

# 页岩有机-无机复合型孔隙及其控气作用

## ——以川西南地区筇竹寺组为例

刘忠宝<sup>1,2,3</sup>, 高波<sup>1,2,3</sup>, 武清钊<sup>1,2,3</sup>, 王濡岳<sup>3</sup>, 聂海宽<sup>3</sup>, 张钰莹<sup>4</sup>

1 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室; 2 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室  
3 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院; 4 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院

**摘要** 以川西南地区寒武系筇竹寺组页岩为例,应用岩石薄片鉴定、矿物X射线衍射、压汞-吸附联合测定、氦气孔隙度测试、氩离子抛光-扫描电镜观察及页岩气储层测井定量表征等多种技术方法,开展页岩孔隙结构、类型及特征研究,探讨了有机-无机复合型连通孔隙系统的形成机制及其对页岩气富集的控制作用。研究表明:①研究区筇竹寺组富有机质页岩孔隙以介孔和微孔为主,其次为大孔;②页岩孔隙类型以粒(晶)间孔、黏土矿物层间孔为主,多呈三角形、多边形及狭缝形;其次为有机黏土复合体内的有机质孔,多呈不规则形;③富有机质页岩具备发育有机-无机复合型连通孔隙系统的条件,有机质孔和无机矿物孔的复合提高了页岩储集能力,控制了页岩气的富集。

**关键词** 页岩储层; 有机质孔; 无机矿物孔; 有机-无机复合型孔隙; 筇竹寺组; 寒武纪; 四川盆地

中图分类号: TE122.2\*3

文献标识码: A

## 0 引言

近几年来,我国四川盆地志留系龙马溪组页岩气勘探开发取得了重大突破,相继建成涪陵<sup>[1-2]</sup>、长宁—威远等国家级页岩气示范区,四川盆地已成为我国页岩气勘探开发的主战场<sup>[3-5]</sup>。与此同时,寻找页岩气接替层系,扩大页岩气勘探开发场面已成为摆在勘探家们面前的难题。四川盆地寒武系筇竹寺组页岩富含有机质、厚度大,页岩气资源潜力大,是我国南方海相页岩气勘探的重要接替领域之一<sup>[6-8]</sup>。

近年来,四川盆地西南部威远及井研—犍为地区寒武系筇竹寺组虽然相继获得了工业气流<sup>[9-11]</sup>,但整体勘探效果并不理想,至今未建成规模性商业开发阵地,这反映寒武系的页岩气勘探极具复杂性。以威远及长宁地区为重点区域,国内研究者<sup>[12-16]</sup>对筇竹寺组页岩的沉积相、有机地球化学、储层孔隙和含气性,及其与龙马溪组页岩的异同点开展过一些研究,已认识到这2个层系在页岩气富集成藏的关键地质条件方面具有一定的差异性。最显著的差异之一

体现在页岩储层微观孔隙特征及储集性能方面——与龙马溪组页岩相比,筇竹寺组页岩物性相对较差。但是,对于筇竹寺组页岩有机质孔隙结构及发育程度的认识仍不统一,无机矿物孔隙对储集页岩气的贡献尚不明确。

本文重点以川西南地区J1井(取心较全、产气效果好)筇竹寺组为例,在岩心观察描述的基础上,综合应用岩石薄片鉴定、矿物X射线衍射、压汞-吸附联合测定、氦气孔隙度测试、氩离子抛光-扫描电镜观察及页岩气储层测井定量表征等多种技术方法,开展了页岩储层微观孔隙结构定量表征与孔隙类型及特征研究,探讨有机-无机复合型连通孔隙系统的形成机制,及其对页岩气富集的控制作用。研究成果对我国南方寒武系页岩气勘探开发具有参考借鉴意义。

## 1 研究区概况

川西南地区位于四川盆地西南部(图1),筇竹寺组深水陆棚相富有机质页岩发育,有机质热演化程

收稿日期: 2018-04-04; 改回日期: 2018-07-23

本文受国家科技重大专项专题“海相页岩有机质富集机理研究”(编号:2017ZX05036-002-001)及中国石油化工股份有限公司科技部项目“中上扬子下寒武统甜点区研究”(编号:P15114)资助

刘忠宝: 1978年生,博士,高级工程师,主要从事非常规油气地质、层序地层及碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址: 100083 北京市海淀区北四环中路267号奥运大厦; E-mail: liuzb.syky@sinopec.com

度高,等效镜质组反射率( $R_o$ )介于2.7%~3.1%之间,平均为2.9%。产气富有机质页岩层段位于筇竹寺组上部,顶、底板均为大套粉砂质页岩及页岩,压力系数高(>1.2),页岩气保存条件好,目前已有3口钻井测试获工业页岩气流。



图1 研究区平面位置

川西南地区J1井筇竹寺组页岩的有机碳含量(TOC)为0.6%~3.5%,平均为1.3%。页岩矿物组成以黏土矿物和石英为主(表1),其次为长石,普遍含少量碳酸盐矿物及黄铁矿等。岩石薄片镜下显示为泥质结构、粉砂结构及纹层构造,隐晶质黏土矿物与有机质相互混杂,少量黏土矿物呈拉长状;碎屑

