

四川盆地寒武统筇竹寺组页岩储层特征及发育控制因素

陈湛溪

中国石化勘探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年7月26日; 录用日期: 2023年8月29日; 发布日期: 2023年9月5日

摘要

近期川北陆内坳陷型的SZY1井和川中、川西南地区“拉张槽”型Z201井、JS103井皆获得突破, 展示四川盆地寒武统筇竹寺组页岩具有较好的勘探潜力, 但不同类型页岩储层差异性及其发育主控因素仍不清楚, 亟需开展储层特征对比研究。文章基于三口井资料, 对四川盆地寒武统筇竹寺组不同类型页岩储层的岩石学、地球化学、储集性及可压性等特征进行系统对比分析。研究表明: 川北地区陆内坳陷型寒武系页岩TOC及粘土矿物含量较高, 以有机质孔和片状粘土矿物孔为主, 比表面积与孔径较大, 孔隙发育主要受有机质丰度和成岩作用控制; 川中地区拉张槽深水陆棚相黑色页岩TOC与含气量较高, 以有机孔为主, 孔隙度与有机质丰度呈良好正相关性; 川西南拉张槽浅水陆棚相粉砂质页岩TOC较低, 含气量低, 片状粘土矿物孔、粒间孔和微裂缝为主要孔隙类型, 孔隙发育主要受成岩作用控制。川北陆内坳陷与川中拉张槽深水陆棚相沉积的筇竹寺组富有机质页岩具有一定相似性, TOC较高, 优质页岩段以有机孔为主; 川西南拉张槽浅水陆棚相粉砂质页岩TOC较低, 以无机孔为主, 但孔隙度较高、可压性较好, 具备一定勘探潜力。

关键词

四川盆地, 下寒武统, 筇竹寺组, 储层特征, 拉张槽型, 坳陷型

Shale Reservoir Characteristics and Development Control Factors of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin

Zhanxi Chen

Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan

Abstract

Recently, breakthroughs have been made in the down warping region SZY1 well, the “intracratonic sag” type Z201 well and the JS103 well in central Sichuan and southwest Sichuan, showing that the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin has good exploration potential, but the differences and main controlling factors of different types of shale reservoirs are still unclear, and it is urgent to carry out comparative research on reservoir characteristics. Based on the data of three wells, this paper systematically compares and analyzes the petrology, geochemistry, reservoir prosperities and crushability of different types of shale reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin. The results show that the content of TOC and clay minerals in Cambrian shale of continent down warping region in northern Sichuan is higher, mainly organic matter pores and flaky clay mineral pores, the specific surface area and pore size are larger, and the pore development is mainly controlled by organic matter abundance and diagenesis. The black shale in the deep-water shelf facies of the intracratonic sag in central Sichuan basin had high TOC and gas content, mainly organic matter pores, and there was a good positive correlation between porosity and organic matter abundance. The intracratonic sag shallow shelf facies sandy shale in southwest Sichuan has low TOC and low gas content, intergranular pores, tiny crack and flaky clay minerals pores are the main pore types. The pore development is mainly controlled by diagenesis. The organic-rich shale of the Qiongzhusi Formation deposited in the deep-water shelf facies of the northern Sichuan basin and central Sichuan basin has certain similarities, with high TOC and high-quality shale sections dominated by organic pores. The intracratonic sag shallow shelf facies sandy shale in southwest Sichuan has low TOC, mainly inorganic pores, higher porosity and good crushability, and has certain exploration potential.

Keywords

Sichuan Basin, Lower Cambrian, Qiongzhusi Formation, Reservoir Characteristics, Intracratonic Sag, Down Warping Region

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

震旦纪末，在扬子板块东南缘和北缘为持续被动大陆边缘环境，伴随海水的快速侵入，在早寒武世形成了一套相对缺氧、静水环境的深水陆棚相黑色页岩，浮游生物红藻、褐藻繁盛，是我国南方古生界页岩气勘探的有利层系之一[1][2]。前期不同专家学者对下寒武统筇竹寺组开展过一定研究，对其储层的认识先后经历了几个时期：从最早的认为深水陆棚相沉积的 TOC 大于 2.0%， R_o 小于 3.0%，厚度大于 160 m 黑色页岩为优质储层[3][4]；到之后的高 TOC、高孔隙度、高成熟度、高脆性、厚度为 5~10 m 的黑色页岩为优质储层[5]；到现在的厚度大、顶底板条件好、储层超压和孔隙发育的黑色泥页岩[6]及烃源岩有效、保存良好条件下的高孔渗、高含气性、低 TOC、顶底板条件好的粉砂质页岩为优质储层[7]。随着认识的不断深入和勘探思路的转变，针对下寒武统筇竹寺组勘探获得突破。近期川西拉张槽 JS103 井在第二段中部粉砂质页岩试采获 25.86 万方/天，Z201 井在第二段底部黑色页岩试采获 73.88 万方/天；川

北陆内坳陷 SZY1 井在第二段黑色页岩获得突破,日产气 1.6 万方/天,进一步证明四川盆地筇竹寺组拉张槽深水陆棚沉积和陆内坳陷深水陆棚沉积皆具有良好的勘探潜力。但四川盆地筇竹寺组各类储层岩石学、地球化学和孔隙类型之间无系统对比,各类型储层差异,发育主控因素及勘探潜力不明晰。本文将利用 JS103 井、Z201 井和 SZY1 井等井的测井和岩心岩屑实验数据资料,对下寒武统筇竹寺组拉张槽和陆内坳陷两种沉积类型储层进行分析研究,明晰页岩岩石学、地球化学、孔隙结构,得出相互之间的关系,为四川盆地筇竹寺组下一步勘探开发提供参考。

