DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2020.07013

西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩 沉积岩相古地理与孔隙特征

客 昆¹,秦建华²,牟必鑫¹,魏洪刚¹,何 伟¹,雷玉雪¹,陈 杨¹,刘治成³ (1.四川省煤田地质工程勘察设计研究院,四川 成都 610072;2.中国地质科学院成都矿产 综合利用研究所,四川 成都 610041;3.四川省国土科学技术研究院,四川 成都 610045)

摘要:海陆过渡相富有机质泥页岩是页岩气勘查开发的重要领域。本文以西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥 页岩为研究对象,对研究区内富有机质泥页岩的沉积岩相古地理特征、微观孔隙类型、孔隙结构特征进行研究。白 果湾组富有机质泥页岩段沉积相主要为湖泊相、三角洲相、河流相。发育不同类型的微孔隙,孔隙主要以小孔为主, 微孔次之,平均孔径分布在5.56~56.89nm之间,比表面积平均为9.44m²/g,总孔体积平均为0.0187cm³/g。页岩气 主要形成于滨浅湖亚相及半深湖亚相中,并主要吸附于富有机质泥页岩的小孔、微孔内;西昌盆地白果湾组富有机 质泥页岩储集空间较好,具有良好的勘探潜力。

关键 词:西昌盆地;白果湾组;富有机质泥页岩;沉积特征;孔隙特征

中图分类号:P534.51; TE122 文献标识码:A

引言

自2003年美国开始工业化利用页岩气以来,全 球对页岩气勘查开发掀起了热潮^[13]。近年来,随 着对海相富有机质泥页岩基础地质条件研究的不 断深入,页岩气的勘探开发不断取得新的进展,对 海陆过渡相富有机质泥页岩的研究备受关注^[410]。 开展海陆过渡相富有机质泥页岩储集空间的类型、 孔隙结构特征的研究对页岩气富集规律和勘查开 发具有重要意义。

四川西昌盆地是国内海陆过渡相富有机质泥 页岩主要分布区,盆地内上三叠统白果湾组富有机 质泥页岩厚度大、分布范围广、有机碳含量较高、热 演化程度中等,具有良好的页岩气勘查开发潜力。 西昌盆地白果湾组富有机质泥页岩沉积岩相古地 理的划分在局部区域尚存在争议^[11-12],对西昌盆地 白果湾组富有机质泥页岩孔隙特征研究较少^[13],制 约了下一步对其页岩气的勘探开发。本文通过野 外28个实测剖面及1口地质调查井,对西昌盆地白 果湾组富有机质泥页岩段岩相古地理进行划分,对 富有机质泥页岩的孔隙特征进行了详细研究,为该 地区页岩气的勘探开发提供依据。

1 地质背景

西昌盆地位于扬子板块与青藏高原东缘交接 过渡的区域,其大地构造位置属于扬子板块的西南 边缘,跨越了康滇地轴和上扬子台拗两个二级构造 单元。盆地东以峨边—美姑断裂为界,西以安宁河 断裂为界,南以则木河断裂为界,向北延伸至大渡 河附近^[14-15](图1),研究区内自西向东依次发育黑 水河断裂、石棉—昭觉断裂、汉源—甘洛断裂。

在印支期中国西北大陆主要处于挤压状态^[16]。 受盆地沉积及构造的影响,西昌盆地上三叠统白果 湾组分布广泛,厚度及岩性存在较大差异,出露厚 度在 213~1000m 之间。西昌盆地上三叠统白果湾 组岩性自下而上可分为4段:一段岩性自下而上依 次为灰色—灰白色块状细砾岩、砂砾岩、灰色中— 厚层状粗砂岩、中砂岩间夹深灰色—灰黑色薄层状 粉砂岩、细砂岩;二段自下而上依次为深灰色—灰 黑色粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩间夹数 层 0.2~1cm 的煤线,层面见大量植物化石,该段为 主要目的层段,本文按照陆相页岩气评价指标^[17],

