

朱亚茹,孙蓓蕾,曾凡桂,等. 西山煤田古交矿区煤层气藏水文地质特征及其控气作用[J]. 煤炭学报,2018,43(3):759-769. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0772

ZHU Yaru, SUN Beilei, ZENG Fangui, et al. Hydrogeological characteristics of CBM reservoirs and their controlling effects in Gujiao Mining Area, Xishan Coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3):759-769. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0772

## 西山煤田古交矿区煤层气藏水文地质特征及其控气作用

朱亚茹<sup>1,2</sup>, 孙蓓蕾<sup>1,2</sup>, 曾凡桂<sup>1,2</sup>, 夏鹏<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>3</sup>, 游永健<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院 山西 太原 030024; 2. 煤与煤系气地质山西省重点实验室 山西 太原 030024; 3. 山西省地质矿产研究院 山西 太原 030024)

**摘要:**煤层气藏的水文地质条件是控制煤层气运移、散失、分布和富集的重要因素之一。以西山煤田古交矿区为研究对象,分析产出水离子浓度、水质水型、矿化度和煤层含气量分布特征,结合地下水动力场分布特征,划分区域水文地质单元,并讨论不同单元内含气量分布特征及地质控制机理。结果表明:① 该区煤层气井产出水离子以  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  为主,水型主要为  $\text{NaHCO}_3$  型,该区煤层气井产出水矿化度介于 632~2 512 mg/L,属于淡水-微咸水;② 根据折算水位和矿化度分布特征将矿区划分为补给径流区、滞留区以及过渡地带的弱径流区 3 种水文地质单元,滞留区含气量最高,弱径流区次之;③ 古交矿区煤层气的富集成藏受构造、水文地质条件双重控制,在屯兰中部形成单斜-水力封堵型煤层气藏,为全区煤层气最为富集区,东曲断层比较发育,形成地垒-水力封堵型煤层气藏,为煤层气较为富集区。

**关键词:**西山煤田;古交矿区;煤层气;水文地质特征;控气作用;含气量;产出水矿化度

中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2018)03-0759-11

## Hydrogeological characteristics of CBM reservoirs and their controlling effects in Gujiao Mining Area, Xishan Coalfield

ZHU Yaru<sup>1,2</sup>, SUN Beilei<sup>1,2</sup>, ZENG Fangui<sup>1,2</sup>, XIA Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>3</sup>, YOU Yongjian<sup>3</sup>

(1. College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Coal and Coal Measure Gas Geology, Taiyuan 030024, China; 3. Institute of Geology and Mineral Resources of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Hydrogeological condition is one of the most important factors controlling the migration, dispersion, distribution and accumulation of coalbed methane (CBM) in coal reservoir. In this paper, the water produced from CBM wells in Gujiao mining area was monitored in terms of concentrations, water quality and salinity. Then, combined with the local gas content and the distribution characteristics of groundwater, the geological controlling mechanisms on gas distribution characteristics in different units were discussed. Results show that the main ions of produced water were  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and the type was  $\text{NaHCO}_3$ . The total dissolved solids (TDS) of produced water were relatively lower, which ranged from 632 to 2 512 mg/L, belonging to freshwater-saline water. The research area were divided into runoff zone, weak runoff zone and stagnant zone, and the stagnant zone according to discounted water level and TDS. The stagnant zone had the highest gas content, while the gas content in the weak runoff zone was relatively lower. The enrichment of

收稿日期:2017-06-06 修回日期:2017-08-28 责任编辑:韩晋平

基金项目:山西省煤基科技重点攻关资助项目(MQ2014-01);山西省基础研究计划煤层气联合研究基金资助项目(2015012007);山西省基础研究计划-省青年科技研究基金资助项目(2015021171)

作者简介:朱亚茹(1992—),女,河南商丘人,硕士研究生。E-mail:zhuyaru0109@126.com

通讯作者:孙蓓蕾(1984—),女,山西曲沃人,副教授,硕士生导师。E-mail:sunbeilei@tyut.edu.cn

Gujiao mining area was controlled by structure and hydrogeological conditions. Now two hydraulic patterns were identified: The monocline-hydraulic sealing in the central of Malan was the richest area and the horst-hydraulic sealing in Dongqu was the richer area.

**Key words:** Xishan Coal Field; Gujiao Mining Area; CBM; hydrogeology characteristics; gas control; gas content; TDS of groundwater

西山煤田古交矿区不但是我国重要的炼焦煤生产基地,也是煤层气重点开发区块之一。西山煤田古交矿区煤层气储量为  $8.2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,煤层具有生气量大、含气性好、渗透率高等优点<sup>[1-2]</sup>,由此可见古交矿区煤层气资源丰富,开发潜力好。截止目前,古交矿区煤层气钻井 700 余口,大多数已投入生产,但矿区存在煤层气分布非均质性强,低产或无产气井比例高等问题,因此古交矿区煤层气分布特征及其主控地质因素是当前急需解决的问题。前人对西山煤田煤层气的研究主要集中在岩浆侵入对煤层气高产富集的影响<sup>[3]</sup>、煤层气成藏特征<sup>[2]</sup>、煤层气地球化学特征及其成因<sup>[4]</sup>、局部煤层气高产的影响因素<sup>[5]</sup>等几个方面。XIA 等<sup>[5]</sup>认为古交矿区高含气量和产出水量与低地下水位的区域有利于煤层气产出;汪岗等<sup>[4]</sup>认为水文地质条件是影响该区煤层气甲烷碳同位素空间分布的主要因素。一般认为水文地质条件是控制煤层气富集和高产的重要因素之一<sup>[6-8]</sup>,对煤层气保存、分布和运移有很大影响。径流和排泄活跃的地下水对煤层气保存不利,相对滞留的地下水有良好的封闭作用<sup>[9-11]</sup>,一方面地下水携带煤层气向低洼带聚集,另一方面地下水阻止煤层气向排泄区逸散<sup>[12]</sup>。前人对华北地区不同盆地煤层气井产出水特征进行分析,认为煤层气井产出水主要以  $\text{NaCl}$  和  $\text{NaHCO}_3$  型为主,并且认为  $\text{NaHCO}_3$  型更有利于煤层气赋存<sup>[12-15]</sup>。西山煤田具有完整的补-径-排系统,古交矿区总体处于补给-径流区<sup>[16]</sup>,但是由于古交矿区构造形态复杂、断层发育,不同构造区域地下水径流强度和方向的变化将可能导致煤层气分布的非均质性。笔者基于西山煤田煤层气井产出水特征,与煤田构造特征相结合,分析水文地质条件与煤层气赋存特征之间的关系,从而探究该地区煤层气非均质性成因,为煤层气井的改造及进一步开发提供较为可靠的科学依据。

## 1 研究区地质概况及水文地质特征

西山煤田位于华北克拉通中部,吕梁复式背斜东缘,云中山余脉南部,太原新生代断陷盆地西侧<sup>[3,17]</sup>。古交矿区位于西山煤田西北部,包括屯兰、马兰、东曲、西曲、镇城底等 5 个井田,煤层气地面开发区域主

要集中在东曲、屯兰、西曲 3 个矿区(图 1(a))。研究区总体构造形态为马兰复向斜,其轴向北北西,马兰向斜西翼次级褶皱发育,其轴向与马兰向斜一致;向斜东翼断层发育,以 NE 向为主,多成组出现。

