

# 深层煤系地层孔隙结构特征及组合型储层的开采潜力

邹辰<sup>1</sup>, 刘洪林<sup>2,3,4</sup>, 梅珏<sup>1</sup>, 李晓波<sup>2,3,4</sup>

- 1. 中国石油浙江油田分公司勘探开发一体化中心 浙江杭州 310023
- 2. 中国石油勘探开发研究院非常规研究所 北京 100083
- 3. 中国石油非常规油气重点实验室 北京 100083
- 4. 国家能源页岩气研发(实验)中心 河北廊坊 065007

通讯作者:Email:liuhonglin69@petrochina.com.cn

项目支持:中国石油集团公司重大现场试验“深层页岩气有效开采关键技术攻关与试验”(2019F-31)、中国石油科技开发项目“页岩气提高储量动用程度技术研究”(KT2021-11-02)

引用:邹辰,刘洪林,梅珏,等. 深层煤系地层孔隙结构特征及组合型储层的开采潜力[J]. 油气井测试,2021,30(6):10-15.

Cite: ZOU Chen, LIU Honglin, MEI Jue, et al. Characteristics of pore structure in deep coal formation and exploitation potential of combined reservoir [J]. Well Testing, 2021,30(6):10-15.

**摘要** 川南地区页岩气勘探开发实践证实,储层特征是制约深层地层非常规气实现有效开发的关键。为查明煤系储层孔隙结构和储层组合特征,以深层煤系地层为例,采用扫描电镜、液氮和二氧化碳吸附等技术手段对煤系地层煤岩、砂岩和页岩的孔隙形态、结构等进行研究,认为深层煤系地层孔隙主要由原生孔隙、次生孔隙、有机质纳米孔、微裂缝等组成,有机质纳米孔为气泡固化形成;深层煤系地层砂岩、泥岩、煤层沉积旋回性受控于沉积环境,形成泥煤砂型等多种岩性组合体;深层砂煤组合储层发育多种孔隙类型,兼有可改造性和较好含气性,具有较大开发潜力。研究结果为深层地层孔隙结构特征及组合型储层的开采提供了理论依据。

**关键词** 深层储层;龙马溪组;砂煤组合储层;页岩气;纳米孔隙;U型孔隙结构;储层特征

中图分类号:TE122.3 文献标识码:A DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.06.002

## Characteristics of pore structure in deep coal formation and exploitation potential of combined reservoir

ZOU Chen<sup>1</sup>, LIU Honglin<sup>2,3,4</sup>, MEI Jue<sup>1</sup>, LI Xiaobo<sup>2,3,4</sup>

- 1. Exploration and Development Integration Center, PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou, Zhejiang 310023, China
- 2. Unconventional Research Institute, PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China
- 3. PetroChina Key Laboratory for Unconventional Oil and Gas, Beijing 100083, China
- 4. China National Energy Shale Gas Research and Development (Experiment) Center, Langfang, Hebei 065007, China

**Abstract:** The practice of shale gas exploration and development in southern Sichuan has proved that reservoir characteristics are the key to restrict the effective development of unconventional gas in deep formation. To find out the pore structure and reservoir combination characteristics of coal stratum, taking deep coal stratum as an example, this paper studies the pore morphology and structure of coal, sandstone and shale by means of scanning electron microscope, liquid nitrogen and carbon dioxide adsorption. The results show that the pores of deep coal stratum are mainly composed of primary pores, secondary pores, organic matter nano pores and micro fractures, while organic matter nano pores are formed by bubble solidification; The sedimentary cycle of sandstone, mudstone and coal seam in deep coal strata is controlled by the sedimentary environment, which forms various lithologic assemblages such as peat sand type; There are many pore types in deep sand coal combination reservoirs, which has both removability and good gas-bearing property, and has great development potential. The research results provide a theoretical basis for the characteristics of pore structure in deep formation and the exploitation of combined reservoir

**Keywords:** deep reservoir; Longmaxi formation; Mixed reservoir of sand and coal; shale gas; Nano pores; U-shaped pore structure; reservoir characteristics

