

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2015095

鄂尔多斯盆地东南缘上古生界煤储层非均质性及其意义

伊伟,熊先钺,庞斌,王伟,林伟,何春连,车延前,冯延青

中石油煤层气有限责任公司 韩城 715400

摘要:鄂尔多斯盆地东南缘陆续发现一批高产井,显示了上古生界煤层气资源勘探开发的潜力。然而,受煤储层非均质性影响,同一区块相邻井组甚至同一井组不同单井的产气效果表现出较大差异,因此深化对煤储层非均质性的认识是实现高效勘探开发的客观途径。该文从岩石学、物性、吸附性、含气性等特征方面对煤储层非均质性进行了研究,结果显示,区内3号、5号、11号煤层分布稳定,厚度较大,是煤层气勘探与开发的主要目的层;煤层以半亮煤和半暗煤为主,镜质组含量较高,具有较好的可压裂性;以低灰-中灰的瘦煤、贫煤为主,部分地段发育少量无烟煤,煤级较高;煤岩孔隙度和渗透率均较低,吸附性强,吸附时间较短且解吸率较高,有利于煤层气的产出,但需要加强煤储层改造措施研究;含气量平均在 $11 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上,最高可达 $19.73 \text{ m}^3/\text{t}$,含气饱和度平均在61%以上,表明资源密度较大且具有较高的地层能量,有利于煤层气解吸产出。

关键词:煤层气;煤储层;物性;含气量;上古生界;鄂尔多斯盆地东南缘

中图分类号: P618.11

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2016) 02-0378-07

Heterogeneity and Significance of Coal Reservoir of Upper Paleozoic in Southeast Margin of Ordos Basin

YI Wei, XIONG Xianyue, PANG Bin, WANG Wei, LIN Wei, HE Chunlian, CHE Yanqian, FENG Yanqing

Petrochina Coalbed Methane Company Limited, Hancheng 715400, China

Abstract: A number of high-yield wells has emerged in the southeast margin of Ordos Basin, which showed the potential of the Upper Paleozoic exploration and development of coalbed methane resources. However, owing to the coal reservoir heterogeneity, great differences of individual gas wells were observed in adjacent block groups and sometime even in the same block. Therefore, a deeper understanding of reservoir heterogeneity is needed for efficient exploration and development. Systematic studies were conducted on coal reservoir in terms of rock characteristics, physical characteristics, adsorption characteristics, and gas characteristics. The results showed that the 3, 5, 11 coal seam, with stable distribution and large thickness, is the main target for exploration and development of coalbed methane. Half-bright coal seam and semi-dark coal with high vitrinite content has better fracture resistance, whereas a low ash-lean coal was also found, with anthracite and a small amount of high grade coal identified in some sections. We found that coal rock porosity and permeability are low, showing strong adsorption, short adsorption time and the higher desorption rate. This is conducive to CBM output, however, coal measures of reservoir stimulation need to be strengthened. The average gas content is about $11 \text{ m}^3/\text{t}$ or more, with a maximum of $19.73 \text{ m}^3/\text{t}$, and the average gas saturation is above 61%, indicating a greater resource and a high density of formation energy, in favor of CBM desorption output.

Key words: coalbed methane; coal reservoir; properties; gas content; Upper Paleozoic; southeast margin of Ordos Basin

First author: YI Wei, Engineer; E-mail: yiwei01@petrochina.com.cn

收稿日期: 2015-05-15; 修回日期: 2015-11-07

基金项目: 国家科技重大专项“煤层气井气、水流动特征和变化规律研究”(2011ZX05038-002); 中国石油天然气股份有限公司重大专项课题五“煤层气富集规律研究及有利区块预测评价”(2013E-2205)联合资助

作者简介: 伊伟,男,1983年生,硕士,工程师,从事煤层气地质、煤层气资源评价及勘探开发综合研究工作; E-mail: yiwei01@petrochina.com.cn

鄂尔多斯盆地是我国大型含煤盆地之一，煤层气资源量约占我国煤层气总资源量的1/3（杨起等，2005；赵庆波等，1997；冯三利等，2002）。经过长期探索，目前盆地东南缘已进入规模性开发阶段，出现了一批高产煤层气井，表明该区具有较好的煤层气开发前景。但是，区内单井之间生产特征差异较大，既有钻井工艺和后期排采技术的影响，也存在对煤储层非均质性认识不足的原因。为此，本文根据大量勘探开发资料，对区内煤储层非均质性进行分析，以期为下一步煤层气资源高效勘探开发提供一定借鉴。

