

文章编号: 0253-2697(2024)03-0517-14 DOI:10.7623/syxb202403003

煤层气井产出水演化路径及产量判识意义

——以黔西地区织金区块为例

郭晨^{1,2,3} 李瑞腾¹ 秦勇⁴ 卢玲玲^{5,6} 易同生⁷ 陈贞龙⁸ 袁航⁸ 高为⁹ 程曦¹

- (1. 西安科技大学地质与环境学院 陕西西安 710054; 2. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室 陕西西安 710054;
3. 西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院 陕西西安 710054; 4. 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;
5. 西北大学地质学系 陕西西安 710069; 6. 中国煤炭地质总局航测遥感局 陕西西安 710199;
7. 贵州省煤田地质局 贵州贵阳 550008; 8. 中国石油化工股份有限公司华东油气分公司 江苏南京 210011;
9. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心 贵州贵阳 550008)

摘要:煤层气井的产出水蕴含着重要的地质与产能信息,揭示产出水的地球化学特征与主控因素,阐明产出水的演化路径及其与产能的内在关系,有助于理解产能的非均质性并为开发方案优化提供依据。近年来,黔西地区织金区块煤层气的勘探开发取得重要突破,这为中国南方多层、薄层状煤层条件下煤层气的开发提供了技术示范,但仍然存在产出水水质变化大、产能不确定性高、控产因素不明等问题。通过采集黔西地区织金区块上二叠统长兴组—龙潭组煤层气井的产出水样并开展水文地球化学测试,探讨了水化学特征、演化路径及其产量判识意义。产出水水质包括 Na-HCO₃ 型与 Na-Cl 型,前者的总固溶体(TDS)含量为 944~2681 mg/L,后者的 TDS 含量为 3603~8800 mg/L。以 TDS 含量为刻度,水样的 5 个聚类(聚类①—聚类⑤)代表地下水的滞留程度依次增高。脱硫酸作用、阳离子交换吸附作用、浓缩作用是控制产出水化学特征与演化的主要因素。产出水的水质变化先后经历了氧化条件下补给作用主导的低 TDS 含量(<200 mg/L)Ca-SO₄ 型水质、还原条件下脱硫酸作用与阳离子交换吸附作用主导的中等 TDS 含量(900~3000 mg/L)Na-HCO₃ 型水质、高度滞留条件下浓缩作用主导的高 TDS 含量(3500~9000 mg/L)Na-Cl 型水质。产出水的演化可分为还原阶段和封闭阶段,处于封闭阶段的产出水(TDS>3000 mg/L)对应高产井。提取煤层气产量判识的关键水化学指标及其临界值,通过分析 TDS 含量和 Cl⁻、Na⁺、Sr²⁺ 等特征离子浓度可更有效地判识高产井;借助脱硫系数可更有效地判识低产井。黔西地区织金区块煤层气井的选址应避开地下水径流强烈地带,布设在具有高 TDS 含量、高 Cl⁻ 含量、低 SO₄²⁻ 含量的滞留区,珠藏次向斜轴部为布设煤层气井的有利区。水动力干扰及其诱发的低效降压仍是制约直井/定向井多层合采产能效率的重要因素。研究成果可为织金区块煤层气的高效开发与产出水的处理提供依据。

关键词:产出水;水化学演化;黔西地区;煤层气合采;流体干扰

中图分类号:TE133

文献标识码:A

Evolution path of water produced from coalbed methane wells and its significance in judging productivity: a case study of Zhijin block in western Guizhou Province

Guo Chen^{1,2,3} Li Ruiteng¹ Qin Yong⁴ Lu Lingling^{5,6} Yi Tongsheng⁷

Chen Zhenlong⁸ Yuan Hang⁸ Gao Wei⁹ Cheng Xi¹

- (1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Shaanxi Xi'an 710054, China;
2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Shaanxi Xi'an 710054, China;
3. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Shaanxi Xi'an 710054, China;
4. Key Laboratory of CBM Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China; 5. Department of Geology, Northwest University, Shaanxi Xi'an 710069, China; 6. Aerophoto Grammetry and Remote Sensing Bureau, China National Administration of Coal Geology, Shaanxi Xi'an 710199, China; 7. Guizhou Bureau of Coal Geological Exploration, Guizhou Guiyang 550008, China; 8. Sinopec East China Oil & Gas Company, Jiangsu Nanjing 210011, China; 9. Guizhou Provincial Engineering and Technology Research Center of Coalbed Methane and Shale Gas, Guizhou Guiyang 550008, China)

Abstract: The water produced from coalbed methane (CBM) wells contains rich information on geology and productivity, which can reveal the geochemical characteristics and main controlling factors of produced water and make clear the evolution path of produced water and its inherent link with production capacity, thus helping understand the heterogeneity of production capacity and provide a basis for the optimization of development programs. In recent years, significant breakthroughs have been made in the CBM exploration.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 42002195, No. 42130802)、贵州省科技计划项目(黔科合战略找矿[2022]ZD001-1)、贵州省科技计划项目(黔科合平台人才 CXTD[2022]016)和陕西省重点研发计划项目(2022GD-TSLD-64)资助。

第一作者及通信作者:郭晨,男,1988年7月生,2015年获中国矿业大学博士学位,现为西安科技大学地质与环境学院副教授,主要从事煤及非常规天然气地质教学与研究工作。Email: makaay_@126.com

tion and development in Zhijin block of western Guizhou Province, providing a technical demonstration for the CBM development multiple thin coal seams in South China. However, there are still a number of problems, including great variability in produced water quality, high uncertainty in production capacity, and unclear control factors for gas production. In this study, hydrogeochemical tests were performed on the water produced from CBM in Zhijin block of western Guizhou Province, which aims to explore the hydrochemical characteristics, evolution path and its significance in judging productivity. The quality of the produced water can be divided into Na-HCO₃ and Na-Cl types; the total dissolved solid (TDS) of the former ranges from 944 mg/L to 2681 mg/L, and that of the latter ranges from 3603 mg/L to 8800 mg/L. According to the scale of TDS, the five clusters of samples show the successively increasing degree of groundwater retention. Desulphidation, cation exchange adsorption, and concentrating action are the main factors controlling the hydrochemical characteristics and evolution of produced water. The produced water is of Ca-SO₄ type with low TDS (<200 mg/L) under oxidation conditions, Na-HCO₃ type with medium TDS (900-3000 mg/L) dominated by desulphidation and cation exchange adsorption under reduction conditions, and Na-Cl type with high TDS (3500-9000 mg/L) dominated by concentrating action under high retention rate. The evolution process of produced water can be divided into reduction stage and retention stage, and the produced water (TDS > 3000 mg/L) in the retention stage corresponds to high-yield wells. High-yield wells can be effectively identified by extracting key hydrochemical indicators and their critical values for identification of CBM production capacity, and analyzing the concentrations of characteristic ions such as Cl⁻, Na⁺ and Sr²⁺; the desulphidation coefficient $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{Cl}^-$ can be used to effectively identify low-yield wells. The CBM wells in Zhijin block of western Guizhou Province should be located in groundwater retention areas with high TDS, high Cl⁻ and low SO₄²⁻, instead of strong groundwater runoff zones. The axial part of Zhucang subsyncline is a favorable area for deployment of CBM wells. Hydrodynamic interference and its resulted low pressure reduction efficiency are still the key factors restricting the multi-seam co-production capacity of vertical and directional wells. In conclusion, these findings can serve as a foundation for the efficient CBM development and produced water treatment in Zhijin block.

Key words: produced water; water chemical evolution; western Guizhou; coalbed methane co-production; fluid interference

引用:郭晨,李瑞腾,秦勇,卢玲玲,易同生,陈贞龙,袁航,高为,程曦.煤层气井产出水演化路径及产量判别意义——以黔西地区织金区块为例[J].石油学报,2024,45(3):517-530.

Cite: GUO Chen, LI Ruiteng, QIN Yong, LU Lingling, YI Tongsheng, CHEN Zhenlong, YUAN Hang, GAO Wei, CHENG Xi. Evolution path of water produced from coalbed methane wells and its significance in judging productivity: a case study of Zhijin block in western Guizhou Province[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(3): 517-530.

黔西地区是中国南方煤层气资源丰富的地区,也是继沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东缘之后最具煤层气商业开发前景的地区,加之瓦斯事故频发且地处南方,煤层气开发的战略价值突显^[1]。贵州省的上二叠统煤层气勘探开发已历时30余年,受制于复杂构造背景和多层、薄层状的煤层叠置条件,前期勘探历程曲折,直至近年才进入快速发展期,主要区块相继取得产能突破^[2-3]。黔西地区织金区块于2009年开始在上二叠统长兴组—龙潭组开展煤层气开发评价试验,煤层的高含气量、高资源丰度、埋藏较浅、煤体结构相对简单等优势证实其具有地面煤层气开发潜力^[4-6]。目前,织金区块形成了“单井突破—小井组先导—大井组试验—整体开发”的基本开发思路,建立了适合多层、薄层状煤层发育特点的开发模式,即“定向井多层合采+水平井分段压裂”,实现了多层、薄层状煤层条件下的产能突破,为中国南方煤层气的高效开发提供了技术示范^[7-8]。

中—浅部煤层气开发的主流方式为排水降压,产出水蕴藏着丰富的地质与产能信息^[9-11]。煤层气井产出水水质之间的差异代表不同的水文地质条件、排采状况及水源类型,于合采井而言亦能反映流体的干扰程度,可作为分析降压效果的重要依据^[12-14]。产出水的化学特征受控于宏观水动力背景与局部水动力场扰动,对气、水

产量具有明确指示意义^[15]。例如,煤层气井的排采水源可分为内源水与外源水,其中,外源水具有较好的补给条件,会抑制降解除吸^[16],也称为“无效水”^[17]。Rivera^[18]提出了无限含水层(infinite acting aquifer)的概念,其关键在于水的越流(跨层)补给和开放向斜中的向心流。再如,美国犹他州中部 Ferron 组煤层气井的产出水水质变化剧烈,构造格局与 Ferron 组三角洲沉积体系的复杂性在区域尺度上控制着地下水补给和径流,也在局部尺度上控制着不同来源的地下水向煤层气井流动,进而造成 Ferron 组煤层气产能不稳定^[19]。从鄂尔多斯盆地东缘煤层气的排采动态来看,可识别出3种局部水动力场扰动模式,即有效扰动型、含水层入侵型和淡水补给型,后两种属无效排水,对应煤层的低产气量^[20]。

