

非常规天然气

沁水盆地柿庄南区块排采水特征 及其对煤层气富集的控制作用

郭广山¹, 柳迎红¹, 张苗², 吕玉民¹

(1. 中海油研究总院, 新能源研究中心煤层气研究室, 北京 100028;

2. 中国矿业大学, 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:基于沁水盆地柿庄南区块23口排采1年以上的煤层气井排采水水质分析数据及实测储层压力,采用Schoeller图、Piper图等分析了柿庄南煤层气井排采水地球化学特征及水动力分区特征,探讨了水文地质条件对煤层气富集的影响。研究表明柿庄南区块煤层气井排采水主要为Na—HCO₃水型,反映研究区处于开启—半封闭的水文地质环境;排采水氢氧同位素值均位于全国大气降水线附近,排采水初始来源主要为大气降水;利用折算水位将研究区大致划分为西北部径流区、南部弱径流区及中部过渡带滞流区,水流从西北部和南部向中部滞流区汇聚,水化学参数反映出滞流区煤层气保存条件好于两侧径流区和弱径流区。基于水化学场和水动力场参数建立了煤层气富集区优选指标体系,优选出煤层气富集有利区和较有利区,对下一步煤层气井布置具有指导作用。

关键词:煤层气;排采水;水文地球化学;水动力分区;柿庄南

中图分类号:TE357

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2017)07-1115-11

引用格式:Guo Guangshan, Liu Yinghong, Zhang Miao, *et al.* The characteristics of drainage water and its controlling effects on the favorable area of CBM in Shizhuangnan block, Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7): 1115-1125. [郭广山, 柳迎红, 张苗, 等. 沁水盆地柿庄南区块排采水特征及其对煤层气富集的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(7): 1115-1125.]

0 引言

我国煤层气井大多通过排水降压开采煤层气,整个排采过程与地层水密切相关。研究煤层气井排采水地球化学特征,探明地下水分布特征,是煤层气富集优选、井位布置的基础。我国对煤层气井排采水进行了大量的研究工作,不同学者从离子特征、矿化度特征、同位素特征、排采曲线等不同角度对排采水进行了大量的研究,判断了水质类型和水化学相,划分了煤层气井产水阶段,建立了Cl⁻浓度排采动态变化模型和水源判识模型,探讨了连续排采的影响因素及水文地质条件对煤层气富集和开发的影响,并引入离子浓度“变化率”和“变化速率”的概念,将煤储层水系统划分为“开放”和“封闭”2种类型^[1-9]。

经过多年的煤层气勘探开发,柿庄南区块已经进入大规模开发阶段,但产气效果未能达到预期目标,低产气井比例较高,单井产量低,产气规模增长缓慢,部分井产水高是柿庄南区块亟待解决的问题^[10-12]。前人^[13-15]针对柿庄南区块煤层气井排采水地球化学特征及水源判识作了大量工作。但针对水文地球化学特征及其对煤层气富集的影响研究较少。鉴于此,本文基于煤层气井排采水地球化学特征分析,探讨水文地质条件对煤层气富集的影响,为柿庄南区块煤层气井井位布置以及排采水综合利用提供指导。

1 煤层气地质背景

柿庄南区块位于沁水盆地东南部,寺头断层为区块西北边界,总面积为388km²,含气面积为

收稿日期:2017-03-01;修回日期:2017-06-13.

基金项目:中国海洋石油总公司资助项目(编号:CN00C-KY125ZDXMZY0115)资助.

作者简介:郭广山(1982-),男,河北沧州人,工程师,硕士,主要从事非常规油气综合地质评价研究.E-mail:guogsh2@cnooc.com.cn.

187.80km²,属于晋城市管辖。区内地层沉积充填序列为古生界奥陶系、石炭系、二叠系、中生界三叠系和新生界第四系^[16]。区内煤层为近南北向、向西倾斜的单斜构造,断层主要发育在研究区北部,以SN走向正断层为主,南部断层不发育(图1)。研究区在平面上处于延河泉岩溶水系统,发育第四系松散沉积物孔隙潜水含水层、三叠系刘家沟组—二叠系孙家沟组/上石盒子组砂岩裂隙潜水和承压水含水层、二叠系下石盒子组/山西组砂岩裂隙承压水含水层、上石炭统一下二叠统太原组石灰岩夹碎屑岩岩溶裂隙承压水含水层和奥陶系灰岩岩溶承压水含水层,其中二叠系下石盒子组/山西组砂岩裂隙承压水含水层为3煤的主要充水来源、上石炭统一下二叠统太原组石灰岩夹碎屑岩岩溶裂隙承压水含水层为15煤主要充水源。区内水文地质条件简单,各含水层层间和层内发育厚度不等的泥岩、粉砂岩隔水层,垂向上各含水层之间形成独立的含水系统,一般不存在水力联系,含水层内部由于泥质岩类隔水层阻隔,水力联系微弱,以层间径流为主^[1]。

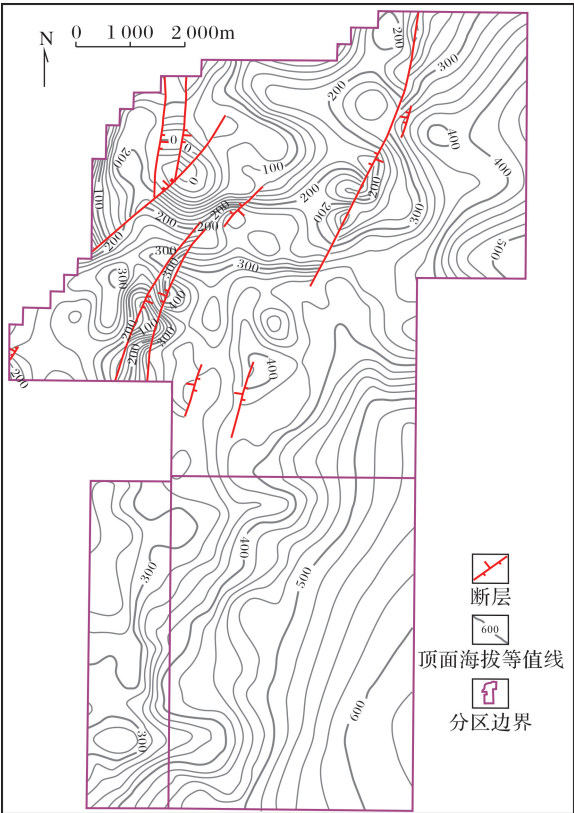


图1 研究区地质构造

Fig.1 The geologic map of the study area

研究区主要排采煤层为山西组3号煤层,部分煤层气井合采3煤和15煤,本次仅对排采3号煤层的煤层气井进行研究。3煤埋深介于454.4~1 243.3m

之间,平均为788.11m,总体上由南向北逐渐增加;煤层厚度介于1.35~16.00m之间,主体厚度介于4.6~7.3m之间,平均厚度为6.34m,由南向北厚度逐渐增大;煤层含气量介于3.11~21.51m³/t之间,平均为12.02m³/t。

