

高阶煤层气储层非均质性及其定量评价 ——以沁水盆地南部郑庄区块为例

李俊乾,卢双舫,薛海涛,王伟明,张 萍

[中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院,山东 青岛 266580]

摘要:煤储层非均质性影响煤层气开采。以沁水盆地南部郑庄区块3#煤层为例,开展高阶煤层气储层非均质性研究。采用变异系数定量评价了煤储层物性参数(含气量、吸附时间、宏观和显微裂隙密度)和煤岩学参数(显微组分和最大镜质体反射率)在储层纵向上的非均质发育特征。结果表明:煤储层参数层内非均质程度由强至弱依次为吸附时间(平均变异系数0.5246)、矿物质含量(0.4665)、总显微裂隙密度(0.4381)、总宏观裂隙密度(0.3143)、惰质组含量(0.2473)、镜质组含量(0.1125)、含气量(0.0877)和最大镜质体反射率(0.0135)。其中,吸附时间、矿物质含量和裂隙密度层内非均质性较强,是需要重点评价的储层参数。研究成果为煤层气储层非均质性的精细刻画以及定量评价提供了新的思路。

关键词:变异系数;层内非均质性;高阶煤储层;郑庄区块;沁水盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Intra-stratal heterogeneity of high rank coalbed methane reservoirs and their quantitative evaluation: A case study from Zhengzhuang block in the southern Qinshui Basin

Li Junqian, Lu Shuangfang, Xue Haitao, Wang Weiming, Zhang Ping

[Unconventional Oil & Gas and Renewable Energy Research Institute, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Coal reservoir heterogeneity affects the exploitation of coalbed methane (CBM). The No. 3 coal reservoir in the Zhengzhuang block in southern Qinshui Basin was taken as an example for intra-stratal heterogeneity study of high rank CBM, and vertical heterogeneity characteristics was quantitatively evaluated on physical properties (gas content, adsorption time, densities of macro-micro fracture) and coal petrology (macerals and maximum vitrinite reflectance) by using a variation coefficient. The following results were obtained. The ranking of intra-stratal heterogeneity of coal reservoir parameters from strong to weak is adsorption time (average variation coefficient is 0.5246), mineral content (0.4665), total density of micro-fracture (0.4381), total density of macro-fracture (0.3143), inertinite content (0.2473), vitrinite content (0.1125), gas content (0.0877) and maximum vitrinite reflectance (0.0135), among which adsorption time, mineral matter content and fracture densities have stronger intra-stratal heterogeneity and need to be evaluated as key parameters. This study proposed a new method for the description and quantitative evaluation of intra-stratal heterogeneity of coal reservoir.

Key words: variation coefficient, intra-stratal heterogeneity, high rank coal reservoir, Zhengzhuang block, Qinshui Basin

煤层气储层普遍具有高非均质特性,直接影响煤层气成藏与开采过程。因此,关于煤储层非均质性的表征与评价一直受到国内外学者的重视。煤层气储层在微观上、平面上、层内和层间均表现出强烈的非均质特性。前人研究多集中于储层微观、平面和层间非均质方面^[1-11]。对于煤储层层内非均质性的研究虽

有涉及^[12-19],但缺乏较为系统的定量评价。目前,针对常规或非常规(泥页岩、致密砂岩等)油气储层的非均质性研究已有大量文献见诸报道^[20-32],主要包括宏观非均质性(平面、层间和层内非均质性)和微观非均质性两大方面。其中微观非均质性研究多借助于实验手段^[20-21],而宏观非均质性研究方法较多,如 SPSS 因

收稿日期:2015-09-18;修订日期:2015-10-28。

第一作者简介:李俊乾(1987—),男,博士、讲师,非常规油气储层。E-mail:lijunqian1987@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41172134,41402110);山东省自然科学基金项目(ZR2014DP007)。

子分析法^[22]、统计学方法^[23]、洛伦兹曲线法^[23]、灰色集对分析评价法^[24]、基于 GIS 的灰色综合评价法^[25]以及采用非均质程度系数^[26]、随机介质模型^[27]、局部变差函数^[28]和分形维数^[29]等方法。

本文借鉴常规油气储层非均质性评价方法,以沁水盆地南部郑庄区块 3#煤层为例,采用统计学方法里的变异系数系统、定量地评价区块尺度内高阶煤层气储层物性(含气量、吸附时间、宏观和微观裂隙密度)和煤岩学参数(显微组分和最大镜质体反射率)层内非均质特性。通过本文研究,为煤层气储层非均质性的精细刻画以及定量评价提供了新的思路。

1 评价方法

本文所使用数据来源于沁水盆地南部郑庄区块 3#煤层的 13 口煤层气勘探井(图 1),包括 91 个岩心解

吸实验,83 个岩心宏观裂隙描述、61 个岩心显微裂隙描述、76 个岩心显微组分和最大镜质组反射率测试等数据。煤储层层内非均质性即为煤储层参数在单一储层内部纵向上的非均质特性。为了量化煤储层层内非均质性,引入了统计学方法里的变异系数,本文称之为纵向变异系数。通常,变异系数反映了样品测试值偏离平均值的程度,变异系数越大,表示非均质性越强,因此可用于定量评价煤储层参数层内非均质发育程度。假设某勘探井钻遇煤厚为 $h(\text{m})$, h 厚度煤层范围内采样点为 n (处),则采用该 n 处的煤岩心测试数据分析层内非均质性,对应的纵向变异系数(V)表示为:

$$V = \left[\sum_{i=1}^n (X_i - X_{\text{平均}})^2 / (n - 1) \right]^{1/2} / X_{\text{平均}} \quad (1)$$