2. 区域地质背景

四川盆地是在扬子克拉通上发展起来的大型叠合盆地,主要经历震旦纪~中三叠世伸展形成的差异升降和海相碳酸盐岩台地及晚三叠世后挤压形成的褶皱-冲断-隆升和陆相碎屑岩盆地[8][9]。震旦期末桐湾运动共发育三幕构造运动,即灯影组二段富藻层沉积末期的桐湾 I 幕、灯影组二段沉积末期的桐湾 II 幕与灯影组三段~灯影组四段沉积末期的桐湾 III 幕,桐湾期的灯影组镶边碳酸盐台地还存在轻微裂化作用下的热液沉积[10]。四川盆地地下寒武统麦地坪组沉积时期,受兴凯地裂运动影响,川西发育绵阳-安岳-长宁裂陷,拉张槽内主要沉积一套含磷的碳硅泥岩组合,在裂陷区外麦地坪通常缺失或主要为灰岩和白云岩沉积[10][11]。下寒武统筇竹寺组沉积期,上扬子克拉通南北被动大陆边缘及周边广泛发育一套下部为深水陆棚相页岩。其中主要发育黑色页岩、粉砂质页岩和粘土质页岩三种岩性类型,其中黑色页岩主要发育在筇竹寺组三个沉积旋回的底部,测井表现为高 GR,低电阻特征;粘土质页岩主要在筇竹寺组顶部发育,测井表现为锯齿状 GR 特征;粉砂质泥岩主要在筇竹寺组第一个和第二个沉积旋回上部发育,表现为低 GR,高电阻这一特征。川北主要发育坳陷型深水陆棚沉积页岩,下部主要为黑色碳质泥岩夹薄层状粉砂质泥岩,测井表现为锯齿状高 GR,低电阻特征。上部主要为泥质粉砂岩和粉砂质泥岩互层,且在上部钙质含量较高,测井表现为低 GR,低电阻特征。在川东发育被动大陆边缘型深水陆棚沉积页岩,下部主要为黑色碳质泥岩,上部主要为灰质泥岩和泥质灰岩互层[12][13][14](图 1、图 2)。

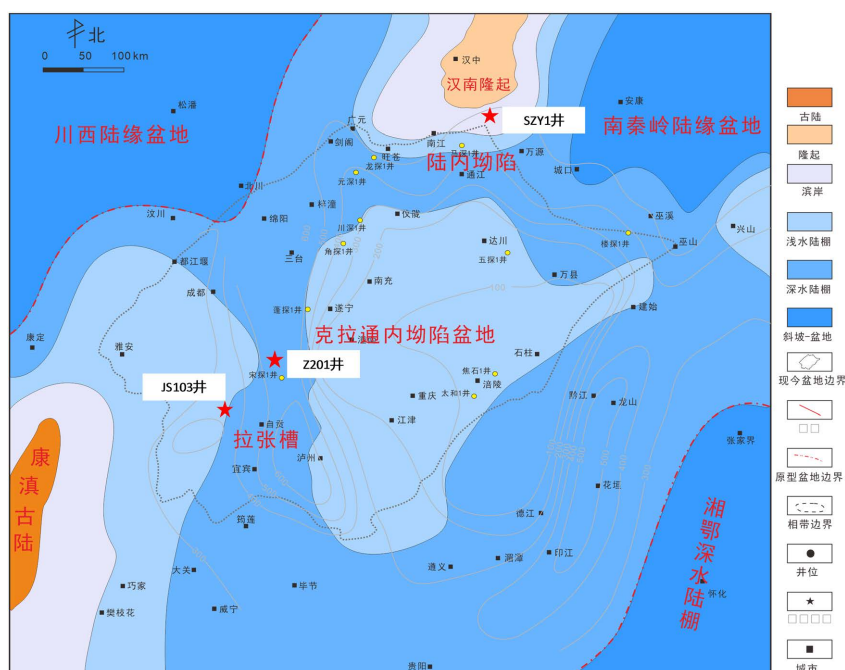


Figure 1. Sedimentary distribution of Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin
图 1. 四川盆地筇竹寺组沉积相图