1 区域地质概况

自古生代以来，鄂尔多斯盆地经历了印支、燕山和喜马拉雅构造运动的改造（张国良和贾高龙，2004；李明等，2012；陈启林等，2013；刘新社等，2007；付金华等，2013），形成了伊盟隆起、渭北隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带6个构造单元（图1）。盆地东南缘的煤层气勘探开发区块位于南部的渭北隆起东段，面积约 $3 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

盆地东南缘含煤地层主要为上古生界下二叠系山西组和太原组，是一套以三角洲相为主的海

陆交互相沉积（李明等，2012；陈启林等，2013；刘新社等，2007；付金华等，2013）。含煤11层，主要煤层3层，包括山西组3号、5号煤层和太原组11号煤层；煤层总厚度5~20 m，单层最大厚度可达10 m。尽管成煤之后经历了多期构造变动，但主煤层分布较稳定。3号煤层厚度0.9~8.5 m，平均3.1 m；5号煤层厚度1.4~8.0 m，平均3.7 m；11号煤层厚度1.3~10.0 m，平均3.3 m。

区内构造整体上表现为向北和北西方向倾斜的单斜构造。含煤地层在区内盘龙、象山一带均有出露，埋藏深度整体上表现为中部地区较浅，分别向北、向西方向变深。

2 煤岩煤质特征

2.1 宏观煤岩特征

区内主煤层的宏观煤岩类型以半亮煤和半暗煤为主，两者平均厚度分别大于煤层总厚度的45%和40%。其中，山西组以半亮煤和半暗煤为主，平均厚度比例分别为43%和39%；太原组以半亮煤和暗淡煤为主，平均厚度比例为42%和18%。光亮煤分布的非均一性最强，在山西组的变化区间为0~18.9%，太原组为0~30%。纵向上，光亮煤和半亮煤厚度之和，由山西组的46.5%变化到太原组的58.1%，暗淡煤则由山西组的18.8%降低到太原组的9.3%。横向上，两组光亮煤与半亮煤厚度之和由北向南逐渐增大，暗淡煤厚度则逐渐下降。

研究区煤层割理发育程度一般，一般6~14条/5 cm，缝长5~90 mm，11号煤层割理发育程度好于3号和5号煤层。煤层裂缝大多被方解石薄膜所充填，这对煤储层渗透率有一定影响。

2.2 显微煤岩特征

研究区煤主要由镜质组、惰质组和矿物质组成；矿物质以粘土矿为主，含少的黄铁矿和碳酸盐矿。3号煤层镜质组含量介于42.8%~92.0%之间，主要为70%~80%，平均73.6%；5号煤层镜质组含量36.4%~95.9%，主要为80%~90%，平均77.5%；11号煤层镜质组含量35.5%~92.1%，主要在70%~80%之间，平均68.4%（图2）。总体来看，3个煤层镜质组含量高，从南向北呈增加趋势。

