

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.389>



煤层气井产出水环境效应及其成因： 以黔西松河区块 GP 井组为例

秦彬超¹, 杨兆彪^{1*}, 高 为²

1. 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 221008
2. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心, 贵州贵阳 550009

摘要: 随着煤层气产业的规模化发展, 煤层气井产出水的环境效益备受重视. 以贵州西部松河井组 8 口煤层气试验井为例, 动态跟踪了 2018 年 5 批次产出水的地球化学数据, 采用模糊综合评价法和单因素分析法进行了产出水环境效应评价并进行成因分析, 得出以下结论: 松河井组煤层气产出水地球化学特征主要表现为 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 浓度高, 矿化度较高, 产出水型为 Na-Cl 和 $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$. 本文采用模糊综合评价法计算得出 8 口煤层气试验井产出水均属于 V 级重度污染, 并得出主要污染指标为 TDS、 Na^+ 以及 Cl^- , F 元素、Mn 元素轻微超标, 在此基础上进行单因子分析, 评价结果为重度污染. 综合 2 种评价方法得出主要污染指标为 TDS、 Na^+ 、 Cl^- 以及 Ba^{2+} . 污染程度在一定范围内随时间变化表现出轻微波动且具有微弱的降低趋势, 研究区煤层气井产出水污染等级高且随时间变化而波动变化, 是地质因素、工程因素叠加影响的耦合结果. 煤系地层中各种元素富集的高地质背景为根本影响因素, 控制着微量元素的种类和含量, 其次压裂液返排率的变化对其有显著影响作用, 季节性降水则加强水岩作用, 促进了元素的溶出.

关键词: 贵州西部; 煤层气井产出水; 环境效应; 模糊综合评价; 成因分析; 地球化学.

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2023)03-1246-13

收稿日期: 2022-05-17

Environmental Effects and Causes of Produced Water in Coalbed Methane Wells: Taking GP Well Cluster in Songhe Block of Western Guizhou as an Example

Qin Binchao¹, Yang Zhaobiao^{1*}, Gao Wei²

1. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

2. Guizhou Coalbed Methane Shale Gas Engineering Technology Research Center, Guiyang 550009, China

Abstract: With the large-scale development of coalbed methane industry, the environmental effects of produced water from coalbed methane wells receive more attention. Taking 8 coalbed methane test wells in Songhejing Formation in western Guizhou as an example, the geochemical data of 5 batches of produced water in 2018 were tracked dynamically, and the environmental effects of produced water were evaluated by fuzzy comprehensive evaluation method and single factor analysis method, and the causes were analyzed. The following conclusions were drawn: The geochemical characteristics of coalbed methane produced water

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42272195, 42130802), 贵州省科技计划项目 (黔科合战略找矿[2022]ZD001-01).

作者简介: 秦彬超 (1997—), 男, 硕士研究生, 从事煤层气开发环境效应研究. ORCID: 0000-0002-8927-0351. E-mail: 18952231631@163.com

* **通讯作者:** 杨兆彪, E-mail: zhaobiaoyang@163.com

引用格式: 秦彬超, 杨兆彪, 高为, 2023. 煤层气井产出水环境效应及其成因: 以黔西松河区块 GP 井组为例. 地球科学, 48(3): 1246-1258.

Citation: Qin Binchao, Yang Zhaobiao, Gao Wei, 2023. Environmental Effects and Causes of Produced Water in Coalbed Methane Wells: Taking GP Well Cluster in Songhe Block of Western Guizhou as an Example. *Earth Science*, 48(3): 1246-1258.

in Songhejing Formation are mainly characterized by high concentration of Na^+ , HCO_3^- and Cl^- and high salinity, and the produced water types are Na-Cl and Na- HCO_3^- . In this paper, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to calculate that the produced water of eight coalbed methane test wells belongs to grade V heavy pollution, and the main pollution indicators are TDS, Na^+ and Cl^- , and the elements F and Mn slightly exceed the standard. On this basis, the single factor analysis shows that the evaluation result is heavy pollution. Two comprehensive evaluation methods show that the main pollution indicators are TDS, Na^+ , Cl^- and Ba^{2+} . In a certain range, the pollution degree fluctuates slightly with time and has a weak decreasing trend. The water pollution level of coalbed methane wells in the study area is high and fluctuates with time, which is the coupling result of the superposition of geological factors and engineering factors. The high geological background of various elements enrichment in coal measures strata is the fundamental influencing factor, which controls the types and contents of trace elements. Secondly, the change of fracturing fluid flowback rate has a significant effect. Seasonal precipitation strengthens the water-rock effect and promotes the dissolution of elements.

Key words: western Guizhou; produced water from coalbed methane wells; environmental benefits; fuzzy comprehensive evaluation; grey correlation evaluation; geochemistry.

0 引言

煤层气是非常规天然气的重要组成部分.埋深2 000 m以浅煤层气地质资源量30.5万亿立方米(张道勇等,2018).截至2021年,我国煤层气累计探明储量约为8 039亿立方米,同时实现了年产量67亿立方米的重大突破.然而煤层气井在排采过程中要抽排煤层及其围岩中的大量地下水,同时压裂过程中注入的压裂液也会一起返排,这些大量产出液不同于原始地层水,可能会对环境产生一定程度上的影响.页岩气开发工程研究现已涉及产出液环境影响评价(杨德敏等,2018;江丽等,2021;孙灵如等,2022).前人对煤层气井产出水研究发现,未经处理的煤层气井产出水任意排放会对周边土壤电导率产生显著影响,进而抑制作物生长,部分煤层气井产出水中含有大量的重金属等污染物,对周边生态系统及人体健康存在着一定程度上的危害,并且煤层水及注入的压裂液本身就含有大量的有害化学元素,必须加强对水质评价的认识(Yang *et al.*, 2013;刘会虎等,2014;温彩哨等,2014;Li *et al.*, 2018;Majee *et al.*, 2018).

水质评价工作是解决水体污染和保护水资源水环境的基础工作,为此国外学者进行了大量研究,相继提出了水质指数(QI)、质量指数(WQI)、Nemerow污染指数等来评价污染程度(Brown *et al.*, 1970;保金花和黄勇,2008).我国在水质评价方面起步较晚(丁桑岚,2001),然而发展迅速,近年来已经积累了大量的研究成果,前人运用主成分分析法、聚类分析法、模糊评价法、灰色系统法等方法对不同的水域水型进行评

价(邓聚龙,1984;刘琰等,2013;张耀辉等,2015;朱洁等,2018;彭小玉等,2021;),重点针对水环境的模糊不确定性问题进行了研究,认为不同的水环境条件需要运用与之适配的评价方法来进行评判,为水环境保护奠定了坚实基础(方红卫等,2009;敖成欢等,2020;刘宇等,2020;唐贺,2020).

贵州西部煤层气资源丰富,煤层气资源量约占全国煤层气资源量的10%,该地区煤储层压裂一般采用“大排量、大液量、大砂量”的改造方式(Yang *et al.*, 2018, 2019).同时西南地区煤系地层经历了多期次的构造演化和水热事件,汞、氟、砷等多种有毒有害元素在煤层中显著富集(Dai *et al.*, 2004;Feng and Qiu, 2008; Qi and Gao, 2008),随着储层改造及排水采气的进行,煤层气井产出水中不可避免地会混入多种元素.针对喀斯特地貌发育,生态脆弱的贵州地区,煤层气产出水可能产生的一系列潜在环境影响,早期更应得到重视.

为此,本文以贵州西部松河井组8口煤层气试验井为例,基于2018年5批次产出水地球化学数据的跟踪分析,采用模糊综合评价法,完成了各井产出水的水质评价,采用单因素评价法,完成了单因素指标的定性定级,明确了该区域煤层气产出水的污染等级及污染指标,在此基础上结合地质因素和工程因素初步阐明了其污染成因.

