

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.223>



鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液的 地球化学特征及排放处理建议

王嘉颖¹, 田文广^{2*}, 张道锋³, 王怀厂³, 闫艺洪⁴, 薛怡勤¹, 王信水¹

1. 中国地质大学(武汉)地球与行星科学学院, 湖北武汉 430074
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018
4. 中国石油华北油田公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552

摘要: 煤岩气是我国非常规天然气勘探开发的重要领域, 其开发过程中的返排液组分复杂, 对水环境存在潜在威胁, 开展返排液地球化学特征与环境风险研究, 对推动煤岩气绿色开发、保障区域水环境安全具有重要的理论和实践意义。选取鄂尔多斯盆地东缘的 24 口煤岩气井产出的 80 个返排液样品, 系统分析阴阳离子、微量元素及氢氧同位素、锶同位素, 解析返排液的地球化学特征, 揭示原生地层水成因机制, 评价其潜在环境风险并提出处理建议。分析结果显示, 返排液具有高盐度、高矿化度的特征, 以 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 为主, 且富 Ca、Sr, 贫 Mg, 元素含量整体较四川盆地页岩气井返排液更富集。返排液是压裂液与原生地层水混合的产物, 据此可推断研究区原生地层水为 Cl-Ca 型。原生地层水经历了古海水蒸发和多类型水-岩相互作用(碳酸盐溶解、白云岩化、黏土矿物吸附和泥岩溶解), 且空间分异显著。原生地层水记录的强烈水-岩相互作用表明储层致密封闭, 有利于煤岩气的产生与保存。返排液中部分有害金属元素超标, 建议构建“源头回用-中和与盐污控制-全域管控”的处置体系, 切实防控环境风险。

关键词: 煤岩气; 返排液; 地层水演化; 鄂尔多斯盆地; 环境影响; 地球化学。

中图分类号: P592

文章编号: 1000-2383(2026)07-2807-14

收稿日期: 2026-05-28

Geochemical Characteristics and Discharge Recommendations for Flowback Water from Coal-Rock Gas Wells, Eastern Ordos Basin

Wang Jiaying¹, Tian Wenguang^{2*}, Zhang Daofeng³, Wang Huaichang³, Yan Yihong⁴, Xue Yiqin¹, Wang Xinshui¹

1. School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China
4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China

Abstract: The coal-rock gas represents a key domain of unconventional natural gas exploration and development in China. The flowback water generated during the coal-rock gas extraction is characterized by complex chemical compositions and poses potential risks to the aquatic environment. Therefore, investigating the geochemical characteristics and environmental risks of

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(No. 2025ZD1404202); 中国石油天然气股份有限公司科技专项(No. 2026DJ003)。

作者简介: 王嘉颖(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事油气地球化学研究。ORCID: 0009-0001-8406-7186。E-mail: wjiaying27@163.com

* **通讯作者:** 田文广, ORCID: 0000-0002-9895-5483。E-mail: tianwg69@petrochina.com.cn

引用格式: 王嘉颖, 田文广, 张道锋, 王怀厂, 闫艺洪, 薛怡勤, 王信水, 2026. 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液的地球化学特征及排放处理建议. 地球科学, 51(7): 2807-2820.

Citation: Wang Jiaying, Tian Wenguang, Zhang Daofeng, Wang Huaichang, Yan Yihong, Xue Yiqin, Wang Xinshui, 2026. Geochemical Characteristics and Discharge Recommendations for Flowback Water from Coal-Rock Gas Wells, Eastern Ordos Basin. *Earth Science*, 51(7): 2807-2820.

flowback water is of significant theoretical and practical importance for promoting the green development of the coal-rock gas and safeguarding regional water environment security. In this study, 80 flowback water samples were collected from 24 coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin. Systematic analyses of cations, anions, trace elements, hydrogen-oxygen isotopes and strontium isotopes were conducted to decipher the geochemical properties of the flowback fluids, reveal the genetic mechanism of the original formation water, evaluate potential environmental risks, and propose targeted treatment suggestions. The results show that the flowback water is characterized by high salinity and high total dissolved solids (TDS), with Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} and Sr^{2+} as the dominant ions. These samples are enriched in Ca and Sr but depleted in Mg, displaying higher total elemental concentrations than those of the flowback water from shale gas wells in the Sichuan Basin. It is concluded that the flowback water is a mixture of fracturing fluid and original formation water, and the original formation water in the study area is inferred to be of Cl-Ca type. The original formation water has undergone paleo-seawater evaporation and multiple types of water-rock interactions (including carbonate dissolution, dolomitization, clay mineral adsorption and mudstone dissolution), and exhibits significant spatial differentiation. The intense water-rock interactions recorded in the original formation water indicate that the reservoirs are tight and well-sealed, which is favorable for the generation and preservation of the coal-rock gas. Given that some toxic heavy metals in the flowback water exceed environmental discharge standards, we suggest establishing a disposal framework of “source-directed reuse, neutralization & salinity control, and full-domain management” to effectively mitigate environmental risks.

Key words: coal-rock gas; flowback water; formation water evolution; Ordos Basin; environmental impact; geochemistry.

0 引言

全球煤岩气资源分布广泛,地质资源量约为 $232 \times 10^{12} \text{ m}^3$. 我国煤岩气资源储量丰富,地质资源量达 $55.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全球煤岩气地质资源量的 24% (李国欣等, 2026). 煤岩气作为深藏于煤系地层的非常规天然气,整体开发潜力可观,近年来探明储量呈现较快的增长态势,已成为我国天然气产量增长的重要组成部分(王高成等, 2025; 邹才能等, 2025; 侯雨庭等, 2026). 鄂尔多斯盆地作为我国煤岩气开发的核心产区,地质资源量约为 $30.49 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 近年来开发规模持续扩大,成为保障我国天然气供给的重要基地(黄道军等, 2024; 万永平等, 2024; 李国欣等, 2026).

由于煤岩气多储藏于致密煤系地层中,具有“一深十高”的特征(安琦等, 2024; 赵喆等, 2024), 必须采用水力压裂技术进行高效抽采. 水力压裂通过高压注入成分复杂的压裂液,在储层中形成裂缝以提高气藏渗透率. 然而,注入的压裂液约有 10%~50% 会随气藏产出液返回地表,形成煤岩气井返排液(Fajfer *et al.*, 2022; 李聪等, 2026). 压裂液通常会与赋存于煤岩孔隙中的原生水相互混合,致使返排液除残留压裂液添加剂外,还会呈现高矿化度、高有机物含量、放射性强等特征. 若处理不当,将对周边地表水、地下水及生态系统造成严重威胁,制约煤岩气产业的可持续发展(Abualfaraj *et al.*, 2014; Rowan *et al.*, 2015; 倪云燕等, 2022). 此外,煤岩气井返排液的地球化学特征可以反映丰富

的地质信息,本质就是压裂液-储层-地层流体-环境介质相互作用的综合产物,是连接储层地质认知、压裂工程优化、环境风险防控的核心纽带,其研究意义贯穿勘探、开发和环保全过程(Huang *et al.*, 2020; 倪云燕等, 2021; Yin *et al.*, 2024). 因此,系统开展煤岩气返排液的地球化学特征、来源演化及环境风险研究,对于保障区域水环境安全、推动煤岩气绿色开发具有重要的理论意义与实践价值.

近年来针对返排液的研究主要集中于四川盆地海相地层的页岩气井返排液,对于鄂尔多斯盆地海陆过渡相地层的煤岩气井返排液的系统研究略显薄弱. 基于此,本文以鄂尔多斯盆地东缘典型煤岩气井返排液为研究对象,系统分析其常规水化学参数、微量元素含量及氢氧同位素和锶同位素组成,旨在:(1)揭示煤岩气井返排液的地球化学特征,明晰海陆过渡相地层返排液的特点;(2)阐明地层水演化过程及主要控制机制;(3)评估返排液中特征金属元素的环境风险,为煤岩气开发过程中的水环境管理提供科学依据.

