

文章编号: 1001-1986(2017)02-0050-05

# 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

徐占杰, 刘钦甫, 宋 璞, 姬景超, 毋应科

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 根据产出水的矿化度、离子类型和离子质量浓度化验结果,采用水化学、单因子方差分析等方法,研究了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,对陷落柱地区煤层气的勘探开发具有参考价值。寺家庄井田煤层气井产出水的平均矿化度为 1 484 mg/L,属微咸水,  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  型。2014 年 4 月和 8 月采集的井田北部煤层产出水样平均矿化度较南部高,陷落柱在井田北部较发育,蒸发作用较强,可能是导致井田北部产出水矿化度略高的原因之一。产出水矿化度随煤层气井排采时间增加略有增高且水型没有改变,说明寺家庄井田煤层气井在排水降压过程中地下水未得到及时补给。不同构造背景下煤层产出水的  $\text{Na}^+$  浓度无显著差异,井田北部陷落柱区样品 282 位于次级向斜轴部且临近陷落柱,其  $\text{Na}^+$  质量浓度最大,平均值达 462 mg/L,归因于水动力条件弱且较强的蒸发作用。

**关键词:** 产出水; 陷落柱; 水地球化学; 煤层气; 寺家庄井田

中图分类号: P618 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.02.009

## Effect of karstic collapse column on hydrogeochemistry of produced water from coalbed methane wells in Sijiazhuang mine field

XU Zhanjie, LIU Qinfu, SONG Pu, JI Jingchao, WU Yingke

(School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study the hydrogeochemistry characteristics of produced water from coalbed methane (CBM) wells in karstic collapse column (KCC) area, Sijiazhuang block, the salinity, type and ion concentration of Sijiazhuang coalbed methane produced water (CMPW) were tested and analyzed with hydrochemistry and one-way variance statistics method. The analyses are useful for CBM exploration and development in KCC areas. The average salinity of CMPW samples is 1 484 mg/L, belonging to saline groundwater with  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  type. The CMPW in the north has higher salinity than that in the south either in April or in August. KCCs were and are developed in the north and may increase the evaporation of the groundwater. The salinity of CMPW in August is higher than that in April, slightly increasing with CBM production processing, indicating that the groundwater does not get recharged on time in the process. The  $\text{Na}^+$  concentrations of samples under different regional tectonic regimes are significantly different, of which sample No. 282 occur on a synclinal axis and near a KCC, which may result in the highest  $\text{Na}^+$  concentration, with a mean of 462 mg/L.

**Keywords:** coalbed methane produced water; karstic collapse column; hydrogeochemistry; CBM; Sijiazhuang mine

近年来,煤层产出水的研究逐渐受到重视,围绕煤层产出水水源、地球化学特征及动态变化规律、水处理、控气作用和产能关系等多方面研究<sup>[1-9]</sup>。煤层气开发过程中产出水主要由煤系裂隙、大孔隙中

的自由水组成。为了达到采气的目的,煤层气开发采用排水降压使吸附在煤基质孔隙表面的甲烷解吸运移到井筒抽到地面来,在此过程中,产出水的水质等地球化学特征也会发生变化。通过对产出水的

收稿日期: 2016-09-21

基金项目: 山西省煤层气联合研究基金项目(2013012005)

**Foundation item:** Shanxi Provincial Basic Research Program—Coalbed Methane Joint Research Foundation(2013012005)

第一作者简介: 徐占杰(1987—),男,河南鹤壁人,博士研究生,从事煤田地质及煤层气开发同位素地球化学研究。E-mail: xzj2009@foxmail.com

引用格式: 徐占杰,刘钦甫,宋璞,等. 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[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(2): 50-54.

XU Zhanjie, LIU Qinfu, SONG Pu, et al. Effect of karstic collapse column on hydrogeochemistry of produced water from coalbed methane wells in Sijiazhuang mine field[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(2): 50-54.

