

许疃煤矿砂岩裂隙水水文地球化学特征分析

尉虎威¹, 余 凯¹, 许继影¹, 戴洪宝², 温廷中³

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州

³安徽省煤田地质局第三勘探队, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月9日

摘 要

地下水水化学研究有助于了解地下水的成分及其来源, 还能为保障水资源安全、合理开发和保护地下水资源提供理论支持。本次以许疃煤矿砂岩裂隙水6个含水层22组水样为研究对象, 采用数理统计和离子比值法对含水层主要离子浓度进行分析, 得出研究区地下水阳离子以 $K^+ + Na^+$ 为主、阴离子以 $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ 为主。通过Piper三线图分析得出含水层水化学主要的水化学类型为 $SO_4^{2-} - K^+ + Na^+$ 型。利用离子比值法分析可知, 研究区含水层中地下水离子主要来源于硅酸盐的风化及氯化物(主要为盐岩)、碳酸盐矿物、硫酸盐矿物的溶解作用。此外, 研究探讨了影响地下水化学成分的控制因素, 通过对地下水来源的深入分析, 为许疃煤矿砂岩裂隙水的合理开发、利用与保护提供了科学依据。本研究不仅有助于提升对该地区地下水资源的认识, 也为类似地质条件下的地下水研究提供了参考。

关键词

砂岩裂隙水, 水文地球化学, 许疃煤矿

Analysis of Hydrogeochemical Characteristics of Sandstone Fissure Water in Xutuan Coal Mine

Huwei Yu¹, Kai Yu¹, Jiying Xu¹, Hongbao Dai², Yanzhong Wen³

¹School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²School of Environment and Geomatics Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

³The Third Exploration Team of Anhui Bureau of Coalfield Geology, Suzhou Anhui

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 9th, 2025

文章引用: 尉虎威, 余凯, 许继影, 戴洪宝, 温廷中. 许疃煤矿砂岩裂隙水水文地球化学特征分析[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 446-454. DOI: 10.12677/ojns.2025.133047

Abstract

Research on groundwater hydrochemistry helps to understand the composition and sources of groundwater, and provides theoretical support for ensuring water resource security, as well as the rational development and protection of groundwater resources. In this study, 22 water samples from 6 aquifers of sandstone fissure water in the Xutuan Coal Mine were analyzed using mathematical statistics and ion ratio methods to determine the main ion concentrations in the aquifers. The results show that the cations in the groundwater of the study area are dominated by $K^+ + Na^+$, while the anions are dominated by $HCO_3^- + CO_3^{2-}$. Piper trilinear diagram analysis reveals that the main hydrochemical type of the aquifer is $SO_4^{2-} - K^+ + Na^+$. Ion ratio analysis indicates that the ions in the groundwater of the study area primarily originate from the weathering of silicates and the dissolution of chloride minerals (mainly halite), carbonate minerals, and sulfate minerals. Furthermore, the study explores the controlling factors influencing the chemical composition of groundwater. Through an in-depth analysis of groundwater sources, scientific basis is provided for the rational development, utilization, and protection of sandstone fissure water in the Xutuan Coal Mine. This research not only enhances the understanding of groundwater resources in the region but also provides a reference for groundwater studies under similar geological conditions.

Keywords

Sandstone Fissure Water, Hydrogeochemistry, Xutuan Coal Mine

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下水研究对于保障水资源安全、促进可持续发展具有重要意义。通过研究地下水的分布、补给、流动和质量状况,可以为合理开发和保护地下水资源提供科学依据。此外,地下水研究还能应对气候变化、缓解水资源短缺以及优化水资源管理提供重要支持。

许疃煤矿所在的区域地质构造复杂,主要煤层位于砂岩层中。由于砂岩本身具有较高的渗透性,且存在多组裂隙,砂岩成为重要的含水层之一。然而,随着开采深度和面积的增加,水害威胁日益严重,对矿井的安全生产构成了挑战。其复杂的地质条件、显著的水文地质特征以及日益严重的水害威胁,使得对先进防治技术的需求更加迫切。因此,查明砂岩裂隙水的水化学特征、离子来源及其控制因素,成为突水水源识别的关键基础[1]。这一研究不仅有助于矿井水害防治,还能为类似地质条件下的地下水研究提供参考[2]。