1 研究区地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是我国第二大含油气盆地,面积约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$,被誉为“中国能源金三角”(周新平等, 2021; 蒋文琦等, 2025). 气候上,鄂尔多斯盆地位于温带内陆区域,属于干旱-半干旱区,降水补给匮乏而蒸发作用强烈,因此生态环境相对脆弱(王德潜等, 2005). 根据构造发育特征,

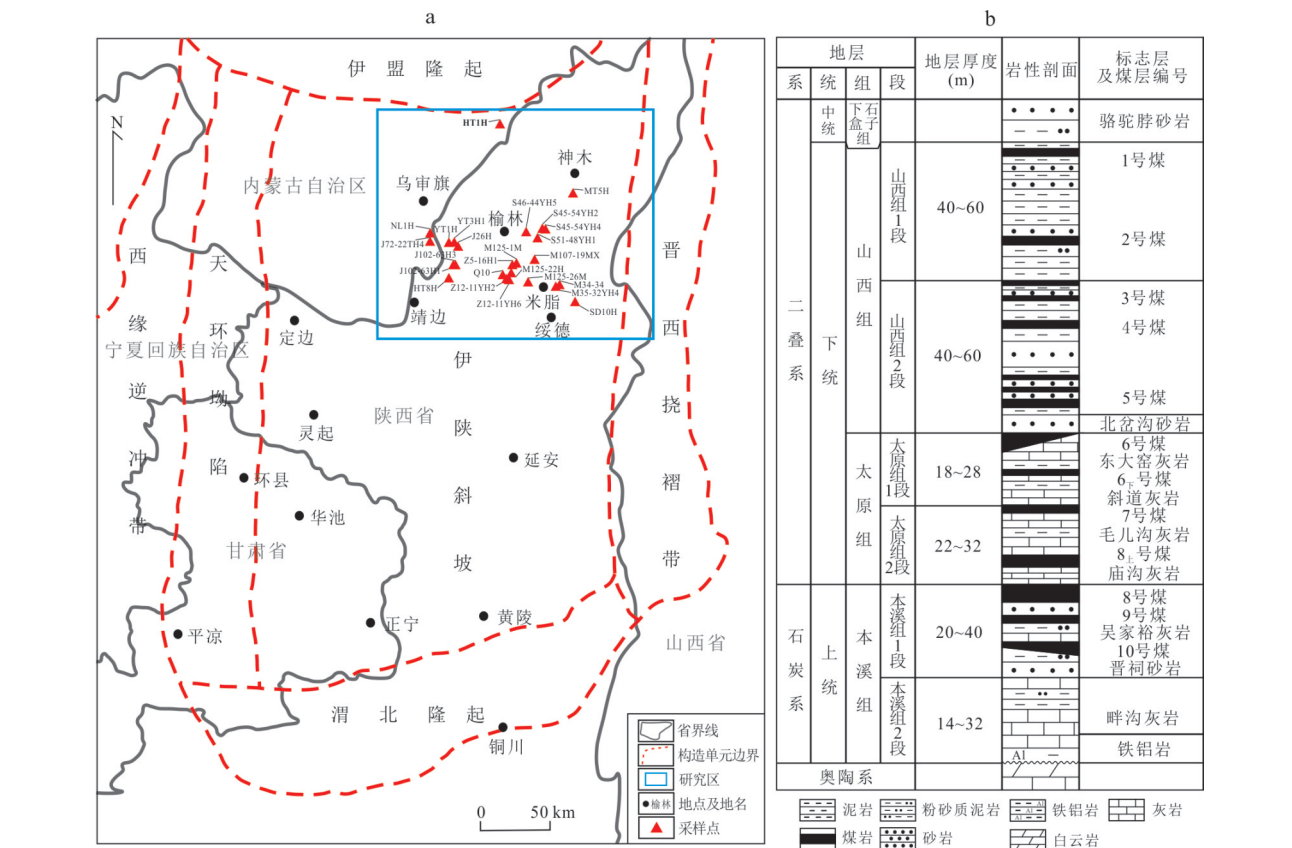


图 1 鄂尔多斯盆地构造分区图(a)及本溪组-山西组地层综合柱状图(b)(据赵喆等, 2024)

Fig.1 Tectonic division map of the Ordos Basin (a) and comprehensive stratigraphic column of the Benxi Formation-Shanxi Formation (b) (modified from Zhao *et al.*, 2024)

可将鄂尔多斯盆地划分为 6 个二级构造单元(图 1)。鄂尔多斯盆地经历了多期构造运动叠加改造, 始终保持相对稳定的克拉通属性, 形成了完整且多样的地层序列与复杂的构造-沉积演化历史(据宜文等, 2025)。

晚古生代是鄂尔多斯盆地构造-沉积格局由海相向陆相转变的关键转折期, 同时也是盆地最重要的成煤演化阶段(包洪平等, 2022; 何登发等, 2025)。其中, 山西组、太原组和本溪组三套地层不仅完整记录了鄂尔多斯盆地从滨海泻湖-潮坪环境向河流-三角洲环境的演变过程, 更因适宜的聚煤条件形成了厚度稳定、分布广泛的优质煤层, 共同构成了上古生界核心的含煤岩系序列, 为盆地天然气资源的大规模富集奠定了核心物质基础(牛小兵等, 2024; 崔广智等, 2026)。

研究区位于鄂尔多斯盆地东缘, 是鄂尔多斯盆地的残余东部边界。该区煤岩气富集得益于 4 个关键条件: 上古生界太原组、山西组等烃源岩生烃潜力大; 深部煤储层及砂岩、灰岩储集空间充足; 燕山期等构造-热作用保障生烃聚集; 构造、岩性等多因素耦合形成良好保存条件(徐凤

银等, 2023; 杨晓利等, 2025)。因此, 鄂尔多斯盆地东缘蕴藏丰富的煤岩气资源, 上古生界石炭系-二叠系煤系地层十分发育(田文广, 2012), 已成为勘探开发的重要层位。随着深部煤岩气勘探的持续推进, 东缘区域已成为我国煤岩气规模效益开发的核心区域, 具有良好的勘探开发前景。

2 样品采集及测试方法

煤岩气井返排液现场采集于鄂尔多斯盆地东缘靖边、榆阳、横山、米脂、绥德等地区的 24 口煤岩气井(表 1)。采集的水样品均装于 500 mL PET 材质塑料瓶中密封, 并标记好取样时间及井号。随后送往中国地质大学(武汉)地球与行星科学学院进行 pH、碱度、阴阳离子和微量元素分析测试, 并在天津大学表层地球系统科学研究院进行氢氧同位素测试, 在武汉上谱分析科技有限责任公司进行锆同位素测试。

取返排液和压裂液样品原液进行 pH 和碱度测试, 测试所用仪器为 T860 全自动电位滴定仪(海能

表 1 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液样品基本信息

Table 1 Basic information of flowback water samples from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

井号	区块位置	层位	层段 (m)	返排阶段	样品数量
SD10H	绥德县	本溪组 8#煤	2 661.0~3 095.0	返排中期	2
HT1H	伊金霍洛旗	本溪组 8#煤	2 989.0~4 119.5	返排中期	3
HT8H	靖边县	本溪组 8#煤	3 426.0~5 036.0	返排后期	1
NL1H	乌审旗	本溪组 8#煤	3 580.0~5 013.0	返排后期	8
J72-22TH4	乌审旗	太原组斜道灰岩	3 468.0~4 828.0	返排中期和返排后期	6
J102-63H3	横山区	太原组斜道灰岩	3 380.0~5 494.0	返排初期	3
Z12-11YH6	横山区	本溪组 8#煤	3 050.0~4 391.5	返排中期	3
J102-63H1	横山区	太原组斜道灰岩	3 393.0~5 429.0	返排中期	3
Q10	横山区	本溪组砂岩	2 873.5~2 876.5	返排后期	8
Z5-16H1	榆阳区	太原组砂岩	3 048.0~3 562.0	返排中期	4
S46-44YH5	榆阳区	本溪组 8#煤	3 046.0~4 408.0	返排中期	1
M125-22H	榆阳区	本溪组 8#煤	3 043.0~4 440.0	返排中期	6
M107-19MX	榆阳区	本溪组 8#煤	2 840.0~3 075.0	返排中期	1
M125-1M	榆阳区	本溪组 8#煤	2 634.0~2 637.0	返排中期	1
YT1H	榆阳区	太原组斜道灰岩	3 409.0~4 731.0	返排后期	7
YT3H1	榆阳区	太原组斜道灰岩	3 321.0~3 963.0	返排后期	7
J26H	榆阳区	本溪组 8#煤	3 523.0~4 689.0	返排后期	1
S51-48YH1	佳县	本溪组 8#煤	3 050.0~4 471.0	返排中期	4
S45-54YH2	佳县	本溪组 8#煤	2 662.0~3 795.0	返排中期	1
S45-54YH4	佳县	本溪组 8#煤	2 711.0~3 840.0	返排中期	5
M34-34	米脂县	本溪组 8#煤	2 683.0~3 183.0	返排中期	2
M35-32YH4	米脂县	本溪组 8#煤	2 690.0~4 076.0	返排中期	1
M125-26M	米脂县	本溪组 8#煤	2 613.0~2 617.0	返排后期	1
MT5	米脂县	本溪组 8#煤	2 404.0~2 406.0	返排后期	1