2 排采水地球化学特征

2.1 排采水离子特征

排采水中阴阳离子的组成和含量,受水动力特征及水文地球化学环境的控制,通常以Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺等常量组分来表示排采水中的大量无机组成^[17]。柿庄南区块煤层气井排采水离子主要为Na⁺、HCO₃⁻、Cl⁻,其次为Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、SO₄²⁻以及CO₃²⁻(图2),以及其他少量离子如Fe^{2+/3+}、Br⁻,与前人关于煤层气产出水“富Na⁺、HCO₃⁻以及Cl⁻,贫SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺”的总体特征基本一致^[1,14]。此外,排采水中还含有Li、Ga、Rb、Sr、Ba等一些微量元素,排采水pH值介于7.52~9.09之间,平均为8.36,为弱碱性。对煤层气井排采水实验数据统计分析发现,阳离子含量Na⁺>Ca²⁺>K⁺>Mg²⁺;阴离子含量HCO₃⁻>Cl⁻>CO₃²⁻>SO₄²⁻(表1),阳离子中Na⁺含量介于119.10~963.40mg/L之间,占阳离子总量的76.18%~98.56%;阴离子中HCO₃⁻含量介于272.35~1 082.50mg/L之间,占阴离子总量的54.92%~95.65%,Cl⁻含量介于35.22~814.03mg/L之间,占阴离子总量的3.43%~43.08%。研究区煤层气井排采水中各种离子含量差距悬殊,阳离子中以碱金属离子Na⁺占绝对优势,平均占阳离子总量的95.60%,具有明显的向Na⁺+K⁺端元集成的特点,即地层水中Na⁺和溶解度较高的钠盐趋于富集,而溶解度较低的镁盐和钙盐沉淀析出;阴离子以HCO₃⁻和Cl⁻为主,且HCO₃⁻含量高于Cl⁻。研究区排采水离子浓度分布范围较大,反映出地层水中水岩作用存在一定的差异,或是地层水受到了后期改造交换作用^[18]。补给地下水是含氧水,通常富含Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻,而K⁺、Na⁺浓度较低,地下水自富氧补给源流向排泄区的过程中,Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻由于水—岩反应及细菌的相互作用而减少,HCO₃⁻、K⁺、Na⁺相应增加,水文地质环境也由氧化环境转变为还原环境,因此“富Na⁺、HCO₃⁻以及Cl⁻,贫SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺”说明地下水处于还原环境,远离水源补给区^[19]。

柿庄南区块煤层气井排采水总体特征表现为

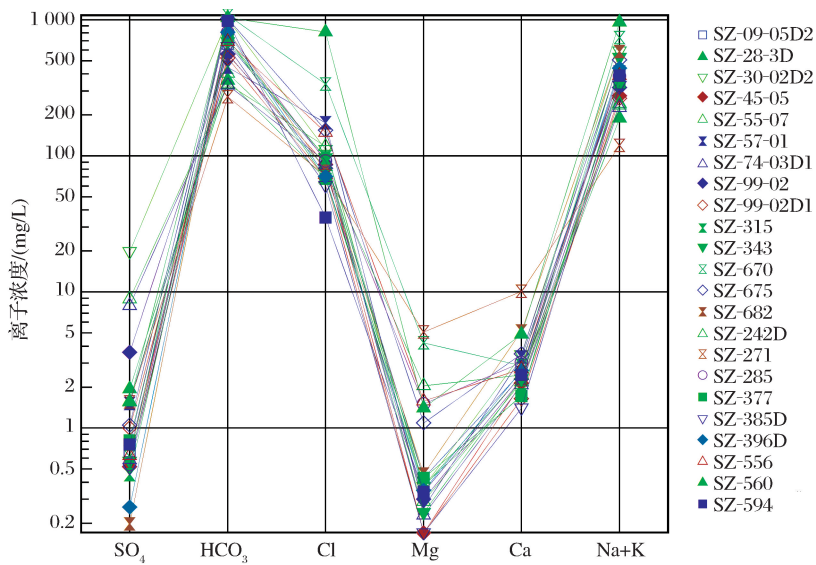


图 2 煤层气井排采水离子浓度特征

Fig 2 Ion concentration characteristics of CBM wells drainage water

表 1 柿庄南区块煤层气井排采水特征

Table 1 The characteristics of CBM wells drainage water in Shizhuangnan block

煤层气井	离子浓度/(mg/L)								稳定同位素/‰		pH	矿化度/ (mg/L)
	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	δ ¹⁸ O	δD		
SZ-09-05D2	2.59	1.29	0.43	418.00	93.517	0.677	668.81	0	-11.34	-82.21	8.30	1 116.40
SZ-28-3D	2.43	0.78	0.37	189.80	67.742	1.943	359.91	0	-11.23	-81.40	8.18	622.97
SZ-30-02D2	3.46	13.39	0.37	588.80	111.508	19.869	1 010.11	6.78	-11.55	-82.70	8.41	1 747.50
SZ-45-05	2.14	2.21	0.17	276.40	86.702	0.521	555.04	6.78	-11.11	-81.79	8.4	923.18
SZ-55-07	2.19	1.58	0.29	242.90	117.277	8.892	337.85	6.78	-11.04	-80.32	8.42	710.98
SZ-57-01	3.33	1.21	0.26	347.90	174.789	1.514	447.48	18.99	-10.92	-79.34	8.69	976.48
SZ-74-03D1	2.08	1.17	0.23	226.80	91.495	7.935	330.96	16.95	-11.43	-82.40	8.70	660.67
SZ-99-02	2.29	0.60	0.30	317.70	81.027	3.602	561.94	3.39	-11.47	-83.15	8.33	967.46
SZ-99-02D1	1.64	0.44	0.17	264.60	68.458	1.001	524.01	16.95	-11.51	-82.66	8.63	860.32
SZ-315	1.75	0.73	0.38	360.10	96.770	0.454	717.07	3.39	-11.35	-81.36	8.37	1 177.30
SZ-343	2.30	0.75	0.24	530.70	96.823	0.570	689.49	0	-11.19	-81.09	8.24	1 320.90
SZ-670	2.87	6.95	4.24	741.00	336.547	0.619	1 082.50	40.69	-10.77	-79.36	8.69	2 174.70
SZ-675	3.50	0.87	1.09	507.60	154.480	1.052	1 020.45	0	-10.95	-81.45	8.06	1 689.00
SZ-682	5.17	1.76	0.46	583.60	77.338	0.198	834.29	0	-11.25	-82.02	8.04	1 502.80
SZ-242D	2.46	0.98	2.05	236.80	83.365	1.572	405.42	40.69	-10.69	-76.26	9.09	732.65
SZ-271	10.10	16.06	5.09	119.10	71.116	1.559	272.35	0	-9.06	-63.56	7.52	495.38
SZ-285	3.03	0.81	1.51	386.60	91.750	0.539	810.15	0	-11.12	-78.88	8.33	1 294.40
SZ-377	1.72	0.60	0.43	346.20	67.841	0.814	741.20	13.56	-11.07	-78.69	8.43	1 158.80
SZ-385D	1.41	0.64	0.17	330.60	60.633	0.514	634.33	61.03	-11.06	-79.40	8.78	1 028.30
SZ-396D	2.65	0.73	0.35	442.30	70.352	0.263	810.15	0	-11.07	-79.36	8.2	1 326.80
SZ-556	2.73	0.94	1.58	389.50	148.981	0.627	692.25	12.21	-10.97	-77.86	8.48	1 236.60
SZ-560	4.89	2.32	1.41	963.40	814.029	1.561	1 037.69	27.12	-10.65	-75.21	8.31	2 825.30
SZ-594	2.46	1.60	0.34	390.70	35.221	0.758	982.53	0	-10.71	-75.49	8.39	1 413.60

