

鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出气-水地球化学特征及其地质响应

黄道军^{1,2}, 周国晓^{1,2}, 杨兆彪³, 顾俊雨³, 荆雪媛^{1,2}, 王嘉楠³

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 2. 中国石油长庆油田公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 3. 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)

摘要: 研究深部煤岩层气井产出气-水的地球化学特征, 对认识煤岩气富集机理和开发规律具有重要意义。以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东缘9口深部煤岩气水平井为研究对象, 开展了产出气气体组分、碳同位素及地层水常规离子以及氢、氧同位素特征研究, 查明了煤岩气的成因类型、排采过程中的气体分馏效应以及产出水的来源。结果表明: ① 研究区煤岩气为中-晚期热成因气, 组分构成以甲烷(CH_4)为主, 重烃及非烃气体含量较低, 碳同位素表现为正碳同位素组成序列。② 排采过程产出气中的甲烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_1$)可辅助标定并划分游离气和吸附气产出阶段, 甲烷碳同位素随着排采天数的增加而较大幅度地变轻, 具体表现为初期以游离气为主, 后期吸附气解吸、分馏叠加, 与含气量测试中保压游离气-初始解吸气释放阶段的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 变化规律吻合, 甲烷碳同位素由重变轻过程持续时间越久, 煤岩气高产可能性越大。③ 典型煤岩气井产出水矿化度(TDS)高达193.08 g/L, 为钙-氯型(Ca-Cl型)水, 以原始沉积水为主, 低钠氯系数、脱硫系数、镁钙系数和高变质系数、盐化系数反映地层封闭性和煤岩气保存条件较好。④ 产出水氢、氧同位素值偏离大气降水线, 大部分表现为明显的氧漂移(^{18}O 漂移), 推测受到了高温地层环境下煤层顶、底板岩层水补给的影响。

关键词: 产出气-水; 地质响应; 地球化学特征; 深部煤岩气; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Geochemical characterization of gas-water output from deep coalrock methane wells in the Ordos Basin and its geological responses

HUANG Daojun^{1,2}, ZHOU Guoxiao^{1,2}, YANG Zhaobiao³, GU Junyu³, JING Xueyuan^{1,2}, WANG Jianan³

(1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources & Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Investigating the geochemical characteristics of gas and water produced from deep coalrock methane wells is significant for understanding the enrichment mechanisms and development patterns of coal rock methane. Focusing on nine deep coal rock methane horizontal wells along the eastern margin of the Yishan slope in the Ordos Basin, we examine the components and carbon isotopes in the produced gas, as well as the conventional ions and hydrogen and oxygen isotopes in the formation water to identify the genetic types of coal rock methane, the gas fractionation effect in the process of coal rock methane production, and the sources of the produced water. The results show that the coal rock methane in the study area is of middle- to late-stage thermogenic gas with methane (CH_4) as the main component while heavy hydrocarbons and non-hydrocarbon gases as the minor components, exhibiting positive carbon isotope sequence. The methane carbon isotope value ($\delta^{13}\text{C}_1$) of the produced gas during coal rock methane production can be used to assist in the calibration and determination of the production stages of free and adsorbed gases and presents a relatively large lightening trend as the coal rock methane production goes on. Specifically, the produced gas is dominated by free gas

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-07-17。

第一作者简介: 黄道军(1979—), 男, 高级工程师, 石油天然气地质。E-mail: hdj_cq@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 杨兆彪(1980—), 男, 博士、教授、博士研究生导师, 煤层气资源与开发地质。E-mail: zhaobiaoyang@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272195, 42130802); 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项(2023ZZ18); 长庆油田科技重大专项(2023DZZ01)。

initially and then exhibits both desorption and fractionation of adsorbed gas in the late stage. This finding aligns with the change pattern in the $\delta^{13}\text{C}_1$ of the pressure-retaining free gas and initially desorbed gas releasing stages of the gas content test. A longer period of high-to-low transition of $\delta^{13}\text{C}_1$ is associated with a higher possibility of high coal rock methane yield. The water produced from a typical coal rock methane well exhibits a total dissolved solids (*TDS*) of up to 193.08 g/L, suggesting a calcium-chloride (Ca-Cl) type water. Such water consists primarily of connate water trapped in sediments. Its low Na/Cl ratio, desulfurization coefficient, and Mg/Ca ratio, along with high metamorphism and salinization coefficients, indicate excellent stratigraphic sealing performance and favorable coal rock methane preservation conditions. The hydrogen and oxygen isotope values of the produced water deviate from the local meteoric water line (LMWL), largely exhibiting significant oxygen (^{18}O) shifts. This is inferred to be influenced by recharge with water from the roof and floor strata of coal seams in a high-temperature stratigraphic environment.

Key words: produced gas and water, geochemical characteristics, geological response, deep coalrock methane, Ordos Basin

引用格式:黄道军,周国晓,杨兆彪,等.鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出气-水地球化学特征及其地质响应[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1617-1627. DOI:10.11743/ogg20240609.

HUANG Daojun, ZHOU Guoxiao, YANG Zhaobiao, et al. Geochemical characterization of gas-water output from deep coalrock methane wells in the Ordos Basin and its geological responses[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1617-1627. DOI: 10.11743/ogg20240609.

煤岩气井产出气-水地球化学特征蕴藏着丰富的地质信息。一方面,气体组分、稳定同位素以及稀有气体同位素特征可用于反映煤岩气成因、保存条件以及产出的层位^[1-3];另一方面,产出水的化学组成(常规离子、微量元素)和同位素特征能反映地下水的来源、地层的封闭/开放程度以及沉积环境特征(从陆相淡水到海相咸水)^[4-6]。储层流体地球化学分析是一种有效的勘探开发分析手段,前人研究主要集中于浅部煤岩气井产出气-水地球化学特征及其地质指示意义。随着深部煤岩气的突破和勘探开发进程的不断推进,深部煤岩气井同样面临着气-水产出规律复杂的问题,同时其产出气-水地球化学特征具有其特殊性,为此亟待开展深部煤岩气井产出气-水的元素地球化学及同位素地球化学特征分析,以进一步深化煤岩气富集机理和开发规律的认识。

鄂尔多斯盆地是目前深部致密气、煤岩气开发最为活跃地区^[7-9],盆地内煤岩气资源十分丰富,2 000 m深度以浅煤岩气地质资源量为 $7.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[10],2 000 m深度以深煤岩气地质资源量达 $12.99 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[11],资源总量仅次于准噶尔盆地。2023年以来,中国石油长庆油田分公司在盆地内部的纳林、米脂北和绥德等区块部署实施了30余口深部煤岩气探井和开发井,多口井初期日产量超 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,展示出了良好的开发潜力。

鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中东部的绥德、米脂和纳林区块煤层埋深超过2 000 m,煤岩气资源丰富,勘探前景良好。前期已部署实施多口生产井,但关于产出流体的地球化学特征及其蕴含的地质信息尚未开展系统分析。鉴于此,本文基于该地区9口煤岩气水平井的气体组分、碳同位素及产出水水质、氢、氧同位素监

测,分析了产出气和水的地球化学特征、煤岩气成因类型及排采过程中气体的分馏特征和产出水来源,研究成果丰富了煤岩气成藏理论和开发规律认识,可为后续勘探开发提供指导。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部,北起阴山,南至秦岭,西起贺兰山、六盘山,东到吕梁山,总体为一东翼缓而长、西翼陡而短、南北翘起的不对称大向斜^[12]。根据盆地基底特征、构造演化史、现今构造形态等条件,可将其划分为6个一级构造单元:伊盟隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷、西缘逆冲推覆构造带和渭北隆起^[13]。本文研究的煤岩气井主要集中在伊陕斜坡东部,伊陕斜坡是盆地的主体部分,为一大型宽缓西倾单斜,地层倾角不足 1° ,斜坡局部发育低幅度鼻状隆起(图1a)。

鄂尔多斯盆地晚古生代含煤地层以山西组、太原组和本溪组为主,本文研究的煤岩气井目的层主要为本溪组的8#煤层(图1b),煤层埋深呈现东高西低的特征(图1a),深度范围介于2 378.0~3 266.1 m,属于深部煤岩气,煤层镜质体反射率(R_o)介于1.8%~2.5%,属于中-高煤阶,煤岩气井均为水平井,经过大规模压裂改造后获得了高产。

2 样品采集与实验方法

本文研究鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东缘9口煤岩气

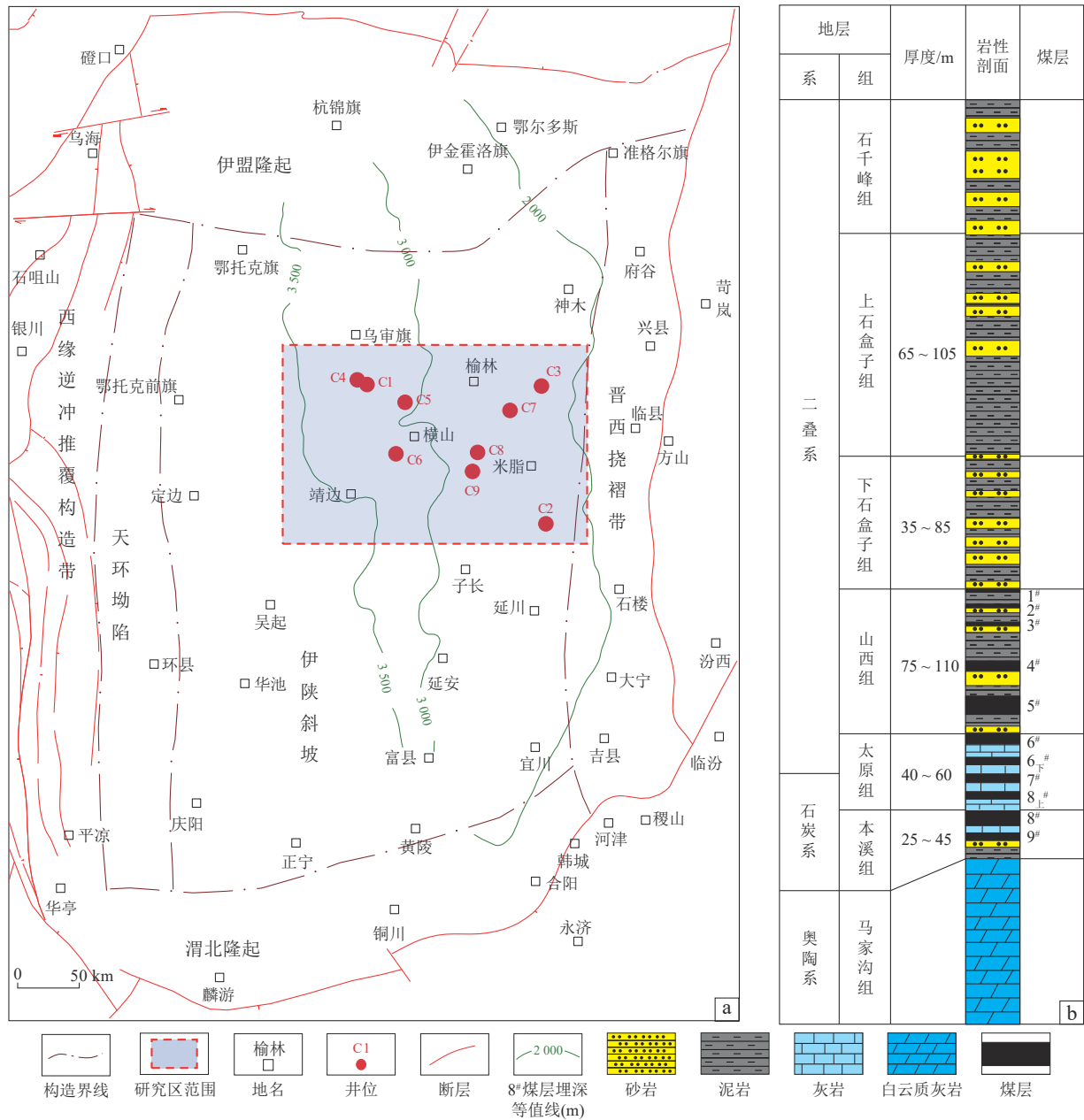


Fig. 1 Map showing the locations of deep coal rock mathane wells (a) and composite stratigraphic column (b) of the Ordos Basin

井产出气与产出水样品,其中C1井与C2井在气井生产过程中连续跟踪监测了产出气与产出水数据。产出气样品采集使用排水集气法,玻璃瓶水封保存,瓶口涂抹凡士林密封,最后标记取样时间和地点。气样测试单位为中国石油勘探开发研究院廊坊分院,测试内容包括气体组分和碳同位素特征。气体组分测试仪器为气相色谱仪(GC9790),碳同位素测量采用的是同位素质谱仪(MAT253),测试按照《国家标准天然气的组成分析气相色谱法》(GB/T 13610—2020)和《质谱分析方法通则》(GB/T 6041—2020)完成。测试数据详见表1。