式中: X_i 为勘探井处第 i 个煤岩心的储层参数测试值; $X_{\text{平均}}$ 为勘探井处 n 个煤岩心的储层参数平均值。

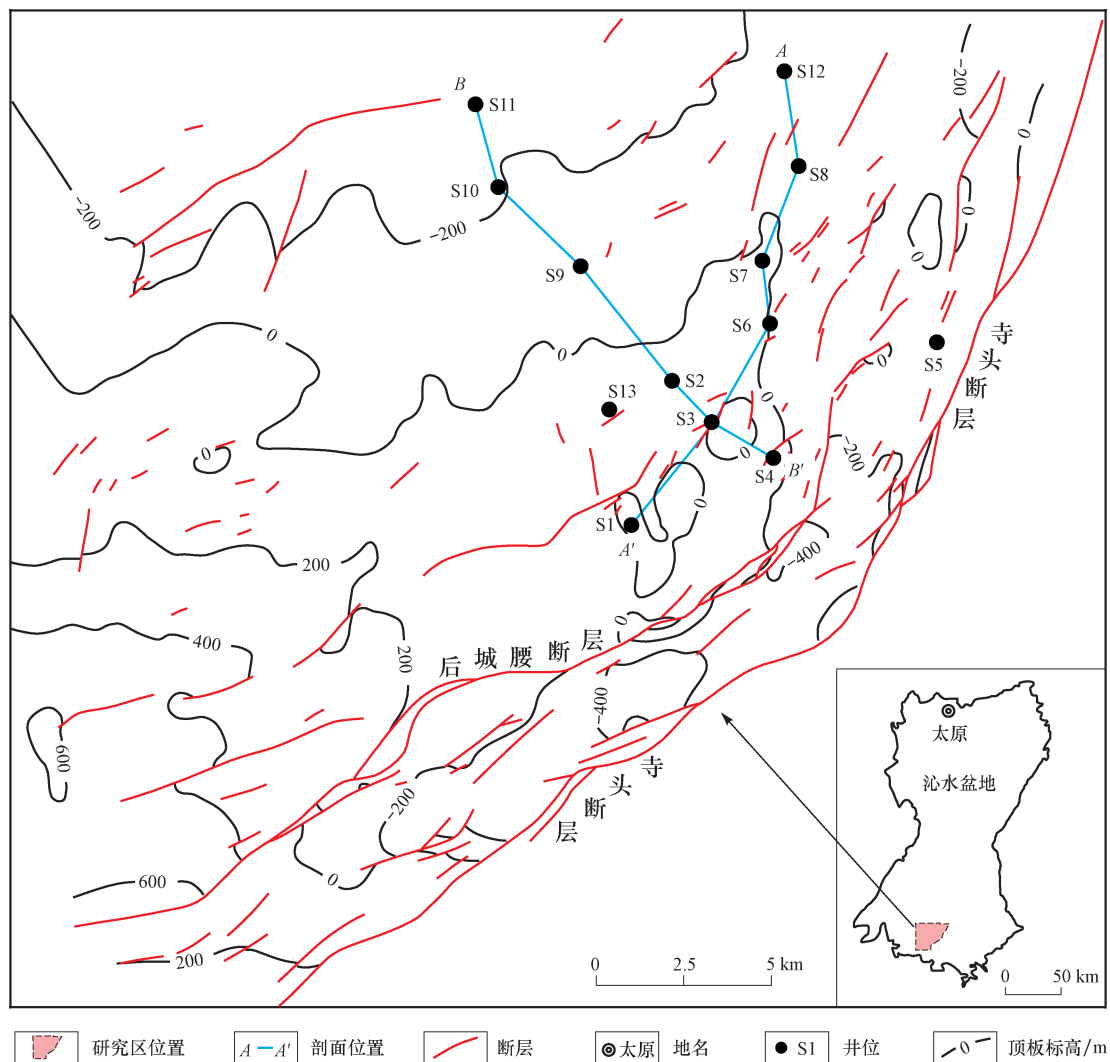


图1 研究区3#煤层构造条件及勘探井位分布

Fig. 1 Structural condition of the No. 3 coal reservoir and well location in the study area

表1 研究区煤储层物性及煤岩学参数层内分布

Table 1 Intra-stratal distribution of physical properties and petrology parameters in coal reservoirs of the study area

