高 为,韩忠勤,吕 放,等.六盘水地区煤层含气性地质特征及差异成因[J].煤炭科学技术,2022,50(11):122-130.
GAO Wei, HAN Zhongqin, LYU Fang, *et al*. Difference characteristics and main controlling factors in gas-bearing of coal seams in Liupanshui Area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 122-130.

移动扫码阅读

六盘水地区煤层含气性地质特征及差异成因

高 为[1,2],韩忠勤[3],吕 放[1],白利娜[1],金 军[4]
(1.贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心,贵州 贵阳 550008;2. 贵州省煤田地质局 159 队,贵州 盘州 561600;
3. 贵州省油气勘查开发工程研究院,贵州 贵阳 550004;4.贵州省煤田地质局,贵州 贵阳 550008)

摘 要:六盘水地区是中国南方多煤层特别发育且地质条件较为复杂的地区,近年来煤层气试采效果较好,勘探进展明显,查明该区煤层含气性特征有助于深化对该区煤层气成藏规律的认识,提高勘探成功率。基于研究区多口煤层气参数井实钻资料及煤岩样品测试获取的大量气体组分、含气量、等温吸附及煤岩基础分析数据,分析了六盘水地区煤层含气性的空间差异特征,探讨了煤层含气性差异的关键地质控制因素。结果显示:区内煤层气组分以甲烷为主,中煤阶阶段容易出现重烃异常,重烃组分主要为乙烷,烃类气体与氮气呈高度线性负相关,局部高异常氮气主要来自大气混入,煤层气成因类型多样,且成因类型发生转换的镜质组反射率临界值在 1.70%左右。煤层含气量和朗格缪尔体积普遍较高,低煤阶和高煤阶阶段一般为吸附气,中煤阶焦煤部分煤层表现为游离气特征。煤层吸附能力和含气量同时受聚集地质因素和保存地质因素影响,平面上具有一定差异性,影响吸附能力差异的主要因素为煤变质程度和温压环境,影响含气量差异的主要因素为煤变质程度、埋深和构造,一般同一勘探区内朗格缪尔体积的变化相对含气量的变化较小;受聚集地质因素控制,吸附能力和含气量在垂向上不同煤层之间也有一定差异,主要影响因素为煤岩有机显微组分和煤质。

关键词:多煤层;煤层气;含气性;吸附特征;六盘水地区
中图分类号:TE37 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2022)11-0122-09

Difference characteristics and main controlling factors in gas-bearing of coal seams in Liupanshui Area

GAO Wei[1,2], HAN Zhongqin[3], LYU Fang[1], BAI Lina[1], JIN Jun[4]
(1. *Guizhou Provincial Engineering and Technology Research Center of Coalbed Methane and Shale Gas, Guiyang* 550008, *China*; 2. *NO.*159 *Team of Guizhou Coal Geological Bureau, Panzhou* 561600, *China*; 3. *Guizhou Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Guiyang* 550004, *China*; 4. *Guizhou Provincial Coalfield Geology Bureau, Guiyang* 550008, *China*)

Abstract: The Liupanshui Area is an area with particularly developed coal seams and complex geological conditions in southern China. In recent years, the results of coalbed methane test production in this area is good, and the exploration progress is obvious. Finding out the gas-bearing characteristics of coal seam in this area is helpful to deepen the understanding of the formation and storage rules of coalbed methane, and improve the success rate of exploration. Based on the actual drilling data of several CBM parameter Wells in the study area and a large number of gas components, gas content, isothermal adsorption and basic analysis data of coal and rock obtained from the test of coal and rock samples, the spatial difference characteristics of coal bed gas content in Liupanshui area are analyzed, and the key geological controlling factors of coal seam gas content difference are discussed. The analysis results show that the coalbed methane component in the area is dominated by methane, and heavy hydrocarbons are prone to abnormalities in the middle coal rank stage. The heavy hydro-

收稿日期:2021-12-20 **责任编辑**:黄小雨 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst. 2021-0312
基金项目:贵州省科技计划资助项目(黔科合战略找矿[2022]ZD001-01;黔科合支撑[2020]2Y028 号);国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044001-005)
作者简介:高 为(1987—),男,湖南长沙人,高级工程师,硕士。E-mail:404929883@qq.com
通讯作者:韩忠勤(1970—),男,贵州道真人,高级工程师,本科。E-mail:1178192212@qq.com

carbon components are mainly ethane. Hydrocarbon gas and nitrogen are highly linearly negatively correlated, and locally high abnormal nitrogen mainly comes from the atmosphere. There are various types of coal-bed methane genesis, and the critical value of vitrinite reflectance at which the genetic type changes is about 1.70%. The gas content and Langmuir volume of coal seams are generally high. The stage of low and high coal rank is generally adsorbed gas, while the part of coking coal seams of medium coal rank is characterized by free gas. The adsorption capacity and gas content of coal seam are affected by both accumulation geological factors and preservation geological factors, and there are certain differences on the plane. The main factors that affect the difference in adsorption capacity are the degree of coal metamorphism and the temperature and pressure environment, and the main factors that affect the difference in gas content are the degree of coal metamorphism, buried depth and structure. Generally speaking, the variation of Langmuir volume in the same exploration area is relatively less than that of gas content. Affected by the accumulation of geological factors, the adsorption capacity and gas content are also different among different coal seams in the vertical direction. The main influencing factors are the organic microscopic composition of coal and coal quality.