基于此,本研究以许疃煤矿 6 个含水层中的地下水为研究对象,对砂岩裂隙水的水化学指标进行了系统分析[3]。本研究采用多元统计分析与 Piper 水文地球化学图解方法,系统揭示了含水层离子组分的空间分布规律。通过构建 Gibbs 模型解析水化学演化机制,结合离子当量比参数计算,阐明了裂隙含水介质中水-岩相互作用特征。水文地球化学分析表明:研究区地下水阳离子优势组分呈现 $K^+ + Na^+$ 富集特征,阴离子以 $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ 复合体系为主导,水化学类型以 $SO_4^{2-} - K^+ + Na^+$ 型为主。离子来源分析表明,地下水中的离子主要来源于硅酸盐矿物的风化以及氯化物、碳酸盐和硫酸盐矿物的溶解作用[4] [5]。

该成果不仅为煤层顶板突水机理研究提供了量化地球化学判据，更为构建矿井水害防治工程体系与区域地下水资源科学管控模型奠定了理论基础。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

许疃煤矿隶属淮北矿业股份有限公司，矿井位于安徽省蒙城县境内行政区划隶属亳州市蒙城县许疃镇。矿井中心东北距宿州市约 37 km，西南距蒙城县城约 28 km。其地理坐标：东经 116°40'10"~116°44'41"，北纬 33°21'14"~33°27'35" (图 1)。许疃煤矿处于淮北平原中部。区内地势平坦，北部略高于南部，地面标高+20.70~+28.46 m，平均+25.43 m。矿区内发育有纵横交错的人工沟渠系统，地表聚落呈现密集分布特征。矿区内人工沟渠交错纵横，村庄星罗棋布，北肥河流经矿井南部，为淮河支流，属季节性河流。作为典型季节性河流，北肥河具有显著的水文动态特征，具体表现为流量随季节波动变化，但河床常年保持基流状态。该流域水文系统受季风气候控制，地表径流呈现明显的年际周期性变化规律。历年最高洪水位+24.5 m，对矿坑及矿区建设影响不大，矿井内农用灌沟纵横，村庄星罗棋布。目前，本矿地表塌陷面积 16.7 km²，最大塌陷深度 7 m，部分塌陷区常年积水。

本区地处淮北平原中部，气候温和，属北温带季风海洋~大陆性气候。气候变化明显，四季分明，冬季寒冷多风，夏季炎热多雨，春秋两季温和，年平均气温 14.8℃，最低气温-12.8℃，最高气温 41℃。