作者简介:客昆(1987-),男,硕士,工程师,主要从事油气资源调查评价。E-mail:907775446@qq.com

收稿日期: 2020-03-20; 改回日期: 2020-04-21

将有机碳含量大于1%的泥页岩定义为富有机质泥 页岩;三段岩性自下而上依次为深灰色细砂岩、深 灰色粉砂岩、深灰色泥质粉砂岩、深灰色—灰黑色 粉砂质泥岩,间夹数层0.3~1.5cm煤线;四段自下 而上依次为灰色块状细砂岩、粉砂岩、深灰色—灰 黑色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、深灰色泥岩、灰色粉 砂岩(图1)。

2 沉积岩相古地理

2.1 沉积特征

本文选取区内嘎格达村典型剖面,结合白果湾 组地层岩石的颜色、岩性、沉积构造特征及化石等 岩石学相标志,将白果湾组沉积相划分为河流相、 三角洲相、湖泊相等3种沉积相,其中河流相主要为



Fig. 1 Sampling points and comprehensive histogram of the upper Triassic Baiguwan Formation in Xichang basin

河道亚相,三角洲相包括三角洲平原亚相、前三角 洲亚相,湖泊相为浅湖亚相。

2.1.1 河流相

西昌盆地白果湾组河流相主要为河道亚相,一般发育在白果湾组一段,岩性为灰色—灰白色块状细砾岩、灰色中—厚层状粗砂岩、中砂岩间夹灰色细砂岩,发育槽状交错层理,底部见叠瓦状构造,主要为河道亚相中的滞留沉积微相(图 2a 下部)。

2.1.2 三角洲相

西昌盆地白果湾组三角洲相主要发育三角洲 平原亚相和三角洲前缘亚相。三角洲平原亚相分 为分流河道微相、陆上天然堤微相、沼泽微相,其 中,分流河道微相主要发育在白果湾组一段顶部、 三段顶部及四段下部,岩性为灰色细—粉砂岩含泥 砾,分选较好,发育波状层理及交错层理,层面见植 物茎化石(图 2a、2b),陆上天然堤微相主要发育在 白果湾组三段、四段,岩性为灰色—深灰色粉砂岩、 泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,层面见植物茎及植物碎 屑化石,发育平行层理、交错层理(图 2b、c),沼泽微 相主要发育在白果湾组二段,三、四段发育较少,岩 性为灰黑色泥岩、粉砂质泥岩间夹深灰色薄层状粉砂岩及数层 0.2~1cm 煤线,为缺氧的还原环境,间 夹的薄层状粉砂岩为洪水沉积,发育水平层理,层 面见大量植物根、茎化石(图 2a);三角洲前缘亚相 可分为水下分流河道微相、分流间湾微相,其中水 下分流河道微相主要发育在白果湾组三、四段,岩 性主要为灰色—深灰色厚层状粉砂岩偶见植物碎 片,发育波状交错层理(图 2b),分流间湾微相主要 发育在白果湾组四段,岩性为深灰色泥岩间夹深灰 色粉砂岩,发育水平层理及透镜状层理(图 2c)。

2.1.3 湖泊相

西昌盆地上三叠统白果湾组湖泊相主要为浅 湖亚相,主要发育在白果湾组二段、三段,岩性主要 为深灰色—灰黑色泥岩、粉砂质泥岩间夹深灰色薄 层状粉砂岩,层面见植物茎、叶化石,发育波状交错 层理及水平层理(图2)。

2.2 岩相古地理

通过分析野外实测剖面、构造剖面以及复查老 井资料得知,西昌盆地南部晚三叠世白果湾中期沉 降中心位于 XD3 井、PG1 井一带,沉积相为半深湖



图 2 西昌盆地上三叠统白果湾组典型沉积相剖面图

Fig. 2 Typical sedimentary facies profile of the upper Triassic Baiguowan Formation in Xichang basin