Key words: multiple coal seams; coalbed methane; gas-bearing characteristics; adsorption characteristics; Liupanshui Area

0　引　　言

六盘水地区是国家和省政府规划的“毕水兴”煤层气产业化基地的重要组成部分,是贵州省内煤种最齐全、多薄煤层最发育、煤层气资源最富集的区域,也是我国南方多煤层煤层气开发进展较迅速、成效较显著的典型代表地区[1-3]。目前区内累计建设有煤层气井 100 余口,其中“十三五”期间建设的煤层气直井单井产气效果相比“十二五”已明显提高,在水城、盘州等地的多口煤层气试采井无论是最高日产气量、累计日产气量还是稳定日产气量均取得了突破性进展,首先得益于区内煤层气参数井和试采井数量不断增加,掌握的煤层气地质数据资料更加可信,对该区的地质研究认识更加贴近实际[4-6]。六盘水地区煤层气聚集单元多,上二叠统龙潭组为区内主要的含煤地层,总体上具有煤层多而薄、控气构造类型多样、储层非均质性强烈、煤层气成藏条件复杂等特点[7-8]。煤层含气性是决定煤层气富集程度的基础条件,其主要包括气体化学组分、含气量、吸附性能等,对煤层气的勘探开发部署具有重要影响。其中,煤层气化学组分是研究煤层气成因的重要内容,含气量和吸附性能参数直接关系煤层气井产能大小和开采时间长短,均是决定煤层气藏能否经济开发的重要地质参数[9]。以往国内外学者针对煤层含气性开展了许多卓有成效的研究[10-14],并发现不同地区之间以及相同地区不同层位之间煤层含气性往往具有很大不同。近几年在研究区内的煤层气勘探开发实践表明,煤层含气性在平面和垂向上均具有较大的差异,不同区域不同层位的煤层气试采效果也很不相同,这给该区煤层气工作者带来了极大的困惑,给地质选区选层也造成了极大的困难。

前期部分学者针对六盘水地区煤层含气性开展了一些基础研究[1,8,15-18],但限于资料程度,主要侧重于煤矿勘探区尺度的研究,尚缺乏整体而系统的研究评价,尤其缺乏对该区煤层含气性地质控制的科学认识。基于六盘水地区近年来煤层气参数井实钻资料及煤岩样品测试获取的大量含气性测试数据,从煤层气气体组分、含气量和等温吸附参数入手,研究了平面上不同勘探区之间、相同勘探区不同煤层气井之间以及垂向上相同煤层气井不同煤层之间含气性的差异特征,探究了煤层含气性差异的关键地质控制因素,以期深化对该区煤层气成藏分布及富集规律的认识,为该区煤层气地质选区选层研究及高效勘探开发提供指导。

1　六盘水地区地质概况

六盘水地区位于晚二叠世上扬子聚煤沉积盆地的贵州西部,区域上主要包括盘州、水城、六枝等地,含煤面积约 8 200 km^2,2 000 m 以浅的煤层气资源量 1.39×10^{12} m^3,占贵州全省煤层气资源总量的 45.5%。该区构造上以 NW 向与 NE 向隔槽/隔挡式褶皱为主,断层多样,变形复杂,含煤岩系主要保存在 20 余个小型向斜和复向斜之中,主要如盘关向斜、土城向斜、青山向斜、杨梅树向斜等[19]。主要含煤地层为上二叠统龙潭组和长兴组,成煤环境以三角洲平原为主,主要由一套低孔低渗的细砂岩、粉砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩及煤层等岩层重复交替组成,水文地质条件简单,富水性弱,单位涌水量一般不超过 0.10 L/(s·m),煤层直接底板岩性以致密性良好的薄层泥岩为主,突破压力大,封盖性好,使得煤层气主要储存在煤层内部。含煤地层厚度为 220~543 m,纵向上表现为“煤层层数多(一般 10~30 层)、单层厚度薄(1.0~2.0 m)、煤层间距小(一般 5~20 m)、累计厚度大(一般 10~20 m)”的煤层群分布特征。区内煤种多样,气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、

贫煤和无烟煤均有分布,煤的镜质体反射率 R_o 主要介于 0.68%~3.14%。

2　含气性地质特征

2.1　煤层气组分特征

国内外大量煤层气组分数据统计结果表明,煤层气组分主要包含烃类气体和非烃类气体,其中烃类气体以甲烷(CH_4)为主,可能还有少量的重烃气体(C_{2+}),非烃类气体主要为氮气(N_2)和二氧化碳(CO_2),不同地区因煤层气成藏条件的差异煤层气组分也具有一定的差异性[20]。收集研究区内大河边向斜、土城向斜、盘关向斜和青山向斜 60 组来自不同煤阶(0.7%<R_o<2.8%)的钻井煤心解吸气体组分数据,本区煤层气组分中 CH_4 体积分数为 72.24%~98.23%,平均 88.40%,占绝对优势;C_{2+} 体积分数为 0.01%~23.22%,平均 4.58%;N_2 体积分数为 0.70%~16.51%,平均 6.09%;CO_2 体积分数为 0.01%~4.05%,平均 0.42%(图 1),不同煤阶煤层气组分有一定差异性。

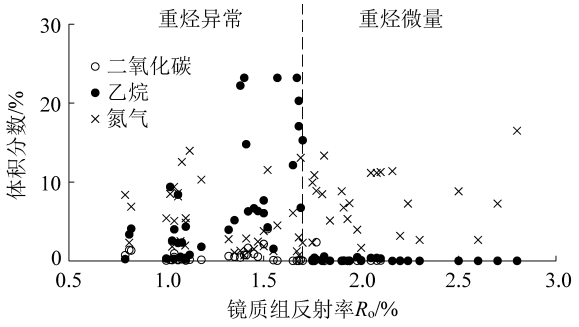


图 1　不同煤阶煤层气组分分布

Fig.1　Component distribution of coalbed methane in different coal ranks

研究区各煤阶阶段烃类气体和氮气均是煤层气的主要组分,二者体积分数之和达 95.95%~99.99%,平均 99.18%,CO_2 体积分数最少且不同煤阶差异并不大,烃类气体体积分数与氮气体积分数呈高度线性负相关,二者互为消长关系(图 2);各煤阶阶段均会出现较高的氮气异常,因此推测煤的变质程度与氮气含量高低并没有必然联系,氮气异常应有其他成因。研究区已有资料统计发现,镜质组反射率低于 1.70%时,普遍容易出现重烃异常,重烃组分主要为乙烷(C_2H_6),体积分数最高可达 23.22%,丙烷、丁烷等其他重烃组分极难出现;当镜质组反射率高于 1.70%时,重烃组分极低,体积分数一般在 1%以下(图 1)。

