



潞安矿区煤层气井产出水地球化学特征及意义

华明国 田林 张燕 李佳 曹永恒

引用本文:

华明国, 田林, 张燕, 等. 潞安矿区煤层气井产出水地球化学特征及意义[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(2): 65–71.

HUA Mingguo, TIAN Lin, ZHANG Yan, et al. Geochemical characteristics and significance of water produced by coalbed methane wells in Lu'an Mining Area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 65–71.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.06.0328>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

寺家庄井田陷落柱对煤层气井产出水地球化学特征的影响

Effect of karstic collapse column on hydrogeochemistry of produced water from coalbed methane wells in Sijiazhuang mine field
煤田地质与勘探. 2017, 45(2): 50–54 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.02.009>

保德地区煤层气地球化学特征及成因探讨

Geochemical characteristics and genesis of coalbed methane in Baode area
煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 133–141,151 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.017>

阳泉矿区寺家庄井田太原组煤层气地球化学特征及成因

Genesis and geochemical characteristics of coalbed methane from Taiyuan Formation in Sijiazhuang mine field of Yangquan mining area
煤田地质与勘探. 2019, 47(3): 91–96 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.03.015>

沁水盆地南部潘庄区块废弃矿井煤层气地球化学特征及成因

Origin and geochemical characteristics of coalbed methane in abandoned coal mines, Panzhuang block, southern Qinshui basin
煤田地质与勘探. 2019, 47(6): 67–72,77 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.011>

鄂尔多斯盆地兴县地区煤层气地球化学特征及成因

Geochemical characteristics and their origin of CBM in Xingxian area, Ordos basin
煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 156–164,173 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.022>

煤层气开发中煤粉产出机理及管控措施

The output mechanism and control measures of the pulverized coal in coalbed methane development
煤田地质与勘探. 2018, 46(2): 68–73 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.02.011>



移动阅读

华明国, 田林, 张燕, 等. 潞安矿区煤层气井产出水地球化学特征及意义[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(2): 65–71. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.06.0328

HUA Mingguo, TIAN Lin, ZHANG Yan, et al. Geochemical characteristics and significance of water produced by coalbed methane wells in Lu'an Mining Area[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(2): 65–71. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.06.0328

潞安矿区煤层气井产出水地球化学特征及意义

华明国¹, 田林², 张燕¹, 李佳², 曹永恒³

(1. 潞安化工集团有限公司, 山西 长治 046200; 2. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003;
3. 焦作市非常规天然气开发工程技术研究中心, 河南 焦作 454003)

摘要: 水文地球化学分析是研究煤层气富集条件及开采动力条件的重要方法。以沁水盆地中南段潞安矿区山西组 3 号煤煤层气井产出水为研究对象, 开展了矿化度、H/O 稳定同位素和主要离子浓度分布特征研究, 结合区域构造展布特征及煤层气开发历史分析了区内煤层气开发优选区。结果表明: (1) 潞安矿区分布有 3 个高矿化度区(五阳井田、余吾西南部、高河北部–古城井田), 地下水平均矿化度 2 000~3 200 mg/L; 1 个低矿化度区域(常村井田和余吾井田中东部), 地下水平均矿化度 1 500 mg/L。(2) 煤层产出水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均落在该区大气降水线附近, 表明该区各含水层均有来自大气降水的补给, 且煤层中的水主要来源于大气降水。(3) 潞安矿区地表水从东部太行山裸露岩层区向下运移至含煤地层和下部奥陶系含水层, 而后在灰岩系中向东出露地表, 补给辛安泉域。研究区内两条区域断层文王山断层和二岗山断层是开放性导水断层, 为地下水运移提供了通道, 其展布特征决定了地下水的基本流动规律, 其控制区域内的煤层气含量较低; 地下水在挤压性断层中华–安昌断层附近、天仓向斜和许村向斜轴部相对滞流, 矿化度较高, 是煤层气富集区, 也是潞安矿区煤层气开发的优选区。