亚相,自沉降中心向南至 HZHBP 剖面一带渐变为 滨浅湖亚相,至普格县城一带沉积相依次渐变为滨 岸亚相、三角洲前缘亚相、三角洲平原亚相,向北至 西昌市—QB1 井— TLMP 剖面一带沉积相渐变为滨 浅湖亚相,至 MD 剖面一带沉积相依次渐变为滨岸 亚相 – 三角洲前缘亚相,至喜德县城一带沉积相渐 变为三角洲平原亚相。西昌盆地中部沉降中心位 于美姑县城一带,自西向东水体逐渐加深,西部喜 德 YMP 剖面—ZGJP 剖面一带沉积相为三角洲平原 亚相,向东至 LRDP 剖面—LBBP 剖面一带沉积相渐 变为三角洲前缘亚相,至 XD1 井—MCQP 剖面一带 沉积相渐变为滨岸亚相,至 HSLDP 剖面—XQP 剖 面一带沉积相渐变为滨浅湖亚相。研究区北部甘 洛一带沉降中心位于甘洛县城北部,沉积相为半深 湖亚相,向南至 AZP 剖面—JEP 剖面一带沉积相渐 依次渐变为滨浅湖亚相、滨岸亚相,至南部 WZLP 剖 面-JWP 剖面一带沉积相依次渐变为三角洲前缘亚 相、三角洲平原亚相,沉降中心北部为剥蚀区(图3)。





Fig. 3 Lithofacies paleogeographic map of the late Triassic Baiguowan in Xichang basin

3 微观孔隙类型

通过野外实测剖面及构造剖面,对西昌盆地上 三叠统白果湾组富有机质泥页岩进行采样,运用氩 离子束抛光扫描电子显微镜技术发现,研究区内富 有机质泥页岩存在多种不同类型的微—纳米级孔 隙,主要以有机质孔、粒间孔、溶蚀孔、颗粒粒缘缝、 黏土矿物层间缝为主,其中,溶蚀孔、黏土矿物层间 缝、颗粒粒缘缝发育较好,为页岩气提供了良好的 储集空间。

3.1 有机质孔

有机质孔是有机质在生烃过程中形成的孔隙, 西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩中有 机质孔发育情况有较大差异,镜下观察在研究区东 部 ZLYP 剖面有机质孔零星分布,截面呈椭圆状,孔

a

径在 100 ~ 360nm 之间,有机质孔之间不具连通性 (图 4a),储集性能较差;在研究区南部 HZHBP 剖面 有机质孔发育较好,呈蜂窝状,截面从形态上看呈 椭圆状、泡沫状,孔径在 100nm ~ 1μm 之间,有机质 孔之间连通性较好(图 4b),同北美 Barnett 富有机 质泥页岩有机质孔相似^[18],可作为页岩气良好的储 集空间。

3.2 粒间孔

粒间孔是矿物颗粒之间相互支撑形成的孔隙, 西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩粒间 孔十分发育,且种类繁多,主要发育在矿物颗粒与 矿物颗粒之间(图4c、4d)、片状黏土矿物集合体之 间(图4e、4f)、片状黏土矿物与矿物颗粒之间(图 4g),由于矿物颗粒大小不一,导致粒间孔孔径分布 范围较广,一般矿物颗粒与矿物颗粒之间孔径范围



a-HZHBP剖面有机质孔;b-ZLYP剖面有机质孔;c-TLMP剖面菱铁矿粒间孔;d-YMLP剖面矿物粒间孔发育;e-YMLP剖 面片层状伊利石集合体发育层间缝;f-YMLP剖面片层状黏土矿物集合体发育层间缝;g-TLMP剖面钠长石颗粒粒缘缝; h-ZLYP剖面石英溶颗粒溶蚀孔;i-YMLP剖面梢球状褐铁矿半充填的溶蚀孔;j:YMLP剖面矿物颗粒溶蚀孔;k:ZGJP剖面 平行的微裂隙:l:TDP剖面片层状伊利石集合体发育层间缝;



Fig. 4 Scanning electron photomicrographs of microscopic pores in organic-rich mud shales in the upper Triassic Baiguowan Formation, Xichang basin

在1~3μm、黏土矿物集合体之间孔径分布范围在 0.1~4μm、黏土矿物集合体与矿物颗粒之间孔径范 围在0.1~3μm,连通性好,是游离气的最主要储集 空间,同时也可作为页岩气良好的运移通道。

3.3 粒内孔

粒内孔是矿物颗粒内发育的孔隙,以溶蚀孔为 主,西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩溶 蚀孔发育较好,种类较多,常见于石英颗粒溶蚀孔 (图4h)、钠长石溶蚀孔(图4i)、矿物颗粒溶蚀孔 (图4j),溶蚀孔形态多样,孔径分布范围集中在0.5 ~2.5μm,连通性一般,同样可以作为页岩气良好的 储集空间。

