

文章编号: 1001-1986(2015)01-0072-04

# 枣园区块煤层气井产出水化学特征及动态变化规律

朱卫平<sup>1</sup>, 唐书恒<sup>2</sup>, 吕建伟<sup>2</sup>, 韩继凡<sup>1</sup>, 张海霞<sup>1</sup>, 徐建红<sup>1</sup>

(1. 中国石油吐哈油田公司, 新疆 哈密 839009; 2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083)

**摘要:** 沁水煤层气田枣园区块煤层气开采井产出的水具有高盐度、高矿化度的特点, 直接排放可能会造成生态环境的破坏。通过连续跟踪采集枣园区块煤层气井产出水样品, 并进行了 25 项物理化学参数的系统测试, 分析了矿化度及各种阴、阳离子的动态变化规律。发现其矿化度、氯离子、钠离子浓度均呈现先高后低的变化趋势, 而碳酸氢根离子的变化规律相反, 呈现先低后高的特点。水化学类型呈现由 Cl—Na 型向 Cl•HCO<sub>3</sub>—Na 型和 HCO<sub>3</sub>•Cl—Na 型变化的规律。产出水中阳离子以 K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup> 离子为主, 阴离子 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 值较为接近, 不存在明显占绝对优势的离子。依据产出水中各离子的变化特点, 依据国家 II 类地表水标准, 采用回归分析方法, 建立了氯离子浓度排采动态变化模型。研究成果为煤层气井产出水处理技术提供了依据。

**关键词:** 煤层气井; 产出水; 水质; 动态变化; 枣园区块

**中图分类号:** P641.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2015.01.015

## The characteristics and dynamic changes of produced water from coalbed methane wells in Zaoyuan block

ZHU Weiping<sup>1</sup>, TANG Shuheng<sup>2</sup>, LYU Jianwei<sup>2</sup>, HAN Jifan<sup>1</sup>, ZHANG Haixia<sup>1</sup>, XU Jianhong<sup>1</sup>

(1. Tuha Oilfield Company, CNPC, Hami 839009, China;

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The produced water from CBM well in Zaoyuan block of Qinshui CBM field is characterized by high salinity and high mineralization. direct discharge may damage the ecologic environments. Based on the continuous tracking collection of the produced water samples of CBM wells and the systematically testing 25 physical and chemical parameters, the dynamic changes of the salinity and various anions and cations were analyzed. The results show that the concentration of salinity, chloride ion and sodium ion change from high to low, but the concentration of bicarbonate ion changes conversely with the trend from low to high. The water changes from Cl—Na type to Cl•HCO<sub>3</sub>—Na type and HCO<sub>3</sub>•Cl—Na type. The cations are mainly K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> ions, and there is no obvious dominant anions, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Cl<sup>-</sup> values are close in the produced water. According to the changes of the ions, the model of chloride ion concentration in the water was established using nonlinear regression analysis.

**Key words:** CBM wells; produced water; water quality; dynamic change; Zaoyuan block

自 20 世纪 90 年代中国开始进行煤层气资源勘探和地面开发试验以来, 沁水盆地南部地区始终是我国煤层气勘探工作的重中之重<sup>[1-4]</sup>。但沁水煤层气田枣园区块煤层气井产出水具有高盐度、高矿化度的特点, 直接排放可能会造成生态环境的破坏。开展煤层气井产出水特征及动态变化规律研究, 将为建立合理有效的产出水处理技术提供依据。

本文以沁水煤层气田枣园区块 MB 井组为基

础, 选取了 MB-01、MB-02、MB-03、MB-04 共 4 口井为对象, 进行连续跟踪取样, 开展了包括矿化度、钾钠离子、钙离子、镁离子、氯离子、碳酸氢根离子、硫酸根离子等在内的 25 项物理化学参数的系统测试, 分析了其变化规律。

### 1 地质背景

沁水煤层气田枣园区块, 面积 51.46 km<sup>2</sup>, 位于

收稿日期: 2013-10-01

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05034-003); 国家自然科学基金项目(40972108)

作者简介: 朱卫平(1980—), 男, 湖南益阳人, 硕士, 从事非常规天然气地质与开发工程研究。

E-mail: zhuweiping1001@163.com

引用格式: 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.