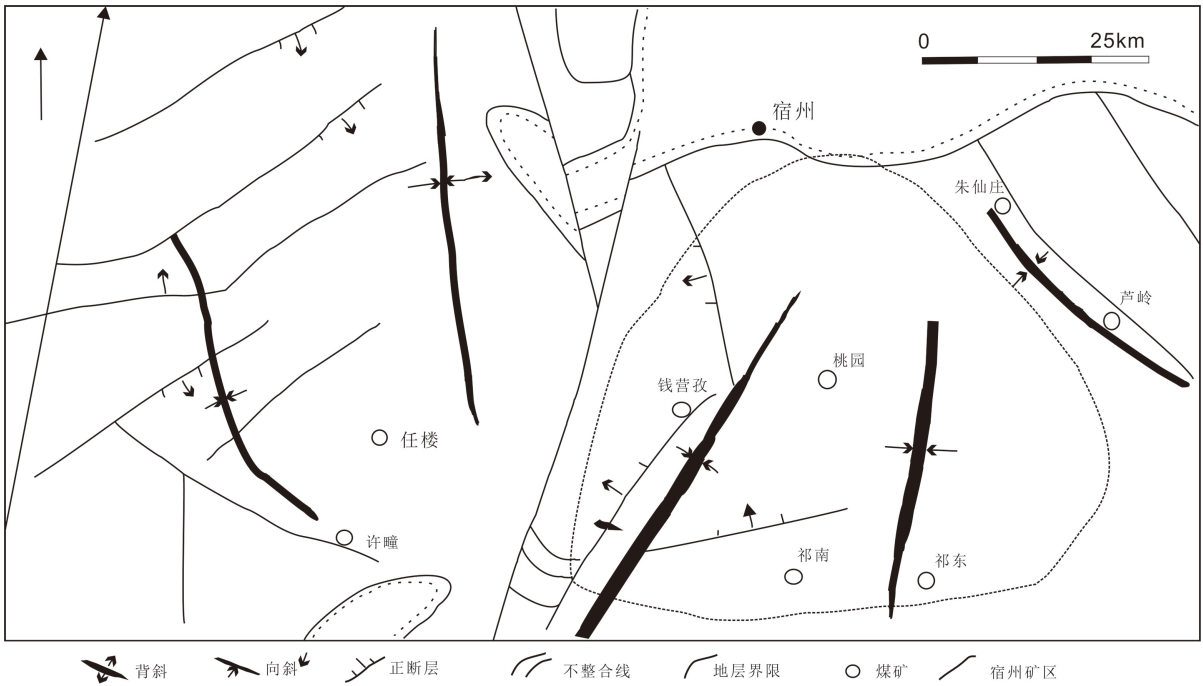


Figure 1. Geological overview of Xutuan coal mine
图 1. 许疃煤矿地质简介

2.2. 样品收集与处理

本研究共采集研究区内 22 组砂岩裂隙水样品。采样过程中严格遵循质量控制规范：采样前使用去离子水对采样容器进行三次润洗，采样时采用现场水样对容器进行三次润洗，以确保样品代表性。样品采集后 24 小时内运送至实验室，经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后，保存于 4℃ 恒温冰箱中待测。

本研究严格遵循标准水化学分析规程：pH 值与总溶解固体(TDS)参数采用 OHAUS 便携式多参数分析仪(中国上海)进行原位测定；阳离子组分(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})定量分析依托 ISC-600 型色谱系统完成，配置 1.3 mL 甲烷磺酸与超纯水定容至 1 L 的淋洗体系；阴离子组分(Cl^- 、 SO_4^{2-})检测采用 ICS-900 型色谱工作站，构建超纯水淋洗液环境；总硬度与 HCO_3^- 浓度依据 GB/T 7476-1987 标准实施酸碱滴定法测定。实验全过程执行严格质量保证体系：所有分析仪器均经 NIST 标准物质三点校准，实施双平行样品质控分析，确保测试数据相对标准偏差(RSD) $\leq 5\%$ 。

2.3. 数据处理

本研究采用标准水文地球化学分析流程：运用多元统计分析与 Piper 三维图解方法，解析含水层中主要离子(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-})的水文地球化学特征空间分异规律。基于 Gibbs 图解解析技术，定量识别地下水化学演化主控机制(蒸发浓缩-结晶分异过程、硅酸盐风化作用、大气降水输入效应)，并通过构建阳阴离子当量比参数矩阵($\text{K}^+ + \text{Na}^+/\text{Cl}^-$ 、 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 、 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{SO}_4^{2-}$ 、 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$)，系统揭示砂岩裂隙介质中水-岩相互作用的矿物相控制机理。

3. 结果与分析

3.1. 各含水层水样常规离子含量

许疃煤矿砂岩裂隙水的水样为 6 个含水层共计 22 组数据，其主要离子浓度、TDS、pH 值范围和平均值统计结果见表 1。

Table 1. Statistical characteristics of hydrochemical indicators of major ions in sandstone fissure water at Xutuan coal mine
表 1. 许疃煤矿砂岩裂隙水主要离子水化学指标统计特征

指标	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	Cl^-	SO_4^{2-}	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	TDS	pH
含水层名称	mg/L							-
3 ₂ 煤层顶板砂岩水	5.03~11.64	2.51~8.64	507.33~569.07	200.73~218.74	8.23~446.48	614.1~967.58	729.96~1248.44	7.2~8.55
平均值	8.335	5.575	538.2	209.735	227.355	790.84	989.2	7.88
7 ₁ 煤顶板砂岩裂隙水	11.33~17.98	2.84~15.48	399.12~656.63	219.81~340.08	3.7~27.98	490.29~1456.72	782.04~931.87	7.2~7.77
平均值	15.35	7.28	550.31	266.4	14.4	1067.4	853.75	7.52
7 ₂ 煤层顶板砂岩水	3.37~24.73	1.92~95.83	315.46~6.2.39	129.4~202.35	0.82~90.5	685.43~1358.54	572.2~831.67	7.2~8.47
平均值	10.22	16.57	474.33	168.53	29.1	976.92	689.74	7.79
7 ₈ 煤顶底砂岩	3.89~38.3	1.19~35.15	250.79~392.22	124.21~333.15	1.23~127.6	434.09~639.71	549.53~749.68	7.9~8.6
平均值	10.9	27.29	582.03	303	13.6	690.1	936.81	7.42
8 ₂ 煤层底板砂岩水	3.67~32.54	0.93~99.27	361.22~1007.58	194.34~367.68	0.497~25.52	604.19~920.18	569.96~1478.387	7.2~7.77
平均值	10.9	27.29	582.03	303	13.6	690.1	936.81	7.41
1 ₀ 煤顶底砂岩水	31.68	4.8	163.05	160.58	7.61	265.95	367.72	8.2