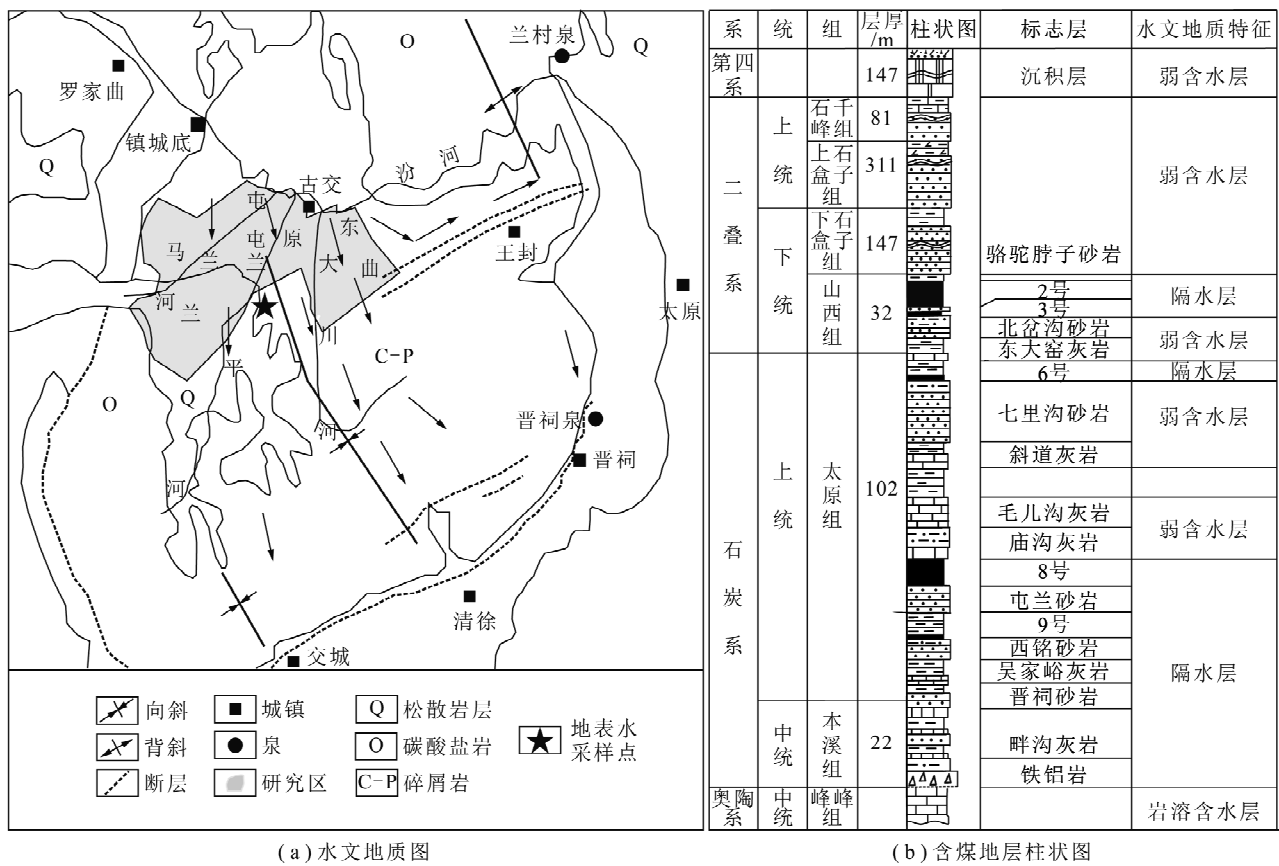
古交矿区主要含煤地层为上石炭统太原组和下二叠统山西组,含煤多达 15 层,其中太原组 8 号煤层为主采煤层<sup>[18]</sup>,也是煤层气开发的主要煤层(图 1(b))。该煤层位于太原组中上部,煤厚 0.75 ~ 4.52 m,平均 3.1 m,煤层顶底板以泥岩和灰岩为主,围岩含水性强,渗透性差,封盖能力较强。

研究区内存在 3 套含水层:奥陶系碳酸盐岩、石炭二叠系碎屑岩和第四系松散沉积层<sup>[19]</sup>。其中下石盒子组砂岩和山西组砂岩为碎屑岩类裂隙水含水岩组,太原组 9 号煤层以上的灰岩和砂岩构成碎屑岩夹层间裂隙岩溶水含水岩组,奥陶系峰峰组灰岩为碳酸盐岩类岩溶裂隙水含水岩组(图 1(b))。区内煤层气井排出水量小,平均  $1.14 \text{ m}^3/\text{d}$ ,很多井甚至无水排出,说明古交矿区煤层气排出水主要来源于煤层附近的弱含水层,如太原组煤层主要来源于煤层顶底板灰岩,而山西组则为砂岩裂隙水,与奥陶系灰岩含水层无水力联系。

研究区西部、北部为山地,汾河流经研究区北部,因此,研究区地下水补给以大气降水及地表水补给为主,地下水流向总体趋势为自北向东和东南流动,在清徐形成滞留区<sup>[20]</sup>。由于受到断层和河流的影响,地下水以泉的形式排泄,兰村泉和晋祠泉为主要的排泄点(图 1(a))。

## 2 样品采集与测试方法

前人研究结果<sup>[21]</sup>表明煤层气井排采 400 d 之后的产出水化学特征可真实反映原始地层水的水化学特征,且为避免井间干扰的影响<sup>[22]</sup>,笔者采用煤层气井排采 800 d 之后的水样,相邻采样井距大于 550 m。共采集古交矿区东曲、屯兰及马兰 3 个井田煤层气生产井产出水 27 件,附近地表水 5 件,产出水均来自 8 号煤层煤层气生产井,水样统一使用 2.5 L 聚乙烯瓶收集。取样步骤如下:首先需要用所采集的水样冲洗准备装样的样品瓶 3 次;其次取样时要使水样充满整个样品瓶;最后在样品瓶上记录采样地点、时间及样



(a) 水文地质图

(b) 含煤地层柱状图

图 1 太原西山水文地质(据文献[20]修改)和含煤地层柱状图

Fig. 1 Hydrogeology and stratigraphic column of coal-bearing strata of Xishan, Taiyuan

品的名称等相关信息。遵照 MT/T 202—2011 标准和 GB/T 6920—1986 标准在煤与煤系气地质山西省重点实验室对煤层气井产出水和地表水分别进行化学成分、矿化度和 pH 值测定,地表水样位置如图 1(a) 所示,产出水样品位置如图 2 所示。

