

# 吐哈盆地西缘艾维尔沟矿区煤储层吸附特征 及其影响因素研究\*

王泽<sup>1</sup>, 李增峰<sup>2</sup>, 孙丕臣<sup>1</sup>, 李亚男<sup>3</sup>, 曹玉召<sup>1</sup>, 王海超<sup>1†</sup>, 杨胜博<sup>1</sup>, 杜亮<sup>1</sup>

(1. 新疆大学地质与矿业工程学院 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室 煤层气工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830017; 2. 新疆焦煤(集团)有限责任公司, 新疆乌鲁木齐 830024; 3. 中国石油勘探开发研究院, 河北廊坊 065099)

**摘要:** 为查明吐哈盆地西缘艾维尔沟矿区煤储层吸附特征, 本文系统收集整理了煤岩煤质资料、等温吸附数据并对其进行分析, 揭示了煤储层吸附特征并分析了埋深、煤阶、显微煤岩组分、煤质与吸附特征之间的关系. 研究结果表明: 研究区煤储层兰氏体积介于 $14.37\sim 27.84\text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 平均为 $25.07\text{ m}^3/\text{t}$ ; 兰氏压力介于 $1.14\sim 3.45\text{ MPa}$ 之间, 平均为 $1.77\text{ MPa}$ . 且在温度、压力、孔隙度等因素的共同作用下, 煤储层吸附能力随埋深增大而增大; 吸附能力随煤阶的增大呈“高-低-高”的变化规律; 吸附能力随镜质组含量的增大而增大, 随惰质组含量的增大而减小; 煤中水分和灰分产率越大, 煤的吸附能力越弱. 整体上, 研究区煤储层吸附能力较强且随埋深增大而增大, 深部煤储层具有较好的煤层气资源潜力.

**关键词:** 煤层气; 吸附特征; 影响因素; 吐哈; 艾维尔沟

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.12.01.0002

**中图分类号:** P618.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2022)01-0080-08

**引文格式:** 王泽, 李增峰, 孙丕臣, 李亚男, 曹玉召, 王海超, 杨胜博, 杜亮. 吐哈盆地西缘艾维尔沟矿区煤储层吸附特征及其影响因素研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(1): 80-87+102.

**英文引文格式:** WANG Ze, LI Zengfeng, SUN Pichen, LI Yanan, CAO Yuzhao, WANG Haichao, YANG Shengbo, DU Liang. Study on adsorption characteristics and influencing factors of coal reservoir in Ewirgol mining area[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(1): 80-87+102.

## Study on Adsorption Characteristics and Influencing Factors of Coal Reservoir in Ewirgol Mining Area

WANG Ze<sup>1</sup>, LI Zengfeng<sup>2</sup>, SUN Pichen<sup>1</sup>, LI Yanan<sup>3</sup>, CAO Yuzhao<sup>1</sup>,  
WANG Haichao<sup>1</sup>, YANG Shengbo<sup>1</sup>, DU Liang<sup>1</sup>

(1. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, CBM Engineering Technology Research Center, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Xinjiang Coking Coal Group Corporation Limited, Urumqi Xinjiang 830024, China; 3. PetroChina Research Institution of Petroleum Exploration and Development, Langfang Hebei 065099, China)

**Abstract:** To ascertain the adsorption characteristics of coal reservoirs in the Ewirgol mining area of the western margin of Turpan-Hami Basin, this paper systematically collected and sorted the coal rock and coal quality data and isothermal adsorption data and analyzed it. The adsorption characteristics of coal reservoir were clarified and the relationship between the depth, coal rank, coal microscopic components and coal quality with adsorption characteristics were analyzed. The research shows that the Langmuir volume of coal reservoirs in the study area ranges from  $14.37\text{ m}^3/\text{t}$  to  $27.84\text{ m}^3/\text{t}$ , with an average of  $25.07\text{ m}^3/\text{t}$ . The Langmuir pressure falls between  $1.14\text{ MPa}$  and  $3.45\text{ MPa}$ , with an average of  $1.77\text{ MPa}$ . Under the combined action of temperature, pressure, porosity and other factors, the adsorption capacity of coal reservoirs exhibit a positive correlation between with buried

\* 收稿日期: 2020-12-01

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区天山青年计划项目(2020Q065); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2018D01C050); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202110755005); 2021年新疆维吾尔自治区研究生教育创新计划项目(XJ2021G077); 新疆大学博士研究生科研启动基金项目(2018740003)。

**作者简介:** 王泽(1998-), 男, 硕士生, 从事煤层气地质研究, E-mail: 460332242@qq.com.

**† 通讯作者:** 王海超(1988-), 男, 博士, 副教授, 从事煤层气地质研究, E-mail: wangxiaoshi2111@163.com.

depth and a “high-low-high” change law with the increase of coal rank. The adsorption capacity of coal reservoir increases and decreases with the increasing vitrinite content and inertinite content, respectively. The greater the moisture and ash yield in the coal, the weaker the adsorption capacity of coal. On the whole, the adsorption capacity of the coal reservoir in the study area is strong and is evidently dependent on the burial depth, and the deep coal reservoir has a good potential of CBM resources.