山西省东南部。枣园区块处于沁水盆地南部向西北倾的斜坡带上, 总体为一走向北北东、倾向北西的单斜构造, 地层平缓, 煤层分布稳定, 伴生少量隐伏的小断层, 总体来讲地质构造较简单。

区内主要含煤地层为石炭系上统太原组( $C_{3t}$ )和二叠系下统山西组( $P_{1s}$ ), 主要可采煤层气煤层为山西组 3 号和太原组 15 号煤层<sup>[5-9]</sup>。

## 2 产出水离子变化规律

### 2.1 矿化度变化规律

根据化验所得到的矿化度数据, 其数值较高, 最高值接近 5 700 mg/L, 最小值也在 1 000 mg/L 以上。

MB 井组在排采初期即取样化验, 除 MB-01 井之外, 其余 3 口井的变化趋势一致, 排采前三个月矿化度数值明显下降, 随后处于缓慢下降的变化过程, 变化斜率基本相似。MB 井组 4 口井在排采初期矿化度值比较接近, 介于 3 500~4 500 mg/L; 其中 MB-01 井排采首月与其他 3 井一样, 离子浓度下降, 之后显著上升并维持了 30 d 左右, 排采到第 90 d 时, 其矿化度值迅速下降至其余 3 口井的水平且变化趋势相同(图 1)。

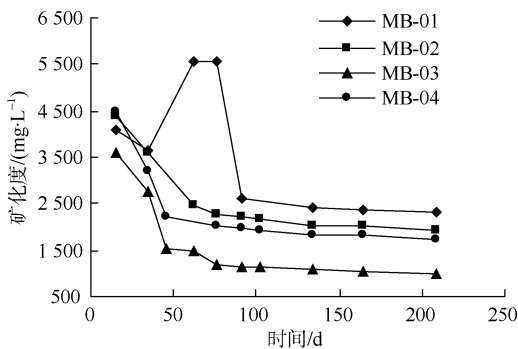


图 1 MB 井组煤层气井产出水矿化度变化趋势

Fig.1 The salinity variation tendency of produced water from MB well group

### 2.2 氯离子变化规律

由图 2 可以看出, 除 MB-01 井外, 其余 3 口井产出的水氯离子浓度变化趋势相同, 在前三个月浓度急剧下降, 之后趋于平稳下降的过程。在排采达到 100 d 左右时, 有 2 口井的氯离子浓度均值下降到 500 mg/L 之下。在排采到第 140 d 左右, MB-03 井氯离子浓度下降到了 200 mg/L 之下。MB-01 井氯离子浓度与其矿化度变化趋势一样, 首月明显下降, 之后迅速上升至较高值, 并维持了约 1 月, 之后突然下降至与其余 3 口井相近的数值区, 但数值比其余 3 口井稍高。