1 煤层气开发地质背景

贵州西部松河区块位于土城向斜的北翼中段(图1),地层走向大约为 $\text{NW}59^\circ$,倾向 SW ,倾角为 $20^\circ\sim 35^\circ$ 总体上呈现单斜构造.研究区主要含煤层为晚二叠世龙潭组,属于海陆过渡相地层,煤系

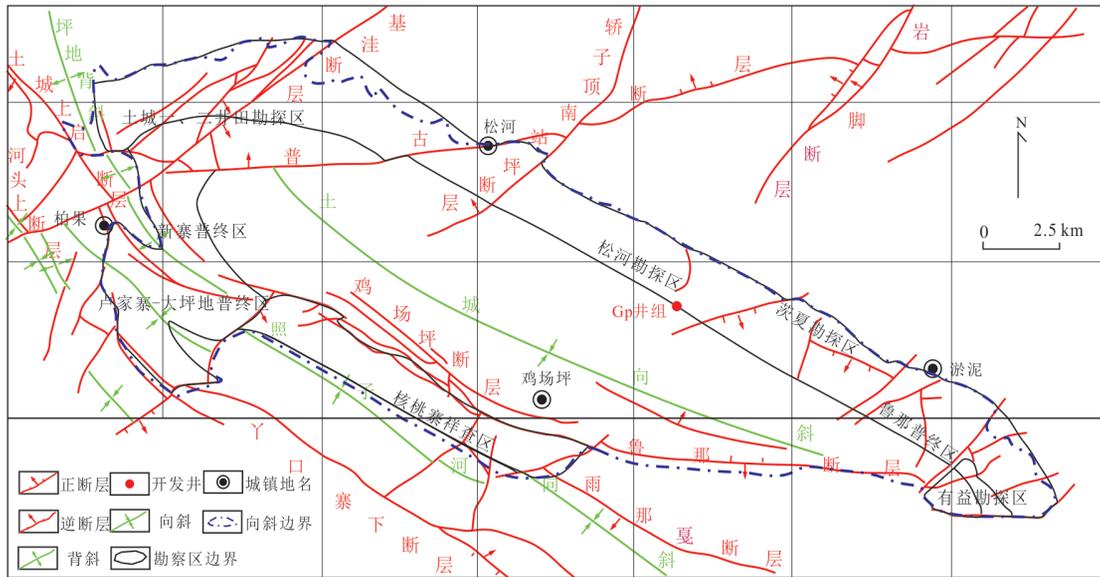


图1 土城向斜构造纲要及井位分布

Fig.1 Tuchen syncline structure outline and well location distribution

地层平均厚度可达 341 m, 具有煤层多、厚度小的特点, 平均含煤 50 层, 平均含煤总厚度 41 m, 可采煤层共 18 层, 可采总厚度 11.68 m. 煤岩最大镜质组反射率在 1.40%~1.69% 之间, 以焦煤为主, 多为半暗型, 大部分为中灰中硫煤. 煤层气含量较高, 为 6.46~20.99 m³/t, 含气饱和度大于 70%; 压力系数 1.08~1.40, 具有异常高压特征. 研究区岩浆活动基本发生在海西晚期, 集中在二叠纪时期, 岩浆岩组合为大陆溢流拉斑玄武岩及辉绿岩组合.

松河井组目前有 8 口煤层气开发试验井, 为丛式井组, 以 29-3 煤靶点标高为分析基准(图 2), GP-3 和 GP-4 井标高较高, 埋深较浅, GP-7 和 GP-8 井靶点标高较低, 埋深较大.

GP-1 和 GP-2 井 2014 年 1 月投产, GP-3~GP-8

井 2015 年 1 月投产. 所有井均采用“分段压裂, 合层排采”的开发方式, 每口井一般压裂 3 到 4 段, 每段厚度在 20 m 左右, 包含 3 层主力煤层, 压裂液注入量在 2 261.0~4 688.5 m³, 平均每口井注入液量为 3 762.96 m³, 为防止粘土膨胀, 压裂液中均加入了浓度为 1%~2% 的 KCl. 截至 2018 年 11 月, 日产量最高达到 3 000 m³ 左右, 后期稳产在 500 m³ 左右. 累计产水量为 1 400~3 300 m³ 左右, 单井平均累计产水 2 000 m³ 以上. 具体井组工程信息见表 1.

2 测试数据及研究方法

2.1 实验数据

针对松河区块 8 口开发井, 在 2018 年的 1、3、5、8、11 月份对煤层产出水分别进行了水样的跟踪采集、化验, 共 5 次. 化验内容包括常规阴阳离子和微量元素. 水样采集统一均用 2.5 L 纯净水瓶, 直接从煤层气井出水口采集水样, 塑料瓶要用所采水样冲洗 3 次, 取样时水样装满整瓶, 以保证排出瓶内全部空气, 再用瓶盖密封, 检查是否有渗漏, 最后标记取样时间和地点, 并在 72 h 内送至中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行相关检测. 测试仪器为: 阴离子检测所用仪器为戴安(ICS-90), 阳离子检测为电感耦合等离子体-发射光谱仪(美国 Vista MPX), 微量元素检测仪器为电感耦合等离子体质谱仪(NexION300 XICP-MS).

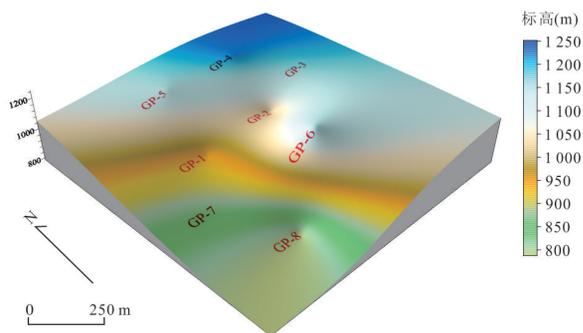


图2 松河井组 29-3 煤层顶靶点标高图

Fig.2 Elevation of coal target point 29-3 of Songhejing Formation

表1 松河煤层气井基本开发情况
Table 1 Basic development of coal bed methane wells in Songhe river

井号	井深	开发煤层	煤层总厚度 (m)	水力压裂液注入量 (m ³)	煤层气累计产量 (10 ⁶ m ³)	累计产水量 (m ³)	投产时间
GP-1	847.00	6/9/12/13/15/16/29	18.8	3 559.2	0.52	3 043.99	2014.1
GP-2	764.00	1+3/5/9/10/11/13/15/16	14.4	3 616.8	0.59	2 731.04	2014.1
GP-3	610.00	6/9/12/13/15/29	15.7	3 538.7	0.66	1 463.37	2015.1
GP-4	564.50	6/9/13/15/16/29	16	2 261.0	0.60	1 235.08	2015.1
GP-5	654.00	1+3/4/5/6/9/13/15/29	22.8	4 083.0	0.61	1 514.00	2015.1
GP-6	617.00	1+3/4/5/6/9/15/16/26/27/29	28.1	4 688.5	0.78	1 800.48	2015.1
GP-7	902.00	1+3/4/5/12/15/27/29	19.1	3 782.3	0.34	2 209.58	2015.1
GP-8	977.08	1+3/4/5/12/13/15/26/27/29	25.75	4 574.2	0.45	2 326.25	2015.1

注:GP1井2018年1月改为1+3煤排采。

2.2 环境评价方法

本文选取单因素评价法和模糊综合评价法对研究区煤层气产出水的水质进行评价。

2.2.1 单因素评价法 单因素评价法,可以针对水中的特定指标进行水质评价,具有简单性、直观性和单一性的特点。该方法是根据水质最差的单项指标的类别确定水体的总体水质类别(陈佳木等,2021)。为了评价各水体指标的污染程度,就必须要对各评价因子进行计算和分析,选取《地下水质量标准》(GB/T14848-2017) III类水质标准作为参考值,对本次研究的8口煤层气井的产出水的水质进行评价。