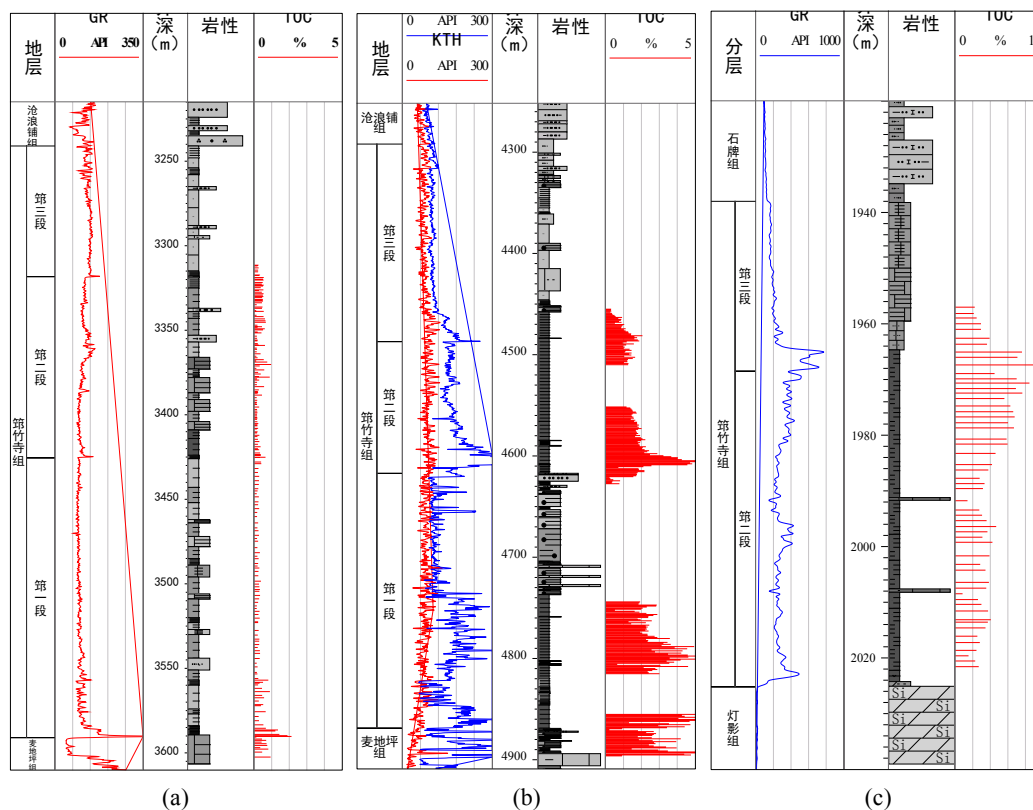


Figure 2. (a) Comprehensive column of JS103wel [15]; (b) Comprehensive column of Z201wel [16]; (c) Comprehensive column of SZY1 well

图 2. (a) JS103 井综合柱状图[15]; (b) Z201 井综合柱状图[16]; (c) SZY1 井综合柱状图

3. 页岩岩石学与地球化学特征对比

3.1. 岩石矿物

矿物组成是影响页岩孔渗、微裂缝发育程度及压裂难易程度的主控因素之一。石英、长石和碳酸盐岩等脆性矿物含量较高时压裂更容易形成裂缝，利于压裂[17]。

拉张槽边缘 JS103 井第二段中部粉砂质页岩硅质矿物含量分布在 29.60%~75.70%之间，平均为 62.46%；碳酸盐矿物含量分布在 2.40%~59.30%之间，平均为 15.20%；脆性矿物(石英 + 长石 + 方解石 + 白云石)含量分布在 65.00%~90.30%之间，平均为 77.66%；粘土矿物含量分布在 8.30%~33.80 之间，平均为 21.20%。拉张槽中心 Z201 井第二段底部黑色页岩硅质矿物含量分布在 51.70%~75.10%之间，平均为 67.46%；碳酸盐矿物含量分布在 4.10%~29.30%之间，平均为 9.54%；脆性矿物(石英 + 长石 + 方解石 + 白云石)含量分布在 70.50%~81.0%之间，平均为 77.00%；粘土矿物含量分布在 14.30%~24.10 之间，平均为 18.03%。两口井甜点层段脆性矿物含量整体偏高平均值皆在 75.00%以上，粘土矿物含量相对偏低，在 20.00%左右(图 3)。

坳陷型深水陆棚相沉积典型井 SZY1 井筇竹寺组页岩硅质矿物含量分布在 53.00%~66.00%之间，平均为 60.05%；碳酸盐矿物含量分布在 2.20%~12.90%之间，平均为 5.81%；脆性矿物(石英 + 长石 + 方解石 + 白云石)含量分布在 55.50%~78.80%之间，平均为 66.16%；粘土矿物含量分布在 25.20%~40.60 之间，平均为 29.95%。坳陷型深水陆棚相沉积脆性矿物含量较高，其中石英矿物相对较高，碳酸盐矿物含量相对较低，粘土矿物含量约 30%。由图 3 可知坳陷型深水陆棚相沉积和拉张槽型深水陆棚相沉积脆性

矿物都较高, 皆大于 60%, 利于压裂。

JS103 井及 SZY1 井相对于 Z201 井都表现出硅质矿物含量低粘土矿物相对较高的特征可能是由于二者都不在沉积中心, 且 JS103 井靠近康滇古陆, SZY1 井靠近汉南隆起, 物源更为丰富。

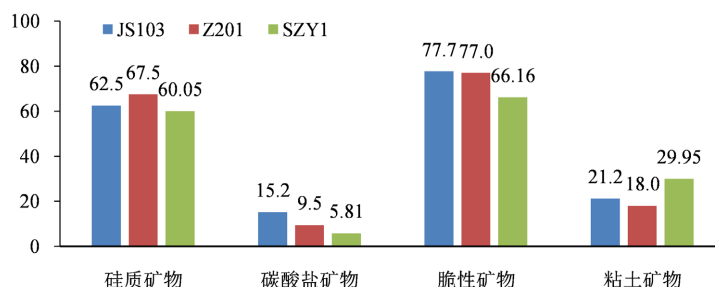


Figure 3. Comparison histogram of mineral composition of dessert section of JS103 well, Z201 well and SZY1 well

图 3. JS103 井、Z201 井、SZY1 井甜点段矿物成分对比柱形图

3.2. TOC

总有机碳含量(TOC)是评价高-过成熟海相烃源岩品质最有效的指标, 前人认为 TOC < 0.5% 的四川盆地海相泥页岩层系不具有商业开发价值, 并以 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、5.0% 为界限将其划分为差、中等、好、很好和极好这五个等级[13]。

拉张槽边缘的 JS103 井总有机碳(TOC)含量在 0.09%~2.10% 之间, 平均为 0.33%, 甜点层段第二段中部总有机碳(TOC)含量在 0.10%~0.59% 之间, 平均为 0.25%。拉张槽中心的 Z201 井总有机碳(TOC)含量在 0.19%~7.13% 之间, 平均为 2.17%, 甜点层段第二段底部总有机碳(TOC)含量在 0.68%~5.46% 之间, 平均为 3.08%。