关键词: 煤层气; 水文化学; 构造控制; 潞安矿区

中图分类号: TE132 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2022)02-0065-07

Geochemical characteristics and significance of water produced by coalbed methane wells in Lu'an Mining Area

HUA Mingguo¹, TIAN Lin², ZHANG Yan¹, LI Jia², CAO Yongheng³

(1. Lu'an Chemical Group Co., Ltd., Changzhi 046200, China; 2. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. Unconventional Gas Development Engineering Research Center of Jiaozuo, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Hydro-geochemistry analysis is an important method for CBM exploration and development research. In this paper, the distribution characteristics of salinity, H/O stable isotope and ion concentration in sample water was investigated, and the optimal CBM development area was analyzed by the characteristics of regional structural distribution and the CBM development history. The testing water was from the No.3 CBM well of the Shanxi Formation Permian system in the Lu'an Mining area in the south-central part of Qinshui Basin. The results show that there are three high salinity areas in the mining area, with an average groundwater salinity of 2 000-3 200 mg/L, including Wuyang Minefield, south-western Yuwu, and northern Gaohe-Gucheng Minefield. And there is a low salinity area in Changcun minefield and east-central Yuwu Minefield, with an average groundwater salinity of about 1 500 mg/L. The δD and $\delta^{18}O$ of testing water are close to the atmospheric precipitation line in the research area, indicating that all aquifers are supplied by atmospheric precipitation, and the water in the coal seam mainly comes from atmospheric precipitation. It also shows that the surface water in Lu'an Mining Area moves downward from the exposed rock stratum of Taihang Mountain in the east to the coal-bearing stratum and the lower Ordovician aquifer, and then exposes eastward in the limestone series to supply the Xin'an spring area. The Wenwangshan Fault and Ergangshan Fault are open water-conducting faults, providing chan-

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-09-22

基金项目: 国家科技重大专项课题(2016ZX05067-006)

第一作者: 华明国, 1981 年生, 男, 江苏扬州人, 博士, 高级工程师, 从事煤矿安全技术研究. E-mail: huamingguo_0418@163.com

通信作者: 田林, 1986 年生, 男, 河南焦作人, 博士, 副教授, 从事煤层气地质及开发技术研究. E-mail: lintian@hpu.edu.cn

nels for groundwater migration. Their distribution characteristics determine the basic flow law of groundwater, with lower gas content in the area. There are three groundwater retention areas with higher salinity, including Zhonghua-Anchang fault, Tiancang syncline and Xucun syncline. They are not only gas enrichment areas, but also preferred areas for CBM development.

Keywords: coalbed methane; hydro-geochemistry; structural control; Lu'an Mining Area

潞安矿区煤层气开发始于 1997 年,自“十二五”开始进入规模化开发阶段,在 13 个高瓦斯矿井累计实施地面煤层气井超过 1 000 口,先后试验了活性水压裂、氮气泡沫压裂、氮气伴注活性水压裂及酸化压裂等多种增产工艺。潞安矿区煤层气最高产量出现在余吾井田,达到 3 400 m³/d,在高河、古城、五阳等井田也有产量超过 1 000 m³/d 的井零星出现,但整体上,全区的煤层气井产量较低,平均 300~500 m³/d。主要原因是,潞安矿区地质条件复杂,储层压力低、渗透率低、含气饱和度低,且低压和低渗相互作用,为煤层气增产高效开发带来了严峻挑战。

现代地下水动力条件与煤层气聚散特征密切相关,一方面是制约煤层气成藏效应的关键要素之一,另一方面影响到煤层气产出驱动力的高低^[1-2]。煤层气井产出水在不断径流过程中与煤层及围岩发生各种物理、化学和生物作用,产出水的组成和性质蕴藏了丰富的地球化学信息^[3],因此,在大部分盆地中,地下水的离子含量可直接反映离子交换、运移、流过的介质以及地下水排泄过程^[4-5]。在含气系统地下水汇流的地区,煤储层能量积聚,煤层气富集,具有形成高压煤储层的水文地质条件。因此,研究地下水中离子的变化特征对指导煤层气勘探、测试和开发具有重要意义^[6-7]。