颗粒散布其中或呈层状分布,呈次棱—次圆状,粒度为0.03 mm左右;偶见少量碳酸盐矿物及粒状黄铁矿星点分布,自形程度较好。

表1 川西南J1井筇竹寺组页岩全岩矿物组成

样号	黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	硬石膏	黄铁矿
1	40	38	2	10	2	3	1	2	2
2	35	40	3	12	2	2	2	0	3
3	37	40	2	10	2	4	1	2	2
4	46	29	1	9	2	5	2	1	4
5	55	24	2	6	2	5	1	0	5
6	41	35	1	6	2	4	2	2	7
7	44	31	1	7	3	4	2	2	6
8	44	31	3	8	3	4	2	2	3
9	52	27	3	4	4	4	1	1	4
平均值	44	33	2	8	2	4	2	1	4

注: 样品采样位置见图2。

根据岩石结构构造、有机碳含量及矿物成分等特征,川西南地区筇竹寺组页岩的岩石类型以黑色碳质页岩和深灰色纹层状粉砂质页岩为主(图2),测井曲线表现为较高自然伽马值(97~285 API),实测孔隙度介于1.3%~4.7%之间,平均为3.5%。其中,黑色碳质页岩孔隙度较高,含气性好。

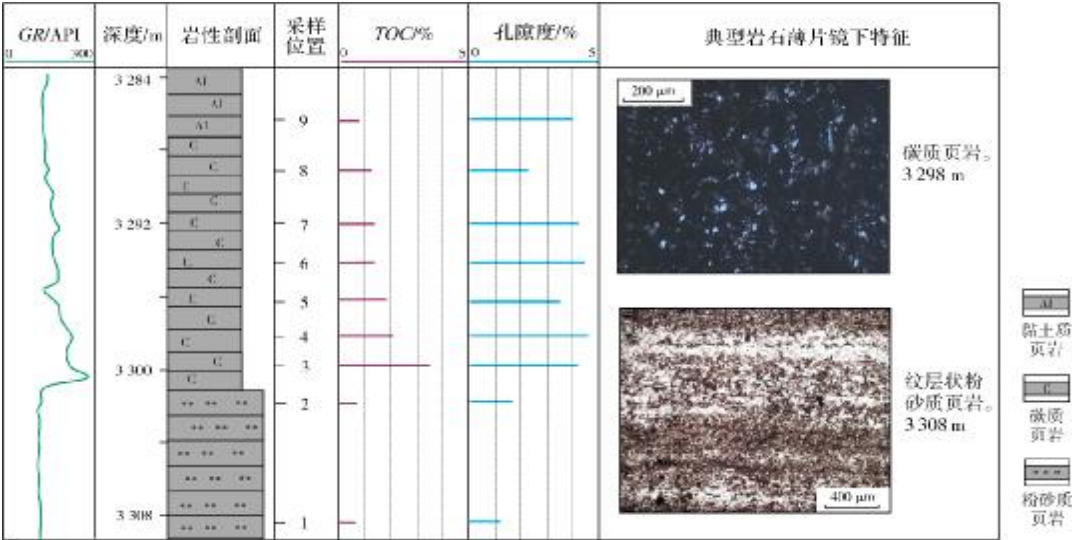


图2 川西南J1井筇竹寺组富有机质页岩段综合柱状图

## 2 页岩储层微观孔隙表征

### 2.1 页岩全孔隙结构特征

页岩储层非均质性强,孔隙孔径小,一般以纳

米至微米级孔隙为主,孔隙结构的定量表征对于评价页岩储集性能至关重要。目前,主要采用流体注入法测定页岩孔隙大小,其中低温氮气吸附法(测定范围为2nm至几百纳米)、压汞法(测定范围为

3 nm~1 mm)<sup>[17]</sup>使用最为广泛。二氧化碳吸附法(测定小于2 nm的孔隙)测定的孔径范围太小,实际使用较少。上述各种方法在孔径的测定范围及精度方面各有优缺点,采用单一手段难以准确表征页岩孔隙结构特征。为此,本次研究中将压汞法和气体吸附法相结合,通过这2种测定结果的衔接实现全孔隙结构定量表征<sup>[18]</sup>,准确地揭示了页岩宽范围的孔径分布特征。

川西南地区J1井筇竹寺组9个页岩样品测试结果表明(表2):富有机质页岩发育各孔径范围的孔隙(图3),

其中以介孔(2~50 nm)和微孔(<2 nm)为主,平均占比分别为58.59%、27.08%;其次为大孔(>50 nm),平均占比为14.33%。多种孔径范围孔隙表征的实现,体现了压汞-吸附联合测定方法对页岩全孔隙结构表征的优势。此外,从比表面积与总孔容的统计来看(图4),川西南地区筇竹寺组页岩(比表面积平均值为7.08 m<sup>2</sup>/g,总孔容平均值为0.006 cm<sup>3</sup>/g)均明显低于涪陵地区龙马溪组页岩(比表面积平均值为16.45 m<sup>2</sup>/g,总孔容平均值为0.02 cm<sup>3</sup>/g),反映其吸附气体的能力不及龙马溪组页岩。

