

青东煤矿太原组灰岩水水文地球化学特征

刘旭¹, 戴洪宝², 温廷中³, 许继影¹, 余凯¹

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8日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

为了深入了解掌握淮北青东煤矿太原组灰岩水的水化学组成及其控制因素, 本文收集了青东煤矿太原组灰岩水20个水样数据, 采用统计分析, Piper三线图, Gibbs图, 离子分析法, 综合分析了研究区域的水化学特征及其水岩作用。结果表明, 太原组水样水体中阳离子主要为钠离子和钙离子, 阴离子主要为硫酸根离子和氯离子, 水体为弱碱性淡咸水。Piper三线图表明, 水化学类型主要为Ca·Na + K·SO₄·Cl型。离子分析法和Gibbs图表明研究地区离子来源与岩盐溶解、硫酸盐岩溶解、碳酸盐岩溶解、硅酸盐岩风化等作用有关, 蒸发浓缩作用对研究地区影响最为显著。研究结果对矿井合理开采等工作提供指导。

关键词

灰岩水, 水化学, 青东煤矿, 水化学特征

Hydrogeochemical Characteristics of Limestone Water in Taiyuan Formation of Qingdong Coal Mine

Xu Liu¹, Hongbao Dai², Tingzhong Wen³, Jiyong Xu¹, Kai Yu¹

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 8th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

In order to deeply understand and master the hydrochemical composition and its controlling factors of the limestone water in the Taiyuan Formation of Qingdong Coal Mine in Huaibei, this paper

文章引用: 刘旭, 戴洪宝, 温廷中, 许继影, 余凯. 青东煤矿太原组灰岩水水文地球化学特征[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 546-553. DOI: 10.12677/ojns.2025.133058

collected data from 20 water samples of the limestone water in the Taiyuan Formation of Qingdong Coal Mine. Through statistical analysis, Piper trilinear diagrams, Gibbs diagrams, and ion analysis methods, the hydrochemical characteristics and water-rock interactions in the study area were comprehensively analyzed. The results show that the main cations in the water samples of the Taiyuan Formation are sodium ions and calcium ions, and the main anions are sulfate ions and chloride ions. The water body is weakly alkaline brackish water. The Piper trilinear diagram indicates that the hydrochemical type is mainly Ca·Na + K-SO₄-Cl type. The ion analysis method and Gibbs diagram show that the ion sources in the study area are related to processes, such as rock salt dissolution, sulfate rock dissolution, carbonate rock dissolution, and silicate rock weathering. The evaporation and concentration effect has the most significant impact on the study area. The research results provide guidance for the rational mining of the mine and other work.

Keywords

Karst Water, Hydrogeochemistry, Qingdong Coal Mine, Hydrogeochemical Characteristics

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

煤矿水的化学成分是不同水体在不同尺度的循环过程中与周围环境(气候、水文、地形、岩石、人类活动等)长期相互作用的结果[1]。近年来,煤炭资源急剧枯竭,导致煤矿开采深度也随之增加,而突水作为煤矿5大灾害(水害、火灾、瓦斯、粉尘、顶板)之一,给矿井安全生产带来严重影响[2][3]。煤矿水主要来源于矿井在掘进和生产过程中遇到的各种地下水,这些水体不仅含有大量的悬浮物,还可能携带重金属、酸性物质等污染物,对周边生态环境构成潜在威胁。通过对煤矿水化学特征和水质状况系统研究,有利于掌握地下水水化学特征与水资源可再生能力,以便科学有效地管理和利用地下水资源,进而保护和改善地下水水质[4]。通过科学合理的治理措施,煤矿水不仅可以得到有效净化,还能转化为宝贵的水资源,用于工业生产、农业灌溉乃至生活用水,实现资源的循环利用。

国内水化学研究近年来取得了显著进展,特别是在地下水水质评价污染防治等方面。特别是在微污染源水源水的化学生物预处理技术方面取得了不少成果,国内的水化学研究不仅注重理论探讨,还非常重视理论与实践的结合,许多研究成果已经被应用于实际的水资源管理和环境保护工作中。

目前,关于地下水水质评价方法的研究多采用单因子指数法、模糊综合评价法、改进灰色关联法、内梅罗综合指数法和水质生物综合评价法等[5][6],原升艳[7]等研究了广州市浅层地下水水化学特征锰氮硝酸盐,pH值是导致该地区地下水水质评价结果较差的主要影响因素,地下水水化学类型主要为Ca²⁺·Na⁺·HCO₃⁻、Ca²⁺·HCO₃⁻、Ca²⁺·Mg²⁺·HCO₃⁻、Ca²⁺·Na⁺·HCO₃⁻·Cl⁻4种类型。冯琪[8]等研究顾桥矿二叠系砂岩裂隙水化学特征及其形成作用,表明Na⁺+K⁺与Cl⁻有较高的来源相关性,Ca²⁺与Mg²⁺呈较高的相关性水样中Na⁺主要来源于岩盐和其他钠盐的溶解,Cl⁻主要来源于岩盐的溶解。闵宁[9]等对宿州市城区地下水化学成分进行研究,得出宿州市城区地下水主要受控于碳酸盐、硅酸盐溶解风化,同时蒸发浓缩也起到重要作用。对于研究地下水循环、水质评估以及生态环境具有重要意义。