目前,人们对煤层气井产出水地球化学特征进行了大量研究,集中阐明了矿化度^[8]、常规离子^[9-10]、微量元素^[11-12]和 H/O 同位素^[13-15]等的成因机理,对煤层气勘探开发起到了一定推动作用。但是,针对沁水盆地中南段潞安矿区复杂断层-褶皱带条件下的煤层气井产出水地球化学特征研究较少。

潞安矿区煤储层的低压特征与煤层埋深和底板高程具有线性相关性,影响煤储层压力区域性分布规律的控制性地质因素是辛安泉域地下水流程。鉴于煤层气水文地质条件分析伴随煤层气成藏、运移及产出的全过程,且煤层气井产出水的地化特征对区域水文地质条件具有重要指示作用,笔者通过分析潞安矿区山西组 3 号煤层中地层水的化学特征,拟合并印证潞安开发区中煤层气的富集区域,为下阶段研究区煤层气开发的宏观布置及排采提供了理论依据。

1 潞安矿区地质概况

1.1 含煤地层及地质构造

石炭-二叠系是潞安矿区的主要含煤地层,主要由

碳酸盐岩、各类碎屑岩和煤层组成,平均厚度约 158.74 m。其中石炭-二叠系太原组 103.6 m^[16],二叠系山西组 51.15 m。山西组下部的 3 号煤层为中高变质程度的贫-瘦煤,厚度约 6 m,是该地区目前煤层气开发的主力煤层。

潞安矿区位于沁水盆地中南部,整体为一单斜构造,走向 NE-SN,倾向西,地层倾角 5°~10°。矿区面积约 3 044 km²,主要包括北部五阳井田,中部的常村井田、余吾井田、古城井田,南部的高河井田和李村井田六大主力生产矿井。北部以西川断层为界,南部以庄头断层为界,东部边界为太原组 15 号煤层露头,西部边界为人为划定的 15 号煤 1 500 m 埋深线(图 1)。预测全矿区煤层气资源量 3.347×10¹¹ m³,是我国大型煤层气田之一。煤矿开采中大量生产数据显示,五阳井田、古城井田和高河井田北部瓦斯含量较其他区域偏高,属于煤层气开发的甜点区域。