表2 川西南J1井筇竹寺组页岩孔隙结构参数

样号	不同孔径占比/%						总孔容/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
	≤ 2 nm	>2~10 nm	>10~50 nm	>50~100 nm	>100~500 nm	> 500 nm		
1	27.74	32.94	31.91	0.83	2.38	4.20	0.006	5.17
2	28.93	32.13	30.73	0.00	0.27	7.94	0.007	9.60
3	7.28	15.99	47.88	2.77	8.65	17.43	0.006	4.99
4	25.27	36.61	22.13	0.49	2.31	13.20	0.003	4.81
5	29.26	44.20	16.20	0.41	2.65	7.28	0.008	8.55
6	28.75	37.20	21.32	0.87	3.54	8.31	0.007	9.93
7	25.78	44.67	18.67	0.49	2.48	7.91	0.009	7.99
8	44.08	34.80	15.21	0.45	2.41	3.04	0.003	5.29
9	26.60	27.01	17.71	0.44	5.00	23.24	0.006	7.40
平均值	27.08	33.95	24.64	0.75	3.30	10.28	0.006	7.08

注: 样品采样位置见图2。

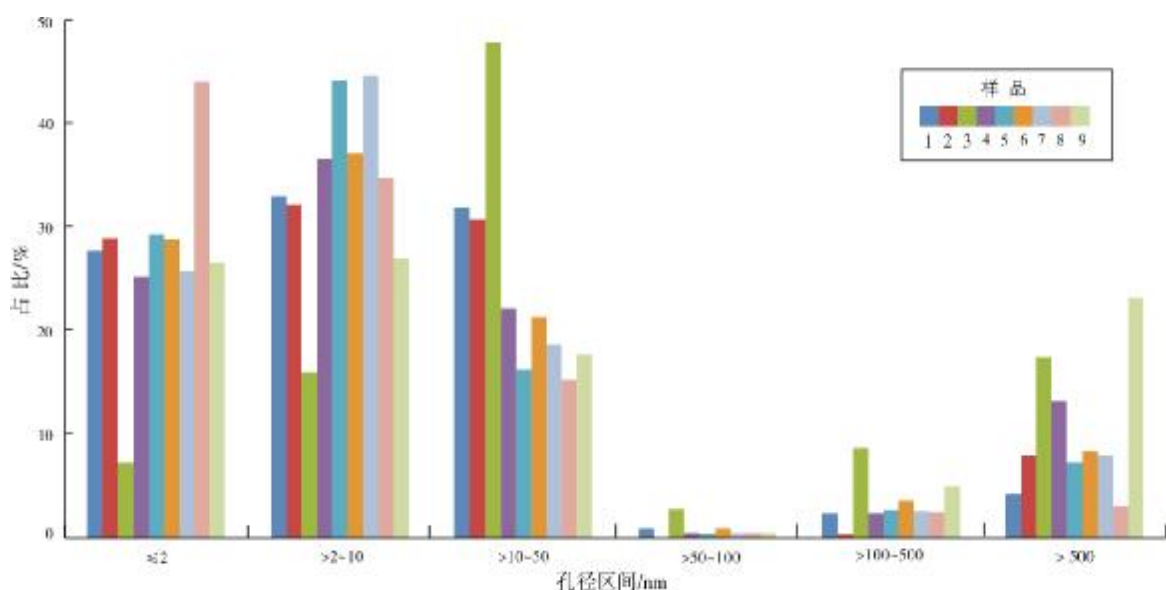
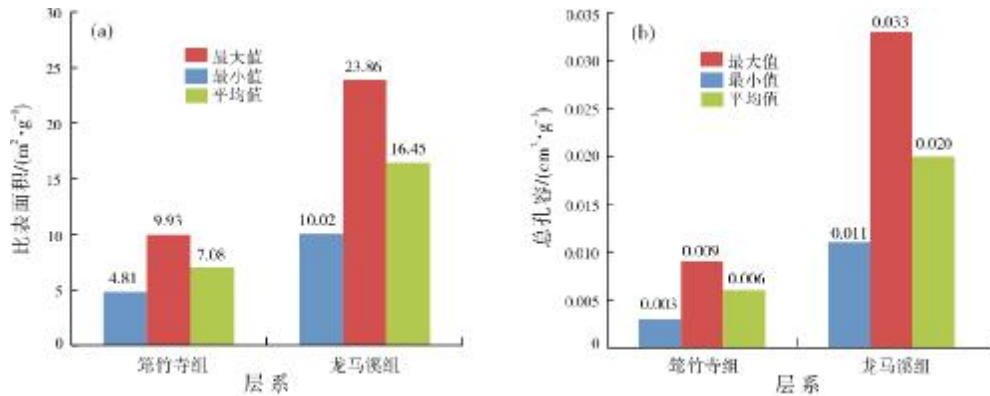


图3 川西南筇竹寺组页岩压汞-吸附联合测定孔隙结构特征



注:川西南地区J1井筇竹寺组样品9个。焦石坝地区JY1井龙马溪组样品25个。

图4 川西南筇竹寺组与焦石坝龙马溪组页岩比表面积、总孔容对比

## 2.2 页岩孔隙类型及特征

本次研究在压汞-吸附联合测定孔隙大小的基础上,进一步开展了相应的氩离子抛光-扫描电镜分析,通过高精度显微镜将观察倍数提高到8万、10万倍,实现川西南地区筇竹寺组页岩孔隙的图像表征(定性观察与定量测定)。依据无机矿物颗粒、有机质及孔隙之间的接触关系与成因联系<sup>[19]</sup>,识别出4种主要孔隙类型:2种有机质孔,包括有机黏土复合体内有机质孔、莓状黄铁矿集合体内有机质孔;2种无机矿物孔,包括粒(晶)间孔、黏土矿物层间孔。其中,以粒(晶)间孔、黏土矿物层间孔最为发育,形态多呈三角形、多边形、狭缝形;其次为有机黏土复合体内有机质孔,形态多呈不规则形。