坳陷型深水陆棚沉积典型井 SZY1 井总有机碳(TOC)含量在 0.79%~9.81% 之间, 平均为 4.14%, 黑色页岩总有机碳(TOC)含量在 1.47%~9.81% 之间, 平均为 4.47%。

SZY1 井和 Z201 井为深水陆棚相沉积甜点段总有机碳(TOC)含量明显高于浅水陆棚相沉积得 JS103 井。

3.3. 孔隙度

拉张槽边缘的 JS103 井孔隙度在 0.31%~4.82% 之间, 平均为 1.63%, 甜点层段第二段中部孔隙度在 1.04%~4.54% 之间, 平均为 2.48%。拉张槽中心的 Z201 井孔隙度(不规则样)在 1.20%~6.21% 之间, 平均为 4.07%, 甜点层段第二段底部孔隙度在 1.39%~6.21% 之间, 平均为 4.91%。

坳陷型深水陆棚沉积典型井 SZY1 井孔隙度在 0.41%~6.21% 之间, 平均为 3.68%; 黑色页岩孔隙度在 1.11%~6.21% 之间, 平均为 3.98% (图 4)。

Z201 井和 SZY1 井相较于 JS103 井孔隙度较高可能主要是受控于 JS103 井 TOC 较低, 有机孔不发育。

3.4. 含气量

拉张槽边缘的 JS103 井总含气量在 0.13%~2.76% 之间, 平均为 0.81%, 甜点层段第二段中部总含气量在 0.82%~1.27% 之间, 平均为 0.98%。拉张槽中心的 Z201 井总含气量(不规则样)在 1.00%~9.38% 之间, 平均为 4.40%, 甜点层段第二段底部总含气量在 3.03%~9.38% 之间, 平均为 5.25% (图 4)。

坳陷型深水陆棚相沉积典型井 SZY1 井总含气量在 1.08%~4.18% 之间, 平均为 2.13%; 黑色页岩总含

气量在 1.08%~4.18%之间, 平均为 2.27% (图 4)。但 SZY1 井越靠近中部, 含气量越高。

Z201 井和 SZY1 井 TOC 都相对较高, 生烃潜力较大, 但 Z201 井甜点段相较于 SZY1 井孔隙度更高, 储集空间更大, 故 SZY1 井较 Z201 井含气量偏低。

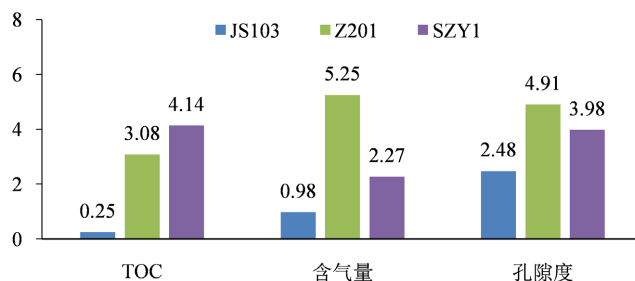


Figure 4. JS103 well, Z201 well, SZY1 well dessert section TOC, gas content, porosity histogram

图 4. JS103 井、Z201 井、SZY1 井甜点段 TOC、含气量、孔隙度柱形图

4. 页岩孔隙结构特征对比

4.1. 孔隙类型

已有研究表明, 有机质是页岩孔隙发育的重要载体, 页岩干酪根在生烃过程中会产生有机质孔, 孔隙度会随有机质含量的增加而逐渐增加[18]。由图 5 可见拉张槽边缘的 JS103 井粉砂质泥岩储层孔隙度与 TOC 相关性不强, 表明有机孔可能并非主要的储集空间。由图 6 和图 7 可见拉张槽中心的 Z201 井和坳陷型沉积的 SZY1 井筇竹寺组页岩储层孔隙度与 TOC 含量具有明显的正相关性, 显示有机质微孔为页岩孔隙发育提供了大量载体。

在扫描电镜下, 可见 SZY1 井牛蹄塘组页岩发育有大量的有机孔(图 8(a), 图 8(b), 图 8(e), 图 8(f)), 且有机孔内壁不光滑、形状不规则、可能彼此相互连通(图 8(a), 图 8(b))。有机质在成熟演化过程中发生了缩聚和固结作用, 使包裹在有机质中的矿物颗粒脱落而形成铸模孔, 在牛蹄塘组页岩中大多铸模孔可能是石英、黄铁矿等颗粒脱落所致, 多呈圆形和不规则形状。此外, 部分铸模孔可能是有机质中的碳酸盐矿物完全溶蚀后形成的溶解铸模孔(图 8(b), 图 8(c))。JS103 井筇竹寺组有机质丰度较低, 有机质孔隙不发育(图 8(c), 图 8(d))。

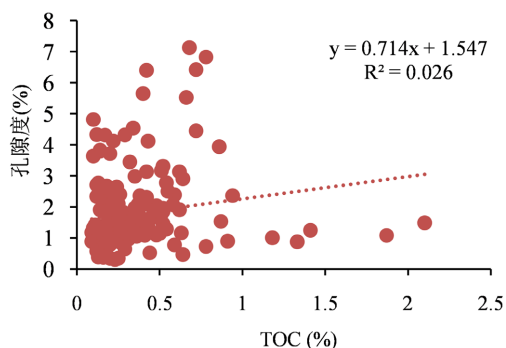


Figure 5. The correlation diagram of TOC and porosity in high quality section of JS103 well