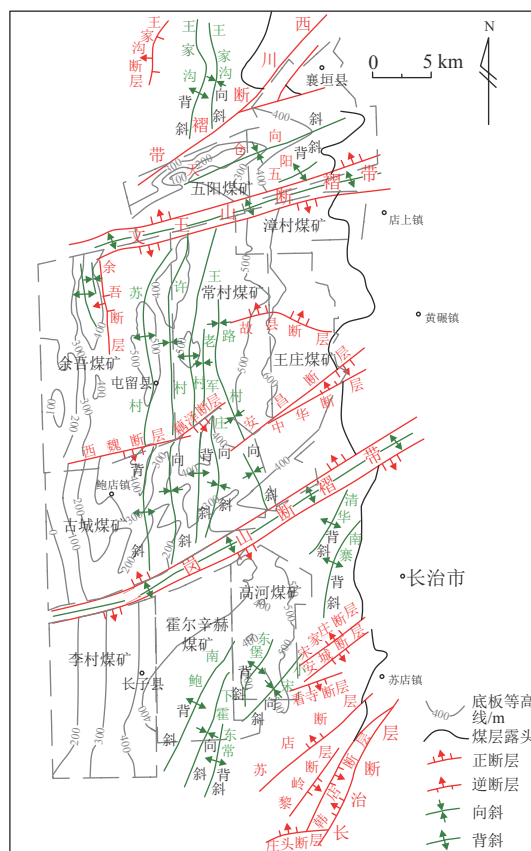


图 1 潞安矿区构造纲要

Fig.1 Structure map of Lu'an Mining Area

矿区内自南向北依次发育庄头断层、看寺断层、二岗山断层、西魏断层、藕泽断层、安昌断层、文王山

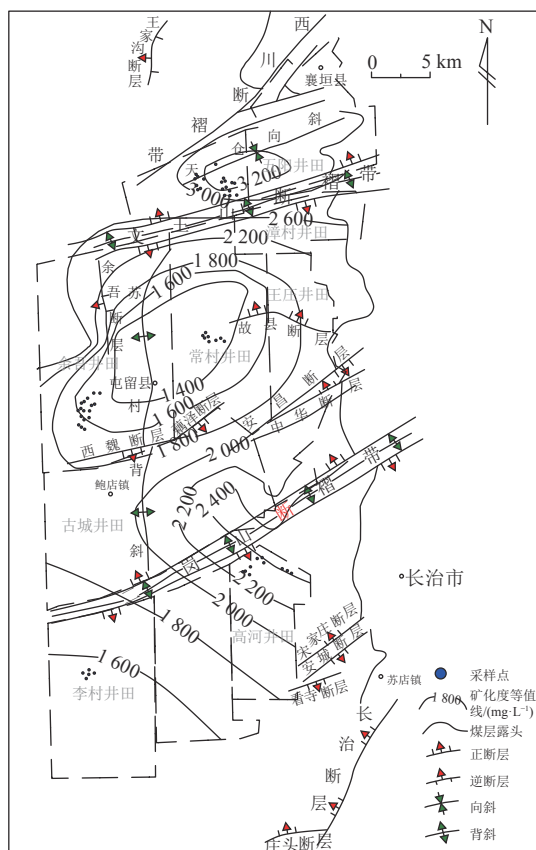


图 3 潞安矿区 3 号煤储层水矿化度等值线
Fig.3 Contour map of water salinity in No.3 coal seam

降低,说明地下水来自天仓向斜以北,并向南部的文王山断层流动。余吾井田西部分布第 2 个高矿化区,向余吾井田东部和常村井田方向矿化度逐渐降低,说明地下水可能从文王山断层和常村井田向西流动,在余吾西部形成 1 个滞流区域,矿化度低于五阳井田。常村井田内的低矿化度区是潞安矿区中最低的,可能处于中段水文地质单元的径流区,地下水从东向西流动。位于二岗山断层以南的高河井田和李村井田,在高河井田东北部形成第 3 个高矿化度区,该区域与北部的古城井田连成一片,矿化度低于余吾西部,而在断层带附近为高矿化度区,说明二岗山断层可能为封闭且不导水断层,与中华-安昌断层类似。

2.2.2 H/O 同位素

同位素水文地球化学分析是研究地下水在时间和空间上演化规律的重要方法。为研究潞安矿区 3 号煤层产出水的稳定同位素特征,分别测试了该地区地表水和 3 号煤层顶板水样的 H/O 同位素。测试结果见表 3。由表中可知,地表水的 $\delta D = -63.55\text{‰}$, $\delta^{18}O = -8.85\text{‰}$, 3 号煤层产出水的 δD 为 $-84.2\text{‰} \sim -71.6\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-12.9\text{‰} \sim -10.9\text{‰}$, 3 号煤层顶板水的 $\delta D = -81.1\text{‰}$, $\delta^{18}O = -10.5\text{‰}$ 。