3.4 微裂缝

微裂缝利于页岩气聚集、运移,是页岩孔裂隙 中重要组成部分^[19],西昌盆地上三叠统白果湾组富 有机质泥页岩微裂缝主要有构造因素形成的微裂 缝(图4k)、片状黏土矿物层间(图4l),微裂缝即可 作为页岩气的储集空间又可作为页岩气的运移通 道,同时水力压裂过程中微裂缝的发育程度直接影 响生产井的产量^[20]。

通过对西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质 泥页岩微观孔隙类型特征的研究可知,白果湾组富 有机质泥页岩发育不同类型的微孔隙,最主要发育 粒间孔,粒内孔次之,偶见微裂缝,有机质孔发育最 差,孔径分布范围较广。粒间孔、微裂缝、粒内孔连 通性较好,即为该区域页岩气的运移提供良好的运 移通道,又为页岩气的聚集提供了良好的储集空间。

4 微观孔隙结构特征

高分辨率扫描电子显微镜不能全面展现富有 机质泥页岩的微观孔隙结构,为了综合体现出富有 机质泥页岩孔隙结构特征及不同孔径分布特征,对 西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩样品, 运用高压压汞法、液氮吸附法来确定富有机质泥页 岩孔径分布特征,本文按(B.B. 霍多特、Choquette) 划分方案^[21],把1~10nm 认定为微孔、10~100nm 认定为小孔、100~1000nm 认定为中孔、大于 1000nm 认定为大孔。

4.1 高压压汞法分析孔隙结构

运用高压压汞法对野外采集的西昌盆地上三 叠统白果湾组富有机质泥页岩样品进行分析。得 知研究区内不同区域富有机质泥页岩孔隙结构不 同,结合压汞曲线及孔径分布关系图可以看出研究 区东部美姑县 YZHP 剖面富有机质泥页岩样品在进 汞压力达到 0.01MPa 时,进汞饱和度显著升高,此 时对应的孔径为 60 ~ 73.5μm 的大孔,表明富有机 质泥页岩中大孔较为发育(可能存在部分微裂缝); 进汞压力在 0.01 ~ 10MPa 之间时,进汞饱和度增长 较少,结合孔径分布曲线可以得出富有机质泥页岩 中中孔发育相对较少;当进汞压力在 10 ~ 60 MPa 时,进汞饱和度升高速率逐渐增大,说明富有机质 泥页岩小孔、微孔非常发育(图 5a,5b)。

研究区中部昭觉附近 TDP 剖面富有机质泥页 岩压汞实验可以看出,进汞压力在 0~1MPa 之间, 进汞饱和度无明显变化,说明富有机质泥页岩大孔 极少发育,进汞量可能与微裂缝有关;进汞压力在 2 ~9MPa 时,进汞饱和度增长率达到最大,结合孔径 分布曲线可以得出富有机质泥页岩中中孔非常发 育;当进汞压力大于 9MPa 时,进汞饱和度增长率逐 渐降低,进汞饱和度缓慢增长,结合孔径分布曲线 可以得出,富有机质泥页岩中小孔及微孔较为发育 (图 5c,5d)。

YZHP 剖面压汞孔隙度在 1.053% ~ 1.1522% 之间,门槛压力在 0.0241 MPa~0.0242 MPa 之间, 最大进汞饱和度介于 83.9128% ~ 91.9914%,说明 其储集性能较好:残留汞饱和度较低介于 18.3386% ~ 30.4921%, 退汞效率较高为 66.8544%~78.1457%,连通性较好,最大孔喉半径 达到 30.3572~30.3632µm,但饱和度中值压力较 高,介于 62. 2709 MPa~102. 1871 MPa,进一步揭示 富有机质泥页岩孔径总体偏小;分选系数值较高, 在 2.9079~4.0152 之间,说明富有机质泥页岩孔隙 分选较差; 歪度系数较小, 介于-0.4493~0.5074之 间,且中值半径为 0.0072~0.0118µm,说明富有机 质泥页岩孔隙以微孔为主,该类孔隙对页岩气的富 集和产出较为有利。TDP 剖面压汞孔隙度 5.9% ~ 9.246%; 门槛压力 0.021 MPa~0.056 MPa; 最大进 汞饱和度介于 98.65% ~ 98.68%, 说明其储集性能 较好;残留汞饱和度较低介于 51.28%~86.75%, 退汞效率较高为 12.06% ~ 48.04%, 说明富有机质 泥页岩孔隙喉道较少或部分吼道被堵塞,连通性较 差,最大孔喉半径达到13.19~34.27µm,饱和度中 值压力较低,介于9.801 MPa~14.25 MPa,进一步揭 示富有机质泥页岩孔径总体偏小:分选系数值较 高,在1.59~2.08之间,说明富有机质泥页岩孔隙 分选较差;歪度系数较小,介于-1.47~0.08之间,