图 5. JS103 井优质段 TOC 与孔隙度相关性图

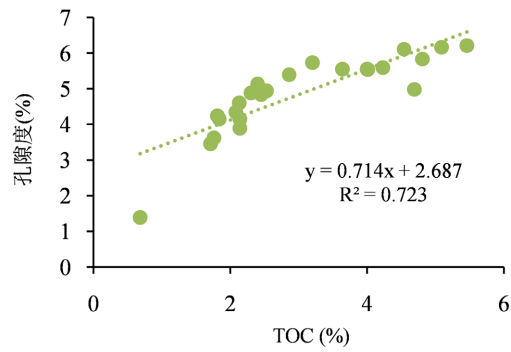


Figure 6. The correlation diagram of TOC and porosity in high quality section of Z201 well

图 6. Z201 井优质段 TOC 与孔隙度相关性图

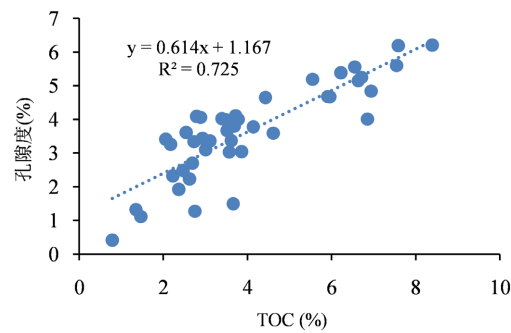


Figure 7. Cambrian shale TOC correlation diagram with porosity in SZY1 well

图 7. SZY1 井寒武系页岩 TOC 与孔隙度相关性图

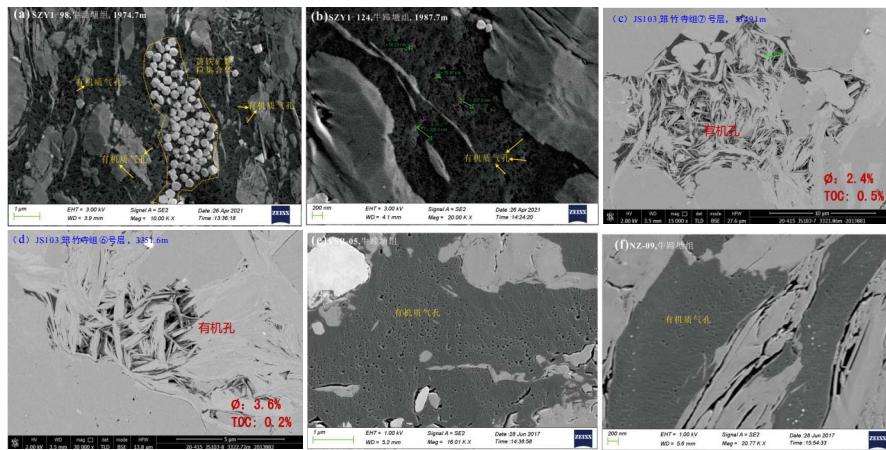


Figure 8. Organic matter pores of typical well shale in the Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin. (a) Organic matter hole, SZY1 well, Niujiatang Formation, 1947.7 m; (b) Organic matter hole, SZY1 well, Niujiatang Formation, 1987.7 m; (c) The intergranular filling part of the asphalt, the development of a small number of organic pores, JS103 well, Xiaozhusi Formation, 3349.1 m; (d) The intergranular filling part of the asphalt, the development of a small number of organic pores, JS103 well, Xiaozhusi Formation, 3351.1 m; (e) Organic matter hole, SZY1 well, Niujiatang Formation, 2000.0 m; (f) Organic matter hole, SZY1 well, Niujiatang Formation, 2015.4 m

图 8. 四川盆地筇竹寺组典型井页岩有机质孔。(a) 有机质孔, SZY1 井, 牛蹄塘组, 1947.7 m; (b) 有机质孔, SZY1 井, 牛蹄塘组, 1987.7 m; (c) 粒间充填部分沥青, 发育少量有机孔隙, JS103 井, 筇竹寺组, 3349.1 m; (d) 粒间充填部分沥青, 发育少量有机孔隙, JS103 井, 筇竹寺组, 3351.1 m; (e) 有机质孔, SZY1 井, 牛蹄塘组, 2000.0 m; (f) 有机质孔, SZY1 井, 牛蹄塘组, 2015.4 m

SZY1 井和 JS103 井筇竹寺组发育大量粒间孔和粒内孔，粒间孔多出现在韧性、刚性矿物颗粒或晶体之间。粒间孔主要为细长孔，并且大部分该孔隙类型呈线状分布在板状、片状黏土矿物之间，孔隙由矿物颗粒支撑(图 9(a), 图 9(c), 图 9(d), 图 9(f))。受控于板状、片状黏土矿物组分、完整度和大小，该类细长孔隙的长度从几十纳米到几微米不等，孔径分布在 30 nm 到 150 nm 不等。脆性矿物颗粒之间的支撑孔隙通常比较大，呈棱角状、三角形分布，孔径约 100 nm 到几个微米之间。支撑孔隙又可以解释为剩余孔隙空间。