产出水样品直接从井口出水口进行采集,需将水

样装满整瓶以确保排出所有的空气,然后使用瓶盖密封并检查是否有渗漏,最后标记取样的时间和地点。水样测试在中国石油勘探开发研究院廊坊分院进行,测试内容包括常规离子和氢、氧同位素特征。阴离子检测所用仪器为戴安ICS-90离子色谱仪,阳离子检测仪器为电感耦合等离子体-发射光谱仪(美国 Vista MPX),氢、氧同位素检测仪器为MAT-253气体同位素质谱计。测试程序严格按照国家标准《地下水水质分析方法第89部分:氡的测定在线高温热转换-气体同位素质谱法》(DZ/T 0064. 89—2021),《地下水水质分析方法第90部分:¹⁸O的测定在线CO₂-H₂O平衡-气体同位

表1 鄂尔多斯盆地煤岩气井部分产出气气体组分及碳同位素特征

Table 1 Gas compositions and isotope contents of some gas produced from coal rock methane wells in the Ordos Basin									
井号	采样日期/ (年/月/日)	气体组分含量/%					$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		
		CH_4	C_2H_6	C_3H_8	CO_2	N_2	C_1	C_2	C_3
C1	2023/2/24	90.037	1.333	0.123	5.250	3.143	-26.87	-20.02	—
C2	2023/3/2	91.349	0.061	0.000	4.765	3.806	-24.16	—	—
C3	2023/8/6	91.256	0.881	0.041	6.430	1.382	-33.92	-19.57	-21.18
C4	2023/8/7	85.559	0.464	0.000	8.917	4.901	-33.71	—	—
C5	2023/11/4	94.164	0.529	0.051	4.299	0.179	-33.30	-23.90	—
C6	2023/11/6	91.051	0.341	0.015	8.451	0.068	-32.90	-19.90	—
C7	2023/11/6	94.337	1.732	0.222	3.403	0.142	-35.30	-23.30	—
C8	2023/11/1	98.567	0.137	—	—	0.062	-31.60	-21.80	—
C9	2023/11/6	92.251	0.194	0.017	6.642	0.812	-33.40	-27.00	—

注:“—”为无此数据。

素质谱法》(DZ/T 0064. 90—2021)进行。测试数据详见表2。

3 结果与讨论

3.1 煤岩气成因判识

煤岩气成因类型分为有机成因气、无机成因气及混合成因气3种,其中有机成因气包括生物成因气(原生生物成因气、次生生物成因气)和热成因气(热降解气、热裂解气)^[14]。不同成因类型的煤岩气,在气体组分和同位素组成上具有明显差异,因此可以依据气体组分和同位素组成特征对煤岩气成因进行判识^[15-16]。

研究区9口煤岩气井产出气组分以甲烷为主,重烃及非烃气体含量较低。甲烷含量分布在85.25%~98.57%,平均为91.64%,乙烷含量平均为3.70%,非

烃气体包括CO₂、N₂、He以及H₂,其中CO₂和N₂含量较高,平均值分别为5.27%和2.33%。气体碳氢化合物指数C_{HC}(C₁/(C₂+C₃))为26.78~1 757.98,平均为434.06,干燥指数(C₁/ΣC₁₋₅)平均为0.99,属于极干气。低煤级与高煤级阶段产生的煤岩气一般是干气,而中煤级阶段则产生大量湿气^[17];生物气和热裂解气具有干气的特征,热降解气具有湿气特征^[18-20]。研究区煤层R_o介于1.8%~2.5%,属于中-高阶煤,此阶段生成的气体一般为热解气。

9口煤岩气井产出气甲烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_1$)分布在-36.20‰~-24.16‰,平均为-31.95‰,乙烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_2$)分布在-27.00‰~-19.57‰,平均为-22.82‰,丙烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_3$)分布在-22.43‰~-21.18‰,平均为-22.01‰,碳同位素总体表现为正碳同位素组成序列,仅 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 存在一定程度的倒转现象,即 $\delta^{13}\text{C}_1<\delta^{13}\text{C}_2>\delta^{13}\text{C}_3$ (图2),正碳同位素序列表

表2 鄂尔多斯盆地煤岩气井部分产出水常规离子及氢、氧同位素组成

Table 2 Conventional ion and hydrogen-oxygen isotope compositions of some produced water from coal rock methane wells in Ordos Basin											
井号	采样日期/ (年/月/日)	阳离子浓度/(mg/L)			阴离子浓度/(mg/L)			TDS/ (mg/L)	pH	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-				
C1	2023/2/5	15 407	905	12 079	45 578	3 573	505	78 050	—	—	—
C2	2023/2/27	22 100	1 060	37 200	104 000	0	212	173 670	—	—	—
C3	2023/7/28	3 880	589	10 974	23 642	2 325	234	41 640	6	—	—
C5	2023/11/14	—	—	—	—	—	—	—	—	-52.2	-3.2
C6	2023/11/14	—	—	—	—	—	—	—	—	-56.6	-3.2
C7	2023/11/14	—	—	—	—	—	—	—	—	-58.2	-3.4
C4	2023/11/14	—	—	—	—	—	—	—	—	-56.6	-3.9
C8	2023/11/14	—	—	—	—	—	—	—	—	-54.9	-3.0
C9	2023/11/14	—	—	—	—	—	—	—	—	-51.9	-3.1

注:TDS为产出水矿化度;“—”为无此数据。

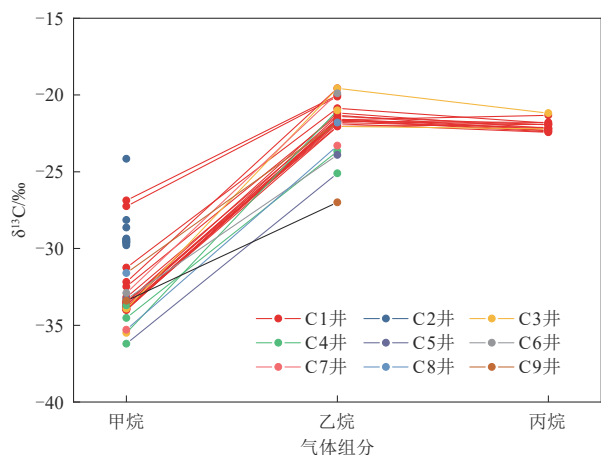


图2 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出气碳同位素组成序列
Fig. 2 Sequence diagram of carbon isotopic composition of gas produced from deep coal rock methane wells in the Ordos Basin

明研究区煤岩气是有机成因而非无机成因^[12]。通常以 $\delta^{13}\text{C}_2 = -29\text{‰}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3 = -25.5\text{‰}$ 为界限来划分煤型气和油型气^[21-22],研究区所有煤岩气井 $\delta^{13}\text{C}_2$ 均大于 -29‰ , $\delta^{13}\text{C}_3$ 均大于 -25.5‰ ,结合 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_3$ 成因判识图(图3)可知,研究区煤岩气为典型煤型气,仅C4井和C9井落入混合气区。通常以甲烷碳同位素值 -55‰ 为界限来划分生物成因气和热成因气^[23],研究区所有煤岩气井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 均大于 -55‰ ,结合Milkov成因判识图版(图4)可知,研究区煤岩气为中-晚期热成因气。