织金区块上二叠统含煤地层沉积后经历了深埋作用,煤层埋深在印支末期超过5000 m;燕山期构造运动使地层抬升剥蚀,煤层埋深变浅,但构造-热演化事件使煤阶达到并定型于无烟煤;喜马拉雅期,织金区块的隆升幅度进一步加剧,导致现今煤层埋深普遍小于1000 m。郭晨等^[21]研究认为,黔西地区织金区块的煤层气开发面临着较为严重的表层水干扰,地表水与浅层地下水对浅部煤层的排采有显著影响,并通过阐明上、中、下煤组合采效果不佳的原因,提出优先开发中、

下部煤组的建议。这一认识已被开发实践所证实,并明确了龙潭组 16 号—30 号煤层为主力开发层系^[22-23]。然而,当开发层位下移后,气水产量和水质的井间差异依然存在,其空间变化规律与内在原因并未得到深入阐释,制约了开发效率。据此,笔者以黔西地区织金区块为例,通过系统采集煤层气井的产出水样品,分析产出水的地球化学特征,探索产出水在空间尺度上的演化路径及关键水化学作用,寻找产出水演化阶段与产能的对应关系,提取对产能具有指示意义的特征水化学指标并探索产量判识方法,以期对排采水动力场分析及开发方案优化提供科学依据。

1 样品与测试

采用 1 L 的聚乙烯瓶在煤层气井口采集产出水样品,采样前用目标水样冲洗瓶体 3 次,然后充满水样并密封,封装于 4 ℃ 的保温箱内,送往实验室开展水化学测试。一次性采集 12 口煤层气井的产出水样[样品号

与井号对应,图 1(a)],采样井的排采时间均在 3 a 以上,返排率在 75% 以上,以最大限度地降低压裂液等外来液体对产出水质的干扰,体现原位地下水特征。另外,在流经黔西地区织金区块的少普河中采集了地表水样 1 份。测试在中国科学院环境地球化学国家重点实验室(贵阳)完成,测试项目包括:总固溶体(TDS)含量,pH 值,阴离子(HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 Br^-)含量,阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Sr^{2+} 、 Fe^{3+})含量等。具体测试方法为:采用盐酸滴定法测试 HCO_3^- 含量,采用离子色谱法测试其他阴离子含量,采用电感耦合等离子原子发射光谱法测试阳离子含量,采用干燥称重法测试 TDS 含量,在采样现场用便携式水质测试笔测试了 pH 值。所有样品均开展了重复性检验,结果具有一致性,并通过毫克当量阴、阳离子平衡法检验了测试数据,相对误差均在 5% 以内,实验结果可靠。另外,利用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)技术测试了水样的微量元素含量。

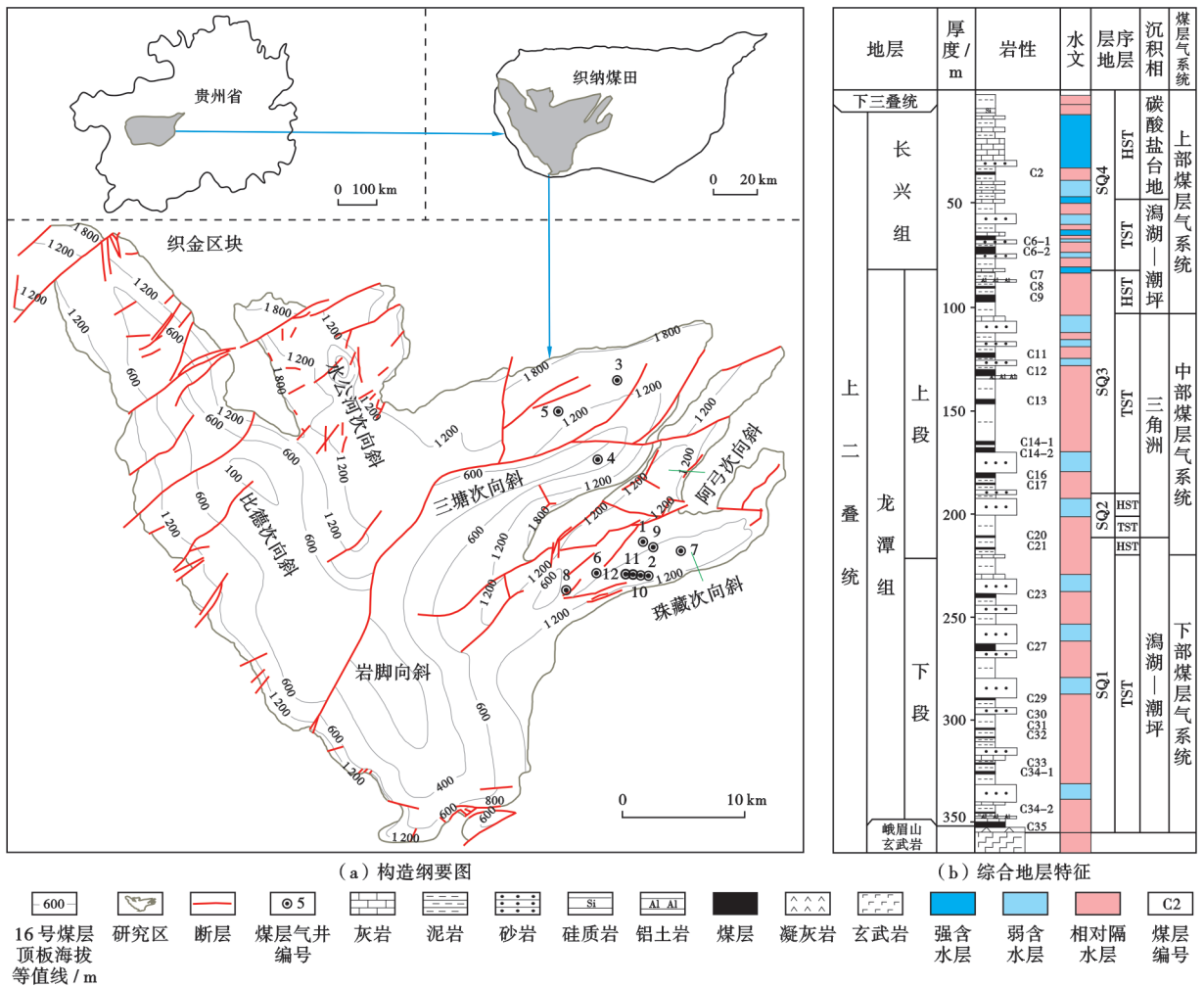


图 1 黔西地区织金区块综合地质特征

Fig. 1 Geological characteristics of Zhijin block in western Guizhou Province

黔西地区织金区块煤层气开发方式包括直井/定向井多层合采以及水平井分段压裂单层排采。从产能来看,水平井的开发效果好于直井/定向井多层合采,水平井的平均产气量在 2000 m³/d 以上,而直井/定向井合采的产能波动较大,其产气量为 0~2 662 m³/d。截至采样日期前,3 号井只产水不产气,其产水量远高于煤系极限供液能力^[24]。各类井型的产能效果按照水平井、定向井、直井依次递减。基于沉积环境与压力

梯度分布特点,织金区块上二叠统含煤地层可分为上、中、下 3 个煤组(煤层气系统),分别对应 1 号—9 号、10 号—21 号、22 号—35 号煤层^[21][图 1(b)]。上部煤组受制于表层水干扰,产能效果不佳。目前,排采层位组合以中、下部煤组为主,仅 1 号井打开了上部煤组,经 10 余年排采后产气量处于低值。织金区块产层(组合)的埋深整体在 300~1 000 m,合采层段的最大跨度为 47.8~248.8 m(表 1)。

表 1 煤层气井的基本信息

Table 1 Information of coalbed methane wells

井号	井型	压裂与排采煤层	产层(组合)几何特征			当月平均产量/(m ³ /d)		当月峰值产量/(m ³ /d)	
			埋深/m	最大跨度/m	总厚度/m	气	水	气	水
1	直井	20/23;6/7/8/10;12/14/16/17	240.4~432.3	191.9	5.0	118	1.04	146	1.24
2	水平井	23(8)	585.3~587.4	2.1	2.1	2660	4.24	3066	5.07
3	直井	23/30;32/33/34	477.2~546.1	68.9	2.1	0	16.53	0	16.81
4	直井	23/24/27;30/32/33	1093.4~1155.0	61.6	5.4	1022	1.58	2382	3.27
5	直井	14;16	562.0~615.7	53.7	3.9	358	5.45	1107	6.74
6	直井	20/21/23;27/30	517.5~598.1	80.6	5.1	1058	1.45	1209	1.99
7	直井	19/20;23/27	509.8~557.6	47.8	5.2	1302	0.73	1529	0.80
8	直井	20/21/23;27/30	806.3~899.3	93.0	6.7	17	6.82	147	7.25
9	定向井	16/17,20/23,27/30	415.0~663.8	248.8	9.9	1324	1.20	1455	1.58
10	水平井	23(7)	539.3~542.1	2.8	2.8	2118	0	2215	0
11	水平井	30(9)	602.4~604.8	2.4	2.4	2219	0	2438	0
12	定向井	11/12/13;16/17/18/19; 20/21/23;27/30	453.3~642.0	188.7	9.9	2662	0	3140	0

注:“/”分隔同一压裂段不同煤层;括号内为水平井的压裂段数。

2 测试分析结果

2.1 水质概述

测试结果显示:产出水样品的水型为 Na-HCO₃ 型与 Na-Cl 型;而地表水样品的水型为 Ca-SO₄ 型,其 TDS 含量显著低于产出水。产出水样品的 pH 值为 7.73~8.65,平均为 8.05,具有弱碱性特征。Na-Cl 型水样的 TDS、Na⁺、Cl⁻、K⁺、Sr²⁺ 含量显著高于 Na-