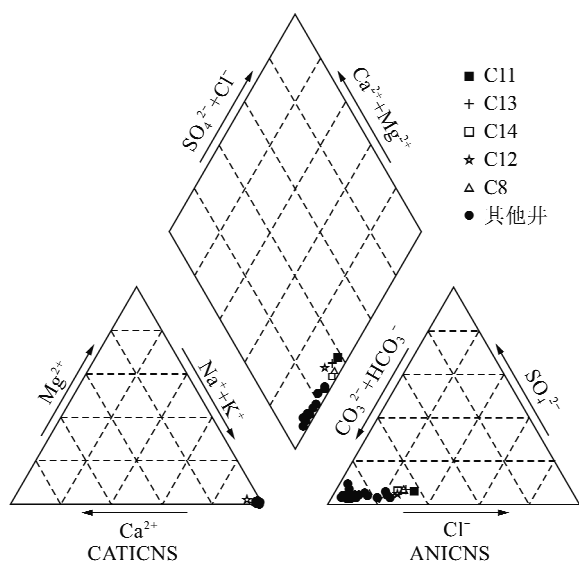


图 2 煤层气井产出水离子在 Piper 三线图中的分布

Fig. 2 Distribution of ions of produced water in Piper diagram

### 3 结果与讨论

#### 3.1 煤层气产出水化学特征及水文地质单元划分

煤层气生产井产出水的水化学特征在一定程度上反映含水层之间的水力联系及地下水动力学条件,其主要指标是离子组成和矿化度及其分布特征<sup>[23]</sup>。

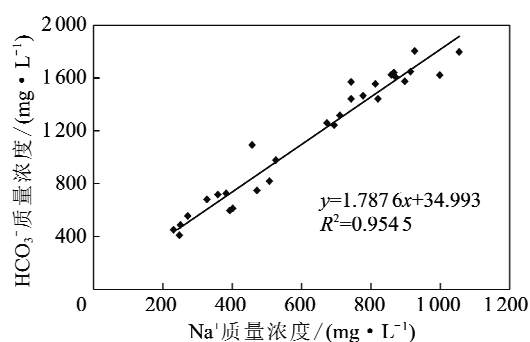
##### 3.1.1 煤层气井产出水离子组成特征

古交矿区煤层气井产出水离子特征见表 1,主要由  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  组成。阳离子  $\text{Na}^+$  +  $\text{K}^+$  质量浓度变化范围为 232.29 ~ 1 060.94 mg/L,  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度在 2.58 ~ 15.98 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度为 0.26 ~ 7.19 mg/L,  $\text{Na}^+$  质量浓度在所有检出的离子中高于其他离子,平均阳离子质量浓度顺序为  $\text{Na}^+$  >  $\text{Ca}^{2+}$  >  $\text{Mg}^{2+}$  >  $\text{K}^+$ 。阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,其质量浓度变化范围 410.22 ~ 1 808.14 mg/L,其次是  $\text{Cl}^-$ ,质量浓度变化范围为 19.3 ~ 335.68 mg/L,  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度在 19.97 ~ 120.8 mg/L,平均阴离子质量浓度顺序为  $\text{HCO}_3^-$  >  $\text{Cl}^-$  >  $\text{SO}_4^{2-}$ 。产出水 pH 值介于 7.73 ~ 8.81,平均为 8.36,呈弱碱性特征。产出水总体上富集碳酸氢根离子和钠离子,  $\text{Na}^+$  与  $\text{HCO}_3^-$  具有良好的线性关系(图 3),缺乏硫酸根离子和钙镁离子。

表1 煤层气井产出水离子质量浓度

Table 1 Statistics of the ion contents of produced water

样品编号	离子质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )								矿化度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	pH 值
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		
C1	5.82	1 054.64	9.27	2.82	335.68	99.20	1 800.34	92.19	2 512	8.38
C2	2.17	999.18	8.25	0.94	325.78	103.52	1 624.60	149.81	2 405	8.69
C3	2.05	694.23	5.67	2.81	126.75	69.56	1 245.78	88.35	1 570	8.50
C4	0.94	507.60	4.64	2.19	92.58	45.48	820.10	111.40	1 162	8.81
C5	1.31	471.87	6.19	1.25	140.12	54.54	749.81	53.78	1 065	8.48
C6	0.94	402.12	4.46	2.81	155.46	49.60	613.13	26.89	923	8.30
C7	1.45	526.04	6.19	2.05	114.86	49.18	980.22	61.46	1 230	8.49
C8	1.35	359.20	5.69	0.94	136.89	19.97	718.74	0	906	7.82
C9	0.89	248.00	5.17	1.88	123.12	30.26	410.22	0	634	7.73
C10	1.14	272.20	12.93	3.14	116.22	32.31	556.00	0	736	7.97
C11	0.94	231.40	8.28	0.94	111.30	35.61	450.91	0	632	7.82
C12	1.23	393.34	5.67	1.25	141.60	46.30	597.50	38.41	904	8.30
C13	4.71	743.14	3.61	3.12	64.85	37.25	1 444.96	111.40	1 570	8.64
W1	2.97	458.00	8.28	3.76	63.03	31.48	1 095.06	43.35	1 192	8.36
W2	3.65	914.70	4.64	3.44	136.16	52.89	1 651.93	119.08	1 955	8.48
W3	3.88	777.94	11.85	4.07	82.68	51.66	1 468.39	92.19	1 690	8.47
W4	6.03	926.56	5.67	7.19	54.96	64.41	1 808.14	122.92	2 032	8.49
W5	4.38	872.19	2.58	2.19	56.44	63.18	1 608.98	126.76	1 904	8.5
W6	3.57	866.85	8.76	1.88	60.90	79.64	1 644.12	103.71	1 930	8.39
W7	2.46	859.24	4.64	3.75	60.90	120.80	1 628.50	96.03	1 931	8.44
W8	4.13	743.55	11.85	0.26	49.02	61.12	1 573.82	99.87	1 670	8.37
W9	3.09	383.03	4.12	1.56	19.30	74.30	726.38	57.62	886	8.43
W10	3.89	710.80	5.67	4.06	72.78	64.00	1 319.98	99.87	1 596	8.57
E1	3.95	813.13	15.98	4.38	242.60	54.12	1 558.21	96.03	2 075	8.35
E2	3.18	820.61	5.15	1.25	106.44	80.64	1 444.96	119.08	1 814	8.56
E3	2.05	673.63	10.82	0.94	101.99	47.54	1 261.40	61.46	1 512	8.32
E4	5.02	898.17	6.70	1.56	137.64	61.94	1 577.73	153.65	1 966	8.50

图3 煤层气井产出水中 Na<sup>+</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 关系Fig. 3 Relationship of Na<sup>+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> of produced water

依据古交矿区煤层气井产出水的离子特征,应用stiff图解法并结合苏林分类方法<sup>[24]</sup>判定该区水型主要为NaHCO<sub>3</sub>型(图4)。通过Piper三线图解<sup>[25]</sup>进一步分析水的离子特征(图2):产出水阳离子在左下方三角形域中分布比较集中,以Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>为主;阴离子

在右下方三角形域中分布较离散,以HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,大川河附近煤层气井C11,C13,C14,C12和C8产出水中Cl<sup>-</sup>浓度高于远离大川河的煤层气井产出水浓度;离子分布在正上方菱形域分区的右下方,说明该区地下水以碳酸碱金属为主<sup>[25-26]</sup>。对地表水的离子组成分析表明地表水水型主要为Ca-HCO<sub>3</sub>和Ca-Na-HCO<sub>3</sub>,说明煤层气井产出水与地表水联系弱(表2)。

从8号煤层煤层气井产出水的离子组成特征可以看出,煤层气井产出水与地表水联系弱,主要为滞留在煤层顶底板或煤层中的水。朱学申等<sup>[27]</sup>在研究沁水盆地柿庄南区块煤层气井产出水时,认为日产水量2~7 m<sup>3</sup>的水主要来自于煤层,称之为内源水。考虑到古交矿区煤层气井产出水量平均1.14 m<sup>3</sup>/d,且水型主要为NaHCO<sub>3</sub>型,而Cl<sup>-</sup>含量低,因此可以认为主要是来源于8号煤层顶板灰岩等弱含水层,而不是煤层本身。