3.2 排采过程中气体分馏特征

煤岩气井生产过程中的气体分馏是一个较为复杂的过程,鉴于此,本文对研究区典型的C1和C2两口高产井产出气组分和碳同位素进行了连续跟踪监测。两口井均为深部煤岩气水平井,游离气占比高,呈现“返排即见气,投产即高产”的生产特征(图5)。C1井于2022年10月21日投产,截至2023年12月20日,累计产气量为 $1\,038.32 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均日产气量为 $2.53 \times 10^4 \text{ m}^3$,最高日产气量为 $5.74 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。C2井于2023年

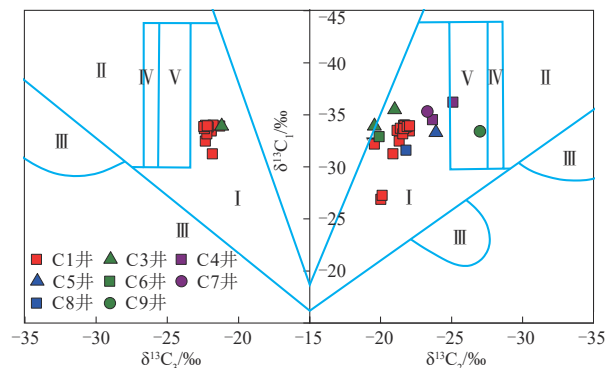


图3 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出气 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_3$ 成因判识图(底图据文献[24])

Fig. 3 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_3$ discriminant diagram illustrating the origins of gas produced from deep coal rock methane wells in the Ordos Basin (base figure from reference [24])

注: I 为煤型气区; II 为油型气区; III 为碳同位素序列倒转混合气区; IV 为煤型气和油型气区; V 为煤型气、油型气和混合气区。

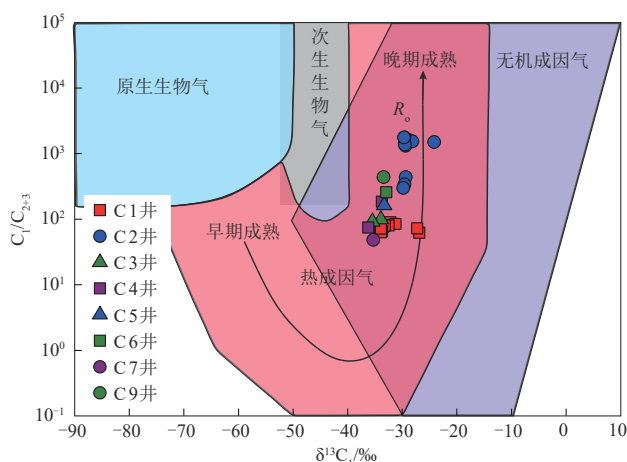


图4 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出气Milkov成因判识图(底图据文献[25])

Fig. 4 Milkov discriminant diagram illustrating the origin of gas produced from deep coal rock methane wells in the Ordos Basin (base figure from reference [25])

2月25日投产,截止到2023年9月4日,累计产气量为 $241.63 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均日产气量为 $1.29 \times 10^4 \text{ m}^3$,最高日产

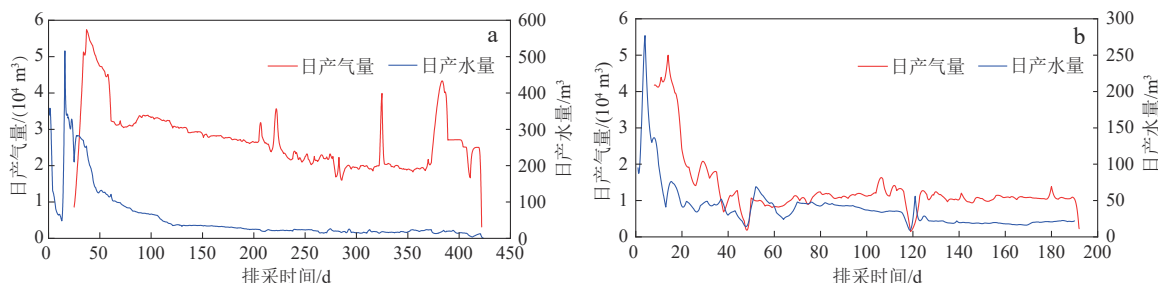


图5 鄂尔多斯盆地深部C1(a)和C2(b)两口煤岩气井排采曲线
Fig. 5 Coal rock methane production curves of wells C1 and C2

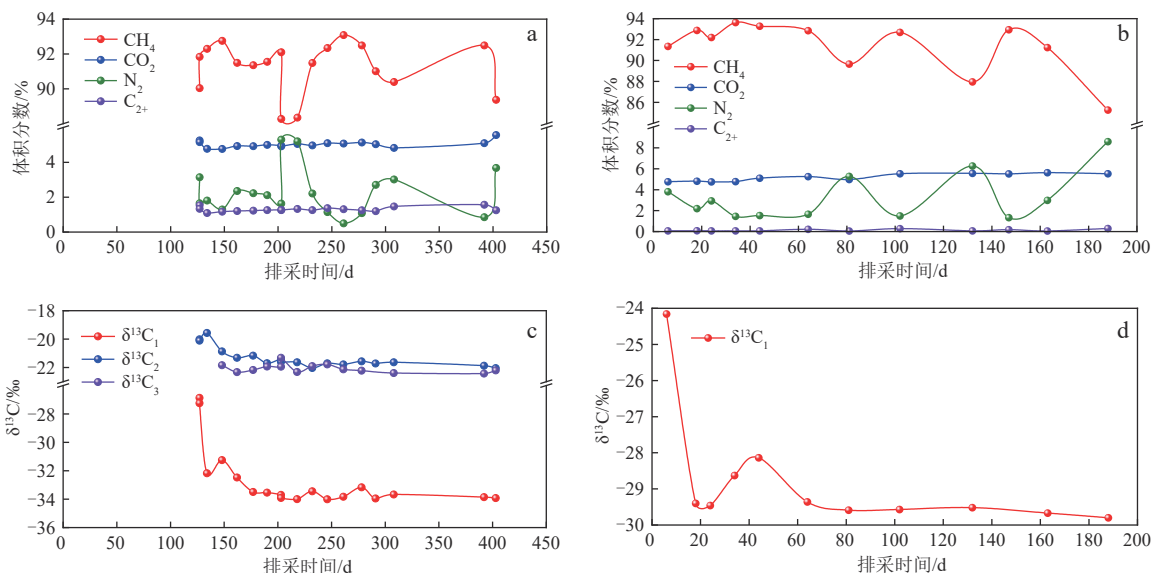


图6 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井生产过程中气体组分与碳同位素分馏特征

Fig. 6 Characteristics of gas components and carbon isotopic fractionation during the production of coal rock methane wells

a. C1井气体组分特征;b. C2井气体组分特征;c. C1井碳同位素分馏特征;d. C2井碳同位素分馏特征

气量为 $5.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

由图6a和b可知,在排采过程中重烃与CO₂体积分数基本不变,C1井重烃平均为1.30%,CO₂平均为5.03%,C2井重烃平均为0.12%,CO₂平均为5.18%。C2井相较于C1井煤层具有更高的成熟度,因此C2井重烃含量更低。CH₄与N₂体积分数存在较大波动且波动趋势相反,呈现“镜像”关系。深部煤岩气井水平井各压裂段解吸时间存在先后差异,以及煤的多组分气体吸附-解吸能力存在显著差异,可能是导致煤层解吸过程中气体组分呈规律性波动变化的重要原因^[26]。