图 5 西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩压汞曲线与孔径关系图

Fig. 5 Relationship between mercury injection curve and pore size of organic-rich mud shale of the upper Triassic Baiguowan Formation in Xichang basin

表1 西昌盆地白果湾组富有机质泥页岩压汞孔隙结构参数

Table 1Mercury-injected pore structure parameters of organic-rich mud shale of the Baiguowan Formation in
Xichang basin

井名	岩性	孔隙度	渗透率	门槛压力	中值压力	最大孔喉	中值	歪度	分选	最大进汞	残留孔汞	退汞效率
		/%	∕md	∕Mpa	/Mpa	半径/μm	半径/μm	系数	系数	饱和度/%	饱和度/%	/%
YZHP29	泥岩	1.05	5.3576	0.0241	102.18	30. 532	0.007	0. 5074	4.015	83.913	18.338	78.146
YZHP47	泥岩	1.15	2.6290	0.0242	62.27	30.363	0.012	-0. 449	2.908	91.991	30. 492	66.854
TDP12	泥岩	9.246	0.978	0.056	9.801	13.19	0.075	0.08	1.59	98.65	86.75	12.06
TDP16	泥岩	5.9	3. 512	0.021	14. 25	34.27	0.052	-1.47	2.08	98.68	51.28	48.04

且中值半径为0.0052~0.075µm,说明富有机质泥 页岩孔隙以小孔、微孔为主,该类孔隙对页岩气的 富集和产出较为有利(表1)。

4.2 低温液氮法分析孔隙结构特征

低温液氮分析法主要是测定富有机质泥页岩 孔径小于100nm的孔隙,包括小孔、微孔。吸附孔 发育特征的表征参数主要包括孔比表面积、总孔体 积、孔径结构和孔隙形态等。与压汞实验相比,低 温液氮吸附实验不存在高压下孔隙结构发生压缩、 变形和破裂所导致的误差,能更精确地表征纳米级 孔隙结构特征^[22]。

4.2.1 吸附等温线与孔隙形态

目前应用 Brunauer 提出的 5 类划分方案(图 6) 较多,这些不同曲线类型代表的典型孔隙结构,具

有比较单一的形状、大小和分布,但实际上富有机 质泥页岩通常具有非常复杂的曲线特征,多是几种 典型曲线的叠加、复合。

研究区南部 HZHBP 剖面、东部 QHGP 剖面、北 部 JE 剖面富有机质泥页岩均出现了迟滞回线,即液 氮吸附曲线和脱附曲线不重合(图 7a,7b,7c),接近 B 型、D 型,也可能为 B 型、D 型的叠加型,说明富有 机质泥页岩孔隙以狭缝状为主,反映了这几种富有 机质泥页岩中发育大量黏土矿物层间孔、缝,GLP 剖面吸附曲线与脱附曲线近重合,不具明显迟滞回 线(图 7d),表现为一端几乎封闭的大小变化范围较 大的圆筒状孔隙或板状孔隙特征,其可能的原因是 富有机质泥页岩中孔隙的形状和大小变化范围很 大,存在较大的粒间孔。





P/Pc

锥形结构的平行板孔





图 7 西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩吸附等温线 Fig. 7 Adsorption isotherm of organic-rich mud shale of the upper Triassic Baiguowan Formation in Xichang basin

4.2.2 孔容与比表面积特征

西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩 低温氮测试的结果分析表明(表2),研究区西部白 果湾组富有机质泥页岩的 BET 法测试的比表面积 分布在1.41~20.71m²/g之间,平均为9.44m²/g,