注:结合现场施工记录,将所有样品划分为 3 个返排阶段:返排初期(<30 d)、返排中期(30~365 d)、返排后期(>365 d)。

仪器),测试精度 0.1 mV±0.003%。取样品原液,用 0.45 μm 一次性针式水系过滤器过滤。经梯度稀释后,使用离子色谱仪(Thermo Scientific DIONEX AQUION RFIC)测试样品中的阴离子。标样的相对标准偏差在 1% 以内,离子浓度分析误差优于 ±5%。另取部分酸化后的样品原液,使用 0.45 μm 一次性针式水系过滤器过滤。经梯度稀释后,使用 Agilent 7700a 型四级杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-MS)测试阳离子和微量元素。测试结果的 RSD<3%,结果重复性良好,精度可靠。总溶解固体(TDS)采用主要阴阳离子浓度加和法计算,并通过电中性平衡校验,确保分析结果的准确性。

用于氢氧同位素测试的样品经过 0.22 μm 一次性针式水系过滤器过滤后,使用水氢氧同位素分析仪(Picarro I2140-i)对样品的 δ¹⁸O 和 δD 值进行测试。分析精度以 1σ 计,δ¹⁸O 优于 0.03‰,δD 优于 0.1‰。用于锶同位素测试的样品使用 0.22 μm 一次性针式水系过滤器过滤酸化

后的样品,离心后取上清液进行柱层析分离纯化,使用 Neptune Plus 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(Thermo Fisher Scientific MC-ICP-MS)测试。标准样品实测值均与推荐值在误差范围内一致,样品测试 2SE 均控制在 0.000 015 以内,分析精度稳定,数据重复性好,测试结果真实可靠。

3 返排液测试结果

3.1 常量离子含量

分析结果显示,鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液具有高盐度、高矿化度的特点。pH 范围在 3.75~6.85,平均值为 5.82,多偏酸性(表 2)。主要离子组成为 Cl⁻(58.56%)、Na⁺(18.03%)、Ca²⁺(15.44%)、Sr²⁺(2.53%)、Mg²⁺(1.72%)、Ba²⁺(1.31%),而 Br⁻(0.85%)、HCO₃⁻(0.52%)、K⁺(0.41%)、NO₃⁻和 SO₄²⁻(0.07%)及其他微量元素(0.58%)则占比较低(图 2)。Cl⁻含量分布在 965~139 576 mg/L,平均值为 64 430 mg/L;

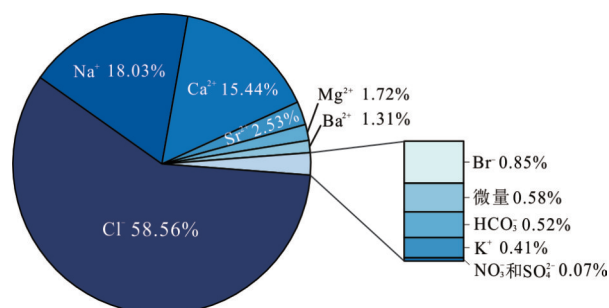


图2 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液主要成分含量饼图

Fig. 2 Pie chart of major component proportions in flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

Na⁺ 含量分布在 585~32 131 mg/L, 平均值为 18 379 mg/L; Ca²⁺ 含量分布在 581~39 972 mg/L, 平均值为 17 155 mg/L; Sr²⁺ 含量分布在 58.5~8 707 mg/L, 平均值为 2 675 mg/L; Mg²⁺ 含量分布

在 62.2~5 012 mg/L, 平均值为 1 864 mg/L; Ba²⁺ 含量分布在 22.8~5 851 mg/L, 平均值为 1 489 mg/L; Br 含量分布在 113~1 431 mg/L, 平均值为 725 mg/L; HCO₃⁻ 含量分布在 9.15~2 179 mg/L, 平均值为 364 mg/L, 其中 HT1H 井返排液的 HCO₃⁻ 浓度显著高于其他井. 总溶解固体(TDS)含量分布在 2 945~226 352 mg/L, 平均值为 106 239 mg/L.

3.2 微量元素含量

通过对 45 种微量元素的测试分析发现, 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液的微量元素组成主要为 Li、Be、Fe、Mn、Cr、Pb、Ni、Ti、Zn、Al、Cu、Co、Mo、Rb. Li 含量分布在 0.7~49.3 mg/L, 平均值为 16.4 mg/L; Be 含量分布在 0~0.01 mg/L, 平均值为 0.002 mg/L; Fe 含量分布在 53~934 mg/L, 平均值为 249 mg/L; Al 含量分布在 3.3~281 mg/L, 平均值为 20.2 mg/L; Mn 含量分布在 2.3~116 mg/L, 平均值为 20.0 mg/L; Cr 含量分布

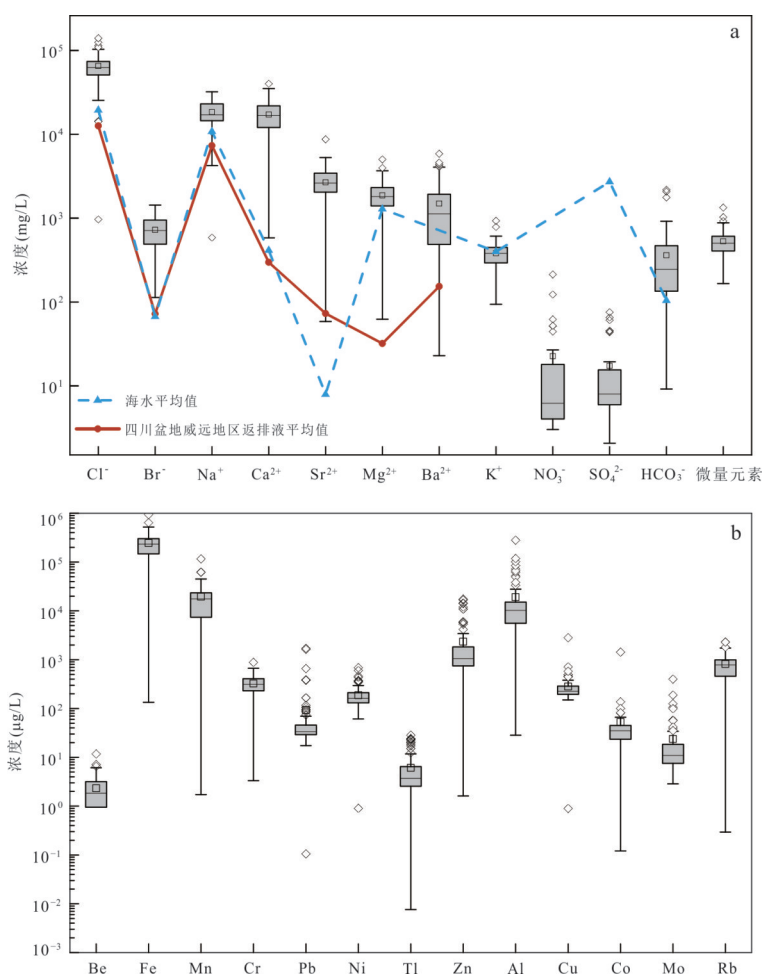


图3 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液主要离子(a)和微量元素(b)含量分布

Fig.3 Distribution of major ion (a) and trace element (b) concentrations in flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

表 2 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气返排液主要离子含量统计与对比

Table 2 Statistics and comparison of major ion concentrations in flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

组分	鄂尔多斯盆地煤岩气返排液		四川盆地威远地区页岩气井返排液(倪云燕等,2021)		现代海水 (Millero <i>et al.</i> , 2008)
	分布范围(mg/L)	平均值(mg/L)	分布范围(mg/L)	平均值(mg/L)	平均值(mg/L)
Cl ⁻	965~139 576	64 430	5 370~37 068	12 578	19 352
Br ⁻	113~1 431	725	21.0~257	72.09	67
Na ⁺	585~32 131	18 379	3 954~20 864	7334	10 781
Ca ²⁺	581~39 972	17 155	118~1 823	297	412
Sr ²⁺	58.5~8 707	2 675	33.6~419	73	7.9
Mg ²⁺	62.2~5 012	1 864	14.0~49	32	1 283
Ba ²⁺	22.8~5 851	1 489	58.3~504	153	-
K ⁺	93.7~932	379	-	-	399
HCO ₃ ⁻	9.15~2 179	364	-	-	104
SO ₄ ²⁻	2.07~75.4	17.3	-	-	2 712
NO ₃ ⁻	3.01~213	22.5	-	-	-
微量元素	166~1 336	527	-	-	-
pH	3.75~6.85		-	-	-
TDS	2 945~226 352	106 239	-	-	-

在 0.12~0.88 mg/L,平均值为 0.33 mg/L;Pb 含量分布在 0.02~1.63 mg/L,平均值为 0.08 mg/L;Ni 含量分布在 0.06~0.69 mg/L,平均值为 0.19 mg/L;Tl 含量分布在 0.000 65~0.02 mg/L,平均值为 0.006 mg/L;Zn 含量分布在 0.31~17.4 mg/L,平均值为 2.4 mg/L;Cu 含量分布在 0.15~2.8 mg/L,平均值为 0.29 mg/L;Co 含量分布在 0.006~1.4 mg/L,平均值为 0.06 mg/L;Mo 含量分布在 0.003~0.4 mg/L,平均值为 0.025 mg/L;Rb 含量分布在 0.05~2.3 mg/L,平均值为 0.8 mg/L(图 3b).