大气降水的 H/O 同位素组成具有很强的规律性,全球大气降水的 δD 值平均 -22‰ , $\delta^{18}O$ 值为 -4‰ ,二者服

表 3 试验水样 H/O 同位素测试成果
Table 3 H/O isotope test results of water samples

区域	水样号	$\delta^{18}O/\text{‰}$	$\delta D/\text{‰}$
		最小~最大值/平均值	
地表水	1	$-9.2 \sim -8.5/-8.9$	$-68.2 \sim -58.9/-63.6$
3号煤层顶板	2	$-11.3 \sim -9.8/-10.5$	$-81.9 \sim -80.2/-81.1$
	WY3	$-11.5 \sim -9.0/-10.2$	$-76.5 \sim -71.6/-74.9$
	WY4	$-11.2 \sim -8.4/-9.8$	$-75.9 \sim -74.3/-75.5$
	CC5	$-12.1 \sim -10.1/-11.1$	$-84.2 \sim -81.3/-83.2$
3号煤层	CC6	$-11.4 \sim -10.4/-10.9$	$-85.3 \sim -83.5/-84.1$
	CC7	$-12.9 \sim -11.7/-12.5$	$-83.8 \sim -82.8/-83.5$
	CC8	$-12.8 \sim -10.1/-12.4$	$-84.2 \sim -83.5/-83.9$
	YW9	$-11.7 \sim -10.7/-11.2$	$-81.6 \sim -80.2/-81.1$
	YW10	$-10.9 \sim -10.5/-10.8$	$-82.4 \sim -80.5/-81.6$
平均值		-11.11	-80.98

从 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$, 称为“全球大气降水线(Global Meteoric Water Line, GMWL)”^[21]。而潞安矿区大气降水监测站的统计结果表明,该区域的大气降水方程为: $\delta D = 8.18\delta^{18}O + 10.5$ ^[22]。将本次实验中各采样点的数据与全球大气降水线和辛安泉域降水线作对比,发现本次实验采集的地表水和地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 均落在大气降水线附近(图 4),这说明潞安矿区 3 号煤层产出水的补给来源是大气降水。

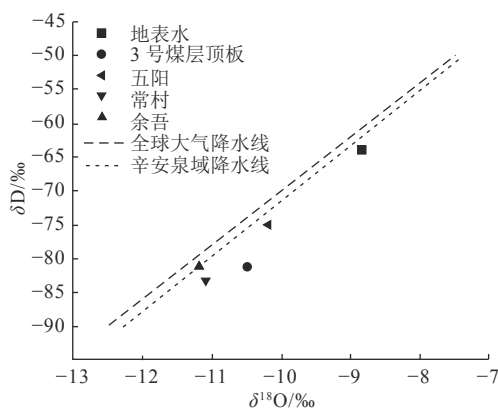


图 4 研究区 H/O 同位素分布曲线
Fig.4 The H/O isotope distribution in research area

2.2.3 离子浓度

不同岩石(如碳酸岩、蒸发岩、硅酸岩)风化可溶解释放出不同的阴阳离子。例如碳酸岩、蒸发岩、硅酸岩的风化可溶解稀释出 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 蒸发岩的溶解和硅酸岩的风化可溶解释放出 Na^{+} 和 K^{+} , 碳酸岩和硅酸岩的风化可溶解稀释出 HCO_3^{-} , 而蒸发岩的风化可溶解稀释出 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} ^[23-24]。采用试剂滴定方法,对采集的 59 组样品进行了主要离子浓度测试分析,结果见表 4。

利用 Piper 三线图进行水样分类和水体总化学性

表 4 潞安矿区 3 号煤层主要离子浓度测试结果
Table 4 Test results of main ion concentration of water samples from No. 3 coal seam of Lu'an Mining Area

矿区	pH	电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	主要离子质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)						
				K^{+}	Na^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}
五阳	8.543	0.580 0	4 117.1	12.60	462.39	6.71	2.100	434.63	1 185.16	66.200
余吾	8.411	0.501 0	3 071.8	17.78	850.24	50.51	32.830	942.04	630.96	34.270
常村	8.597	0.158 0	1 119.8	14.33	393.75	4.62	1.712	279.35	430.26	9.180
李村	8.954	0.188 1	1 340.1	16.59	290.95	3.80	1.430	349.97	535.83	19.604
高河	8.710	0.291 8	2 071.0	11.24	232.51	4.98	1.930	298.65	573.15	9.029
平均	8.642	0.344 0	2 344.0	14.51	445.97	14.12	8.000	460.93	671.07	31.441