水质指数 A_i 的计算公式如下:

$$A_i = \frac{B_i}{C_i}, \quad (1)$$

式中, B_i 为产出水中 i 元素浓度值; C_i 为 i 元素浓度评价标准;计算 $A_i \leq 1$ 时,就认为 i 元素超过评价标准,对水体或者环境未造成污染; $A_i > 1$ 时,就认为 i 元素未达评价标准,对水体或者环境造成污染。

2.2.2 模糊综合评价法 模糊综合评价法利用模糊数学理论可对有些不容易定量的对象进行定量化处理,以表征影响因子与评价标准之间的隶属关系,根据隶属关系的不同,最终准确客观地进行关联评价。

(1)确定评价因子集。因子集中可设置 m 个评价因子,分别用 u_m 来表示,则建立的因子集 U 应满足: $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ 。

(2)确定评价集。根据评价标准设置 n 个评价等级,分别用 v_n 来表示,则建立的因子集 V 应满足: $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 。

(3)构建评价因子与评价标准集合的模糊隶属

矩阵 $R_{n \times m}$ 。

$$R = (r_{ij}) = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中, r_{ij} 表示某一组数据中因子 u_i 对等级 v_j 的隶属程度, n 表示评价等级即 $j=1,2,3,\dots,m$ 表示评价因子数 $i=1,2,3,\dots,m$ 。

根据《地下水质量标准》(GB/T14848-2017),对各水质类别的隶属程度 r_{ij} 按照下式进行计算:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & c_i \leq s_j \\ \frac{s_{j+1} - c_i}{s_{j+1} - s_j} & s_j < c_i < s_{j+1}, \\ 0 & c_i \geq s_{j+1} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: s_j 为评价因子 X_i 的第 j 类水质标准值; c_i 为评价因子 X_i 的监测值。

(4)确定评价因子的权向量 $A_{1 \times m} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_m)$ 。目前主要的赋权方法主要包含:主观赋权法、客观赋权法。其中,主观赋权法主要从定性的角度确定权重系数,评判者偏好度不同也会形成不同的评价结果,主要有直接判定法、层次分析法以及Delphi法等;客观赋权法则侧重从定量的角度确定权重,通过一定的数学方法分析研究,最终得出各评价对象的权重系数,主要有熵权法、超标倍数法以及变异系数法等(刘琰等,2013;张耀辉等,2015;朱洁等,2018;唐贺,2020)。

传统模糊综合评价法使用超标赋权法,即根据每种因子的超标程度进行归一化处理,最终得出权重矩阵 A 。本文中主要使用客观赋权法中的超标倍数法确定权重系数,能更好地表征最大污染指标对结果的作用,同时也能反映指标间的相互作用,使权重系数更加合理。本文使用《地下水

质量标准》作为评价集合,由于评价标准阈值差距不大,均值即可表征其结果,进行先行对照计算后发现,使用均值并不影响最终评价结果,且井间相对等级也保持一致,故直接采用各类水质标准限制的均值作为参数,使评价体系更为完善.

使用超标赋权法进行计算时,针对数值越小越好的评价指标,即偏小型分布指标,如 COD、TDS 等,其计算公式一般为:

$$I_i = \frac{c_i}{\bar{s}_i}, \quad (4)$$

针对数值越大越好的评价指标,即偏大型分布指标时,如 DO 等,其计算式应为:

$$I_i = \frac{\bar{s}_i}{c_i}, \quad (5)$$

式中, I_i 为一个无量纲数,表示某评价因子的实际监测值相对于水质标准超标的倍数; c_i 为评价因子 X_i 的监测值; \bar{s}_i 为评价因子 X_i 各类水质标准限值的均值.

当每个评价指标的超标比都计算完之后,将计算结果进行归一化处理,进而得出每个评价指标的权重:

$$w_i = \frac{I_i}{\sum I_i}, \quad (6)$$

由此便可求得权重集:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_m], \quad (7)$$

(5) 建立模糊综合评价模型.采用模糊算子将权重矩阵 A 和隶属矩阵进行合成计算,得到模糊综合评价结果 B .

$$B = A \times R = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_m) \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n), \quad (8)$$

式中, b_j 表示某一组评价对象综合对 j 级评价标准的隶属度,根据最大隶属度来确定最终评价结果,若 $b_j = \max(b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$ 则待评价对象的水质级别应该为第 j 类.

3 结果与结论

3.1 水化学组分特征

如表 2 和表 3 所示,煤层气井产出水中元素包括 Ba^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- . 阳离子中 Na^+ 和 K^+ 占绝对

优势,质量浓度介于 $1.859.68 \times 10^{-6} \sim 3.658.94 \times 10^{-6}$,平均值为 $2.793.86 \times 10^{-6}$,主要在 GP-6、GP-7 和 GP-8 井中表现出高浓度; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度较低,主要在 GP-1、GP-5、GP-6、GP-7 和 GP-8 井浓度较高;值得一提的是 Ba^{2+} 浓度,浓度介于 $5.417.00 \times 10^{-9} \sim 16.085.99 \times 10^{-9}$,平均浓度为 $11.039.24 \times 10^{-9}$,严重超出浓度标准,必须给予足够重视.阴离子中 Cl^- 质量浓度最为突出,在 $2.660.99 \times 10^{-6} \sim 4.869.58 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 $3.804.64 \times 10^{-6}$,在 GP-6、GP-7 和 GP-8 中浓度显著高于其他井; HCO_3^- 次之,平均值为 485.69×10^{-6} ,其他阴离子质量浓度较低. TDS 介于 $3.232.2 \times 10^{-6} \sim 4.914.6 \times 10^{-6}$ 之间,主要在 GP-5、GP-6、GP-7 以及 GP-8 井 TDS 含量较高,而 GP-1 和 GP-2 井含量较低.从超标情况来看, TDS、Ba、Cl 以及 Na 为主要超标元素,其他元素在研究区内普遍不超标,且都以 GP-6、GP-7 和 GP-8 三口井浓度最高.

借助元素之间的相关关系分析(表 4)可知, TDS 与大多数元素均呈正相关关系,其中与 Na、Cl 和 Cu 具有极强的正相关性,同时 TDS 在一定尺度上可表征水岩作用的进行程度, Cl 元素浓度异常的原因是由于大量使用混入 KCl 的压裂液;因此,笔者推测其主要来源与研究区内压裂方式及压裂液滞留有关. Fe、Al、Mn、Hg 和 Pb 等元素具有良好的相关性,可能与铁锰氧化物和氢氧化物的吸附作用有关系.

世界各地的煤层水在离子组成上都表现出相似的水化学特征,即阳离子以 Na^+ 为主,含少量的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 NH_4^+ ,阴离子以 Cl^- 、 HCO_3^- 为主,其次是少量 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 以及 SO_4^{2-} . 利用 Piper 三线图可以有效解释水文地质现象,完成对地下水归类以及地下水演变特征研究等工作.如图 3 所示,研究区水质类型表现为 Na-Cl 和 Na- HCO_3 -Cl 两种,接近压裂液水质特点,笔者推测其主要受到压裂液的影响.

研究区 8 口井数据均落于三线图 2、4、7 区(图 3 和图 4),分别指示研究区碱金属超过碱土金属、强酸超过弱酸以及非碳酸金属超过 50%.