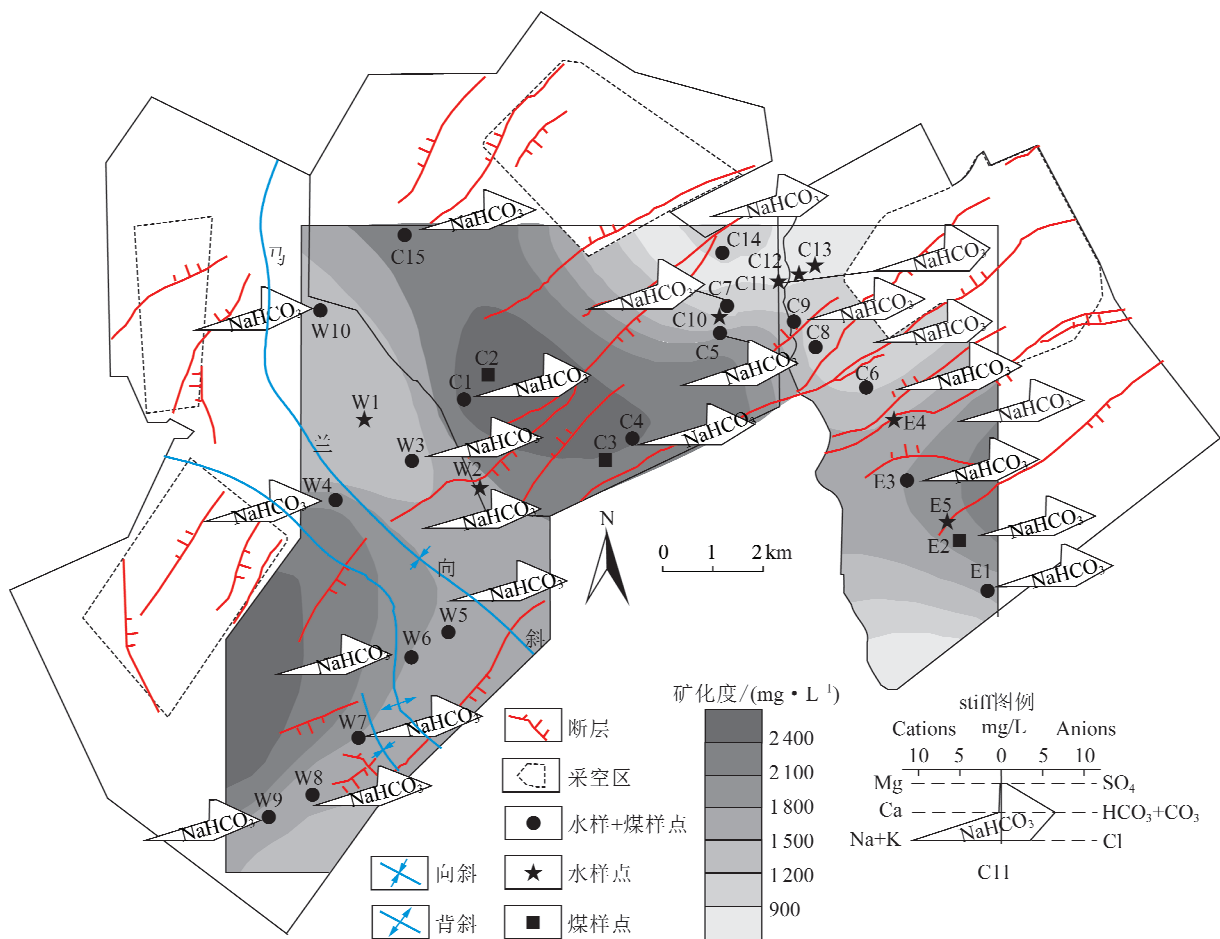


图4 矿化度等值线与水型分布

Fig. 4 Isolines of total dissolved solids and water type of the selected samples

表2 地表水离子质量浓度

Table 2 Statistics of the ion contents of surface water

样品编号	离子质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )								矿化度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH 值
	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$		
QS-1	1.58	47.27	72.41	17.87	16.74	116.28	282.56	0.02	436	7.98
QS-2	1.64	44.28	72.41	16.05	18.71	62.76	287.58	0.03	378	7.93
QS-3	1.24	51.93	63.42	25.74	16.74	101.04	331.04	0.02	442	7.90
QS-4	1.35	46.56	57.43	19.68	16.74	98.58	257.48	0.03	386	7.91
QS-5	4.56	49.57	62.42	21.50	22.65	116.90	282.56	0.03	438	8.04

### 3.1.2 煤层气井产出水矿化度分布特征

煤层气井产出水矿化度是表征水动力活跃程度的重要指标,矿化度越高,封闭条件越好,越有利于煤层气的保存,补给区地下水交替活跃,因此矿化度较低,随着地下水径流远离补给区以及滞留时间的增加,矿化度也随之增加<sup>[13,28]</sup>。

据27口煤层气井产出水特征分析,古交矿区煤层气井产出水矿化度变化较大,在632~2512 mg/L,平均1501 mg/L,最大矿化度水平远低于海水矿化度35000 mg/L,属于淡水-微咸水(表1)。C13, C12,

C11位于大川河附近(图4),为补给径流区,矿化度分别为632, 736, 634 mg/L,向西南方向增加到1570 mg/L(C5),向东南方向增加至1512 mg/L(E4);在马兰向斜附近的W1井矿化度由1192 mg/L分别向东北增加到2512 mg/L(C1)和向西南增加至2032 mg/L(W4)。最终在屯兰中部、马兰中部和东曲中部形成了矿化度相对较高的区域。

### 3.1.3 地下水水文地质单元划分

一般而言,从含煤盆地边缘到盆地中心地下水径

流能力由强到弱,可划分为“强径流”、“缓流”和“滞留”3种控气类型<sup>[29]</sup>。前人利用式(1)和(2)计算含油气藏的地层水水头进而确定地下水的流动方向<sup>[24,30]</sup>,WANG等<sup>[6]</sup>将该公式引用到煤层气藏中,利用储层压力和测点标高计算水位:

$$S = H_2 + 10 \frac{p_c}{r_{rw}} \quad (1)$$

$$p_c = p + \frac{1}{10} \int_{H_1}^{H_2} r_{rw}(H) dH \quad (2)$$

式中, $S$ 为等折算水位,m; $H_1$ 为储层压力的测点绝对

标高,m; $H_2$ 为基准面的绝对标高,m; $p_c$ 为折算压力,Pa; $p$ 为实测储层压力,Pa; $r_{rw}$ 为地下水的相对密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $r_{rw}(H)$ 为 $r_{rw}$ 随深度变化的函数。

计算过程中,以海平面为基准面,即 $H_2 = 0$ 。另外,8号煤层埋深小于1 000 m,水密度变化不大,因此式(1)可以简化为 $S = 100p + H_1$ <sup>[24]</sup>。与太原组实测水位相比(1 033.19 m,内部资料),8号煤层的折算水位(1 000 ~ 1 100 m)基本一致,因此证明该方法可以用来反应煤层气藏地层水水位,根据计算结果,绘制地下水等水位图(图5)。