惰质组含量变化较大。3号煤层惰质组含量介于1.2%~50.0%之间，平均16.1%，多为10%~

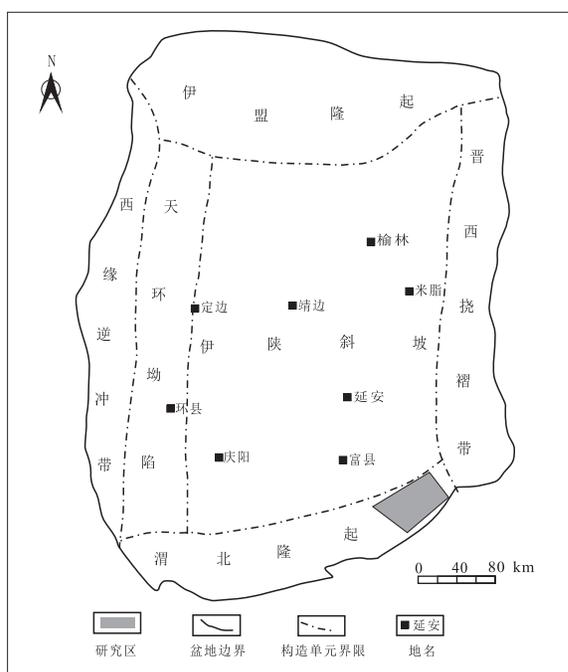


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分图

Fig. 1 The tectonic units of the Ordos basin

15%；5号煤层惰质组含量3.0%~61.7%，平均18.0%，主要为5%~10%；11号煤层惰质组含量6.4%~64.0%，平均24.3%，主要分布在10%~15%之间（图2）。平面上，惰质组含量与镜质组含量的分布互成相反的趋势。

由此可见，5号煤层镜质组含量最高，吸附煤层气的潜力最大，可改造性最好。

2.3 煤质与煤阶

213件煤样的工业分析数据统计分析表明，三个主煤层煤质都呈现出较强的非均质性。

3个煤层的水分含量分布具有较好的一致性，以0~1.0%为主，其次为1.0%~1.5%；5号煤层水分含量的平均值最高，其次为11号煤层，3号煤层最低（图3）。

煤的灰分产率分布范围较宽（图3）。3号煤层

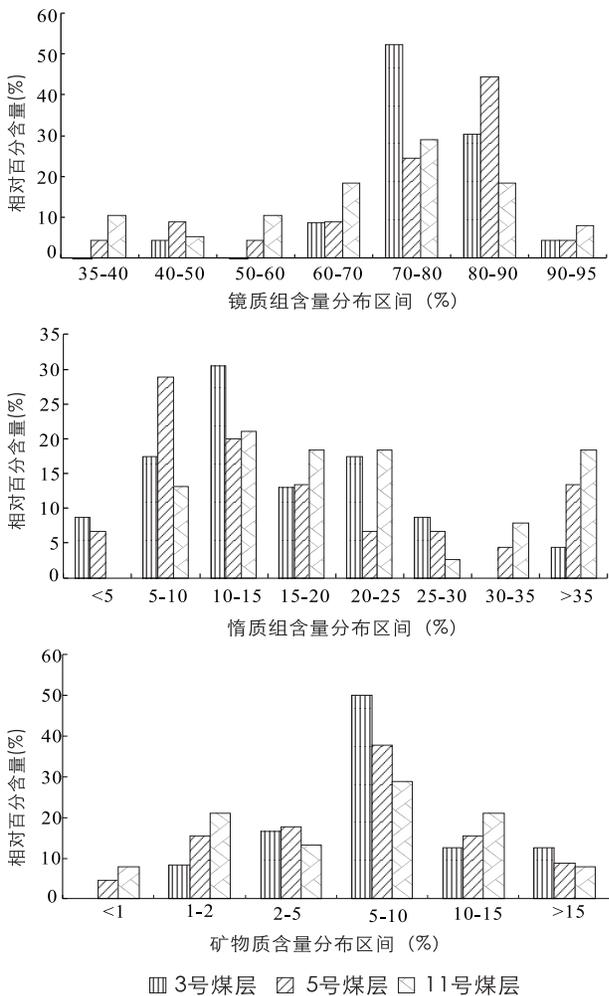


图2 鄂尔多斯盆地东南缘地区煤岩显微组分含量直方图
Fig. 2 Histogram of content of coal macerals in the southeast margin of Ordos basin

灰分产率为8.88%~47.95%，平均21.91%；5号煤层灰分产率6.55%~74.82%，平均18.83%。3号和5号煤层灰分产率没有明显的主峰分布区间。3号煤层主要为中灰煤，低灰煤和富灰煤也有一定的比例；5号煤层主要为低灰煤和中灰煤，有少量富灰煤；11号煤层总体上为中灰煤。

3个煤层的挥发分产率主要分布在5%~10%之间，具有高阶低挥发分煤的特点（图3）。自南向北、自东向西煤层埋深增大，煤的挥发分产率逐步变小，表现为煤的变质程度不断加深，水平分带与垂直分带明显。