**Key words:** coal bed methane(CBM); adsorption characteristics; influencing factors; Turpan-Hami; Ewirgol

## 0 引言

煤层气的勘探开发在改善我国能源构成、保护环境和推动煤矿安全生产等方面具有重要意义。我国煤层气资源十分丰富,2 000 m以浅的资源量达 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,与陆上天然气资源量相当,位居世界第三位<sup>[1-2]</sup>,主要分布在华南地区、东北地区、华北地区和西北地区。目前我国的煤层气产业在国家的大力扶持下呈现快速发展的态势,通过学习和借鉴国外煤层气发展的理论经验,已基本在沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘等建成了煤层气产业基地<sup>[3]</sup>。由于我国煤层气的勘探及开采利用起步时间较晚,主要开发部位仍处于浅部煤层,在深部煤层气开发的基础理论研究方面仍然较为薄弱<sup>[4]</sup>。

煤层气的吸附特征是评价煤层气资源潜力的重要参数,国内外众多学者都对影响煤层气吸附特征的因素进行了大量研究,并取得了丰硕成果。研究表明控制煤储层吸附能力的主要因素包括温度、压力、埋深等外部因素及煤阶、煤的孔隙结构、煤岩组分、煤层含水性、灰分等内部因素。埋深通过控制储层温度和压力等多种因素影响煤储层的吸附能力,温度升高时,气体分子之间的无规则运动加强导致碰撞几率增加,使得甲烷( $\text{CH}_4$ )分子与煤基质表面的接触时间减少,吸附点位减少,从而导致吸附量降低<sup>[5]</sup>。煤储层压力增大会使煤粒径发生改变,产生孔隙与裂缝的同时还会使气体分子与煤基质之间的接触概率增大,从而造成吸附量的上升<sup>[6-7]</sup>。煤层气主要以吸附态赋存于煤储层的孔隙中,故煤储层中的孔隙结构决定了煤层气吸附能力的强弱<sup>[8]</sup>。通常认为煤对 $\text{CH}_4$ 的吸附能力与总孔比表面积之间呈正相关,煤基质表面对 $\text{CH}_4$ 分子的吸附能力是依靠两者之间的范德瓦耳斯力,且为单层吸附,由于微孔对总孔比表面积贡献大,因此微孔含量越多,煤的吸附能力越强<sup>[9-10]</sup>。但Bustin等通过对一系列不同煤阶的加拿大煤样和澳大利亚煤样研究,发现微孔含量较高或比表面积较大的煤样却具有较低的 $\text{CH}_4$ 吸附量<sup>[11]</sup>。因为随煤阶的增大,煤的吸附能力先后经历了快速增加阶段( $R_{O,\max} < 1.3\%$ )、缓慢增加阶段( $1.3\% < R_{O,\max} < 2.5\%$ )、达到极大值阶段( $2.5\% < R_{O,\max} < 4.0\%$ )和降低阶段( $R_{O,\max} > 4.0\%$ )4个阶段<sup>[12]</sup>。煤储层的吸附性与镜质组含量在中~低阶煤中呈正相关、在高阶煤中则与惰质组的含量呈正相关<sup>[13]</sup>。煤储层的吸附性与水分和灰分产率之间呈负相关,同时煤中水分类型的不同影响煤吸附气体的方式也不同。

艾维尔沟矿区煤炭和煤层气资源丰富,煤质以焦煤为主、肥煤次之,是新疆重要的炼焦煤生产基地<sup>[14-15]</sup>。目前矿区内各矿井仍在浅部煤层进行开采,瓦斯涌出量不大,但随着煤矿开采深度的增加,瓦斯涌出量会逐渐增大,煤瓦斯突出的危险性也逐渐增大。本文通过收集整理煤田地质报告中的煤岩煤质、等温吸附等数据资料,系统剖析了艾维尔沟矿区煤储层的吸附特征及其影响因素,以期指导该矿区煤矿的安全生产并为深部煤层气的勘探开发提供理论依据。

## 1 地质背景

艾维尔沟矿区位于西天山东段、东西天山的交汇部位,构造位置处于塔里木板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块的交接处,东部与东天山构造带相接,西部沿西贯穿插入中国的西天山<sup>[16]</sup>。

研究区构造形态主要受深大断裂控制,对研究区内构造形态影响较大的是博罗科努-阿其克库都克深大断裂,研究区的构造形态主要由该深大断裂控制。矿区内构造以断裂构造为主,有断层发育、构造复杂。

研究区内的含煤地层为侏罗系地层,从下至上地层分别为下统八道湾组和中统西山窑组,研究区内主要的含煤地层是八道湾组,共含煤18层,依次编为1-1#、1-2#、1下#、2-1#、2-2#、2下1#、2下2#、3#、4#、5上#、5#、6#、7#、8#、9#、10#、11#、12#,主采煤层为1-2#、2-2#、4#、5#、6#煤层,主采煤层可采厚度、平均厚度、结构及

表 1 主采煤层信息

煤层号	可采厚度/m	平均厚度/m	结构	可采部位
1-2#	0~11.31	2.38	简单且较稳定	大部可采
2-2#	0~10.66	3.45	简单且较稳定	大部可采
4#	0~4.02	1.23	简单且较稳定	大部可采
5#	0~7.28	3.31	简单且较稳定	大部可采
6#	0~5.87	3.28	简单且较稳定	全区可采

可采部位见表1.

## 2 煤岩煤质

艾维尔沟矿区煤层为条带状结构、层状构造,断层附近的煤层因挤压多呈鳞片状、贝壳状或阶梯状断口.煤层内生裂隙较发育,局部受构造的影响可见外生裂隙并被黄铁矿薄膜充填.宏观煤岩类型以光亮煤、半亮煤为主,半暗煤、暗淡煤较少;宏观煤岩主要成分为镜煤和亮煤,含有少量的暗煤和丝炭,且两者之间呈条带状交互产出.