3.3 同位素组成

氢氧同位素(δD、δ¹⁸O)分析结果显示,鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液的 δD 值分布在 -92.90‰~-35.86‰,平均值为 -55.07‰±0.38‰;δ¹⁸O 值分布在 -9.17‰~0.54‰,平均值为 -2.59‰±0.17‰. 锶同位素分析结果显示,返排液的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值分布在 0.709 228~0.733 658,平均值为 0.713 321±0.000 006. 不同煤岩气井的值有一定差别.

4 讨论

4.1 返排液中主要离子来源

水力压裂过程中注入的压裂液通常为低盐度体系,而返排中后期则普遍出现高盐度、高矿化度特征.关于返排液主要组分的来源,目前已基本形成共识:返排液本质上是压裂液与原生地层水随采出时间以动态比例混合的产物(Rowan *et al.*, 2015).Cl⁻浓度与其他主要阳离子浓度之间的线性协变关系,可以有效指示样品中压裂液与地层卤水的相对贡献比例(图 4).随着返排过程的持续推进,初期占主导地位的低矿化度压裂液比例逐渐降低,高矿化度地层水的比例相应增大,这是返排后期流体盐度与总溶解固体(TDS)含量显著升高的直接原因.基于这种混合端元模型,返排液的化学组成可在一定程度上反映原生地层水的地球化学信息.原生地层水作为控制返排液整体水化学特征的关键端元,其离子组成复杂,成因多样,对其来源与演化机制的深入认识是解析返排液地球化学特征的重要前提.

样品中最主要的离子是 Na⁺和 Cl⁻,因此探讨 Na⁺和 Cl⁻的来源尤为重要.在沉积盆地中,地层水 Na⁺、Cl⁻、Br⁻的关系可以用来帮助判断地层水的盐

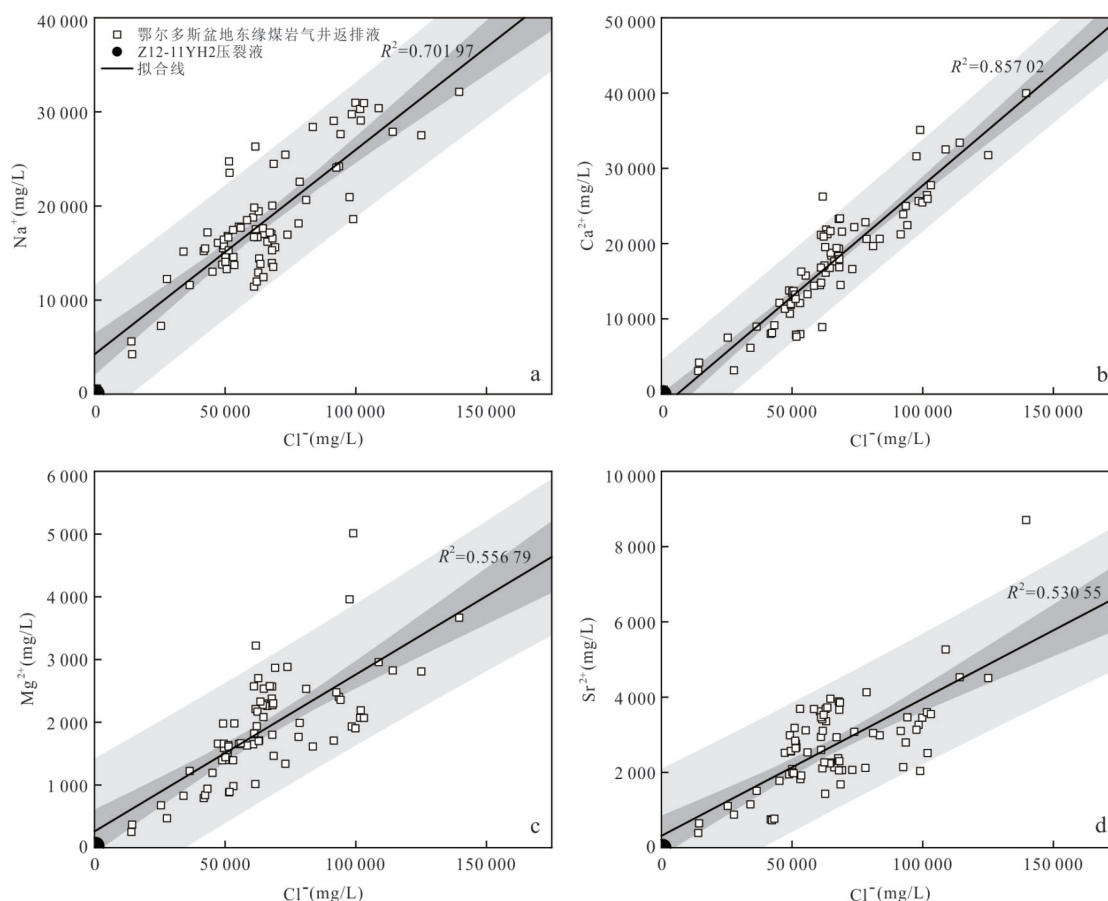


图4 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度随 Cl^- 浓度的变化

Fig.4 Variations of Na, Ca, Mg, and Sr concentrations with Cl^- concentration in flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

度是由石盐矿物溶解形成还是由海水蒸发浓缩形成,不同来源地层水的 $\text{Na}-\text{Cl}-\text{Br}$ 组成有着显著区别(Carpenter, 1978; Kharaka and Hanor, 2014). 地层中的石盐矿物来自海水蒸发过程中的 NaCl 结晶,而地层卤水则由蒸发残留海水经一系列物理化学过程演化而成.在海水蒸发浓缩过程中, Na^+ 和 Cl^- 以1:1的摩尔比析出,直到 Na^+ 完全耗尽时则蒸发完全. Br^- 通常难以形成自生矿物,以离子形式存在于液相中,随着蒸发浓缩程度的增加,盐类矿物析出, Br^- 浓度不断增加.因此,海水蒸发浓缩形成的地层水具有富 Br^- 和高 Br/Cl 特征,而石盐矿物溶解产生的地层水则显示低 Br/Cl 特征.返排液样品的各指标特点与演化后的蒸发海水相似, Br/Cl 摩尔比最高可达 7.08×10^{-3} ,约对应蒸发海水的35倍.返排液样品偏离海水蒸发线,且几乎有着相近的线性关系,表明样品是由蒸发残留海水稀释而来(图5a、5b).

相比于现代海水显示富 Mg^{2+} 贫 Ca^{2+} 的特点,鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液呈现了富 Ca^{2+} 、

Sr^{2+} , 贫 Mg^{2+} 的特点,这与四川盆地威远地区页岩气井返排液的特征一致,但总体元素含量较四川盆地更为富集(图3a).蒸发浓缩模型可以解释 Na^+ 和 Cl^- 的来源,但无法解释 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 的富集与 Mg^{2+} 的亏损.如果仅存在压裂液的稀释作用,返排液 Ca^{2+} 含量应该下降,整体位于海水蒸发线的下方(图5c).结合本溪组-山西组地层综合柱状图(图1b),山西组、太原组和本溪组煤层的顶板或底板均有不同厚度的灰岩,碳酸盐岩的溶解可导致 Ca^{2+} 含量富集.但是,仅碳酸盐岩溶解无法导致 Mg^{2+} 含量降低并产生高 Ca 低 Mg 的分异,因此还需要其他机制解释这种现象.原生地层水与碳酸盐岩通过水-岩相互作用可发生白云岩化(沈安江等, 2025):



残余蒸发海水中存在大量 Mg^{2+} ,通过白云岩化作用可交换出碳酸盐岩的 Ca^{2+} .同时,由于 Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 容易发生类质同象替换,在碳酸盐岩溶解和白云岩化过程中,均会释放大量的 Sr^{2+} 进入地层水中,导