关于煤岩气运移过程中同位素分馏,前人已做了较多的研究^[27-29],Niemann和Whiticar^[30]监测国外多口煤岩气井后,发现生产过程中甲烷碳同位素均表现出非常显著的变轻趋势。气井生产过程中的同位素分馏主要受吸附-解吸作用和扩散作用控制,由于吸附势的差异,¹³CH₄相较于¹²CH₄优先吸附,滞后解吸;由于¹²CH₄比¹³CH₄分子量更小,从而具有更高的扩散系数^[31]。由图6c和d可知,研究区两口井均处于¹²CH₄优先解吸扩散阶段,持续变轻。C1井碳同位素变轻约8‰,C2井变轻约6‰。

对于深部煤岩气井,在排采初期高产阶段则叠加了初始游离气大量释放产出的这一独特特征,在这一过程中,由于原始气藏游离气和吸附气在漫长的地质演化过程中已达到气体化学性质的动态平衡,在游离气为主的产出阶段,产出气甲烷同位素特征反映的是真正原始气藏的平衡结果,此时吸附气的解吸造成的

同位素分馏影响较小,产出气同位素偏重。随着排采的进行,吸附气开始大量解吸并逐渐成为主力,日产气量达到稳定平衡,吸附-解吸造成的同位素分馏影响显现,此时同位素逐渐偏轻且稳定。如C2井,在初始阶段就密集采样测试,在初期高产阶段,日产气量达到 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,测得的甲烷同位素值为-24.16‰,排采20d后,日产气量逐渐降低并稳定在 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,甲烷同位素大幅度变轻,最终甲烷同位素稳值定在-29‰左右(图6d)。C1井在排采120d后开始密集采样测试,与上述规律基本一致,170d后甲烷同位素偏轻稳定(图6c)。可以推测,C1井游离气释放为主的周期较长,初期高峰日产气量最高突破 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,170d后吸附气释放为主,日产气量稳定在 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上(图5a)。两口井的排采曲线特征和甲烷同位素演化具有一致性,一定程度上反映出游离气释放阶段延续时间越久,深部煤岩气井产量可能越高。这一规律与深部煤岩气井含气量测试的保压气-解吸气碳同位素变化规律具有一致性。研究区内C8井及另外4口深部煤岩气典型井完成了保压气-解吸气甲烷碳同位素密集测试(图7),根据含气量测试阶段划分,分为保压游离气释放、解吸气大量释放和残余解吸气释放3个阶段。在保压游离气释放阶段,甲烷碳同位素逐渐变轻,这一阶段以游离气为主,也包含少量吸附气。而后进入解吸气释放阶段,在测试初期,解吸气大量产出,甲烷碳同位素较轻,随着解吸气的持续产出,甲烷碳同位素逐渐变重。在最后的残余解吸气释放阶段,

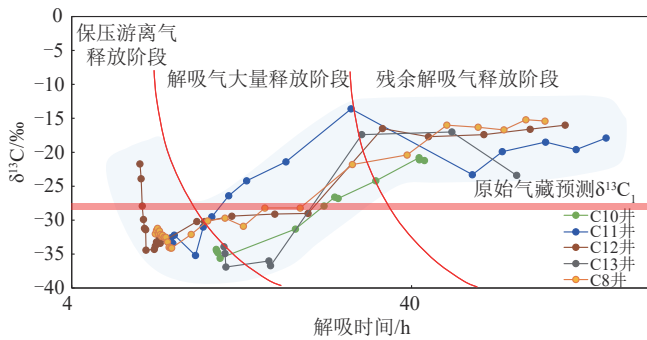


图7 鄂尔多斯盆地深部煤层保压游离气-解吸气甲烷碳同位素随时间变化

Fig. 7 Time-varying methane carbon isotopes in pressure-retained free gas and initially desorbed gas in the Ordos Basin

甲烷碳同位素较为稳定,但远远重于原始气藏预测的甲烷碳同位素值(原始气藏预测值基于煤层镜质组最大反射率与热成因气甲烷碳同位素值关系式^[32]计算)。保压气-解吸气测试是一个甲烷连续释放的过程,直至甲烷完全释放而结束。然而深部煤岩气井要揭示这一完整过程至少需要到气井生产周期基本结束,即需要很多年。目前排采1年左右的煤岩气井监测数据所反映的主要是保压游离气释放阶段的情况,解吸气释放的初期阶段也有涉及。

另外,C1井 $\delta^{13}\text{C}_2$ 变轻约4‰,由于 $^{13}\text{C}_1$ 分子间的相

对质量差大于 $^{13}\text{C}_2$ ^[33],因此扩散过程中的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 分馏幅度小于 $\delta^{13}\text{C}_1$;C1井 $\delta^{13}\text{C}_3$ 基本未发生分馏(图6c)。

3.3 产出水常规离子特征

前人研究表明鄂尔多斯盆地浅部煤岩气井产出水主要来源于地表水和大气降水补给:其中保德地区浅部煤层产出水呈弱碱性的Na-HCO₃型水,为地表水补给^[1, 34];临汾矿区煤层产出水为Na-Cl型水,TDS较高,氢、氧同位素数据表明产出水主要来源于大气降水^[5]。而深部煤岩气由于埋藏较深,受地表水和大气降水的影响较小,开发时通常产水量低或不产水^[35]。然而研究区9口煤岩气井累计产水量 $0.13 \times 10^4 \sim 2.27 \times 10^4 \text{ m}^3$,稳定日产水量 $12.63 \sim 87.79 \text{ m}^3$,产水量较大,推测除了受到大规模压裂液返排的影响外,还存在煤层顶、底板围岩水补给。研究区顶、底板主要含水层为奥陶系灰岩、石炭系-二叠系砂岩及砂岩夹灰岩含水层^[36]。