“富 Na⁺、HCO₃⁻ 以及 Cl⁻，贫 SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺”，23 口煤层气井排采水 SO₄²⁻/HCO₃⁻ 值介于 0.000 2~0.026 3 之间，平均为 0.004 7，Na⁺/(Ca²⁺ + Mg²⁺) 值介于 7.84~209.65 之间，平均为 121.06，仅 SZ-271 井 Na⁺/(Ca²⁺ + Mg²⁺) 值为 7.84，其余 22 口煤层气井 Na⁺/(Ca²⁺ + Mg²⁺) 值均大于 50。煤层气排

采水 SO_4^{2-} 子被还原、 HCO_3^- 富集可能与硫酸盐还原反应相关,脱硫酸盐还原菌可在 $-5\sim 75^\circ\text{C}$ 、pH 值在 $5\sim 9$ 的条件下生存^[5],因此在研究区径流一滞流的还原环境下 SO_4^{2-} 与硫酸盐还原菌发生硫酸盐还原反应,消耗煤层水中的 SO_4^{2-} ,生成 HCO_3^- ,导致煤层水中 SO_4^{2-} 浓度降低,而 HCO_3^- 浓度增加,此外,水中的 SO_4^{2-} 与烃类气体相互作用,使烃类脱氢产生重质组分和胶质,同时产生 HCO_3^- 。而煤层气井排采水中 Na^+ 的富集、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 损耗是因为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸附能力远大于 Na^+ ,阳离子吸附交换作用使得大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 被煤基质颗粒吸附,置换出的 Na^+ 转移到煤层水中,导致排采水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 损耗,阳离子具有向 Na^+ 端元富集的特征^[5]。

2.2 排采水矿化度特征

煤层气井排采水的矿化度介于 $495.38\sim 2\,825.30\text{mg/L}$ 之间,平均为 $1\,215.76\text{mg/L}$ (表 1),明显高于地表水的矿化度(一般为 0.1g/L),而低于现今海水的总矿化度(一般为 $35\,000\text{mg/L}$),为淡

水—微咸水。根据各种常规离子浓度与总矿化度的大小绘制两者的拟合曲线,研究区 Na^+ 、 HCO_3^- 浓度与总矿化度之间具有非常好的正相关关系,相关系数分别为 $0.955\,5$ 和 $0.794\,1$, Na^+ 与 HCO_3^- 之间的相关性也非常好,相关系数为 $0.695\,4$,而 Cl^- 与矿化度之间的相关关系较差(图 3),相关系数为 $0.595\,1$ 。地下水中 Cl^- 不为植物细菌所摄取,不被黏土表面吸附,而且氯盐溶解度大,不易沉淀析出,是地下水中最稳定的离子。 Cl^- 的浓度随矿化度增高而不断增加,研究区排采水的总矿化度完全受 HCO_3^- 和 Na^+ 组分的控制。

平面分布上,研究区 3 号煤层排采水矿化度具有“西北低、东南高”的总体分布趋势(图 4),表明研究区西北部靠近水源补给区,而且矿化度的水平变化梯度相对较缓,即西北部地下水的径流条件相对较强,水岩作用相对较弱,导致矿化度相对较低,且水中的物质在较强径流的作用条件下得以较大程度的均匀化。在此整体背景上,研究区发育 2 个高矿

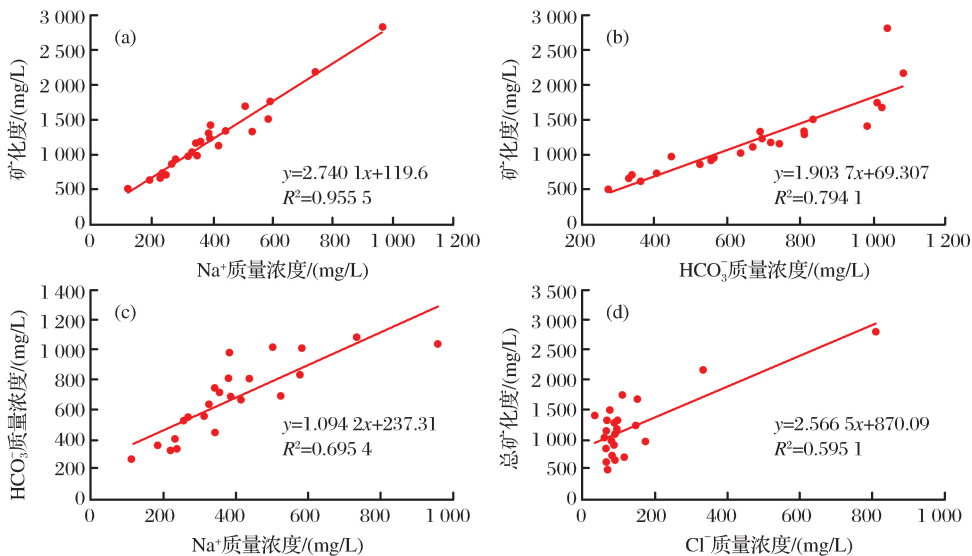


图 3 常规离子与总矿化度之间的关系

Fig.3 The relationship between TDS and conventional ion

化度中心:第一个中心出现在研究区南部,以 SZ-560 为中心形成一个相对滞水的封闭环境,同时也是研究区矿化度最高的区域,其矿化度明显高于周边其他煤层气井;第二个高矿化度中心位于研究区中部,以 SZ-670 为中心形成一个封闭条件相对较弱的滞水环境。矿化度与气藏的形成、分布密切相关,矿化度升高的方向一般是煤层气的聚集方向^[20]。

2.3 水质类型

研究区水样 Piper 图表明煤层气井排采水在主

要阳离子三角图中落点全部分布在 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 端点;在主要阴离子三角图中水样落点在三角图底部,主要位于 HCO_3^- 端点,仅 SZ-560 井水样落点趋向于 Cl^- ;研究区煤层气井排采水的水型以 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型为主,仅 SZ-560 样品为 $\text{Na}-\text{HCO}_3-\text{Cl}$ 水型(图 5)。 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 水型是地层水长期地层内循环、水岩长期作用和高度浓缩的结果^[4],低矿化度的 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型水反映研究区水力交替作用强烈的动荡环境,储层封闭性较差,对煤层气的保存较为不

利,而 $\text{Na}-\text{HCO}_3-\text{Cl}$ 型水则指示封闭性较好的水动力环境,对煤层气聚集较为有利^[20]。研究区煤层气井产出水介于开启与封闭之间、有自由交替水存在的半封闭—开启的水文地质环境。