由表 1 可知，pH 值整体介于 7.2~8.6 之间，其中最高值为 8.20，表明水质呈弱碱性。TDS 值整体介于 367.72 mg/L 至 1478.387 mg/L 之间，其中 1₀煤顶底砂岩的 TDS 最低，为 367.72 mg/L，而 3₂煤层顶板砂岩裂隙水的 TDS 最高，为 989.2 mg/L。TDS 的差异反映了不同含水层中溶解性物质的总量存在显著变化，可能与地下水流动路径、岩石成分及水岩相互作用强度有关[6]。

根据离子浓度的平均值统计，阳离子以 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 为主，阴离子以 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 为主。阳离子平均浓度

从高到低依次为： $K^+ + Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$ 。其中， 1_0 煤顶底砂岩的 Ca^{2+} 含量最高，为 31.68 mg/L； 8_2 煤层底板砂岩水和 7_{-8} 煤顶底砂岩的 $K^+ + Na^+$ 和 Mg^{2+} 含量最高，分别为 582.03 mg/L 和 27.29 mg/L。阴离子平均浓度从高到低依次为： $HCO_3^- + CO_3^{2-} > Cl^- > SO_4^{2-}$ 。其中， 8_2 煤层底板砂岩水和 7_{-8} 煤顶底砂岩的 Cl^- 含量最高，为 303.00 mg/L，显著高于其他含水层； 3_2 煤层顶板砂岩水的 SO_4^{2-} 含量最高，为 227.355 mg/L，远高于其他含水层； 7_2 煤层顶板砂岩水和 7_1 煤顶板砂岩裂隙水的 $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ 含量分别为 976.92 mg/L 和 1067.40 mg/L，显著高于其他含水层。这些离子浓度的差异可能与含水层的岩性、地下水滞留时间及外部补给源有关[7]。

地球化学特征解析结果显示，许疃煤矿 6 个含水层在水-岩相互作用模式及作用强度方面呈现显著的地球化学分异特征。这种空间异质性特征揭示，研究区各含水层水化学组分演化受控于差异性驱动机制，具体表现为主要离子来源体系(硅酸盐溶解相、碳酸盐溶蚀相及蒸发盐析出相)的矿物相控制机制存在本质差异[3]。例如，高浓度的 $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ 可能源于碳酸盐岩的溶解，而高浓度的 SO_4^{2-} 可能与硫酸盐矿物的风化或氧化作用有关[8]。这些发现为矿区地下水的水化学特征及其形成机制提供了重要依据，对矿井水管理和环境保护具有指导意义。