### 2.3 $HCO_3^-$ 变化规律

由图 3 可以看出, MB 井组 4 口井产出水  $HCO_3^-$  离子浓度变化趋势相同, 在排采初期均较低, 只有

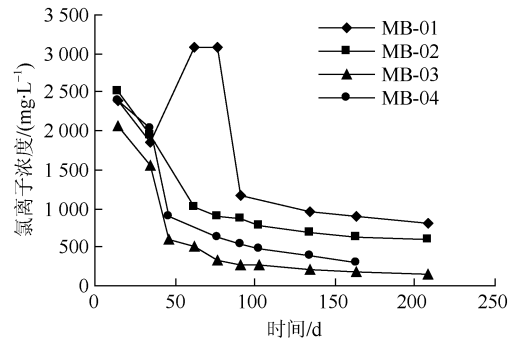


图 2 MB 井组煤层气井产出水氯离子变化趋势

Fig.2 The variation tendency of chloridion of produced water from MB well group

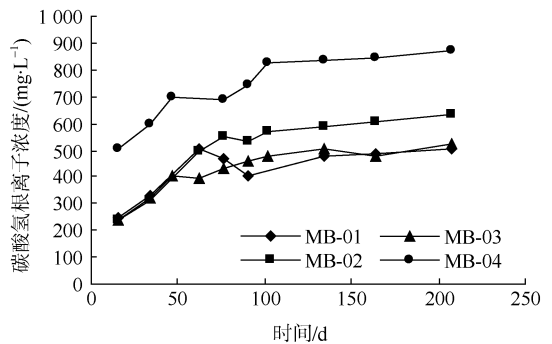


图 3 MB 井组煤层气井产出水  $HCO_3^-$  变化趋势

Fig.3 The variation tendency of  $HCO_3^-$  of produced water from MB well group

240 mg/L 左右, 最高值也只有 500 mg/L, 而后趋于逐步上升的过程, 期间个别点出现小幅降低。在排采达到 130 d 左右时, 3 口井的  $HCO_3^-$  离子浓度均值在 450~600 mg/L, 最高值超过 800 mg/L。

### 2.4 $Na^+$ 变化规律

剔除 MB-01 井第 3 和第 4 个数据点外, 4 口井产出水  $Na^+$  离子浓度变化趋势相同(图 4), 排采初期均较高, 在 1 000~1 300 mg/L, 之后逐步下降, 排采前三个月下降趋势比较明显, 中期之后下降幅度较小, 处于一个比较平稳的状态。在排采达到 130 d 左右时, 4 口井的  $Na^+$  离子浓度均值在 300~800 mg/L。

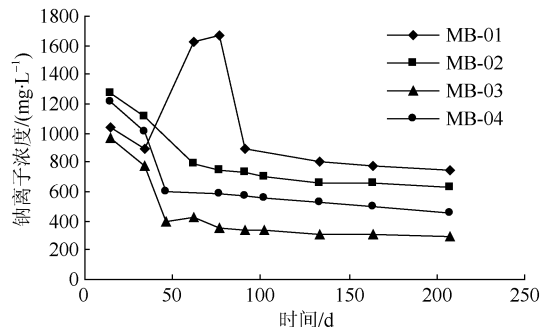


图 4 MB 井组煤层气井产出水钠离子变化趋势

Fig.4 The variation tendency of sodion of produced water from MB well group

### 2.5 其他离子变化规律

其他离子主要是钙、镁离子和硫酸根离子。其变化规律为：钙、镁离子，4 口井化验得出的钙镁离子浓度均较低，一般小于 14 mg/L；硫酸根离子，4 口井化验得出的硫酸根离子浓度均较低，一般小于 35 mg/L。

### 3 水型动态变化规律

MB 井组中 MB-03、MB-04 井前期呈现为 Na—Cl 水型，中期为 Cl•HCO<sub>3</sub>—Na 水型，后期呈现为 HCO<sub>3</sub>•Cl—Na 水型；MB-01 井主要呈现为 Cl—Na 水型；MB-02 井排采初期呈现为 Cl—Na 水型，后期为 Cl•HCO<sub>3</sub>—Na 水型。柿庄南 4 口井阳离子主要为 K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>离子，而阴离子主要是 Cl<sup>-</sup>，只有 MB-03、MB-04 井 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 Cl<sup>-</sup>值较为接近。

本文以时间为主线，MB 井组的水型整体变化情况由 Aquachem 软件中的 Stiff 图形可以清晰地体现出来。在排采初期，MB 井组水型表现为 Na—Cl 水型，Aquachem 软件中的 Stiff 图呈上宽下窄的漏斗状，如图 5a 所示，这一阶段的持续时间一般为 4~6 个月；在排采的中期，MB 井组水型表现为 Cl•HCO<sub>3</sub>—Na 水型或者 HCO<sub>3</sub>•Cl—Na，Stiff 图形如图 5b、5c 所示，这一阶段的持续时间大约为 6~8 个月；在排采的中后期，水型以 Na—HCO<sub>3</sub> 或 Cl•HCO<sub>3</sub>—Na 为主。Aquachem 软件中的 Stiff 图形呈图 5d 所示形状。