C1、C2和C3三口井产出水样品常规离子检测结果显示pH值为6,呈弱酸性,TDS平均为133.78 g/L。其中C2井TDS最高,平均为193.08 g/L,与其较好的保存条件相关;C1井次之,TDS平均为81.04 g/L;C3井较低,TDS为41.64 g/L。产出水阳离子以Na⁺和Ca²⁺为主,Mg²⁺含量较少;阴离子以Cl⁻为主,HCO₃⁻和SO₄²⁻含量较少(图8)。根据苏林水型分类法, $(\gamma_{\text{Na}^+} - \gamma_{\text{Cl}^-}) / \gamma_{\text{Mg}^{2+}} < 1$ 时,

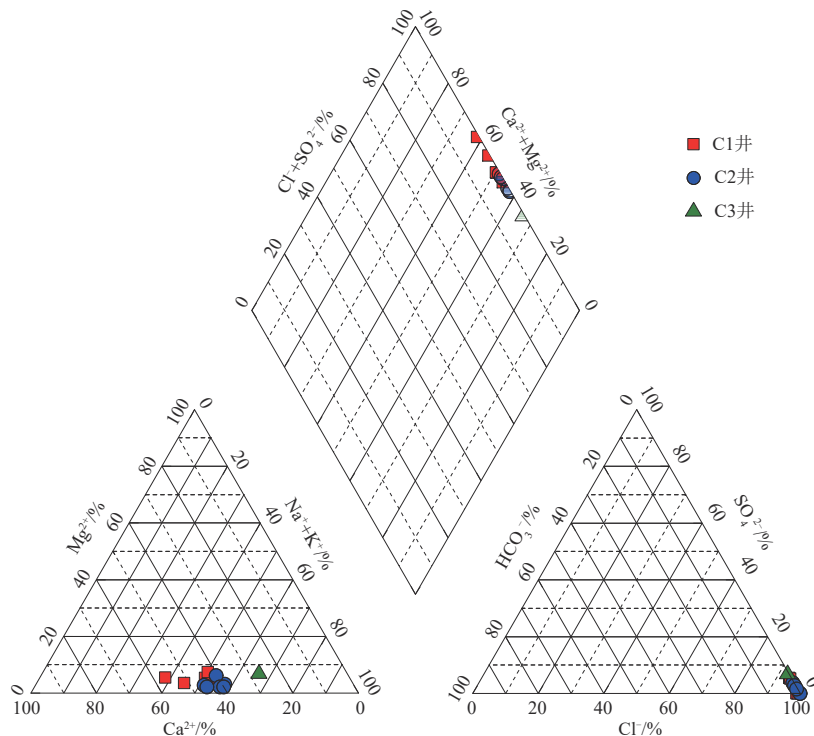


图8 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出水piper图

Fig. 8 Piper diagram of water produced from coal rock methane wells in the Ordos Basin

为Ca-Cl水型,反映了封闭的地下水环境^[37],主要为原始沉积水。产出水钠氯系数($\gamma_{\text{Na}^+}/\gamma_{\text{Cl}^-}$)平均为0.54,脱硫系数($100 \times \gamma_{\text{SO}_4^{2-}}/\gamma_{\text{Cl}^-}$)平均为2.49,镁钙系数($\gamma_{\text{Mg}^{2+}}/\gamma_{\text{Ca}^{2+}}$)平均为0.11,变质系数 $[(\gamma_{\text{Cl}^-}-\gamma_{\text{Na}^+})/\gamma_{\text{Mg}^{2+}}]$ 平均为6.20,盐化系数 $[\gamma_{\text{Cl}^-}/(\gamma_{\text{CO}_3^{2-}}+r_{\text{HCO}_3^-})]$ 平均为302.05,具有较低的钠氯系数、脱硫系数、镁钙系数与较高的变质系数、盐化系数,多种离子比例系数均显示研究区地层封闭性好,煤岩气保存条件好^[38-39]。

深部煤岩气井在排采初期,TDS受压裂液影响较大,但这种影响一般是一种稀释作用,因为原始地层水矿化度很大,而大规模压裂液的加入,稀释了原始地层水。随着排采的进行,C1和C2两口井TDS逐渐增高,受压裂液影响逐渐降低,表现为原始地层水属性(图9),这与浅部煤层井产出水TDS变化截然相反,浅部煤岩气井原始地层水矿化度往往较低,TDS大部分小于10 g/L,排采初期受压裂液影响较大,这种影响是增浓作用,初期产出水TDS较高,而后随排采时间延长,TDS降低并逐渐接近原始地层水。

3.4 产出水氢、氧同位素特征

稳定的氢、氧同位素组成数据包含地下水的起源及其演化和运动的信息,且受工程影响较弱,因此可为识别产出水来源提供重要依据^[40]。氢、氧同位素组成的研究方法通常采用全球大气降水线[GMWL,公式(1)]^[41]

和中国大气降水线方程[公式(2)]^[42-43],而鄂尔多斯盆地大气降水线方程为[公式(3)]^[41]。将产出水测试数据与鄂尔多斯盆地大气降水线方程进行对比(图10),可见研究区煤岩气井产出水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-3.9\text{‰} \sim -3.0\text{‰}$,平均为 -3.3‰ , δD 值在 $-58.2\text{‰} \sim -51.9\text{‰}$,平均为 -55.1‰ ;产出水氢、氧同位素值大部分偏离大气降水线,说明受大气降水影响较小(图10)。

$$\delta\text{D}=8 \times \delta^{18}\text{O}+10 \quad (1)$$

$$\delta\text{D}=7.9 \times \delta^{18}\text{O}+8.2 \quad (2)$$

$$\delta\text{D}=6.88 \times \delta^{18}\text{O}+0.23 \quad (3)$$

式中: δD 为产出水氢同位素值, ‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 为产出水氧同位素值, ‰ 。

中国浅部煤岩气井产出水氢、氧同位素值通常分布在大气降水线附近,且普遍呈明显的D漂移特征,少数呈 ^{18}O 漂移。研究区煤岩气井早期产出水氢、氧同位素值均分布在大气降水线右侧,表现为明显的 ^{18}O 漂移趋势(图10)。蒸发作用、水-岩交互作用($100 \sim 150\text{℃}$)以及与盆地卤水或海水混合均可导致产出水同位素呈 ^{18}O 漂移^[44-45]。而研究区产出水呈 ^{18}O 漂移的原因推测受到了高温地层环境下富 ^{18}O 的顶、底板岩层沉积水补给的影响,裂缝监测显示部分压裂段裂缝高度可扩展到顶、底板进而沟通含水层。测试井煤层埋深在 $2\,600 \sim 3\,300\text{ m}$,原始地层温度较高,为 $75 \sim 100\text{℃}$ 。高温环境下的岩层水在径流的过程中,不断地溶解岩石中的含氧矿物成分,岩层水中 ^{16}O 与含氧矿物中 ^{18}O 发生交换,使得产出水中逐渐富集 ^{18}O ,表现为明显的 ^{18}O 漂移。随着排采的进行,少部分井产出水的氢、氧同位素值逐渐向大气降水线靠近,表明排采后期岩层水逐渐向煤层水过渡。