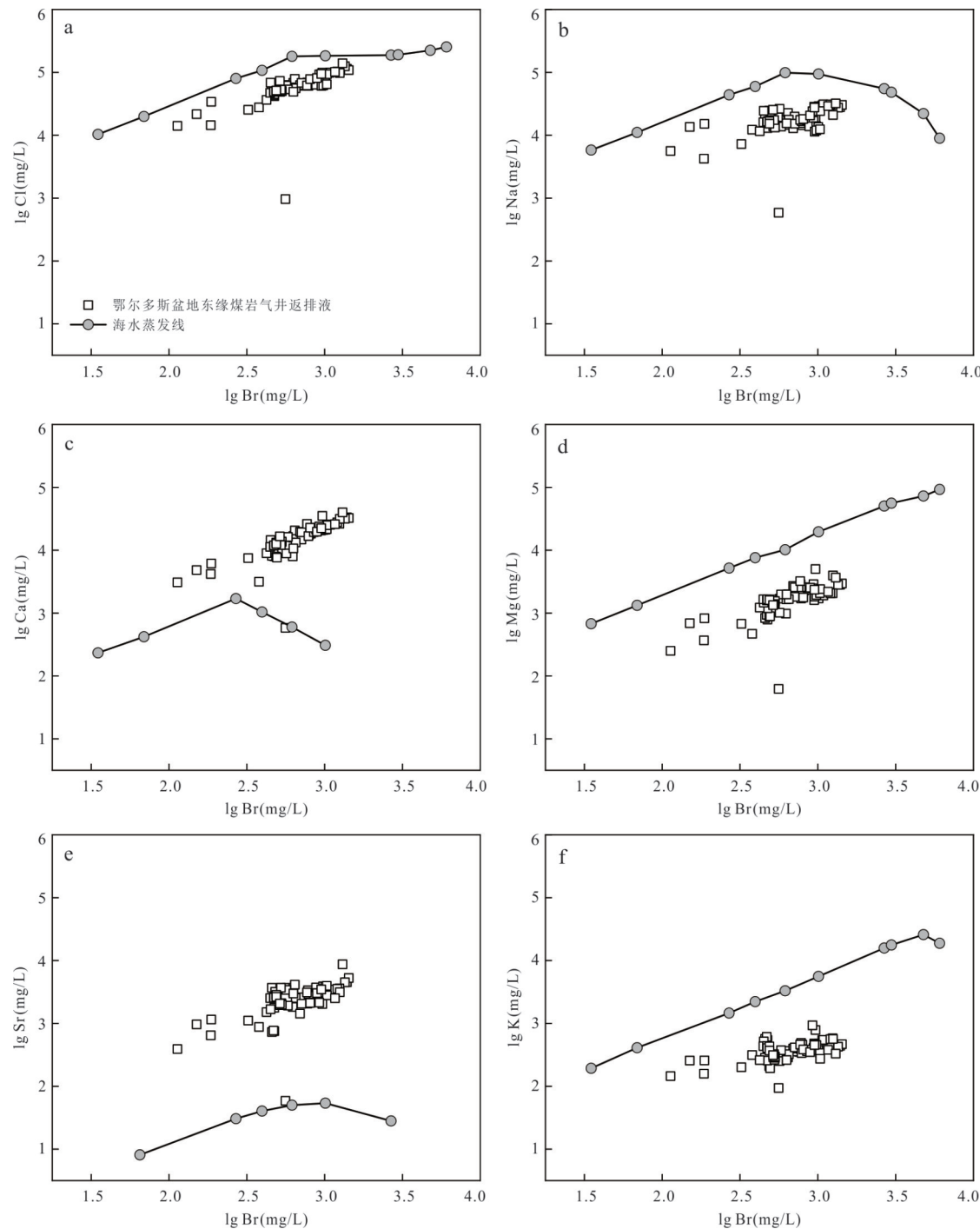


图5 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液lg图解(海水蒸发线取自 Dresel and Rose, 2010)

Fig.5 lg plots of flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin (the seawater evaporation line after Dresel and Rose, 2010)

致 Sr^{2+} 含量也远高于蒸发相海水(图5e)。

此外,lgBr-lgK图解(图5f)显示原生地层水 K^{+} 亏损.由于部分煤岩层顶、底板也会发育一定厚度的泥岩,而黏土矿物作为泥岩的主要组分,对 K^{+} 离子具有吸附性.因此,原生地层水与泥岩的相互作用可以导致原生地层水中 K^{+} 含量相对贫化。

因此,返排液中的主量离子继承了蒸发浓缩古海水的属性,并在演化过程中经碳酸盐溶解、白云岩化和黏土矿物吸附等叠加改造,最终形成富Ca、Sr,贫Mg、K的组成特征。

4.2 地层水的演化及主控机制

地层水的演化是一个受多重地质与地球化学

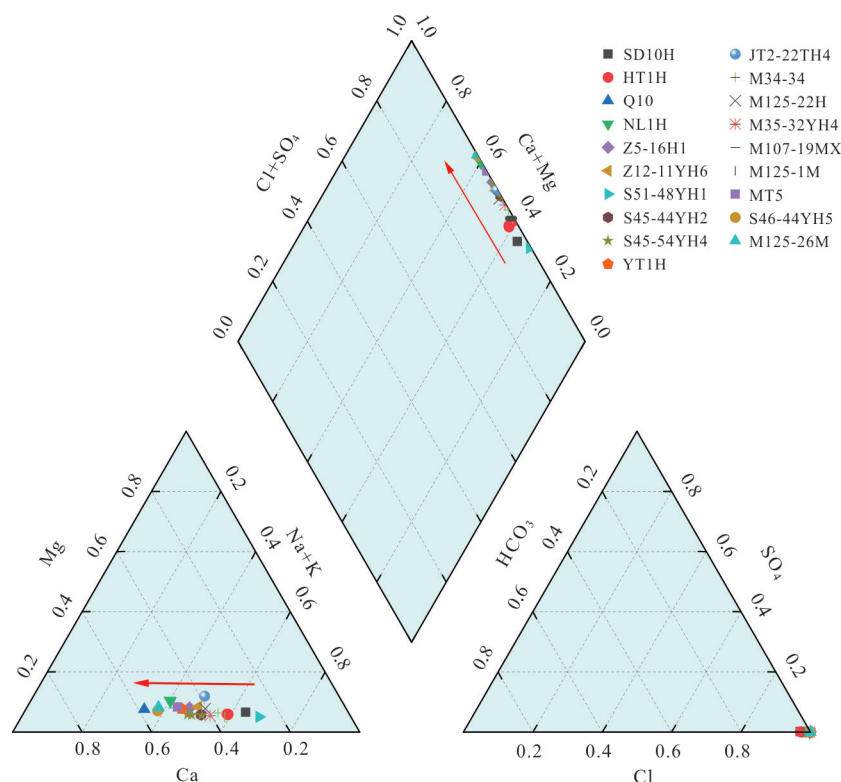


图 6 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液 Piper 图解

Fig.6 Piper diagram of flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

过程共同控制的复杂过程.在不同构造背景、岩性条件与水文地质条件下,各类过程的贡献程度往往存在显著差异,致使地层水的演化呈现明显的区域性与阶段性特征.Piper 三线图常用于判断水化学及水-岩相互作用类型,并可以检验上述推测的演化机制.在 Piper 三线图中(图 6),样品分布呈现出清晰的阶段性演化规律.阴离子三角区内,所有样品点均高度集中在 Cl 端元,表明 Cl^- 是返排液中占绝对主导的阴离子组分;在阳离子三角区内,样品整体沿 $\text{Ca}-(\text{Na}+\text{K})$ 边展布,其中排采后期的样品(如 Q10、NL1H)相较排采中期的样品更靠近 Ca 端元,呈现随排采时间向 Ca 端元逐渐偏移的趋势;菱形区内,样品整体偏向 $\text{Ca}+\text{Mg}$ 与 $\text{Cl}+\text{SO}_4$ 一侧,排采后期样品同样较排采中期样品向高 Ca 、高 Cl 方向偏移,显示了压裂液与原生地层水两种水体以不同比例混合的特征(王瑞久, 1983).随排采时间延长,返排液中原生地层水的占比持续升高,是形成该趋势的核心原因.因此,可以推测原生地层水具有更高 Ca 含量,水化学类型为 $\text{Cl}-\text{Ca}$ 型.此外,样品点在图中分布范围相对集中,表明其化学性质极其相似,属于同一水文地质单元或经历了相似的水-岩相互作用.