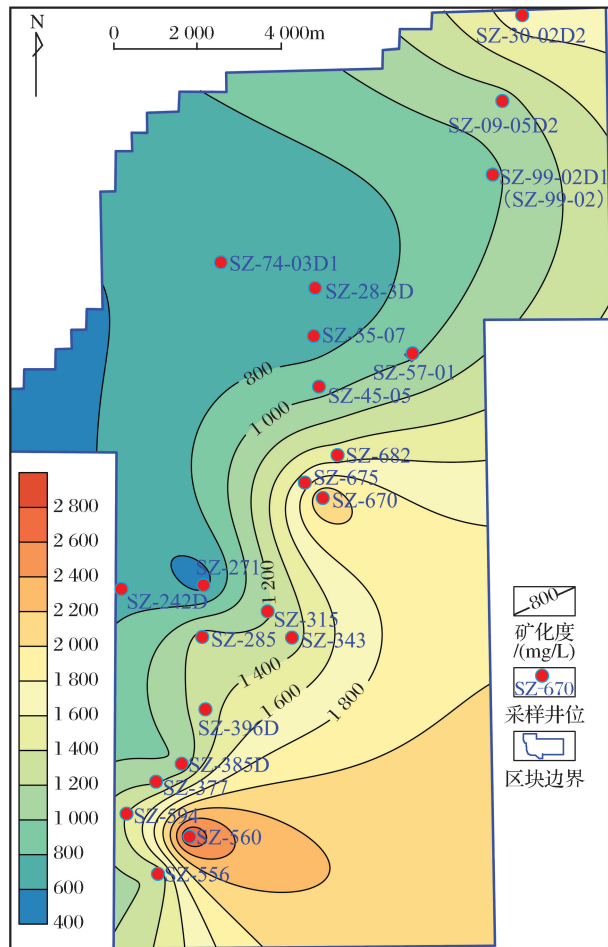


图4 柿庄南区块煤层气井排采水矿化度等值线

Fig.4 The TDS counter map of CBM wells drainage water in Shizhuangnan block

2.4 氢氧同位素特征

排采水的氢氧同位素组成特征是研究水岩反应和大气降水影响程度的重要手段。根据水—岩同位素交换反应的特点,不同类型水的来源和生成环境不同,氢氧同位素往往存在较大的差异,因此可以根据氢氧同位素特征判断煤层气井排采水来源。研究区煤层气井排采水 δD 值介于 -83.15‰ ~ -63.56‰ 之间,平均为 -79.39‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -11.55‰ ~ -9.06‰ 之间,平均为 -11.02‰ 。我国大气降水 δD 值介于 -190‰ ~ 20‰ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -24.3‰ ~ 2‰ 之间(表1),研究区煤层气井排采水水样的氢氧同位素组成均在中国大气降水氢氧同位素组成范围内,表明煤层气井排采水的初始来源均为大气降水。

我国大气降水线方程为 $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2^{[13]}$,本次采集的23口煤层气井水样的 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图发现(图6),水样点均分布在全国大气降水线附近,说明煤层气井产出水的原始来源均为大气降水,接受大气降水补给。

3 排采水水化学参数特征

根据矿化度和水型可以判断油气运聚、保存条件,但当有地表水或大气降水渗入时,判断结果会存在一定的偏差,而研究区煤层气井排采水初始水源为大气降水,接受大气降水补给,因此需要结合排采水水化学参数进行综合判断。常用的水化学参数有钠氯系数($r\text{Na}^+/\text{rCl}^-$)、脱硫酸系数($100\times r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$)、碳酸盐平衡系数 $[(r\text{HCO}_3^-+r\text{CO}_3^{2-})/r\text{Ca}^{2+}]$ 、变质系数 $[(r\text{Cl}^- - r\text{Na}^+)/r\text{Mg}^{2+}]$ 、氯镁系数($r\text{Cl}^-/r\text{Mg}^{2+}$)等(图7)。

钠氯系数($r\text{Na}^+/\text{rCl}^-$)为地层水中 Na^+ 和 Cl^- 的当量比值,可以反映地层水的浓缩变质程度和水文地球化学环境。一般认为钠氯系数越大,地层水浓缩变质作用越强,受入渗水的影响越大,越不利于煤层气的保存。现代海水的钠氯系数为0.85,受大气降水淋滤作用影响的地下水, $r\text{Na}^+/\text{rCl}^-$ 值一般大于1。博雅斯基将地层水划分为流动水($r\text{Na}^+/\text{rCl}^- > 0.85$)和滞流水($r\text{Na}^+/\text{rCl}^- < 0.5$)^[21-23]。研究区23口煤层气井排采水钠氯系数介于1.83~17.12之间,均大于1.0,表明研究区排采水为受到大气降水淋滤作用的流动地层水,浓缩变质作用程度高,煤层气藏形成后曾遭到破坏。平面上,研究区由北向南钠氯系数表现出“高一低—高一低”的整体趋势,最高值位于西南方向,形成以SZ-30-02D2、SZ-682和SZ-343、SZ-396D、SZ-385D、SZ-337及以SZ-594井为中心的3个高钠氯系数中心,钠氯系数大于8.0,烃类气体保存条件差,而以SZ-74-03D1、SZ-28-3D、SZ-57-01、SZ-55-07、SZ-670、SZ-271井为界和以SZ-560、SZ-556为中心在研究区中北部和南端形成低钠氯系数中心,烃类气体保存条件好。

脱硫酸系数($100\times r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$)可以反映地层水脱硫酸作用的强度,该值越小,反映地层水脱硫酸作用越强,处于还原环境,保存条件越好,但接近0值时只能说明保存条件较好^[24]。研究区煤层气井排采水脱硫酸系数介于0.07~6.59之间,大部分煤层气井脱硫酸系数小于1,表明地层水还原彻底,仅SZ-28-3D、SZ-30-02D2、SZ-55-07、SZ-74-03D1、SZ-99-02

5 口煤层气井脱硫系数大于 1,可能受浅表层氧化作用影响,还原不彻底,埋藏封闭条件相对较差。平面上,研究区脱硫系数呈现由北向南脱硫系数逐渐降低的趋势,脱硫系数低于 1 的区域集中于研究区中南

部,反映出研究区由南向北保存条件逐渐变差,但 SZ-670、SZ-560、SZ-682 井脱硫系数分别为 0.07、0.07 和 0.09,接近于 0 值,说明研究区高矿化度中心煤层气保存条件相比南部其他煤层气井所在区域略差。