3.2 水质评价结果

3.2.1 模糊综合评价方法 本次研究对象的 8 口煤层气开发井产出水的水质检测数据见表 2 和表 3. 利用表中的水质检测数据,并根据 2017 年我国的自然

表 2 2018 年 1~11 月份 GP 井组产出水常规阴阳离子平均质量浓度 (10⁻⁶)

Table 2 Average mass concentration (10⁻⁶) of conventional cations in produced water of GP Well Group from January to November, 2018

井号	Ca	K	Na	Mg	Sr	pH	TDS	F	Cl	SO ₄	HCO ₃
GP-1	237.90	193.91	1 665.76	24.63	14.86	6.95	3 288.60	0.57	3 059.55	0.04	123.21
GP-2	34.08	103.84	1 969.40	13.87	8.77	7.38	3 232.20	0.63	2 660.99	0.16	531.24
GP-3	21.08	132.73	2 803.51	9.76	9.37	7.60	4 024.20	0.93	3 641.42	0.23	916.84
GP-4	19.61	100.23	2 283.90	6.29	8.28	7.75	3 620.00	1.02	2 853.29	0.19	779.74
GP-5	92.86	166.75	2 532.44	18.47	14.30	7.45	4 046.20	0.55	3 777.30	0.17	390.40
GP-6	109.19	136.81	3 153.62	27.53	20.63	7.23	4 770.60	0.61	4 787.63	0.10	383.11
GP-7	64.59	456.61	3 202.33	17.36	16.96	7.40	4 914.60	0.82	4 869.58	0.36	357.21
GP-8	88.47	181.76	3 267.25	21.94	18.36	7.27	4 903.60	0.83	4 787.32	0.22	403.79

表 3 2018 年 1~11 月份 GP 井组产出水微量元素平均质量浓度 (10⁻⁹)

Table 3 Average mass concentration (10⁻⁹) of trace elements in produced water of GP Well Group from January to November, 2018

井号	As	Cr	Pd	Hg	Fe	Cu	Mn	Zn	Sb	Mo	Ni	Ba	Cd
GP-1	0.759	0.301	0.039	0.262	280.000	0.819	331.100	11.112	0.098	2.395	1.953	9 248.000	-
GP-2	0.688	0.211	0.025	0.205	20.460	0.949	23.810	5.065	0.092	23.53	0.658	5 417.000	-
GP-3	1.127	0.320	0.022	0.223	16.220	1.491	8.480	8.768	0.071	2.764	8.430	10 670.000	-
GP-4	0.832	0.282	0.019	0.181	21.490	1.168	21.200	5.729	0.068	2.709	7.687	6 936.000	-
GP-5	0.836	0.183	0.028	0.149	57.189	1.514	62.636	9.530	0.039	0.773	8.170	10 167.451	-
GP-6	1.217	0.251	0.022	0.125	58.588	2.083	172.186	13.041	0.095	3.939	1.332	14 739.729	-
GP-7	1.092	0.270	0.012	0.092	34.322	1.906	116.179	13.242	0.101	13.552	1.993	16 085.985	-
GP-8	1.252	0.294	0.017	0.177	54.187	1.751	187.594	11.908	0.075	8.910	1.843	15 049.775	-

注:“-”表示未检出。

表 4 研究区煤层气井产出水元素相关关系

Table 4 Correlation of elements in produced water of coalbed methane wells in the study area

	TDS	Cl	Na	F	Fe	Mn	Cu	Zn	Al	Hg	As	Cd	Cr	Pb
TDS	1.00													
Cl	0.98	1.00												
Na	0.97	0.92	1.00											
F	0.05	-0.08	0.13	1.00										
Fe	-0.35	-0.20	-0.53	-0.25	1.00									
Mn	0.11	0.25	-0.10	-0.27	0.87	1.00								
Cu	0.96	0.93	0.96	-0.04	-0.45	-0.04	1.00							
Zn	0.90	0.96	0.79	-0.17	0.05	0.45	0.85	1.00						
Al	-0.63	-0.53	-0.69	0.13	0.80	0.50	-0.72	-0.33	1.00					
Hg	-0.72	-0.61	-0.77	-0.08	0.80	0.47	-0.77	-0.43	0.95	1.00				
As	0.90	0.88	0.93	0.23	-0.31	0.11	0.87	0.79	-0.41	-0.50	1.00			
Cd	0.37	0.29	0.27	0.17	-0.12	0.18	0.25	0.21	-0.45	-0.47	0.15	1.00		
Cr	0.13	0.07	0.16	0.75	0.09	0.17	0.10	0.08	0.24	0.09	0.40	0.20	1.00	
Pb	-0.68	-0.57	-0.76	-0.04	0.85	0.50	-0.71	-0.34	0.93	0.94	-0.53	-0.43	0.16	1.00

资源部发布的最新《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)的第 3 类基于人体健康一般水质标准,选取 TDS、Cl、Na、F、Fe、Mn、Cu、Zn、Al、Hg、As、Cd、Cr、

Pb 这 14 种元素作为评价指标建立评价因子集(表 5),即 $U = \{Fe, Mn, Cu, Zn, Al, Hg, As, Cd, Cr, Pb\}$,并根据《地下水质量标准》分为 5 个评价等级建

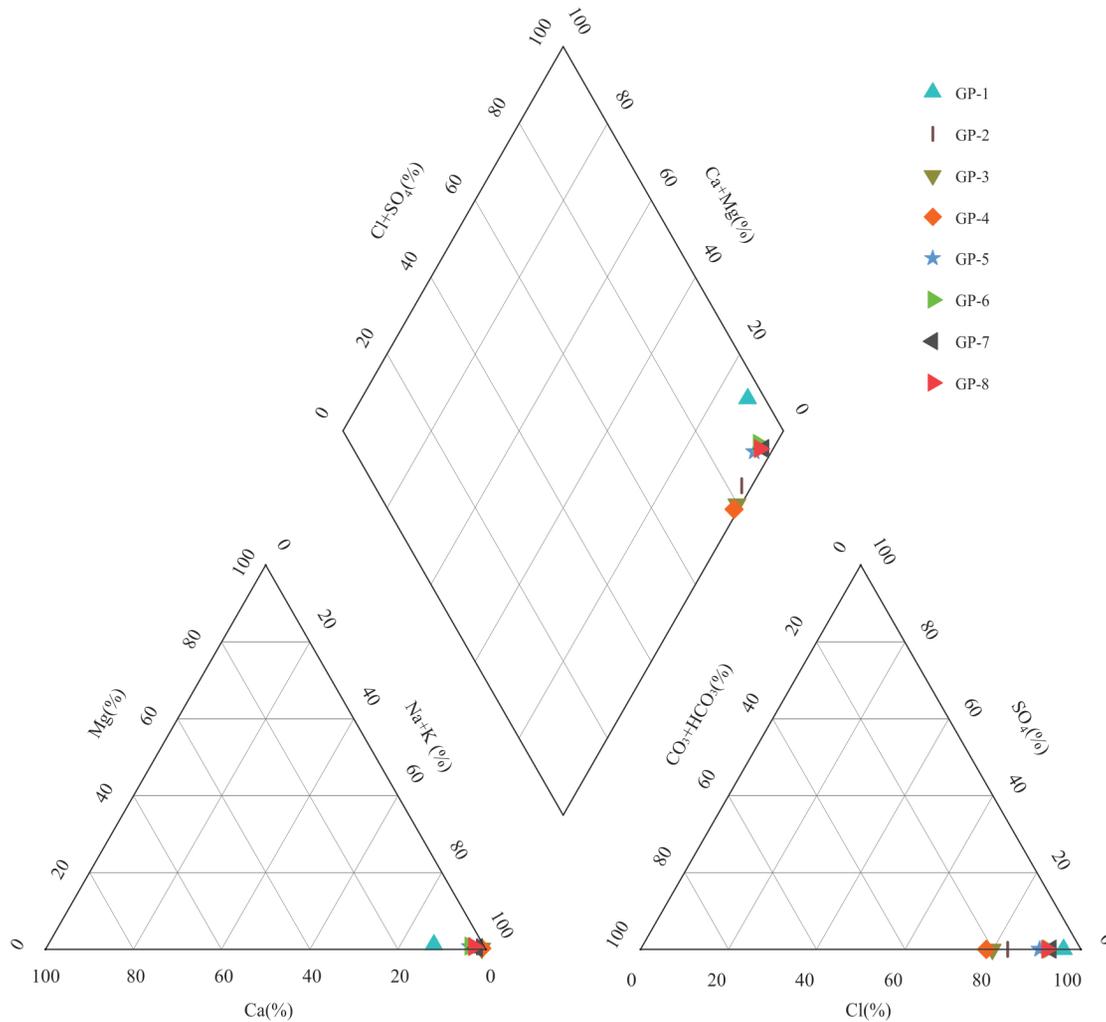


图 3 松河井组产出水三线图

Fig. 3 Three-line diagram of produced water of Songhe Well Group

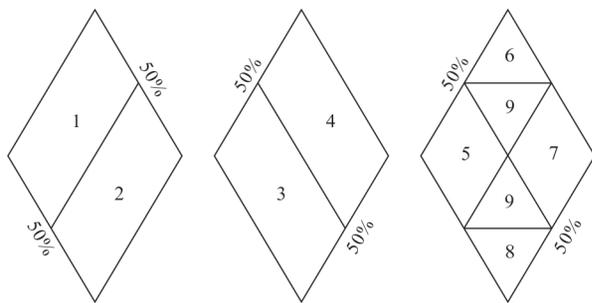


图 4 三线图菱形域分区

Fig. 4 Three-line diagram diamond domain division

立评价标准集, 即 $V = \{I, II, III, IV, V\}$, 如表 6 所示.