HCO₃⁻ 型水样,例如,Na-Cl 型水样的平均 TDS 含量为 5 642 mg/L,而 Na-HCO₃ 型水样的平均 TDS 含量为 1 655 mg/L。各离子中,质量浓度平均值较大的前 3 位依次是 HCO₃⁻、Na⁺ 和 Cl⁻(表 2),变异系数较大的依次是 SO₄²⁻、Cl⁻ 和 Sr²⁺,可见 Cl⁻ 的特征性与可区分性均十分显著,可作为煤层气井产能分析和水源识别的关键离子。SO₄²⁻ 虽然平均值很低,但变异系数最高,亦需要关注。

表 2 水样测试结果

Table 2 Test results of water samples

样品号	HCO ₃ ⁻ / (mg/L)	F ⁻ / (mg/L)	Cl ⁻ / (mg/L)	SO ₄ ²⁻ / (mg/L)	Ca ²⁺ / (mg/L)	Mg ²⁺ / (mg/L)	Na ⁺ / (mg/L)	K ⁺ / (mg/L)	Sr ²⁺ / (mg/L)	TDS / (mg/L)	pH 值	水型
1	1555.49	6.70	6.28	0.03	2.25	0.35	543.80	1.38	0.37	949	8.18	Na-HCO ₃
2	1897.89	2.41	2958.02	0.22	30.59	5.95	2440.18	13.39	9.80	4523	7.73	Na-Cl
3	1643.54	8.11	4.39	1.36	2.06	0.25	549.98	1.78	0.40	944	8.29	Na-HCO ₃
4	2876.19	3.90	876.36	0.08	9.53	1.95	1528.09	10.78	3.53	2681	7.77	Na-HCO ₃
5	1858.76	3.94	37.31	0.29	3.66	0.63	664.17	1.79	0.59	1123	7.79	Na-HCO ₃
6	2719.66	8.99	21.49	0.20	3.88	0.90	937.09	5.60	1.05	1562	8.38	Na-HCO ₃
7	3404.47	4.28	266.90	0.05	8.81	1.23	1313.53	6.41	2.41	2152	7.93	Na-HCO ₃
8	2690.31	10.14	31.16	5.25	4.41	1.30	940.24	8.53	0.92	1568	8.01	Na-HCO ₃
9	2827.27	9.14	56.12	13.24	6.59	1.26	993.64	4.68	1.08	1678	8.00	Na-HCO ₃
10	1213.09	2.66	5516.03	0.03	22.52	11.32	3977.76	94.75	23.12	8800	7.73	Na-Cl
11	2162.03	2.85	1994.29	1.17	4.51	3.33	2485.85	46.80	5.72	3603	8.65	Na-Cl
12	2837.05	7.94	488.65	1.22	5.09	1.38	1277.35	20.75	2.23	2240	8.42	Na-HCO ₃
13	68.48	0.13	2.32	69.62	59.23	4.94	4.72	1.52	0.55	166	7.81	Ca-SO ₄

注:样品 1—12 的编号与煤层气井的井号一一对应;样品 13 为地表水样;TDS—总固溶体。

水样的 Piper 三线图(图 2)显示,样品点分布于 3 个区域内:样品 13 的地表水样位于 I 型区,样品 2、样品 10、样品 11 位于 III 型区,其余样品位于 IV 型区,样品的分布区与其水型对应。IV 型区内,样品 4、样品 7、样品 12 分布于其他样品的右上方,代表此区域内水质的 TDS 含量相对高,TDS 含量均在 2000 mg/L 以上。

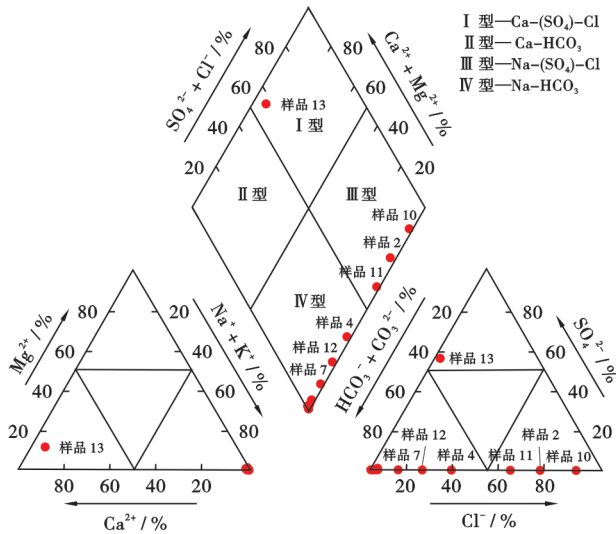


图 2 水样 Piper 三线图

Fig. 2 Piper trilinear diagram of water samples

2.2 样品分类

分析产出水的地球化学特征对煤层气产能的指示意义,关键在于基于水化学数据对样品及其所属煤层气井进行分类,并揭示各类型间水化学差异的形成机理,分析水化学组成与煤层气产能的因果关系。因此,基于 Cl^- 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Sr^{2+} 和 SO_4^{2-} 5 种代表性离子,笔者对样品进行了聚类分析。聚类方法选择“组间联接”,度量标准为平方欧式距离(squared Euclidean distance)。

基于聚类谱系(图 3)可识别出 5 类水样,从聚类①到聚类⑤,TDS 含量由小变大。聚类①包含样品 13 的地表水样,其水型为 Ca-SO_4 型,TDS 含量为 166 mg/L;聚类②包含样品 1、样品 3 和样品 5,其水型为 Na-HCO_3 型,TDS 含量为 944~1 123 mg/L;聚类③包含样品 4、样品 6、样品 7、样品 8、样品 9 和样品 12,其水型为 Na-HCO_3 型,TDS 含量为 1 562~2 681 mg/L;聚类④包含样品 2 和样品 11,其水型为 Na-Cl 型,TDS 含量为 3 603~4 523 mg/L;聚类⑤包含样品 10,其水型为 Na-Cl 型,TDS 含量为 8 800 mg/L。聚类分析结果与样品的水型对应, Ca-SO_4 型、 Na-HCO_3 型、 Na-Cl 型水的 TDS 含量逐次增大, Na-HCO_3 型被分为 2 类,包括低 TDS (<1 200 mg/L) 型与高 TDS (>1 500 mg/L) 型。

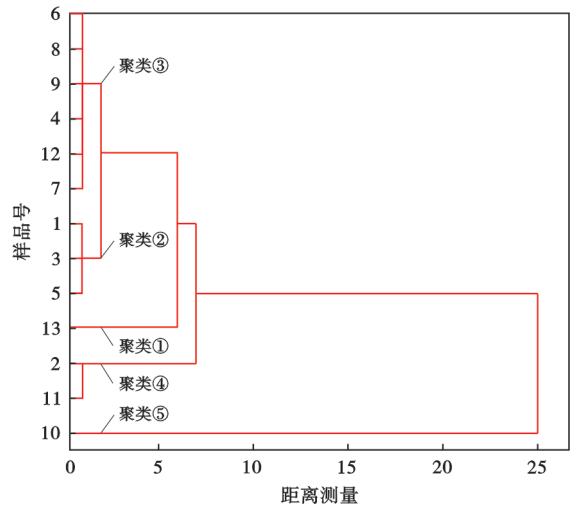


图 3 水样的聚类谱系

Fig. 3 Cluster pedigree of water samples

3 关键水化学作用

3.1 特征离子相关性

以 TDS 含量为刻度,样品的 Cl^- 、 Na^+ 、 Sr^{2+} 含量均呈现一致的正相关性(图 4),体现了地下水的封闭性特征。聚类分析结果在特征离子的相关性分析图(图 4)中具有良好的区分,显示一个以聚类①地表水样为起点、以聚类⑤为终点的封闭性演化序列[图 4(a)—图 4(c)]。这是由于随着水-岩作用增强,盐类将按溶解度序列逐渐沉淀析出,例如, CaCO_3 首先达到饱和并析出,随后 CaSO_4 沉淀析出,从而使溶解度高的 Cl^- 和 Na^+ 得到富集。 Cl^- 是地下水中最稳定的离子,其含量随 TDS 含量的增加而增加,可作为反映地下水流程与演变的重要示踪离子^[25]。另外, Sr^{2+} 是煤层水中的特征微量元素,亦会随着水-岩作用的增强而富集^[12],煤层水中极低的 SO_4^{2-} 含量有利于溶解更多的 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 等微量元素^[26]。

以 2 000 mg/L 的 TDS 含量为分界,在 HCO_3^- 含量与 TDS 含量的交会关系中聚类特征呈现明显转折[图 4(d)],这指示了 3 方面的含义:①不同水型的 TDS 贡献存在差异, HCO_3^- 含量是 Na-HCO_3 型水的主要贡献者;②当地表水或大气降水补给煤系后,其水型通过脱硫酸作用与阳离子交换吸附发生改造,导致 Ca-SO_4 型水转化为 Na-HCO_3 型水;③随 TDS 含量进一步增高,溶解度低的盐类相继析出, Na^+ 和 Cl^- 得以在煤系地下水中富集,形成 Na-Cl 型水。据此推测,煤层气井产出水经历了以补给作用为主导的低 TDS 含量 (<200 mg/L) Ca-SO_4 型、以脱硫酸与阳离子交换吸附作用为主导的中等 TDS 含量 (900~3 000 mg/L)