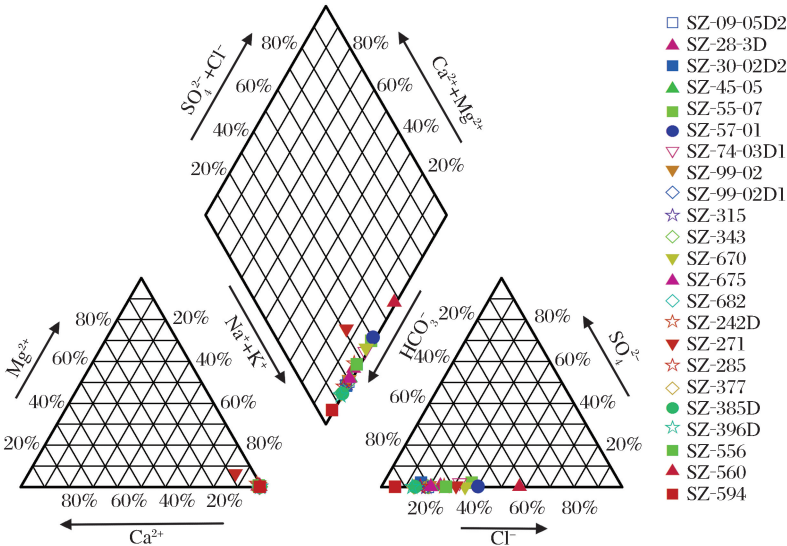


图 5 煤层气井产水 Piper 图

Fig.5 The Piper map of the CBM wells drainage water

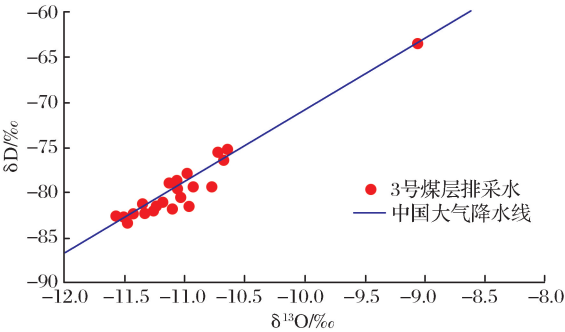


图 6 水中氢氧同位素 δD — $\delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig.6 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of hydrogen and oxygen isotopes in water

碳酸盐平衡系数 $[(r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-})/r\text{Ca}^{2+}]$ 可以指示油气的方向和性质,反映地层水脱碳酸根作用的强弱,该值越小,越靠近油气藏,油气性质越轻,保存条件越好^[25]。研究区排采水碳酸盐平衡系数介于 8.84~176.73 之间,碳酸盐平衡系数较高,油气性质较差,地层水被 CaCO_3 饱和。平面上,碳酸盐平衡系数具有与钠氯系数分布相似的特征,由北向南表现出“高一低—高一低”的整体趋势,研究区中北部和南部油气性质条件较好,并以 SZ-670 井、SZ-315 井和 SZ-385D 井为中心形成 3 个碳酸盐平衡系数高值中心。

变质系数 $[(r\text{Cl}^- - r\text{Na}^+)/r\text{Mg}^{2+}]$ 反映地下水的变质程度,间接反映地层的封闭性,变质系数越大,水岩作用的强度和离子交换的程度越大,煤层气藏封闭性越好,当变质系数为负值时,表征地层水受到大气降水的淋滤作用^[26]。柿庄南区块煤层气井变质系数均为负值,产出水受到大气降水淋滤的影响,变质系数数值介于 7.48~1 009.71 之间,平均为 411.63,仅 SZ-271 井变质系数小于 40。变质系数越大,越有利于煤层气的富集,研究认为变质系数大于 40 的区域为煤层气的富集区,从变质系数角度研究区煤层气保存条件普遍较好。平面上,研究区呈现出“东高西低”的整体趋势,研究区大部分区域变质系数高于 200,仅在研究区西部和最南端出现变质系数低于 200 的区域,且在西部区域存在变质系数低于 40 的煤层气富集不利区。

氯镁系数 $(r\text{Cl}^-/r\text{Mg}^{2+})$ 是反映地层水浓缩变质作用程度和阳离子吸附交换作用的参数,其值越大,地层水封闭性越好,封闭时间越长,浓缩变质作用越强,越有利于油气的聚集、保存^[26]。研究区 23 口煤层气井排采水氯镁系数介于 4.78~233.51 之间,平均为 89.65,仅 SZ-271 井排采水氯镁系数低于 5,整体研究区氯镁系数较高,地层封闭性较好。平

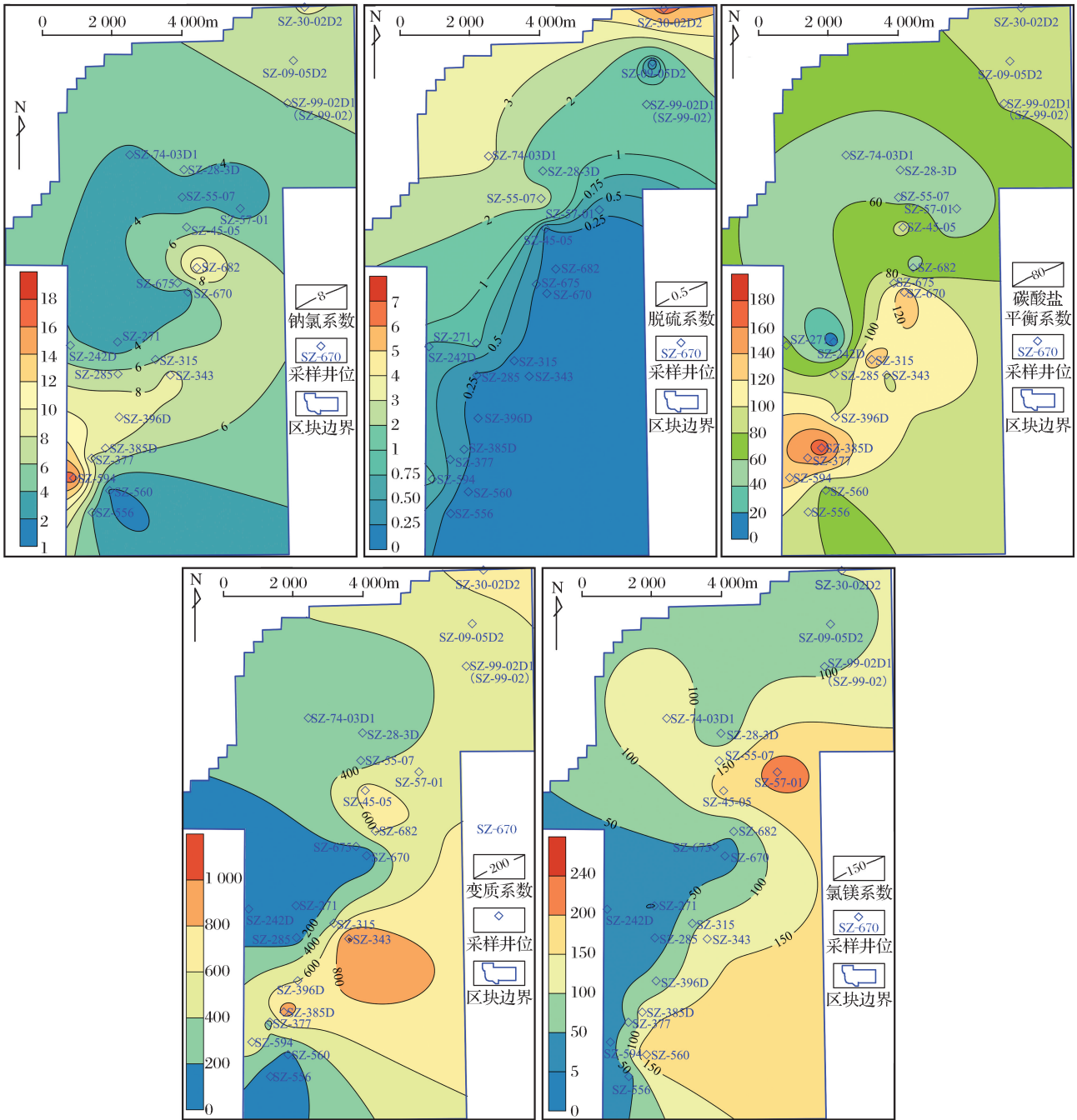


图 7 水文化学参数等值线

Fig.7 The counter map of hydrogeochemical parameters

面上研究区氯镁系数与变质系数分布相似,整体上“东高西低,南高北低”,以SZ-57-01井为中心存在一个氯镁系数大于 200 的高值区。

4 排采水水动力强度

地下水动力场是影响煤层气驱出动力高低的关键要素,在地下水汇流的地区,煤储层能量积聚,煤层气富集。利用 23 口煤层气井实测储层压力数据,根据等折算水位公式计算柿庄南研究区等折算水位