利用公式(2)~(8)中的模糊综合评价方法进行计算, 便可得到模糊综合评价模型集, 之后根据模糊数学的最大隶属度原则, 所得数值最大者的等级即为最终水样评定等级, 如表 7 所示.

结合表 7 列出的 8 口煤层气井产出水的模糊综合评价法的评价结果可知, 8 口煤层气井产出水的水质模糊综合评价等级均达到了 V 级, 全部显示为重度污染, 如果该井组产出水未经处理直接排放, 将会对周围的自然环境造成严重的危害. 结合模糊综合矩阵分析可知, 8 口井均表现为高 TDS、高 Na、高 Cl 异常.

由模糊关系矩阵可知, 常量元素中, Fe 离子仅在 GP-1 井产出水中接近并隶属于 III 级水质, 在其他井产出水中均表现出优于一级水质; F 离子仅在 GP-4 井产出水中显示为含量等级达 III 级, 表现出轻微程度的超标, 其他井 F 离子含量均在所参照的《地下水质量标准》(GB/T14848-2017) 中的 1 级标准以下.

根据各微量元素污染程度分级(图 5)可知, 微量元素中, Hg 元素含量在 8 口煤层气井产出水中均

表 5 GP 井组水质评价指标(10⁻⁹)

Table 5 Water Quality Evaluation Index of GP Well Group (10⁻⁹)

井号	TDS (10 ⁻⁶)	Cl ⁻ (10 ⁻⁶)	Na (10 ⁻⁶)	F ⁻ (10 ⁻⁶)	Fe (10 ⁻⁹)	Mn (10 ⁻⁹)	Cu (10 ⁻⁹)	Zn (10 ⁻⁹)	Al (10 ⁻⁹)	Hg (10 ⁻⁹)	As (10 ⁻⁹)	Cd (10 ⁻⁹)	Cr (10 ⁻⁹)	Pb (10 ⁻⁹)
GP-1	3 288.6	3 059.55	1 665.76	0.71	280.08	331.101	0.819	11.112	8.082	0.328	0.759	0.024	0.301	0.098
GP-2	3 232.2	2 660.99	1 969.40	0.63	20.46	23.810	0.949	6.331	4.102	0.205	0.688	0.024	0.211	0.041
GP-3	4 024.2	3 641.42	2 803.51	0.94	16.220	8.480	1.491	10.959	5.340	0.223	1.127	0.012	0.320	0.055
GP-4	3 620.0	2 853.29	2 283.90	1.02	21.495	21.199	1.168	7.161	3.919	0.181	0.832	0.038	0.353	0.049
GP-5	4 046.2	3 777.30	2 532.44	0.55	57.189	62.636	1.514	11.912	3.171	0.186	0.836	0.025	0.183	0.047
GP-6	4 770.6	4 787.63	3 209.70	0.62	58.588	172.186	2.083	16.302	2.734	0.155	1.217	0.030	0.314	0.037
GP-7	4 914.6	4 869.58	3 202.33	0.83	34.322	116.179	1.906	16.553	3.036	0.116	1.092	0.032	0.270	0.029
GP-8	4 903.6	4 787.32	3 267.26	0.83	54.187	187.594	1.751	14.885	3.645	0.177	1.252	0.037	0.294	0.029

表 6 地下水环境质量限值(10⁻⁶)

Table 6 Limits of groundwater environmental quality (10⁻⁶)

指标	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
TDS≤	300	500	1 000	2 000	>2 000
氯 Cl≤	50	150	250	350	>350
钠 Na≤	100	150	200	400	>400
氟 F≤	1	1	1	2	>2
铁 Fe≤	0.1	0.2	0.3	2.0	>2.0
锰 Mn≤	0.05	0.05	0.10	1.50	>1.50
铜 Cu≤	0.01	0.05	1.00	1.50	>1.50
锌 Zn≤	0.05	0.50	1.00	5.00	>5.00
铝 Al≤	0.01	0.05	0.20	0.50	>0.50
汞 Hg≤	0.000 1	0.000 1	0.001	0.002	>0.002
砷 As≤	0.001	0.001	0.01	0.05	>0.05
镉 Cd≤	0.000 1	0.001	0.005	0.01	0.01
铬 Cr≤	0.005	0.01	0.05	0.10	0.10
铅 Pb≤	0.005	0.005	0.01	0.10	0.10

表 7 松河井组水质模糊综合评价结果

Table 7 Fuzzy comprehensive evaluation results of water quality of Songhe Well Group

井号	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	所属级别
GP-1	0.024 15	0.013 01	0.029 86	0.003 48	0.929 50	V 级
GP-2	0.024 67	0.007 57	0.001 00	0	0.966 77	V 级
GP-3	0.023 44	0.007 46	0.000 95	0	0.968 15	V 级
GP-4	0.005 01	0.006 16	0.028 39	0.000 69	0.959 75	V 级
GP-5	0.016 98	0.007 60	0.001 35	0	0.974 06	V 级
GP-6	0.013 85	0.004 98	0.006 85	0.000 36	0.973 95	V 级
GP-7	0.016 85	0.004 01	0.004 64	0.000 05	0.974 44	V 级
GP-8	0.017 51	0.005 33	0.007 40	0.000 47	0.969 30	V 级

表现出接近二级水质标准,即化学组分含量较低, Hg 元素在松河井组中显示出分布范围广、含量低,未造成环境污染的特征; Mn 元素含量在 CP-1、CP-6、CP-7 和 CP-8 井产出水中均轻微超出 III 级水质标准,仍隶属于 III 级水质,为化学成分含量中等,在 CP-5

井产出水超二级水质标准,仍隶属于二级水质,其他井中显示出优于一级水质特征; As 元素在 GP-3、GP-6、GP-7 和 GP-8 中显示出超出二级水质但仍隶属于二级水质,在其他井产出水中均显示出优于一级水质的特点。

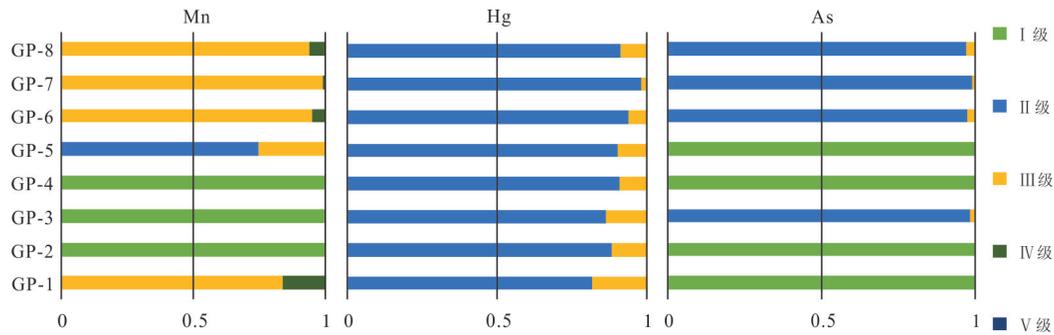


图5 Mn、Hg、As污染程度分级

Fig.5 Grading diagram of pollution degree of Mn, Hg and As

为了研究区块井组水体在全年的变化情况,笔者进一步对松河区块8口煤层气开发井不同月份水体情况进行评价,结果见表8.