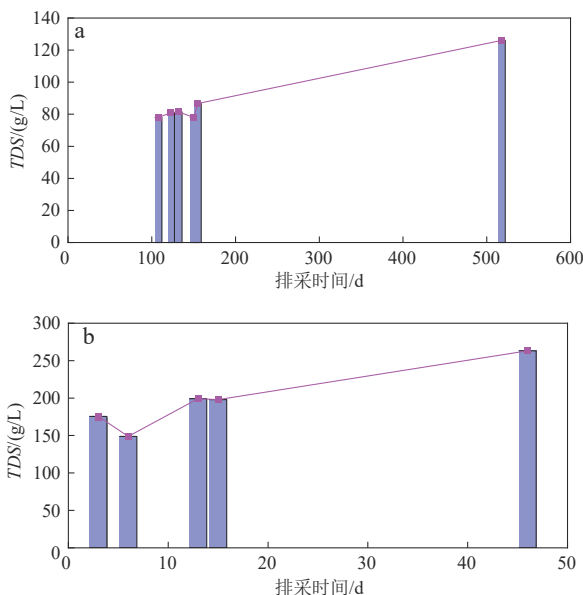


图9 鄂尔多斯盆地深部C1(a)和C2(b)两口煤岩气井产出水矿化度(TDS)随排采时间的变化

Fig. 9 TDS in water produced from coal rock methane wells C1 and C2 varying with the number of coal rock methane production days

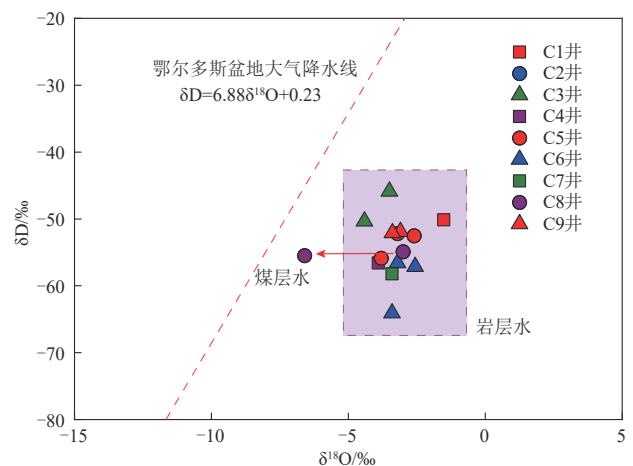


图10 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系
Fig. 10 δD vs. $\delta^{18}\text{O}$ of water produced from coal rock methane wells in the Ordos Basin

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东缘煤岩气井产出气为中-晚期热成因气,以 CH_4 为主,重烃及非烃气体含量较低,为极干气。碳同位素总体表现为正碳同位素组成序列。研究区煤岩气为典型煤型气。

2) 深部煤岩气井随着排采天数的增加,产出气甲烷碳同位素较大幅度地变轻,其演化特征是初期以游离气产出为主,后期有吸附气解吸、分馏的叠加,这一变化与含气量测试中保压游离气-解吸气释放初始阶段的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 变化规律吻合,可有效辅助标定划分游离气和吸附气产出阶段,甲烷碳同位素由重变轻持续时间越久,煤岩气高产可能性越大。

3) 研究区部分煤岩气井产水量较大,除了受压裂液返排影响外,还存在外来水补给。产出水TDS高,平均为133.78 g/L。产出水水型为Ca-Cl型,主要为原始沉积水,具有较低的钠氯系数、脱硫系数、镁钙系数与较高的变质系数、盐化系数,反映了地层封闭性和煤岩气保存条件好。初期产出水氢、氧同位素值普遍偏离大气降水线,受大气降水影响较小,大部分井表现为 ^{18}O 漂移趋势,推测受到了高温地层环境下煤层顶、底板岩层水补给的影响。

参 考 文 献

- [1] HU Weiqiang, CHEN Xin, LI Yangbing, et al. Geochemical characteristics and genesis of coalbed methane in Baode area on the eastern margin of Ordos Basin[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 206: 01019.
- [2] ZHANG Kun, MENG Zhaoping, WANG Xiaoming. Distribution of methane carbon isotope and its significance on CBM accumulation of No. 2 coal seam in Yanchuannan CBM block, Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 92-105.
- [3] ZHANG Shuo, ZHANG Xiaodong, LI Guizhong, et al. Distribution characteristics and geochemistry mechanisms of carbon isotope of coalbed methane in central-southern Qinshui basin, China[J]. Fuel, 2019, 244: 1-12.
- [4] CORTES J, CASTRO A, ARBOLEDA G, et al. Hydrogeological and hydrogeochemical evaluation of groundwaters and surface waters in potential coalbed methane areas in Colombia [J]. International Journal of Coal Geology, 2022, 253: 103937.
- [5] GUO Zhidong, BAO Yuan, WANG Yubin, et al. Hydrogeochemical characteristics and water-rock interaction mechanism of coalbed-produced water in the Linfen mining area, eastern margin of Ordos Basin, China [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1108520.
- [6] ÜNAL B, PERRY V R, SHETH M, et al. Trace elements affect methanogenic activity and diversity in enrichments from subsurface coal bed produced water[J]. Frontiers in Microbiology, 2012, 3: 175.
- [7] 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1013-1023.
- GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1013-1023.
- [8] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 277-285.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [9] 李进步, 崔越华, 黄有根, 等. 鄂尔多斯盆地低渗-致密气藏水平井全生命周期开发技术及展望[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 480-494.
- LI Jinbu, CUI Yuehua, HUANG Yougen, et al. Technologies and prospect of full-cycle development of low-permeability tight gas reservoirs with horizontal wells, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 480-494.
- [10] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1598-1604.
- ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1598-1604.
- [11] 申建. 我国主要盆地深部煤层气资源量预测[R]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- SHEN Jian. Prediction of deep coalbed methane resources in major basins in China [R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [12] 中国煤田地质总局. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- China National Administration of Coal Geology. Coal accumulating and coal resource evaluation of Ordos Basin [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996.
- [13] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [14] BAO Yuan, WANG Wenbo, MA Dongmin, et al. Gas origin and constraint of $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ distribution in the Dafosi mine field in the southern margin of the Ordos Basin, China [J]. Energy & Fuels,