井位	t/d	$C_{ad}/(m^3 \cdot t^{-1})$	$D_1/(\frac{1}{5} \text{条} \cdot cm^{-1})$	$D_2/(\text{条} \cdot cm^{-1})$	$V/\%$	$I/\%$	$MM/\%$	$R_{o,max}/\%$
S1	2.22 ~ 9.00/6.52 ^a	23.89 ~ 28.59/25.81	12 ~29/20	8.8 ^b	67.3	23.3	8.8	3.88
S2	1.63 ~ 5.01/3.49	24.85 ~ 30.35/28.01	11 ~17/16	6.4 ~ 15.8/10.4	63.3 ~ 83.9/76.8	13.2 ~ 30.5/19.3	1.3 ~ 6.2/3.9	3.70 ~ 3.76/3.72
S3	18.22 ~ 81.84/61.30	1.99 ~ 4.49/3.28	8 ~17/14	5.9 ~12.6/9.6	49.0 ~ 81.5/68.6	16.2 ~ 40.0/26.7	1.2 ~ 11.0/4.6	3.58 ~ 3.74/3.67
S4	4.26 ~ 16.23/8.90	18.10 ~ 23.35/22.03	9 ~19/15	8.4	76.2	19.9	3.9	3.89
S5	9.88 ~ 61.16/39.99	5.89 ~ 9.03/7.65	5 ~13/9	4.6 ~ 20.3/10.9	48.2 ~ 69.1/60.1	26.8 ~ 49.4/37.2	1.0 ~ 4.1/2.7	3.53 ~ 3.77/3.68
S6	3.34 ~ 27.58/9.76	17.38 ~ 22.27/22.09	15 ~38/23	5.0 ~ 12.2/8.0	43.9 ~ 70.7/58.4	27.2 ~ 46.1/36.0	2.1 ~ 13.9/5.7	3.55 ~ 3.65/3.61
S7	3.71 ~ 15.74/10.05	21.10 ~ 22.38/21.82	9 ~31/17	4.2 ~ 11.2/6.8	47.5 ~ 66.4/58.2	28.0 ~ 49.6/37.5	2.7 ~ 5.6/4.2	3.54 ~ 3.67/3.62
S8	4.78 ~ 19.03/11.82	18.55 ~ 23.18/21.02	4 ~13/8	2.9 ~ 16.0/6.9	52.4 ~ 70.0/61.6	23.9 ~ 42.7/34.7	1.4 ~ 6.5/3.7	3.47 ~ 3.61/3.57
S9	1.85 ~ 10.46/5.61	23.57 ~ 30.12/27.57	11 ~18/14	4.8 ~ 11.4/6.8	79.9 ~ 87.3/83.9	10.1 ~ 15.7/11.5	1.8 ~ 9.3/4.6	3.38 ~ 3.59/3.49
S10	3.37 ~ 7.38/4.89	23.22 ~ 27.07/25.03	16 ~29/22	3.9 ~ 12.3/9.0	81.1 ~ 93.3/86.9	3.5 ~ 12.5/7.2	3.0 ~ 7.8/5.9	3.60 ~ 3.68/3.62
S11	1.88 ~ 3.11/2.22	29.26 ~ 34.06/30.92	6 ~22/11	5.3 ~ 17.1/10.0	54.7 ~ 77.9/65.7	19.5 ~ 41.3/30.9	1.3 ~ 4.9/3.3	3.61 ~ 3.73/3.68
S12	4.46 ~ 20.57/4.46	15.26 ~ 18.15/18.15	14 ~31/20	6.8 ~ 18.9/10.6	46.4 ~ 68.6/61.5	26.2 ~ 47.6/34.7	1.9 ~ 6.0/3.8	3.20 ~ 3.37/3.29
S13	21.03 ~ 37.22/27.51	7.53 ~ 10.55/8.70	17 ~32/25	—	59.1	30.6	10.3	3.67

注: t 为吸附时间,d; C_{ad} 为空气干燥基煤层气含量, m^3/t ; D_1 为总宏观裂隙密度, $\frac{1}{5}$ 条/cm; D_2 为总显微裂隙密度,条/cm; V 为镜质组含量,%; I 为惰质组含量,%; MM 为矿物质含量,%; $R_{o,max}$ 为最大镜质体反射率,%;—为未测试项目。

^a表示最小值~最大值/平均值。
^b表示仅测试一个样品。

2 结果与讨论

2.1 煤储层特征

研究区3#煤层地质背景参见文献[33]。本文基于13口勘探井的取心观察和测试结果(表1),重点总结了煤储层物性和煤岩学发育特征。

1) 煤体结构以原生结构为主,局部见碎裂结构。宏观煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主,局部见半暗煤条带,暗淡煤则极少发育。

2) 煤层气含量普遍较高,为1.99~34.06 m^3/t ,平均20.42 m^3/t 。煤层气吸附时间范围较宽,为1.63~81.84d,平均14.73d。

3) 煤储层发育宏观主、次裂隙,也有少量煤岩心不发育宏观次裂隙,部分煤岩心可见外生裂隙。煤储层总宏观裂隙密度(主、次裂隙密度之和)大多在1条/cm以上,裂隙密度级别属于密级,宏观裂隙连通性以好和中等为主。煤储层显微主裂隙和次裂隙同时发育,总显微裂隙密度为2.9~20.3条/cm,以密级和较

密级为主。裂隙连通性以好和中等为主,部分煤岩心表现出差的连通性。不同井位处的煤储层总宏观裂隙密度平均值为1.6~5条/cm;平均总显微裂隙密度为6.8~10.9条/cm。

4) 煤岩显微组分以镜质组为主,其次为惰质组,含有少量矿物质,几乎不含壳质组。其中矿物质以粘土矿物为主,所占比例为21.7%~100%,平均达82.7%;其次为碳酸盐矿物,比例为0~70.0%,平均13.0%。

5) 煤变质程度普遍较高, $R_{o,max}$ 均大于3.0%,属于无烟煤三号级别。

2.2 层内非均质性及定量评价

煤储层物性参数(含气量、吸附时间、宏观和微观裂隙密度)和煤岩学参数(显微组分和最大镜质体反射率),影响煤储层压裂效果和煤层气井排采过程^[17,33-36],是煤层气勘探、开发评价中的重要指标。

1) 含气量反映了煤储层含气性,是煤层气开采的物质基础,直接影响煤层气产量。

2) 煤层气吸附时间影响煤层气井排采特征,通常吸附时间越短,煤层气井产气高峰出现的越早,峰值产

气量越高。

3) 主裂隙(面割理)对煤储层渗透性贡献最大。在研究区,割理裂隙被矿物充填较为严重,主裂隙和次裂隙对煤储层渗透性均有所贡献,综合影响煤储层渗透性。除了对煤层气排采的影响之外,由于裂隙导致压裂液滤失,裂隙密度在储层内部的非均质发育对压裂过程也会产生影响。

4) 煤岩物质组成、变质程度影响煤岩力学特性,对煤储层水力压裂裂缝扩展、延伸等产生一定影响。

煤储层层内非均质性是普遍存在的,宏观上常表现出明显的分层特征,形成不同的煤岩类型和煤体结构等(图2)。在研究区煤层底部,稳定发育一层 0.35 ~ 1.00 m 厚的夹矸,也是储层层内非均质性的一个宏观体现。对于煤储层物性和煤岩学参数,亦表现出一定的层内非均质性。从图2上可以看出煤储层参数层内非均质性发育特征,且各参数非均质程度明显不同。根据研究区 13 口井处的储层参数纵向变异系数计算结果(表2),显示出研究区 3#煤储层参数层内非均质