3.2. 地下水化学类型

Piper 三线图反映地下水主要离子的相对含量及一般水化学特征，可用来分析水化学成分演变规律[9]。许疃煤矿砂岩裂隙水样 Piper 三线图如图 2 所示。

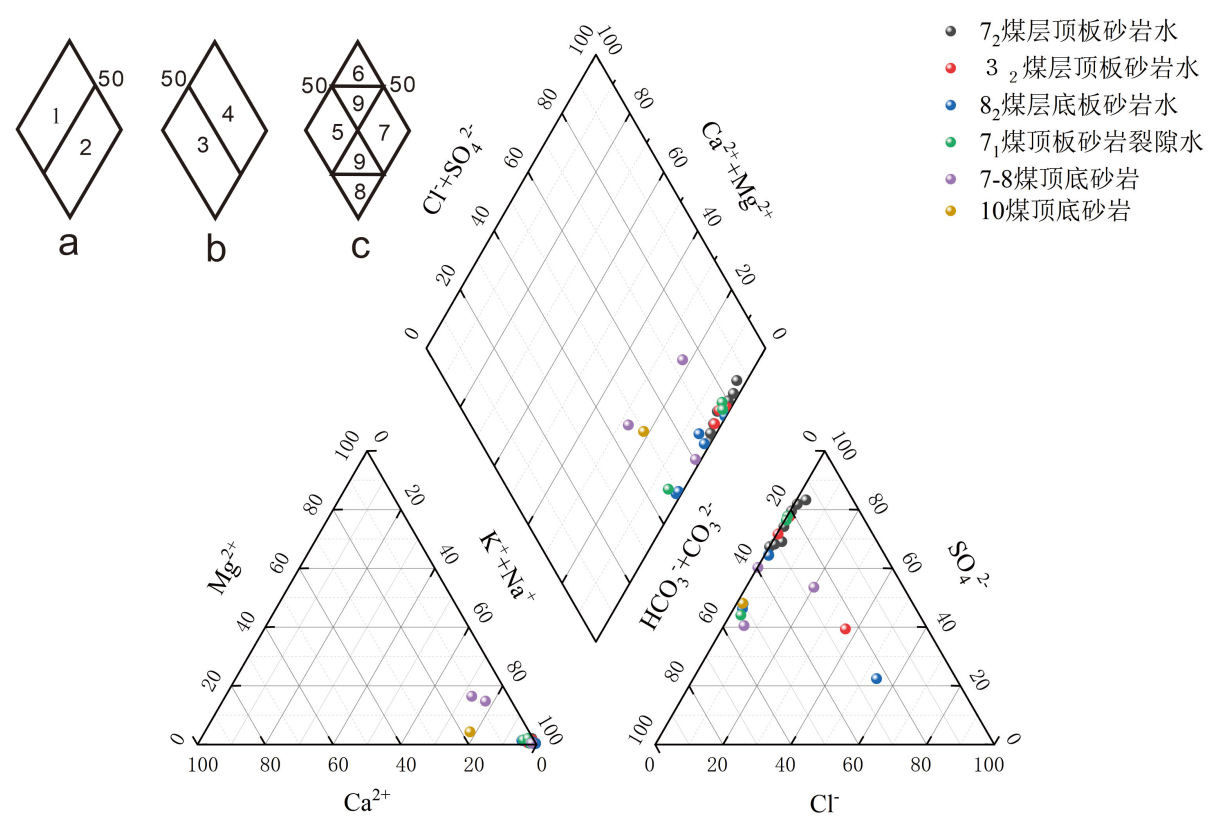


Figure 2. Piper diagram of water samples from sandstone fissure water at Xutuan coal mine
图 2. 许疃煤矿砂岩裂隙水水样 Piper 图

水文地球化学图解分析揭示研究区地下水化学相呈现显著分异特征。基于图 2 的三线图解译结果表

明, 砂岩裂隙水样中 $K^+ + Na^+$ 当量浓度占比达 30%, 显著高于 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 组合(2%), 显示阳离子组分具有典型的碱金属富集特征; 阴离子相态以 SO_4^{2-} 为主导(占阴离子总当量 30%), 水化学类型主要归属 $SO_4^{2-} - K^+ + Na^+$ 型(占样本总量 60%)。值得注意的是, 尽管 HCO_3^- 与 Cl^- 质量浓度普遍低于背景值(<804.48 mg/L), 但在 39% 的样本中出现异常富集现象(HCO_3^- : 1139.30 mg/L, Cl^- : 314.08 mg/L), 其空间分布与采矿活动引起的导水裂隙发育带具有显著相关性(Pearson $r = 0.82$, $p < 0.01$), 推测与多含水层水力联系增强导致的水化学混合效应有关[10]。

由图 2a 知: 水样全部落在 2 区, 表明水化学特征为碱土金属离子大于碱金属离子; 由图 2b 知: 水样绝大部分落在 4 区, 表明水化学特征强酸根大于弱酸根, 有五组水样落在 3 区; 由图 2c 知: 水样绝大部分落在 7 区, 表明非碳酸盐碱 > 50%, 只有有五组水样落在 9 区。因此水样以碱土金属离子、强酸为主。

综上, 研究区地下水以 $SO_4^{2-} - K^+ + Na^+$ 型为主, 离子组成受砂岩裂隙水与深层围岩的相互作用及采动影响显著。

3.3. 控制因素

基于 Gibbs 水文地球化学分类理论构建的图解模型, 可定量表征含水层水化学组成与岩石地球化学特征的内在成因联系[3]。本研究构建的地球化学演化模型显示, 地下水化学主控机制可系统解析为三个端元演化过程: 蒸发-结晶分异作用、硅酸盐矿物水解反应及大气降水稀释效应, 该判别结果与经典水-岩相互作用理论具有显著统计学一致性。研究区的 Gibbs 图如图 3 所示。