综上所述,模糊综合评价结果中显示所有水体均属于V级,主要贡献评价指标为TDS、钠元素和氯元素,II级、III级和IV级的评价得分贡献主要源于Fe元素、F元素、Hg元素、Mn元素以及As元素,其他微量元素为I级评价结果得分来源.

3.2.2 单因素评价法 根据产出水的水质检测数据并结合《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)的第3类基于人体健康一般水质标准,对研究井组产出水的水质进行单因素评价,因子评价法环境质量评价分级见表9.本次8口实验井产出水的评价结果见表10.

通过对照《地下水质量标准》3类水质标准,发现8口井产出水都是由于Na元素、Cl元素和Ba元素严重超标,导致水质指数A₁都大于5,显示出5级的严重污染,溶解性总固体TDS水质指数均大于3,显示为中度污染.

但值得注意的是,本研究区内的各试验井产出水的微量元素(除了Mn、F)都在国家标准内,显示为无污染.

综合两种水质评价方法最终可知,松河井组8口煤层气井产出水的水质评价结果均属于严重污染水质,且2种方法均显示出松河井组主要水体污染来源为TDS、Cl元素、Na元素以及Ba元素,其中Ba元素在《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)中属于地下水质量非常规指标,因此未参与模糊综合评价,仅在单因子评价中有体现,但由于其元素含量远远超出评价指标,显示出严重污染的特征,也应将其列为主要污染来源.

3.3 成因探讨

煤层气产出水中元素多来自于煤层及周围地

层中,因此原始煤系地层微量元素特征将对产出水元素含量造成极大影响,高元素含量往往伴随着高地质背景.贵州多种元素较全国元素背景值处于较高水平,比值>2的元素主要有Cd、Hg、Sb,为贵州很高背景区;比值1.5~2.0的元素主要有As、Cu,为贵州高背景区;比值介于1.5~1.2的元素主要有Pb、Zn、Cr、Ni等,为贵州较高背景区(杨永忠,1999).该研究区内F、As元素与煤层中该种元素富集有关.煤层碳酸盐矿物的富集致使产出水中Ba元素含量高,Hg元素普遍存在于松河井组,且主要与含煤地层中的硫化物有关(李清光等,2019).

观察8口井产出水水质评价结果随时间变化特征(图6),其中纵坐标S为评价得分,可见:整体具有随返排时间延长,污染程度逐渐降低的趋势,然而不是很明显,且各井之间有差异.研究区采用“大排量、大液量、大砂量”的压裂方式(金军等,2022),在压裂过程中注入了大量的压裂液,排采前期产出水中压裂液占比极大,产出水水质接近压裂液,随着排采进行,产出水矿化度整体呈现缓慢降低趋势(吴丛丛,2019; Yang *et al.*, 2021),后期通过排水可将部分压裂液从储层中排出,但各井返排率存在差异,返排率低则会导致压裂液滞留,水质矿化度高.由前文可知,松河井组煤层气井产出水均受压裂液影响,导致Na元素以及Cl元素的浓度偏高,通过相关性分析得出TDS与两种元素均呈极好的正相关性,即TDS一定程度上受这两种元素的影响,也会形成数值较大的结果.

溶滤作用普遍存在于地下水流动的各个阶段之中,在溶滤作用的影响下,随作用时间增大及季节性大气降水的补给,水岩作用会增强,导致部分元素溶出量呈波动变化.8口井中,GP-1井产出水污染程度最低,水质情况最好,这与GP-1井在2018年1月重新压裂1+3号煤层,开始排采有关,即排采初

表 8 2018 年松河井组全年模糊综合评价结果

Table 8 Fuzzy comprehensive evaluation results of Songhejing Formation in 2018

月份	井号	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	所属级别
1	GP-1	0.000 79	0.008 75	0.043 28	0.021 65	0.948 85	V 级
	GP-2	0.025 20	0.007 44	0.000 17	0.000 00	0.967 19	V 级
	GP-3	0.003 83	0.009 07	0.001 42	0.000 00	0.985 67	V 级
	GP-4	0.017 81	0.009 86	0.002 59	0.000 00	0.969 74	V 级
	GP-5	0.004 82	0.008 75	0.011 14	0.000 89	0.974 40	V 级
	GP-6	0.002 51	0.007 28	0.008 05	0.000 32	0.981 85	V 级
	GP-7	0.002 13	0.007 18	0.001 73	0.000 00	0.988 96	V 级
	GP-8	0.003 02	0.007 24	0.009 70	0.000 77	0.979 26	V 级
3	GP-1	0.027 67	0.001 56	0.054 74	0.007 24	0.908 79	V 级
	GP-2	0.025 97	0.013 87	0.014 30	0.000 00	0.947 12	V 级
	GP-3	0.001 26	0.009 68	0.030 55	0.002 76	0.955 74	V 级
	GP-4	0.002 34	0.008 99	0.026 48	0.013 49	0.948 70	V 级
	GP-5	0.019 83	0.008 52	0.006 43	0.000 00	0.965 23	V 级
	GP-6	0.017 01	0.005 76	0.008 72	0.000 48	0.968 04	V 级
	GP-7	0.018 41	0.004 63	0.000 90	0.000 00	0.976 05	V 级
	GP-8	0.019 80	0.004 88	0.007 72	0.000 47	0.967 14	V 级
5	GP-1	0.025 31	0.004 21	0.020 81	0.006 04	0.943 63	V 级
	GP-2	0.023 34	0.005 92	0.000 50	0.000 00	0.970 25	V 级
	GP-3	0.023 98	0.004 70	0.000 39	0.000 00	0.970 93	V 级
	GP-4	0.003 73	0.005 05	0.024 80	0.011 88	0.954 54	V 级
	GP-5	0.018 10	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.981 90	V 级
	GP-6	0.015 72	0.000 00	0.005 81	0.000 25	0.978 22	V 级
	GP-7	0.016 92	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.983 08	V 级
	GP-8	0.016 70	0.002 96	0.005 32	0.000 19	0.974 84	V 级
8	GP-1	0.025 81	0.000 22	0.021 33	0.006 11	0.946 52	V 级
	GP-2	0.024 26	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.975 74	V 级
	GP-3	0.019 89	0.001 71	0.000 06	0.000 00	0.978 33	V 级
	GP-4	0.031 58	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.968 42	V 级
	GP-5	0.015 80	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.984 20	V 级
	GP-6	0.011 85	0.001 36	0.008 21	0.000 83	0.977 76	V 级
	GP-7	0.017 45	0.001 35	0.016 57	0.005 04	0.958 21	V 级
	GP-8	0.020 23	0.001 53	0.011 14	0.001 44	0.965 67	V 级
11	GP-1	0.033 69	0.001 60	0.000 00	0.000 00	0.964 71	V 级
	GP-2	0.024 64	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.975 36	V 级
	GP-3	0.024 14	0.001 60	0.000 03	0.000 00	0.974 24	V 级
	GP-4	0.004 79	0.001 69	0.025 16	0.007 42	0.960 94	V 级
	GP-5	0.014 79	0.001 44	0.000 17	0.000 00	0.983 61	V 级
	GP-6	0.013 10	0.001 81	0.005 11	0.000 09	0.979 88	V 级
	GP-7	0.016 45	0.001 46	0.000 06	0.000 00	0.982 03	V 级
	GP-8	0.015 54	0.005 15	0.004 85	0.000 06	0.974 40	V 级