川南地区页岩气勘探开发实践证实,储层特征是 制约深层地层非常规气实现有效开发的关键<sup>[1-2]</sup>。

煤系地层气是由整个煤系烃源岩在地质演化过程中生成的天然气,没有经过运移或经过短距离运移而赋存于煤系中的天然气,包括地层中所有常规和非常规天然气。前人根据煤系地层非常规天然气演化特征,将其分为煤层气、页岩气、致密砂岩气及煤系天然气水合物,认为煤系地层非常规气具备自生自储、短距运移、同盆同源共生、差异运移的特征<sup>[3]</sup>。煤系地层常见岩性为煤层、页岩和砂岩,常见天然气为煤层气、页岩气和致密砂岩气。但把煤系地层作为一个整体概念进行研究,煤系地层气又不是三种类型天然气简单组合,成藏特征上与单纯的煤层气、页岩气和致密砂岩气存在不同。煤系气是典型近源富集成藏,其成藏富集与否与煤系地层中砂岩、煤层和页岩发育组合和分布关系十分密切。川南、昭通北部和鄂尔多斯盆地东部地区山西组地层主要为三角洲、河流-沼泽相沉积环境,由于海平面的升降频繁影响,在空间上形成了多套含煤碎屑岩系,成为煤系地层气赋存主要层位,是最为典型煤系地层气。

四川盆地南部、昭通北部及鄂尔多斯盆地石炭-二叠系煤系地层分布范围广、厚度大,砂-泥-煤岩互层发育,煤系地层拥有丰富的非常规天然气资源,含煤地层以Ⅲ型干酪根为主,空间上具备形成大型非常规天然气聚聚的源岩、储层、封盖等有利条件,上古生界非常规天然气资源量  $7.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>。煤系地层由于其砂-泥-煤互层发育,具备通过合采技术开发煤层气、页岩气和致密砂岩气的巨大潜力,皮森斯盆地白河隆起地区曾经进行过煤层与致密砂岩的联合开采实验,在埋深 1 560.0~2 561.0 m 钻探了 65 口井,系地层具有较好脆性的砂岩或粉砂岩,压裂后裂缝贯穿煤层,单井日均产气量达  $10\ 890 \text{ m}^3$  左右,最高达  $14\ 375 \text{ m}^3$ ,生产测试证实产自煤层和砂岩的天然气比例为 6:4<sup>[5-6]</sup>。国内也在鄂尔多斯盆地大宁吉县、临兴、榆林、保德等区块山西组煤系地层实施压裂尝试联合开采,部分地区如大宁吉县地区的吉探 1 井单井日产气量为  $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,榆林地区单井日产气量为  $6\ 500.0 \text{ m}^3$ ,临兴区块单井日产气量可达  $6\ 000.0 \sim 53\ 000.0 \text{ m}^3$ <sup>[7]</sup>,展示了良好的勘探前景。部分地区,如保德地区未能获得预期产量,说明煤系地层非常规天然气储存和产出机理复杂,地区间存在较大的差异性。

本文以鄂尔多斯盆地东部山西组山 2 段煤系地层为例,分析了煤系储层微观结构,提出了一种“砂煤组合储层”概念,来重新认识煤系地层的勘探潜

力,对于指导鄂尔多斯盆地煤系地层、四川盆地南部、昭通地区北部的煤系地层非常规天然气勘探具有重要意义。

## 1 研究区地质背景

研究区以鄂尔多斯盆地东部为例,其研究方法和研究思路适用于四川盆地、昭通北部地区深层煤系地层。研究区北跨乌兰格凸起与河套盆地为邻,南越渭北挠褶带与渭河盆地相望,东接晋西挠褶带与吕梁隆起呼应,西经逆掩冲断构造带与六盘山、银川盆地对峙。构造上受东滨太平洋构造域和西南特提斯-喜马拉雅构造域影响,是一个多旋回克拉通叠合盆地,形成演化经历了中晚元古代坳拉谷、早古生代浅海台地、晚古生代滨海平原、中生代内陆盆地和新生代周边断陷等 5 个主要发展阶段<sup>[8-10]</sup>。鄂尔多斯盆地海西期地壳缓慢沉降,印支晚期沉降速率增大,克拉通构造活动增强,燕山早期构造沉降相对稳定,燕山中期构造获得加强,岩浆活动加剧,构造线由 EW 最终转化为 SN 向或 NNE 向,喜马拉雅期以来隆升剥蚀<sup>[11]</sup>。盆地构造单元划分为伊盟隆起、渭北隆起、天环坳陷、伊陕斜坡、西缘冲断带和晋西挠褶带共 6 个一级构造单元,呈东高西低、北高南低、中部斜坡、周缘隆起伴有断层的构造形态<sup>[9,12]</sup>(图 1)。