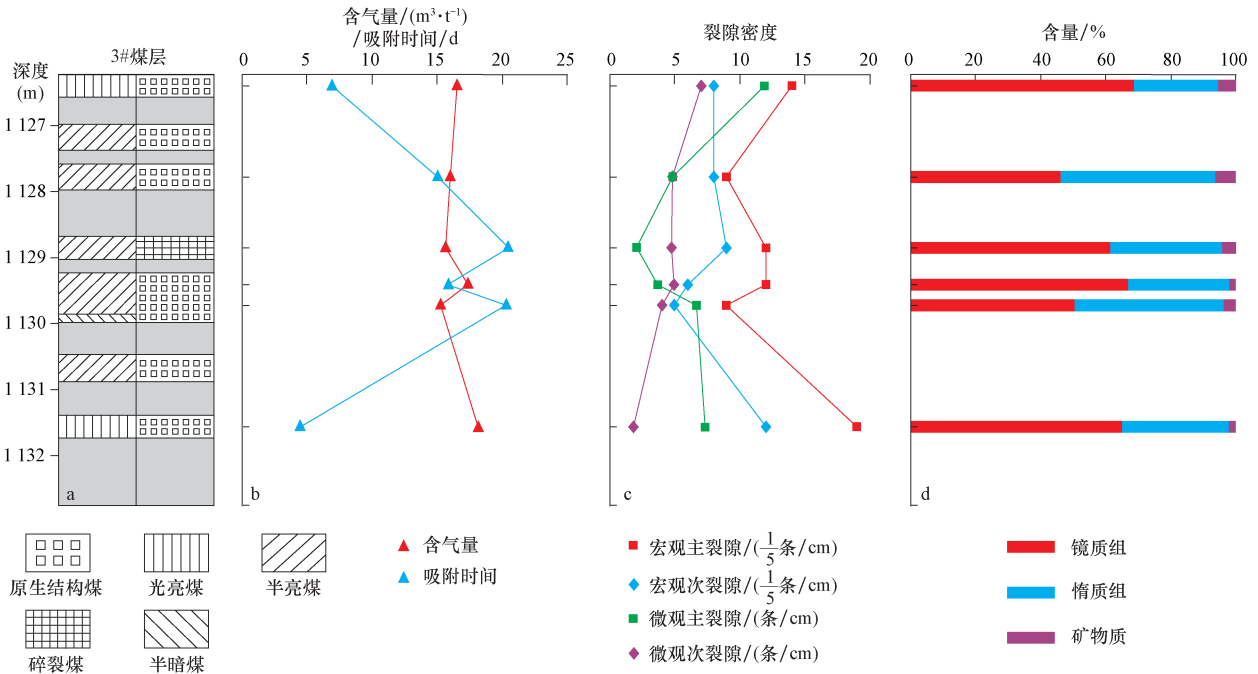


图2 研究区 S12 井 3#煤储层层内非均质性

Fig. 2 Intra-stratal heterogeneity of the No. 3 coal reservoir in Well S12 in the study area

表 2 研究区 3#煤层储层物性及煤岩学参数纵向变异系数

Table 2 Vertical variation coefficients of physical properties and petrology parameters in the No. 3 coal reservoir of the study area

井位	变异系数/样品个数							
	t	C_{ad}	D_1	D_2	V	I	MM	$R_{o,max}$
S1	0.384 2/7	0.064 4/7	0.321 8/7	—	—	—	—	—
S2	0.341 0/7	0.067 5/7	0.190 9/4	—	0.090 9/7	0.295 5/7	0.393 7/7	0.006 0/7
S3	1.075 7/5	0.209 1/5	0.254 6/4	—	0.153 0/8	0.309 1/8	0.655 5/8	0.017 7/8
S4	0.445 3/9	0.072 9/9	0.221 1/9	—	—	—	—	—
S5	0.550 4/8	0.131 3/8	0.408 4/7	0.558 1/8	0.136 5/8	0.224 8/8	0.377 2/8	0.022 4/8
S6	0.927 7/6	0.102 7/6	0.431 4/6	0.390 3/6	0.191 4/6	0.215 0/6	0.783 2/6	0.009 5/6
S7	0.425 9/8	0.027 2/8	0.402 6/7	0.418 6/5	0.113 3/8	0.192 6/8	0.263 9/8	0.013 3/8
S8	0.435 1/8	0.062 8/8	0.438 7/7	0.626 2/8	0.090 2/8	0.177 1/8	0.530 2/8	0.012 5/8
S9	0.667 3/7	0.073 2/7	0.154 3/7	0.327 0/7	0.037 1/7	0.169 6/7	0.583 2/7	0.021 9/7
S10	0.683 9/7	0.067 8/7	0.244 1/7	0.296 6/7	0.052 8/7	0.421 9/7	0.354 1/7	0.000 1/7
S11	0.173 8/8	0.057 8/8	0.493 8/7	0.487 1/5	0.125 6/8	0.245 0/8	0.350 6/8	0.012 7/8
S12	0.489 7/6	0.066 0/6	0.288 8/6	0.400 5/6	0.133 7/6	0.222 0/6	0.373 4/6	0.019 0/6
S13	0.220 4/6	0.137 8/6	0.235 3/6	—	—	—	—	—

注: t 为吸附时间; C_{ad} 为空气干燥基煤层气含量; D_1 为总宏观裂隙密度; D_2 为总显微裂隙密度; V 为镜质组含量; I 为惰质组含量; MM 为矿物质含量; $R_{o,max}$ 为最大镜质体反射率;—为样品数少于3个,未统计计算项目。