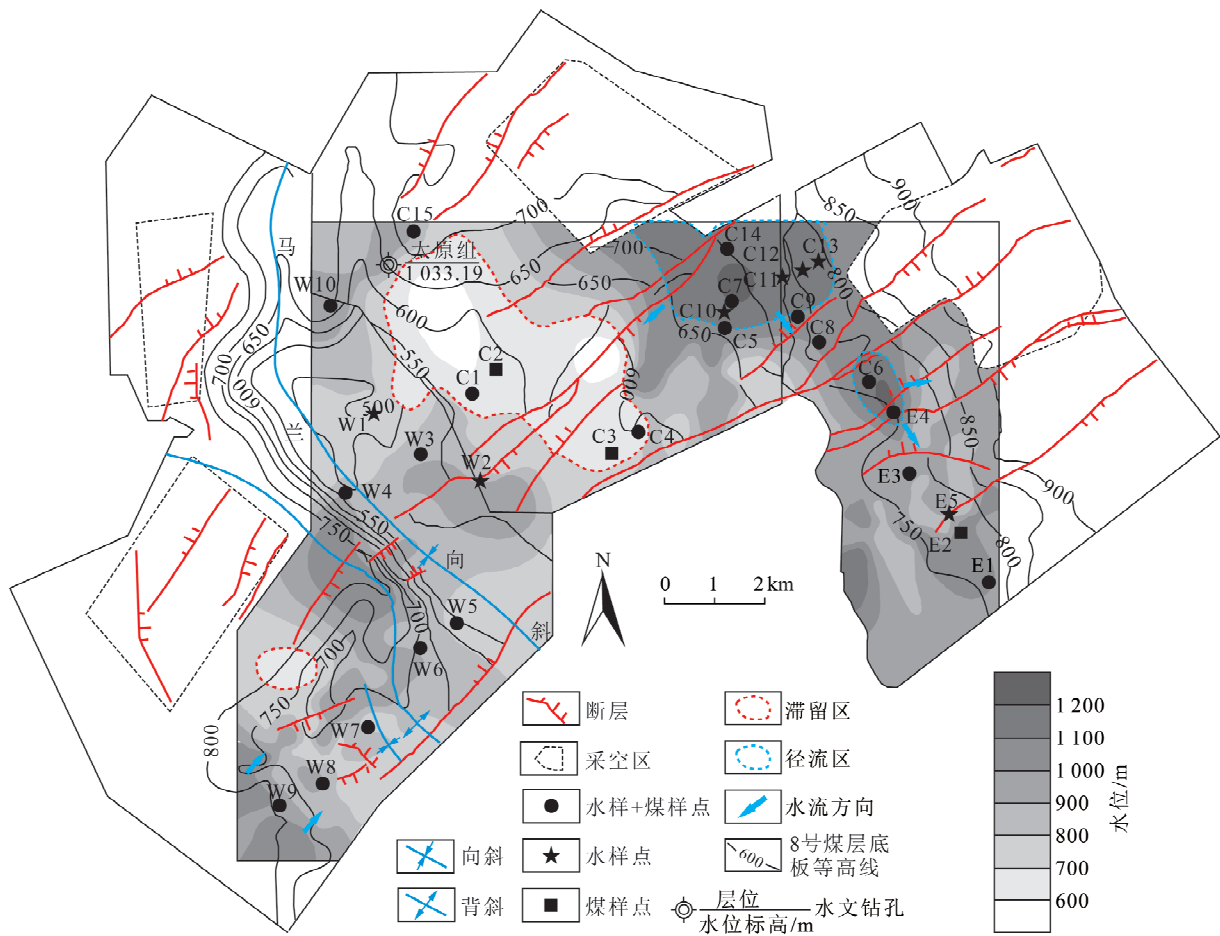


图5 8号煤层底板等高线、折算水位等值线和水文地质单元划分

Fig. 5 Isolines of floor and discounted water level of the No. 8 coal seam and hydrodynamic zoning

根据折算水位高低变化趋势和矿化度分布特征,将折算水位小于700 m、矿化度大于2 100 mg/L划分为滞留区,折算水位为700 ~ 1 100 m、矿化度1 350 ~ 2 100 mg/L为弱径流区,折算水位大于1 100 m、矿化度低于1 350 mg/L为径流区(图5)。屯兰—东曲交界处位于大川河附近(图1(a)),是古交矿区水势最高处也是矿化度最低处,水动力活跃,为主要的补给径流区;补给区的地下水分别向西南和东南部水势“低洼带”汇聚,在屯兰中西部形成滞留区;马兰向斜西翼次级褶皱发育,背斜轴部隆起,因此马兰西南部

和背斜轴部为水势较高的弱径流区,向四周水势较低处流动。

### 3.2 水文地质控气作用

#### 3.2.1 水文地质条件影响下的含气量分布

水文控气作用主要包括水力运移逸散作用、水力封闭控气作用和水力封堵控气作用<sup>[31]</sup>。水力运移逸散作用主要见于断层发育地区,易导致煤层气散失;水力封闭控气作用常发生在构造简单的宽缓向斜中,地下水在静水压力、重力驱动方式下流动,呈封闭状态,对煤层气有封隔作用;水力封堵作用常见于不对

称向斜或单斜中,煤储层和煤系围岩含水层地下水流与煤层气运移方向相反而对煤层气运移产生阻力,又可携带溶解在地下水中的煤层气向深部聚集,因而有利于煤层气富集<sup>[32]</sup>。古交矿区的中等矿化度特征和NaHCO<sub>3</sub>型的水质类型反映该区处于半封闭到封闭的状态,是水力封堵型煤层气藏的微观表征,有利于水文控气作用的形成。

不同水文地质单元由于构造、埋深和水动力条件的差异,造成地下煤层气分布和含气量也不尽相同,结合古交矿区实际情况可知(图6):马兰向斜东翼含气量范围为6.17~15.4 m<sup>3</sup>/t,平均含气量为

10.76 m<sup>3</sup>/t;向斜西翼含气量范围为4.1~8.09 m<sup>3</sup>/t,平均为6.25 m<sup>3</sup>/t。屯兰中部含气量最高,马兰西部和屯兰一东曲交界处含气量最低,南北方向呈条带状分布。前人研究认为<sup>[33-34]</sup>向斜轴部为煤层气富集区,但古交矿区向斜轴部并非是全区含气量最高处,其原因为马兰向斜轴部煤层埋深最大,随着上覆地层压力的增大,煤基质孔隙割理随之减小甚至闭合,气体吸附空间减小,含气量减小;其次,轴部地下水位较东翼高,流体由势能高的区域流向势能低的区域,地下水的流动携带煤层气沿着水流方向运移<sup>[10,35]</sup>,因此在向斜东翼形成有利富集区。