### 2.2.1 有机质孔

#### (1)有机黏土复合体内有机质孔

氩离子抛光-扫描电镜观察显示,川西南地区筇竹寺组页岩中有机质多与板条状或针叶状黏土矿物相互伴生发育(图5a,5b),形成有机黏土复合体,有机质内部纳米级孔隙较发育,以不规则形为主,孔径多为几纳米至几十纳米。多数有机黏土复合体内的板条状或针叶状黏土矿物排列无明显定向性,且有钠长石和黄铁矿等无机矿物颗粒骨架支撑;但一些黏土矿物层间没有无机矿物颗粒支撑,且其片层排列又具有一定方向性,又受压实作用影响,使得层间形成了紧密接触,仅存在少量有机质,导致黏土矿物层间已完全闭合。可见,黏土矿物的杂乱堆积及无机矿物颗粒的支撑作用对有机质及内部孔隙的保存至关重要。

有机质与黏土矿物通过化学键键合或相互吸附形成的有机黏土复合体,是沉积物中有机质存在的一种重要形式,它一方面可以有效地聚集有机质,另一方面又可以形成牢固的稳定结构。前人<sup>[20]</sup>针对不同沉积环境中有机黏土复合体特征的对比研究发现,浅海相沉积物经历了较深的埋藏压实过程,造成有机质与黏土矿物结合能力加强,紧结态有机质较多,有机质与黏土矿物的结合较牢固而不易释放,因此有机黏土复合度高。黏土矿物层间有机质稳定性加热实验研究发现<sup>[21]</sup>,当温度升到550℃时,黏土矿物的层间距才发生收缩。上述研究均表明有机黏土复合体具有很好的稳定性,有利于有机质与有机质孔的保存。

#### (2)莓状黄铁矿集合体内有机质孔

研究区筇竹寺组页岩中莓状黄铁矿集合体较发育,集合体由许多单晶黄铁矿杂乱堆积组成,多呈圆球形,少数呈椭圆形,直径多在2~6 μm之间,个别可达16 μm。根据晶间接触关系及充填物的不同,莓状黄铁矿集合体可分为3种不同类型。

第1种黄铁矿集合体单晶之间基本无缝闭合接触,除集合体边缘隐约可以见到多边形轮廓外,内部多个晶体已混为一体,无晶间孔隙或仅局部零星残存若干不规则形孔隙,内部晶间孔隙早期可能未充填有机质或黏土矿物,加之后期压实强烈,导致集合体内部单个晶体之间基本闭合。