并划分水动力分区^[27,28]。

$$S=H_2+10\frac{p_c}{r_{rw}}$$

其中： $p_c=p+\int_{H_1}^{H_2}r_{rw}(H)dH$

式中： S 为等折算水位,常用绝对标高表示, m ; H_2 为基准面的绝对标高, m , 由于本文计算研究区等折算水位时以海平面为基准面, 因此 $H_2=0$; P_c 为折算压力; r_{rw} 为地下水的相对密度, Kg/m^3 ; p 为实测

地层压力,MPa; H_1 为地层压力测试点的绝对标高,m; $r_{rw}(H)$ 为 r_{rw} 随深度变化的函数。

本文在等折算水位计算过程中,选择海平面作为基准面,由于柿庄南区块 23 口煤层气排采井 3 号煤层埋深介于 567.93~889.90m 之间,埋深均浅于 1 000m,因此水的相对密度相差不大,据此等折算

水位公式简化为 $S = 100p + H_1$ [27,28],根据研究区 23 口煤层气井等折算水位绘制研究区等折算水位分布等值线图(图 8,表 2),研究区西北部为水动力高势区,中部为水动力低势区,据此将研究区划分为西北部径流区、中部滞流区及南部弱径流区,地下水由西北部和南部向研究区中部即滞流区汇聚。

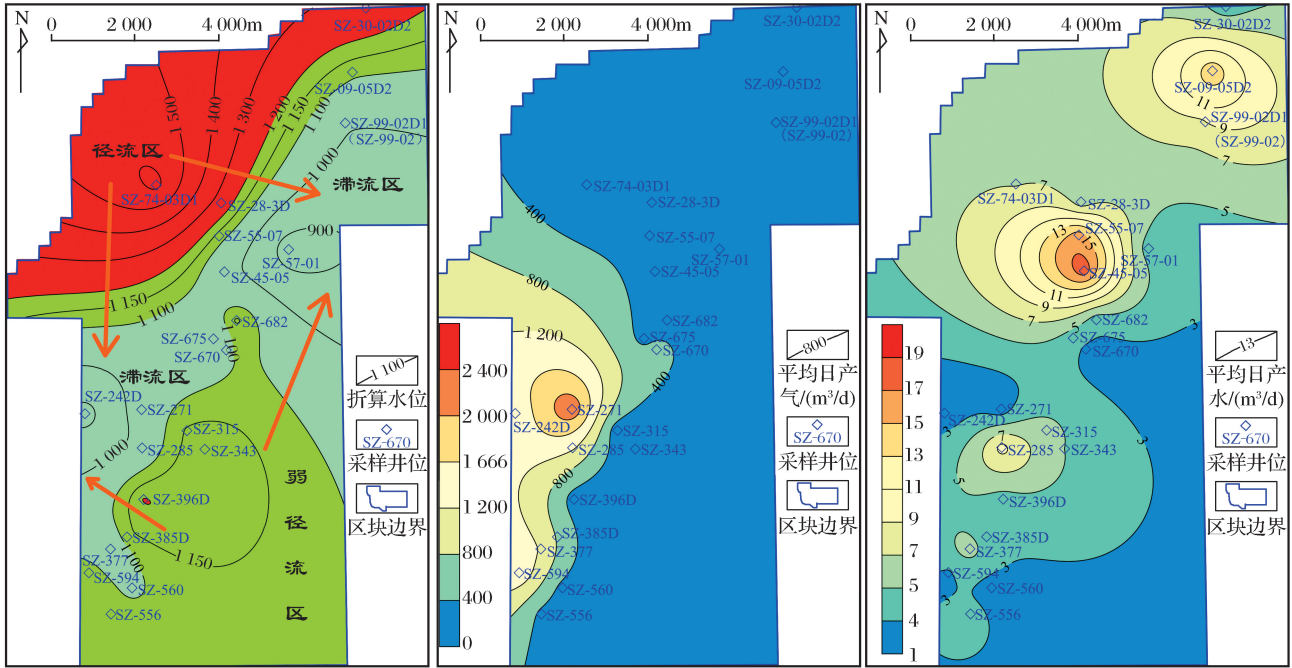


图 8 柿庄南区等折算水位等值线

Fig.8 Conversion water level of counter map of Shizhuangnan block

表 2 柿庄南区块煤层折算水位数据

Table 2 Conversion water level data in Shizhuangnan block

煤层气井	埋深/m	储层压力/MPa	折算水位/m	煤层气井	埋深/m	储层压力/MPa	折算水位/m
SZ-09-05D2	740.47	3.73	1 113.67	SZ-675	668.10	3.37	1 004.82
SZ-28-3D	837.50	4.22	1 259.60	SZ-682	771.10	3.89	1 159.73
SZ-30-02D2	849.05	4.28	1 276.97	SZ-242D	576.48	2.91	867.03
SZ-45-05	675.00	3.40	1 015.20	SZ-271	698.46	3.52	1 050.48
SZ-55-07	751.50	3.79	1 130.26	SZ-285	681.79	3.44	1 025.41
SZ-57-01	567.93	2.86	854.17	SZ-377	665.40	3.35	1 000.76
SZ-74-03D1	1 078.54	5.44	1 622.12	SZ-385D	754.56	3.80	1 134.86
SZ-99-02	672.25	3.39	1 011.06	SZ-396D	800.26	4.03	1 203.59
SZ-99-02D1	674.70	3.40	1 014.75	SZ-556	750.30	3.78	1 128.45
SZ-315	769.00	3.88	1 156.58	SZ-560	722.40	3.64	1 086.49
SZ-343	786.34	3.96	1 182.66	SZ-594	764.20	3.85	1 149.357
SZ-670	723.80	3.65	1 088.60				

结合研究区 23 口煤层气井实际生产资料可知,研究区煤层气井西北部径流区产水量最高,难以形成区域性的压降漏斗,煤层气井产气效果不理想;滞

流区西南部产气量最高,相应的煤层气井产水量较低,是煤层气井勘探开发的有利区段,而滞流区东北部由于煤层露头接受大气降水补给,使得东北部滞

流区煤层气含量较低,且地层水不断汇聚使得东北部滞流区产水量较大,煤层气井排水降压过程中压力不易降到临界解吸压力之下^[28],导致东北部滞流区高产水、低产气的特征。因此在煤层气生产过程中需加强滞流区排水,扩大压降漏斗规模。