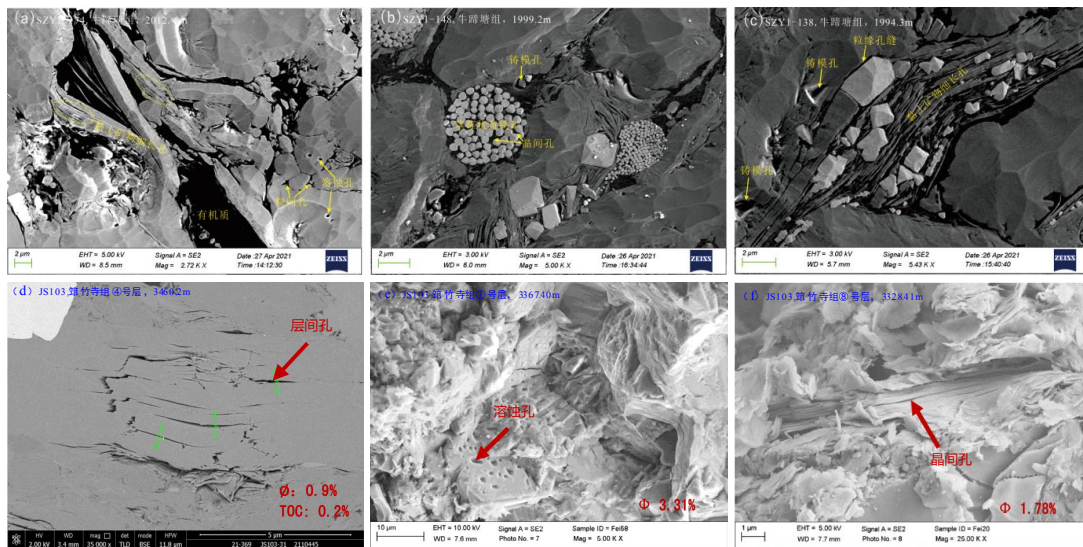


Figure 9. Mineral pores and microfractures in typical wells of Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin. (a) Quartz particle surface dissolution pores and intergranular pores, SZY1 Well, Niutitang Formation, 2012.6 m; (b) Intergranular pores and cast film holes, SZY1 Well, Niutitang Formation, 1999.2 m; (c) Cast film pores, granular margin joints and clay mineral interlayer pores, SZY1 Well, Niutitang Formation, 1994.3 m; (d) Pores and fractures between layers of clay minerals, JS103 well, Qiongzhusi Formation, 3460.2 m; (e) Quartz particle surface dissolution hole, JS103 well, Qiongzhusi Formation, 3367.4 m; (f) Layered chlorite development interlaminar gap, JS103 well, Qiongzhusi Formation, 3328.4 m

图 9. 四川盆地筇竹寺组典型井矿物质孔与微裂缝。(a) 石英颗粒表面溶蚀孔和粒间孔, SZY1 井, 牛蹄塘组, 2012.6 m; (b) 晶间孔和铸膜孔, SZY1 井, 牛蹄塘组, 1999.2 m; (c) 铸膜孔、粒缘缝及黏土矿物层间孔隙, SZY1 井, 牛蹄塘组, 1994.3 m; (d) 黏土矿物层间孔隙与裂缝, JS103 井, 筇竹寺组, 3460.2 m; (e) 石英颗粒表面溶蚀孔, JS103 井, 筇竹寺组, 3367.4 m; (f) 层状绿泥石发育层间缝, JS103 井, 筇竹寺组, 3328.4 m

粒内孔往往存在颗粒内部，而且古老页岩粒内孔在强大压实作用下，容易遭受破坏。但是在筇竹寺组页岩中，仍发育较多的粒内孔隙类型，如长石、石英等颗粒内可见内壁光滑、大小不一的溶蚀孔(图 9(a), 图 9(e))。

此外，在这些页岩样品中观察到数百纳米至微米级的微裂缝，它们主要是由构造应力、矿物力学和成分的差异造成的。这些微裂缝增加了天然气孔隙与粒间孔隙相互连通的可能性，为游离气的储存和运移提供了充分的通道。

4.2. 孔隙结构

页岩孔隙结构主要包括页岩储层的比表面积、孔体积及孔隙的大小分布，直接影响着页岩气的储集性能、吸附能力和渗流特征等方面。基于低温氮气吸附实验来表征页岩孔隙结构特征，并分析主控因素。

由图 10 和图 11 可见拉张槽型浅水陆棚沉积和坳陷型深水陆棚沉积筇竹寺组页岩吸附等温线相似，孔隙类型均发育有板状矿物构成的槽状孔和狭缝孔隙。各页岩吸附过程可分为 3 个阶段：当相对压力 P/P_0

小于 0.04 时, 有一定的吸附气量, 表明页岩中发育一定的微孔; 当相对压力处在 0.04~0.8 之间, 吸附气量缓慢上升, 等温线几乎平行于 P/P_0 轴。当相对压力大于 0.4 时, 吸附曲线与解吸附曲线分析, 形成滞后回线, 并且解吸附曲线在相对压力约为 0.5 时, 快速下降, 表明页岩发育两端开放型的孔隙类型; 当相对压力近乎达到 1.0 时, 吸附曲线和解吸附曲线形态变尖, 并且无吸附限制, 吸附气量快速增加, 表明页岩还发育一定的大孔。综上所述, 拉张槽型沉积和坳陷型沉积页岩微孔 - 介孔 - 大孔均有发育, 部分孔隙具有一定的连通性。