第2种黄铁矿集合体单晶之间未闭合,未充填或未被黏土矿物完全充填,仍残存较多的不规则形晶间孔隙。发育这类莓状黄铁矿集合体的页岩本身有机质含量不高,受压实强度较弱。

第3种黄铁矿集合体单晶之间被有机质全充填(图5c,5d),发育这类莓状黄铁矿集合体的页岩有机



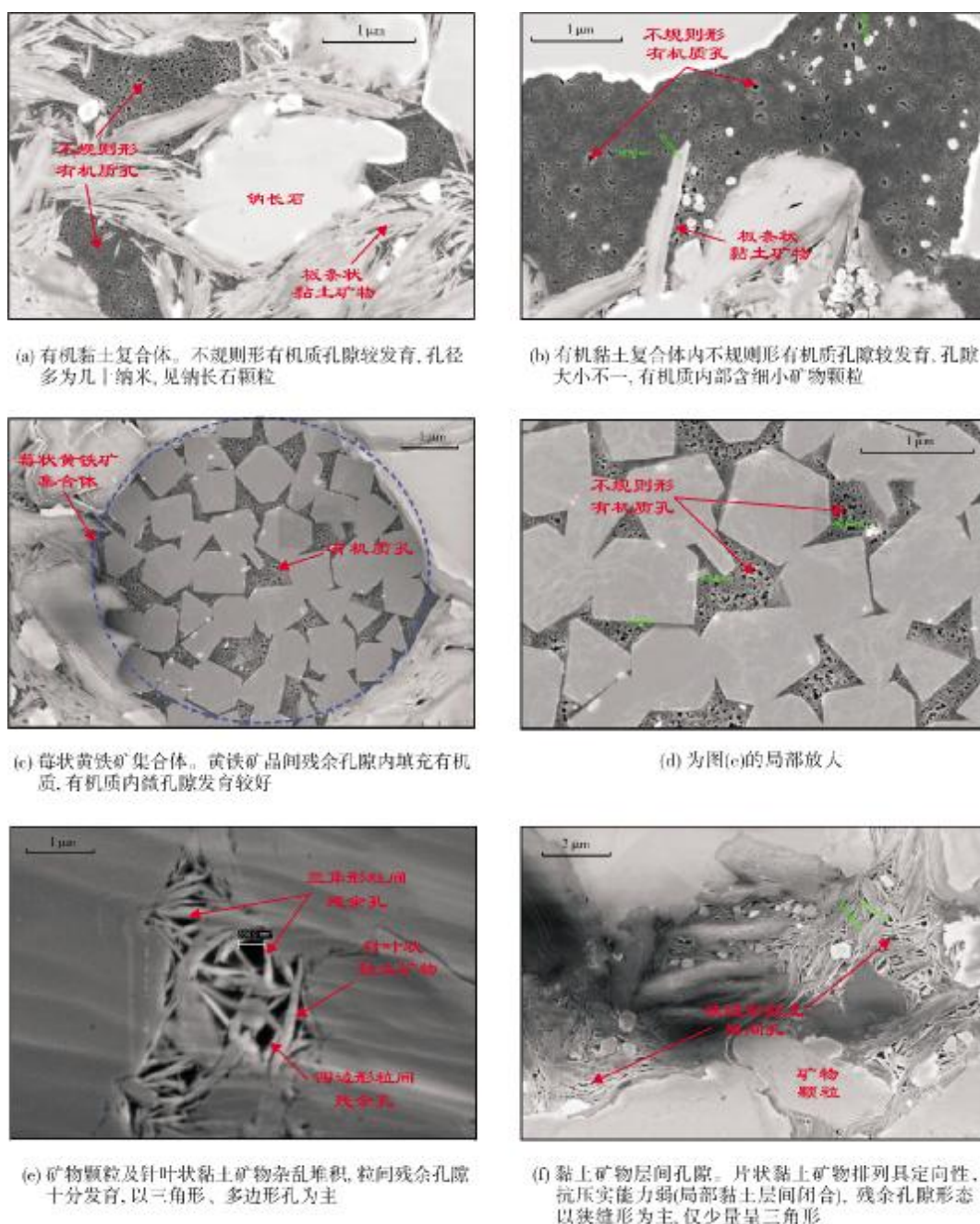


图5 川西南J1井筇竹寺组富有机质页岩微观孔隙类型及特征

质含量较高, 有机质内不规则形纳米级孔隙较发育, 孔径以几纳米至50 nm为主, 少数可达80 nm, 大孔隙有机质孔主要分布在有机质中心, 靠近黄铁矿晶体边缘孔径变小。

## 2.2.2 无机矿物孔

### (1) 粒(晶)间孔

粒(晶)间孔主要为石英、长石、碳酸盐矿物及黏

土矿物颗粒排列堆积、成岩压实后颗粒之间残留的原生孔隙。川西南地区筇竹寺组页岩粒(晶)间孔较发育(图5e), 孔隙形态多呈三角形、多边形及不规则形等, 孔径范围较大, 纳米至微米级孔隙均有发育。粒(晶)间孔之所以发育, 主要是由于针叶状、片状黏土矿物及少量长石、石英颗粒杂乱排列, 颗粒之间相互支撑, 形成较为稳定的抗压实结构, 同时有机质含

量较低,未充填或仅充填部分孔隙,使得粒(晶)间孔隙较好地保存下来。

## (2)黏土矿物层间孔

黏土矿物是组成泥页岩的主要矿物,黏土矿物层间孔是重要的页岩储集空间类型。国外不同类型盆地、不同层系页岩中均发育黏土矿物层间孔隙,如美国得克萨斯州的上侏罗统海恩斯维尔页岩中发育大量层状及狭缝形黏土矿物层间孔。

川西南地区筇竹寺组页岩中黏土矿物层间孔较发育(图5f),黏土矿物以板条状、针叶状及片状为主,受排列方式及压实作用强弱的影响,孔隙呈狭缝形、不规则形、层状等形态,孔径以几十至几百纳米为主。研究区全岩矿物及黏土矿物X衍射分析表明,页岩中黏土矿物含量较高,平均为43.78%,黏土矿物以伊利石(平均含量35.44%)、伊蒙混层(混层比为10%)及绿泥石(平均含量18.33%)为主。大量具有层状结构的伊利石和绿泥石为黏土矿物层间孔隙的发育提供了物质基础。

综上所述,本次研究将流体注入法(压汞-吸附联合测定)与图像法(氩离子抛光-扫描电镜)相结合,实现了研究区筇竹寺组页岩储层微观孔隙表征,明确了孔隙结构及主要孔隙类型,证实筇竹寺组页岩中有机质孔较发育,明确大孔(>50 nm)主要是粒(晶)间孔和黏土矿物层间孔2种无机矿物孔。

## 3 有机-无机复合型孔隙及其控气作用

### 3.1 有机-无机复合型连通孔隙系统的形成

关于页岩储层孔隙,目前已基本形成2个方面的

共识:一是页岩孔隙类型具有多样性,有机质孔、无机矿物孔均有发育。基于产状及成因等因素,无机矿物孔可以进一步细分为粒间孔、黏土矿物层间孔、粒内孔和古生物化石孔等。二是有机质孔是页岩气的主要储集空间,有机质孔发育对页岩气富集至关重要<sup>[3,15,22-23]</sup>。但是,对于无机矿物孔是否对页岩气储集有贡献,有机质孔与无机矿物孔是否具有连通性等的关注和研究较少。

通过氩离子抛光-扫描电镜观察分析,笔者认为川西南地区筇竹寺组页岩中有机质孔与无机矿物孔具备相互连通条件。如图6所示,石英颗粒的粒间堆积了大量针叶状黏土矿物及少量石英、长石颗粒,发育大量三角形、不规则形残余粒间孔,孔隙被黑色有机质全充填或不完全充填(图6a)。这种有机质与无机矿物残余粒间孔隙形成的复合结构,在有机质进入大量生气期时,一方面形成大量有机质孔,另一方面生成的天然气在满足有机质孔自身储集后进入无机矿物孔内储集下来,从而形成有机-无机复合型连通孔隙系统(图6b,6c),提高了页岩储集能力,为页岩气的富集提供有利保障。