区内主煤层镜质体最大反射率介于1.62%~3.09%之间，煤阶变化较大，但以瘦煤、贫煤、无烟煤为主（表1）。最高镜质体反射率出现在北部

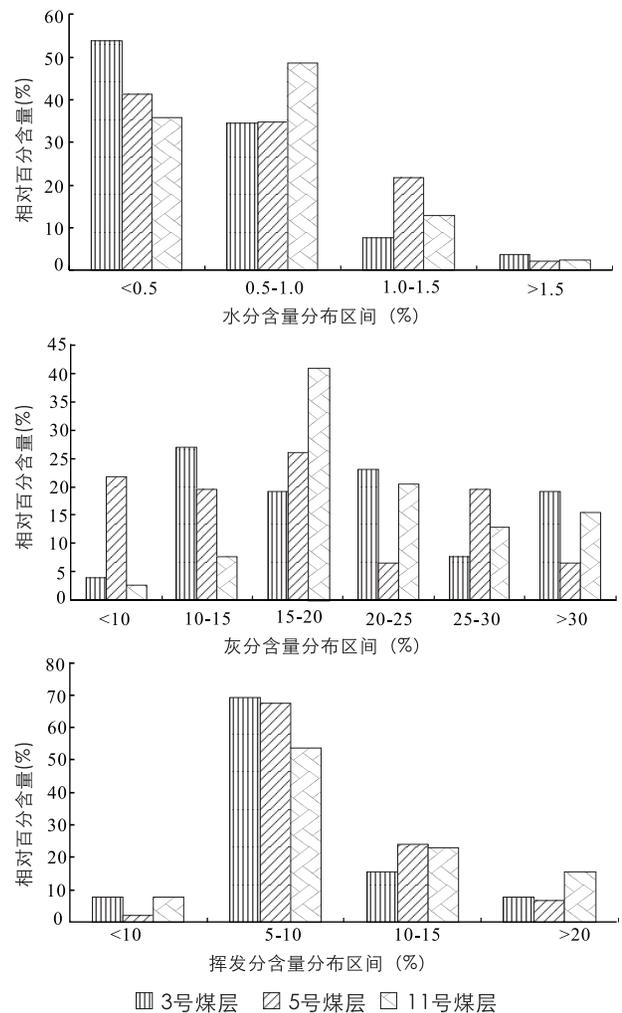


图3 鄂尔多斯盆地东南缘地区煤岩工业分析组分含量直方图

Fig. 3 Histogram of coal industrial analysis in the southeast margin of Ordos basin

表1 鄂尔多斯盆地东南缘地区煤岩镜质组反射率统计
Table 1 Statistics of Coal vitrinite reflectance in the southeast margin of Ordos basin

井区	反射率(%)			煤岩类型
	最小	最大	平均	
盘龙	1.92	3.09	2.57	瘦煤、贫煤、无烟煤
薛峰	1.81	2.33	2.03	瘦煤、贫煤
合阳	1.62	2.11	1.79	瘦煤、贫煤
澄白	1.67	2.18	1.86	瘦煤、贫煤

盘龙矿区11号煤层,与煤层埋藏最深有关。平面上,由南向北、由东向西镜质体最大反射率逐渐增高,与埋深变化趋势一致。

总体上,区内以高阶低灰-中灰煤为主,煤层具有很好的生气条件和吸附条件。

3 煤储层物性特征

3.1 煤储层裂隙孔隙

观测统计结果表明:区内煤层普遍发育一组或两组内生割理,北部和中部地区割理平均密度相对较大,南部和西部地区稍差,内生割理密度以北部盘龙矿区最大。

据真密度和视密度换算:3号煤层孔隙度为3.47%~19.05%,平均8.72%;5号煤层孔隙度4.71%~9.58%,平均6.31%;11号煤层孔隙度2.95%~8.69%,平均5.32%。

3.2 煤储层渗透性

据注入压降测试数据,5号煤层渗透率为0.053~0.121 mD,11号煤层为0.174~0.251 mD,均为低渗储层;垂向上,渗透率随煤层埋藏深度增大而减小(表2)。Y3、Y4井区煤层试井渗透率相对较高,结合排采数据分析,认为Y3井区煤层渗透率>0.2 mD,具有较好的可采性。