程度各不相同,由强至弱依次为:吸附时间(平均变异系数0.524 6,下同)、矿物质含量(0.466 5)、总显微裂隙密度(0.438 1)、总宏观裂隙密度(0.314 3)、惰质组含量(0.247 3)、镜质组含量(0.112 5)、含气量(0.087 7)、最大镜质体反射率(0.013 5)。煤储层参数层内非均质程度是多因素综合影响的结果,不同参数之间亦互相产生影响。在研究区内吸附时间与含气量呈幂指数负相关性变化,对于割理裂隙连通性较好的煤岩,煤层气吸附时间随总宏观(微观)裂隙密度增加呈线性降低^[36]。从图2上亦可看出含气量和裂隙密度纵向变化对吸附时间非均质性的影响。这是因为吸附时间是煤层气体扩散速率的量化指标,扩散速率越大,吸附时间越短。而扩散速度与基质-裂隙气体浓度差和扩散系数呈正相关,和扩散距离(即基质微孔隙至裂隙的距离)呈负相关。含气量层内非均质性受煤岩显微组分(镜质组和惰质组含量)、灰分产率影响

较大,随镜质组(惰质组)含量增加而增加(降低),随灰分含量增加而降低^[37]。裂隙密度发育程度又与煤岩物质组成、煤岩类型及煤体结构等密切相关。

总体上,在研究区内高阶煤层气储层纵向上,吸附时间、矿物质含量和裂隙密度具有相对较强的非均质性,在煤储层勘探、开发评价中应加以重视。但这些参数在煤储层纵向上非均质发育程度对煤层气排采、储层水力压裂的影响作用,还有待深入研究。

在确定了煤储层各参数层内非均质性强弱的基础上,本文以含气量和裂隙密度为例,沿断层走向和垂直方向绘制了两条储层剖面(A—A'和B—B')的等值线分布图。从图3上可以直观地看出,两条储层剖面的含气量和裂隙密度均显示出层内非均质特性,且非均质强弱在等值线图上亦有所反映。含气量纵向变异系数较小,层内非均质性较弱,在储层内部的等值线展布以垂直于煤层横向方向为主。而裂隙密度纵向变异系

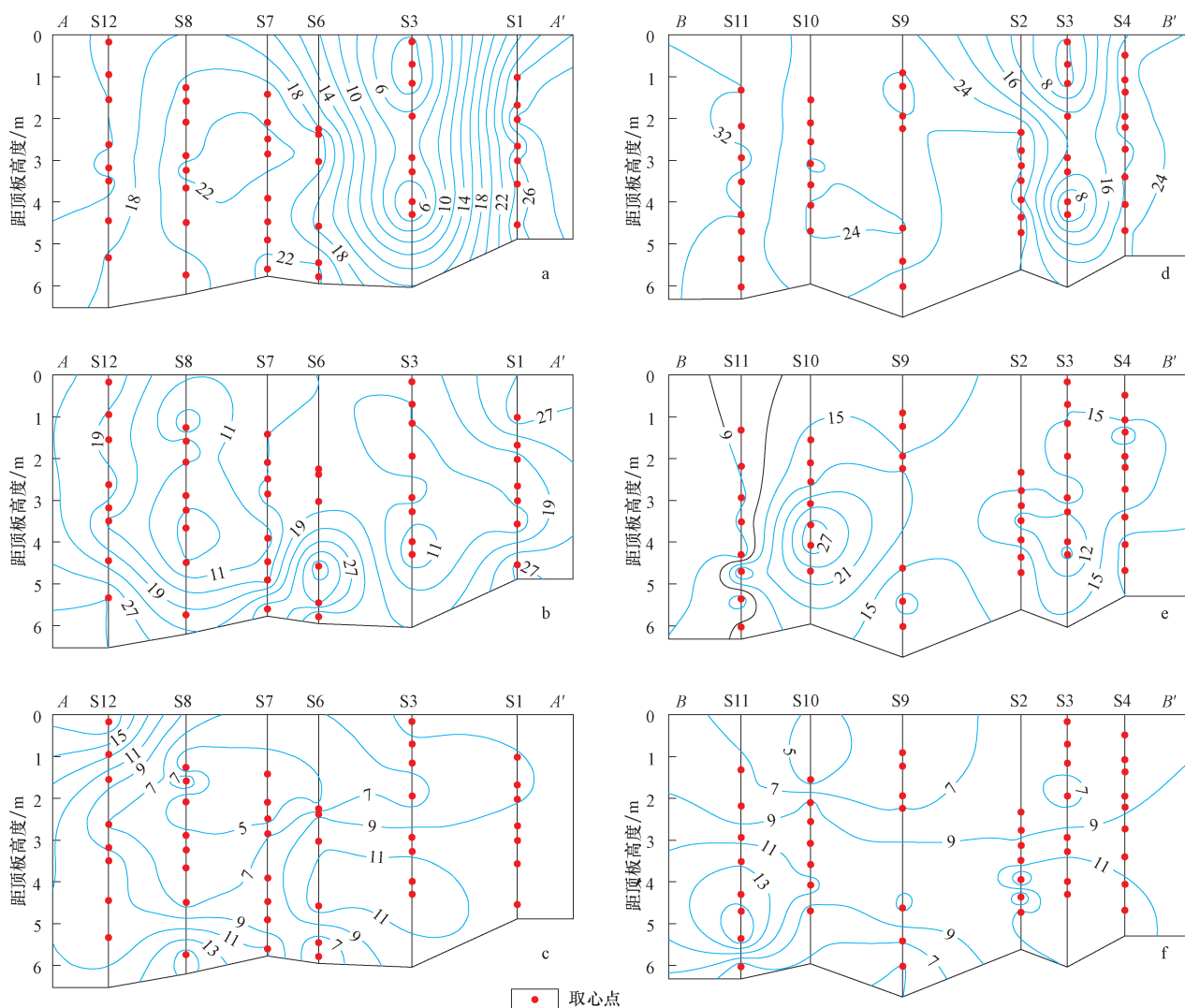


图3 研究区3#煤层储层含气量(a,d,m³/t)、总宏观裂隙密度(b,e, $\frac{1}{5}$ 条/cm)和总显微裂隙密度(c,f,条/cm)等值线图

Fig. 3 Contour maps of gas content (a,d,m³/t), total density of macro-fracture(b,e, $\frac{1}{5}$ 条/cm) and total density of micro-fracture (c,f,条/cm) in the No. 3 coal reservoir of the study area