这种有机-无机复合型孔隙的形成,主要与2个方面的因素有关:一是黏土矿物晶片及无机矿物颗粒的杂乱堆积(图6b,6c),形成了抗压实稳定结构,为无机矿物孔的保存提供了条件;二是页岩中富含有机质,有机质与黏土矿物相互吸附形成有机黏土复合体,在热演化作用下生气形成有机质孔,从而实现了有机质孔与无机矿物孔的连通与复合。

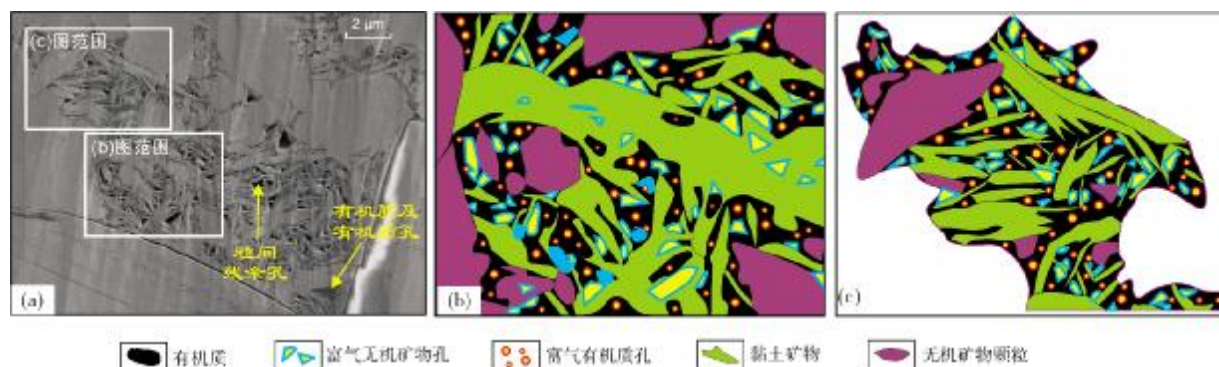


图6 川西南筇竹寺组页岩有机质孔与无机矿物孔复合连通示意图

### 3.2 有机-无机复合型孔隙对页岩气富集的控制

通过对典型井页岩孔隙度测井解释成果、页岩

层段气测显示和试采过程中产气量情况的综合分析,认为筇竹寺组页岩中有机孔与无机矿物孔不但具备复合连通条件,而且共同对页岩气的储集起到



了关键作用,即有机-无机复合型孔隙控制了页岩气的富集。

目前对于有机质孔与各类无机矿物孔在页岩中占比的定量分析,尚处于探索阶段。本次研究采用李军等<sup>[24-25]</sup>建立的页岩气储层“四孔隙”模型及测井定量表征方法,结合J1井筇竹寺组产气页岩层段TOC、全岩矿物组成及孔隙度实测数据,探索性地开展了测井孔隙综合评价(图7)。结果表明:页岩有效孔隙度(相当于样品实测孔隙度)介于1.76%~5.04%

之间,平均为3.87%;总孔隙度介于2.41%~9.30%之间,平均为7.43%,平均总孔隙度为平均有效孔隙度的2倍;有机质孔隙度介于0.16%~0.96%之间,平均为0.40%,占总孔隙度的5.4%;黏土孔隙度介于0.19%~4.3%之间,平均为2.88%,占总孔隙度的38.8%;碎屑孔隙度介于1.97%~5.35%之间,平均为4.15%,占总孔隙度的55.8%。可见,无机矿物孔才是总孔隙度的主要贡献者,而有机质孔(主要由于TOC含量不高,介于0.6%~3.5%之间)对总孔隙度的贡献有限。