3.3 煤岩吸附性

煤层气主要以物理吸附形式吸附在煤岩孔隙内表面上,其吸附性能通常用吸附常数 V_L (Langmuir

体积)和 P_L (Langmuir 压力) 和等温吸附曲线来描述(张松航等,2009;薛光武等,2012;陈振宏等,2006;欧成华等,2003)。

等温吸附实验结果显示,不同区块煤的吸附能力差别较大,无烟煤的吸附能力大于瘦煤和贫煤,北部盘龙地区无烟煤吸附能力强(表3,图4)。3号煤层朗格缪尔体积为12.17~32.11 m³/t,平均24.71 m³/t,朗格缪尔压力为1.13~3.41 MPa;5号煤层朗格缪尔体积为12.43~31.57 m³/t,平均22.24 m³/t,朗格缪尔压力为1.21~3.23 MPa;11号煤层朗格缪尔体积为10.07~33.97 m³/t,平均22.66 m³/t,朗格缪尔压力为1.07~3.51 MPa。煤岩朗格缪尔体积普遍较大,反映吸附能力较强。

3.4 煤层气解吸特征

根据统计结果,区内煤岩吸附时间小于72 h的占60%以上,解吸速率较快,有利于煤层气早期产出(图5)。北部盘龙井区除1口井外,其余井煤岩吸附时间为5.22~248.16 h,平均84.72 h,解吸速率中等;中部区域由于断层影响,煤岩裂隙发育,气体解吸速率有所提高,吸附时间平均

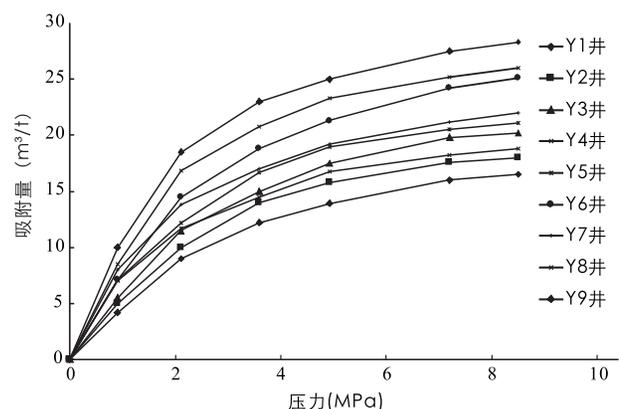


图4 鄂尔多斯盆地东南缘地区典型煤岩等温吸附曲线
Fig. 4 Adsorptions isotherm of typical coal rocks in the southeast margin of Ordos basin

表2 鄂尔多斯盆地东南缘地区参数井测试参数统计表

Table 2 Statistics of test parameters of parameter well in the southeast margin of Ordos basin

测试参数	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
测试储层	5	11	11	11	11	5	5
测试方式	套管						
煤层深度(m)	757	846	867	892	884	1015	1130
储层压力(MPa)	3.11	4.38	4.77	4.85	4.68	5.09	4.92
压力梯度(MPa/100 m)	0.411	0.502	0.536	0.542	0.530	0.501	0.435
压力系数	0.419	0.528	0.561	0.555	0.540	0.512	0.444
渗透率(md)	0.121	0.174	0.251	0.223	0.192	0.053	0.106

表3 鄂尔多斯盆地东南缘地区煤层气吸附特征数据

Table 3 Statistics of adsorption characteristics of coalbed methane in the southeast margin of Ordos basin