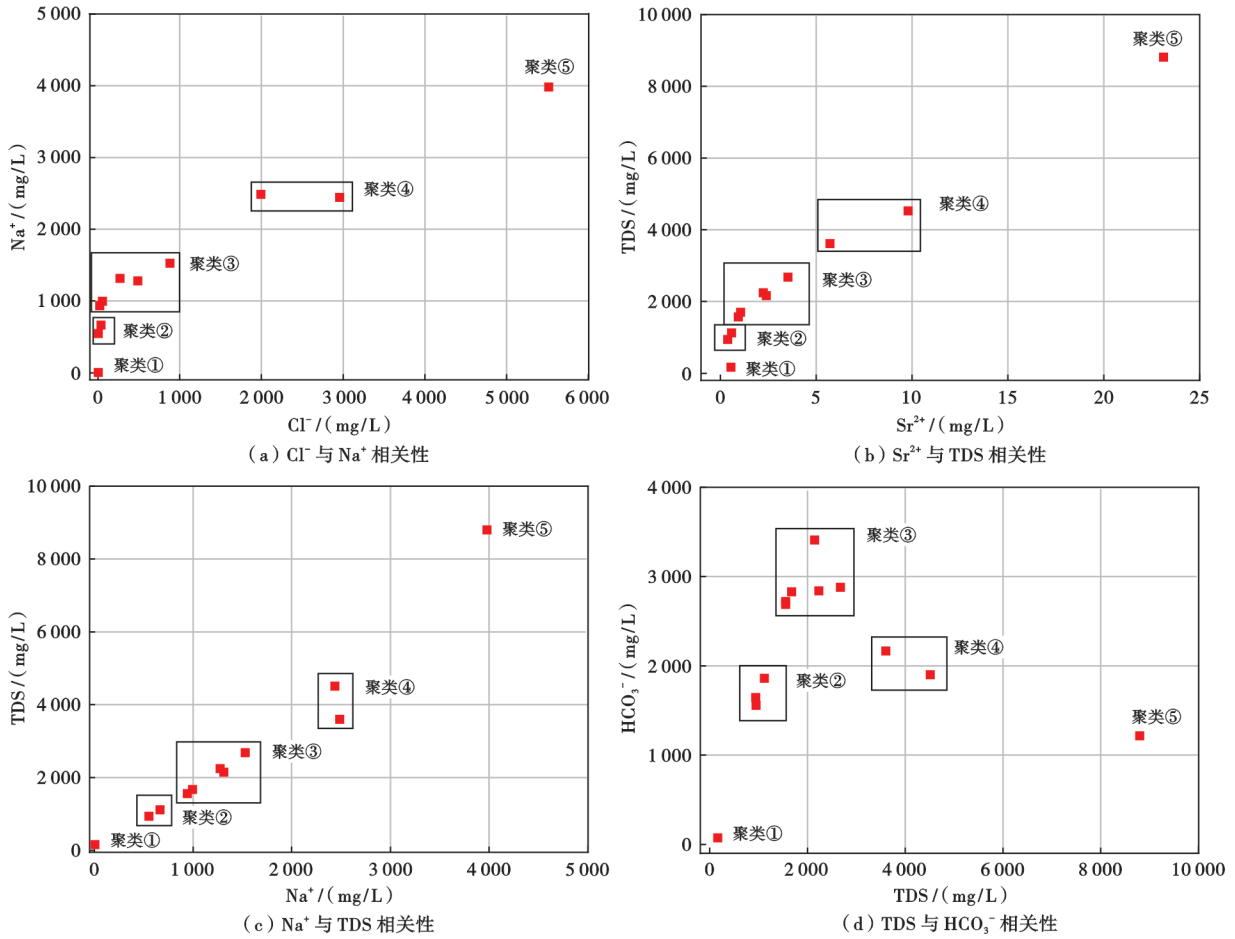


图 4 特征离子相关性

Fig. 4 Correlations between characteristic ions

Na-HCO_3 型和以滞留浓缩作用为主导的高 TDS 含量(3 500~9 000 mg/L)Na-Cl 型的地质演化过程。以下将进一步论证这一推测。

3.2 脱硫酸作用

脱硫系数($\gamma\text{SO}_4^{2-} / \gamma\text{Cl}^-$, 其中, γSO_4^{2-} 和 γCl^- 代表分别采用 SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子的毫克当量浓度)可表征脱硫酸作用程度, 其值越低, 反映脱硫酸作用越彻底, 地下水环境越封闭。织金区块产出水样的 SO_4^{2-} 含量为 0.03~13.24 mg/L, 平均为 1.93 mg/L; 脱硫

系数为 $3.97 \times 10^{-6} \sim 0.23$, 平均为 0.04, 反映脱硫酸作用充分。多煤层含煤岩系具有丰富的有机质与还原条件, 这使得脱硫酸作用成为煤系地层水的特征水-岩作用之一^[11], 黔西地区上二叠统广泛发育高硫煤可为此提供佐证。Cheung 等^[27]指出, 煤层产出水所具有的低 SO_4^{2-} 含量、高硫同位素($\delta^{34}\text{S}$)特征源于硫酸盐还原菌参与下的脱硫酸作用。脱硫系数与 TDS 含量呈现的负相关性反映地下水的滞留程度越高, 脱硫酸作用越彻底[图 5(a)]。

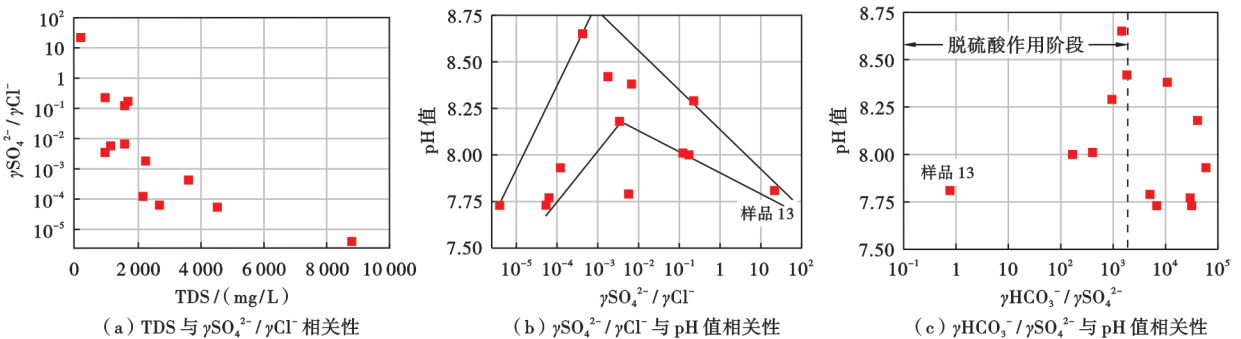


图 5 脱硫酸作用分析

Fig. 5 Analysis of sulfate reduction

脱硫酸作用导致 SO_4^{2-} 降低、 HCO_3^- 增加,并伴随 pH 值升高。进一步分析脱硫系数与 pH 值的关系[图 5(b)]显示:以样品 13 的地表水样为起点,随着脱硫系数降低,pH 值呈现先增高后降低的趋势,前一阶段指示脱硫酸作用,后一阶段反映脱硫酸作用达到极限后脱硫系数的降低主要源于 Cl^- 含量增加,同时 HCO_3^- 的消耗也导致 pH 值降低。

Van Voast^[28]指出,煤层水系统中大多数 HCO_3^- 来自于硫酸盐还原作用,这会导致产出水中具有高 HCO_3^- 含量($>500 \text{ mg/L}$)和低 SO_4^{2-} 含量($<500 \text{ mg/L}$)的特征。据此可构建另一个可表征脱硫酸作用的系数 $\gamma\text{HCO}_3^-/\gamma\text{SO}_4^{2-}$,脱硫酸作用越强,其值越高。该系数与 pH 值的关系也同样显示出明确的两段性特征。图 5(c)中左侧的正相关关系指示脱硫酸作用,右侧的

负相关关系反映水化学作用类型发生了转变。

3.3 阳离子交换吸附

前人的研究认为,当 $\gamma\text{Na}^+ - \gamma\text{Cl}^-$ 与 $(\gamma\text{Ca}^{2+} + \gamma\text{Mg}^{2+}) - (\gamma\text{SO}_4^{2-} + \gamma\text{HCO}_3^-)$ 呈斜率为 -1 的线性关系时,指示地下水发生了阳离子交换吸附作用^[29-30],且距离坐标原点越远的数据,其样品的阳离子交换作用越强。图 6(a)显示:除样品 11 外,其他样品基本符合上述关系,这说明织金区块产出水的演化过程受阳离子交换吸附作用影响,煤系中丰富的黏土矿物为此提供了物质基础。在图 6(a)中,样品 13 的数据点位于坐标原点位置,代表了演化的起点,聚类②、聚类③样品沿基线依次分布,代表了阳离子交换吸附作用逐渐增强,聚类④、聚类⑤样品分布的规律性差,反映阳离子交换吸附不再是主要作用。

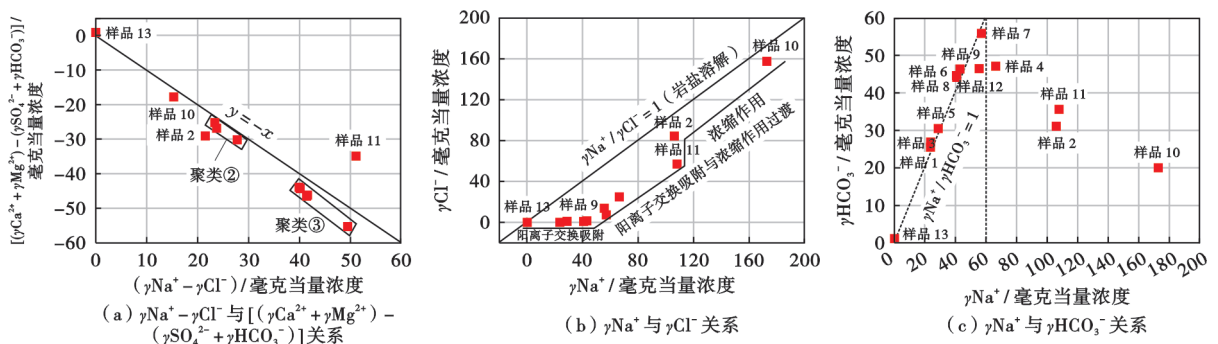


图 6 阳离子交换吸附作用分析

Fig. 6 Analysis of cation exchange adsorption

氯碱指数 (CaI_1 、 CaI_2) 可反映阳离子交换吸附的方向性^[31],其关系式为:

$$\text{CaI}_1 = (\gamma\text{Cl}^- - \gamma\text{Na}^+ - \gamma\text{K}^+) / \gamma\text{Cl}^- \quad (1)$$

$$\text{CaI}_2 = (\gamma\text{Cl}^- - \gamma\text{HCO}_3^- - \gamma\text{K}^+) / (\gamma\text{SO}_4^{2-} + \gamma\text{HCO}_3^- + \gamma\text{CO}_3^{2-} + \gamma\text{NO}_3^-) \quad (2)$$