P/P

两端开孔的锥形管孔

BJH 法测试的总孔体积分布在 0.0112 ~ 0.0288 cm³/g之间,平均为 0.0187 cm³/g; 孔径分布在 5.56 ~ 56.89 nm 之间,平均为 14.77 nm,其中,孔径分布 在 10~100 nm 的小孔分布约占 50.7% ~ 55.0%,均 值为 52.10%,孔径小于 10 nm 的占 19.5%, 孔径分

P/Pc

具墨水瓶结构的孔

布大于 100nm 的中孔、大孔介于 24.2% ~ 31.4% (部分受微裂缝的影响),均值为 27.8%,研究区西 部富有机质泥页岩以小孔为主,其次为微孔,中孔、 大孔对泥岩孔体积贡献较小。

研究区东部富有机质泥页岩比表面积介于 4.7 ~ 8.26m²/g之间,平均为 6.48 m²/g,总孔体积介于 0.0108 ~ 0.0231 cm³/g,平均为 0.01695 cm³/g,孔径 介于 9.17 ~ 11.21 nm,平均孔径为 10.19 nm,其中, 孔径分布在 10 ~ 100 nm 的小孔占 52.6%,小于 10 nm 的微孔占 25.5%,超过 100 nm 的中、大孔径占 比为 21.9% (部分受微裂缝的影响),反映出东部富 有机质泥页岩孔隙以小孔为主,微孔次之,少量中 孔、大孔。

北部的甘洛地区富有机质泥页岩比表面积介于 8.82~10.90m²/g,平均为 18.17m²/g;总孔体积在 0.0143~0.0215cm³/g之间,平均为 0.0180cm³/g, 平均孔径介于 6.50~7.78nm,其中,孔径分布在 10~ 100nm 小孔介于 48.4%~51.3%, 微孔占 28.1%, 超 100nm 的中孔、大孔占比为 20.6% (部分受微裂 缝的影响),反映出北部富有机质泥页岩孔隙以小 孔为主, 微孔次之,中孔、大孔较少。

西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩 孔隙主要以分布在10~100nm范围内的小孔为主, 微孔次之,大、中孔发育较少,与压汞法测得的实验 结果相吻合。

表 2 西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩氮气吸附法测量孔隙结构数据

Table 2Pore structure data measured by nitrogen adsorption method in organic-rich mud shale of the upper TriassicBaiguwan Formation in Xichang basin

刘西友步	目旦	BET 比表	总孔体积	平均孔直径	各孔径段孔体积比/%			
司囬名你	运亏	$(m^2 \cdot g^{-1})$	$(10^{-3} \mathrm{mL} \cdot \mathrm{g}^{-1})$	(nm)	其它	10-100nm(小孔)	<10nm(微孔)	
-	YMP-38	7. 88	0. 0144	7.31	29.8	51.3	18.9	
	YMP-42	7.80	0.0112	7.81	27.4	51.2	21.4	
YMP	YMP-48	6.92	0.0153	8.66	31.4	50. 7	17.9	
	YMP-60	10. 15	0. 0197	7.75	28.1	51.0	20.9	
	YMP-82	20.71	0. 0288	5.56	26.6	55.0	18.4	
UZUDD	HZHBP-7	1.41	0. 0208	58.89	26.6	53.4	20.0	
плир	HZHBP-18	11.18	0. 0207	7.40	24.3	52.0	23.7	
QHGP	QHGP-2	4. 70	0. 0108	9.17	9.5	49.5	41.0	
GLP	GLP-17	8.26	0. 0231	11.21	30. 3	52.6	17.1	
AZP	AZP-29	10.90	0. 0215	7.78	25.5	48.4	26.1	
HQWP	HQWP-12	10. 57	0.0182	6.83	22. 1	49.0	28.9	
JEP	JEP-6	8.82	0. 0143	6.50	19.3	51.3	29.4	

结合富有机质泥页岩比表面积随孔径分布曲 线可以看出,0~10nm的微孔处,所有样品均呈现出 比表面积峰值,即富有机质泥页岩中微孔是比表面 积的主要贡献者,南部 HZHB 剖面及东部 GLP 剖面 富有机质泥页岩孔径在 60nm 处,部分比表面积呈 现出高值,表明页岩气主要吸附于富有机质泥页岩 中的微孔内,少量吸附于小孔内(图 8a,8b)。