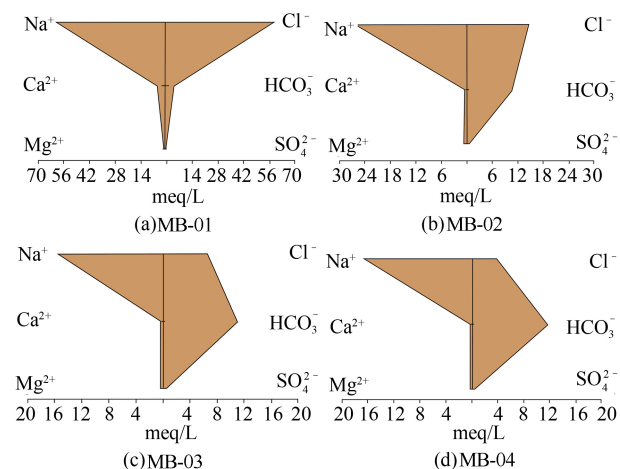


图 5 MB 井组煤层气井产出水化学成分 Aquachem 软件 Stiff 图形

Fig.5 The stiff graph of chemical composition of produced water from MB wells

### 4 氯离子浓度排采动态变化模型

枣园区块煤层气产出水物理性质见表 1。但是，由于钻井液的影响<sup>[10]</sup>，开采初期具有较高的矿化度和盐度，为了保护环境，本文以国家 II 类地表水标

准<sup>[11]</sup>为参照(表 2)，进行煤层气井产出水的水质变化分析。

表 1 2010 年 7 月枣园区块煤层气井产出水的物理性质  
Table 1 Physical property of produced water of CBM wells in Zaoyuan block, July, 2010

指标	井号			
	MB-01	MB-02	MB-03	MB-04
气 味	无	无	无	无
口 味	微咸	无	无	无
色 度	无	无	无	无
透明度	透明	透明	透明	透明
浑浊度	无	无	无	无
悬浮物	无	无	无	无

表 2 国家 II 类地表水水标准主要离子限定要求  
Table 2 The restriction for major ions under national drinking water standard

离子	标准值 (/(mg·L <sup>-1</sup> ))	离子	标准值 (/(mg·L <sup>-1</sup> ))
硫酸盐(以 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 计)	250	锰	0.1
氯化物(以 Cl <sup>-</sup> 计)	250	铜	0.06
硝酸盐(以 N 计)	10	锌	0.05
铁	0.3	砷	0.03

枣园区块煤层气井产出水经水质化验显示，不含国家 II 类地表水标准中所严格要求的铁、锰、铜、锌、砷等阳离子，标准中严格要求的阴离子硝酸盐(以 N 计)、硫酸盐(以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 计)远低于国家 II 类地表水标准的限定值。唯有氯化物(以 Cl<sup>-</sup>计)浓度在排采前期远高于国家 II 类地表水标准，并随着排采时间的增加而降低，枣园区块煤层气井产出水中氯化物的变化趋势见图 2。

可以发现，随着排采时间的增加，枣园区块煤层气井产出水中氯离子浓度，由初期远高于国家 II 类地表水标准，逐渐降低并向 II 类地表水标准接近，最后完全达到 II 类饮用水标准。因此，建立起煤层气井产出水中氯离子浓度与排采时间的关系模型，对于煤层气井产出水的处理具有重要意义。

本文利用回归分析方法对氯离子浓度进行分析。回归分析法是以统计回归概念为基础，采用多种类型的回归方法建立预测方程。它不仅可以提供变量之间相互关系的数学表达式，而且还可以利用概率统计知识对此关系进行分析，以判别其有效性；还可以利用关系式，由一个或多个变量值，预测和控制另一个因变量的取值，进一步可以知道这种预测和控制达到了何种程度，并进行因素分析<sup>[12]</sup>。在