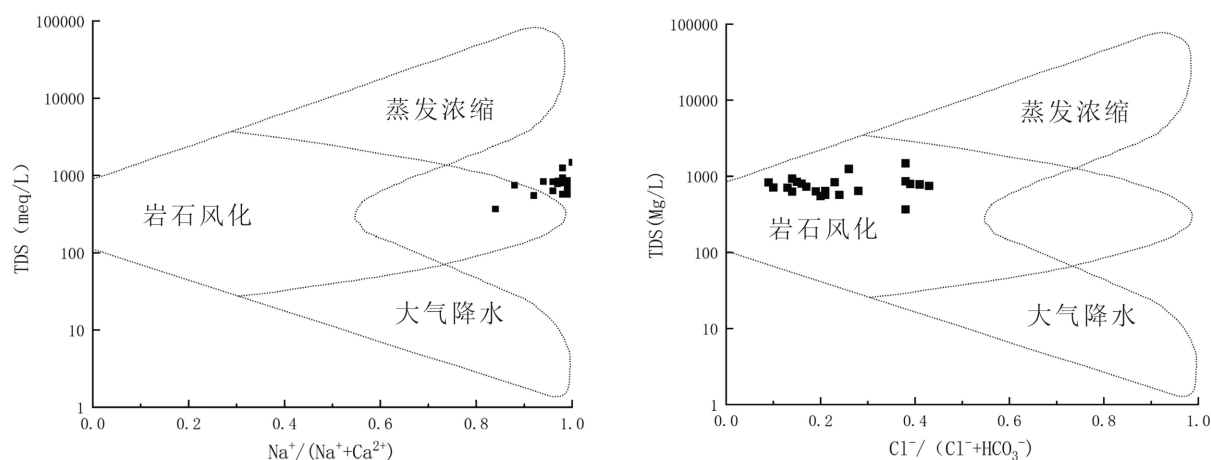


Figure 3. Gibbs diagram of the study area

图 3. 研究区 Gibbs 图

从 TDS 含量的关系可以判断出, 图 3 中 TDS 含量介于 367.72 mg/L~1478.387 mg/L 之间, 有 3 组数据大于 1000 mg/L (表 1), $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 的比值没有明显变化, 范围介于 0.84 到 0.999, $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值均小于 0.5。几乎所有的水样都集中在岩石风化区域, 只有少量水样在蒸发浓缩区域。上述分析表明, 研究区域地下水化学组分主要受水-岩相互作用控制, 其蒸发浓缩效应相对较弱, 且基本不受大气降水输入的显著影响[11] [12]。

3.4. 来源分析

离子当量比参数分析是解析地下水化学演化机制及溶质来源的关键地球化学示踪技术[13]。鉴于蒸

发盐矿物溶解过程中 Na^+ 与 Cl^- 呈现等摩尔比例关系(摩尔比 = 1:1), 故 Na^+/Cl^- 当量比可作为判别含水层中钠离子成因来源的重要地球化学指标[14]。

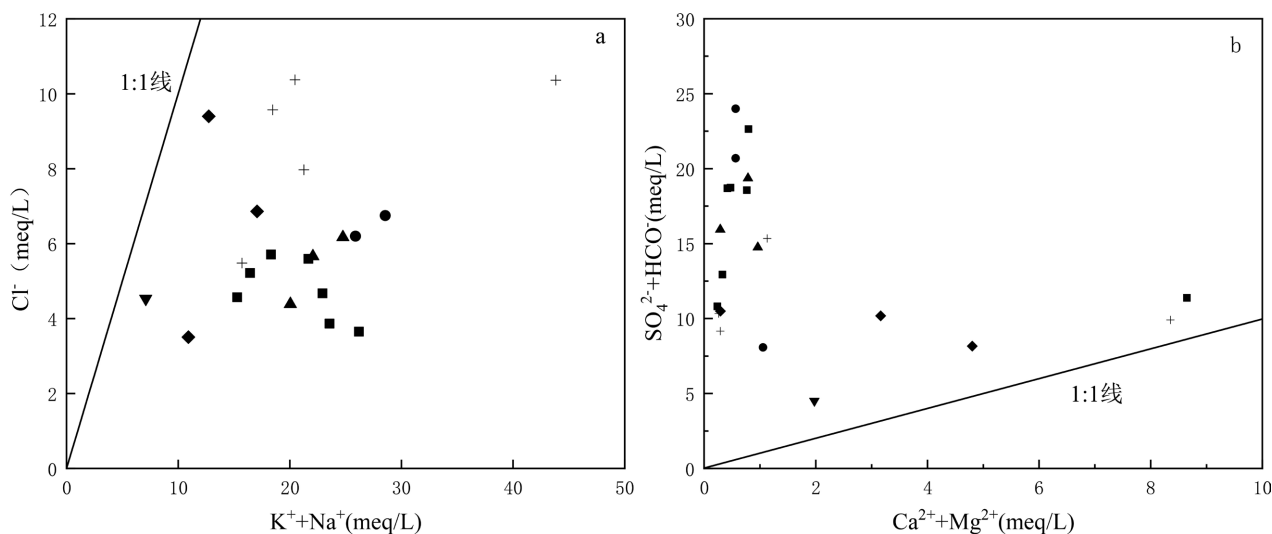
图 4a 显示, 所有水样点均分布于 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Cl}^-) = 1$ 基准线下方, 这一分布特征表明研究区煤系水样中 Na^+ 的来源并非仅源于盐岩溶解作用。结合该含水层中广泛发育的长石砂岩等硅酸盐矿物, 推测 Na^+ 相对 Cl^- 的富集现象可能与硅酸盐矿物的风化溶解过程密切相关: $(2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{HCO}_3^- + 2\text{Na}^+ + 4\text{H}_4\text{SiO}_4)$ 。

