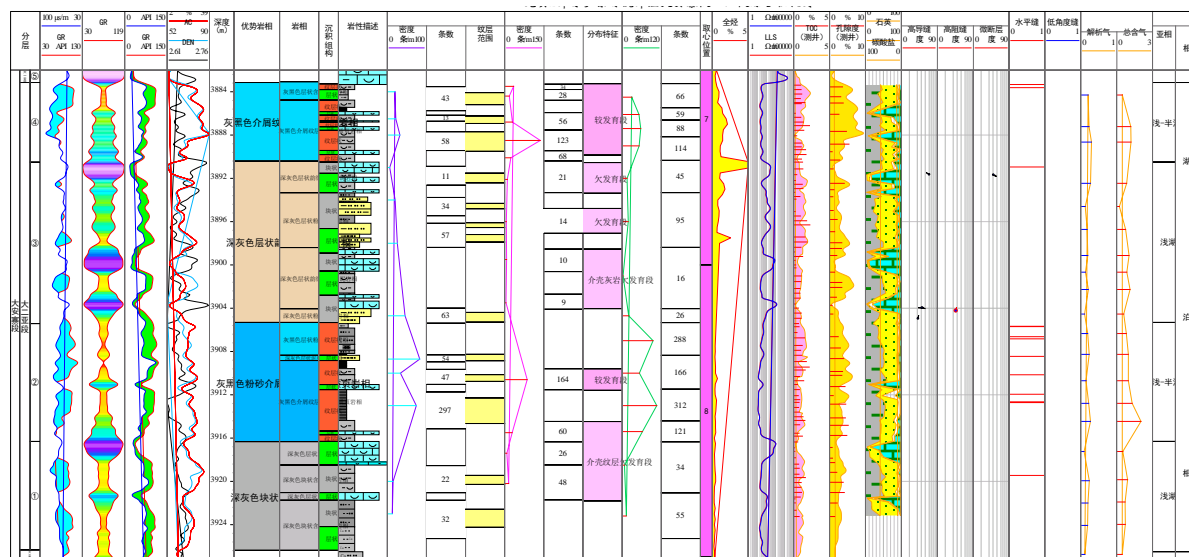


Figure 10. Histogram of laminar density of YY2 well in Yuanba area

图 10. 元坝地区 YY2 井纹层密度柱状图

7. 结论

1) 大安寨段页岩主要为温暖、潮湿环境及缺氧的淡水湖盆沉积环境, 发育滨湖、浅湖、半深湖 3 种沉积相, 发育灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相、灰黑色介屑纹层型混合质页岩相、深灰色层状韵律型介屑泥岩相、深灰色块状含粉砂泥岩相四种主要岩相。

2) 页岩矿物类型以黏土矿物、石英、方解石为主, 含少量长石、白云石以及黄铁矿; 孔隙类型以粘土晶间孔为主的无机孔隙为主, 中孔占比大约为 64.8%, 其中优势岩相灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相中孔占比 65%。

3) 灰黑色粉砂介屑纹层型粘土质页岩相因“源-储”配置良好, 具有高脆性、高孔隙度、高分形维数及高含气量特点, 同时页理缝及介壳纹层发育, 是大安寨段有利岩相, 分布在 YY2 井 - YL173 井中间。

参考文献

- [1] 邹才能, 杨智, 王红岩, 董大忠, 刘洪林, 施振生, 张斌, 孙莎莎, 刘德勋, 李贵中, 吴松涛, 庞正炼, 潘松圻, 袁懿琳. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. 地质学报, 2019, 93(7): 1551-1562.
- [2] 肖继林, 魏祥峰, 李海军. 涪陵海相页岩气和元坝-兴隆场湖相页岩气富集条件差异性分析[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(4): 8-17.
- [3] 杨跃明, 黄东. 四川盆地侏罗系湖相页岩油气地质特征及勘探开发新认识[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 22-33.
- [4] 杨跃明, 黄东, 杨光, 李育聪, 戴鸿鸣, 白蓉. 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.
- [5] 王玉满, 董大忠, 杨桦, 何伶, 王世谦, 黄金亮, 蒲泊伶, 王淑芳. 川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1348-1356.