应用回归分析法时, 一般用 Newton 迭代法求解此正规方程组。也可以直接极小化残差平方和, 求出未知参数  $\theta$  的非线性最小二乘估计值  $\tilde{\theta}$ 。在实际应用中, 可以采用 SPSS 软件直接求出未知参数  $\theta$  的非线性最小二乘估计值  $\tilde{\theta}$  [13]。根据回归分析方法的原理, 以 MB-03 为例, 采用 SPSS 软件来进行函数的计算和模型建立。初步判定氯离子浓度变化的模型为  $f(x)=b_0b_1^x$ , 随机给定初值  $b_0=2\ 420$ ,  $b_1=0.99$ , 经过 14 次迭代后收敛。从计算结果来看(图 6), 模型的相关系数  $R^2=0.94$ , 说明非线性回归拟合效果较好。因而可以得到该井氯化物(以 Cl<sup>-</sup>计)浓度的变化模型为:

$$f(x)=b_0b_1^x=3206\times 0.973^x$$

同理, 可计算其余 3 口井模拟计算数据, 模型相关参数见表 3。

根据上述数学模型可以预测煤层气井产出水水质达到国家标准所要求的时间(表 3), 在这个时间点之前, 产出水必须进行处理才能进行排放, 否则会对周围环境和地表水源产生污染。

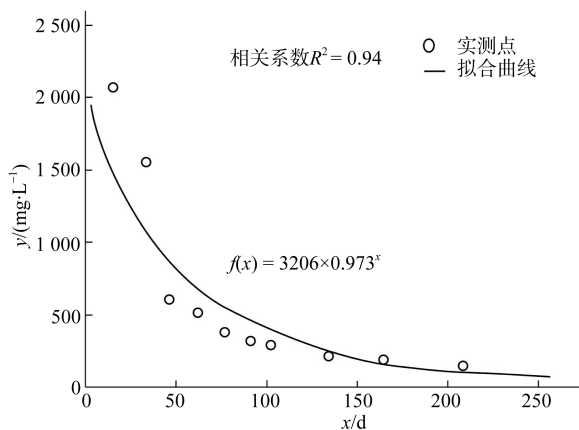


图 6 MB-03 井氯离子浓度与时间的关系

Fig.6 The relation between concentration of chloridion and production time from well MB-03

表 3 枣园区块氯离子浓度排采动态模型参数

Table 3 The parameters in production dynamic model of chloridion concentration in Zaoyuan area

	$b_0$	$b_1$	$R^2$	排采达标时间/d
MB-01	2 429	0.993	0.939	325
MB-02	2 855	0.988	0.899	262
MB-03	3 206	0.973	0.940	94
MB-04	3 268	0.989	0.923	257

## 5 结论

a. 各煤层气井产出水的矿化度和氯离子、钠离子浓度, 均随着排采时间的增长呈现由高到低的变化趋势, 而碳酸氢根离子的变化规律相反, 呈现先低后高的特点。

b. 水型呈现由 Cl—Na 水型向 Cl•HCO<sub>3</sub>—Na 水型、HCO<sub>3</sub>•Cl—Na 水型或 HCO<sub>3</sub>—Na 水型变化的规律。

c. 建立了氯离子浓度变化与排采时间的非线性回归分析模型。采用该模型可以较好地预测氯离子浓度达到国家 II 类饮用水标准所需的时间, 为煤层气井产出水的技术处理提供了参考依据。

## 参考文献

- [1] 赵庆波, 田文广. 中国煤层气勘探开发成果与认识[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 16-18.
- [2] 高远文, 姚艳斌. 我国煤层气产业现状及开发模式探讨[J]. 资源管理, 2008, 10(2): 90-92.
- [3] 赵生才. 中国天然气资源与发展战略[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 144-148.
- [4] 李景明, 巢海燕, 李小军, 等. 中国煤层气资源特点及开发对策[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 9-14.
- [5] 周宝艳, 傅雪海, 秦勇, 等. 河东煤田水文地质条件与煤层气的关系[C]//煤层气勘探开发理论与实践. 北京: 石油工业出版社, 2007: 70-77.
- [6] 接铭训. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 1-6.
- [7] 赵庆波. 煤层气地质与勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [8] 刘新社, 席胜利, 周焕顺. 鄂尔多斯盆地东部上古生界煤层气储层特征[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(1): 37-40.
- [9] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 143-144.
- [10] 李忠城, 唐书恒, 王晓锋, 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): 434-439.
- [11] 国家环境保护总局. GB3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 2003.
- [12] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2007.
- [13] 朱卫平, 唐书恒, 王晓锋, 煤层气井产出水中离子浓度变化的预测模型研究[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(5): 34-36.

(责任编辑 张宏)