2.2　含气量特征

多煤层发育地区单煤层厚度普遍偏薄,故含气

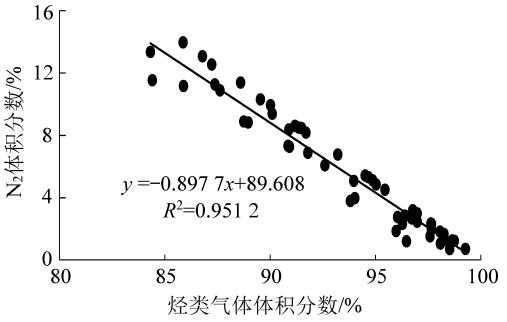


图 2　氮气与烃类气体体积分数关系

Fig.2　Relationship between volume fraction of nitrogen and hydrocarbon gas

量大小在很大程度上决定了煤层气井可供开发利用的资源量多少,进而决定了煤层气井的产气持续时间,被看作是确定煤层气开发前景最重要的地质参数之一[9]。煤的变质程度决定了煤层初始生气量的多少,因而对煤层含气量具有一定的控制作用[13]。通过统计研究区典型勘探区煤层实测含气量数据(表 1),区内煤储层含气量具有以下特点:①含气量总体较高。全区煤层空气干燥基实测含气量在 4.21~20.59 m^3/t,均值为 11.39 m^3/t,其中测试值小于 10 m^3/t 的占 43%,位于 10~15 m^3/t 的占 37%,大于 15 m^3/t 的占 19%。②受变质程度影响,不同勘探区含气量差异明显。总体上煤层镜质组反射率较大的勘探区其平均含气量较高,镜质组反射率较小的勘探区其平均含气量较低,随着煤变质作用程度的增强,含气量总体趋于升高,一般情况下,当 R_o<1.0%时,煤的含气量多低于 8 m^3/t,当 1.0%<R_o<2.0%时,煤的含气量一般介于 8.0~15.0 m^3/t,当 2.0%<R_o<2.5%时,煤的含气量一般介于 12.0~18.0 m^3/t,说明变质程度对勘探区之间的含气量差异具有重要的控制作用(图 3)。③同一勘探区相同煤层不同煤层气井的含气量差异大。如土城向斜松河 SV1 井 29-3 号煤层的含气量为 18.53 m^3/t,而 SV2 井 29-3 号煤层的含气量仅 11.55 m^3/t(图 4),说明含气量在平面上不同成藏地区之间差别较大,煤层气资源量不同,产气效果可能也不尽相同。④同一勘探区内相同煤层气井垂向不同煤层之间含气量存在差异,且变化规律多样。研究区上二叠统含煤岩系普遍具有煤层层数多、纵向跨度大的特点,尽管垂向上的不同煤层其镜质组反射率随层位降低呈现单调递增,但含气量却并不完全单调递增,如图 4a 所示,松河 SV2 井随层位降低煤层含气量趋于升高,变化幅值不大,图 4b 显示松河 SV1 井随层位降低煤层含气量呈现旋回式频繁波动的特点,且变化

幅值较大;图 3 所示的实测含气量与镜质组反射率的线性相关系数仅 0.413 7,具有较大的离散性,以上综合表明,变质程度对含气量有较强的控制,但并非惟一因素。

表 1　六盘水地区煤层主要含气性地质参数统计

Table 1　Statistics of main gas-bearing geological parameters of coal seams in Liupanshui Area

构造单元	矿区/井名	镜质组反射率/%	含气量/($m^3 \cdot t^{-1}$)	V_L/($m^3 \cdot t^{-1}$)	P_L/MPa
大河边向斜	大河边矿	0.78~0.91 (0.85)	4.21~9.56 (6.53)	—	—
盘关向斜	月亮田矿	0.79~1.18 (1.01)	8.08~14.44 (9.95)	11.11~17.09 (12.96)	0.90~2.51 (1.49)
土城向斜	松河 SV1	1.38~1.68 (1.47)	8.50~18.53 (13.11)	16.13~20.98 (18.12)	1.70~2.97 (2.56)
土城向斜	松河 SV2	1.16~1.54 (1.38)	5.87~12.06 (9.98)	21.93~28.41 (24.35)	1.42~1.84 (1.57)
盘关向斜	金佳 JV1	1.78~1.98 (1.85)	9.25~15.70 (13.61)	21.66~25.96 (24.46)	1.24~1.69 (1.51)
青山向斜	马依西矿	1.99~2.43 (2.27)	12.10~18.20 (15.67)	25.13~30.75 (27.14)	1.03~1.36 (1.24)

注:数据格式为最小值~最大值(平均值)。

2.3　吸附性能特征

煤的吸附能力控制着煤层气的赋存状态和储集性能,是研究煤层气成藏效应和评估资源潜力的首要基础,对指导煤层气科学排采具有重要意义[21]。由表 1 可知,区内煤储层的吸附性能具有如下特点:①吸附能力总体较强,以吸附气为主,中煤阶焦煤部分煤层具有游离气特征。全区煤层空气干燥基朗格缪尔体积为 11.11~30.75 m^3/t,均值为 19.59 m^3/t,其中测试值小于 15 m^3/t 的占 33%,位于 15~25 m^3/t 的占 39%,大于 25 m^3/t 的占 28%,且低煤阶和高煤阶阶段朗格缪尔体积普遍高于实测含气量,表现为典型的吸附气特征,中煤阶焦煤部分煤层的朗格缪尔体积低于实测含气量,表现出具有部分游离气的特征,这一现象在土城向斜以焦煤为主力煤层的部分煤层气井中表现尤为明显[15]。②受变质程度影响,不同勘探区吸附能力差异明显。总体上中高变质程度煤的朗格缪尔体积高于中低变质程度煤的朗格缪尔体积,如青山向斜马依西矿煤的镜质组反射率为 1.99%~2.43%,主体为贫煤,勘探区内煤的朗格缪尔体积为 25.13~30.75 m^3/t,远高于盘关向斜月亮田矿肥煤的朗格缪尔体积(11.11~17.09 m^3/t),体现了变质程度对吸附性能的控制。③同一勘探区一般朗格缪尔体积的变化相对含气量的变化较小。由表 1 可知,同一勘探区内朗格缪尔体积最小值与最大值的差值一般在 2.0~6.0 m^3/t,而含气量的变化值却在 5.0~10.0 m^3/t,究其原因可能是,一般影响煤吸附性能的因素也会影响煤的含气量,而煤现今实测的含气量除了取决于吸附性能外,还取决于后期的保存条件,相同勘探区不同煤层气井保存条件的差异可能导致实测含气量出现较大变化。④同一勘探区内相同煤层气井垂向不同煤层之间吸附能力存在一定差异,且没有明显变化规律。