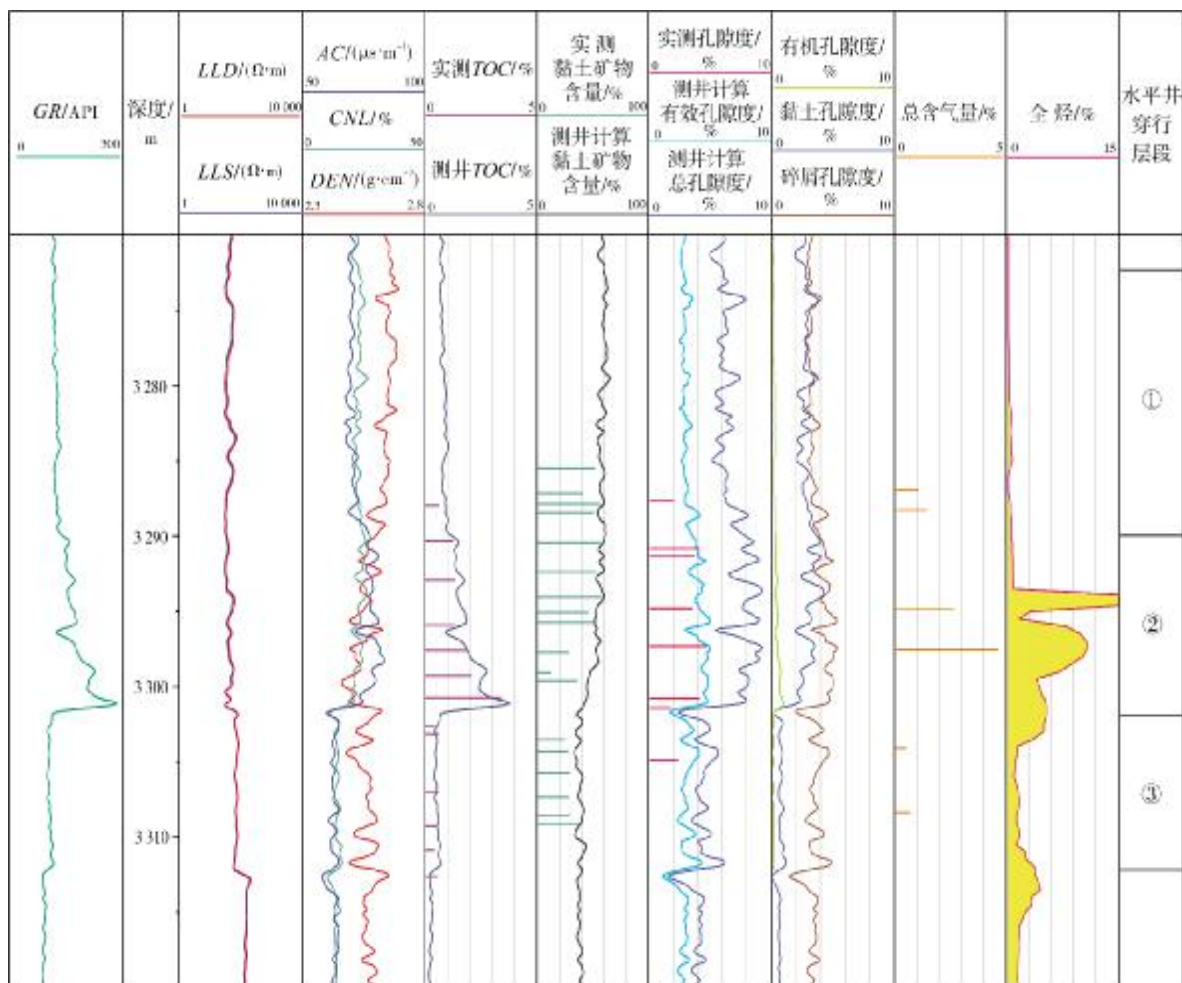


图7 J1井筇竹寺组产气页岩段有机-无机孔隙控气特征

依据王玉满等<sup>[26]</sup>建立的龙马溪组页岩三层岩石物理模型和基质孔隙度数学模型,王道富等<sup>[27]</sup>针对威远地区的32个筇竹寺组页岩样品进行了孔隙度测算,测算结果为:脆性矿物孔、黏土矿物层间孔、有机质孔对页岩基质孔隙的贡献,分别占2.4%、79.0%和18.6%。虽然各类孔隙占比有所差异,但无

机矿物孔对总孔隙度的贡献明显大于有机质孔的结论是一致的。

J1井筇竹寺组气测及含气量高值区主要分布在相对高TOC页岩段、高有机质孔隙段及其附近(图7),说明有机质及有机质孔的发育是供气的基础,只是有机质孔的储集空间有限,持续生气后,大量的天然

气需要运移到无机矿物孔隙中储集下来。3302 m以下的贫有机质页岩段,有机质孔极小,无机矿物孔隙度为3%~4%,仍存在2%~3%的连续气测显示,这也反映无机矿物孔对储气具有重要贡献。只是3285~3302 m之间高TOC页岩段的有机质孔与无机矿物孔均较发育,含气量也较高,反映有机-无机复合型连通孔隙更有利于页岩气富集。

从实际试采情况来看,J1井产层位于筇竹寺组上部,顶、底板条件较好,不发育大型高角度裂缝,保存条件较好,水平井段主要钻遇了①、②和③号3个层段(图7),其中②号层段条件最优,钻遇率达50%左右,穿行轨迹及压裂效果均较好,最终获得日产 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的工业气流,且稳产时间较长。在优质页岩层段厚度不大的情况下,除保存条件较好外,页岩良好的储集能力是获得工业气流的重要保障。结合前面有机质孔隙度与无机矿物孔隙度的分析,该段页岩的储集性能仅靠有机质孔的贡献是远远不够的。有机质孔与无机矿物孔之间的相互连通复合是提高页岩储集能力、控制页岩气富集的关键。

## 4 结 论

(1)川西南筇竹寺组富有机质页岩各孔径范围的孔隙均有发育,以介孔(2~50 nm)和微孔(<2 nm)为主,其次为大孔(>50 nm);页岩孔隙类型以粒间孔、黏土矿物层间孔最为发育,形态多呈三角形、多边形及狭缝形,其次为有机黏土复合体内有机质孔,形态多呈不规则形。

(2)有机-无机复合型连通孔隙系统的形成主要与2个方面的因素有关:一是无机矿物颗粒的杂乱堆积,形成抗压实稳定结构,为原生无机矿物孔的良好保存提供了条件;二是页岩中富含有机质,有机质与黏土矿物相互吸附而形成有机黏土复合体,在热演化作用下生气形成有机质孔,从而实现了有机质孔与无机矿物孔的连通与复合。