地球化学特征研究可以应用于煤层气勘探开发, 例如排水状况、补水来源、煤层气井产能等。

寺家庄井田位于山西省昔阳县境内, 地质上位于沁水盆地北部, 构造特征如图 1。通过分析寺家庄井田产出水化学和区域构造特征来研究煤层气井产出水化学特征与地质构造(陷落柱、褶皱等)的关系, 利用单因子方差分析方法对煤层气井产出水地球化学特征进行显著性分析, 结合区域地下水动力条件和构造特征, 解释其成因。

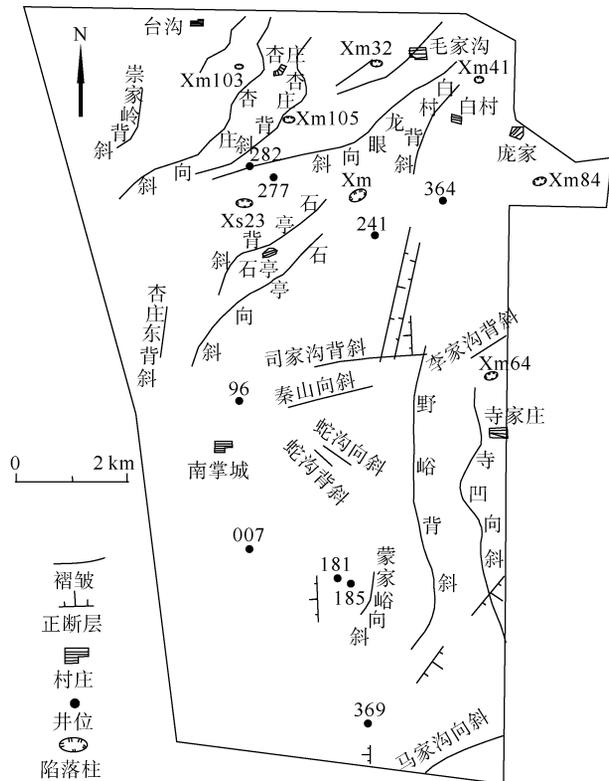


图 1 寺家庄井田采样井口及陷落柱分布位置

Fig.1 The location of CBM sampling wells and karstic collapse columns in Sijiazhuang

## 1 水文地质背景

水文地质条件是煤层气富集和开发的最活跃因素<sup>[10]</sup>。寺家庄井田属海河流域子牙河支流—滹沱河水系, 属于娘子关水文地质单元。

娘子关水文地质单元出露碳酸盐岩, 出露面积占总面积的 25.6%, 碳酸盐岩埋藏面积占 58.2%, 非岩溶面积占 15.7%。寺家庄井田煤层气井排产出水以太原组地下水为主。太原组下部为奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层, 灰岩岩溶极发育, 富水性强, 据钻孔资料, 主要含水段水位标高在 138~425 m, 随深度的增加, 富水性程度逐渐减弱。

灰岩裸露区主要接受大气降水的直接入渗补给, 其次为河流的渗漏及少量裂隙水, 河流沿岸的

第四系松散层空隙水补给。奥陶系岩溶含水层透水性较强, 为一具有统一水位的综合含水水体, 具有完整的水动力场。桃河以南为岩溶水系统的主要补给径流区, 岩溶水自南向北流动, 东部灰岩裸露区大气降水入渗后沿岩层倾向分散向西流动至低水位带内, 形成南部地区岩溶地下水主要汇水通道和强径流带。寺家庄井田煤层气井分布于桃河以南, 故属于补给径流区。

寺家庄井田主要包括中奥陶统岩溶裂隙含水层、上石炭统太原组灰岩岩溶含水层、山西组砂岩裂隙含水层组、石盒子组砂岩裂隙含水层组以及全新统砂砾含水层。井田内岩溶发育不均一, 连通性较差, 且太原组 15 号煤层大部分高于奥灰水位, 仅在井田西部(最低标高 340 m)低于奥灰水位, 15 号煤层与奥灰岩层间距 23.49~71.04 m, 平均 49.66 m, 突水系数 0.10~0.01 MPa, 煤层底板岩体力学强度较差, 抗水压能力差, 加上陷落柱的存在, 太原组含水层可能会与奥陶系灰岩含水层沟通, 发生水力联系。15 号煤层上部有 3 层灰岩:  $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ , 其中  $K_2$  为主要含水层,  $K_3$ 、 $K_4$  基本不取水。山西组富水性弱, 石盒子组渗透性较强而富水弱, 而全新统含有较丰富的潜水, 与地表水和下伏基岩风化带联系密切, 因受裂隙发育深度的制约, 与深部含水层关系不大。