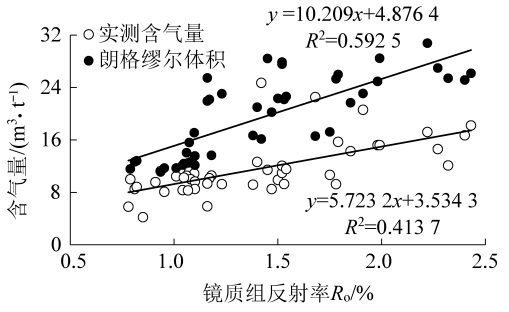


图 3　不同煤阶的煤层含气量与朗格缪尔体积

Fig.3　Coal seam gas content and Langmuir volume of different coal ranks

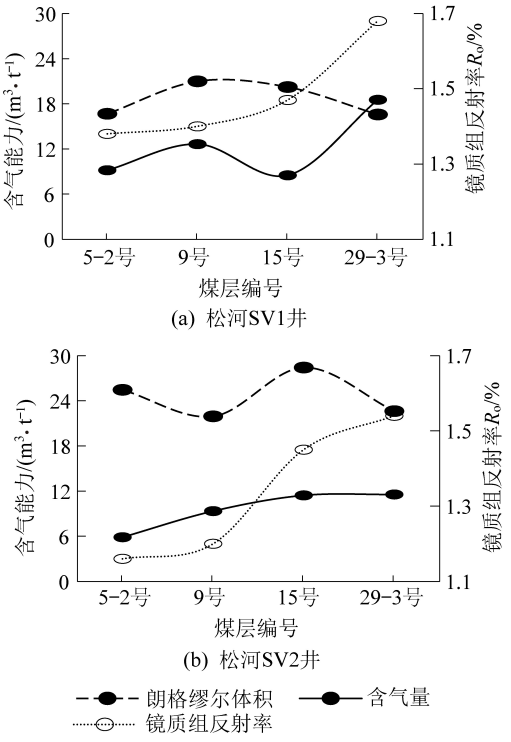


图 4　土城向斜典型煤层气井垂向不同煤层的含气量和朗格缪尔体积

Fig.4　Gas content and Langmuir volume of different vertical coal seams in typical coalbed methane wells in Tucheng syncline

由图 4a 可知,松河 SV1 井随层位降低煤的镜质组反射率单调递增,而朗格缪尔体积表现为先增加后降低,由图 4b 可知,松河 SV2 井随层位降低煤的镜质组反射率单调递增,而朗格缪尔体积表现为旋回式波动变化,体现了变质程度也不是影响煤吸附性能的唯一因素。

3　含气性差异成因探讨

3.1　氮气异常成因

已有研究发现[22-24],有机质含氮化合物降解可以形成内生氮气,但由于煤中有机质固有的低 N/C 原子比,煤层气中有机成因的氮气体积分数一般应在 5%以下,因此,煤层气中出现异常高的氮气(体积分数大于 5%)一般是地表大气混入、深部幔源气体混入或含氮矿物高温热解的结果。深部幔源气体混入不但会造成氮气体积分数较高,往往二氧化碳和稀有气体体积分数也较高,而含氮矿物高温热解则需要 1 000 ℃以上的高温条件[25-26]。然而研究区上二叠统煤系地层富水性较弱,煤层气中二氧化碳的体积分数较稳定且含量甚微,极难检测到氦气、氖气等稀有气体,含煤岩系的古地温温度最高也不超过 240 ℃[27-28],远达不到含氮矿物高温热解所需的温度,因此,大气混入应是研究区煤层气组分中局部高异常氮气的主要原因,氮气含量的高低可反映出煤层气保存条件的好坏。

3.2　重烃异常成因

煤层气气体组分是煤层气地球化学研究的重要内容,用其作为气体成因判识依据仍存在一定争议,但仍是研究煤层气成因规律的有效指标之一[22]。文献[29-30]研究表明,当 $C_1/(C_1+C_2)>0.95$ 时煤层气为干气(C_1 为甲烷含量,C_2 为乙烷含量),干气多数在低煤级和高煤级阶段产生,$C_1/(C_1+C_2)\leqslant 0.95$时煤层气为湿气,湿气一般在中煤级阶段产生;当 $C_1/C_2<100$ 时煤层气属于热成因气,$C_1/C_2>1\,000$ 时煤层气属于生物成因气,$100<C_1/C_2<1\,000$ 时煤层气属于热成因气与生物成因气的混合,热成因气主要生气阶段的 R_o 值分布在 0.6%~4.0%,而生物成因气在成煤作用的各阶段都可能产生。进一步统计区内不同镜质组反射率下煤层气分中的 $C_1/(C_1+C_2)$ 和 C_1/C_2,分析不同煤级煤层气的成因类型,图 5a 显示干气在低至高煤阶均广泛出现,而湿气仅在 $1.0\%<R_o<1.7\%$时出现,表明干气是研究区煤层气的主要类型,中煤级阶段可能会产生大量湿气。图 5b 显示,热成因气主要出现在中低煤级阶段($0.7\%<R_o<1.7\%$),生物成因气主要出现在高煤级阶段($1.7\%<R_o<3.0\%$),而混合成因气在任何煤级阶段都可能出现。以上研究表明,研究区煤层气成因类型的多样化,可能是造成不同煤级煤层气烃类气体组成差异化分布的重要原因,根据已有研究数据统计,推测研究区煤层气成因类型发生转换的镜质组反射率 R_o 临界值在 1.70%左右,当 R_o 低于 1.70%时,普遍容易出现重烃异常,这与戴金星院士等[31]认为的"烟煤原生煤层气基本特征是相对富含重烃气,体积分数一般为 5%~20%,无烟煤原生煤层气重烃体积分数常为 2%~3%或更低甚至没有"研究认识不谋而合。