5 煤层气富集区评价

在煤层气井排采水离子特征、矿化度特征、水化学参数分布特征及水动力分区等条件的分析基础上,建立了以折算水位、矿化度、钠氯系数、脱硫系数和碳酸盐平衡系数为主要参数的煤层气富集区优选指标体系(表 3),优选出 SZ-560 井、SZ-556 井所在区域为煤层气富集有利区,SZ-285 井、SZ-45-05 井、SZ-57-01 井、SZ-99-02D1 井及 SZ-09-05D2 井所在滞流区为煤层气较有利区(图 9)。

表 3 柿庄南区块煤层气有利区优选指标体系

Table 3 The index parameters of CBM favorable area optimization in Shizhuangnan block

区块划分	不利区	较有利区	有利区
水动力分区	径流区—弱径流区	弱径流区—滞流区	滞流区
等折算水位/m	>1 200	1 100~1 200	<1 100
矿化度/(mg/L)	<1 000	1 800~1 000	>1 800
钠氯系数	>8	6~8	<6
脱硫系数	>3	1~3	<1
碳酸盐平衡系数	>100	80~100	<80

6 结论

- (1)柿庄南煤层气井排采水整体表现为“富 Na⁺、HCO₃⁻ 以及 Cl⁻, 贫 SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺”特征,水型主要为 Na—HCO₃ 型,区块处于开启—半封闭的水文地质环境;排采水氢氧同位素值均落在全国大气降水线附近,煤层气田排采水主要来源于大气降水。
- (2)反映煤层气保存条件的排采水负相关水化学参数中钠氯系数、碳酸盐平衡系数表现出由北向南“高—低—高—低”而脱硫系数“南高北低”的整体趋势;而正相关水化学参数变质系数、氯镁系数呈现出“东高西低,南高北低”的整体趋势,研究区煤层气保存条件整体较好。
- (3)研究区可以划分为西北部径流区、中部滞流区及南部的弱径流区,径流区等折算水位高于 1 200m,滞流区等折算水位一般小于 1 100m,研究区地下水由西北方向和南部向中部滞流区汇聚。

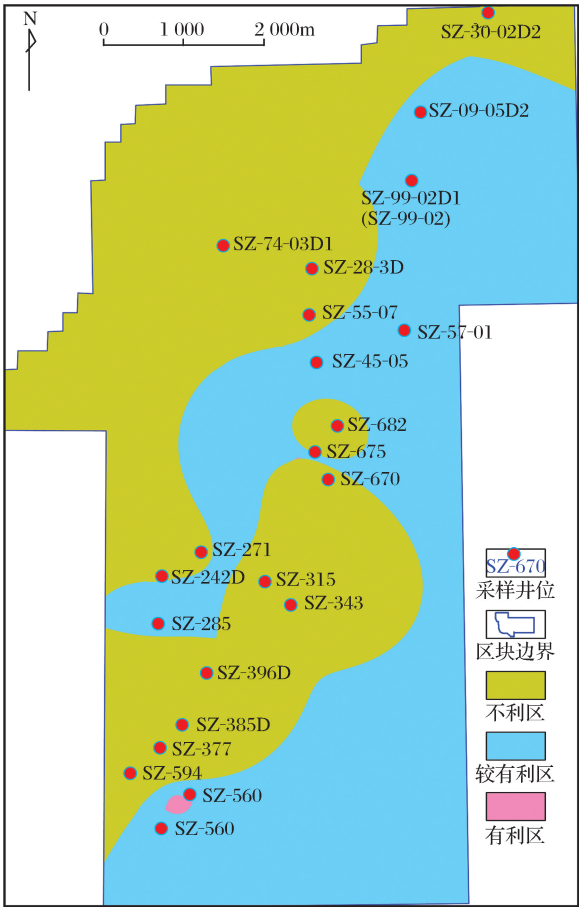


图 9 柿庄南区块煤层气有利区优选

Fig.9 The favorable area optimization of CBM in Shizhuangnan block

(4)基于水动力分区、矿化度、水化学参数建立了煤层气富集区优选指标体系,优选出煤层气富集有利区和较有利区。

参考文献(References)

[1] 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. [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.]

[2] Fu Xuehai, Li Sheng, Yu Jingtun, *et al.* Dynamic monitor on coal reservoir water system during drainage process of coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 26-31. [傅雪海, 李升, 于景邨, 等. 煤层气井排采过程中煤储层水系统的动态监测[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 26-31.]

[3] Zhu Weiping, Tang Shuheng, Lv Jianwei, *et al.* The characteristics and dynamic changes of produced water from coalbed methane wells in Zaoyuan block[J]. Coal Geology & Explora-