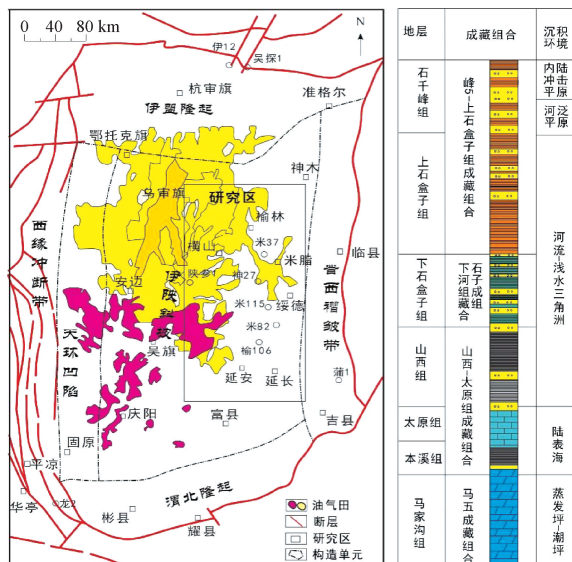


图 1 鄂尔多斯盆地东部构造位置图

Fig. 1 Structural map of eastern Ordos basin

研究区属于鄂尔多斯盆地东部,跨越伊陕斜坡和晋西褶皱带,为一个单斜构造,地层倾角小于  $5^\circ$ ,相对平缓,总体呈西倾单斜,局部发育低幅度背斜,区内断层稀少。区内山西组山二段表现为泥岩以

灰黑色-深灰色为主,碳质泥岩比例高,发育 3~5 套煤层,电阻率值普遍较高,山二段内部细分为三个砂组,自上而下包括山<sub>2</sub><sup>1</sup>、山<sub>2</sub><sup>2</sup> 和山<sub>2</sub><sup>3</sup>。

## 2 样品采集与测试分析

通过样品采集与测试分析,获取样品岩石矿物组成及样品有机质类型。

### 2.1 样品采集与测试方法

采集了鄂尔多斯盆地东部神木-绥德地区 30 口井的山西组山 2 段岩心样品,样品共计 136 块,样品类型包括砂岩、页岩和煤层。系统开展了孔隙度、渗透率和氩离子抛光扫描电镜等实验,均采用通用设备和国家或行业标准,薄片鉴定依据 SY/T 5368—2016 标准,矿物组成依据 SY/T 5163—2010 标准,纳

米孔隙表征采用氩离子抛光仪抛光后使用 FEI Heilos 650F 观察,岩石孔渗依据 GB/T 34533—2017 标准测试。低温 N<sub>2</sub> 吸附和 CO<sub>2</sub> 吸附分别采用 Quantachrome Autosorb-1 和 Quantachrome Nova Station A 完成,测试依据为 GB/T 19587—2004。

### 2.2 样品岩石矿物组成

鄂尔多斯盆地东部煤系地层山 2 段砂岩石英含量 61.53%,岩屑含量 16.98%,由于煤系地层水在成岩早期为酸性条件,方解石、石膏、沸石等早期形成的易溶胶结物较少(表 1)。X-衍射全岩和黏土矿物分析表明,山 2 段泥页岩以黏土矿物为主,黏土矿物含量介于 45.0%~62.7% 之间,平均含量为 55.2%,石英含量次之,平均含量为 40.0%,碳酸盐岩及其它矿物占 4.8%(表 2)。

表 1 鄂尔多斯盆地东部山 2 段砂岩岩石成分表  
Table 1 Composition of sandstone in Shan 2 formation in eastern Ordos basin

层位	石英/%	长石/%	岩屑/%				Q/(F+R)	数量
			岩浆岩	变质岩	沉积岩	合计		
山 <sub>2</sub> <sup>1</sup>	57.58	0.56	2.00	9.56	4.39	22.81	2.48	25
山 <sub>2</sub> <sup>2</sup>	58.92	0.31	1.53	6.58	3.48	16.34	3.55	32
山 <sub>2</sub> <sup>3</sup>	65.06	0.30	1.10	6.58	1.94	15.01	4.21	28
平均值	61.53	0.35	1.42	7.16	2.94	16.98	3.54	/

表 2 鄂尔多斯盆地东部山 2 段页岩矿物组成表  
Table 2 Mineral composition of shale in Shan 2 formation in eastern Ordos basin