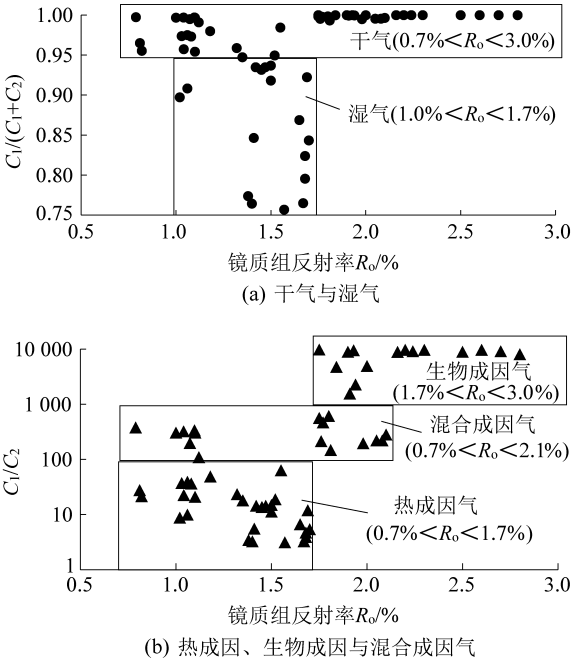


图 5　基于煤层气组分判识的不同煤阶煤层气成因类型

Fig.5　Genetic types of coalbed methane in different coal ranks based on component identification of coalbed methane

3.3　吸附能力与含气量差异成因

研究煤层吸附能力和含气量在平面和垂向上差异分布的成因对煤层气有利区及有利开发层段优选均有着重要的意义[32]。现今实测到的煤层含气量是煤层埋藏演化过程中生烃、吸附、运移、逸散等多过程长时间动态平衡后的结果,煤的含气量大小与煤的吸附性能大小密切相关[33]。近年来,关于煤层含气量和吸附性能的影响因素国内外学者作了大量的研究[33-35],笔者将其归纳为聚集地质因素和保存地质因素 2 个方面。聚集地质因素主要是跟煤本身物理化学性质有关的内生因素,如变质程度、煤岩组分、煤质等,聚集地质因素不仅决定了煤储层的初始生气量多少,还决定了储气空间性质和大小,主要通过影响生烃能力和气体储存状态而对含气量和吸附能力起到重要控制作用;保存地质因素主要是与煤

层演化环境有关的外界因素,如沉积环境、埋藏深度、断层性质和密度、温压环境、顶底板封闭性、水动力条件等,其主要通过影响气体运移和逸散而影响含气量大小,相对来说,对吸附性能的影响有限。

因此,煤层吸附能力与含气量都是受诸多因素耦合控制下差异性较强的地质参数,煤层气成藏条件的复杂性也正在于此,笔者通过对研究区吸附能力和含气量差异分布的深入研究,并结合国内外已有研究认识,认为造成该区吸附能力与含气量平面上差异分布、垂向上频繁波动的成因主要如下:

1)影响平面上不同勘探区之间或相同勘探区不同煤层气井之间煤层吸附能力差异的主要因素为煤变质程度和温压环境,即受聚集地质因素和保存地质因素的双重影响。平面上不同区域由于沉积环境、构造演化等条件的差异,煤的变质程度、温压环境往往差异巨大。目前关于煤变质程度对吸附能力的决定性影响认识已得到了广泛的认同[35-37],因此变质程度是导致区域上吸附能力差异的主因已不存在争论。文献[38]的室内等温吸附试验研究表明,温度对煤的吸附能力起着负面影响,而压力对煤的吸附能力起着正面影响,不同区域间煤层埋藏深度、地层能量等可能存在较大差异,因而储层温度和压力状态差别较大,导致吸附性能存在一定差别。

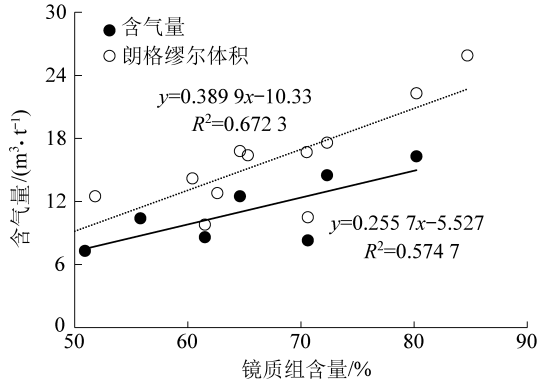


图 6　煤层镜质组含量对含气量和吸附能力的影响

Fig.6　Effect of vitrinite content in coal seam on gas content and adsorption capacity

2)影响垂向上相同煤层气井不同煤层之间吸附能力差异的主要因素为煤岩有机显微组分和煤质,主要受控于聚集地质因素。一般来说,相同煤层气井垂向上不同煤层之间往往煤的变质程度和温压环境差异不大,煤岩有机显微组分和煤质是导致差异的主因。有机显微组分中镜质组含量对吸附能力和含气量均有较强控制,镜质组含量越高的煤层,其朗格缪尔体积和实测含气量也往往越高(图 6)。煤质对吸附能力和含气量的影响主要体现为灰分,灰分越高的煤层,其朗格缪尔体积和实测含气量往往越低(图 7);另外,煤中碳元素含量与煤的吸附能力也有一定正相关关系,碳含量越高往往有机质含量越高,但其影响程度较镜质组和灰分的影响均要小[37-39]。

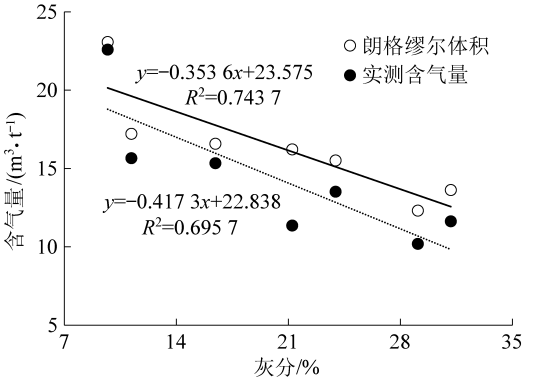


图 7　煤层灰分对含气量和吸附能力的影响

Fig.7　Influence of coal ash on gas content and adsorption capacity

3)影响平面上不同勘探区之间或相同勘探区不同煤层气井之间含气量差异分布的主要因素为煤变质程度、埋深和构造,亦是聚集地质因素和保存地质因素双重控制的结果。变质程度通过对煤吸附能力的控制,从而影响煤的含气量,二者具有一定的正相关性,在其他因素相似的条件下,煤阶较高的其含气量也较高(图 8)。埋藏深度对含气量的控制非常显著,在含煤向斜内部一般表现为核部含气量较高而两翼含气量较低,其实质是因为向斜核部埋深较大而两翼埋深较浅,当煤的变质程度等其他因素相似时,在现有勘探深度范围内,煤层含气量与埋藏深度呈正相关(图 8)。区内构造(断层性质和密度)控气也较明显,一般封闭性断层密集发育的地区含气量高,而开放性断层密集发育的地区含气量低,构造越复杂的地区含气量分布也越复杂。