氢氧同位素(δD 、 $\delta^{18}\text{O}$)是识别水体来源与演化过程的核心示踪工具.部分样品点紧密分布在大气降水线附近(图 7a),未出现明显偏离,与鄂尔多斯盆地雨水平均值相近(杨郧城等, 2005),且低 Br 含量(图 7b).上述特征表明,返排初期的返排液以压裂用淡水为主,水体继承了现代大气降水未经历深层地层水的演化过程,且水-岩相互作用程度微弱的特征.而绝大部分样品值落在大气降水线右下方,呈现显著的“氧漂移”特征,表明样品中的 $\delta^{18}\text{O}$ 非大气降水来源.一般来说,岩石中的 ^{18}O 含量极高,在深层相对封闭的还原环境中,随着径流路径延长、埋藏深度增加及地温梯度升高,地层水与富 ^{18}O 的围岩(如碳酸盐、泥岩、砂岩等)发生氧同位素交换反应,使水体 $\delta^{18}\text{O}$ 出现不同程度富集.强烈的水-岩相互作用也表明原生地层水处于封闭性良好的深层埋藏环境.部分样品的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现异常,为返排液中有有机物对测试的干扰所致.

以上机制可以解释原生地层水的共性特征,但不同井之间仍存在差异.锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)是示踪水-岩相互作用、水源混合及地层岩性的关键地球化学工具.由于压裂液的 Sr^{2+} 含量相对原生地层水而言很低,其混入比例的高低不会造成返排液的 Sr

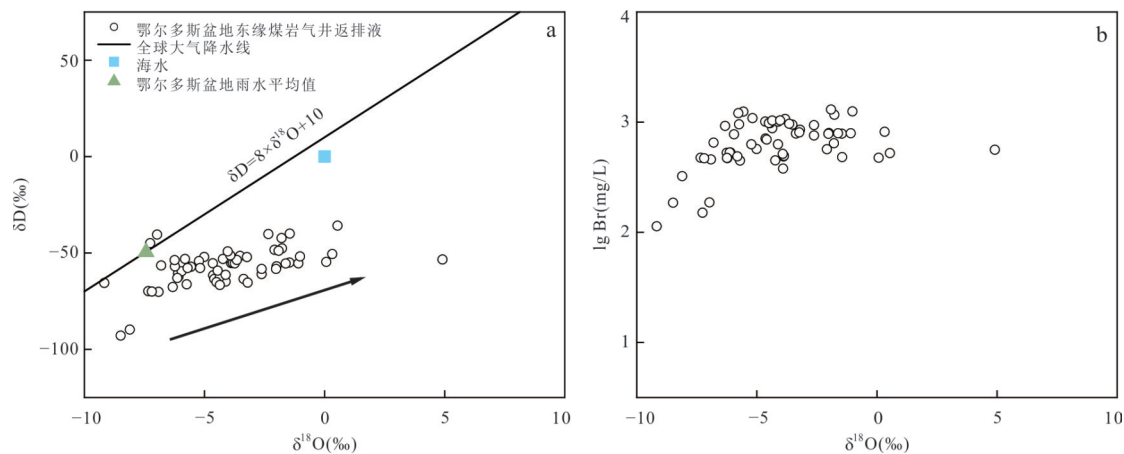


图 7 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液氢氧同位素图(全球大气降水线数据来自 Craig, 1961)

Fig.7 Hydrogen and oxygen isotope plot of flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin (global meteoric water line after Craig, 1961)

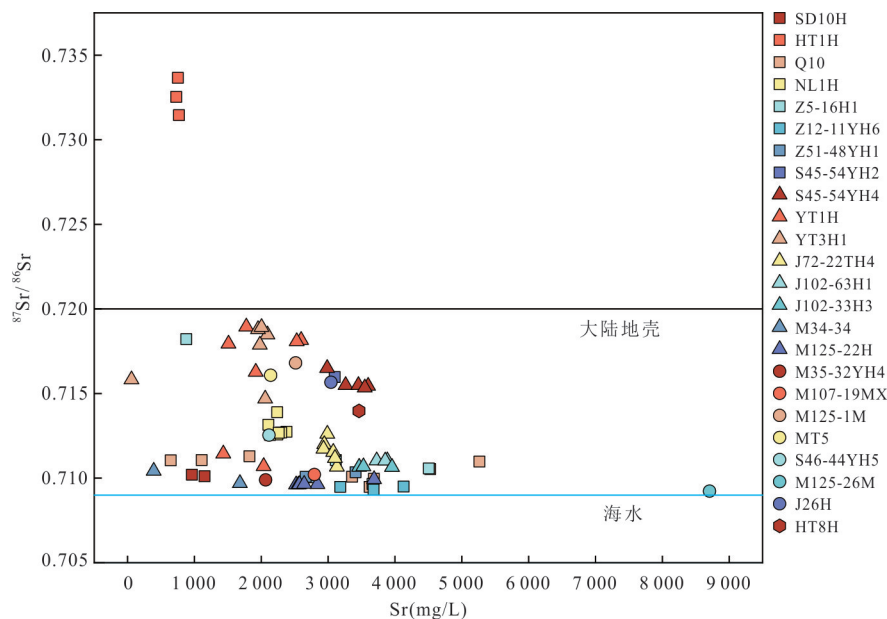


图 8 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液 Sr 同位素比值

Fig.8 Strontium isotope ratio of flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

同位素比值发生改变,因此,返排液的 Sr 同位素组成直接反映原生地层水的特征.大多数返排液的 Sr 同位素组成和海水组成 0.709 相当(图 8),表明返排液中 Sr^{2+} 的来源主要是海水或海相碳酸盐溶解;而部分样品的 Sr 同位素值介于海水和古老大陆地壳之间,表明海水/海相碳酸盐和硅铝质地壳均不同程度提供了 Sr^{2+} .值得注意的是,HT1H 井的样品呈现低 Sr^{2+} 含量和高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (高达 0.730) 的特征,表明 Sr^{2+} 来源于具有极高 Rb/Sr 比值的物质.而 HT1H 井的煤层层位处于本溪组 1 段,其顶、底板有泥岩和泥质粉砂岩.作为泥岩的典型矿物,伊利石晶格中的 K^{+}

极易被 Rb^{+} 通过类质同象形式替代,从而导致伊利石具有异常高的 Rb/Sr 比值.这种高 Rb/Sr 比值的矿物相在地质历史时期持续衰变,累积了极高的 ^{87}Sr .在水-岩相互作用过程中,放射性成因的 ^{87}Sr 进入流体中,致使原生地层水具有高 Sr 同位素比值的特征.因此,偏高的 Sr 同位素比值表明,鄂尔多斯盆地东缘北部的 HT1H 井与其他井位地层条件差异明显, Sr 同位素组成具有显著的空间分异特征.

综上所述,研究区原生地层水为 Cl-Ca 型,其形成演化受古海水蒸发浓缩与多类型水-岩相互作用(碳酸盐溶解、白云岩化、黏土矿物吸附、泥岩溶解)

表 3 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液环境指标

Table 3 Environmental indicators of flowback water from the coal-rock gas wells in the eastern Ordos Basin

组分	鄂尔多斯盆地返排液(mg/L)		生活饮用水 卫生标准	污水综合排放标准	超标倍数	V 类地表水环 境质量标准	V 类地下水 指标及限值
	分布范围	平均值	(mg/L)	(mg/L)		GB 8978—1996	GB/T 14848—2017
			GB 5749—2022				
pH	3.75~6.85			6~9		6~9	pH<5.5或pH>9.0
铁	53~934	249	0.3	--	--	--	>2.0
锰	2.3~116	20	0.1	5.0	4	--	>1.5
钡	22.8~5 851	1 475	0.7	--	--	--	>4.0
铬	0.12~0.88	0.33	0.05	1.5	0.22	0.1	--
铅	0.02~1.63	0.08	0.01	1.0	--	0.1	>0.10
镍	0.06~0.69	0.19	0.02	1.0	0.19	--	>0.10
铊	0.000 65~0.02	0.006	0.000 1	--	--	--	>0.001
锌	0.31~17.4	2.4	1.0	5.0	0.48	2.0	>5.0
铝	3.3~281	20.2	0.2	--	--	--	>0.50
铜	0.15~2.8	0.29	1.0	2.0	0.15	1.0	>1.5
铍	0~0.01	0.002	0.002	0.005	0.4	--	>0.06
钴	0.006~1.4	0.06		--	--	--	>0.10
钼	0.003~0.4	0.025	0.07	--	--	--	>0.15

共同控制,且空间上显著分异.地层水经历的强烈水-岩相互作用,指示研究区储层致密且封闭性良好,为煤岩气的产生与富集保存提供了有利条件.