表 2 煤岩组分

煤层	煤样编号	$R_{O,max}/\%$	有机组分/ $\%$				无机组分/ $\%$			
			壳质组	镜质组	惰质组	有机总量	粘土类	硫化物	碳酸盐	氧化物
1-1#	1-1#-1	1.13	-	92.3	5.3	97.6	1.7	0.2	0.2	0.3
1-2#	1-2#-1	0.86	-	94.3	1.1	95.4	3.0	0.2	1.4	-
	1-2#-2	1.03	-	98.0	0.6	98.6	1.4	-	-	-
2-1#	2-1#-1	0.88	1.1	84.4	5.8	91.3	5.3	0.5	0.4	1.8
2-2#	2-2#-1	1.15	-	93.1	1.1	94.2	5.1	0.2	0.5	-
	2-2#-2	0.84	2.9	70.5	4.7	78.1	19.2	0.6	0.5	0.5
3#	3#-1	0.97	-	92.2	3.2	95.4	4.0	-	0.6	-
	5#-1	1.30	-	98.6	0.5	99.1	0.2	0.1	0.4	0.2
5#	5#-2	-	2.4	89.0	7.2	98.6	0.6	0.3	0.4	0.1
	5#-3	0.82	1.0	80.4	5.3	86.7	12	0.1	1.1	0.1
	5#-4	0.92	1.9	86.7	6.7	95.3	3.8	0.2	0.6	0.1
6#	5#-5	1.32	-	92.8	2.2	95.0	3.8	-	0.5	0.7
	6#-1	0.85	1.5	88.3	6.6	96.4	3.2	0.2	0.2	-
	6#-2	0.87	-	96.1	2.0	98.1	-	0.6	1.3	-
8#	8#-1	0.83	1.3	95.8	1.6	98.7	0.2	-	0.2	0.9
9#	9#-1	1.17	-	82.2	10.6	92.8	5.2	-	0.5	0.8
	9#-2	-	-	57.2	8.8	66.0	31.7	-	1.8	0.5
10#	10#-1	1.08	-	89.7	8.8	98.5	0.4	0.5	0.2	0.4

注:“-”表示未检出.

表 3 煤质组分

煤层	煤样编号	采样深度/m	煤质			视密度/ $g \cdot cm^{-3}$	真密度/ $g \cdot cm^{-3}$	孔隙度/ $\%$
			$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$			
1-1#	1-1#-1	230.70	1.12	15.03	43.73	1.30	1.34	2.99
2-2#	2-2#-2	228.70	0.62	18.31	32.09	1.32	1.38	4.35
	2-2#-3	232.45	0.68	19.51	32.89	1.32	1.39	5.04
5#	5#-1	81.90	0.82	8.02	33.53	1.26	1.30	3.08
	5#-2	187.20	0.68	23.58	38.34	1.36	1.41	3.55
	5#-3	74.25	0.72	17.53	28.77	1.34	1.40	4.29
	5#-4	234.95	0.69	11.59	33.88	1.28	1.32	3.03
	5#-5	350.65	0.62	8.11	39.83	1.23	1.30	5.38
6#	6#-1	212.95	0.53	13.33	34.04	1.31	1.33	1.50
	6#-2	156.70	0.72	19.00	36.72	1.30	1.36	4.41
7#	7#-1	175.40	0.85	12.00	31.82	1.27	1.33	4.51

通过收集艾维尔沟矿区煤田地质报告中煤岩、煤质数据可知<sup>[17]</sup>,研究区煤镜质组最大反射率( $R_{O,max}$ )介于0.82%~1.32%之间,变质程度较低,属于气煤~焦煤.显微煤岩组分以有机组分为主,介于66.0%~99.1%之间,一般以凝胶化物质为主,其中镜质组含量最大,介于57.2%~98.6%之间;其次为惰质组,介于0.5%~10.6%之间;

壳质组含量最低,介于1.0%~2.9%之间;无机质含量介于0.9%~34.0%之间,以粘土类为主、碳酸盐次之,硫化物和氧化物含量较少(见表2)。研究区内各煤层水分( $M_{ad}$ )产率平均值在0.53%~1.12%之间;灰分( $A_d$ )产率平均值在8.02%~23.58%之间,属中~高灰煤;挥发分( $V_{daf}$ )产率平均值在28.77%~43.73%之间,属中挥发分煤(见表3)。

### 3 煤储层吸附特征

煤层气中约有80%~90%的气体以吸附状态赋集于煤的微孔隙中,其中又以煤体表面吸附占大多数<sup>[18]</sup>。煤层气吸附理论有许多种,目前几种主流的观点为Langmuir单分子层吸附理论、吸附势理论、BET多分子层吸附理论、多相吸附模型等。其中Langmuir在1916年提出的单分子层吸附理论是目前应用最为广泛的一种。

Langmuir模型是基于单分子层吸附理论推导出的,其基本假设如下:(1)固体表面的吸附能力来源于吸附剂的表面立场,但是立场的作用范围是分子级,因此只有气体分子和空白的固体表面进行碰撞时才可能发生吸附,所以固体表面对气体分子只能发生单分子吸附;(2)固体的表面是均匀的,且表面上所有位置的吸附能力都相同;(3)固体表面上吸附的气体分子之间无相互作用力;(4)吸附平衡是动态平衡。