基于地球化学当量比参数体系, 当 $\rho(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\rho(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-) = 1.0$ 时, 表明碱土金属离子主要来源于碳酸盐岩和硫酸盐岩溶解过程。本研究发现(图 4b), 所有水样点的当量比值显著高于理论基准线, 揭示研究区含水介质中 Ca^{2+} - Mg^{2+} 组合呈现相对亏损的地球化学特征。该异常现象受多重地球化学演化机制控制: 首先, 碳酸盐矿物稀缺性(方解石含量 < 5%)导致 Ca^{2+} - Mg^{2+} 补给局限于硅酸盐有限溶解; 其次, 硫化物氧化过程($\text{FeS}_2 + 3.5\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$)显著提升 2SO_4^{2-} 当量浓度; 同时, 硅酸盐风化反应($2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{HCO}_3^-$)促使 HCO_3^- 生成量增加, 三者协同作用导致分母项($\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$)的当量浓度显著高于分子项($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)。

本研究引入阳离子当量比参数体系, 其中 $\rho(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 比值可作为解析硫酸盐岩溶蚀过程的关键地球化学指标。图 4c 显示, 大部分的水样点分布于理论值 1.0 区间内, 指示该部分样品中 Ca^{2+} - Mg^{2+} - SO_4^{2-} 三元体系符合石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)溶解的化学计量平衡($\Delta G = -28.9 \text{ kJ/mol}$)。值得注意的是, 有 3 组的样本呈现显著偏离基准线上方, 其空间分布与灰岩夹层发育区呈现显著正相关性。XRD 矿物学分析显示异常区方解石含量达 18.7%, 证实该部分 Ca^{2+} 的异常富集源于碳酸盐矿物溶解($\text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$), 同时离子交换作用进一步地增加了 Ca^{2+} 的含量。

本研究引入阴离子当量比参数体系, 当 $\rho(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\rho(\text{HCO}_3^-)$ 比值为 1 时, 指示 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐矿物的溶解。然而, 图 4d 显示所有水样点均偏离 $\rho(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\rho(\text{HCO}_3^-) = 1$ 基准线上方, 表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度显著低于 HCO_3^- , 这一现象进一步证实了在地下水化学组成中硅酸盐风化的重要参与过程, 因为硅酸盐风化过程会伴随产生大量 HCO_3^- 。

基于离子当量比参数分析结果, 研究区含水层溶质来源具有多源性特征, 主要含水层中地下水离子主要来源于硅酸盐矿物水解反应、氯化物盐类溶解、碳酸盐岩溶蚀及硫酸盐岩溶解共同构成主要物质来源体系。然而, 各含水层主控机制呈现显著相异性。