- 2020, 34(11): 14065–14073.
- [15] 琚宜文, 李清光, 颜志丰, 等. 煤层气成因类型及其地球化学研究进展[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 806–815.
- JU Yiwen, LI Qingguang, YAN Zhifeng, et al. Origin types of CBM and their geochemical research progress [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 806–815.
- [16] 唐淑玲, 汤达祯, 孙斌, 等. 富(含)CO₂煤层气多源多阶成因研究进展及勘探开发启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 58–68.
- TANG Shuling, TANG Dazhen, SUN Bin, et al. Research progress of multi-source and multi-stage genesis of CO₂-enriched CBM and the enlightenments for its exploration and development [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 58–68.
- [17] CLAYTON J L. Geochemistry of coalbed gas—A review [J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/4): 159–173.
- [18] MOORE T A. Coalbed methane: A review [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 101: 36–81.
- [19] SCOTT A R, KAISER W R, AYERS W B, Jr. Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan Basin, Colorado and New Mexico—Implications for coalbed gas producibility [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(8): 1186–1209.
- [20] TAO Mingxin, SHI Baoguang, LI Jinying, et al. Secondary biological coalbed gas in the Xinji area, Anhui province, China: Evidence from the geochemical features and secondary changes [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 71(2/3): 358–370.
- [21] 李剑, 王晓波, 侯连华, 等. 四川盆地页岩气地球化学特征及资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1093–1106.
- LI Jian, WANG Xiaobo, HOU Lianhua, et al. Geochemical characteristics and resource potential of shale gas in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1093–1106.
- [22] 孙晓, 王杰, 陶成, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地古生界天然气地球化学特征及其来源综合判识[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 307–314.
- SUN Xiao, WANG Jie, TAO Cheng, et al. Evaluation of geochemical characteristics and source of natural gas in Lower Paleozoic, Daniudi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(2): 307–314.
- [23] SONG Yan, LIU Shaobo, ZHANG Qun, et al. Coalbed methane genesis, occurrence and accumulation in China [J]. Petroleum Science, 2012, 9(3): 269–280.
- [24] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: 化学, 1992, 22(2): 185–193.
- DAI Jinxing. Identification of various alkane gases [J]. Scientia Sinica(Chimica), 1992, 22(2): 185–193.
- [25] MILKOV A V, ETIOPE G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of >20,000 samples [J]. Organic Geochemistry, 2018, 125: 109–120.
- [26] 杜明洋. 滇东煤层气合采井气水地球化学特征及气层层源判识[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020: 18–23.
- DU Mingyang. Geochemical characteristics of gas and water in coalbed methane production wells in east Yunnan and identification of gas sources [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020: 18–23.
- [27] 胡国艺, 李谨, 马成华, 等. 沁水煤层气田高阶煤解吸气碳同位素分馏特征及其意义[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 267–272.
- HU Guoyi, LI Jin, MA Chenghua, et al. Characteristics and implications of the carbon isotope fractionation of desorbed coalbed methane in Qinshui coalbed methane field [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 267–272.
- [28] 刘洪林, 王红岩, 赵国良, 等. 稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 在煤层气田勘探中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(4): 442–446.
- LIU Honglin, WANG Hongyan, ZHAO Guoliang, et al. Application of coal bed methane stable carbon isotope in exploration of coal bed methane field [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2004, 24(4): 442–446.
- [29] GAO Li, WU Sheng, DEEV A, et al. The gas isotope interpretation tool: A novel method to better predict production decline [J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(8): 1263–1275.
- [30] NIEMANN M, WHITICAR M J. Stable isotope systematics of coalbed methane: Desorption and production [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(12): A682–A682.
- [31] 马勇, 李大华, 黄越, 等. 页岩气析出过程中的H同位素分馏及地质意义[J]. 地球化学, 2024, 53(2): 163–173.
- MA Yong, LI Dahua, HUANG Yue, et al. Hydrogen isotopic fractionation during shale gas release and its geological significance [J]. Geochimica, 2024, 53(2): 163–173.
- [32] 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 359–366.
- LIU Wenhui, XU Yongchang. A two stage model of carbon isotopic fractionation in coal gas [J]. Geochimica, 1999, 28(4): 359–366.
- [33] 李文鏢, 卢双舫, 李俊乾, 等. 页岩气/煤层气运移过程中的同位素分馏研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 929–942.
- LI Wenbiao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Research progress on isotopic fractionation in the process of shale gas/coalbed methane migration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 929–942.
- [34] 李洋冰, 曾磊, 胡维强, 等. 保德地区煤层气地球化学特征及成因探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 133–141, 151.
- LI Yangbing, ZENG Lei, HU Weiqiang, et al. Geochemical characteristics and genesis of coalbed methane in Baode area [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 133–141, 151.

- [35] 许浩, 汤达桢, 陶树, 等. 深、浅部煤层气地质条件差异性及其形成机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 33-39.
XU Hao, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Differences in geological conditions of deep and shallow coalbed methane and their formation mechanisms [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 33-39.
- [36] 王相业, 孙保平. 鄂尔多斯盆地兴县地区煤层气地球化学特征及成因[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 156-164, 173.
WANG Xiangye, SUN Baoping. Geochemical characteristics and their origin of CBM in Xingxian area, Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 156-164, 173.
- [37] 康志勇, 李晓涛, 田文, 等. 地表水/地层水水型分类及其划分方法[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(1): 65-77.
KANG Zhiyong, LI Xiaotao, TIAN Wen, et al. Type classification of surface water/formation water and its classified method[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 65-77.
- [38] 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.
- [39] 赵永强, 倪春华, 吴小奇, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系地层水地球化学特征和来源[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 279-287.
ZHAO Yongqiang, NI Chunhua, WU Xiaoqi, et al. Geochemical characteristics and source of Permian formation water in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(2): 279-287.
- [40] LU Lingling, GUO Chen, CHEN Zhenlong, et al. Quantitative identification of water sources of coalbed methane wells, based on the hydrogen and oxygen isotopes of produced water—A case of the Zhijin Block, South China [J]. Energies, 2022, 15(24): 9550.
- [41] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [42] 王善博, 唐书恒, 万毅, 等. 山西沁水盆地南部太原组煤储层产出水氢氧同位素特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 448-454.
WANG Shanbo, TANG Shuheng, WAN Yi, et al. The hydrogen and oxygen isotope characteristics of drainage water from Taiyuan coal reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 448-454.
- [43] 郑淑惠, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.
ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Hydrogen and oxygen stable isotope study of meteoric water line in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801-806.
- [44] CLAYTON R N, FRIEDMAN I, GRAF D L, et al. The origin of saline formation waters: 1. Isotopic composition [J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(16): 3869-3882.
- [45] HAMILTON S K, GOLDING S D, BAUBLYS K A, et al. Stable isotopic and molecular composition of desorbed coal seam gases from the Walloon Subgroup, eastern Surat Basin, Australia [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 122: 21-36.

(编辑 孙川翔)