Langmuir模型的数学表达式为:

$$V = V_L P / (P_L + P),$$

式中: $V$ 为吸附体积,  $m^3/t$ ;  $V_L$ 为兰氏体积,  $m^3/t$ ;  $P_L$ 为兰氏压力, MPa;  $P$ 为平衡气体压力, MPa。

通常采用等温吸附的兰氏参数(包括兰氏压力和兰氏体积)来评价煤储层的吸附能力。兰氏体积( $V_L$ )指的是煤储层的极限吸附量,反映煤储层吸附煤层气能力的强弱,兰氏体积越大代表煤储层吸附煤层气的能力越强;兰氏压力( $P_L$ )指的是极限吸附量50%所对应的压力,反映煤储层吸附气体的难易程度,兰氏压力越大煤层气开发难度越大。

本文收集整理艾维尔沟矿区5个主采煤层的18个煤样的等温吸附实验数据<sup>[17]</sup>(见表4),其中1-1#煤层1个;2-2#煤层4个;5#煤层7个;6#煤层5个;7#煤层1个。实验采用美国Terratek公司的IS-100型高压等温吸附仪进行,实验方法采用平衡水法,煤样破碎至60~80目,实验温度为30°C,测试依据GB/T 19560—2008《煤的高压等温吸附试验方法》<sup>[19]</sup>进行。实验流程如下:首先,将达到平衡水分的煤样样品置于密封容器中,测定其在相同温度、不同压力条件下达到吸附平衡时所吸附的 $CH_4$ 体积;然后,根据Langmuir单分子层吸附理论,通过理论计算求出表征煤对 $CH_4$ 吸附特性的吸附常数(兰氏体积 $V_L$ 、兰氏压力 $P_L$ )并绘制等温吸附曲线(图1)。

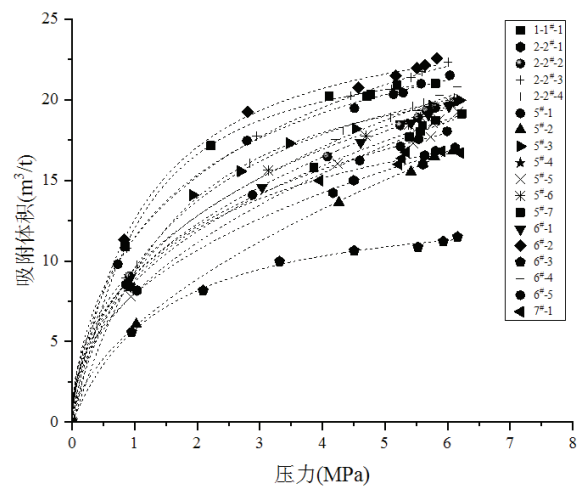


图1 等温吸附曲线特征

研究区煤储层吸附体积随压力的增大可分为三个阶段,分别是低压区、中压区 and 高压区:0~2.5 MPa为低压区,此区域内随着压力增大吸附量快速增加;2.5~5 MPa为中压区,此区域内随着压力增大吸附量逐渐增加,但增长速率减缓;5~7 MPa为高压区,此区域内随着压力的增大吸附量基本不变,增长幅度较小。

整体上,研究区煤储层具有较强的吸附能力,各煤层 $V_L$ 介于14.37~27.84  $m^3/t$ 之间,且主要集中在22.00  $m^3/t$ 左右,平均 $V_L$ 为25.07  $m^3/t$ 。其中:1-1#煤层 $V_L$ 为26.54  $m^3/t$ ;2-2#煤层 $V_L$ 介于23.45~27.84  $m^3/t$ 之间,平均为25.99  $m^3/t$ ;5#煤层 $V_L$ 介于14.37~27.09  $m^3/t$ 之间,平均为24.53  $m^3/t$ ;6#煤层 $V_L$ 介于23.27~27.53  $m^3/t$ 之间,平均为25.52  $m^3/t$ ;7#煤层 $V_L$ 为21.45  $m^3/t$ 。研究区煤储层 $P_L$ 介于1.14~3.45 MPa之间,平均为1.77 MPa。其中:1-1#煤层 $P_L$ 为1.14 MPa;2-2#煤层 $P_L$ 介于1.47~2.18 MPa之间,平均为1.78 MPa;5#煤层 $P_L$ 介于1.24~3.45 MPa之间,平均为1.98 MPa;6#煤层 $P_L$ 介于1.14~2.06 MPa之间,平均为1.70 MPa;7#煤层 $P_L$ 为1.32 MPa。