数较大,具有较强的层内非均质性,等值线图变化趋势相对较复杂。因此,对于层内非均质性较弱的参数(如含气量),可以使用平均值评价该参数大小;而对于层内非均质性较强的参数(如裂隙密度),使用平均值带来的误差则较大,层内非均质性不可忽略。其它储层参数亦是如此,这也进一步说明了研究煤储层层内非均质性的重要性。

2.3 层内非均质性影响因素

关于煤储层物性和煤岩学参数的平面非均质影响因素,特别是针对煤层含气量和渗透率两个参数(前者涉及煤层气富集区,后者涉及煤储层高渗区^[33]),前人已进行大量的研究工作。本文针对煤储层参数的层内非均质性影响因素,进行了初步探讨。结果显示,煤储层参数纵向变异系数与该参数在纵向上的平均值大小密切相关,根据这一关系可定性评价煤储层层内非均质发育程度。通过对吸附时间、含气量、宏观总裂隙密度、镜质组含量、惰质组含量和矿物质含量等6个参数进行统计分析,显示:①吸附时间纵向变异系数与平均吸附时间(勘探井处储层纵向上的平均值,下同)呈正相关变化趋势,即平均吸附时间越大,吸附时间纵向变异系数越大,层内非均质性越强(图4a)。矿物质含量具有类似特征,但相关性较弱,相关性系数 R^2 为0.2066(图4f)。②镜质组含量、惰质组含量、含气量和总宏观裂隙密度纵向变异系数与其自身平均值呈负相关关系(图4b—e),即在某一井位处平均值越大,纵向变异系数越小,在纵向上具有较小的非均质特征。由于数据

点较少,未统计总显微裂隙密度纵向变异系数与其平均值之间的关系。

图4所示结果仍然是反映煤储层参数之间的相关性。研究区高阶煤层气吸附时间受含气量、裂隙密度等的综合影响,在平均吸附时间较长的储层部位,含气量总体较低或割理裂隙不发育或者割理裂隙被矿物充填导致连通性差。因此,较长的平均吸附时间往往对应于:①较小的平均含气量;②较小的平均裂隙密度;③较大的平均矿物质含量。相应地,较大的吸附时间纵向变异系数与较大的含气量、裂隙密度和矿物质含量纵向变异系数相一致。层内含气量非均质性变化也表现出受显微组分、矿物质含量等参数的综合影响。研究区内平均含气量较高的储层部位,镜质组(惰质组)含量较高(较低)和灰分产率较低。图4e、图4f和图4b具有较好的对应关系。但图4d表现出弱负相关性($R^2=0.3404$),与图4b不对应,可能由于研究区内镜质组含量较高,对煤层气含量非均质性的影响更大,而且图4e也显示镜质组含量的平均值与纵向变异系数之间的相关性更强($R^2=0.6095$)。

3 结论

1) 采用变异系数定量评价了沁南郑庄区块3#煤层内非均质特征,煤储层参数层内非均质程度由强至弱依次为吸附时间、矿物质含量、总显微裂隙密度、总宏观裂隙密度、惰质组含量、镜质组含量、煤层气含量、最大镜质体反射率。

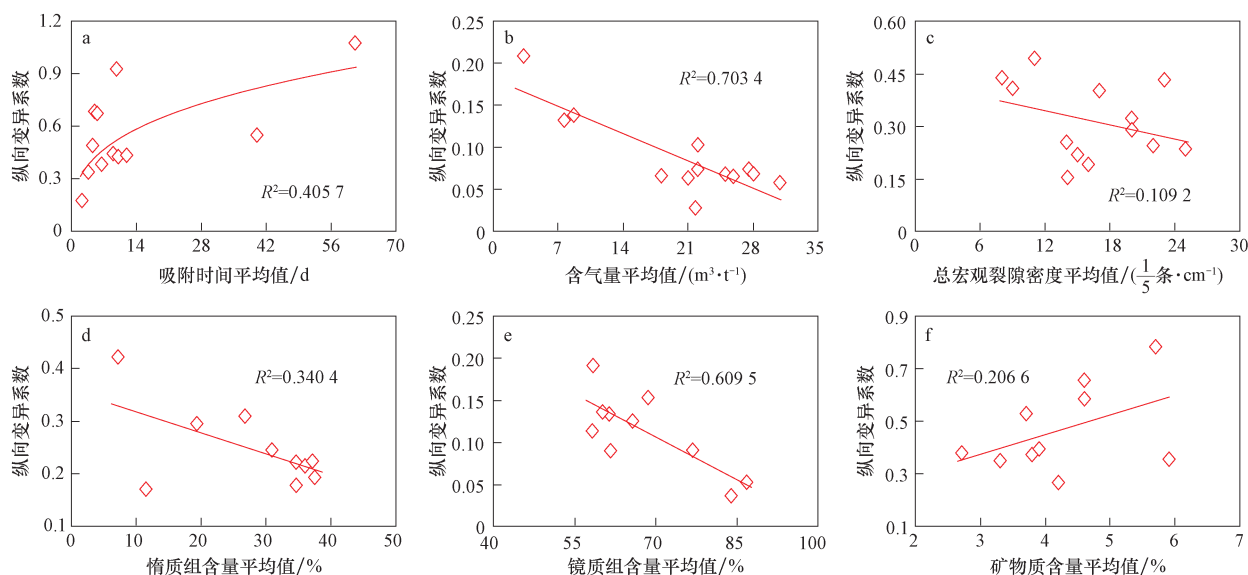


图4 研究区煤储层参数纵向变异系数与其平均值之间关系

Fig. 4 Relations between vertical variation coefficients and average values of reservoir parameters