通过富有机质泥页岩累计孔体积随孔径分布 曲线可见看出,研究区南部 HZHBP 剖面、东部 GL 剖面富有机质泥页岩累计孔体积在孔径达到 60nm 后不再升高,说明页岩气主要吸附在富有机质泥页 岩中 10~60nm 的小孔内。研究区北部 AZP 剖面、 HQWP 剖面富有机质泥页岩累计孔体积在孔径达 到 130nm 后不再升高,说明页岩气主要吸附在富有 机质泥页岩中 10~100nm 的小孔及 100~130nm 的 中孔内(图 8c,8d)。

5 讨论与结论

结合国内近年来取得有关海陆过渡相富有机 质泥页岩的初步成果,对研究区内富有机质泥页岩 沉积环境、微观孔隙类型、孔隙结构特征进行对比 及讨论。

国内海陆过渡相富有机质泥页岩在鄂尔多斯 盆地取得初步成果,该盆地勘探的鄂页1井获得 1.95×10⁴ m³/d的页岩气流^[24],鄂尔多斯盆地延长 组7段富有机质泥页岩为半深湖亚相沉积,微观孔



图 8 西昌盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩比表面积、孔体积随孔径变化关系图

Fig. 8 Relationships of specific surface area, pore volume, and pore size of organic-rich mud shale in the upper Triassic Baiguowan Formation in Xichang basin

隙以粒间孔和粒内孔为主,少量溶蚀孔,有机质孔 发育较少,粒间孔主要发育在脆性矿物颗粒和黏土 矿物之间,粒内孔发育在矿物颗粒内部,有机质孔 以蜂窝状分布在有机质表面,孔隙形态多为狭缝型 孔和板状孔,页岩气主要吸附于微孔内^[25-26]。西昌 盆地上三叠统白果湾组富有机质泥页岩沉降中心 主要集中在3个区域即南部的 XD3 井—PG1 井一 带、中部的美姑一带及北部甘洛县城一带;研究区 南部沉积环境为半深湖亚相与鄂尔多斯盆地沉积 环境一致,中部及北部沉积环境较差于鄂尔多斯盆 地,为滨浅湖亚相沉积;孔隙类型以粒间孔最为发 育且种类繁多、连通性好,粒内孔次之,偶见微裂 缝,有机质孔发育较差,孔隙类型与鄂尔多斯盆地 相似;孔隙形态较鄂尔多斯盆地复杂,以狭缝状、一 端近封闭的大小变化范围较大的圆筒状、板状孔隙 为主;页岩气吸附的孔径范围较鄂尔多斯盆地广, 主要吸附于富有机质泥页岩的小孔、微孔内,少量 吸附于中孔内。与鄂尔多斯盆地对比,西昌盆地富 有机质泥页沉积环境及储集空间较好,为页岩气的 聚集提供了良好的基础地质条件,具有较大的勘探 潜力。

参考文献:

- Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002,86(11):1921-1938.
- [2] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然 气工业,2008,28(6):136-140.
- [3] 常泰乐. 黔北龙马溪组页岩气成藏条件研究[D]. 贵阳:贵州 大学,2016.
- [4] 邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展 对策[J].石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
- [5] Jarvie D M, Hill R J, Rubble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas asone model for thermogenic: Shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [6] 冯小龙,敖卫华,唐玄,等.陆相页岩气储层孔隙发育特征及主 控因素分析:以鄂尔多斯盆地长7段为例[J].吉林大学学报, 2017(3):678-692.
- [7] Ross, D. J. K., Bustin, R. M., Characterizing the Shale Gas Resource Potential of Devonian-Mississippian Stra-ta in the Western Canada Sedimentary Basin: Application of an Integrated Formation Evaluation [J]. AAPG Bul-letin, 2008, 92 (1): 87 – 125.
- [8] Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C. et al., Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale [J]. Journal of

Sedimentary Research, 2009, 79 (12):848-861.