本文研究通过对淮北煤田青东煤矿太原组灰岩水的水化学分析,采用多种图解和统计分析方法,研究该地区水化学组分特征和形成作用及控制因素。为青东煤矿灰岩水水源的判别提供更可靠的依据,为煤矿区水害防治、安全开采及水资源利用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

如图 1 所示, 淮北煤田青东煤矿位于安徽省淮北市濉溪县西南部, 青东煤矿东边与海孜煤矿和临涣煤矿相邻, 西止 F9 断层, 南以石炭系太原组顶界灰岩露头线为界, 隔袁店深部勘查区与袁店一、二矿相望, 北至 F19 断层和 3-2 煤层-1200 m 水平投影线, 隔青东深部预查区与崔楼煤矿和百善矿相望, 地貌区内地势较为平坦, 海拔标高+27.62~+31.37 m, 一般+29 m 左右, 略呈西高东低之势。区内有 135 个钻孔揭露本组上部, 揭露最大厚度 60.96 m (9 西 4 孔), 为灰~深灰色泥晶生物碎屑灰岩 4 层夹深灰色泥岩及薄层细砂岩。岩一般厚 2~3 m, 顶部泥质含量较高, 为区域性标志层之一。水文区内无大型地表水体, 主要河流为人工开挖的界洪新河, 它经本矿西北部由西南流向东北, 经青疃镇注入包河。区域属季风暖温带半湿润气候, 春秋季多东北风, 夏季多东~东南风, 冬季多北~西北风。平均风速为 3 m/s, 最大风速可达 18 m/s。年平均气温 14.6℃, 最高气温 41.1℃, 最低气温-21.3℃。年平均降水量为 811.8 mm, 雨量多集中在七、八两个月。据邻区临涣煤矿资料, 本组地层厚 120.30 m, 含灰岩 9~12 层, 中下部的灰岩之间发育薄煤 6 层, 一般均不可采。