所以, 寺家庄井田 15 号煤层水主要受其下部奥陶纪灰岩岩溶裂隙水和上部的太原组  $K_2$  灰岩岩溶水影响, 是寺家庄井田煤层气井产出水的主要来源。

## 2 样品采集及测试

### 2.1 样品采集

煤层产出水样品取自寺家庄井田, 根据现场资料, 煤层气井产出水以太原组地层水为主。2014 年 4 月和 8 月在陷落柱较发育的井田北部采集 4 组水样, 在相对构造稳定的井田南部采集 5 组水样, 共 9 组。采样井位及陷落柱位置见图 1。

产出水从煤层气井口采集, 封装在 500 mL 聚乙烯塑料瓶中, 在采水前用新鲜产出水反复冲洗采样瓶 3 次, 并使水样充满采样瓶, 有助于去除杂质和减少空气中可溶气体对产出水的影响<sup>[2]</sup>。采集完成后 48 h 内送至实验室做常量离子质量浓度与矿化度等测试。寺家庄井田褶皱发育, 断层较少, 陷落柱比较发育, 但主要集中在北部, 为加以区分, 将寺家庄井田分为陷落柱区(井田北部)和非陷落柱区(井田南部)。陷落柱区的水样包含井号为 282、277、364 和 241 的 4 个样品, 非陷落柱区的水样包含井号为 007、181、185、96、369 的 5 个样品。

## 2.2 实验测试

采样煤层气井连续排采时间均达 3 a 以上, 产出水更接近原始煤层水, 而不受钻进和完井过程中钻井液、压裂液等注入煤层的污染影响<sup>[11]</sup>。产出水的矿化度和常量离子质量浓度测试在核工业北京地质研究所完成。产出水的矿化度测试依据 DZ/T 0064.9—1993《地下水水质检验方法—溶解性固体总量的测定》, 使用 785—DMP 滴定仪测定。常量离子质量浓度依据地下水水质检验方法 DZ/T 0064.28—

1993《离子色谱法测定钾、钠、锂和铵》、DZ/T 0064.49—1993《滴定法测定碳酸根、重碳酸根和氢氧根》、DZ/T 0064.51—1993《离子色谱法测定氯离子、氟离子、溴离子、硝酸根和硫酸根》行业标准, 使用 DIONEX-500 离子色谱仪和 METROHM 全自动滴定仪测定。表 1 为水质测试结果及相关信息。寺家庄井田煤层气井产出水中硫酸盐(以  $\text{SO}_4^{2-}$  计)、氯化物(以  $\text{Cl}^-$  计)等远低于国家 II 类饮用水标准的限定值, 所以产出水无需处理可直接排出。

表 1 寺家庄井田产出水矿化度和离子质量浓度特征  
Table 1 The salinity and ions concentration of CMPW from Sijiazhuang mine field

位置	井号	排采时间/月	矿化度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	离子质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )								
				$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$
	282	43/47	1 626/1 675	4.36/4.42	37.3/40.4	6.83/6.95	472/452	1.15/1.17	1.49/1.03	5.56/3.79	1 097/1 130	46.1/34.5
陷落柱区	277	43/47	1 433/1 506	4.56/4.65	46.1/46.6	3.57/2.58	420/415	1.16/1.11	1.81/1.18	6.22/4.33	949/1 031	37.5/-
	364	40/44	1 524/1 451	5.54/5.69	51.4/47.6	3.49/2.91	427/401	0.80/0.95	0.97/0.84	4.81/3.09	1 030/950	n.d./38.8
	241	43/47	1 516/1 521	5.17/5.11	43.8/43.5	2.25/2.86	443/417	1.28/1.01	1.41/1.33	3.84/3.51	1 014/999	46.3/47.8
	7	64/68	1 404/1 448	4.85/5.03	31.2/35.8	1.85/2.63	406/395	0.88/0.67	1.67/0.93	5.34/2.60	952/978	45.2/27.0
非陷落柱区	181	48/52	1 439/1 461	6.43/6.38	32.5/37.6	1.36/0.82	417/409	2.59/3.43	2.13/1.42	4.40/2.93	972/927	45.1/71.9
	185	48/52	1 405/1 399	5.61/5.61	35.3/37.7	0.76/0.71	415/400	1.72/2.13	1.60/1.09	4.70/3.11	940/878	38.8/71.1
	96	45/49	1 594/1 602	2.68/2.79	27.7/31.2	17.8/14.4	455/440	2.03/2.15	2.31/1.32	5.84/4.48	1 081/1 054	50.6/52.7
	369	48/52	1 219/—	6.15/—	36.0/—	21.0/—	355/—	3.89/—	1.76/—	5.14/—	790/—	32.0/—