井号	煤层号	煤类	干燥无灰基含气量(m ³ /t)	兰氏体积(MPa)	兰氏压力(MPa)	理论含气量(m ³ /t)	临界解吸压力(Mpa)	解吸率(%)
H1	3	贫煤	18.73	32.11	3.24	20.74	3.44	89.16
	11	贫煤	17.00	29.65	2.01	21.22	2.94	89.74
H2	3	贫煤	15.68	29.72	3.33	21.41	3.10	86.85
	5	贫煤	18.07	25.83	3.23	21.00	5.39	95.07
H3	11	贫煤	19.73	20.65	1.94	22.32	4.82	89.80
	5	贫煤	16.73	17.01	1.93	17.01	3.44	93.95
H4	11	贫煤	11.43	23.07	2.02	18.56	1.95	79.85
	3	贫煤	10.05	15.54	1.95	21.25	1.11	84.56
H5	5	贫煤	11.58	20.63	1.97	13.50	2.52	95.25
	11	贫煤	9.93	10.07	2.39	18.00	1.15	95.39
H6	3	贫煤	10.90	26.13	2.04	20.88	1.10	95.80
	5	贫煤	14.40	26.14	2.08	20.87	1.82	95.25
H7	3	贫煤	12.43	25.52	2.24	19.07	1.00	95.45
	5	贫煤	15.18	19.94	1.76	15.78	1.87	95.39
H8	11	贫煤	12.58	25.69	2.35	19.16	1.53	60.43
	5	贫煤	10.13	20.67	2.08	15.50	1.37	62.25
H9	5	瘦煤	15.30	22.42	1.48	19.29	3.11	94.45
	11	瘦煤	14.72	18.57	1.07	17.00	2.15	94.56
H10	3	瘦煤	12.26	17.49	3.14	15.26	2.78	87.76
	11	瘦煤	9.40	17.2	2.89	17.95	1.61	81.77
H11	5	瘦煤	8.98	18.04	2.57	14.46	2.55	96.03
	11	瘦煤	8.08	21.50	2.49	17.42	1.49	95.88
H12	3	瘦煤	11.84	23.87	2.08	19.16	2.79	95.25
	5	瘦煤	13.13	19.34	1.78	16.02	1.62	95.45
H13	5	瘦煤	11.01	22.74	1.87	17.83	1.77	70.43
	11	无烟煤	16.99	20.98	1.39	18.20	3.84	91.36
H14	3	无烟煤	10.19	22.67	3.10	18.02	3.90	94.70
	11	无烟煤	9.52	21.14	2.78	20.11	2.10	93.83
H15	3	无烟煤	13.01	23.54	1.67	19.72	3.04	94.40
	11	无烟煤	10.87	21.83	1.81	19.00	1.49	95.06
H16	3	无烟煤	17.56	25.46	3.01	18.52	3.50	95.88
	11	无烟煤	17.08	26.28	3.13	23.22	2.52	96.49
H17	3	无烟煤	14.90	28.27	2.45	17.89	3.91	96.34
	11	无烟煤	15.36	28.41	2.61	28.62	3.74	95.80
H18	3	无烟煤	15.42	31.56	2.90	18.90	2.77	95.25
	5	无烟煤	12.55	28.68	3.16	21.11	2.60	95.45
H19	11	无烟煤	15.26	28.16	2.75	29.95	3.60	95.39

为60.48 h, 最短仅1.68 h; 西部澄白井区煤阶较低, 煤层气解吸速率较慢, 吸附时间长达240 h以上。

区内煤层气解吸率为60.43%~96.49%, 平均89.18%; 无烟煤的解吸率明显高于贫煤和瘦煤(表3)。

4 煤储层含气性

4.1 煤储层含气量

据钻孔煤芯解吸数据统计, 研究区煤层含气量介于2.55~19.73 m³/t之间。其中, 3号煤层含气

量6.77~18.73 m³/t, 平均13.34 m³/t; 5号煤层介于2.55~18.07 m³/t之间, 平均10.66 m³/t; 11号煤层介于3.73~19.73 m³/t之间, 平均12.09 m³/t。

就全区来可以看出, 煤层含气量主要分布在9~11 m³/t之间, 其次为11~13 m³/t和15~17 m³/t区间(图6a)。研究区目前开发井大部分位于北部地区, 实测资料丰富, 煤层含气量相对较高, 3号煤层含气量主要在12~14 m³/t之间, 5号煤层以10~14 m³/t和16~18 m³/t两个区间为主, 11号煤层含气量以14~18 m³/t区间值占优势(图6b)。

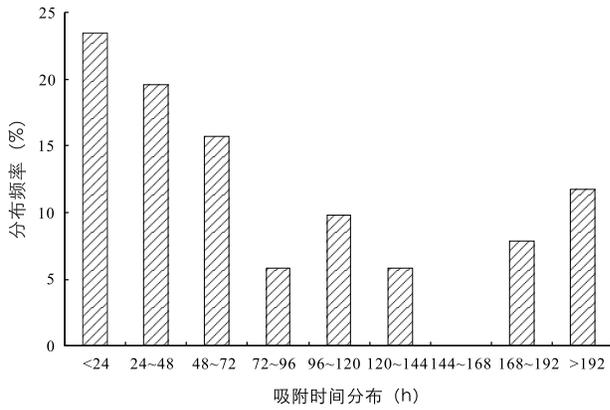


图5 鄂尔多斯盆地东南缘地区煤岩吸附时间分布直方图

Fig. 5 Distribution histogram of adsorption time in the southeast margin of Ordos basin