氯碱指数为负值代表正阳离子交换,促使地下水中 Na^+ 增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 减少;正值代表反向交换,促使地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 增加, Na^+ 减少;绝对值越高,表明阳离子交换作用越强烈。计算结果显示: CaI_1 为 $-189.99 \sim -0.11$, CaI_2 为 $-1.47 \sim -0.07$,所有样品的氯碱指数均为负值,表示发生了正阳离子交换,造成水中 Na^+ 富集。 CaI_1 变化较大,样品 2、样品 10、样品 11 的 CaI_1 的绝对值均小于 1,代表阳离子交换作用微弱,源于高 Na^+ 条件下正阳离子交换作用受到抑制。

γCl^- 与 γNa^+ 的关系[图 6(b)]显示:样品 13 位于 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^- = 1$ 基线上,以此为起点,样品首先向右发生偏离,直到样品 9,此阶段 γCl^- 未明显增加,代表阳离子交换吸附主导下的 Na^+ 富集过程;之后随着滞留

性增强, γCl^- 和 γNa^+ 同步增加,开始了浓缩作用进程;样品 10 代表产出水的演化终点,在强烈浓缩作用下其水质偏离基线的程度有所降低。

γHCO_3^- 与 γNa^+ 的相关性[图 6(c)]也具有明显的两分特征:在 γNa^+ 含量 <60 毫克当量浓度时,两者呈现正相关,且沿 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{HCO}_3^- = 1$ 的基线分布,当 γNa^+ 含量 >60 毫克当量浓度后,相关性反转。前者反映为脱硫酸作用与阳离子交换吸附同步进行;后者反映为脱硫酸作用终止后,地下水滞留与弱碱性条件导致 CaCO_3 沉淀析出, Na^+ 在此过程中得到富集。黔西地区织金区块煤层裂隙中广泛发育的方解石脉体(薄膜)可为此提供佐证。

3.4 浓缩作用

$\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 与 TDS 的相关性[图 7(a)]显示:相比于 Na^+ , Cl^- 是决定 TDS 的更关键因素。在图 7(a)中,除样品 13 的地表水样外,其余样品以 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^- = 20$ 为界,呈现两段式分布特点,其中,分界左侧样品的 TDS 含量随 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 降低而急剧增高,源于强烈浓缩作用。图 7(b)、图 7(c)显示:样品 2、样品 10、样

品 11 均位于蒸发主导区域内,证明产出水在演化后期经历了强烈的浓缩作用。另外,Cl⁻ 含量与 TDS 含量的幂函数关系[图 7(d)]指示演化后期 TDS 含量的急剧增加源于 Cl⁻ 的富集。煤层水中含有放射性同位

素,放射性同位素衰变与深部地热可引起滞留条件下煤层水的蒸发浓缩,造成矿化度急剧增高,并伴随 Cl⁻ 含量的显著增加^[32-33]。蒸发浓缩也是导致油田水矿化度增高的重要作用^[25]。

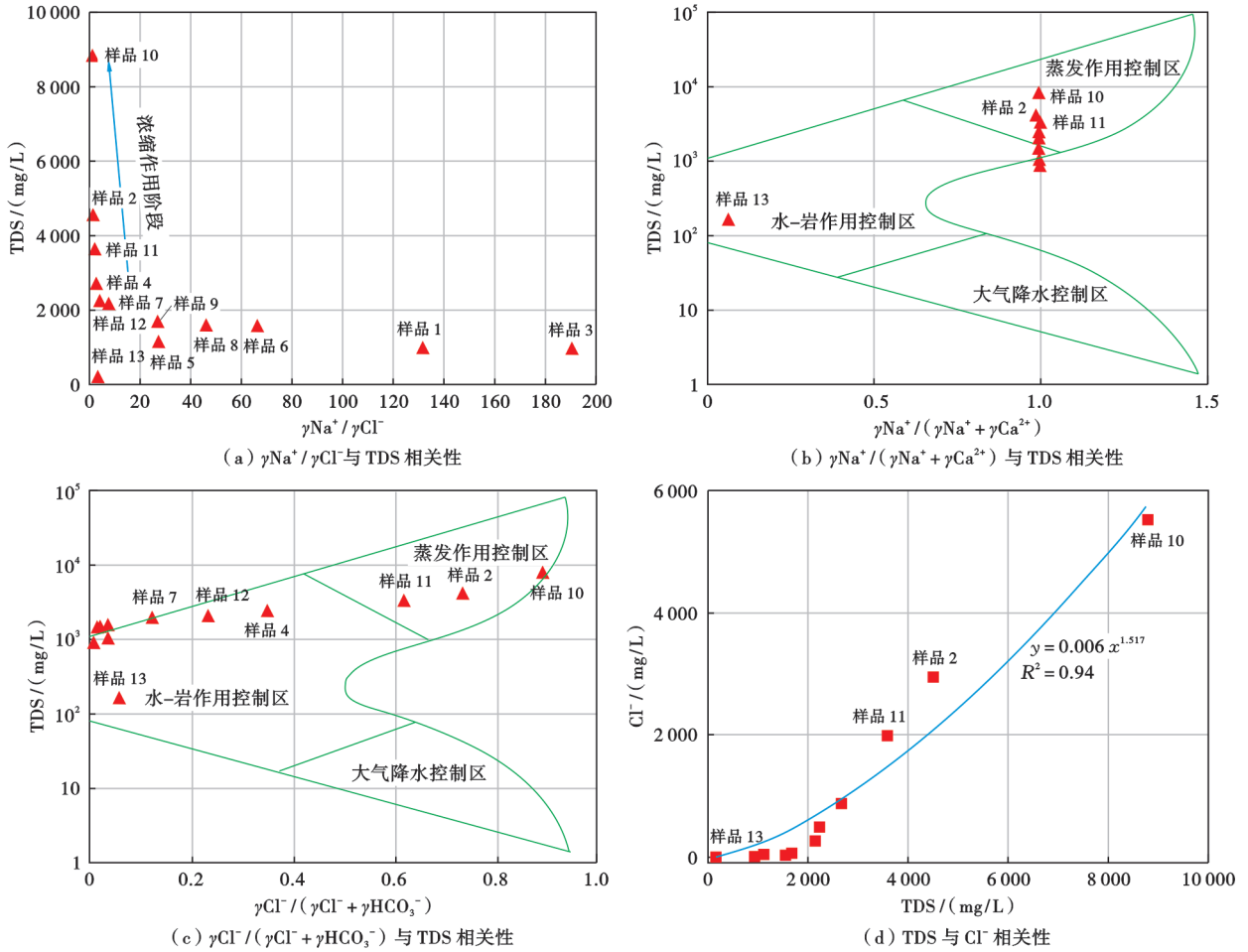


图 7 浓缩作用分析

Fig. 7 Analysis of evaporating concentration

4 产出水演化路径

基于放射性同位素分析,黔西地区织金区块煤系地下水以现代大气降水为主,仅有极少量的古大气降水^[34],稳定同位素亦位于现代大气降水线附近^[21];沁水盆地南部放射性同位素同样显示产出水主要源于现代大气降水与古大气降水,地质年龄未超过 3.3 Ma,稳定同位素沿大气降水线分布,为后期渗入成因^[35]。上述认识为以现代大气降水或地表水为基准分析产出水演化路径提供了依据。

主成分分析是一种多元数据分析手段,可通过多变量降维提取关键水化学作用,被广泛应用于水化学研究^[30]。对测试数据开展主成分分析(表 3),以特征值大于 1 为标准,可提取出 PC1 和 PC2 两种主成分,分别代表影响产出水化学特征的主要因素与次要因

素,累计方差贡献率为 84.018%。

表 3 主成分信息

Table 3 Information of principal components

主成分	特征值	方差/%	累计方差/%
PC1	5.737	52.151	52.151
PC2	3.505	31.868	84.018

以相关系数 ± 0.6 为判别临界值,PC1 与 TDS、Cl⁻、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、Sr²⁺ 具有正相关性[图 8(a)]; PC2 与 SO₄²⁻、Ca²⁺ 具有正相关性,与 HCO₃⁻、F⁻ 具有负相关性,与 pH 值的负相关性也较明显[图 8(b)]。

补给区地下水的 SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺ 离子含量高,随流动距离增加,上述离子含量趋于降低,HCO₃⁻、Na⁺、K⁺、Cl⁻ 等离子浓度与 TDS 含量逐渐增加^[36]。因此,PC1代表了地下水滞留与封闭特点,PC2则反

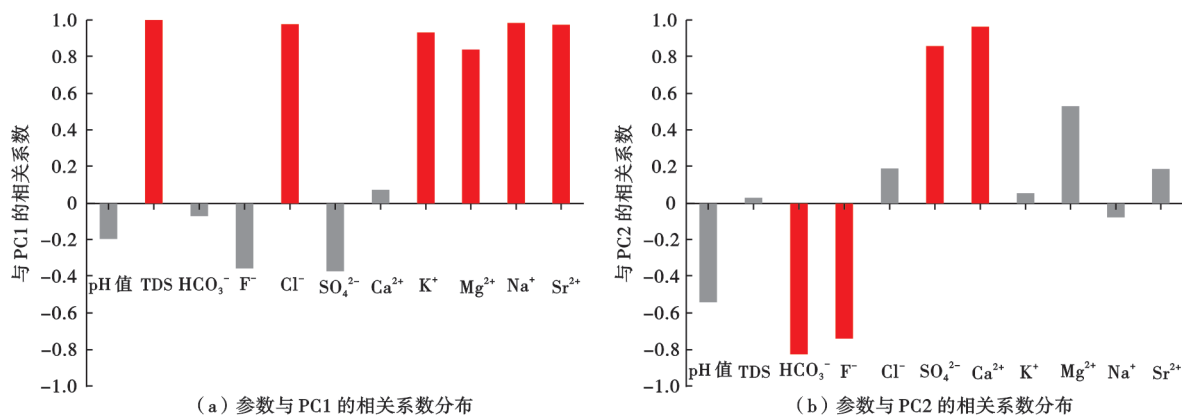


图 8 主成分与水化学参数相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient between principal components and hydrochemical parameters

映了靠近富氧水源补给区的氧化与开放特点,在富氧条件下, O₂ 与 CO₂ 的溶解导致 pH 值降低。PC1 的方差贡献更高,说明封闭性对产出水质的影响更明显,这与龙潭组极弱的水动力条件相符^[37]。PC2 代表随流动距离增加,氧化环境向还原环境转变,出现脱硫酸作用,导致 HCO₃⁻ 含量增加和 pH 值升高。另外, F⁻ 与 OH⁻ 容易发生阴离子交换反应,碱性水环境中 F⁻ 含量偏高^[30],产出水中 F⁻ 含量 (>1 mg/L) 超标问题需要关注。