表 4 等温吸附数据

煤样编号	压力 /MPa	吸附体积 /m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup>	煤样编号	压力 /MPa	吸附体积 /m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup>	煤样编号	压力 /MPa	吸附体积 /m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup>	煤样编号	压力 /MPa	吸附体积 /m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup>
	0	0		0	0		0	0		0	0
	0.851 6	10.896 7		0.731 6	9.806 7		0.906 5	8.862 5		0.857 8	8.970 7
	2.215 6	17.157 3		2.794 7	17.470 0		3.135 8	15.626 7		4.205 2	17.553 2
1-1 <sup>#</sup> -1	4.109 9	20.238 5	5 <sup>#</sup> -1	4.511 0	19.479 0	5 <sup>#</sup> -6	4.693 9	17.768 0	6 <sup>#</sup> -4	5.531 6	19.363 6
	4.713 7	20.214 0		5.134 3	20.345 6		5.379 0	18.467 0		5.708 0	19.300 1
	4.770 2	20.333 2		5.287 7	20.438 2		5.566 4	18.940 0		5.787 2	19.780 0
	5.194 4	20.923 3		5.575 4	21.001 0		5.785 0	19.536 9		5.866 4	20.260 0
	5.807 5	21.019 9		6.035 6	21.527 9		6.044 6	19.848 8		6.151 6	20.792 8
	0	0		0	0		0	0		0	0
	1.038 1	8.174 7		1.027 1	6.074 7		0.927 0	8.405 9		0.859 8	8.536 0
	4.169 8	14.229 3		4.264 1	13.622 8		3.865 5	15.794 4		2.881 0	14.103 1
2-2 <sup>#</sup> -1	4.497 7	15.001 0	5 <sup>#</sup> -2	5.416 1	15.526 7	5 <sup>#</sup> -7	5.390 7	17.694 8	6 <sup>#</sup> -5	4.596 0	16.237 1
	5.606 6	15.989 2		5.600 7	16.062 8		5.568 0	18.031 1		5.246 3	17.108 4
	5.634 7	16.553 2		5.785 1	16.480 8		5.598 1	18.404 8		5.538 5	17.560 5
	5.807 6	16.819 6		6.089 1	16.863 4		5.804 8	18.733 6		5.990 7	18.052 5
	6.116 5	17.023 1					6.227 7	19.134 5			
	0	0		0	0		0	0		0	0
	0.916 2	9.054 2		0.909 3	8.564 6		0.929 2	8.974 8		0.895 1	8.407 0
	4.079 9	16.480 4		1.933 0	14.087 8		3.036 3	14.577 3		3.955 5	14.993 7
2-2 <sup>#</sup> -2	5.241 2	18.415 9	5 <sup>#</sup> -3	2.694 8	15.567 0	6 <sup>#</sup> -1	4.611 2	17.363 3	7 <sup>#</sup> -1	5.220 6	16.001 6
	5.526 7	18.901 9		3.476 7	17.305 7		5.252 1	18.498 5		5.272 4	16.379 8
	5.660 3	19.333 5		4.524 0	18.220 5		5.416 8	18.574 4		5.334 6	16.754 3
	5.803 0	19.515 0		5.749 5	19.638 2		5.691 5	19.094 7		5.899 8	16.819 5
	6.097 9	19.873 9		6.194 1	19.974 5		6.021 1	19.600 9		6.197 6	16.714 5
	0	0		0	0		0	0		0	0
	0.879 2	10.775 9		0.951 9	5.591 4		0.835 3	11.338 0			
	2.951 2	17.734 7		2.095 2	8.182 0		2.809 3	19.258 5			
2-2 <sup>#</sup> -3	4.454 5	20.234 2	5 <sup>#</sup> -4	3.315 8	9.978 8	6 <sup>#</sup> -2	4.572 4	20.749 0			
	5.101 4	20.655 6		4.505 2	10.644 1		5.170 0	21.487 7			
	5.420 0	21.386 6		5.526 8	10.868 5		5.511 6	21.962 5			
	5.589 3	21.750 5		5.930 0	11.214 6		5.635 0	22.157 8			
	6.007 4	22.336 5		6.156 3	11.504 9		5.825 1	22.571 7			
	0	0		0	0		0	0			
	1.041 0	9.749 9		0.942 3	7.813 4		0.951 9	5.591 4			
	2.840 5	16.058 3		4.239 1	16.030 8		2.095 2	8.182 0			
2-2 <sup>#</sup> -4	4.331 5	18.077 0	5 <sup>#</sup> -5	5.447 2	17.315 7	6 <sup>#</sup> -3	3.315 8	9.978 8			
	5.086 0	18.905 6		5.730 2	17.704 2		4.505 2	10.644 1			
	5.436 0	19.625 0		5.769 0	18.541 0		5.526 8	10.868 5			
	5.620 0	19.804 0		5.863 4	18.751 5		5.930 0	11.214 6			
	6.107 4	20.124 2		6.165 5	19.254 8		6.156 3	11.504 9			

## 4 影响因素分析

### 4.1 埋深

埋深是影响煤储层吸附能力的重要因素之一,研究区内煤储层孔隙度与 $V_L$ 均随埋深的增大而增大(图2),表明随埋深增大,煤储层孔隙度增大、吸附空间增大、煤储层的吸附能力也增强<sup>[20]</sup>。

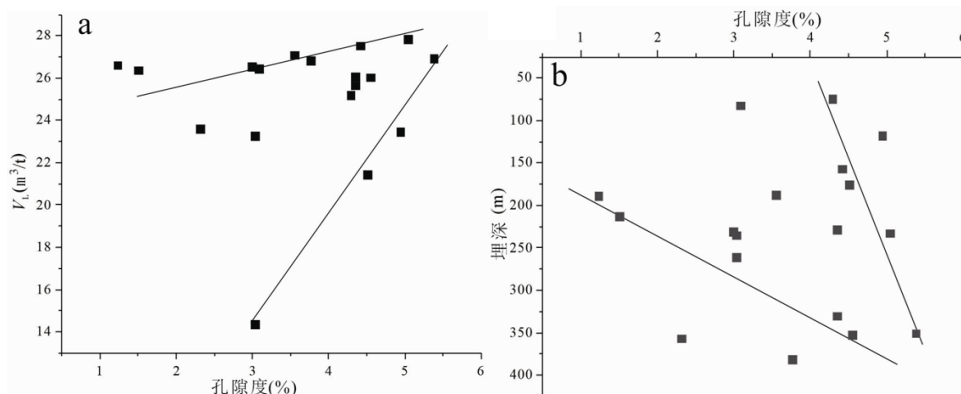


图 2 \$V\_L\$与孔隙度、埋深与孔隙度的关系

另一方面,埋深还可以通过影响储层压力从而进一步影响煤储层的吸附能力.储层压力随埋深的增大而增大,压力的增大会增加单位空间内CH<sub>4</sub>分子与煤体碰撞的概率,进而增大煤储层对CH<sub>4</sub>的饱和吸附量.