注: 表中数据 43/47 中 43 和 47 分别表示 4 月份和 8 月份数据, 其他同; 1219/—表示 4 月份有数据, 8 月份无数据, 其他同。

## 3 结果与讨论

### 3.1 产出水矿化度特征

寺家庄井田产出水的矿化度为 1219~1675 mg/L, 平均 1 484 mg/L, 与沁水盆地南部太原组储层产出水的矿化度相当<sup>[4]</sup>。寺家庄井田煤层水处于弱径流—滞流区水动力条件, 利于煤层气的保存<sup>[11]</sup>。

陷落柱区的水样平均矿化度在 4 月和 8 月均比非陷落柱区的高(表 2)。根据钻孔资料, 陷落柱主要分布在北部, 确定陷落柱存在的依据有很多(如不同岩性混杂, 岩石多呈角砾状, 异常破碎带等), 陷落柱形成时临近岩层或煤层遭到破碎, 使岩石或煤中可溶矿物或离子进入临近含水层, 是井田北部产出水矿化度较高的原因之一。但陷落柱区和非陷落柱区的矿化度差别不大, 陷落柱中岩层时代最新为三叠纪, 形成时间已久, 柱体较稳定, 地下水是动态的, 化学特征已较稳定和趋同。

随着煤层气井排采的不断进行, 无论有无陷落柱, 8 月产出水矿化度均比 4 月高(表 2), 因井田太原组含水层受上部潜水影响小, 可能是煤层气井在排采过程中, 排采层位地下水没有得到及时补给, 致使矿化度随着煤层气井开采时间增长而增大。

表 2 寺家庄井田煤层气井产出水的矿化度  
Table 2 The salinity of CMPW from Sijiazhuang mg/L

日期	陷落柱区	非陷落柱区
2014-04	1 525	1 412
2014-08	1 538	1 478

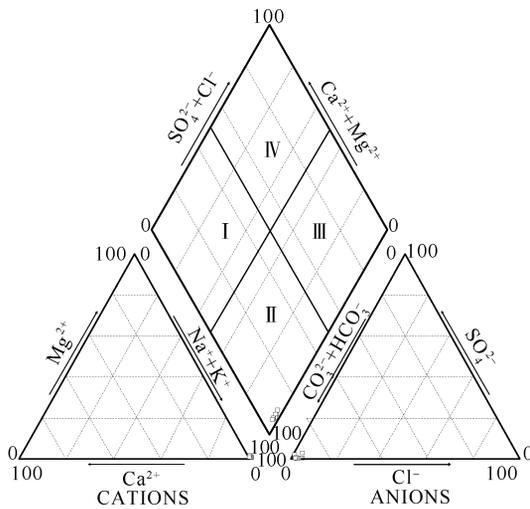
### 3.2 产出水水型

图 2a 中, 区属于  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型, 碳酸盐硬度超过 50%, 大多为浅层地下水或河水; 区属于  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  型, 为深层地下水的水质特征; 区属于  $\text{Cl-Na}$  或  $\text{SO}_4\text{-Na}$  型, 为海水、盐水或热水水质特征; 区属于  $\text{Cl-Ca}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Ca}$  型, 为地下水或海水混合水。

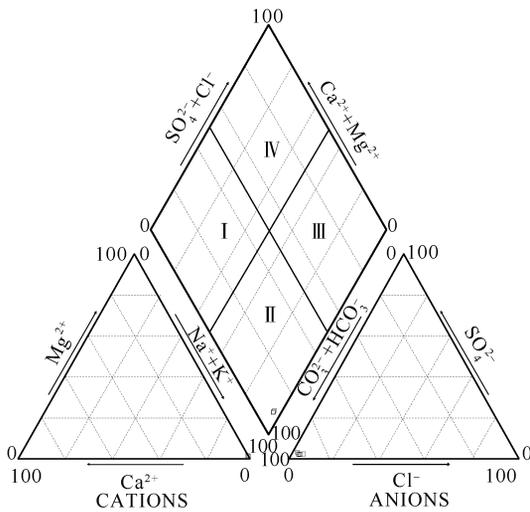
陷落柱区和非陷落柱区产出水水质均落在 Piper 图区域 (图 2), 属于  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  型, 反映寺家庄井田煤层气井产出水为深部岩层或煤层水, 受地表水、潜水影响较小。4 月和 8 月产出水水质没有发生很大变化, 地下水环境没有改变。陷落柱区和非陷落柱区产出水的水型和水质均没有明显的区别, 说明二者属同一水力系统。