层位	石英 SiO <sub>2</sub> /%	钾长石 AlKO <sub>8</sub> Si3/%	斜长石 KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> /%	方解石 CaCO <sub>3</sub> /%	白云石 CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /%	菱铁矿 FeCO <sub>3</sub> /%	黄铁矿 FeS <sub>2</sub> /%	黏土矿物 Clay minera/%	数量
山 <sub>2</sub> <sup>1</sup>	45.13	1.28	3.86	0.24	0.39	2.49	0.00	46.62	15
山 <sub>2</sub> <sup>2</sup>	36.64	0.00	1.71	14.31	1.46	7.76	3.52	34.61	16
山 <sub>2</sub> <sup>3</sup>	25.19	0.38	0.67	6.98	1.73	3.16	6.41	55.48	19
平均值	35.65	0.55	2.08	7.18	1.19	4.47	3.31	45.57	/

鄂尔多斯盆地东部煤系地层沉积环境主要为河流、三角洲沉积,受沉积和成岩作用控制,煤系地层具有低孔、低渗特征,山西组山 2 段属于典型的超低渗-致密储层,储层孔隙度很低,最小孔隙度为 0.22%,最大孔隙度为 9.7%,平均孔隙度为 4.6%;储层渗透率也很低,最小渗透率为 0.002×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,最大渗透率为 0.95×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均渗透率为 0.15×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。砂岩渗透率平均 0.18×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,高于页岩 0.012×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,砂岩孔隙度平均 4.78%,高于页岩平均孔隙度 3.96%。

### 2.3 样品有机质类型

鄂尔多斯盆地东部煤层沉积环境以海滨沼泽相或内陆沼泽相为主,高等植物发育,山西组烃源岩干酪根类型以Ⅲ型为主,部分地区发育有Ⅱ<sub>2</sub>型,以Ⅲ型为主的煤系地层特征为大量烃类气体的生

成奠定了基础。

## 3 地层孔隙特征

利用电镜观测地层孔隙类型,利用液氮吸附和二氧化碳吸附等反复开展了页岩、砂岩和煤岩孔隙结构特征分析研究,分析了山 2 段部分煤岩样品发育沥青质纳米孔的成因。

### 3.1 地层孔隙类型

鄂尔多斯盆地东部神木-绥德地区煤系地层发育多种类型的孔隙,根据电镜观测,可以将镜下孔隙划分为原生孔隙、次生孔隙、有机质纳米孔、微裂缝等类型煤系地层砂岩发育微裂缝、次生孔隙,少见沥青质纳米孔,微裂隙一般沿着矿物边缘分布。

粒内/粒间溶孔一般发育于矿物内和矿物接触边缘,主要是受煤系地层早期成岩作用中有机酸影

响而产生,在溶蚀作用较强部位,原生粒间余孔周围的长石岩屑颗粒被全部溶蚀,从而形成粒间超大溶孔。溶蚀孔隙与微裂隙组合在一起形成复杂的孔隙网络结构,构成了致密气储集和运移的主体。从不同类型的砂岩来看,石英砂岩孔隙尺度较大,矿物棱角分明,长石岩屑砂岩粒间溶蚀孔隙发育,泥质粉砂岩粒间孔隙发育,含黄铁矿泥质粉砂岩粒间孔和微裂隙发育,含黄铁矿粉砂质泥岩晶间孔发育。

煤系地层中煤层发育丰富的微孔,尺度从几个纳米到几微米不等,煤层一般小于2 nm的微孔十分发育,具有丰富的储集空间,可以吸附大量天然气,是煤系地层重要的储集层。煤系地层中页岩发育丰富的微裂隙、粒间微孔等,尺度从几个纳米到几微米不等,发育少量沥青质纳米孔。