此外,埋深还可以通过影响煤储层温度,从而进一步影响煤储层的吸附能力.随着埋深的增加,研究区煤储层温度逐渐增大(图3),地温梯度约为3 °C/100 m.随温度的升高煤储层吸附能力逐渐降低,CH<sub>4</sub>分子活性增强,不易被煤体吸附,已被煤体吸附的气体分子在温度升高时易获得动能,增加分子间作用力断裂的机会,发生脱附现象,导致吸附量降低,因此温度越高煤储层的吸附能力越低<sup>[21]</sup>.

埋深可通过影响孔隙度、储层压力和温度等多种因素影响煤储层的吸附能力,其中孔隙度和储层压力与储层吸附能力之间为正效应,即在孔隙度增大、煤储层压力升高时,煤储层的吸附能力会增强;温度与储层吸附能力之间为负效应,在温度升高时,煤储层的吸附能力会降低.随埋深增大,研究区孔隙度增大、储层压力增大、储层温度升高,最大吸附量增大(图4),表明孔隙度和储层压力增大对吸附能力的正效应大于温度升高的负效应.

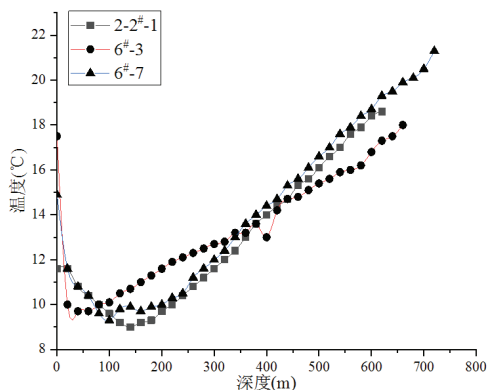


图 3 温度随埋深的变化规律

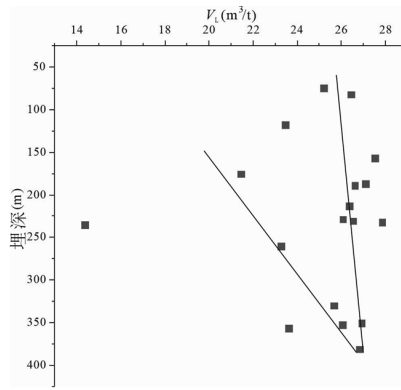


图 4 \$V\_L\$与埋深之间的关系

### 4.2 煤阶

前人研究发现\$V\_L\$随煤阶的增大呈先减小后增大的趋势:0.5% < \$R\_{O,max}\$ < 1.2%时,吸附量随煤变质程度增高而呈下降趋势; \$R\_{O,max}\$ > 1.2%时,吸附量随煤变质程度升高而增大.研究区内煤储层镜质组反射率介于0.82%~1.32%之间, \$V\_L\$随镜质组反射率的增大整体呈先减小后增大的趋势(图5),拐点出现在\$R\_{O,max}\$=1.2%左右,符合前人研究规律;储层孔隙度随镜质组反射率的增大整体也表现为先减小后增大的规律,同\$V\_L\$与镜质组反射率之间的规律一致,也表明\$V\_L\$与孔隙度之间为正相关,与前文研究结果一致.

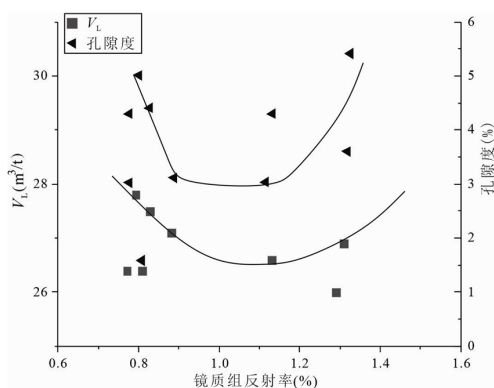


图 5 \$V\_L\$及孔隙度与镜质组反射率的关系

### 4.3 显微煤岩组分

$V_L$ 随着镜质组含量的增大而增大,随着惰质组含量的增大而减小(图6). 镜质组的主要成分是凝胶状物质,是由植物中的木质纤维素在还原条件下经过凝胶化作用形成的;壳质组成分是由植物皮质部、花粉、孢子还有其他化学活性较稳定的分泌物,在没有发生质的改变下形成的;惰质组是植物遗体经过丝炭化作用的产物,植物遗体在氧化条件下经氧化作用导致脱水、脱氢,从而含炭量相对升高,还经历了较大程度的芳烃化和缩合作用. 由于各组分形成时所经历的化学作用不同,所以各组分中的化学成分、分子结构及孔隙结构之间都存在较大差异,经历的化学作用不同,各组分之间植物遗体的保存程度也不相同. 煤在变质过程中各组分含量不同,从而产生的烃类物质和挥发性物质含量也不同. 导致各组分之间孔隙度不同,因此各显微组分之间吸附气体的能力也有较大差异,镜质组在变质过程中有更多的挥发物质产出,从而导致微孔增多,吸附能力增强,故镜质组吸附能力大于惰质组,表现为煤岩显微组分中镜质组含量越高、煤储层的吸附能力越强.