以主成分为坐标轴投影水化学参数(图 9),横轴(参数与 PC1 的相关系数)向右代表封闭性,纵轴(参数与 PC2 的相关系数)向上代表氧化开放性,向下代表还原性。Mg²⁺ 含量受到开放性与封闭性的双重制约,一方面表现为在补给区低矿化水中阳离子以 Ca²⁺、Mg²⁺ 为主^[36],而另一方面表现为在深部高矿化氯型水中, MgCl₂ 与 CaCl₂ 以其强溶解性为 Mg²⁺、Ca²⁺ 的保存提供了条件^[25]。Mg²⁺ 含量 >3 mg/L 的样品共 4 个: 1 个为样品 13,其 TDS 含量为 166 mg/L;另外 3 个分别为样品 2、样品 10、样品 11,其 TDS 含量为 3 603~8 800 mg/L。Ca²⁺ 含量超过 20 mg/L 的样品仅有 3 个,

以样品 13 最高,代表补给来源,其次为样品 2 与样品 10,源于深部煤层滞留条件。

基于各离子与主成分相关系数,将每个样品的离子毫克当量浓度与相关系数相乘,获得各样品在两个主成分上的载荷得分 (S_{PC1}、S_{PC2}):

$$S_{PC1} = -0.067\gamma HCO_3^- - 0.370\gamma SO_4^{2-} + 0.976\gamma Cl^- - 0.352\gamma F^- + 0.076\gamma Ca^{2+} + 0.835\gamma Mg^{2+} + 0.984\gamma Na^+ + 0.932\gamma K^+ + 0.974\gamma Sr^{2+} \quad (3)$$

$$S_{PC2} = -0.818\gamma HCO_3^- + 0.850\gamma SO_4^{2-} + 0.188\gamma Cl^- - 0.739\gamma F^- + 0.958\gamma Ca^{2+} + 0.528\gamma Mg^{2+} - 0.073\gamma Na^+ + 0.052\gamma K^+ + 0.187\gamma Sr^{2+} \quad (4)$$

计算结果见表 4,据此绘制的载荷得分交汇图(图 10)为揭示产出水演化路径提供了依据。图 10 可分为 4 个象限(I—IV),代表不同的水化学作用。样品多数位于第 IV 象限,反映还原作用与封闭作用对产出水质的主导性。

在图 10 中,样品 13 位于原点偏上位置,代表了补给的初始特征;随后向聚类②(样品 1、样品 3 和样品 5)

表 4 样品在主成分上的荷载得分

Table 4 Load scores of samples on principal components

样品号	S _{PC1}	S _{PC2}
1	21.68	-22.68
2	185.82	-15.61
3	21.76	-23.94
4	87.09	-38.29
5	27.45	-26.77
6	37.77	-39.44
7	60.15	-48.06
8	38.24	-38.91
9	40.95	-40.50
10	326.26	2.43
11	161.02	-25.81
12	65.66	-39.42
13	0.27	3.37

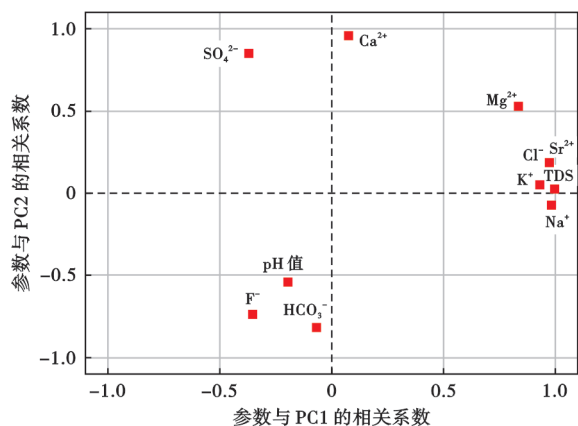


图 9 水化学参数与主成分相关系数的关系

Fig. 9 Relationship between hydrochemical parameters and correlation coefficients of principal components

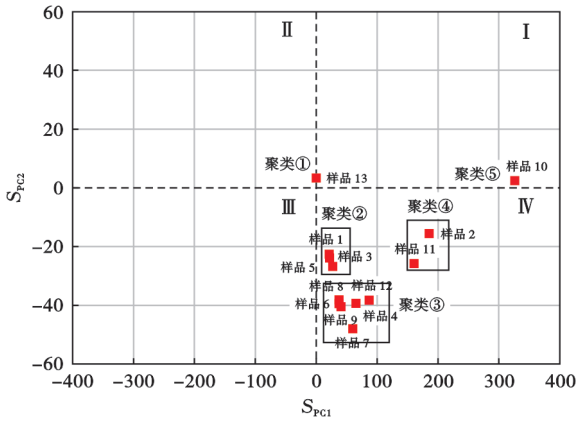


图 10 样品主成分荷载得分交汇

Fig. 10 Crossplot of sample load scores on principal components

演化,代表还原性增强;随着流动距离增加,进一步向聚类③(样品 4、样品 6、样品 7、样品 8、样品 9 和样品 12)演化,其中,7号样品代表脱硫酸作用达到极限。放射性同位素 ^3H 的研究显示:大约 50a 或者更少的时间就足够还原所有的 SO_4^{2-} ,且涉及距离补给区在 4 km 以内的径流范围,由此限定了脱硫酸作用发生的时空范围^[38]。

随后,还原作用开始向封闭条件下的浓缩作用转化,形成聚类④(样品 2、样品 11)。随着浓缩作用进一步增强,形成代表终极演化形态的聚类⑤(样品 10)。产出水的“V”字形演化路径(图 10)包含了还原与浓缩

两个阶段。鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气的产出水往往呈 Ca-Cl 型, TDS 含量 $>10 \text{ g/L}$, 富水性极弱, 代表了更高层次的滞留浓缩作用^[39-41]。由此指示, 水动力条件不再是制约深部煤层气富集与产出的主要因素, 排水—降压—产气的传统模式适用性降低。

结合煤层气水样的井位分析, 2 号、10 号、11 号井位于珠藏次向斜轴部, 其 16 号煤层顶板标高为 980~1060 m, 其中以 11 号井的标高略高; 7 号与 12 号井也位于珠藏次向斜轴部, 但更靠近西北翼, 16 号煤层顶板标高为 1100 m; 1 号、6 号、8 号、9 号井位于珠藏次向斜西北翼, 其中, 6 号、8 号、9 号井 16 号煤层顶板标高约为 1200 m, 1 号井 16 号煤层顶板标高约为 1300 m, 且与水动力条件更强的上部煤组沟通; 3 号与 5 号井位于三塘次向斜西北翼, 16 号煤层顶板标高约为 1550 m, 4 号井位于三塘次向斜轴部, 16 号煤层顶板标高约为 600 m。三塘次向斜位于珠藏次向斜的 NW 方位, 其地势、地下水位和煤层标高整体高于珠藏次向斜且构造开启程度更好, 水质具有淡化趋势^[42]。活跃的水动力背景或沟通含水层会延缓产出水的演化进程, 三塘次向斜水质的演化程度滞后于珠藏次向斜, 产能水平也相应较低。

井位分布与水化学演化序列所呈现的规律表现出高度一致(图 11)。露头区接受补给后, 翼部(径流区)

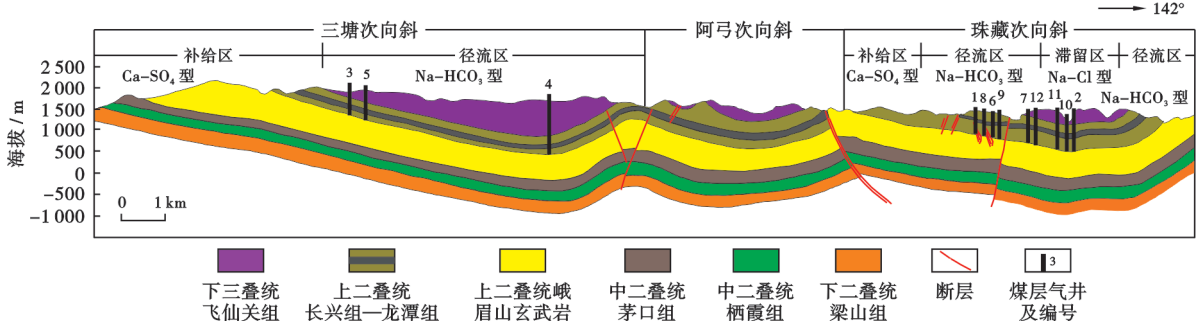


图 11 煤层气井位分布与水文地质分区剖面

Fig. 11 Cross section of the coalbed methane well locations and hydrogeological zoning

主要发生还原作用(对应 1 号、3 号、5 号、6 号、8 号和 9 号井), 其中, 沟通上部煤组的 1 号井与位于三塘次向斜西北翼的 3 号井、5 号井的水动力条件更强, 还原作用不充分, 3 号井只产水不产气; 在珠藏次向斜翼部与轴部的转换部位以及三塘次向斜轴部, 还原作用基本达到极限, 开始向浓缩作用转换(4 号、7 号和 12 号井); 珠藏次向斜轴部为滞留区, 此处 23 号煤层及其下部煤层的原位渗透率极低, 23 号煤层的试井渗透率仅为 0.000 2 mD, 煤层水发生强烈浓缩作用(2 号、10 号和 11 号井)。Na⁺—Cl⁻—HCO₃⁻ 三端元分析图版^[43](图 12)也能反映出地下水的演化过程, 水样聚集的 3 个区域分别代表补给区、径流区(还原作用)与滞留区(浓缩作用)。