### 3.2 地层孔隙结构

为了研究煤系地层孔隙结构,利用液氮吸附和二氧化碳吸附等反复开展了页岩、砂岩和煤岩孔隙结构特征分析研究,利用不同测试方法获得的孔径分布和比例进行了煤系地层全孔隙拼合成图,同时利用10 nm作为滑动窗口进行窗口内孔隙体积比例平均,获得煤系地层小于150 nm孔隙结构全貌。从分析测试结果来看,煤系地层中的页岩、砂岩和煤岩孔隙结构特征鲜明,页岩孔径从几个纳米到100 nm均有分布,从孔径占比看,10 nm以下孔隙占比20%~30%左右,10 nm以上孔隙占比大,这与页岩中黏土矿物与裂缝发育程度有关。砂岩孔径分布从几纳米到100 nm都有较多分布,10 nm以上孔隙占比40%~50%以上,这与砂岩矿物颗粒较大,粒间孔、粒间溶孔和微裂隙较为发育有关,这些孔隙一般孔径较大。煤层孔径分布从几纳米到100 nm都有分布,其中小于2 nm的微孔极其发育,这与煤层吸附性强密切相关,同时在30~100 nm也有一些较大的纳米孔隙发育,根据扫描电镜观测结果这些孔隙为沥青质纳米孔,形成与煤化过程中煤岩沥青质二次裂解产气形成的气泡孔。

### 3.3 沥青质纳米孔成因

山2段部分煤岩样品发育沥青质纳米孔,此类孔隙因为煤岩在煤化过程中早期排出的液态烃,经历了二次裂解产生了天然气,生成的天然气初期以气泡的形式分布于液态烃,并且气泡会随着在未固结的液态烃运移,随着液态烃生产更多的天然气,液态烃变得更加粘稠,气泡难以运移,随着液态烃固化为固体沥青而转化为气泡孔,成为沥青质气

泡孔,其孔隙尺度较小,一般为几纳米到几百纳米。此类孔隙为煤岩特有的孔隙类型,由于其孔隙尺度较大,孔隙渗流能力强,因此,此类孔隙对于提高煤系地层勘探潜力具有重要意义。

## 4 U型组合孔隙及其地质意义

煤层可以提供丰富的气源,砂岩可以提供相对较为丰富的储集空间和渗流通道。砂与煤直接接触的组合对于富集和开发较为有利。

### 4.1 地层岩性沉积组合类型

煤系地层气多样性主要体现在赋存形式的多样性和储层类型的多样性。煤系地层中煤层、碳质泥岩、暗色泥岩等厚度比例高,气源充足,既有游离气,也有吸附气,煤层气、页岩气、砂岩气一般互层共生,赋存态呈现多样性。煤岩生气量大,天然气大部分运移到其他储层,成为煤系主要气源,受河流影响较大泥炭沼泽所成的煤系砂岩往往含有一定数量的煤屑、煤线等,具有一定生气及吸附能力。

煤系地层形成沉积环境相对稳定,砂岩、泥岩、煤层等互层频繁,旋回性极强,形成复杂多样的生储盖组合和综合储集体,如澳大利亚苏拉特盆地多而薄的煤储层通过与砂岩、泥岩呈频繁互层,构成煤系气复合储集体,形成有利的煤系复合气藏,单井生产曲线呈现非典型煤层气、致密气生产曲线特征<sup>[13]</sup>。因此,煤层地层沉积受控于海平面或湖平面的变化,呈现旋回性的特征,可以划分出6种岩性组合,如图2所示。

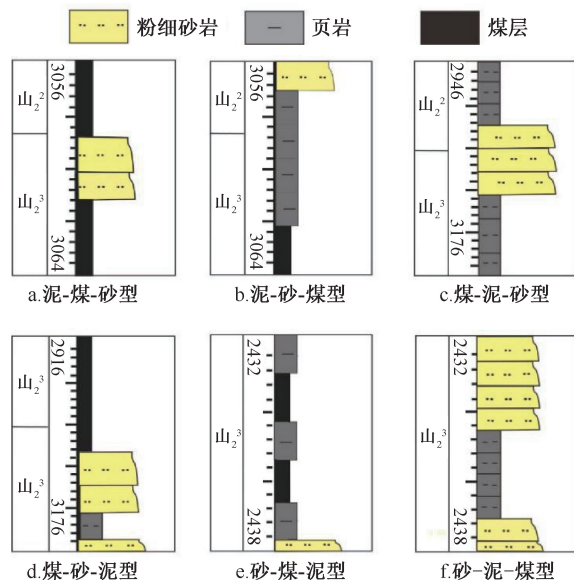


图2 山西组2段砂、泥、煤组合类型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of combination types of sand, mud and coal in Shan 2 formation