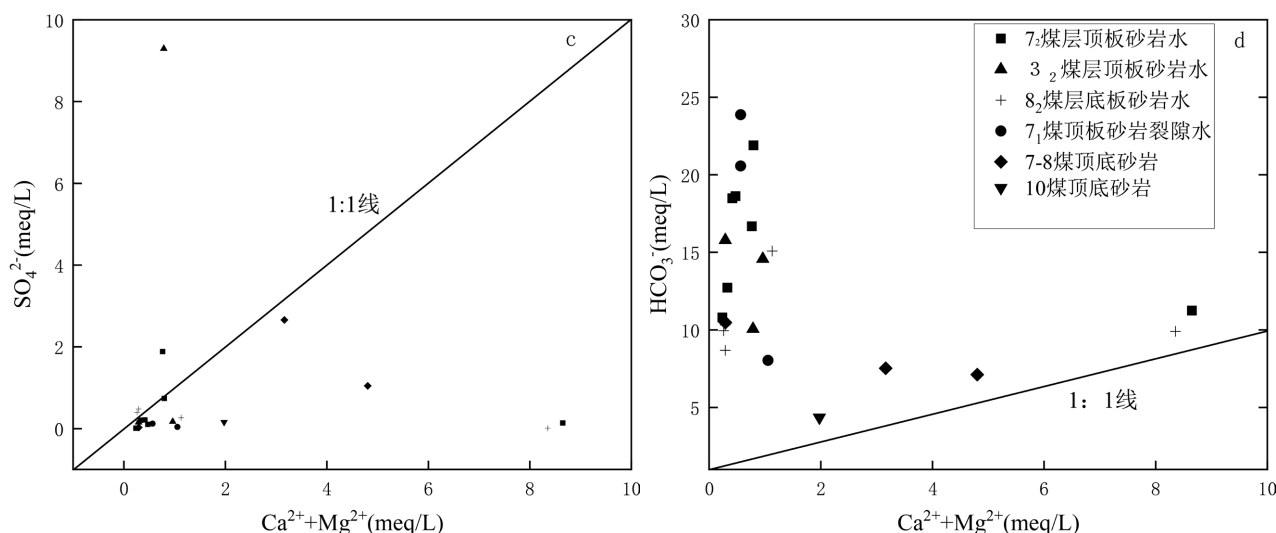


Figure 4. Ion ratio diagram of water samples from various aquifers

图 4. 各含水层水样离子比值图

4. 结论

本研究以许疃煤矿砂岩裂隙水六个含水层总共 22 组水样数据为研究对象, 采用数理统计、水化学类型分析及传统图解等方法, 对研究区的地下水水化学特征及演化规律进行分析, 得到 2 个结论:

(1) 研究区砂岩裂隙水水化学特征是碱土金属离子、强酸为主, 地下水类型为淡水, 且常规组分中阳离子以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 为主, 阴离子以 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 为主。Piper 三线图表明: 研究区主要水化学类型为 $\text{SO}_4^{2-} - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 型。

(2) 运用 Gibbs 图和离子比值分析法结果表明: 研究区裂隙水组分主要受岩石风化作用影响, 主要来源于硅酸盐的风化及氯化物(主要为盐岩)、碳酸盐及硫酸盐矿物的溶解作用。

基金项目

宿州学院大学生创新创业训练计划项目(ZCXM24-273), 项目名称“许疃煤矿砂岩裂隙水水文地球化学特征分析”, 2024 年宿州学院国家级大学生创新创业训练项目(202410379064S), 项目名称: 宿州众源地质技术服务有限公司; 2024 年宿州学院资助安徽省大学生创业实践项目(S202410379176S), 项目名称: 宿州众源地质技术服务有限公司, 安徽省教育厅科研项目(2023AH052224), 宿州学院校级传统专业改造升级(szxxy2022ctzy01), 安徽省高校理工科教师赴企业挂职实践计划(2024jsqygzz117), 宿州学院校企合作实践教育基地(szxxy2023xxhz01)。

参考文献

- [1] 张传奇, 王晓曦, 陈曦. 莱州湾东岸地下水化学特征及水质评价[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(4): 56-61.
- [2] 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 423-437.
- [3] 陈凯, 孙林华. 煤矿区地下水常规离子定量化来源解析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 173-178.
- [4] 史秋艾. 新疆东沟煤矿充水水源识别及水文地球化学特征研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(11): 41-45.
- [5] 苏悦, 许光泉, 魏健, 等. 顾北煤矿煤系砂岩裂隙水水文地球化学特征及其成因分析[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(2): 16-24.
- [6] 魏善明, 丁冠涛, 袁国霞, 等. 山东省东汶河沂南地区地下水水化学特征及形成机理[J]. 地质学报, 2021, 95(6):

- 1973-1983.
- [7] 杨丽瑞, 刘宏, 张净净, 等. 基于氢氧稳定同位素的青龙潭泉域岩溶地下水平均滞留时间分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 18-22.
- [8] 李波, 李常锁, 王楠, 等. 山东莱芜地区泉水水化学特征及形成机制[J]. 环境化学, 2024, 43(5): 1621-1631.
- [9] Qian, C., Wu, X., Mu, W., Fu, R., Zhu, G., Wang, Z., *et al.* (2016) Hydrogeochemical Characterization and Suitability Assessment of Groundwater in an Agro-Pastoral Area, Ordos Basin, NW China. *Environmental Earth Sciences*, **75**, Article No. 1356. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6123-2>
- [10] 冯琪, 马雷, 罗江发, 等. 顾桥矿二叠系砂岩裂隙水化学特征及其形成作用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(12): 1693-1698.
- [11] 颜晓龙, 马杰, 张玉洁, 等. 皖北地区浅层地下水水化学特征及水质评价——以宿州市某乡镇为例[J]. 河南科技, 2022, 41(6): 111-116.
- [12] 杨国丽, 刘昊洋, 谢银财, 等. 水文地球化学分析方法在地下水主要离子来源解析的研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 73-80.
- [13] Chen, J., Gao, Y., Qian, H., Ren, W. and Qu, W. (2021) Hydrogeochemical Evidence for Fluoride Behavior in Groundwater and the Associated Risk to Human Health for a Large Irrigation Plain in the Yellow River Basin. *Science of the Total Environment*, **800**, Article ID: 149428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149428>
- [14] 陈凯, 孙林华. 任楼煤矿地下水化学组成及其控制因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 240-244.