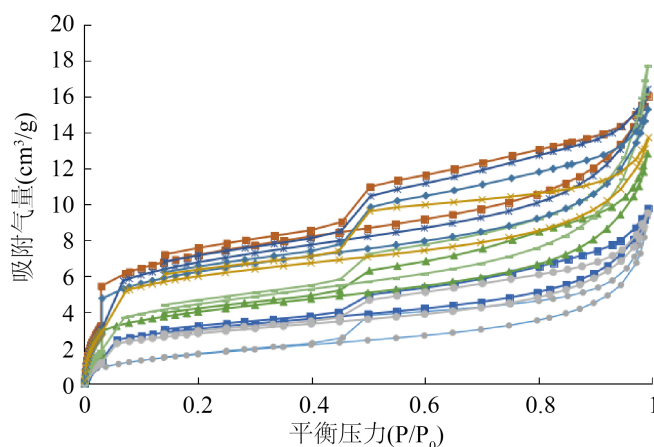


Figure 10. SZY1 Well Qiongzhusi formation shale adsorption isotherm

图 10. SZY1 井筲竹寺组页岩吸附等温线

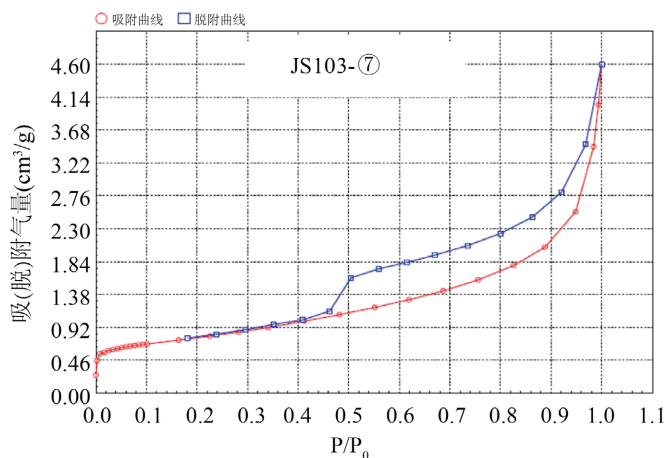


Figure 11. JS103 Well Qiongzhusi formation shale adsorption isotherm

图 11. JS103 井筲竹寺组小层页岩吸附等温线

SZY1 井联合表征结果显示, 微孔孔径分布具有多个区间, 峰值分别为 0.55 nm~0.85 nm~1.5 nm, 介孔孔径分布范围较广, 40~50 nm 存在峰值, 大孔孔径分布峰值在 100~103 nm。筲竹寺组总比表面积分布在 14.071~44.581 m^2/g 之间, 平均 27.965 m^2/g ; 孔隙体积分布在 0.0126~0.026 cm^3/g 之间, 平均 0.018 cm^3/g (图 12)。筲竹寺组页岩微孔提供了 18%~36.4% 的孔体积和 57.2%~77.6% 的比表面积(图 12)。

JS103 井联合表征结果显示, 微孔体积占 2.4%, 介孔体积占 67.0%, 大孔体积占 30.6%, 反映了介孔

和大孔是粉砂质页岩储集空间的主体，而介孔对孔体积的贡献最大[11]。

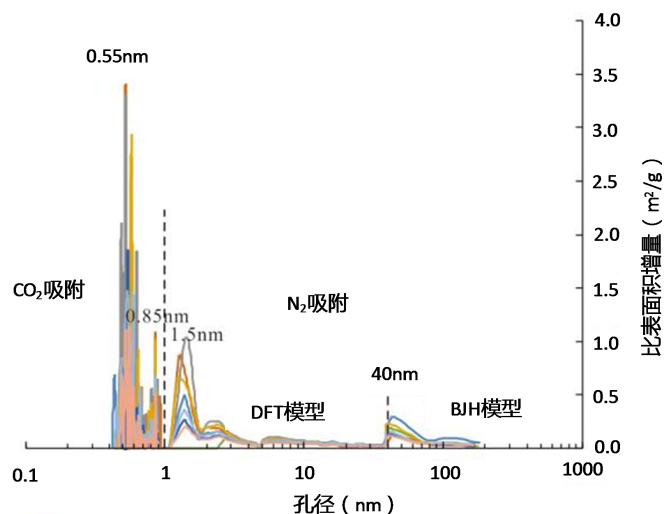


Figure 12. SZY1 Well shale aperture distribution map of Qiongzhusi Formation

图 12. SZY1 井筇竹寺组页岩孔径分布图

5. 优质储层发育主控因素

结合孔隙结构特征，分析拉张槽深水陆棚相沉积、拉张槽浅水陆棚相沉积和陆内坳陷深水陆棚相沉积优质页岩储层控制因素，明确拉张槽深水陆棚相沉积、陆内坳陷深水陆棚相沉积和拉张槽浅水陆棚相优质储层的发育条件。川中拉张槽深水陆棚相沉积黑色页岩孔隙发育受控于有机质富集程度，有机质富集程度越高，越有利于优质储层的发育。筇竹寺组页岩形成于陆棚沉积环境利于有机质保存和富集，在有机质产生气的同时会产生大量有机孔，提供大量储集空间。对于川西南拉张槽浅水陆棚相沉积粉砂质页岩储层，由于有机质富集程度较低导致有机质对控制优质储层发育的影响较小，主要由成岩作用控制。综合分析拉张槽深水陆棚相沉积页岩最优储层为黑色页岩储层，其适宜的高 TOC、高脆性矿物、高含气量、良好的顶底板条件为储层提供有利条件；其次拉张槽浅水陆棚相沉积粉砂质页岩亦可作为次一级储层，具有高脆性矿物含量以及良好的顶底板等有利条件。

川北陆内坳陷深水陆棚相沉积黑色页岩孔隙发育受控于有机质富集程度，有机质富集程度越高，越有利于优质储层的发育。但其中也发育有大量的微裂缝和溶蚀孔，成岩作用对优质储层的发育也有较强的影响。同时，陆内坳陷深水陆棚相沉积黑色页岩发育大量水平缝和低角度缝也可作为页岩气的储集空间。综合分析，陆内坳陷深水陆棚相沉积筇竹寺组页岩储层有机质丰度和石英含量高且发育大量水平缝和低角度缝，保证了有机质富集程度高、脆性高和储集空间大的条件，可作为潜在优质储层开展下一步含气性及综合甜点评价研究。