- [6] 施振生, 武瑾, 董大忠, 孙莎莎, 郭长敏, 李贵中. 四川盆地五峰组-龙马溪组重点井含气页岩孔隙类型与孔径分布[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 249-260.
- [7] 姜涛, 金之钧, 刘光祥, 胡宗全, 刘全有, 刘忠宝, 王鹏威, 王濡岳, 杨滔, 王冠平. 四川盆地元坝地区自流井组页岩储层孔隙结构特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 909-918.
- [8] 冯动军. 四川盆地侏罗系大安寨段陆相页岩油气地质特征及勘探方向[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 219-230.
- [9] 厚刚福, 宋兵, 倪超, 陈薇, 王力宝, 寰洋, 李亚哲, 彭博. 致密油源储配置特征及油气勘探意义——以四川盆地川中地区侏罗系大安寨段为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1078-1085.
- [10] 王玮, 黄东, 易海永, 赵容容, 岑永静, 李育聪. 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.
- [11] 陈超, 杨雪飞, 王兴志, 李博, 黄梓桑. 湖相碳酸盐岩沉积相分析: 以四川盆地东北部下侏罗统自流井组大安寨段为例[J]. 地质论评, 2019, 65(S1): 117-119.
- [12] 王拥军, 童敏, 孙圆辉, 张元中, 袁大伟. 四川盆地大安寨段介壳灰岩致密油储层特征[J]. 石油学报, 2019, 40(1): 42-55.
- [13] 黄东, 段勇, 李育聪, 陈洪斌, 闫伟鹏, 戴鸿鸣. 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.
- [14] 邓燕, 黄东, 米鸿, 金涛, 闫伟鹏. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相含云质储层成因研究[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 75-85.
- [15] 李磊, 李平平, 张正辰, 郝景宇, 肖继林, 邹华耀. 川北元坝地区大安寨段页岩微观孔隙空间定量表征[J]. 科学与技术, 2020, 20(22): 8923-8932.
- [16] 魏祥峰, 黄静, 李宇平, 王庆波, 刘若冰, 文治东. 元坝地区大安寨段陆相页岩气富集高产主控因素[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 970-981.
- [17] 刘忠宝, 胡宗全, 刘光祥, 刘珠江, 刘皓天, 郝景宇, 王鹏威, 李鹏. 四川盆地东北部下侏罗统自流井组陆相页岩储层孔隙特征及形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 136-145.
- [18] 杜江民, 张小莉, 张帆, 王兴志, 冯明友, 罗川又, 聂万才. 川中龙岗地区下侏罗统大安寨段沉积相分析及有利储集层预测[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 493-502.
- [19] 朱彤, 龙胜祥, 王烽, 彭勇民. 四川盆地湖相泥页岩沉积模式及岩石相类型[J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 22-28.
- [20] 张少敏, 杨跃明, 洪海涛, 曾溅辉, 张芮, 李育聪, 何绪全. 陆相页岩层段储集特征及其油气地质意义——以四川盆地中部大安寨段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022(4): 1-13.
- [21] 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 刘光祥, 冯动军, 杨振恒, 王鹏威. 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.
- [22] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 魏祥峰, 陈斐然, 刘珠江. 湖相页岩油气富集主控因素与勘探潜力——以四川盆地涪陵地区侏罗系为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 113-120.
- [23] 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 冯动军, 朱彤, 边瑞康, 姜涛, 金治光. 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.
- [24] 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2005(1): 67-73.
- [25] 郭来源, 张士万, 解习农, 李忠生, 黄传炎, 陈北辰. 鄂西-渝东地区下侏罗统东岳庙段泥岩地球化学特征及有机质富集模式[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1235-1246.
- [26] 张宇, 杜垚, 刘耘, 李文皓, 何硕, 王兴志, 庞谦, 黄东. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气基本特征及勘探方向[J]. 中国地质, 2022, 49(1): 51-65.
- [27] 孙莎莎, 董大忠, 李育聪, 王红岩, 施振生, 黄世伟, 昌燕, 拜文华. 四川盆地侏罗系自流井组大安寨段陆相页岩油气地质特征及成藏控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 124-135.
- [28] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 魏祥峰, 刘若冰, 刘珠江, 燕继红, 王庆波. 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和自流井组大安寨段为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 18-28.
- [29] 罗超, 刘树根, 孙玮, 冉波, 雍自权, 杨迪, 张旋, 王世玉, 叶玥豪, 邓宾. 上扬子区下寒武统牛蹄塘组页岩气基本特征研究——以贵州丹寨南皋剖面为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 453-470.