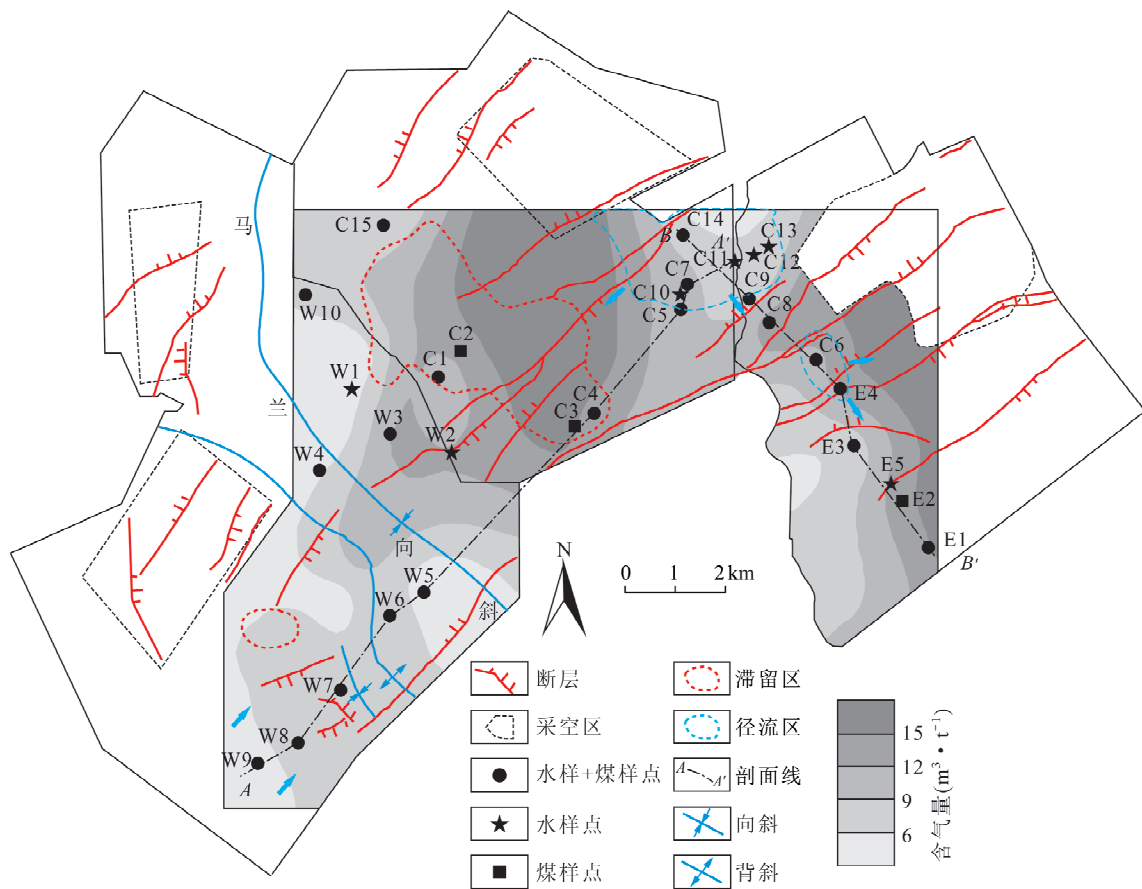


图6 8号煤层含气量等值线

Fig. 6 Isolines of gas content from No. 8 coal seam

总体上,含气量随矿化度增大而增大,随折算水位增大而降低(图7),但明显还受其他因素影响。图6表明屯兰中部为最大滞留区,也为煤层含气量最高区,但前者长轴方向为北西—南东向,后者长轴方向为南—北向,两者并不完全重合,其原因可能在于该区域存在地层平缓区(图5),且断层较少,有利于煤层气的聚集;东曲区块径流区与弱径流区相间分布,水文径流特征明显受断层影响。因此该矿区煤层气富集受构造、水文地质条件双重控制。

### 3.2.2 水文控气模式

煤层气主要以吸附态赋存在煤基质颗粒表面上,地下水系统通过地层压力对气体吸附聚集起到控制作用,因此在排采过程中需要排水降压<sup>[21,36]</sup>。孙粉锦等<sup>[37]</sup>认为地层压力高和地下水势能低的区域煤层含气量高,其因地下水由高势区流向低势区,阻止煤层气解吸和逸散。根据古交矿区地质情况,将该区水文地质控气特征概括为单斜-水力封堵控气作用和地垒-水力封堵控气作用。

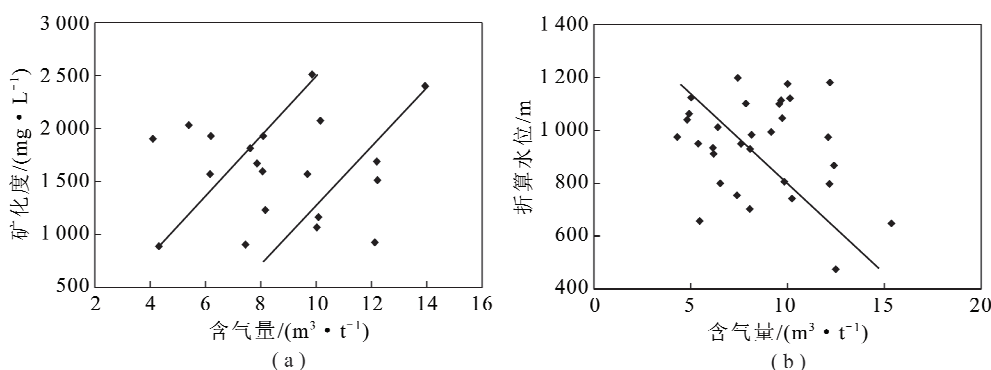


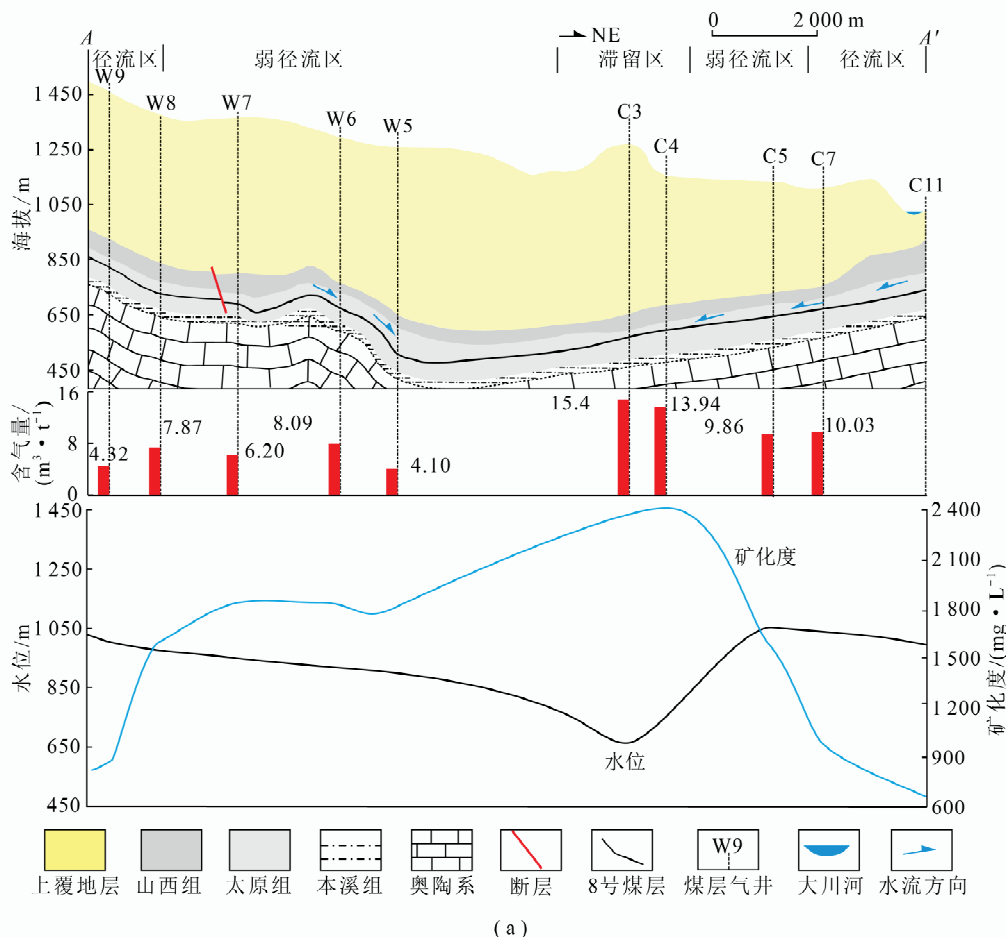
图7 含气量与矿化度和折算水位的关系

Fig. 7 Relationships of gas content with TDS and discounted water level

W5井处于马兰向斜轴部和次级背斜轴部之间,地层较陡,水体流速较快,导致气体逸散,因此该处含气量低;马兰向斜西翼发育次级背斜、向斜和正断层,次级背斜轴部和正断层主要受张应力作用,产生大量的张性裂隙,而次级向斜轴部距离背斜和断层较近,有利于煤层气的扩散转移。由剖面A—A'的水文控气模式图(图8(a))可知,马兰向斜属于不对称向斜,东翼地层水随着大气降水向深部运移,且马兰向斜轴部水位较东翼中部高,向斜轴部水体流向东翼,东翼地层水径流方向与煤层气顺层运移方向相反,在马兰向斜东翼即屯兰中西部煤层气受单斜-水力封