整体上，11号煤层含气量最高，5号煤层次之，3号煤层最低。3号煤层含气量较高的地区有板桥3号井区、盘龙16号井区，平均含气量都在17 m³/t以上。5号煤层平均含气量以板桥4号井区和2号井区最高，达16 m³/t以上；1号井区含气量则相对较低，平均在8 m³/t左右；11号煤层含气量最高的地区有板桥4号、5号和8号井区，平均含气量在18 m³/t以上；盘龙22井区含气量最低，平均不足6 m³/t。

4.2 煤储层含气饱和度

煤储层含气饱和度是指在一定的压力、温度和平衡水等条件下，煤层气的吸附饱和程度，即实测含气量与原始储层压力对应的吸附气量的比值（吴晓东等，2008；王琳琳等，2013；赵丽娟

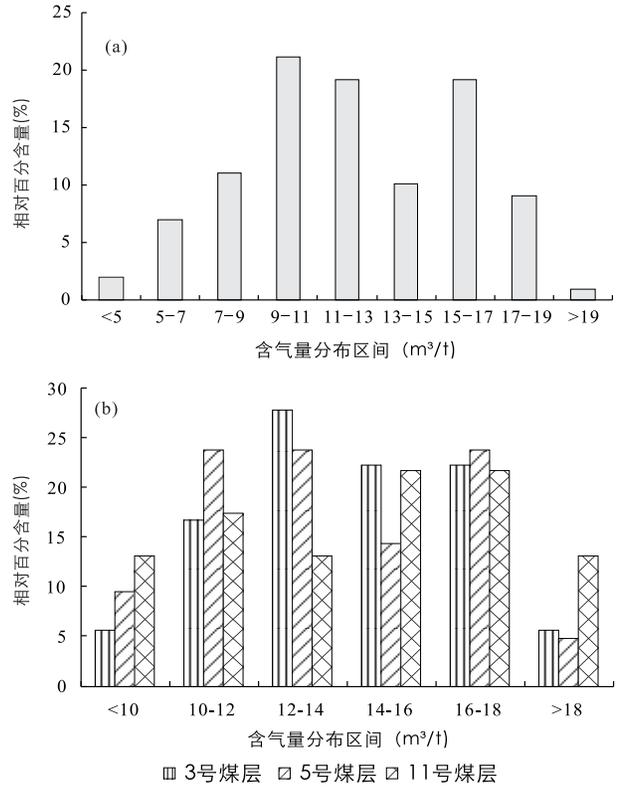


图6 鄂尔多斯盆地东南缘地区含气量分布直方图

Fig.6 Distribution histogram of gas content in the southeast margin of Ordos basin

等，2010)。

就临界解吸压力（表4）来看，3号煤层为1.00~3.90 MPa，5号煤层为0.40~6.64 MPa，11号煤层为0.59~4.82 MPa；南部地区解吸压力较低，北部地

表4 鄂尔多斯盆地东南缘地区含气饱和度和临界解吸压力数据

Table 4 Data of gas saturation and critical desorption pressure in the southeast margin of Ordos basin

地区	井区	平均含气饱和度/%			平均临界解吸压力/MPa		
		3号煤层	5号煤层	11号煤层	3号煤层	5号煤层	11号煤层
北部	WLC11	69.5	89.9	51.1	3.44	2.67	3.90
	WLC12	75.9	35.1	53.4	3.10	6.64	2.24
	HS19	43.5	42.0	48.2	2.78	3.11	2.94
	WLC3	79.9	79.2	76.4	3.90	5.39	4.82
	WLC8	79.2	72.7	77.1	3.04	2.17	2.05
中部	HS4	69.9	64.6	53.4	1.11	3.11	2.15
	HS7	41.7	65.2	48.1	1.79	2.27	2.25
	HS12	—	23.3	38.8	—	3.44	2.97
	HS11	—	62.1	46.2	—	2.20	3.84
	HS9	—	56.4	43.3	—	2.18	3.07
	HS7	—	6.9	51.1	—	1.11	2.10
南部	CS4	25.5	34.5	42.1	0.59	2.48	0.59
	CS5	29.1	45.5	38.1	1.53	1.48	1.95
	CS3	45.2	50.1	29.3	1.49	2.16	1.11
	CH1	60.9	49.2	50.1	1.04	2.52	2.66
	ED1	75.5	59.4	43.5	1.25	0.70	1.15