- [9] Chalmers, G. R., Bustin, R. M., Power, I. M. Characterization of Gas Shale Pore Systems by Porosimetry, Pycnometry, Surface Area, and Field Emission Scanning Electron Microscopy Transmission Electron Microscopy Image Analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig Units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6):1099 - 1119.
- [10] 田巍,彭中勤,白云山,等.湘中涟源凹陷石炭系海陆过渡相 测水组页岩气成藏征及勘探潜力[J].地球科学,2019,44 (11):3794-3811.
- [11] 杨威,魏国齐,金惠,等. 西昌盆地上三叠统白果湾组沉积相 与油气勘探前景[J]. 天然气工业,2020,40(3):13-22.
- [12] 张长俊,覃建雄,沈丽娟,等. 西昌盆地晚三叠世三角洲的发现及研究意义[J]. 矿物岩石,1994,14(4):54-58.
- [13] 刘树根,李国蓉,郑荣才,等. 西昌盆地上三叠统储层特征研 究[J]. 天然气工业,2004,24(2):92-95.
- [14] 刘丽华,徐强,范明祥,等.西昌盆地构造特征和含油气条件 分析[J].天然气,2003,23(5):34-38.
- [15] 王运生,李云岗,等. 西昌盆地的形成与演化[J]. 成都理工学 院学报,1996,23(1):85-90.
- [16] 许怀志,张岳桥,王贵重,等.塔里木盆地瓦石峡凹陷侏罗纪构造演化与油气地质条件[J].石油地球物理勘探,2010,45 (1).
- [17] 张大伟,李玉喜,张金川,等.全国页岩气资源潜力调查评价[M].北京:地质出版社,2012.

- [18] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and adescriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1078.
- [19] 肖贤明,宋之光,朱炎铭,等.北美页岩气研究及其对我国下 古生界页岩气开发的启示[J].煤炭学报,2013,38(5):721 -727.
- [20] 琚宜文, 戚宇, 房立志, 等. 中国页岩气的储层类型及其制约因素[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8):782-899.
- [21] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(2):207 - 244.
- [22] 刘顺喜.海陆过渡相泥页岩储层特征及其沉积控制机理-以 织纳煤田龙潭组为例[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [23] Brunauer S, Deming L S, Deming W E, et al., On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases [J]. Journal of the American Chemical Society, 1940,62(7):1723 - 1732.
- [24] 郭旭升,胡东风,刘若冰,等.湘中涟源凹陷上二叠统龙潭组 和大隆组海陆过渡相泥页岩孔隙结构特征及对比[J].地球 科学,2018,10(3):3757-3772.
- [25] 原园.陆相页岩储层孔隙结构演化特征及其控制因素[D]. 北京:中国石油大学,2016.
- [26] 徐红卫,李贤庆,祁帅,等.鄂尔多斯盆地延长探区延长组页 岩气储层孔隙结构特征[J].现代地质,2017,31(2)328 -337.

Sedimentary lithofacies paleogeography and pore characteristics of the organic-rich mud shale of the upper Triassic Baiguwan Formation in Xichang basin

Qie Kun¹, Qin Jianhua², Mou Bixin¹, Wei Honggang¹, He Wei¹, Lei Yuxue¹, Chen Yang¹, Liu Zhicheng³

Sichuan Coal Geological Engineering Design and Research Institute, Chengdu 610072, Sichuan, China; 2.
Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Sichuan Institute of Land Science and Technology, Chengdu 610045, Sichuan, China)

Abstract: Organic-rich mud shale in transitional facies is an important target for shale gas exploration. In this paper, the paleogeographic features, micro-pore types and pore structures of the organic-rich mud shale of the Upper Triassic Baiguowan Formation in Xichang Basin were studied. Lake facies and delta facies are the main sedimentary facies of organic-rich mud shale in the Baiguowan Formation. Small pores, which are dominant, followed by micropores, occurred in the organic-rich mud shale in the Baiguowan Formation. The average pore size was between 5.56 nm and 56.89 nm, the average specific surface area was $9.44 \text{m}^2/\text{g}$, and the average total pore volume was 0. 0187 cm³/g. Shale gas was mainly formed in shore-shallow lake subfacies and semi-deep lake subfacies, and mainly adsorbed in the small pores and micropores of the organic-rich mud shale. In general, the organic-rich mud shale of the Baiguowan Formation in Xichang basin is potential for exploration of shale gas.

Key words: Xichangbasin; the Baiguowan Formation; Organic-rich mud shale; Sedimentary characteristics; Pore characteristics