堵作用而富集。

由剖面B—B'的水文控气模式图(图8(b))可知,该区正断层发育,多成组出现,形成地垒和地堑。正断层为张性断层,周围发育裂隙,且地下水位较高,水体沿着割理、裂隙网络状微渗滤,对气体起到一定的封堵作用;由于正断层上盘的裂隙发育程度优于下盘<sup>[38]</sup>,导致煤层气逸散作用增强,因此地垒对气体的保存作用要优于地堑,如井C8处煤层含气量高于井C9,井E4处煤层含气量高于C6,井E2处煤层含气量高于E1,因此东曲受断层和水文地质的共同作用,属于地垒-水力封堵型煤层气藏。



(a)

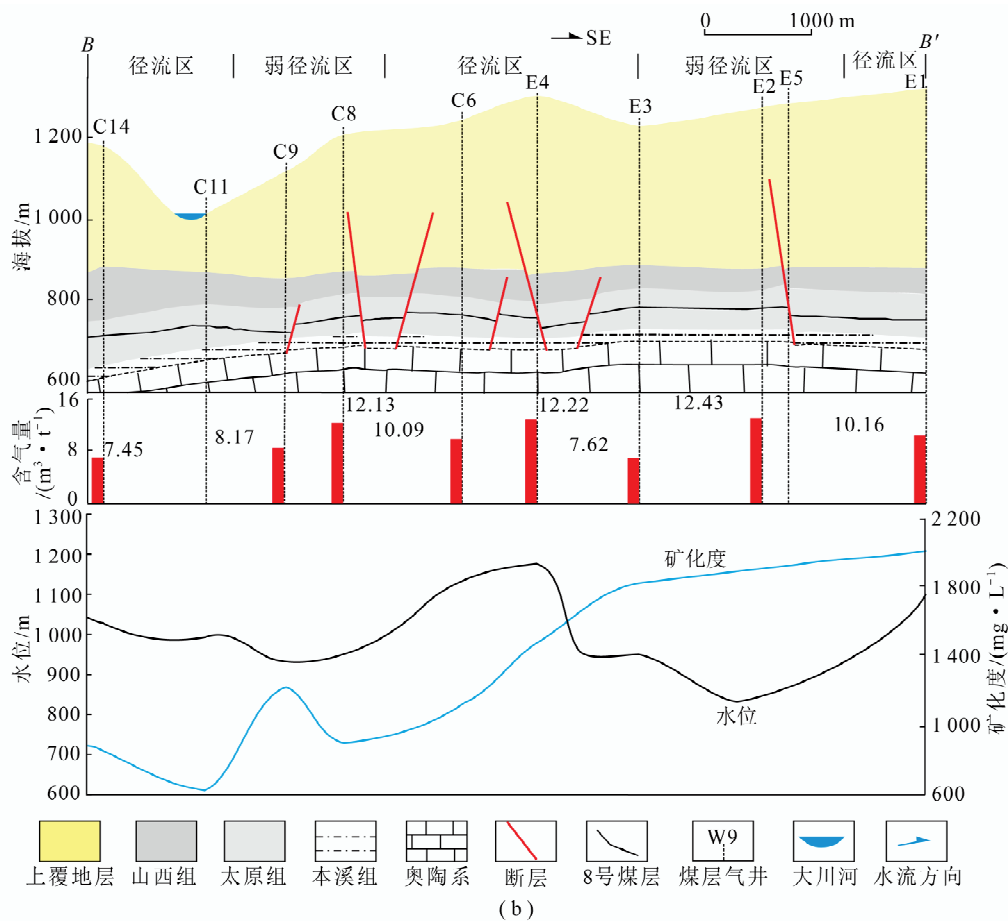


图8 水文控气模式:剖面A—A'和剖面B—B'(位置如图6所示)

Fig. 8 Hydrogeology controlling gas content for cross section A—A' and cross section B—B' (positions showing in Fig. 6)

## 4 结 论

(1)煤层气井产出水中阴阳离子主要为  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Na}^+$ , 并且具有很好的正相关关系; 产出水水型以  $\text{NaHCO}_3$  型为主, 地表水水型为  $\text{Ca-HCO}_3$  和  $\text{Ca-Na-HCO}_3$ , 表明煤层气井产出水与地表水联系弱。产出水矿化度在  $632 \sim 2\,512 \text{ mg/L}$ , 属于淡水-微咸水; 产出水 pH 值介于  $8.81 \sim 7.73$ , 平均为  $8.36$ , 呈弱碱性特征。

(2)古交矿区含气量范围  $4.1 \sim 15.4 \text{ m}^3/\text{t}$ , 南北方向呈条带状分布, 马兰和东曲井田含气量均是由西向东增加, 屯兰中部含气量最高, 含气量随矿化度增大而增大, 随折算水位的增大而降低。根据折算水位和矿化度分布特征, 将古交矿区划分为补给径流区、弱径流区和滞留区, 其中补给径流区含气量最低, 滞留区含气量最高。

(3)结合水化学特征、水动力和构造特征得出, 西山煤田古交矿区煤层气的聚集分布主要受构造、水文地质条件的双重控制, 形成单斜-水力封堵型煤层气藏和地垒-水力封堵型煤层气藏。

## 参考文献 (References):

- [1] 莫日和, 赵军, 王艳芳. 古交煤层气项目勘探开发现状及前景 [J]. 中国煤层气, 2012(5): 3-7.  
MO Rihe, ZHAO Jun, WANG Yanfang. Current status and prospect of exploration and development of Gujiao CBM project [J]. China Coalbed Methane, 2012(5): 3-7.
- [2] 王勃, 姜波, 郭志斌, 等. 沁水盆地西山煤田煤层气成藏特征 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 565-567.  
WANG Bo, JIANG Bo, GUO Zhibin, et al. Coalbed methane reservoir-forming characteristics of Xishan coalbed, Qinshui Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 565-567.
- [3] 刘洪林, 王红岩, 赵国良, 等. 燕山期构造热事件对太原西山煤层气高产富集影响 [J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 29-32.  
LIU Honglin, WANG Hongyan, ZHAO Guoliang, et al. Influence of the tectonic thermal events in yanshan epochon coalbed methane enrichment and high-productivity in Xishan coal field in Taiyuan [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 29-32.
- [4] 汪岗, 秦勇, 解奕炜, 等. 古交区块煤层气地球化学特征及其成因 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1180-1187.  
WANG Gang, QIN Yong, XIE Yiwei, et al. Geochemical characteristic and its origin of CBM in Gujiao blocks [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1180-1187.
- [5] XIA Peng, ZENG Fangui, SONG Xiaoxia. Parameters controlling