期产水量大, 尽管初期 TDS 较高, 但由于水岩作用时间短, 煤中溶出的元素少, 污染程度较低; 而随着排采时间的增加, 水岩作用增强, 污染程度就会增

表 9 环境质量评价分级表

Table 9 Grading table of environmental quality evaluation

等级	水质指数 A_i	污染评价
1	$A_i \leq 1$	无污染
2	$1 < A_i \leq 2$	轻微污染
3	$2 < A_i \leq 3$	轻度污染
4	$3 < A_i \leq 5$	中度污染
5	$A_i > 5$	重度污染

表 10 8 口试验井产出水单因子法评价结果

Table 10 Evaluation results of produced water of 8 test wells by single factor method

井名	污染因子	评价结果	污染等级
GP-1	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	Mn, TDS	4	中度污染
GP-2	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	TDS	4	中度污染
GP-3	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	TDS	4	中度污染
GP-4	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	TDS	4	中度污染
	F	2	轻度污染
GP-5	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	TDS	4	中度污染
GP-6	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	TDS	4	中度污染
	Mn	2	轻度污染
GP-7	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	TDS	4	中度污染
GP-8	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ba	5	重度污染
	TDS	4	中度污染
	Mn	2	轻度污染

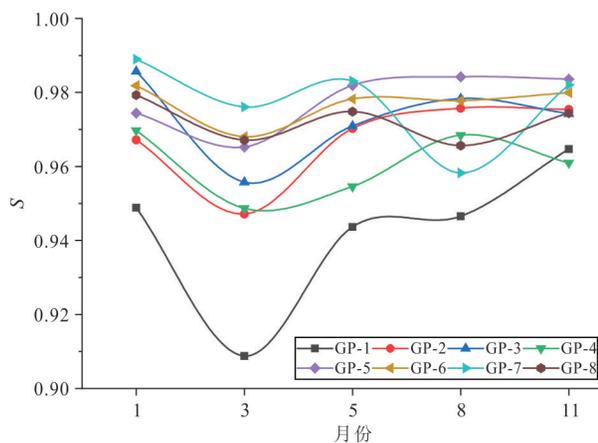


图 6 2018 年 8 口井产出水模糊综合评价结果

Fig.6 Fuzzy comprehensive evaluation results of produced water of 8 wells in 2018

强.此外,8口井均呈现出3月份污染程度最低的现象,并在后续的月份中整体呈上升趋势,这与2017年的水质变化趋势较为一致(Yang *et al.*, 2021).笔者推测其原因与季节性降水有关,研究区属于大陆季风气候,雨水在5~10月相对集中,在多雨季节,大气降水急剧增加,极大地补充了地下水,使水岩作用更加强烈,使得原本富集于煤系地层中的各类元素溶入水中,最终导致产出水微量元素的增高,水质随之下降.

综上所述得出,研究区煤层气井产出水污染等级高且随时间变化而波动变化,是地质因素、工程因素叠加影响的耦合结果.地层中各种元素富集的高地质背景为根本影响因素,控制着微量元素的种类和含量.煤储层改造过程中加入的大量KCl是造成产出水高TDS、 Na^+ 、 Cl^- 的主要原因.同时返排率较低、压裂液滞留和季节性降水造成水岩作用强烈,煤系地层中的一些富集元素溶解产出,比如Ba元素等.以上综合影响了煤层气井产出水的污染等级.

4 结论

以贵州西部松河井组8口煤层气井为例,结合模糊综合评价法以及单因子评价法,对2018年5批次煤层气井产出水进行评价,并作出成因分析,得到以下结论:

(1)煤层气井产出水地球化学特征主要表现为 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 浓度高,矿化度较高,产出水型为Na-Cl和Na- HCO_3 -Cl两种.整体上表现出GP-1和GP-2元素含量较低,GP-6、GP-7和GP-8元素含量较高.

(2)基于2017年中国的国土资源部发布的最新《地下水质量标准》(GB/T14848-2017),采用模糊综合评价法计算得出8口煤层气井产出水均属于V级重度污染,并得出主要污染指标为TDS、 Na^+ 以及 Cl^- ,Fe仅在GP-1井产出水中接近并隶属于Ⅲ级水质,在其他井产出水中均表现出优于一级水质, Mn^{2+} 含量在CP-1、CP-6、CP-7和CP-8井产出水中均轻微超出Ⅲ级水质标准,仍隶属于Ⅲ级水质, F^- 在GP-4井中表现出轻微超标,Hg和As普遍存在于松河井组煤层气井产出水中,但均未达到污染指标,其评价结果在该研究区具有参考意义.污染程度在一定范围内随时间变化表现出轻微波动,其中GP-1井产出水污染程度最低,水质优于其他井产出

水,8口井产出水均在3月份达到污染最低值.在此评价结果的基础上,使用《地下水质量标准》的第3类基于人体健康一般水质标准为计算准值进行单因子分析,进一步得出主要污染元素应包含Ba,其他元素评价结果与模糊综合评价法一致.

(3)研究区煤层气井产出水污染受多因素叠加影响,地层中各种元素富集的高地质背景为根本影响因素,控制着微量元素的含量和种类,其次压裂液返排率低及排水量的增减等工程活动也有显著作用,水岩作用作为微量元素的溶出机制在全过程中起着关键性作用,降水则加强水岩作用,促进了元素的溶出.

References

- Ao, C. H., Zhong, J. S., Zhao, M., et al., 2020. Evaluation on Water Quality Evaluation of Baihua Lake Based on Fuzzy Comprehensive Method and Grey Correlation Method. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 40 (1): 116–122, 129 (in Chinese with English abstract).
- Bao, J. H., Huang, Y., 2008. A Renew on Comprehensive Evaluation Methods of Water Quality. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 14(8): 639–642 (in Chinese with English abstract).
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., et al., 1970. A Water Quality Index—Do We Dare. *Water and Sewage Works*, 117(10): 339–343.
- Chen, J. M., Wu, Z. H., Liu, W. H., et al., 2021. Heavy Metal Pollution Evaluation and Species Analysis of Waste Rock Piles in Shuikoushan, Hunan Province. *Earth Science*, 46(11): 4127–4139 (in Chinese with English abstract).
- Dai, S. F., Ren, D. Y., Ma, S. M., 2004. The Cause of Endemic Fluorosis in Western Guizhou Province, Southwest China. *Fuel*, 83(14–15): 2095–2098. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.03.016>
- Deng, J. L., 1984. Theory and Method of Socio-Economic Grey System. *Social Sciences in China*, (6): 47–60 (in Chinese with English abstract).
- Ding, S. L., 2001. Introduction to Environmental Assessment. Chemical Industry Press, Beijing, 88 (in Chinese).
- Fang, H. W., Sun, S. Q., Zhu, Y. L., et al., 2009. Principal Component Analysis Apply in Water Quality Assessment. *Environmental Science and Management*, 34(12): 152–154 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. B., Qiu, G. L., 2008. Mercury Pollution in Guizhou, Southwestern China: An Overview. *Science of the Total Environment*, 400(1–3): 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.016>