质分析,利用阴阳离子浓度表示水体的相对成分。由图 5 可知,五阳矿区煤层气井产出水位于Ⅱ区,属于 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Na}^{+}$ 型水,显示为深层地下水的水质。余吾井田水质类型与其他水样的水质明显不同,地层产出水位于 Piper 图的右上部位,属于Ⅲ区,也处于Ⅱ区内,为 $\text{HCO}_3^{-}\cdot\text{Cl}^{-}\text{-Na}^{+}$ 型水。常村、李村、高河矿区位于Ⅱ区和Ⅲ区的分界处,特征离子不明显,在图上的位置彼此靠近,水质类型为 $\text{HCO}_3^{-}\cdot\text{Cl}^{-}\text{-Na}^{+}$ 型水,可能属于混合水水质(图 5)。

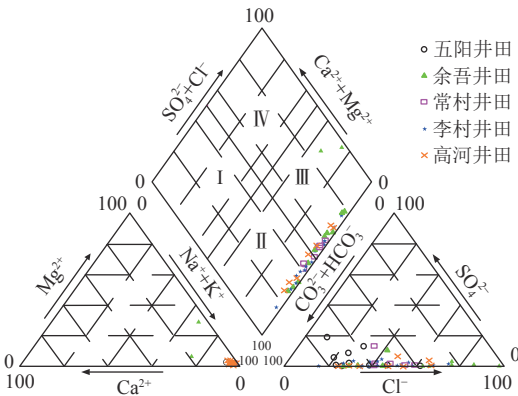


图 5 潞安矿区 3 号煤层水化学 Piper 图
Fig.5 Hydrochemical Piper map of coal water samples from No. 3 coal seam of Lu'an Mining Area

2.3 水化学特征的构造控制作用分析

潞安矿区具有东西分带、南北分段的构造特征。潞安矿区位于沁水复式向斜东翼宽缓单斜上,向西以地层倾角 $3^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 缓倾斜,其上发育一系列走向 NE 和近 SN 向褶皱,埋深自东向西增加。煤层气含量一般随煤层埋深的增加而增加,这也是潞安矿区煤层气开发有利区东西向分带的重要基础。其次,北部文王山和南部二岗山 NEE 向断层系将矿区分为北、中、南 3 段。北段为五阳井田,中段为常村、余吾、古城井田,南段为高河、李村井田。在中段南部发育有中华—安昌断层系。这一区域构造格局奠定了地下水的运移规律,并进一步影响煤层气的区域赋存规律。

(1) 潞安矿区地表水从东部太行山裸露岩层区向下运移至含煤地层和下部奥陶系含水层,而后在灰岩

系中向东出露地表,补给辛安泉域。两条区域断层文王山和二岗山断层控制为地下水运移提供了通道,地下水在岩系上部向西运移时,文王山断层是良好通道;而后地下水向东出露地表时,二岗山断层系是主要通道。

(2) 研究区内 2 个区域断层的开放性导水特征导致其附近煤层气含量降低,远离断层带,煤层气含量升高;地下水在挤压性断层中华—安昌断层附近、天仓向斜和许村向斜轴部相对滞流,矿化度较高,是煤层气富集区,也是潞安矿区煤层气开发的优选区。

3 结论

a. 煤层产出水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均落在该区大气降水线附近,表明该区各含水层均有来自大气降水的补给,且煤层中的水主要来源于大气降水;矿区内分布有 3 个高矿化度区,分别位于五阳井田、余吾西南部、高河北部—古城井田,平均矿化度 $2\ 000\sim 3\ 200\ \text{mg/L}$; 1 个低矿化度区域,位于常村井田和屯留井田中东部,平均矿化度 $1\ 500\ \text{mg/L}$ 。

b. 研究区内文王山断层和二岗山断层的展布特征决定了地下水的基本流动规律,在向斜轴部及挤压断层附近往往形成滞流区,地下水矿化度增加,煤层气相对富集,是煤层气开发的优选区。

c. 矿化度和矿区构造特征表明,潞安矿区五阳井田、余吾西南部、高河北部—古城井田为该区煤层气开发的有利区,潞安矿区煤层气多年的开发实践也证明了这一点。

参考文献(References)

[1] 李洋冰,曾磊,胡维强,等. 保德地区煤层气地球化学特征及成因探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 133-141.
LI Yangbing, ZENG Lei, HU Weiqiang, et al. Geochemical characteristics and genesis of coalbed methane in Baode area[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 133-141.
[2] 李忠城,吴建光,王建中,等. 沁水盆地南部 15 号煤层和顶板 K_2 灰岩水文地球化学演化特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 75-80.