- high-yield coalbed methane vertical wells in the B3 area, Xishan coal field, Shanxi, China [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2016, 34(5): 711-734.
- [6] WANG Bo, SUN Fenjin, TANG Dazhen, et al. Hydrological control rule on coalbed methane enrichment and high yield in FZ Block of Qinshui Basin [J]. *Fuel*, 2015: 568-577.
- [7] SCOTT A R. Hydrogeologic factors affecting gas content distribution in coal beds [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 50: 363-387.
- [8] LÜ Yumin, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Production characteristics and the key factors in high-rank coalbed methane fields; A case study on the fanzhuang block, Southern Qinshui Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012: 93-108.
- [9] 刘俊杰. 王营井田地下水与煤层气赋存运移的关系 [J]. *煤炭学报*, 1998, 23(3): 225-230.  
LIU Junjie. Relation between occurrence of groundwater and migration of coalbed methane in Wangying mine field [J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 23(3): 225-230.
- [10] 秦胜飞, 宋岩, 唐修义, 等. 水动力条件对煤层气含量的影响 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(2): 149-152.  
QIN Shengfei, SONG Yan, TANG Xiuyi, et al. The influence on coalbed gas content by hydrogeology—The stagnant groundwater controlling [J]. *Nature Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 149-152.
- [11] 田文广, 汤达祯, 孙斌, 等. 鄂尔多斯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.
- [12] 田冲, 汤达祯, 周志军, 等. 彬长矿区水文地质特征及其对煤层气的控制作用 [J]. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(1): 43-46.  
TIAN Chong, TANG Dazhen, ZHOU Zhijun, et al. Hydrogeological characteristics and their control on coalbed methane in Binchang mining area [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(1): 43-46.
- [13] 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]. *Nature Gas Industry*, 2014, 34(8): 15-19.
- [14] 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.  
XU Rui, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Hydrogeological characteristics of CBM and their controlling effects in Block Anze, Qinshui Basin [J]. *Nature Gas Industry*, 2016, 36(2): 36-44.
- [15] YANG Mei, JU Yiwen, LIU Guijia, et al. Geochemical characters of water coproduced with coalbed gas and shallow groundwater in Lulin coalfield of China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2013, 87(6): 1690-1700.
- [16] 赵永贵, 蔡祖煌. 岩溶地下水系统的研究——以太原地为例 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 154-157.
- [17] 汪雷, 汤达祯, 许浩, 等. 岩浆活动对西山煤田煤储层物性的差异改造特征 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1900-1910.  
WANG Lei, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Magmatism effect on different transformation characteristics of coal reservoirs physical properties in Xishan coalbed [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1900-1910.
- [18] 杨锡禄. 太原西山含煤地层沉积环境 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1987: 11-95.
- [19] 张吉汉. 太原地区水文地质概述 [J]. *山西建筑*, 2014, 40(34): 87-88.  
ZHANG Jihan. Overview on hydrogeology of Taiyuan region [J]. *Shanxi Architecture*, 2014, 40(34): 87-88.
- [20] 乔小娟, 李国敏, 都洁, 等. 太原市西山岩溶水系统水文地球化学特征分析 [J]. *中国岩溶*, 2008, 27(4): 353-358.  
QIAO Xiaojuan, LI Guomin, DU Jie, et al. Hydrochemical features of Xishan karst groundwater system in Taiyuan [J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(4): 353-358.
- [21] 张松航, 唐书恒, 李忠诚, 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.
- [22] 闫霞, 李小军, 赵辉, 等. 煤层气井井间干扰研究及应用 [J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(2): 126-132.  
YAN Xia, LI Xiaojun, ZHAO Hui. Research on well interference of coalbed methane wells and its application [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(2): 126-132.
- [23] 王红岩, 张建博, 刘洪林, 等. 沁水盆地南部煤层气藏水文地质特征 [J]. *煤田地质与勘探*, 2001, 29(5): 33-36.  
WANG Hongyan, ZHANG Jianbo, LIU Honglin, et al. Hydrogeologic feature of coalbed methane reservoir in the southern Qinshui Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(5): 33-36.
- [24] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 1-5.
- [25] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释 [J]. *工程勘察*, 1983, 11(6): 6-11.  
WANG Ruijiu. Three line diagram and its hydrological geological explanation [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 1983, 11(6): 6-11.
- [26] 吴颖, 尹锦涛, 白建林. 鄂尔多斯盆地东南部煤层气井产出水特征及其指示意义 [J]. *中国煤层气*, 2014, 11(6): 27-30.  
WU Ying, YIN Jintao, BAI Jianlin. Characteristics and significance of coalbed methane well produced water in southeast of Ordos Basin [J]. *China Coalbed Methane*, 2014, 11(6): 27-30.
- [27] 朱学申, 梁建设, 柳迎红, 等. 煤层气井产水影响因素及类型研究——以沁水盆地柿庄南区块为例 [J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(5): 755-760.  
ZHU Xueshen, LIANG Jianshe, LIU Yinghong, et al. Influencing factor and type of water production of CBM wells; Case study of Shizhuangnan Block of Qinshui Basin [J]. *Nature Gas Geosci-*

- ence,2017,28(5):755-760.
- [28] 王勃,李谨,张敏. 煤层气成藏地层水化学特征研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2007,29(5):66-68.  
WANG Bo,LI Jin,ZHANG Min. Formation water chemical characteristics of coalbed methane(CBM)reservoir formation[J]. Journal of Oil and Gas Technology(J JPI),2007,29(5):66-68.
- [29] 傅雪海,秦勇,韦重稻. 煤层气地质学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2007,107-108.
- [30] 金爱民,楼章华,朱蓉,等. 鄂尔多斯盆地上古生界储层现今地下水动力场及其流体特征[J]. 高校地质学报,2002,8(3):334-344.  
JIN Aimin,LOU Zhanghua,ZHU Rong,et al. A study on present hydrodynamics and properties of fluids in up-palaeozoic reservoir of the Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities,2002,8(3):334-344.
- [31] 叶建平,武强,王子和. 水文地质条件对煤层气赋存的控制作用[J]. 煤炭学报,2001,26(5):459-462.  
YE Jianping,WU Qiang,WANG Zih. Controlled characteristics of hydrogeological conditions on the coalbed methane migration and accumulation[J]. Journal of China Coal Society,2011,26(5):459-462.
- [32] 吴鲜,廖冲,叶玉娟,等. 水文地质条件对煤层气富集的影响[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2011,13(5):78-81.  
WU Xian,LIAO Chong,YE Yujuan,et al. The influence of hydrogeological conditions on the enrichment of coalbed methane[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology:Natural Science Edition,2011,13(5):78-81.
- [33] SONG Yan,LIU Honglin,HONG Feng,et al. Syncline reservoir pooling as a general model for coalbed methane(CBM) accumulations;Mechanisms and case studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2012,88-89:5-12.
- [34] CAI Yidong,LIU Dameng,YAO Yanbin,et al. Geological controls on prediction of coalbed methane of No. 3 coal seam in Southern Qinshui Basin,North China[J]. International Journal of Coal Geology,2011,88:101-112.
- [35] 秦胜飞,宋岩,唐修义,等. 流动的地下水对煤层含气性的破坏机理[J]. 科学通报,2005,50(b10):99-104.  
QIN Shengfei,SONG Yan,TANG Xiuyi,et al. The groundwater flow of coal seam gas containing the destructive methanism[J]. Chinese Science Bulletin,2005,50(b10):99-104.
- [36] 王怀勳,朱炎铭,李伍,等. 煤层气赋存的两大地质因素[J]. 煤炭学报,2011,36(7):1129-1134.  
WANG Huaijin,ZHU Yanming,LI Wu,et al. Two major geological control factors of occurrence characteristics of CBM[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(7):1129-1134.
- [37] 孙粉锦,王勃,李梦溪,等. 沁水盆地南部煤层气富集高产主控地质因素[J]. 石油学报,2014,35(6):1070-1079.  
SUN Fenjin,WANG Bo,LI Mengxi,et al. Major geological factors controlling the enrichment and high yield of coalbed methane in the southern Qinshui Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(6):1070-1079.
- [38] 宋国奇,刘克奇. 断层两盘裂隙发育特征及其石油地质意义[J]. 油气地质与采收率,2009,16(4):1-4.  
SONG Guoqi,LIU Keqi. Petroleum geology and recovery efficiency[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2009,16(4):1-4.