4.3 返排液的环境影响及排放处理建议

鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液整体呈偏酸性至酸性,其中 pH≤5.5 的样品占比达 33%;同时具有高矿化度、多金属元素显著富集的特征,多项指标远超现行污染物排放标准,对区域水环境安全构成潜在威胁.测试结果显示(表 3),返排液中 Mn 元素平均含量超过《污水综合排放标准》(GB 8979—1996)中规定限值的 4 倍,部分样品的 Pb 含量也超出该标准限值,必须经过处理达标后方可排放,否则会对土壤、水体生态环境及人体健康造成不利影响;Cr、Ni、Tl、Cu、Be、Co、Mo 等元素含量均在该排放标准限值以内.

返排液中常规特征金属 Fe、Mn、Ba 的含量均远高于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)及地下水 V 类水质限值,Cr、Pb、Ni、Tl 等有毒金属含量也超出饮用水标准要求.此外,Zn、Al 等元素在返排液中也存在一定富集.若返排液未经妥善处置进入地下水、地表水等环境水体,将对区域饮用水安全与地下水水质构成潜在风险.

返排液的强酸性特征(pH≤5.5)进一步加速了

地层中金属元素的溶出与迁移,加剧了环境风险.Fe、Mn 的超标会导致水体感官性状(如色度、浊度)升高,影响水生生态系统;Ba 作为毒理学指标,过量摄入可对心血管系统造成损害;Cr、Pb、Ni 等重金属具有致癌性或神经毒性,Tl 作为剧毒元素,其超标对人体健康与生态环境构成严重威胁.因此,针对返排液强酸性、高矿化度、外排处理成本高的特点,优先建议推行返排液资源化回用是兼具经济性与环境效益的处置方法.返排液经沉淀、过滤预处理后直接回用于同区块后续压裂施工,可从源头减少废水外排量与新鲜水消耗,避免直接进入地表与地下水环境.对于确需外排的返排液,以中和调节 pH 为核心,将偏酸性至酸性的返排液调至中性.通过氢氧化物沉淀、树脂吸附或氧化吸附工艺进行深度去除 Fe、Mn 及有毒金属元素;同时采用膜处理或蒸发结晶工艺脱盐,实现盐污协同控制.另外,还需强化排放过程管控,严禁返排液未经处理直排、散排与渗排,完善处理设施及防渗措施;以本研究识别的 Fe、Mn、Ba、Pb、Tl 为特征监测指标,在井场周边浅层地下水、临近地表水体布设监测点位,长期跟踪水质动态变化.同时健全环境应急处理机制,制定泄漏、溢流等突发环境事件的处置流程,切实防控区域水环境长期风险.

总之,鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液存在

排放超标与受纳水体污染双重风险,其酸性条件进一步加剧了环境危害.需构建“源头回用-中和与盐污控制-全域管控”的处置体系,防控水环境长期风险,为区域煤岩气绿色开发提供科学支撑.

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液具有高盐度、高矿化度的特点,主要离子组成为 Cl^- (58.56%)、 Na^+ (18.03%)、 Ca^{2+} (15.44%)、 Sr^{2+} (2.53%)、 Mg^{2+} (1.72%)、 Ba^{2+} (1.31%),而 Br^- (0.85%)、 HCO_3^- (0.52%)、 K^+ (0.41%)、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} (0.07%)及其他微量元素(0.58%)则占比较低.与现代海水相比,返排液呈现富 Ca、Sr 贫 Mg 的特点,这与四川盆地威远地区页岩气井返排液的特征相似,但元素含量整体更为富集.

(2)鄂尔多斯盆地东缘煤岩气井返排液是压裂液注入地层与原生地层水混合后返回至地表的液体,随着排采时间的增加,原生地层水的比例升高,因此返排液可以显示原生地层水的特征.

(3)鄂尔多斯盆地东缘的原生地层水为 Cl-Ca 型水,经历了古海水蒸发浓缩、多类型水-岩相互作用(碳酸盐溶解、白云岩化、黏土矿物吸附和泥岩溶解)后,再与压裂液混合稀释,才形成现在返排液富 Ca、Sr,贫 Mg、K 的地球化学特征. Sr 同位素结果显示,不同地区有明显的空间分异特征.强烈的水-岩相互作用也表明储层致密且封闭性良好,为煤岩气的储存提供了有利条件.

(4)鄂尔多斯盆地东缘返排液兼具偏酸性、高矿化度与多金属元素富集的多重污染属性,既存在排放超标的风险,也存在对区域生态安全与人体健康的潜在威胁.需构建“源头回用-中和与盐污控制-全域管控”的处置体系,优先推行资源化回用;对确需外排的废水进行中和调节 pH 与盐污协同去除;同时配套完善防渗管控、长期监测与应急处置机制,以切实防控水环境风险.

附表见 <https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.223>.

References

Abualfaraj, N., Gurian, P. L., Olson, M. S., 2014. Characterization of Marcellus Shale Flowback Water. *Environmental Engineering Science*, 31(9): 514–524. <https://doi.org/10.1089/ees.2014.0001>

An, Q., Yang, F., Yang, R. Y., et al., 2024. Practice and

Understanding of Deep Coalbed Methane Massive Hydraulic Fracturing in Shenfu Block, Ordos Basin. *Journal of China Coal Society*, 49(5): 2376–2393 (in Chinese with English abstract).

Bao, H. P., He, D. F., Wang, Q. P., et al., 2022. Four Main Paleouplifts Evolution in Ordos Basin and Their Differences in Significance of Oil and Gas Reservoir Control. *Journal of Palaeogeography*, 24(5): 951–969 (in Chinese with English abstract).

Carpenter, A. B., 1978. Origin and Chemical Evolution of Brines in Sedimentary Basins. In: SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Houston. <https://doi.org/10.2118/7504-ms>

Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

Cui, G. Z., Zhang, Y., Wang, X. Y., et al., 2026. Main Controlling Factors of Gas Enrichment in Thin Coal Seams and Evaluation of Favorable Zones in Yichuan Area of Ordos Basin. *Earth Science*, 51(5): 1908–1923 (in Chinese with English abstract).

Dresel, P. E., Rose, A. W., 2010. Chemistry and Origin of Oil and Gas Well Brines in Western Pennsylvania. Report 10-01.0. In: Pennsylvania Geological Survey Open-File Oil and Gas Report Series. Pennsylvania Department of Conservation and Natural Resources, Pennsylvania.

Fajfer, J., Lipińska O., Koniecznyńska, M., 2022. Hydraulic Fracturing Flowback Chemical Composition Diversity as a Factor Determining Possibilities of Its Management. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11): 16152–16175. <http://doi.org/10.1007/s11356-021-16432-7>

He, D. F., Cheng, X., Zhang, G. W., et al., 2025. Scope, Nature, and Exploration Significance of Ordos Basin during Geological Historical Periods, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(4): 757–771 (in Chinese with English abstract).

Hou, Y. T., Hui, X., Zhang, D. F., 2026. Hydrocarbon Exploration in the Ordos Basin: Experience Enlightenment, Fundamental Researches, and Future Priorities. *Natural Gas Geoscience*, 37(6): 1057–1069 (in Chinese with English abstract).

Huang, D. J., Zhou, G. X., Yang, Z. B., et al., 2024. Geochemical Characterization of Gas - Water Output from Deep Coalrock Methane Wells in the Ordos Basin and Its Geological Responses. *Oil & Gas Geology*, 45(6): 1617–1627 (in Chinese with English abstract).