- LI Zhongcheng, WU Jianguang, WANG Jianzhong, et al. Hydro-geochemical evolution of No.15 coal seam and limestone K₂ in southern Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(3): 75–80.
- [3] 杨兆彪, 吴丛丛, 朱杰平, 等. 中国煤层气井产出水地球化学研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 110–117.
- YANG Zhaobiao, WU Congcong, ZHU Jieping, et al. Research progress on produced water geochemical from CBM wells in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 110–117.
- [4] 于振锋, 郝春生, 杨昌永, 等. 阳泉矿区寺家庄井田太原组煤层气地球化学特征及成因[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(3): 91–96.
- YU Zhenfeng, HAO Chunsheng, YANG Changyong, et al. Genesis and geochemical characteristics of coalbed methane from Taiyuan Formation in Sijiazhuang mine field of Yangquan mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(3): 91–96.
- [5] 朱卫平, 唐书恒, 吕建伟, 等. 枣园区块煤层气井产出水化学特征及动态变化规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(1): 72–75.
- ZHU Weiping, TANG Shuheng, LYU Jianwei, et al. The characteristics and dynamic changes of produced water from coalbed methane wells in Zaoyuan block[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(1): 72–75.
- [6] 常园, 董琪. 地下水与煤层气相互关系研究进展[J]. *中外能源*, 2017, 22(9): 79–84.
- CHANG Yuan, DONG Qi. Research progress on relationship between groundwater and coalbed methane[J]. *Sino-Global Energy*, 2017, 22(9): 79–84.
- [7] 梁雄兵, 程胜高, 宋立军. 煤层气勘探开发中的水污染分析及防治对策[J]. *环境科学与技术*, 2006(1): 50–51.
- LIANG Xiongbing, CHENG Shenggao, SONG Lijun. Water pollution and control in CBM exploration and development[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006(1): 50–51.
- [8] 张松航, 唐书恒, 李忠城, 等. 煤层气井产出水化学特征及变化规律: 以沁水盆地柿庄南区块为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(2): 292–299.
- ZHANG Songhang, TANG Shuheng, LI Zhongcheng, et al. The hydrochemical characteristics and ion changes of the coproduced water: Taking Shizhuangnan Block, south of the Qinshui Basin as an example[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(2): 292–299.
- [9] 唐书恒, 朱卫平, 李忠城, 等. 柳林区块煤层气井产出水特征及动态变化规律[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集, 厦门, 2011.
- [10] 菅笑飞, 唐书恒, 单帅强, 等. 沁水盆地潘庄区块煤层气井产出水水质分析[J]. *科技视界*, 2012(24): 49–52.
- JIAN Xiaofei, TANG Shuheng, SHAN Shuaiqiang, et al. Quality analysis of water produced from CBM wells of Panzhuang District in Qinshui Basin[J]. *Science & Technology Vision*, 2012(24): 49–52.
- [11] 吴丛丛, 杨兆彪, 秦勇, 等. 贵州松河及织金煤层气产出水的地球化学对比及其地质意义[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 1058–1064.
- WU Congcong, YANG Zhaobiao, QIN Yong, et al. Geochemical comparison and its geological significance of CBM produced water in the Songhe and Zhijin blocks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 1058–1064.
- [12] 郭晨, 秦勇, 王生全, 等. 基于煤层气合采井产出水微量元素动态的层间干扰判识: 以黔西比德—三塘盆地上二叠统为例[C]//中国煤炭学会瓦斯地质专业委员会学术年会论文集, 深圳, 2019.
- [13] 焦雯, 唐书恒, 张松航, 等. 煤层气井产出水离子及同位素演化特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12): 168–176.
- JIAO Wen, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Study on evolution characteristics of water ions and isotopes produced by coalbed methane wells[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12): 168–176.
- [14] 时伟, 唐书恒, 李忠城, 等. 沁水盆地南部山西组煤储层产出水氢氧同位素特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(2): 62–68.