### 3.3 陷落柱对地下水化学成分的影响

水化学成分的变化能直接反映水动力场变化, 显示煤层和外界水动力的联系程度<sup>[7]</sup>。寺家庄井田北部陷落



(a) 4月份



(b) 8月份

图 2 寺家庄井田不同月份产出水水型

Fig.2 The water types of coalbed methane produced water from Sijiazhuang in different month

柱较南部发育，虽然陷落柱对地下水的运移和补给影响大，但陷落柱形成较早或者不导水，对产出水的化学成分影响甚微。为了研究陷落柱是否对地下水化学成分产生影响，运用单因子方差分析方法对产出水的离子质量浓度进行显著性分析。

3.3.1 数学模型

单因子方差分析统计模型为<sup>[12]</sup>：设因素 A 取 r 个不同水平  $A_1, A_2, \dots, A_r$ ，此时相当于有 r 个总体  $X_1, X_2, \dots, X_r$ ，且  $X_i \sim N(\mu_i, \sigma^2) (i=1, 2, \dots, r)$ 。在水平  $A_i$  下，进行  $n_i (n_i \geq 2)$  次独立实验，且假定这 r 个样本相互独立，因此有

$$X_{ij} \sim N(\mu_i, \sigma^2) (j=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, r) \quad (1)$$

所有  $X_{ij}$  为实验结果，且相互独立，整理成表 3。

令  $\varepsilon_{ij} = X_{ij} - \mu_i (j=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, r)$ 。  $\varepsilon_{ij}$  为随机误差，是在水平  $A_i$  下第 j 次重复实验的实验误差。即

表 3 单因子方差分析数据统计表

Table 3 One-way variance statistics

水平	不同水平下的实验次数			
	1	2	...	$n_i$
$A_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1n_1}$
$A_2$	$X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{2n_2}$
...	...	...	...	...
$A_r$	$X_{r1}$	$X_{r2}$	...	$X_{rn_r}$

$$X_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} (j=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, r) \quad (2)$$

检验的假设为  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_r$

表 4 为单因子方差分析表，其中， $S_T$  为总偏差平方和， $S_e$  为实验误差平方和， $S_A = S_T - S_e$  为因素 A 的偏差平方和。

表 4 单因子方差分析表

Table 4 One-way variance statistics method

方差来源	平方和 S	自由度 f	方差 s	F 值
因素 A	$S_A$	$r-1$	$s_A = S_A / (r-1)$	$F = s_A / s_e$
误差 e	$S_e$	$n-r$	$s_e = S_e / (n-r)$	
总和	$S_T$	$n-1$		

在给定显著性水平  $\alpha$  下，检验假设  $H_0$ ，由试验数据计算统计量的观察值 F，若  $F \geq F_{1-\alpha}(r-1, n-r)$ ，则拒绝  $H_0$ ，即认为因素 A 对实验结果的影响显著；若  $F < F_{1-\alpha}(r-1, n-r)$ ，则接受  $H_0$ ，即认为因素 A 对实验结果的影响不显著。

3.3.2 实例分析

由于寺家庄井田煤层气井产出水为  $HCO_3^-Na^+$  型，故以  $Na^+$  质量浓度为对象进行显著性分析。

已知  $r=9, n_1=n_2=\dots=n_8=2, n_9=1$ 。设 9 口井产出水中  $Na^+$  质量浓度的数学期望是  $\mu_i (i=1, \dots, 9)$ ，则检验假设  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_9$

表 5 中数据为  $Na^+$  质量浓度原始数据减去 400 后的差值，这样处理不影响 F 值结果。用表 4 中的数据 and 公式进行计算，其结果见表 6。

表 5 单因子方差分析  $Na^+$  数据统计表(原始数-400)

Table 5  $Na^+$  concentration of one-way variance analysis

因素	实验次数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
陷落柱区	72	52	20	15	27	1	43	17	
非陷落柱区	6	-5	17	9	15	0	55	40	-45