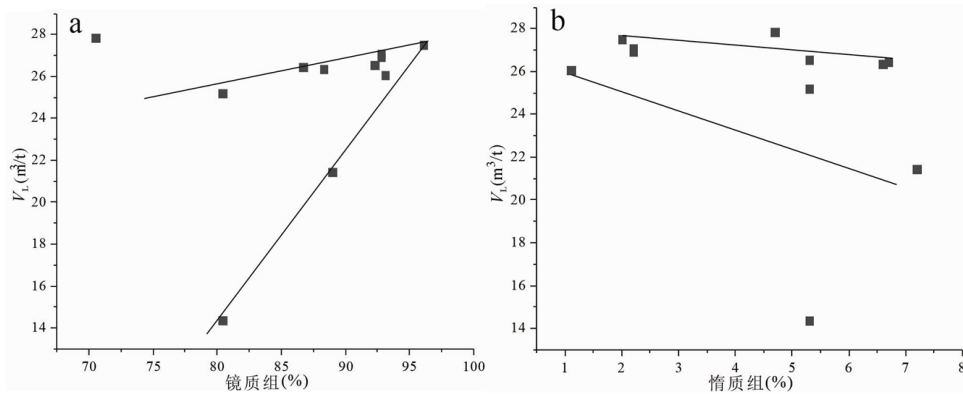


图6  $V_L$ 与镜质组及惰质组的关系

### 4.4 煤质

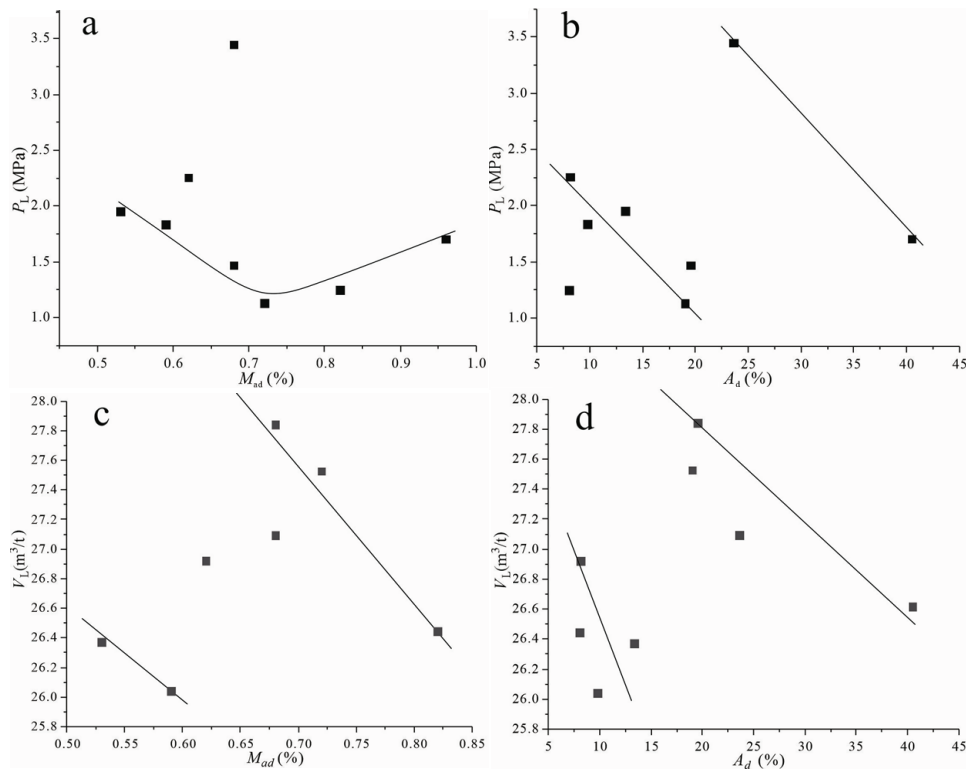


图7  $V_L$ 和 $P_L$ 与水分、灰分产率的关系

$P_L$ 和 $V_L$ 均随水分产率的增大而减小(图7a、图7c). 在低阶煤中水分产率较多时会占据煤中孔隙,使得吸附空间减小,煤孔隙表面提供给 $CH_4$ 分子可供附着的有效面积是有限的,煤中水分含量越高,水分子占据的可

供 $\text{CH}_4$ 分子吸附的有效吸附点位越多,从而留给 $\text{CH}_4$ 分子吸附的有效点位减少,导致煤的饱和吸附量降低.并且煤基质与被吸附气体分子之间的作用力是范德瓦耳斯力与氢键,其中煤基质与水分子和 $\text{CH}_4$ 分子之间的作用力中都含有范德瓦耳斯力,虽然煤基质与 $\text{CH}_4$ 分子间的范德瓦耳斯力比其与水分子间的范德瓦耳斯力更大,但煤的大分子结构与水分子之间还存在氢键的作用力,且煤与水分子之间氢键的作用力要大于煤基质与 $\text{CH}_4$ 分子间的范德瓦耳斯力,所以水分子要比 $\text{CH}_4$ 分子更容易吸附到煤孔隙表面,从而降低煤吸附 $\text{CH}_4$ 的能力.同时因为水分产率增大导致吸附空间减小,从而 $V_L$ 减小,由于吸附量的降低会导致煤的吸附速率增加,从而 $P_L$ 减小.