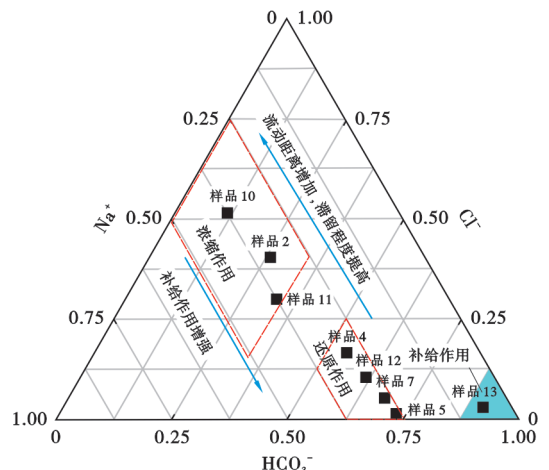


图 12 水化学 Na⁺—Cl⁻—HCO₃⁻ 三端元分析

Fig. 12 Na⁺—Cl⁻—HCO₃⁻ ternary diagram of water chemistry

5 产量判别

鉴于黔西地区织金区块采用多煤层合采方式,为便于产能对比,将各井的平均日产气量除以有效压裂段厚度,得到单位有效压裂段厚度的平均日产气量。一般而言,产出水的封闭性或滞留程度越高,其

降压效果越显著,实现高产的潜力越大。 S_{PC1} 与产能的关系(图 13)显示:随着 S_{PC1} 增加,单位有效压裂段厚度的平均日产气量趋于增加,平均日产水量趋于降低,表明产出水的封闭性演化对降压与产能效果有控制效应。产出水封闭性增强有助于高效降压与产气。

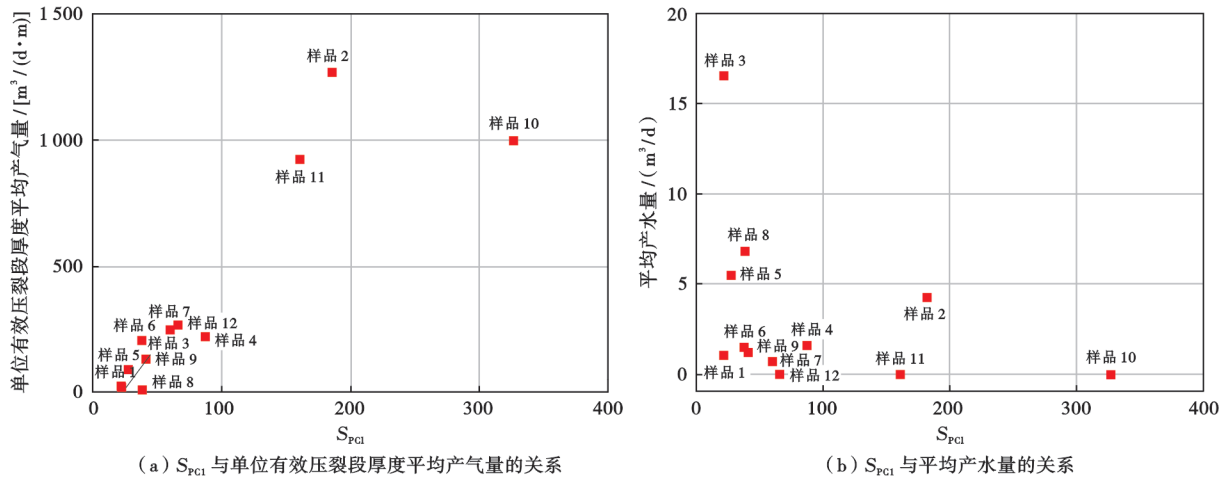


图 13 主成分荷载得分 S_{PC1} 与煤层气产能的相关性

Fig. 13 Correlations between load scores on principal components (S_{PC1}) and coalbed methane production

TDS 含量与产气量具有正相关性[图 14(a)],脱硫系数与产气量具有负相关性[图 14(b)].通过分析 TDS 含量可以有效地预测高产井。TDS 含量的临界值约为 3000 mg/L,对应的特征离子浓度: Cl^- 含量为 1100 mg/L; Na^+ 含量为 1600 mg/L; Sr^{2+} 含量为 5 mg/L。大于以上数值,单位有效压裂段厚度的平均产气量大于 $500 m^3/(d \cdot m)$,对应聚类④和聚类⑤水质。通过分析脱硫系数可以有效地判别低产井:当脱硫系数 >0.001 时,单位有效压裂段厚度的平均产气

量小于 $300 m^3/(d \cdot m)$,对应聚类②和聚类③水质;当脱硫系数 >0.1 时,单位有效压裂段厚度的平均产气量均在 $150 m^3/(d \cdot m)$ 以下。煤层气井选址应避免地下水径流强烈地带,布设于具有高 TDS 含量、低 SO_4^{2-} 含量的地下水滞留区,珠藏次向斜轴部为布设煤层气井的有利区。在常规的油气勘探中,多以 SO_4^{2-} 含量与 HCO_3^- 含量的比值(<3.0)作为指示具有伴生油气资源的标准^[28]。另外,水平井具有产出水封闭性强、直井/定向井具有产出水封闭性弱的特点,

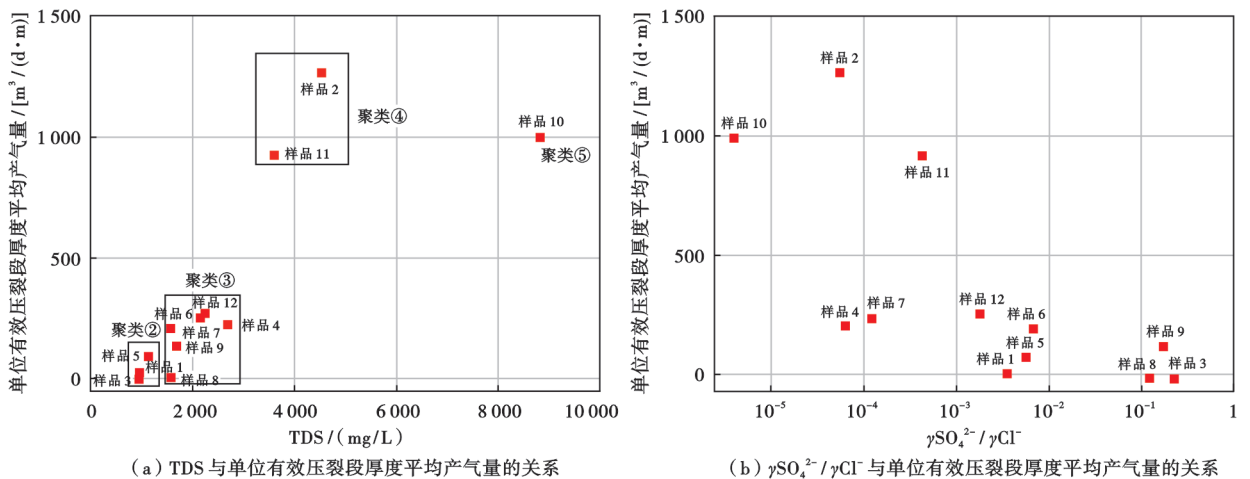


图 14 水化学参数与煤层气产能的相关性

Fig. 14 Correlations between hydrochemical parameters and coalbed methane production

指示水动力干扰及其诱发的低效降压仍是制约直井/定向井合采产能的重要因素。Li、Ga、Rb、Sr 和 Ba 5 种特征微量元素对产出水的封闭性亦具有良好响应,可作为煤层水识别的标志^[12]。根据上述 5 种元素均值绘制的各聚类水质的微量元素蛛网图(图 15)无交叉,数值由小到大代表地下水封闭程度升高,可为产量判识提供依据,聚类④和聚类⑤的蛛网区域对应高产井。

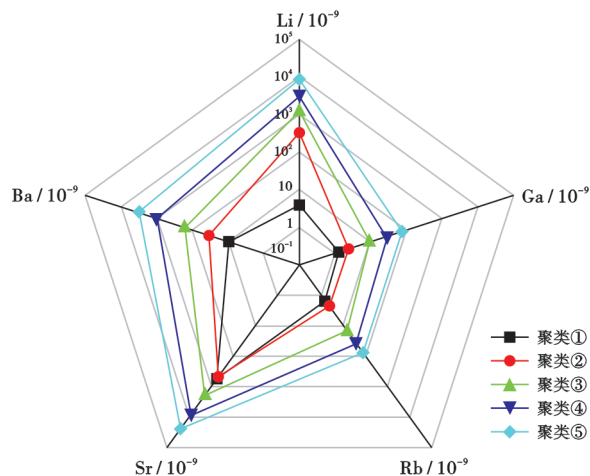


图 15 不同聚类的微量元素蛛网图

Fig. 15 Spider diagram of trace elements in different clusters

6 结论

(1) 基于产出水样的地球化学分析结果,识别了影响水化学特征的关键水化学作用,包括脱硫酸作用、阳离子交换吸附作用和浓缩作用。在此基础上探讨了产出水的地质演化序列,包括补给作用、脱硫酸作用与阳离子交换吸附作用、浓缩作用交替主导的 3 个阶段,空间上对应补给区、径流区与滞留区,水型依次为 Ca-SO₄ 型、Na-HCO₃ 型与 Na-Cl 型。随着地下水流程增加,TDS 含量与 Cl⁻、Na⁺、Sr²⁺ 等特征离子浓度逐步升高,反映封闭性与滞留程度逐渐增强。

(2) 识别了基于产出水的化学特征来判识产量的关键参数及其临界值。通过 TDS 含量与特征离子含量分析能够有效判识高产井,借助脱硫系数能够有效地判识低产井。产出水的封闭性演化程度与产量升高序列一致,产出水的封闭性越强,实现高产的潜力越大,水动力干扰仍是制约直井/定向井多层合采降压与产能效果的重要因素。构建了基于产出水的特征微量元素(Li、Ga、Rb、Sr、Ba)含量来判识产能潜力的蛛网图,产能潜力随特征微量元素含量增加而增加的特征取决于封闭条件下排水降压的有效性。

(3) 煤层气井选址应避免地下水径流强烈地带,布设于具有高 TDS 含量、高 Cl⁻ 含量、低 SO₄²⁻ 含量

的地下水滞留区,珠藏次向斜轴部为有利区。针对低渗这一制约因素,在煤体结构完整的条件下,水平井分段压裂技术有助于高效降压产气。直井压裂规模过小会导致增渗效果不佳,过大则容易沟通含水层,导致低效降压。查明水文地质分区与地层结构,识别关键含水层与隔水层,精细调控压裂规模以避免沟通含水层,应作为合采方案设计的必要工作。