表 6 单因子方差分析表

Table 6 One-way variance statistics method

方差来源	平方和 S	自由度 f	方差 s	F 值
因素 A	1 806.5	1	1 806.5	2.68
误差 e	10 120.4	15	674.7	
总和	11 926.9	16		

取显著性水平  $\alpha=0.01$ ，查得  $F_{0.99}(1,15)=8.68 > F(1,15)=2.68$ ，故接受假设  $H_0$ ，认为陷落柱区和非陷落柱区的产出水中  $\text{Na}^+$ 质量浓度无显著差异。显然陷落柱区 282 号井产出水中  $\text{Na}^+$ 质量浓度最高，4 月和 8 月的平均值达 462 mg/L。282 号煤层气井处于龙眼向斜轴部，太原组地层水处于汇流区，水动力条件差，且临近陷落柱 Xs23，增强了局部的蒸发作用，致使产出水中  $\text{Na}^+$ 质量浓度较高。

#### 4 结论

a. 寺家庄井田煤层产出水水型为  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ，属于微咸水，平均矿化度为 1 484 mg/L。井田北部产出水平均矿化度为 1 532 mg/L，南部为 1 445 mg/L。陷落柱在井田北部较发育，蒸发作用强可能是北部产出水矿化度较大的原因之一。

b. 煤层气井在排采过程中，地下水的矿化度等水化学特征可以判断地下水的补给排泄情况。寺家庄 8 月产出水的矿化度比 4 月高，说明随着排水降压，地下水未得到及时补给，使产出水矿化度随排采时间增加略有增大。

c. 陷落柱区和非陷落柱区的产出水中  $\text{Na}^+$ 质量浓度无显著差异。282 号井产出水中  $\text{Na}^+$ 质量浓度最大，平均值为 462 mg/L，因其位于次级向斜轴部，且临近陷落柱 Xs23，排采水处于滞流环境，陷落柱可能增强了局部地下水的蒸发作用，为产出水  $\text{Na}^+$ 离子浓度较高的原因之一。

#### 参考文献

- [1] 秦勇, 张政, 白建平, 等. 沁水盆地南部煤层气井产出水源解析及合层排采可行性判识[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1892-1898.  
QIN Yong, ZHANG Zheng, BAI Jianping, et al. Source apportionment of produced-water and feasibility discrimination of commingling CBM production from wells in southern Qinshui basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1892-1898.
- [2] 卫明明, 踞宜文. 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.  
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.
- [3] 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.

- [4] 张松航, 唐书恒, 李志城, 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 co-produced 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.
- [5] 孙悦, 冯启言, 李向东, 等. 煤层气产出水处理与资源化技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2010, 24(6): 1-4.  
SUN Yue, FENG Qiyang, LI Xiangdong, et al. Research progress of treatment and resource in produced water associated with CBM operations[J]. Energy Environmental Protection, 2010, 24(6): 1-4.
- [6] 田文广, 汤达祯, 孙斌, 等. 鄂尔多斯盆地东缘含煤地层水动力条件及其控气作用[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 433-437.  
TIAN Wenguang, TANG Dazhen, SUN Bin, et al. Hydrodynamic conditions and their controls of gas in coal-bearing strata in eastern edge of the Ordos basin[J]. Geological Journal of China University, 2012, 18(3): 433-437.
- [7] 李志城, 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): 424-429.  
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.
- [8] 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.  
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 University, 2012, 18(3): 579-582.
- [9] 杨秀春, 李明宅. 煤层气排采动态参数及其相互关系[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2): 19-23.  
YANG Xiuchun, LI Mingzhai. Dynamic parameters of CBM well drainage and relationship among them[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(2): 19-23.
- [10] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬, 等. 沁水盆地水文地质条件对煤层气产量的控制作用[C]//雷群, 李景明, 赵庆波. 煤层气勘探开发理论与实践. 北京: 石油工业出版社, 2007: 61-69.
- [11] 田文广, 邵龙义, 孙斌, 等. 保德地区煤层气井产出水化学特征及其控气作用[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 15-19.  
TIAN Wenguang, SHAO Longyi, SUN Bin, et al. Chemical behaviors of produced water from CBM wells in the Baode area, Shanxi, China, and their control on gas accumulation[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 15-19.
- [12] 高云良, 马玲. 数理统计[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 1-322.