(3)页岩各类孔隙的测井定量表征、页岩层段气测显示和试采过程中产气量情况的综合分析表明,有机-无机复合型连通孔隙提高了页岩储集能力,控制了页岩气的富集。

致谢:中国石油化工股份有限公司西南油气分公司相关领导及同事在资料上给予了大力支持,审稿专家及编辑老师提出了宝贵的修改建议,在此一并表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 郭旭升,胡东风,李宇平,等. 涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J]. 石油勘探与开发,2017,44(4): 481-491.
- [2] 郭旭升,胡东风,魏志红,等. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J]. 中国石油勘探,2016,21(3): 24-37.
- [3] 胡宗全,杜伟,彭勇民,等. 页岩微观孔隙特征及源-储关系:以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质,2015,36(6): 1001-1008.
- [4] 何治亮,胡宗全,聂海宽,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气富集特征与“建造-改造”评价思路[J]. 天然气地球科学,2017,28(5): 724-733.
- [5] 聂海宽,金之钧,边瑞康,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气“源-盖控藏”富集[J]. 石油学报,2016,37(5): 557-571.
- [6] 聂海宽,张金川,李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报,2011,32(6): 959-967.
- [7] 刘忠宝,高波,张钰莹,等. 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征[J]. 石油勘探与开发,2017,44(1): 21-31.
- [8] 刘忠宝,高波,冯动军,等. 上扬子地区下寒武统黑色页岩矿物组成特征及其油气勘探意义[J]. 天然气工业,2017,37(4): 21-26.
- [9] 程克明,王世谦,董大忠,等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业,2009,29(5): 40-44.
- [10] 闫存章,黄玉珍,葛春梅,等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]. 天然气工业,2009,29(5): 1-6.
- [11] 孟宪武,田景春,张翔,等. 川西南井研地区筇竹寺组页岩气特征[J]. 矿物岩石,2014,34(2): 96-105.
- [12] 李延钧,赵圣贤,黄勇斌,等. 四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩沉积微相研究[J]. 地质学报,2013,87(8): 1136-1148.
- [13] 江强,朱传庆,邱楠生,等. 川南地区热史及下寒武统筇竹寺组页岩热演化特征[J]. 天然气地球科学,2015,26(8): 1563-1570.
- [14] 王淑芳,张子亚,董大忠,等. 四川盆地寒武统筇竹寺组页岩孔隙特征及物性变差机制探讨[J]. 天然气地球科学,2016,27(9): 1619-1628.
- [15] 王羽,金婵,汪丽华,等. 应用氩离子抛光-扫描电镜方法研究四川九老洞组页岩微观孔隙特征[J]. 岩矿测试,2015,34(3): 278-285.
- [16] 黄金亮,邹才能,李建忠,等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1): 69-75.
- [17] 陈生蓉,帅琴,高强,等. 基于扫描电镜-氮气吸脱附和压汞法的页岩孔隙结构研究[J]. 岩矿测试,2015,34(6): 636-642.
- [18] 承秋泉,陈红宇,范明,等. 盖层全孔隙结构测定方法[J]. 石油实验地质,2006,28(6): 604-608.
- [19] 刘忠宝,冯动军,高波,等. 上扬子地区下寒武统高演化页岩微观孔隙特征[J]. 天然气地球科学,2017,28(7): 1096-1107.



- [20] 王爱萍, 杨守业, 李从先. 三种沉积环境中有机黏土复合体特征比较[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 785-788.
- [21] 张永刚, 蔡进功, 许卫平, 等. 泥质烃源岩中有机质富集机制[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 1-51.
- [22] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素: 以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 893-901.
- [23] 张慧, 焦淑静, 庞起发, 等. 中国南方早古生代页岩有机质的扫描电镜研究[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 675-680.
- [24] 李军, 路菁, 李争, 等. 页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 266-271.
- [25] 李军, 武清钊, 路菁, 等. 页岩气储层总孔隙度与有效孔隙度测量及测井评价: 以四川盆地龙马溪组页岩气储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 602-609.
- [26] 王玉满, 董大忠, 杨桦, 等. 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.
- [27] 王道富, 王玉满, 董大忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩储集空间定量表征[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 1-10.

编辑: 张润合

## Organic-inorganic compound pore system and its gas-controlling significance: a case study of the Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin

LIU Zhongbao, GAO Bo, WU Qingzhao, WANG Ruyue,  
NIE Haikuan, ZHANG Yuying

**Abstract:** Taking the shale of the Cambrian Qiongzhusi Formation of Southeastern Sichuan Basin as an example, a variety of technical methods including rock thin slice identification, mineral X ray diffraction, pressure mercury-adsorption joint determination, helium porosity measure, argon ion polishing-scanning electron microscope, and quantitative characterization of shale gas reservoir by logging are applied to analyze the types and structures of the shale of the Cambrian Qiongzhusi Formation, and to discuss the mechanism of organic-inorganic compound connected pore systems and the significance on shale gas enrichment. The results show that: (1) the pores in the organic shale are mainly micropores (< 2 nm) and mesopores (2~50 nm), followed by macropores (> 50 nm); (2) the pore types are mainly intergranular pores and clay mineral interlayer pores, mostly triangular, polygonal and slit, then are irregular organic pores in organic matter-clay complex; (3) the rich organic shale has favorable conditions for the development of organic-inorganic composite connected pore systems, which improves shale storage ability and controls the enrichment of shale gas.

**Key words:** shale reservoir; organic pore; inorganic pore; organic-inorganic compound pore; Qiongzhusi Formation; Cambrian; Sichuan Basin

LIU Zhongbao: PhD, Senior Engineer. Add: Olympic building, 267 Beisihuan Middle Rd., Haidian District, Beijing 100083, China