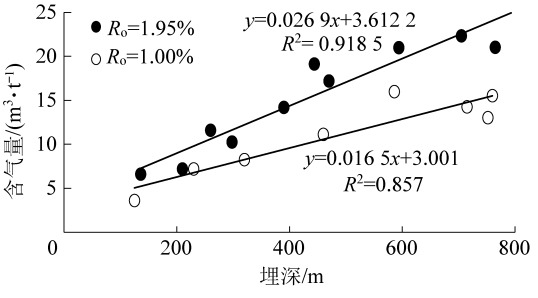


图 8　不同煤阶含气量与埋深的关系

Fig.8　Relationship between gas content of different coal rank and buried depth

4)影响垂向上相同煤层气井不同煤层之间含

气量差异分布的主要因素为煤岩有机显微组分和煤质,主要受控于聚集地质因素。研究区上二叠统龙潭组含煤岩系纵向上普遍具有煤层层数多、纵向跨度大、煤岩组分和煤质差异明显的特点。多层叠置含煤层气系统的理论研究表明[40-42],煤系跨度大的多煤层发育区垂向上普遍发育多个含气系统,不同含气系统之间受沉积控制形成的关键层封闭,邻近系统之间含气量、压力系数、水动力条件等存在突变,且不同煤层的煤岩组分、煤质等储层物性也有较大不同,从而导致多煤层合采产生较大层间矛盾。通过深入分析多口井含气量与压力系数的垂向变化发现,煤层气井垂向上主力煤层的含气量波动变化越大,即纵向上不同煤层含气量最大值与最小值的差值(含气量最大差值)越大,其压力系数最大值与最小值的差值(压力系数最大差值)也越大,越容易形成多个含气系统(图 9),这一发现将为多煤层条件下含气系统识别提供新的方法和指导。

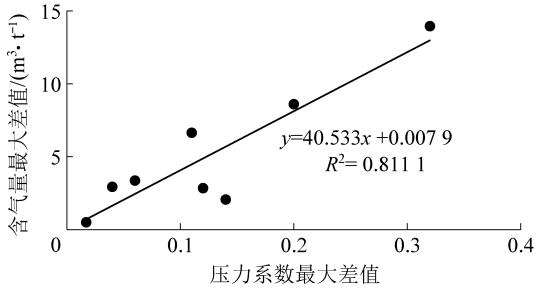


图 9　不同煤层气井纵向含气量最大差值与压力系数最大差值关系

Fig.9　Relationship between maximum difference of vertical gas content and maximum difference of pressure coefficient in different coalbed methane wells

4　结　　论

1)六盘水地区煤层气组分以甲烷为主,烃类气体与氮气呈高度线性负相关关系,大气混入是局部高异常氮气的主要原因;区内不同煤阶煤层气成因类型多样,煤层气成因类型发生转换的镜质组反射率 R_o 临界值在 1.70%左右,当 R_o 低于 1.70%时,普遍容易出现重烃异常,重烃组分主要为乙烷。

2)六盘水地区煤层含气量和朗格缪尔体积总体较高,低煤阶和高煤阶阶段基本表现为吸附气特征,中煤阶阶段部分煤层表现为游离气特征;不同勘探区之间、同一勘探区相同煤层不同煤层气井之间以及同一勘探区内相同煤层气井垂向不同煤层之间其含气量和朗格缪尔体积均具有一定差异,没有统一的变化规律;同一勘探区内一般朗格缪尔体积的变化相对含气量的变化较小。

3)分析了煤层含气量、吸附能力的空间差异尤其是不同煤阶控制下的差异特征,探讨了差异主控因素;受聚集地质因素和保存地质因素的双重控制,平面上不同勘探区之间或相同勘探区不同煤层气井之间影响煤层吸附能力差异的主要因素为煤变质程度和温压环境,影响含气量差异分布的主要因素为煤变质程度、埋深和构造;受聚集地质因素控制,垂向上相同煤层气井不同煤层之间影响吸附能力和含气量差异的主要因素为煤岩有机显微组分和煤质。

参考文献(References):

[1] 易同生,高　为.六盘水煤田上二叠统煤系气成藏特征及共探共采方向[J].煤炭学报,2018,43(6):1553-1564.
YI Tongsheng, GAO Wei. Reservoir formation characteristics as well as co-exploration and co-mining orientation of Upper Permian coal-bearing gas in Liupanshui Coalfield[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(6):1553-1564.

[2] 吴财芳,刘小磊,张莎莎.滇东黔西多煤层地区煤层气"层次递阶"地质选区指标体系构建[J].煤炭学报,2018, 43(6):1647-1653.
WU Caifang,LIU Xiaolei,ZHANG Shasha. Construction of "hierarchical" geological selection index system for coalbed methane in multi coal seam areas of eastern Yunnan and Western Guizhou[J]. Jonurnal of China Coal Society, 2018,43(6):1647-1653.

[3] 高　为,田维江,秦　文,等.贵州省煤层气与页岩气共探共采的地质优选[J].断块油气田,2014,21(1):36-38.
GAO Wei,TIAN Weijiang,QIN Wen,*et al*. Geological optimization of coalbed methane and shale gas co-exploration and concurrent production in Guizhou Province[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014,21(1):36-38.

[4] 迟焕鹏,毕彩芹,单衍胜,等.黔西都格井田煤层气储层特征及可采性[J].煤炭学报, 2018, 43(12):3447-3452.
CHI Huanpeng,BI Caiqin,SHAN Yansheng,*et al*. Reservoir characteristics and recoverability of CBM resource in Duge coalfield of Western Guizhou[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12):3447-3452.

[5] 高　为,易同生,金　军.黔西地区煤样孔隙综合分形特征及对孔渗性的影响[J].煤炭学报,2017,42(5):1258-1265.
GAO Wei, YI Tongsheng, JIN Jun, *et al*. Pore integrated fractal characteristics of coal sample in western Guizhou and its impact to porosity and permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(5):1258-1265.

[6] 高　为,易同生.黔西松河井田煤储层孔隙特征及对渗透性的影响[J].煤炭科学技术,2016,44(2):55-61.
GAO Wei,YI Tongsheng. Pore features of coal reservoir in Songhe Mine Field of West Guizhou and its impact to permeability[J]. Coal Science and Technology,2016,44(2):55-61.