$P_L$ 和 $V_L$ 均随灰分产率的增大而减小(图7b、图7d).煤中灰分是指煤完全燃烧后剩下的残渣,来自煤岩中的矿物质.前人研究了煤中矿物与煤储层吸附能力之间的关系,发现煤中矿物增加会导致煤储层的吸附能力降低,每当煤中灰分产率增加1%, $V_L$ 就降低 $0.16 \text{ m}^3/\text{t}$ .灰分的主要成分是无机物,相比有机组分,无机物对 $\text{CH}_4$ 的吸附能力相对更弱,并且煤中灰分的存在会占据一部分孔隙表面积,使得煤孔隙吸附 $\text{CH}_4$ 的有效点位减少,进一步使得煤储层的吸附能力下降<sup>[22]</sup>.并且灰分的存在会影响煤表面气体的解吸和吸附作用,从而使 $P_L$ 发生变化,所以当矿物含量增高时 $P_L$ 减少.

## 5 结论

(1) 研究区煤层 $R_{O,\max}$ 介于 $0.82\% \sim 1.32\%$ 之间,变质程度较低,属于气煤~焦煤;显微煤岩组分以有机组分为主,占 $66.0\% \sim 99.1\%$ ,有机组分以凝胶物质为主,镜质组含量占 $57.2\% \sim 98.6\%$ ,惰质组含量占 $0.5\% \sim 10.6\%$ ,壳质组含量占 $1.0\% \sim 2.9\%$ ;无机质占 $0.9\% \sim 34.0\%$ ,以粘土类为主、碳酸盐次之,硫化物和氧化物含量较少;研究区内各煤层 $M_{ad}$ 产率平均值在 $0.53\% \sim 1.12\%$ 之间; $A_d$ 产率平均值在 $8.02\% \sim 23.58\%$ 之间,属中~高灰煤; $V_{daf}$ 产率平均值在 $28.77\% \sim 43.73\%$ 之间,属中挥发分煤.

(2) 研究区煤储层 $V_L$ 介于 $14.37 \sim 27.84 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间,且主要集中在 $22.00 \text{ m}^3/\text{t}$ 左右,平均 $V_L$ 为 $25.07 \text{ m}^3/\text{t}$ ,具有较强的吸附能力; $P_L$ 介于 $1.14 \sim 3.45 \text{ MPa}$ 之间,平均为 $1.77 \text{ MPa}$ .

(3) 研究区煤储层吸附能力随煤阶的增大先减小后增大,与镜质组含量呈正相关,与惰质组含量、水分产率、灰分产率呈负相关.

(4) 埋深可通过影响孔隙度、储层压力和温度等因素影响煤储层的吸附能力,其中:孔隙度和储层压力对储层吸附能力具有正效应;温度对储层吸附能力具有负效应;研究区孔隙度和储层压力增大对吸附能力的正效应大于温度升高的负效应.

## 参考文献:

- [1] 李夏伟,刘大锰,蔡益栋,等.高煤级煤储层含水性特征及其对吸附能力的影响[J].地学前缘,2018,25(4):237-244.
- [2] 赵兴龙.沁水盆地南部煤储层精细描述及物性主控因素分析[D].北京:中国地质大学,2011.
- [3] 朱瑞静,穆满根,荆丽波,等.我国煤层气开发现状及展望[J].能源与环境,2020,4:24-45.
- [4] 贾小宝.大宁-吉县地区深部煤储层物性特征研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [5] 张永强,韩志雄,薛海军,等.西南典型矿区煤等温吸附/解吸影响因素研究[J].煤炭工程,2019,51(6):18-23.
- [6] 冯松宝,刘瑞,余磊.煤吸附甲烷能力影响因素分析[J].科技创新与应用,2015,9:32-33.
- [7] 李永太,李辰,张建国,等.低渗透裂缝油藏生产曲线特征及提高采收率技术研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2016,33(4):438-443.
- [8] 钟玲文.煤的吸附性能及影响因素[J].地球科学,2004,3:327-332+368.
- [9] 朱学申,吕玉民,王存武,等.沁南柿庄地区高煤阶煤储层吸附性及其影响因素[J].煤炭技术,2020,39(3):121-124.
- [10] 张凯,汤达祯,陶树,等.不同变质程度煤吸附能力影响因素研究[J].煤炭科学技术,2017,45(5):192-197.
- [11] BUSTIN R M, CLARKSON C R. Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 38(1): 3-26.
- [12] 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,2005,1:19-21+205-206.
- [13] 傅雪海,秦勇,薛秀谦,等.煤储层孔、裂隙系统分形研究[J].中国矿业大学学报,2001,3:11-14.
- [14] 崔洪庆,李祝.艾维尔沟矿区瓦斯地质规律研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2011,30(6):668-673.
- [15] 丁艳.新疆艾维尔沟矿区煤层气资源浅析及评价[J].科技成果纵横,2010,1:34-35.
- [16] 孙永娟.新疆艾维尔沟侏罗纪盆地的沉积学分析及与准噶尔侏罗纪盆地演化的对比[D].西安:长安大学,2007.