参考文献

- [1] 徐宏杰,桑树勋,杨景芬,等. 贵州省煤层气勘探发现状与展望[J]. 煤炭科学技术,2016,44(2):1-7.
XU Hongjie, SANG Shuxun, YANG Jingfen, et al. Status and expectation on coalbed methane exploration and development in Guizhou Province[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 1-7.
- [2] 秦勇,熊孟辉,易同生,等. 论多层叠置独立含煤层气系统——以贵州织金—纳雍煤田水公河向斜为例[J]. 地质论评,2008,54(1):65-70.
QIN Yong, XIONG Menghui, YI Tongsheng, et al. On unattached multiple superposed coalbed-methane system: in a case of the Shuigonghe syncline, Zhijin-Nayong coalfield, Guizhou[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 65-70.
- [3] 金军,杨兆彪,秦勇,等. 贵州省煤层气开发进展、潜力及前景[J]. 煤炭学报,2022,47(11):4113-4126.
JIN Jun, YANG Zhaobiao, QIN Yong, et al. Progress, potential and prospects of CBM development in Guizhou Province[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 4113-4126.
- [4] 许浩,汤达祯,秦勇,等. 黔西地区煤储层压力发育特征及成因[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(4):556-560.
XU Hao, TANG Dazhen, QIN Yong, et al. Characteristics and origin of coal reservoir pressure in the west Guizhou area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(4): 556-560.
- [5] 吴财芳,王聪,姜玮. 黔西比德—三塘盆地煤储层异常高压形成机制[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2014,39(1):73-78.
WU Caifang, WANG Cong, JIANG Wei. Abnormal high-pressure formation mechanism in coal reservoir of Bide-Santang Basin, western Guizhou Province[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(1): 73-78.
- [6] 杨兆彪,秦勇. 地应力条件下的多层叠置独立含气系统的调整研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(1):70-75.
YANG Zhaobiao, QIN Yong. A study of the unattached multiple superposed coalbed-methane system under stress conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 70-75.
- [7] 李佳欣,陈贞龙,郭涛. 贵州织金地区煤层气合采开发实践与认识[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(9):163-170.
LI Jiaxin, CHEN Zhenlong, GUO Tao. Practice and understanding of coalbed methane co-production in Zhijin area, Guizhou[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 163-170.
- [8] 郭涛. 贵州省织金区块岩脚向斜煤层气富集高产规律研究[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(2):62-69.
GUO Tao. The enrichment and high yield law of CBM in Yanjiao syncline in Zhijin Block, Guizhou Province[J]. Coal Geology &

- Exploration, 2021, 49(2): 62-69.
- [9] ZHANG Songhang, TANG Shuheng, LI Zhongcheng, et al. Study of hydrochemical characteristics of CBM co-produced water of the Shizhuangnan block in the southern Qinshui Basin, China, on its implication of CBM development[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 159: 169-182.
- [10] GUO Chen, QIN Yong, XIA Yucheng, et al. Geochemical characteristics of water produced from CBM wells and implications for commingling CBM production: a case study of the Bide-Santang Basin, western Guizhou, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 159: 666-678.
- [11] GUO Chen, QIN Yong, MA Dongmin, et al. Ionic composition, geological signature and environmental impacts of coalbed methane produced water in China[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2021, 43(10): 1259-1273.
- [12] 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别[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.
- [13] ZHANG Zheng, QIN Yang, BAI Jianping, et al. Hydrogeochemistry characteristics of produced waters from CBM wells in southern Qinshui Basin and implications for CBM commingled development[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 56: 428-443.
- [14] 杨兆彪, 秦勇, 秦宗浩, 等. 煤层气井产出水溶解无机碳特征及其地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1000-1008.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, QIN Zonghao, et al. Characteristics of dissolved inorganic carbon in produced water from coalbed methane wells and its geological significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1000-1008.
- [15] 宋岩, 马行陟, 柳少波, 等. 沁水煤层气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 621-634.
- SONG Yan, MA Xingzhi, LIU Shaobo, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Qinshui coalbed methane field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 621-634.
- [16] 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——以沁冰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]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 755-760.
- [17] ZOU Mingjun, WEI Chongtao, ZHANG Miao, et al. A mathematical approach investigating the production of effective water during coalbed methane well drainage[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(5): 1683-1692.
- [18] RIVERA L. Infinite acting aquifer (IAA)—Implications for coalbed methane production at the syncline of Umbita, Colombia[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 209: 54-71.
- [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 U. S. A. [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(1/2): 76-85.
- [20] 王密计, 康永尚, 毛得雷, 等. 煤层气排采局部水动力场模式及其意义——以鄂尔多斯盆地东南缘为例[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 57-62.
- WANG Miji, KANG Yongshang, MAO Delei, et al. Dewatering-induced local hydrodynamic field models and their significance to CBM production: a case study from a coalfield in the southeastern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 57-62.
- [21] 郭晨, 秦勇, 夏玉成, 等. 基于氢、氧同位素的煤层气合排井产水源判别——以黔西地区比德—三塘盆地上二叠统为例[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 493-501.
- GUO Chen, QIN Yong, XIA Yucheng, et al. Source discrimination of produced water from CBM commingling wells based on the hydrogen and oxygen isotopes: a case study of the Upper Permian, Bide-Santang Basin, western Guizhou area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 493-501.
- [22] 郭涛, 高小康, 孟贵希, 等. 织金区块煤层气合采生产特征及开发策略[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 14-19.
- GUO Tao, GAO Xiaokang, MENG Guixi, et al. Combined CBM production behavior and development strategy of multiple coal seams in Zhijin block[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 14-19.
- [23] 高玉巧, 郭涛, 何希鹏, 等. 贵州省织金地区煤层气多层合采层位优选[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 227-232.
- GAO Yuqiao, GUO Tao, HE Xipeng, et al. Optimization of multi-layer commingled coalbed methane production in Zhijin area, Guizhou Province[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(2): 227-232.
- [24] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 基于生产特征曲线的煤层气合采干扰识别方法——以黔西地区织金区块为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 977-986.
- GUO Chen, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. A method for identifying coalbed methane co-production interference based on production characteristic curves: a case study of the Zhijin block, western Guizhou, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 977-986.
- [25] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 7版. 北京: 地质出版社, 2018: 54-56.
- ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui, et al. Fundamentals of hydrogeology[M]. 7th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 54-56.
- [26] RICE C A. Production waters associated with the Ferron coalbed methane fields, central Utah: chemical and isotopic composition and volumes[J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 56(1/2): 141-169.
- [27] CHEUNG K, SANEI H, KLASSEN P, et al. Produced fluids and shallow groundwater in coalbed methane (CBM) producing regions of Alberta, Canada: trace element and rare earth element geochemistry[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(3/4): 338-349.
- [28] VAN VOAST W A. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(4):

- 667-676.
- [29] BARZEGAR R, MOGHADDAM A A, TZIRITIS E, et al. Identification of hydrogeochemical processes and pollution sources of groundwater resources in the Marand plain, northwest of Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(7): 297.
- [30] ZHANG Zheng, LI Guoqing, SU Xianbo, et al. Geochemical controls on the enrichment of fluoride in the mine water of the Shandong mining area, China [J]. *Chemosphere*, 2021, 284: 131388.
- [31] SCHOELLER H. Qualitative evaluation of groundwater resources [M]// UNESCO. *Methods and techniques of ground-water investigation and development*. New York: UNESCO, 1967: 44-52.
- [32] 赵馨悦, 韦波, 袁亮, 等. 煤储层水文地质特征及其煤层气开发意义研究综述 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(4): 105-117.
ZHAO Xinyue, WEI Bo, YUAN Liang, et al. Hydrological characters of coal reservoir and their significances on coalbed methane development: a review [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(4): 105-117.
- [33] 马行陟, 宋岩, 柳少波, 等. 煤储层中水的成因、年龄及演化: 卤素离子、稳定同位素和¹²⁹I 的证据 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1699-1707.
MA Xingzhi, SONG Yan, LIU Shaobo, et al. Origin and evolution of waters in the Hancheng coal seams, the Ordos Basin, as revealed from water chemistry and isotope (H, O, ¹²⁹I) analyses [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(11): 1962-1970.
- [34] 葛燕燕. 煤系多层叠置含水系统及煤层气合排水源判识——以黔西珠藏向斜为例 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
GE Yanyan. Study on the multi-superimposed aquifer system of coal seams and source discrimination of commingling CBM produced-water: an example from Zhucang syncline in western Guizhou Province [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [35] 卫明明, 琚宜文. 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.
- [36] 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.
- [37] 高弟, 秦勇, 易同生. 论贵州煤层气地质特点与勘探开发战略 [J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(3): 20-23.
GAO Di, QIN Yong, YI Tongsheng. Geological condition, exploration and exploitation strategy of coal-bed methane resources in Guizhou, China [J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(3): 20-23.
- [38] BRINCK E L, DREVER J E, FROST C D. The geochemical evolution of water coproduced with coalbed natural gas in the Powder River Basin, Wyoming [J]. *Environmental Geosciences*, 2008, 15(4): 153-171.
- [39] 陈贞龙. 延川南深部煤层气田地质单元划分及开发对策 [J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 13-20.
CHEN Zhenlong. Geological unit division and development countermeasures of deep coalbed methane in southern Yanchuan block [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 13-20.
- [40] 聂志宏, 巢海燕, 刘莹, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气生产特征及开发对策——以大宁—吉县区块为例 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1738-1746.
NIE Zhihong, CHAO Haiyan, LIU Ying, et al. Development strategy and production characteristics of deep coalbed methane in the east Ordos Basin: taking Daning-Jixian block for example [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1738-1746.
- [41] 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.
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.
- [42] 郭晨, 夏玉成, 卢玲玲, 等. 黔西比德—三塘盆地多层叠置独立含煤层气系统发育规律与控制机理 [J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(4): 622-632.
GUO Chen, XIA Yucheng, LU Lingling, et al. Development features and mechanism of multi-layer superimposed independent CBM systems in Bide-Santang Basin, western Guizhou, South China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(4): 622-632.
- [43] DAHM K G, GUERRA K L, MUNAKATA-MARR J, et al. Trends in water quality variability for coalbed methane produced water [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 840-848.

(收稿日期 2023-07-06 改回日期 2023-10-10 编辑 雷永良)