[7] 高　为,韩忠勤,金　军,等.六盘水煤田煤层气赋存特征及有利区评价[J].煤田地质与勘探,2018,46(5):81-89.
GAO Wei, HAN Zhongqin, JIN Jun, *et al*. Occurrence

characteristics and assessment of favorable areas of coalbed methane exploration in Liupanshui coalfield[J]. Coal Geology & Exploration,2018,46(5):81-89.

[8] 杨兆彪,秦　勇,秦宗浩,等.煤层气井产出水溶解无机碳特征及其地质意义[J].石油勘探与开发,2020,47(5): 1000-1008.
YANG Zhaobiao, QIN Yong, QIN Zonghao ,*et al*.Characteristics of dissolved inorganic carbon in produced water from coalbed methane wells and its geological significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1000-1008.

[9] 孟尚志,张文忠,莫日和,等.柳林区块多煤层含气性差异与煤层气成藏模式[J].煤炭科学技术,2015,43(2):49-52,57.
MENG Shangzhi, ZHANG Wenzhong, MO Rihe, *et al*. Difference characteristics in gas-bearing between multiple coal seams and coalbed methane accumulation models in Liulin Area[J].Coal Science and Technology,2015,43(2):49-52,57.

[10] 高丽军,谢英刚,潘新志,等.临兴深部煤层气含气性及开发地质模式分析[J].煤炭学报,2018,43(6):1634-1640.
GAO Lijun, XIE Yinggang, PAN Xinzhi, *et al*. Gas analysis of deep coalbed methane and its geological model for development in Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(6): 1634-1640.

[11] 陈红东,姜　波,屈争辉,等.临汾与保德地区构造差异性特征及其对煤层含气性的控制[J].煤炭学报,2014,39(3): 510-517.
CHEN Hongdong, JIANG Bo, QU Zhenghui, *et al*. Structural difference between Linfen and Baode areas and its control on coal seam gas bearing property [J]. Journal of China Coal Society, 2014,39 (3): 510-517.

[12] 赵兴龙,汤达祯,张　岩.延川南煤层气田深部煤层气藏排采制度的建立与优化[J].煤炭科学技术,2021,49(6):251-257.
ZHAO Xinglong,TANG Dazhen,ZHANG Yan.Establishment and optimization of drainage system for deep coalbed methane in South Yanchuan CBM Field[J].Coal Science and Technology,2021, 49(6):251-257.

[13] 刘大锰,刘正帅,蔡益栋. 煤层气成藏机理及形成地质条件研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 1-16.
LIU Dameng, LIU Zhengshuai, CAI Yidong. Research progress on accumulation mechanism and formation geological conditions of coalbed methane [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 1-16.

[14] 桑树勋,范炳恒,秦　勇,等.煤层气的封存与富集条件[J].石油与天然气地质,1999(2):8-11.
SANG Shuxun,FAN Bingheng,QIN Yong, *et al*. Storage and enrichment conditions of coalbed methane [J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 1999 (2): 8-11

[15] 高　为,易同生,金　军,等.贵州松河井田煤层气地面抽采潜力分析[J].煤矿安全,2016,47(8):190-193,197.
GAO Wei, YI Tongsheng, JIN Jun, *et al*. Potential analysis of coal-bed methane drainage in Guizhou Songhe coal mine[J]. Safety in Coal Mines,2016,47(8):190-193,197.

[16] 白利娜,曾家瑶,高　为.基于灰色关联分析的盘关向斜煤层气有利井区优选[J].煤炭科学技术,2019,47(4):169-173.
BAI Lina,ZENG Jiayao,GAO Wei. Optimization of coalbed methane favorable well area in Panguan syncline based on grey correlation analysis [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 (4): 169-173

[17] 桂宝林.六盘水地区煤层气地质特征及富集高产控制因素[J].石油学报,1999, 20(3):31-37.
GUI Baolin. Geological characteristics and enrichment controlling factors of coalbed methane in Liupanshui region[J]. Acta Petrolei Sinica,1999, 20(3):31-37.

[18] 陈本金,温春齐,曹盛远,等.贵州六盘水煤层气勘探开发有利目标区优选[J].西南石油大学学报(自然科学版),2010, 32(3):56-60.
CHEN Benjin, WEN Chunqi, CAO Shengyuan, *et al*. Determination of favorable target areas of coalbed methane exploration and production in Liupanshui, Guizhou [J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2010,32(3):56-60.

[19] 邓恩德,姜秉仁,高　为,等. 黔西地区龙潭组煤系泥页岩孔隙结构及分形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 184-190.
DENG Ende, JIANG Bingren, GAO Wei, *et al*. Study on pore structure and fractal characteristics of shale from coal measures of Longtan Formation in western Guizhou [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 184-190.

[20] 巢海燕,王延斌.鄂尔多斯盆地东南缘临汾区块煤层气成因及其影响[J].煤炭学报,2016,41(7):1769-1777.
CHAO Haiyan,WANG Yanbin. Origin of coalbed methane and its influence in Linfen, Southeastern Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(7):1769-1777.

[21] 魏迎春,项歆璇,王安民,等.不同矿化度水对煤储层吸附性能的影响[J].煤炭学报,2019,44(9):2833-2839.
WEI Yingchun,XIANG Xinxuan,WANG Anmin,*et al*. The influence of water with different salinity on the adsorption performance of coal reservoir[J].Journal of China Coal Society,2019,44(9): 2833-2839.

[22] 夏　鹏,曾凡桂,宋晓夏,等.山西古交矿区煤层气组成特征及成因探讨[J].煤炭学报,2019,44(9):2824-2832.
XIA Peng,ZENG Fangui,SONG Xiaoxia,*et al*. Origins and molecular composition of coalbed methane in Gujiao area, Shanxi [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(9):2824-2832.

[23] 刘全有,戴金星,刘文汇,等. 塔里木盆地天然气中氮地球化学特征与成因[J].石油与天然气地质,2007,28(1):12-17.
LIU Quanyou,DAI Jinxing,LIU Wenhui,*et al*. Geochemical characteristics and genesis of nitrogen in natural gas from Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology,2007,28(1):12-17.