a. 吸附时间; b. 含气量; c. 总宏观裂隙密度; d. 惰质组含量; e. 镜质组含量; f. 矿物质含量

2) 吸附时间、矿物质含量、裂隙密度层内非均质性较强,影响煤层气开采和储层压裂,是应该重点评价的煤储层参数。

3) 煤储层参数纵向变异系数与该参数纵向上的平均值大小有关,吸附时间、矿物质含量纵向变异系数与两参数的平均值呈正相关。镜质组含量、惰质组含量、含气量和总宏观裂隙密度纵向变异系数与其自身平均值呈负相关关系。

参 考 文 献

- [1] 张慧. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 40-43.
Zhang Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 40-43.
- [2] Shevkoplyas V N, Saranchuk V I. The impregnation effect on low and middle rank coals structure reorganization and their behavior during pyrolysis[J]. Fuel, 2000, 79(5): 557-565.
- [3] Machnikowska H, Krzton A, Machnikowski J. The characterization of coal macerals by diffuse reflectance infrared spectroscopy[J]. Fuel, 2002, 81(2): 245-252.
- [4] Prinz D, Pyckhout-Hintzen W, Littke R. Development of the meso- and macroporous structure of coals with rank as analysed with small angle neutron scattering and adsorption experiments[J]. Fuel, 2004, 83(4/5): 547-556.
- [5] 龙胜祥, 李辛子, 叶丽琴, 等. 国内外煤层气地质对比及其启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 696-703.
Long Shengxiang, Li Xinzi, Ye Liqin, et al. Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 696-703.
- [6] 张尚虎, 汤达祯, 王明寿. 沁水盆地煤储层孔隙差异发育主控因素[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 37-40.
Zhang Shanghu, Tang Dazhen, Wang Mingshou. Main control factor affecting pore differential development of the coal reservoirs in Qinshui basin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 37-40.
- [7] 鲁静, 邵龙义, 鞠奇, 等. 柴北缘大煤沟矿区侏罗纪煤系层序地层及其煤岩变化特征[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 9-14.
Lu Jing, Shao Longyi, Ju Qi, et al. Coal petrography variation in the sequence stratigraphic frame of the Jurassic coal measures of Dameigou mine area in Northern Qaidam Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(4): 9-14.
- [8] Yao Y, Liu D, Cai Y, et al. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53(6): 854-862.
- [9] Yao Y, Liu D, Che Y, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR) [J]. Fuel, 2010, 89(7): 1371-1380.
- [10] 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 等. “多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2012, 37(3): 573-579.
Shen Yulin, Qin Yong, Guo Yinghai, et al. Sedimentary controlling factor of unattached multiple superimposed coalbed-methane system formation[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(3): 573-579.
- [11] Li J, Liu D, Yao Y, et al. Physical characterization of the pore-fracture system in coals, Northeastern China [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2013, 31(2): 267-285.
- [12] 郭德勇, 韩德馨, 张建国. 平顶山矿区构造煤分布规律及成因研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 249-253.
Guo Deyong, Han Dexin, Zhang Jianguo. Research on the occurrence and distribution of structural coal in Pingdingshan coal district[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 249-253.
- [13] 李清. 山西延川南煤层气田2号煤层煤相研究: 煤层气开发选区意义[J]. 石油实验地质, 2014, 36(2): 245-248.
Li Qing. Coal facies of no. 2 coal in Yanchuannan coal field of Shanxi; Significance for constituencies of coalbed methane exploitation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 245-248.
- [14] 秦勇, 王文峰, 宋党育, 等. 山西平朔矿区上石炭统太原组11号煤层沉积地球化学特征及成煤微环境[J]. 古地理学报, 2005, 7(2): 249-260.
Qin Yong, Wang Wenfeng, Song Dangyu, et al. Geochemistry characteristics and sedimentary micro-environments of No. 11 coal seam of the Taiyuan formation of Upper Carboniferous in Pingshuo mining district, Shanxi province [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(2): 249-260.
- [15] 王绍清, 唐跃刚. 神东矿区煤岩学特征及煤相[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(5): 4-7.
Wang Shaoqing, Tang Yuegang. Coal petrological characteristics and coal facies in Shendong mining area [J]. Coal Geology of China, 2007, 19(5): 4-7.
- [16] 秦勇, 王文峰, 李壮福, 等. 海侵作用影响下的高分辨煤相序列及其古泥炭沼泽发育模式—以山西北部安太堡上石炭统太原组11号煤层为例[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 234-245.
Qin Yong, Wang Wenfeng, Li Zhuangfu, et al. High-resolution coal facies sequence and peat paleo-bog pattern during the transgression [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(2): 234-245.
- [17] 李俊乾, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 基于无量纲裂隙导流能力的煤储层压裂效果分析[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 573-578.
Li Junqian, Liu Dameng, Yao Yanbin, et al. Analysis of hydraulic fracturing effect of coal reservoir based on dimensionless fracture conductivity[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 573-578.
- [18] 陈跃, 汤达祯, 许浩, 等. 应用测井资料识别煤体结构及分层[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 19-23.
Chen Yue, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Application of logging data in recognition of coal structure and stratification [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 19-23.
- [19] 陆小霞, 黄文辉, 王佳旗, 等. 沁水盆地柿庄北深部煤层煤体结构发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 8-11.
Lu Xiaoxia, Huang Wenhui, Wang Jiaqi, et al. The development characteristics of deep coal structure in northern Shizhuang area [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(3): 8-11.
- [20] 陈杰, 周鼎武. 鄂尔多斯盆地合水地区长8储层微观非均质性的试验分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 13-18.
Chen Jie, Zhou Dingwu. Experimental analysis on micro-anisotropy of Chang 8 reservoir in Heshui area, Ordos basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34(4): 13-18.