- tion, 2015, 43(1): 72-75. [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.]
- [4] Wang Baoyu, Li Youyi. Geochemistry of water from coalbed methane wells and the analysis of gas drainage in the Xifeng mining district, Gansu Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 579-582. [王保玉, 李友谊. 西峰矿区煤层气井产出水地球化学特征及排采状况分析[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 579-582.]
- [5] Li Zhongcheng, Tang Shuheng, Wang Xiaofeng, *et al.* Relationship between water chemical composition and production of coalbed methane wells, Qinshui Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 424-429. [李忠城, 唐书恒, 王晓峰, 等. 沁水盆地煤层气井产出水化学特征与产能关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 424-429.]
- [6] Liu Aihua. Simulation of CBM Desorption at Fixed Pressures and Flow in Southern Qinshui Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2013. [刘爱华. 沁南煤储层排采水化学动态变化特征及带压解吸/流动物理模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.]
- [7] Zhang Zheng, Qin Yong, Fu Xuehai. The favorable developing geological conditions for CBM multi-layer drainage in southern Qinshui Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(6): 1019-1024. [张政, 秦勇, 傅雪海. 沁南煤层气合层排采有利开发地质条件[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(6): 1019-1024.]
- [8] Liu Huihu, Sang Shuxun, Li Mengxi, *et al.* Discrimination of source of formation water during CBM drainage with the multi-well pattern and its significance[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(1): 29-34. [刘会虎, 桑树勋, 李梦溪, 等. 煤层气群井排采地层水来源识别及其意义[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 29-34.]
- [9] Ge Yanyan, Fu Xuehai, Sun Wenqing, *et al.* Characteristics of ion concentration in groundwater drainage from coalbed methane wells in Panzhuang of China[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 3839-3849.
- [10] Yang Guojiao, Tang Shuheng, Li Zhongcheng, *et al.* Analysis on drainage system of coalbed methane high production well in south block of Shizhuang[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 176-181. [杨国桥, 唐书恒, 李忠城, 等. 柿庄南区块煤层气高产井排采制度分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 176-181.]
- [11] Jiang Shanyu, Kang Yongshang, Zhang Shouren, *et al.* Analysis on influencing factors of drainage dynamic of wells and CBM development strategy in Shizhuang block[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(6): 1134-1142. [姜杉钰, 康永尚, 张守仁, 等. 沁水盆地柿庄区块煤层气井排采动态影响因素分析及开发对策研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(6): 1134-1142.]
- [12] Huang Shaohua, Sun Tongying, Ji Kun, *et al.* CBM early stage production characteristics in Shizhuang southern block and exploitation proposals[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(7): 13-17. [黄少华, 孙同英, 冀昆. 柿庄南区块煤层气井早期生产特征及开采建议[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(7): 13-17.]
- [13] Wang Shanbo, Tang Shuheng, Wan Yi, *et al.* The hydrogen and oxygen isotope characteristics of drainage water from Taiyuan coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 448-454. [王善博, 唐书恒, 万毅, 等. 山西沁水盆地南部太原组煤储层产出水氢氧同位素特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 448-454.]
- [14] Wei Mingming, Ju Yiwen. Chemical characteristics and origin of produced waters from coalbed gas field in the southern of Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 629-635. [卫明明, 嵇宜文. 沁水盆地南部煤层气田产出水地球化学特征及其来源[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 629-635.]
- [15] Huang Shaohua, Zou Jing, Han Jie, *et al.* Application of hydrochemical and gray correlation methods in CBM well produced water source discrimination[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(6): 58-64. [黄少华, 邹婧, 韩杰, 等. 水化学与灰色关联度法在煤层气井产出水水源判别中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(6): 58-64.]
- [16] Shao Longyi, Xiao Zhenghui, He Zhiping, *et al.* Palaeogeography and coal accumulation for coal measures of the Carboniferous-Permian in Qinshui Basin, southeastern Shanxi Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(1): 43-52. [邵龙义, 肖正辉, 何志平, 等. 晋东南沁水盆地石炭二叠纪含煤岩系古地理及聚煤作用研究[J]. 古地理学报, 2006, 8(1): 43-52.]
- [17] Wu Juan, Liu Shugen, Zhao Yihua, *et al.* Fluid characteristics of Upper Sinian-Lower Cambrian petroliferous strata in Gaoshiti-Moxi structure of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2014, 41(6): 713-722. [吴娟, 刘树根, 赵异华, 等. 四川盆地高石梯—磨溪构造震旦系—寒武系含气层系流体特征[J]. 成都理工大学学报, 2014, 41(6): 713-722.]
- [18] Li Jihong, Hui Xiao, Cheng Dangxing, *et al.* Characteristics of formation water of Chang 8 reservoir in Jiyuan area of Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(2): 45-49. [李继宏, 惠潇, 程党性, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组地层水特征研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(2): 45-49.]
- [19] Rice C A, Flores R M, Stricker G D, *et al.* Chemical and stable isotopic evidence for water/rock interaction and biogenic origin of coalbed methane, Fort Union Formation, Powder River Basin, Wyoming and Montana USA[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(1-2): 76-85.
- [20] Zhang Zongfeng, Zha Ming, Gao Changhai. Hydrochemical characteristics and hydrocarbon accumulation in the Chengbei fault terrace zone of Dagang Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 268-274. [张宗峰, 查明, 高长海. 大港油田埕北断阶区地层水化学特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 268-274.]
- [21] Meng Dewei, Jia Ailin, Ji Guang, *et al.* Water and gas distribution and controlling factors of large scale tight sand gas: A

- case study of western Sulige Gasfield, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 607-614. [孟德伟, 贾爱林, 冀光, 等. 大型致密砂岩气田气水分布规律及控制因素——以鄂尔多斯盆地苏里格气田西区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 607-614.]
- [22] Deng Daping. Chemical characteristics of Triassic-Jurassic Formation water and relationship of it to hydrocarbon preservation in the west of Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(1): 62-70. [邓太平. 四川盆地西部三叠系—侏罗系地层水化学特征与油气保存关系[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(1): 62-70.]
- [23] Chen Yong, Wang Miao, Wang Xintao, *et al.* Chemical characteristics and implications of formation water of the Es₄ member in Dongying Sag [J]. *Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science*, 2015, 39(4): 42-52. [陈勇, 王淼, 王鑫涛, 等. 东营凹陷沙四段地层水化学特征及其指示意义[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(4): 42-52.]
- [24] Ren Guoxuan, Hou Dujie, Shi Yuling, *et al.* Relationship between formation water characteristics and hydrocarbon accumulation in Hongshangzui Oilfield in the northwestern margin of the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 179-184. [任国选, 侯读杰, 史玉玲, 等. 准噶尔盆地西北缘红山嘴油田地层水特征与油气藏聚集关系[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2): 179-184.]
- [25] Tong Xin, Ma Pengjie, Zhang Shiqi, *et al.* Characteristics and diagenetic response of Es₃ formation water of Wendong area, Dongpu Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2015, 22(5): 594-599. [佟昕, 马鹏杰, 张世奇, 等. 东濮凹陷文东地区沙三段地层水特征及成岩响应[J]. *断块油气田*, 2015, 22(5): 594-599.]
- [26] Zhan Qing, Zheng Qingwei, Pan Baozhi. Relationship between water ion parameter characteristics and hydrocarbon reservoirs in Chepaizi area of Junggar Basin [J]. *Global Geology*, 2015, 34(2): 524-530. [占庆, 郑庆伟, 潘保芝. 准噶尔盆地车排子地区地层水离子参数特征与油气藏的关系[J]. *世界地质*, 2015, 34(2): 524-530.]
- [27] Chen Gang, Hu Zongquan, Zhang Yonggui, *et al.* Study on the geological controlling effects on the enrichment and high-yield of coalbed methane in Yanchuannan area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(11): 2093-2102. [陈刚, 胡宗全, 张永贵, 等. 延川南区块煤层气富集高产的地质控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(11): 2093-2102.]
- [28] Xu Rui, Tang Dazhen, Tao Shu, *et al.* Hydrogeological characteristics of CBM reservoirs and their controlling effects in block Anze, Qinshui Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(2): 36-44. [徐锐, 汤达祯, 陶树, 等. 沁水盆地安泽区块煤层气藏水文地质特征及其控气作用[J]. *天然气工业*, 2016, 36(2): 36-44.]

The characteristics of drainage water and its controlling effects on the favorable area of CBM in Shizhuangnan block, Qinshui Basin

Guo Guang-shan¹, Liu Ying-hong¹, Zhang Miao², Lü Yu-min¹

(1. *New Energy Research Center, CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China*;

2. *Key Laboratory of Coalbed Methane Resource and Reservoir-formation Process (Ministry of Education), China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China*)

Abstract: Based on the measured reservoir pressure and the water quality analysis data of 23 CBM wells draining more than 1 year in Shizhuangnan block, hydrogeological and hydrodynamic characteristics were studied using multi-methods such as Schoeller counter, Piper counter, and the influence of hydrogeological conditions on coalbed methane enrichment was discussed. The study indicated that the drainage water is mainly Na-HCO₃ type which reflects the study area was in an open-semi closed hydrogeological environment, the hydrogen and oxygen isotopic values of drainage located near the national atmospheric precipitation line and proved that the initial source of drainage water was atmospheric precipitation. The study area was divided into runoff area in the northwest, weak runoff area in the south and the stagnant wake in the central area using conversion water level, and the water came from the northwest and south and flew into the stagnation zone. Hydrochemical parameters reflect the preservation condition in the stagnation zone are better than that in the runoff area and weak runoff area at both sides. Based on the parameters of hydrodynamic field and hydrochemical field, the parameter system of CBM favorable area optimization was established, and the favorable good target was selected using this system, and it gave a guide for the next CBM well layout.

Key words: CBM; Drainage water; Hydrogeochemistry; Hydrodynamic zoning; Shizhuangnan block