区解吸压力较高。通过换算,3号煤层含气饱和度为37.63%~79.93%,平均61.45%;5号煤层含气饱和度为6%~92.97%,平均56.80%;11号煤层含气饱和度为25.01%~86.09%,平均57.56%(表4)。总体分析,北部区煤层含气饱和度和临界解吸压力较高,可采性较好,是有利的勘探开发目标区。

5 结论

(1) 研究区上古生界二叠系含煤地层是一套以三角洲相为主的海陆交互相沉积,3号、5号和11号煤层厚度大且分布范围广,煤岩储层总厚度为5~20 m,单层最大厚度可达10 m,是煤层气勘探开发的目的层。

(2) 主煤层以半亮煤和半暗煤为主,主要由镜质组构成,热演化程度较高,煤岩具有较高的吸附潜力。各项煤质参数都呈现出较强的非均质性,3号煤层总体上为低灰煤,5号煤层以低灰煤和中灰煤占较大比例,11号煤层为中灰煤。

(3) 煤储层孔隙度和渗透率均较低,属于低孔低渗储层。煤岩总体吸附性较好,但不同煤阶煤岩的吸附性能有明显的差异。无烟煤的吸附性能最好,解吸率较大且解吸速率较快,有利于煤层气的产出。

(4) 煤储层含气量较高,含气饱和度在61%以上,资源密度较大,产出能量较高,有利于煤层气开发。

参考文献 (References):

- 陈启林,白云来,马玉虎,等.2013.再论鄂尔多斯盆地寒武纪岩相古地理及沉积构造演化[J].吉林大学学报(地球科学版),43(6):1697-1713.
- 陈振宏,王勃,宋岩.2006.韩城地区煤层气成藏条件评价[J].天然气地球科学,17(6):868-870.
- 冯三利,叶建平,张遂安.2002.鄂尔多斯盆地煤层气资源及开发潜力分析[J].地质通报,21(10):658-662.
- 付金华,郭少斌,刘新社,等.2013.鄂尔多斯盆地上古生界山西组页岩气成藏条件及勘探潜力[J].吉林大学学报(地球科学版),43(2):382-389.
- 李明,闫磊,韩绍阳.2012.鄂尔多斯盆地基底构造特征[J].吉林大学学报(地球科学版),42(3):38-43.
- 刘新社,席胜利,周焕顺.2007.鄂尔多斯盆地东部上古生界煤层气储层特征[J].煤田地质与勘探,35(1):37-40.
- 欧成华,李士伦,杜建芬,等.2003.煤层气吸附机理研究的发展与展望[J].西南石油学院学报,25(5):34-38.
- 吴晓东,师俊峰,席长丰.2008.煤层渗透率敏感性及其对煤层气开发效果的影响[J].天然气工业,28(7):27-29.
- 王琳琳,姜波,屈争辉.2013.鄂尔多斯盆地东缘煤层含气量的构造控制作用[J].煤田地质与勘探,41(1):14-24.
- 薛光武,刘鸿福,要惠芳.2012.等.渭北盆地韩城开发区煤层气储层特征分析[J].太原理工大学学报,42(3):185-189.
- 杨起,刘大锰,黄文辉,等.2005.中国西北煤层气地质与资源综合评价[M].北京:地质出版社.
- 张国良,贾高龙.2004.鄂尔多斯东缘煤层气地质及勘探开发方向[J].中国煤层气,1(1):17-20.
- 张松航,汤达祯,唐书恒,等.2009.鄂尔多斯盆地东缘煤层气储集与产出条件[J].煤炭学报,34(10):1297-1304.
- 赵庆波,孙斌,李五忠.1997.鄂尔多斯盆地东部大型煤层气气田形成条件及勘探目标[J].石油勘探与开发,17(6):4-21.
- 赵丽娟,秦勇,林玉成.2010.煤层含气量与埋深关系异常及其地质控制因素[J].煤炭学报,35(7):1165-1168.