## 4.2 砂煤U型孔隙组合地质意义

四川盆地龙马溪组页岩能够形成富集区,通过改造实现高效开发,主要在于龙马溪组页岩储层的两大基本特征<sup>[14-17]</sup>:一是孔隙结构呈现U型孔隙结构,大尺度孔隙和小尺度孔都较为发育,大孔还可以作为渗流通道吸附大量的天然气;二是龙马溪组页岩脆性好,可改造性好,通过压裂后能够产生复杂缝网,沟通孔隙,利于气体产出。若不考虑煤系地层互层性、旋回性特征,单纯致密砂岩成藏而言,鄂尔多斯盆地东部致密砂岩大孔发育,微孔不发育,吸附气量少,后期气体充注,孔隙含水饱和度较高,砂岩普遍致密化,硬度较大,具有一定可改造性<sup>[18-21]</sup>。煤层微孔发育,吸附气量大,但是大孔不发育,加之储层脆性不足,难以形成较好的渗流通道;鄂尔多斯盆地东部、四川盆地南部、昭通北部石炭-二叠页岩微孔和大孔都不发育,吸附和游离气含量都不足,难以作为储层<sup>[22]</sup>。但是由于煤系地层沉积的旋回性和煤系非常规气成藏的同期性,在砂-煤直接接触的岩性组合中有可能形成孔隙结构与龙马溪组页岩类似的孔隙结构,煤岩微孔加上致密砂岩大孔,共同构成一种U型孔隙结构组合,该“砂煤组合储层”兼具吸附气和游离气,同时致密砂岩又具有较好的脆性,通过改造致密砂岩实现对煤层和砂岩的联合沟通和开采,有可能形成复合性的特殊储层,达到与龙马溪组页岩储层相类似的效果<sup>[23]</sup>。砂与煤直接接触的组合对于富集和开发较为有利,煤层可以提供丰富的气源,砂岩可以提供相对较为丰富的储集空间和渗流通道。以上认识对于四川盆地南部、昭通地区北部石炭二叠系过渡相深层非常规气开发具有重要意义。

## 5 结论

(1) 深层煤系地层发育多种类型的孔隙,包括原生孔隙、次生孔隙、有机质纳米孔、微裂缝等,有机质纳米孔为煤系地层生成的液态烃裂解气泡固化形成。

(2) 煤系地层受控于沉积环境,砂岩、泥岩、煤层互层频繁,形成多样岩性组合体。

(3) 煤系非常规气成藏具有同期性,砂煤组合体发育多种孔隙,兼有可改造性和较好的含气性,可以通过改造致密砂岩实现对煤层和砂岩的联合开采。

致谢:中石油勘探开发研究院非常规油气重点实验室刘德勋,为本文提供了实验测试数据,并对本文提出了修改建议,

在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 161-169.  
MA Xinhua, XIE Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploration in southern Sichuan Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2018, 45(1): 161-169.
- [2] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.  
WANG Yuman, DONG Dazhong, LI Jianzhong, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi formation of the lower Silurian, Southern Sichuan [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 551-561.
- [3] 王佟, 王庆伟, 傅雪海. 煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 24-27.  
WANG Tong, WANG Qingwei, FU Xuehai. The significance and the systematic research of the unconventional gas in coal measures [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 24-27.
- [4] 曹代勇, 姚征, 李靖. 煤系非常规天然气评价研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 89-92, 105.  
CAO Daiyong, YAO Zheng, LI Jing. Evaluation status and development trend of unconventional gas in coal measure [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 89-92, 105.
- [5] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性——煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14-23.  
QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14-23.
- [6] OLSON T M. White river dome field: Gas production from deep coals and sandstones of the Cretaceous Williams Fork Formation [J]. Clinical & Vaccine Immunology Cvi, 2003, 19(9): 155-169.
- [7] 傅雪海, 德勤哈提·加娜塔依, 朱炎铭, 等. 煤系非常规天然气资源特征及分隔合采技术[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 36-40.  
FU Xuehai, JIANATAY Deleqati, ZHU Yanming, et al. Resources characteristics and separated reservoirs' drainage of unconventional gas in coal measures [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 36-40.
- [8] 杨华, 傅锁堂, 马振芳, 等. 快速高效发现苏里格大气田的成功经验[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 89-94.  
YANG Hua, FU Suotang, MA Zhenfang, et al. Successful experience of rapid and efficient discovery of Sulige atmos-