[24] TAO Mingxin,SHI Baoguan,LI Jinying,*et al*.Secondary biological coalbed gas in the Xinji area, Anhui province, China: Evidence from the geochemical features and secondary changes[J]. International Journal of Coal Geology,2007,71(2):358-370.

[25] MINGRAM B, HOTH P, LUDERS V, *et al*. The significance of fixed ammonium in Palaeozoic sediments for the generation of nitrogen-rich natural gases in the North German basin[J]. International Journal of Earth Science,2005,94:1010-1022.

[26] 李　剑,李志生,王晓波,等. 多元天然气成因判识新指标及图版[J].石油勘探与开发,2017,44(4):503-512.
LI Jian, LI Zhisheng, WANG Xiaobo, *et al*. New indexes and charts for genesis identification of multiple natural gas[J]. Petroleum Exploration and Development,2017,44(4):503-512.

[27] 孙蓓蕾,曾凡桂,刘　超,等. 太原西山煤田新生代隆升史的磷灰石裂变径迹约束[J]. 地质学报,2017,91(1):43-54.
SUN Beilei, ZENG Fangui, LIU Chao, *et al*. Cenozioc uplift history of the Xishan coalfield and constraints from apatite fission track dating[J]. Acta Geologica Sinica,2017,91(1):43-54.

[28] 刘洪林,王红岩,赵国良,等. 燕山期构造热事件对太原西山煤层气高产富集影响[J].天然气工业,2005,25(1):29-32.
LIU Honglin, WANG Hongyan, ZHAO Guoliang, *et al*. Influence of the tectonic thermal events in Yanshan period coalbed methane ecrichment and high productivity in Xishan coalfield in Taiyuan[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 29-32.

[29] 琚宜文,李清光,颜志丰,等. 煤层气成因类型及其地球化学研究进展[J].煤炭学报,2014,39(5):806-815.
JU Yiwen,LI Qingguang,YAN Zhifeng,*et al*.Origin types of CBM and their geochemical research progress[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(5):806-815.

[30] 徐占杰,刘钦甫,郑启明,等.沁水盆地北部太原组煤层气碳同位素特征及成因探讨[J].煤炭学报,2016,41(6):1467-1475.
XU Zhanjie, LIU Qinfu, ZHENG Qiming, *et al*. Origins and carbon isotopic composition of coalbed methane and carbon dioxide from Taiyuan Formation, Northern Qinshui Basin, China[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(6):1467-1475.

[31] 戴金星,戚厚发,宋　岩,等. 我国煤层气组分、碳同位素类型及其成因和意义[J]. 中国科学:B 辑化学,1986,16(12):1317 -1326.
DAI Jinxing,QI Houfa,SONG Yan,*et al*. Composition and carbonisotope of Chinese coalbed methane[J].Science China:PART B,1986(12):1317-1326.

[32] 杨师宇,魏　韧,袁学浩,等.新疆乌鲁木齐河东矿区煤层含气特征及主控因素[J].天然气地球科学,2019,30(11):1667-1675.
YANG Shiyu, WEI Ren, YUAN Xuehao, *et al*. Analysis of coal reservoir gas characteristics and main controlling factors in Hedong mining area, Urumqi city, Xinjiang Uygur Autonomous Region[J].Natural Gas Geoscience,2019,30(11):1667-1675.

[33] 姚艳斌,刘大锰.华北重点矿区煤储层吸附特征及其影响因素[J].中国矿业大学学报,2007,36(3):308-314.
YAO Yanbin,LIU Dameng. Adsorption characteristics of coal reservoirs in North China and its influencing factors[J]. Journal of Chinese University of Mining & Technology, 2007, 36(3): 308-314.

[34] CHATTARAJ S,MOHANTY D,KUMAR T,*et al*. Thermodynamics,kinetics and modeling of sorption behaviour of coalbed methane:A review[J].Journal of Unconventional Oil and Gas Resources,2016,16:14-33.

[35] 苏现波,张丽萍,林晓英.煤阶对煤的吸附能力的影响[J].天然气工业,2005,25(1):19-21.
SU Xianbo,ZHANG Liping,LIN Xiaoying. Influence of coal rank on coal and sorption capacity[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1):19-21.

[36] 钟玲文.煤的吸附性能及影响因素[J].地球科学:中国地质大学学报,2004,29(3):327-332.
ZHONG Lingwen. Adsorptive capacity of coals and its affecting factors[J].Journal of China University of Geosciences:Earth Science,2004,29(3):327-332.

[37] 鲍　园,安　超,琚宜文,等.川南煤田古叙矿区 DC-5 井上二叠统龙潭组煤层甲烷吸附性及其主控因素[J].天然气地球科学,2020,31(1):93-99.
BAO Yuan,AN Chao,JU Yiwen,*et al*.Constraints of methane absorbability in the Upper Permian Longtan Formation of Well DC-5 in Guxu mine area of southern Sichuan Coalfield[J].Natural Gas Geoscience,2020,31(1):93-99.

[38] 陈　刚,秦　勇,胡宗全,等.不同煤阶深煤层含气量差异及其变化规律[J].高校地质学报,2015,21(2):274-279.
CHEN Gang,QIN Yong,HU Zongquan,*et al*. Gas content difference and variation law of deep coal seams in different coal ranks[J]. Journal of Geology of Colleges and Universities, 2015, 21(2): 274-279.

[39] 田伟兵,李爱芬,韩文成.水分对煤层气吸附解吸的影响[J].煤炭学报,2017,42(12):3196-3202.
TIAN Weibing,LI Aifen,HAN Wencheng. Effect of moisture on adsorption and desorption of coalbed methane [J]. Journal of China Coal Society, 2017,42 (12): 3196-3202.

[40] 杨兆彪, 张争光, 秦　勇, 等.多煤层条件下煤层气开发产层组合优化方法[J].石油勘探与开发, 2018, 45(2): 297-304.
YANG Zhaobiao, ZHANG Zhengguang, QIN Yong,*et al*. Optimization methods of production layer combination for coalbed methane development in multi-coal seams[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 297-304.

[41] 杨兆彪, 李洋阳, 秦　勇, 等. 煤层气多层合采开发单元划分及有利区评价[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3):559-568.
YANG Zhaobiao, LI Yangyang, QIN Yong,*et al*. Development unit division and favorable area evaluation for joint mining coalbed methane[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 559-568.

[42] 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.