6. 结论

通过拉张槽沉积粉砂质页岩和黑色页岩及陆内坳陷沉积黑色页岩在矿物组成、孔隙发育特征和孔隙发育主控因素等方面的对比，揭示了拉张槽与陆内坳陷型页岩气储层差异及发育主控因素，认识到：

1) 川北陆内坳陷型黑色页岩储层有 TOC 较高，含气量略低，粘土矿物含量高，脆性矿物含量相对偏低，可压性稍差。川中拉张槽深水陆棚相黑色页岩有机质丰度略低，孔隙度高，含气量高脆性矿物含

量高,可压性好。川西南地区拉张槽浅水陆棚沉积粉砂质页岩有机质丰度低,孔隙度低,含气量低,脆性矿物含量高,可压性较好。

2) 陆内坳陷深水陆棚沉积、拉张槽深水陆棚沉积和拉张槽浅水陆棚沉积页岩储层孔隙类型及发育主控因素不同。陆内坳陷深水陆棚沉积页岩储层孔隙类型主要以有机质孔和矿物溶蚀孔,比表面积相对较低,但孔径相对较大。孔隙受控于有机质丰度和成岩作用。拉张槽深水陆棚沉积黑色页岩储层孔隙类型主要以有机质孔为主,孔隙受控于有机质丰度;拉张槽浅水陆棚沉积粉砂质页岩储层孔隙类型主要以片状粘土矿物孔、粒间孔和微裂缝为主,比表面积最低,孔径最大,孔隙发育受控于成岩作用。

3) 川北陆内坳陷深水陆棚沉积页岩储层,靠近陆源,有机质丰度及石英含量高,确保有机质富集和储层脆性较高,有机质丰度高且板状矿物构成的槽状孔和狭缝孔隙发育,使得该类型页岩储层孔隙度高同时,比表面积和孔径也相对较高。其中位于古隆起边缘的陆内坳陷深水陆棚型页岩储层埋藏较浅且镜质体反射率较低小于3.0%,未开始石墨化,有机质依然具生烃潜力[19] [20] [21],可作为页岩气有利潜在目标进行进一步评价研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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. <https://doi.org/10.13745/j.esf.2016.01.001>
- [3] 张静平,唐书恒,郭东鑫. 四川盆地地下古生界筇竹寺组与龙马溪组页岩气勘探优选区预测[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 357-363.
- [4] 腾格尔,高长林,胡凯,等. 上扬子北缘下组合优质烃源岩分布及生烃潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(2): 254-259.
- [5] 梁峰,姜巍,戴贇,等. 四川盆地威远——资阳地区筇竹寺组页岩气富集规律及勘探开发潜力[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(5): 755-763.
- [6] 付小东,陈娅娜,罗冰,等. 中上扬子区下寒武统麦地坪组——筇竹寺组烃源岩与含油气系统评价[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 103-120.
- [7] 郭彤楼,熊亮,叶素娟,等. 输导层(体)非常规天然气勘探理论与实践——四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 24-37.
- [8] 李双建,高平,黄博宇,王海军,沃玉进. 四川盆地绵阳-长宁凹槽构造演化的沉积约束[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 889-898.
- [9] 刘树根,孙玮,罗志立,宋金民,钟勇,田艳红,彭瀚霖. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 511-520.
- [10] 吴冬,邓虎成,熊亮,等. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组-筇竹寺组层序充填和演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 764-777.
- [11] 邹才能,董大忠,王玉满,李新景,黄金亮,王淑芳,管全中,张晨晨,王红岩,刘洪林,拜文华,梁峰,吝文,赵群,刘德勋,杨智,梁萍萍,孙莎莎,邱振. 中国页岩气特征、挑战及前景(二) [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 166-178.
- [12] 王玉满,沈均均,邱振,李新景,张磊夫,张琴,王灿辉. 中上扬子地区下寒武统筇竹寺组结核体发育特征及沉积环境意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(9): 1308-1323.
- [13] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16.
- [14] 吴冬,邓虎成,熊亮,等. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组-筇竹寺组层序充填和演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 764-777.
- [15] 周桦,董晓霞,魏力民,等. 井研——犍为地区筇竹寺组粉砂质页岩储层特征[J]. 天然气技术与经济, 2023, 17(2): 23-31, 46.

- [16] 李进步, 卢双舫, 陈国辉, 等. 基于矿物学和岩石力学的泥页岩储层可压裂性评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(6): 159-164.
- [17] 姜鹏飞, 吴建发, 朱逸青, 等. 四川盆地海相页岩气富集条件及勘探开发有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 91-109.
- [18] 聂海宽, 张光荣, 李沛, 等. 页岩有机孔研究现状和展望[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1770-1787.
- [19] 王玉满, 董大忠, 程相志, 等. 海相页岩有机质碳化的电性证据及其地质意义——以四川盆地南部地区下寒武统筇竹寺组页岩为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 1-7.
- [20] 陈建平, 赵文智, 王招明, 等. 海相干酪根天然气生成成熟度上限与生气潜力极限探讨——以塔里木盆地研究为例[J]. 科学通报, 2007, 52(z1): 95-100.
- [21] 赵延铭, 高平, 肖贤明, 等. 中上扬子区下寒武统页岩有机岩石学特征及成熟度综合评价[J/OL]. 地球化学: 1-13[2023-07-18]. <https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.2023.01.012>