- pheric field [J]. China Petroleum Exploration, 2001, 6(4):89-94.
- [9] 姚泾利,胡新友,范立勇,等. 鄂尔多斯盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2018,29(10):1465-1474.
- YAO Jingli, HU Xinyou, FAN Liyong, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Ordos basin [J]. Gas Geoscience, 2018,29(10):1465-1474.
- [10] 杨华,刘新社,杨勇. 鄂尔多斯盆地致密气勘探开发形势与未来发展展望[J]. 中国工程科学,2012,14(6):40-48.
- YANG Hua, LIU Xinshe, YANG Yong. Status and prospects of tight gas exploration and development in the Ordos basin [J]. China Engineering Science, 2012, 14(6):40-48.
- [11] 杨华,刘新社,闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. 地学前缘,2015,22(3):174-183.
- YANG Hua, LIU Xinshe, YAN Xiaoxiong. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3):174-183.
- [12] 彭海艳. 鄂尔多斯盆地东部山西组沉积体系及岩相古地理研究[D]. 成都:成都理工大学,2006.
- PENG Haiyan. Study on sedimentary system and lithofacies paleogeography of Shanxi Formation in Eastern Ordos basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [13] 秦勇,申建,沈玉林,等. 苏拉特盆地煤系气高产地质原因及启示[J]. 石油学报,2019,40(10):1147-1157.
- QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin, et al. Geological causes and inspirations for high production of coal measure gas in Surat basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(10):1147-1157.
- [14] 欧阳永林,孙斌,王勃,等. 煤层气封闭体系及其与煤层气富集的关系[J]. 天然气工业,2016,36(10):19-27.
- OUYANG Yonglin, SUN Bin, WANG Bo, et al. CBM sealing system and its relationship with CBM enrichment [J]. Natural Gas Industry, 2016,36(10):19-27.
- [15] 秦勇,梁建设,申建,等. 沁水盆地南部致密砂岩和页岩的气测显示与气藏类型[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1559-1565.
- QIN Yong, LIANG Jianshe, SHEN Jian, et al. Gas logging shows and gas reservoir types in tight sandstones and shales from Southern QinShui basin [J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(8):1559-1565.
- [16] SHEN Yulin, QIN Yong, GUO Yinghai, et al. Characteristics and sedimentary control of a coalbed methane-bearing system in lopingian (late permian) coal-bearing strata of western Guizhou province [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016,33(4):8-17.
- [17] 闫新义. 砂岩致密化形成机理探讨——以鄂尔多斯盆地山西组为例探讨[D]. 西安:西安石油大学,2016.
- YAN Xinyi. The discussion of mechanism of tight sandstone's formation——By Shanxi formation of the eastern part of the Ordos basin [D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2016.
- [18] 张苗. 深部煤系气储层物性随温压增加的差异性变化规律[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- ZHANG Miao. The variation law of deep coal measure gas reservoirs physical properties with the increase of temperature and pressure [J]. Xuzhou: China University Mining & Technology, 2019.
- [19] JLAB C, WHA B, HWA B, et al. Organic geochemical and petrophysical characteristics of transitional coal-measure shale gas reservoirs and their relationships with sedimentary environments: A case study from the Carboniferous-Permian Qinshui Basin, China-Science Direct [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019(10):184-196.
- [20] CAO Daiyong, LI Jing, WEI Yingchun, et al. Study on the forming conditions of shale gas in coal measure of Wuli area, Qinghai Province, China [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(295-298):2770-2773.
- [21] CREEDY D P. Geological controls on the formation and distribution of gas in British coal measure strata [J]. International Journal of Coal Geology, 1988, 10(1):1-31.
- [22] MARTIN M A, WAKEFIELD M, MACPHAIL M K, et al. Sedimentology and stratigraphy of an intra-cratonic basin coal seam gas play: Walloon subgroup of the Surat basin, eastern Australia [J]. Petroleum Geoscience, 2013,19(1):21-38.
- [23] PETERSEN H I, ANDSBJERG J, BOJESSEN-KG-OEFOED J A, et al. Coal-generated oil: Source rock evaluation and petroleum geochemistry of the Lulita Oilfield, Danish North Sea [J]. Journal of Petroleum Geology, 2010,23(1):55-90.

编辑 刘振庆

第一作者简介:邹辰,男,1987年4月出生,高级工程师,2007年毕业于西南石油大学石油地质专业,现从事石油地质研究工作。电话:0571-56318826,18268875793; Email: zouc85@petrochina.com.cn。通信地址:浙江省杭州市留下镇浙江油田分公司勘探开发一体化中心,邮政编码:310023。