- [21] 魏晨阳,朱玉双,马永宁,等. 定边地区长₈₂ 储层微观非均质性试验分析[J]. 长江大学学报,2012,9(12):53-56.
Wei Chenyang, Zhu Yushuang, Ma Yongning, et al. Experimental analysis on micro-anisotropy of Chang 8₂ reservoir in Dingbian area [J]. Journal of Yangtze University, 2012, 9(12): 53-56.
- [22] 施尚明,房晓萌,关帅,等. 稠油油田开发中后期储层非均质性评价与应用[J]. 断块油气田,2013,20(5):627-630.
Shi Shangming, Fang Xiaomeng, Guan Shuai, et al. Evaluation and application of reservoir heterogeneity in middle and late periods of heavy oilfield development [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(5): 627-630.
- [23] 江山,蒋明煊,程彦武. A 油田储层非均质性研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(6):101-104.
Jiang Shan, Jiang Mingxuan, Cheng Yanwu. Study on the reservoir heterogeneity in oilfield A [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(6): 101-104.
- [24] 刘海松,匡建超,霍志磊,等. 储层非均质性定量评价新方法—以XC 气田须二气藏为例[J]. 天然气技术与经济,2013,7(1):16-18.
Liu Haisong, Kuang Jianchao, Huo Zhilei, et al. A new method to evaluate quantitatively reservoir heterogeneity—an example from Xujiache 2 gas reservoir in XC Gas-field [J]. Natural Gas Technology & Economy, 2013, 7(1): 16-18.
- [25] 施冬,张春生. 基于 GIS 的储层非均质性灰色综合评价研究[J]. 地理空间信息,2008,6(5):12-14.
Shi Dong, Zhang Chunsheng. GIS-based grey comprehensive evaluation on oil-gas reservoir heterogeneity [J]. Geospatial information, 2008, 6(5): 12-14.
- [26] 严科,杨少春,任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究[J]. 石油学报,2008,29(6):870-874.
Yan Ke, Yang Shaochun, Ren Huaiqiang. Research on quantitative characterization of macroscopic heterogeneity of reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 870-874.
- [27] 吴何珍,符力耘,兰晓雯. 基于随机介质模型的储层非均质性分析[J]. 地球物理学进展,2008,23(3):793-799.
Wu Hezhen, Fu Liyun, Lan Xiaowen. Analysis of reservoir heterogeneity based on random media models [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 793-799.
- [28] 王延忠,乔勇. 利用局部变差函数描述储层非均质性[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2010,32(2):39-42.
Wang Yanzhong, Qiao Yong. Characterization of reservoir heterogeneity by using locally varying variogram [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(2): 39-42.
- [29] 杨庆红,谭吕,蔡建超,等. 储层微观非均质性定量表征的分形模型[J]. 地球物理学进展,2012,27(2):603-609.
Yang Qinghong, Tan Lv, Cai Jianchao, et al. Fractal models for quantitative characterization of the reservoir microscopic heterogeneity [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 603-609.
- [30] 田景春,刘伟伟,王峰,等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):183-189.
Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. Heterogeneity of the Paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao Area of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 27(2): 603-609.
- [31] 黄文彪,邓守伟,卢双舫,等. 泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用—以松辽盆地南部青山口组为例[J]. 石油与天然气地质,2014,35(5):704-711.
Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 704-711.
- [32] 王超,陆永潮,杜学斌,等. 油页岩岩性非均质性特征及地球物理精细刻画—以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段为例[J]. 石油与天然气地质,2015,36(5):814-821.
Wang Chao, Lu Yongchao, Du Xuebin, et al. Characteristics and geophysical prediction of lithology heterogeneity of oil shale: Taking the 2nd Member of Funing Formation of Qintong sag, Subei Basin, as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 814-821.
- [33] 李俊乾,刘大锰,姚艳斌,等. 基于主地质参数的煤层气有利开发区优选及应用. 现代地质,2014,28(3):653-658.
Li Junqian, Liu Dameng, Yao Yanbin, et al. A method for targeting favorable coalbed methane development area based on primary geological parameters and its application [J]. Geoscience, 2014, 28(3): 653-658.
- [34] Li J, Liu D, Yao Y, et al. Influencing factors of the Young's modulus of anthracite coals [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295-298: 2762-2765.
- [35] 孟艳军,汤达祯,李治平,等. 高煤阶煤层气井不同排采阶段渗透率动态变化特征与控制机理[J]. 油气地质与采收率,2015,22(2):66-71.
Meng Yanjun, Tang Dazhen, Li Zhiping, et al. Dynamic variation characteristics and mechanism of permeability in high-rank CBM wells at different drainage and production stages [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 66-71.
- [36] 李俊乾. 煤层气开发储层渗透性动态变化规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京),2014:96-112.
Li Junqian. Study on the dynamic changes in coal reservoir permeability during coalbed methane (CBM) recovery [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014: 96-112.
- [37] Li J, Liu D, Yao Y, et al. Geological controls of the coalbed methane (CBM) enrichment in the Zhengzhuang coal zone, Southern Qinshui Basin, China [J]. Advanced Materials Research, 2013, 616-618: 234-239.

(编辑 张玉银)