- Huang, T. M., Li, Z. B., Mayer, B., et al., 2020. Identification of Geochemical Processes during Hydraulic Fracturing of a Shale Gas Reservoir: A Controlled Field and Laboratory Water-Rock Interaction Experiment. *Geophysical Research Letters*, 47(20): e2020GL090420. <https://doi.org/10.1029/2020gl090420>
- Jiang, W. Q., Feng, Y. L., Zou, C. N., et al., 2025. Depositional Character and Influencing Factors of Fine-Grained Gravity Flow of Chang 73 Submember in Longdong Area of Ordos Basin. *Earth Science*, 50(6): 2209—2226 (in Chinese with English abstract).
- Ju, Y. W., Wang, W., Ren, Z. L., et al., 2025. Multi-Stage Evolution of Ordos Basin: Basin-Mountain Coupling System and Energy Resources. *Scientia Sinica Terrae*, 55(8): 2537—2582 (in Chinese).
- Kharaka, Y. K., Hanor, J. S., 2014. Deep Fluids in Sedimentary Basins. In: Holland, H.D., Turekian, K.K., eds., *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 471—515. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00516-7>
- Li, C., Ma, L. M., Cong, P., et al., 2026. Analysis of the Main Controlling Factors for High Production in Deep Coal Rock Gas Horizontal Wells: Taking Jiaxian Area on the Northeast Edge of the Ordos Basin as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 37(2): 379—390 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. X., Chen, R. Y., Wen, Z. X., et al., 2026. Global Coal-Rock Gas Resource Potential and Distribution. *Petroleum Exploration and Development*, 53(1): 14—26 (in Chinese with English abstract).
- Millero, F. J., Feistel, R., Wright, D. G., et al., 2008. The Composition of Standard Seawater and the Definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(1): 50—72. <http://doi.org/10.1016/j.dsr.2007.10.001>
- Ni, Y. Y., Yao, L. M., Liao, F. R., et al., 2021. Geochemical Characteristics of the Elements in Hydraulic Fracturing Flowback Water from the Weiyuan Shale Gas Development Area in Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 32(4): 492—509 (in Chinese with English abstract).
- Ni, Y. Y., Yao, L. M., Sui, J. L., et al., 2022. Isotopic Geochemical Characteristics and Identification Indexes of Shale Gas Hydraulic Fracturing Flowback Water/Produced Water. *Natural Gas Geoscience*, 33(1): 78—91 (in Chinese with English abstract).
- Niu, X. B., Yu, J., Xu, W. L., et al., 2024. Geological Conditions and Exploration Direction of Upper Paleozoic Coal-Rock Gas Accumulation in Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 33—50 (in Chinese with English abstract).
- Osselin, F., Saad, S., Nightingale, M., et al., 2019. Geochemical and Sulfate Isotopic Evolution of Flowback and Produced Waters Reveals Water-Rock Interactions Following Hydraulic Fracturing of a Tight Hydrocarbon Reservoir. *Science of the Total Environment*, 687: 1389—1400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.066>
- Rowan, E. L., Engle, M. A., Kraemer, T. F., et al., 2015. Geochemical and Isotopic Evolution of Water Produced from Middle Devonian Marcellus Shale Gas Wells, Appalachian Basin, Pennsylvania. *AAPG Bulletin*, 99(2): 181—206. <https://doi.org/10.1306/07071413146>
- Shen, A. J., Hu, A. P., Tan, X. C., et al., 2025. Geneses of Dolomites and Dolomite Reservoirs: Review, Advances, and Prospects. *Oil & Gas Geology*, 46(3): 740—758 (in Chinese with English abstract).
- Tian, W. G., 2012. Study on Enrichment Law and Control Mechanism of Coalbed Methane in the Eastern Margin of Ordos Basin (Dissertation). China University of Geosciences (Beijing), Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. P., Wang, Z. C., Han, S. B., et al., 2024. Geological Characteristics and Resource Potential of Deep Coalbed Methane Accumulation in Yan'an Gas Field, Southeastern Margin of Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 35(10): 1724—1739 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Q., Liu Z. Z., Yin, L. H., 2005. Hydro-Geological Characteristics and Groundwater Systems of the Ordos Basin. *Quaternary Sciences*, 25(1): 6—14 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Tian W. G., Zhang C., et al., 2025. Reservoir Characteristics and Exploration Potential of Deep CBM in the Da'an Block, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 45(3): 68—81 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., 1983. Trilinear Diagram and Its Hydrogeological Interpretation. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (6): 6—11 (in Chinese).
- Xu, F. Y., Wang, C. W., Xiong X. Y., et al., 2023. Evolution Law of Deep Coalbed Methane Reservoir Formation and Exploration and Development Practice in the Eastern Margin of Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1764—1780 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. L., Gao, J., He, F. W., et al., 2025. Sedimentary Evolution and Reservoir-Forming Conditions of Taiyuan Formation in Jiaxian Area, Eastern Margin of Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(1): 86—96 (in Chinese with English abstract).

- Yang, Y. C., Hou G. C., Wen, D. G., et al., 2005. Hydrogen-Oxygen Isotope Composition of Precipitation and Seasonal Effects on $\delta^{18}\text{O}$ of Precipitation in Ordos Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(Sup.): 289–292 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X. P., Fu, X. G., Jiang, Y. Q., et al., 2024. The Indicative Role of Geochemical Characteristics of Fracturing Flowback Fluid in Shale Gas Wells on Production Performance. *Processes*, 12(10): 2097. <https://doi.org/10.3390/pr12102097>
- Zhao, Z., Xu, W. L., Zhao, Z. Y., et al., 2024. Geological Characteristics and Exploration Breakthroughs of Coal Rock Gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 234–247, 259 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. P., Deng, X. Q., Li, S. X., et al., 2021. Characteristics of Formation Water and Its Geological Significance of Lower Combination of Yanchang Formation in Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 33(1): 109–120 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, Q., Liu, H. L., et al., 2025. Chian's Breakthrough in Coal-Rock Gas and Its Significance. *Natural Gas Industry*, 45(4): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 安琦, 杨帆, 杨睿月, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气体积压裂实践与认识. *煤炭学报*, 49(5): 2376–2393.
- 包洪平, 何登发, 王前平, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地四大古隆起演化及其油气控藏意义的差异. *古地理学报*, 24(5): 951–969.
- 崔广智, 张扬, 王珣尧, 等, 2026. 鄂尔多斯盆地宜川地区薄层煤岩气富集主控因素及有利区评价. *地球科学*, 51(5): 1908–1923.
- 何登发, 成祥, 张国伟, 等, 2025. 地质历史时期鄂尔多斯盆地的范围、性质及其勘探意义. *石油勘探与开发*, 52(4): 757–771.
- 侯雨庭, 惠潇, 张道锋, 2026. 鄂尔多斯盆地油气勘探历程启示、基础地质研究和勘探领域思考. *天然气地球科学*, 37(6): 1057–1069.
- 黄道军, 周国晓, 杨兆彪, 等, 2024. 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. *石油与天然气地质*, 45(6): 1617–1627.
- 蒋文琦, 冯有良, 邹才能, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 73 亚段细粒重力流沉积特征及其主要影响因素. *地球科学*, 50(6): 2209–2226.
- 据宜文, 王巍, 任战利, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地的多阶段演化: 盆山耦合系统和能源资源. *中国科学: 地球科学*, 55(8): 2537–2582.
- 李聪, 马立民, 丛彭, 等, 2026. 深层煤岩气水平井高产主控因素分析——以鄂尔多斯盆地东北缘佳县地区为例. *天然气地球科学*, 37(2): 379–390.
- 李国欣, 陈瑞银, 温志新, 等, 2026. 全球煤岩气资源潜力与分布. *石油勘探与开发*, 53(1): 14–26.
- 倪云燕, 姚立邈, 廖凤蓉, 等, 2021. 四川盆地威远返排液元素地球化学特征及排放处理建议. *天然气地球科学*, 32(4): 492–509.
- 倪云燕, 姚立邈, 隋建立, 等, 2022. 页岩气压裂返排液/采出水同位素地球化学特征与鉴别指标. *天然气地球科学*, 33(1): 78–91.
- 牛小兵, 喻健, 徐旺林, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地上古生界煤岩气成藏地质条件及勘探方向. *天然气工业*, 44(10): 33–50.
- 沈安江, 胡安平, 谭秀成, 等, 2025. 白云岩与白云岩储层成因: 回顾、进展与展望. *石油与天然气地质*, 46(3): 740–758.
- 田文广, 2012. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气富集规律与控制机制研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 万永平, 王振川, 韩双彪, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地东南缘延安气田深部煤层气成藏地质特征及资源潜力. *天然气地球科学*, 35(10): 1724–1739.
- 王德潜, 刘祖植, 尹立河, 2005. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析. *第四纪研究*, 25(1): 6–14.
- 王高成, 田文广, 章超, 等, 2025. 四川盆地大安区块深层煤层气储层特征及勘探潜力. *天然气工业*, 45(3): 68–81.
- 王瑞久, 1983. 三线图解及其水文地质解释. *工程勘察*, (6): 6–11.
- 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践. *石油学报*, 44(11): 1764–1780.
- 杨晓利, 高娟, 何福文, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地东缘佳县地区太原组沉积演化及成藏条件. *天然气地球科学*, 36(1): 86–96.
- 杨郧城, 侯光才, 文东光, 等, 2005. 鄂尔多斯盆地大气降雨氢氧同位素的组成与季节效应. *地球学报*, 26(增刊): 289–292.
- 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破. *石油勘探与开发*, 51(2): 234–247, 259.
- 周新平, 邓秀芹, 李士祥, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地延长组下组合地层水特征及其油气地质意义. *岩性油气藏*, 33(1): 109–120.
- 邹才能, 赵群, 刘翰林, 等, 2025. 中国煤岩气突破及意义. *天然气工业*, 45(4): 1–18.