- SHI Wei, TANG Shuheng, LI Zhongcheng, et al. Hydrogen-oxygen isotope characteristics of produced water from coal reservoir of Shanxi Formation in Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(2): 62–68.
- [15] 刘超, 冯国瑞, 曾凡桂. 沁水盆地南部潘庄区块废气矿井煤层气地球化学特征及成因[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(6): 67–72.
- LIU Chao, FENG Guorui, ZENG Fangui. Origin and geochemical characteristics of coalbed methane in abandoned coal mines, Panzhuang block, southern Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(6): 67–72.
- [16] 杨雯. 山西地块太原组含煤地层综合研究及石炭—二叠系界线划分[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- YANG Wen. Comprehensive study on coal bearing strata of Taiyuan Formation in Shanxi block and boundary division of Carboniferous-Permian[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2018.
- [17] 曹运兴, 柴学周, 刘同吉, 等. 潞安矿区山西组3号煤储层低压特征及控制因素研究[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(11): 2077–2085.
- CAO Yunxing, CHAI Xuezhou, LIU Tongji, et al. A research on low reservoir pressure of coal 3 of Shanxi Formation in Lu'an mining area, Qinshui Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(11): 2077–2085.
- [18] 白海波, 缪协兴, 冯梅梅. 潞安矿区新构造及其控水作用的研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2006, 23(4): 383–388.
- BAI Haibo, MIAO Xiexing, FENG Meimei. Research on the neotectonics and water controlling effect in Lu'an coal mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(4): 383–388.
- [19] 李贵娟. 定边县周台子地区地下水水化学演化规律研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- LI Guijuan. Study on the evolution of chemical composition of the water in the Zhoutaizi area in Dingbian County[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- [20] 黄望望, 姜春露, 陈星, 等. 淮南新集矿区主要充水含水层水化学特征及成因[J]. *地球与环境*, 2020, 48(4): 432–442.
- HUANG Wangwang, JIANG Chunlu, CHEN Xing, et al. Chemical characteristics and genesis of deep groundwater in the Xinji Mining Area[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(4): 432–442.
- [21] 连会青, 刘德民, 尹尚先. 水化学综合识别模式在矿井水源判别中的应用[J]. *煤炭工程*, 2012(8): 107–109.
- LIAN Huiqing, LIU Demin, YIN Shangxian. Application of hydrochemical comprehensive identification mode in mine water source discrimination[J]. *Coal Engineering*, 2012(8): 107–109.

- drochemistry comprehensive identification mode to distinguish mine water resources[J]. *Coal Engineering*, 2012(8): 107–109.
- [22] 张晓敏. 沁水盆地南部煤层气产出水化学特征及动力场分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- ZHANG Xiaomin. Chemical characteristics and dynamic field analysis of CBM produced water in the southern Qinshui Basin[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [23] 韩积斌. 尕斯库勒盐湖盆地水文系统中高浓度铀的迁移富集行为[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- HAN Jibin. Migration and enrichment of high concentration uranium in the hydrological system of Gas Hure Salt Lake, Qaidam Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [24] 覃小群, 蒋忠诚, 张连凯, 等. 珠江流域碳酸盐岩与硅酸盐岩风化对大气CO₂汇的效应[J]. *地质通报*, 2015, 34(9): 1749–1757.
- QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng, ZHANG Liankai, et al. The difference of the weathering rate between carbonate rocks and silicate rocks and its effects on the atmospheric CO₂ consumption in the Pearl River Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(9): 1749–1757.

(责任编辑 范章群 郭东琼)