- org/10.1016/j.scitotenv.2008.05.040
- Jiang, L., Liu, C. Y., Wang, H. J., et al., 2021. Domestic and Foreign Environmental Management of Shale Gas Development: Status and Comparison. *Natural Gas Industry*, 41(12):146–155 (in Chinese with English abstract).
- Jin, J., Yang, Z. B., Qin, Y., et al., 2022. Progress, Potential and Prospects of CBM Development in Guizhou Province. *Journal of China Coal Society*, 47(11): 4113–4126 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. G., Wu, P., Gu, S. Y., et al., 2019. Pollution Characteristics of Toxic and Harmful Elements and Its Environmental Impact in Water Co-Produced from Coalbed Methane Wells in the CBM Development Block in Western Guizhou. *Earth Science*, 44(9): 2862–2873 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. D., Fei, B., Feng, Q. Y., et al., 2018. Effects of Coalbed Methane Co-Produced Water for Irrigation in China's Qinshui Basin: An Experimental Field Study. *Mine Water and the Environment*, 37(2): 263–271. <https://doi.org/10.1007/s10230-018-0536-y>
- Liu, H. H., Sang, S. X., Cao, L. W., et al., 2014. Heavy Metal Pollution Feature Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of the Coalbed Methane Production on the Topsoil Quality of the Mining Area. *Journal of Safety and Environment*, 14(3): 288–293 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Ji, Z. Y., Liu, S. J., et al., 2020. Application and Comparison of Three Methods in Water Quality Evaluation of Plateau Lakes. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (2): 166–174 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Zheng, B. H., Fu, Q., et al., 2013. Application of Water Pollution Index in Water Quality Assessment of Rivers. *Environmental Monitoring in China*, 29(3): 49–55 (in Chinese with English abstract).
- Majee, U., Chattopadhyay, G. N., Chaudhury, S., 2018. Qualitative Assessment of Coal Bed Methane Produced Water for Developing Safe Disposal Strategies. *Environmental Earth Sciences*, 77(15): 558. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7736-4>
- Peng, X. Y., Zhou, L. C., Wu, W. H., et al., 2021. Application Analysis of Water Pollution Index Method in Water Quality Evaluation for the Tributary of Xiangjiang River in Changsha City. *Sichuan Environment*, 40(2): 172–177 (in Chinese with English abstract).
- Qi, L., Gao, J. F., 2008. Revisiting Platinum Group Elements of Late Permian Coals from Western Guizhou Province, SW China. *International Journal of Coal Geology*, 75(3): 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.05.007>
- Sun, L. R., Rao, W., Liu, W. S., 2022. The Impact Assessment and Study of ²²⁶Ra Radioactivity in Shale Gas Flowback Water in the Southern Sichuan Basin. *Environmental Impact Assessment*, 44(2): 44–48, 53 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H., 2020. Application of Improved Grey Relational Analysis in Groundwater Evaluation. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 38(8): 51–53, 72 (in Chinese with English abstract).
- Wen, C. S., Yu, Z. S., Liu, X. C., et al., 2014. Progress in the Research on the Water Quality Characteristics and Treatment Technologies of Coal Bed Methane Produced Effluent. *Industrial Water Treatment*, 34(10): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. C., 2019. Geochemical Characteristics and Response of Produced Water from Cbm Wells in Western Guizhou (Dissertation). China University of Mining and Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. M., Yu, Y. X., Liang, R., et al., 2018. Environment Impact Appraisal (EIA) for Shale Gas Development in China: Present Status, Existing Issues and Proposals. *Natural Gas Industry*, 38(8): 119–125 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M., Ju, Y. W., Liu, G. J., et al., 2013. Geochemical Characters of Water Coproduced with Coalbed Gas and Shallow Groundwater in Liulin Coalfield of China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 87(6): 1690–1700. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12169>
- Yang, Y. Z., 1999. The Geochemistry of Anomalous Elements in the Environment of Guizhou. *Guizhou Geology*, 16(1): 66–72 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. B., Qin, Y., Wu, C. C., et al., 2019. Geochemical Response of Produced Water in the CBM Well Group with Multiple Coal Seams and Its Geological Significance—A Case Study of the Songhe Well Group in Western Guizhou. *International Journal of Coal Geology*, 207: 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.03.017>
- Yang, Z. B., Qin, Z. H., Wang, G. C., et al., 2021. Environmental Effects of Water Product from Coalbed Methane Wells: A Case Study of the Songhe Well Group, Western Guizhou, China. *Natural Resources Research*, 30(5): 3747–3760. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09866-w>
- Yang, Z. B., Zhang, Z. G., Qin, Y., et al., 2018. Optimiza-

- tion Methods of Production Layer Combination for Coalbed Methane Development in Multi-Coal Seams. *Petroleum Exploration and Development*, 45(2): 312–320. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(18\)30034-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(18)30034-X)
- Zhang, D. Y., Zhu, J., Zhao, X. L., et al., 2018. Dynamic Evaluation and Availability Analysis of Coalbed Methane Resources in China. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1598–1604 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.H., Guo, R., Hu, R., et al., 2015. Comprehensive Evaluation of Groundwater Quality Based on AHP. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 34(6): 17–22 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J., Lian, X. Z., Ke, A. Y., et al., 2018. Application of Fuzzy Synthetic Evaluation Method in Nanxi River Water Quality Evaluation. *Zhejiang Hydrotechnics*, 46(6): 8–13, 28 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 敖成欢, 钟九生, 赵梦, 等, 2020. 基于模糊综合法和灰色关联法的百花湖水质评价. *水土保持通报*, 40(1): 116–122, 129.
- 保金花, 黄勇, 2008. 水质综合评价方法研究综述. *水利科技与经济*, 14(8): 639–642.
- 陈佳木, 吴志华, 刘文浩, 等, 2021. 湖南水口山多金属矿区废石堆重金属污染评价及赋存形态分析. *地球科学*, 46(11): 4127–4139.
- 邓聚龙, 1984. 社会经济灰色系统的理论与方法. *中国社会科学*, (6): 47–60.
- 丁桑岚, 2001. 环境评价概论. 北京: 化学工业出版社, 88.
- 方红卫, 孙世群, 朱雨龙, 等, 2009. 主成分分析法在水质评价中的应用及分析. *环境科学与管理*, 34(12): 152–154.
- 江丽, 刘春艳, 王红娟, 等, 2021. 国内外页岩气开发环境管理现状及对比. *天然气工业*, 41(12): 146–155.
- 金军, 杨兆彪, 秦勇, 等, 2022. 贵州省煤层气开发进展、潜力及前景. *煤炭学报*, 47(11): 4113–4126.
- 李清光, 吴攀, 顾尚义, 等, 2019. 黔西某煤层气开发区块产出水有毒有害元素污染特征及其环境效应. *地球科学*, 44(9): 2862–2873.
- 刘会虎, 桑树勋, 曹丽文, 等, 2014. 煤层气生产区重金属污染特征及其潜在生态危害. *安全与环境学报*, 14(3): 288–293.
- 刘宇, 吉正元, 刘淑娟, 等, 2020. 三种方法在高原湖泊水质评价中的应用与比较. *海洋湖沼通报*, (2): 166–174.
- 刘琰, 郑丙辉, 付青, 等, 2013. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究. *中国环境监测*, 29(3): 49–55.
- 彭小玉, 周理程, 吴文晖, 等, 2021. 水污染指数法在湘江长沙段支流水质评价中的应用分析. *四川环境*, 40(2): 172–177.
- 孙灵如, 饶维, 刘文士, 2022. 川南页岩气压裂返排液²²⁶Ra放射性影响评估与研究. *环境影响评价*, 44(2): 44–48, 53.
- 唐贺, 2020. 改进灰色关联分析法在地下水评价中的应用. *东北水利水电*, 38(8): 51–53, 72.
- 温彩哨, 余志晟, 刘新春, 等, 2014. 煤层气产出水水质特征及处理技术研究进展. *工业水处理*, 34(10): 1–6.
- 吴丛丛, 2019. 贵州西部煤层气井排采水地球化学特征及其响应(硕士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.
- 杨德敏, 喻元秀, 梁睿, 等, 2018. 我国页岩气开发环境影响评价现状、问题及建议. *天然气工业*, 38(8): 119–125.
- 杨永忠, 1999. 贵州环境异常元素地球化学研究. *贵州地质*, 16(1): 66–72.
- 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等, 2018. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析. *煤炭学报*, 43(6): 1598–1604.
- 张耀辉, 郭瑞, 胡蕊, 等, 2015. 基于层次分析法的地下水水质综合评价. *兰州交通大学学报*, 34(6): 17–22.
- 朱洁, 连新泽, 柯爱英, 等, 2018. 模糊评价法在楠溪江水质评价中的应用. *浙江水利科技*, 46(6): 8–13, 28.