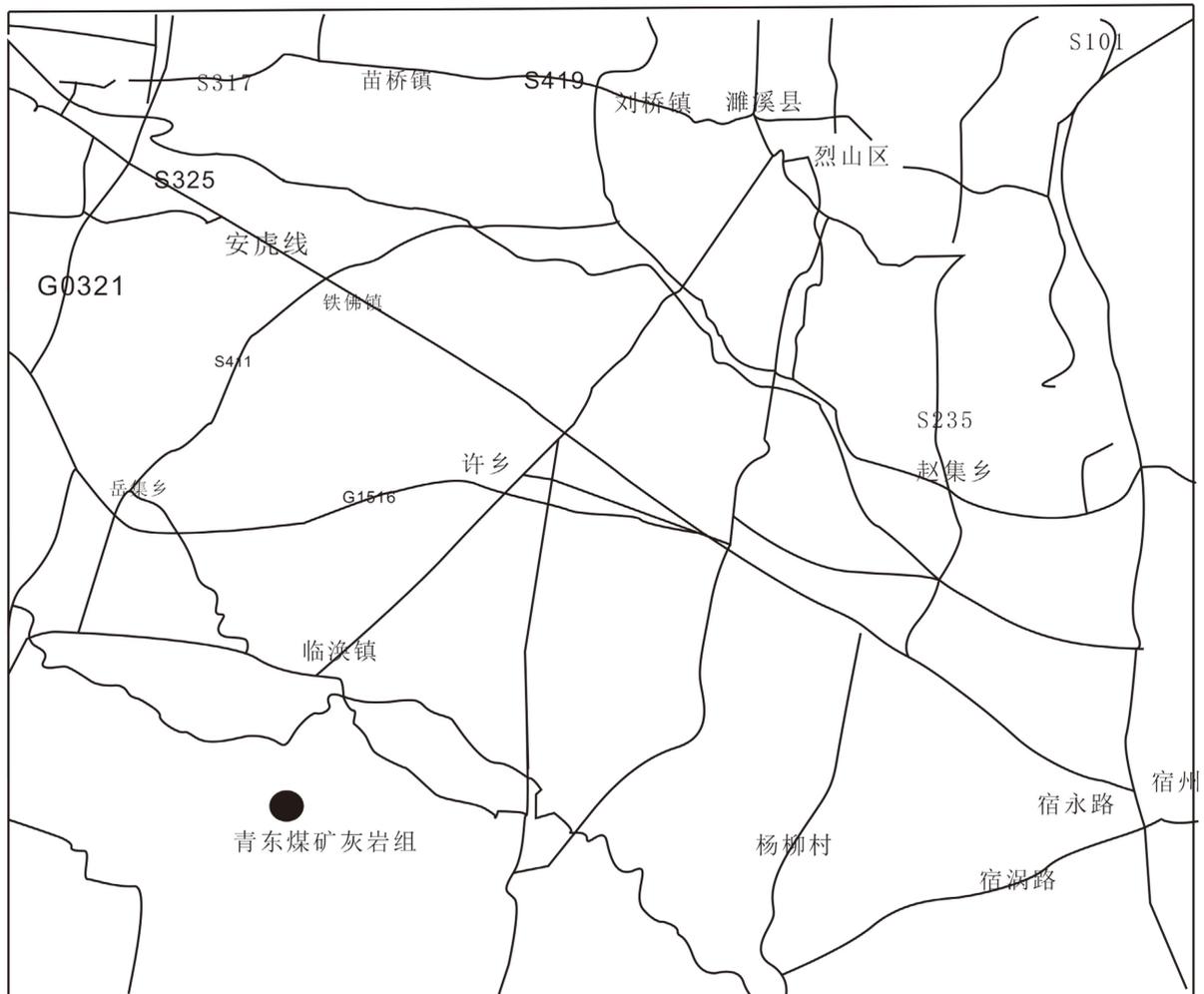


Figure 1. Traffic location map
图 1. 交通位置图

2.2. 采样及与处理

本文采集青东煤矿太原组灰岩水水样 20 个, 水样取自于青东煤矿井下机巷及风巷灰岩含水层疏放水钻孔, 为矿井取样, 包括物理性质, PH 值, 总硬度, 测 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等离子浓度指标等。采取水样, 当场使用便携仪器测量 pH 值和 TDS 值, 样品采集后, 于 24 h 内送至实验室, 利用实验室仪器具体测出各离子浓度。 HCO_3^- 则采用酸碱指示剂滴定法测定[10]。本文采用数理统计和 Piper 三线图分析含水层主要离子的水化学特征, 利用 Gibbs 图解法、离子比值法分析影响因素。

采集样品前, 我们用去采样点的水对采样桶进行了三次清洗, 采样时也用待采的水样对桶进行了三次冲洗, 记录温度、pH、Eh 等现场参数, 样品采集完毕并密封后, 贴好标签, 确保在 24 小时内将它们送至安徽省煤田地质局第三勘探队进行测试。

3. 结果与讨论

3.1. 化学特征分析

对研究区域内灰岩水水样的常规离子、pH 值和 TDS 值进行统计分析, 结果见表 1 所列。

Table 1. Statistical analysis of Qingdong coal mine
表 1. 青东煤矿统计分析

统计项目	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS	pH
				mg/l				-
最大	566.04	553.18	192.99	282.98	2063.76	320.96	3644.73	9.17
最小	0.42	0.41	0.35	0.32	0.37	0.12	557.88	7.13
平均值	289.73	265.58	107.06	165.57	1151.19	209.61	2601.47	7.93
标准差	180.2	170.6	66.38	102.05	684.97	105.95	777.61	0.43
变异系数	0.62	0.64	0.62	0.62	0.6	0.51	0.30	0.06

青东煤矿太原组灰岩水水化学参数的统计特征值见表 1。水样中 pH 值最大 9.17, 最小 7.13, 平均在 7.93, 水体为弱碱性。图中 TDS 值 557.88~3644.73 mg/l, 平均在 2601.47 mg/l, TDS 值较大, 水体质量差, 为淡咸水。水体中阳离子浓度由大到小依次为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, 平均浓度分别是 339.98、301.94、120.31 mg/l。水体中阴离子浓度由大到小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$, 平均浓度分别是 1377.93 mg/l、261.23 mg/l、207.43 mg/l。根据上述比较可知, 研究该地区水体阳离子主要是 Na^+ 、 Ca^{2+} 离子。阴离子主要是 SO_4^{2-} 、 Cl^- 离子。此外, 从表 1 可以看出各离子变异系数都较小(小于 1), 说明该地区灰岩水中各离子含量都相对处于稳定状态, 外部因素对该地区影响较小, 不容易变化。基于水化学特征分析, 研究区太原组灰岩水呈现典型的 $\text{Na}\text{-Ca}\text{-SO}_4\text{-Cl}$ 型水化学类型。高浓度 SO_4^{2-} (占比达 74.6%) 可能源自石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 溶解及硫化矿物氧化作用, 而 Na^+ 的富集则与硅酸盐岩风化及阳离子交替吸附作用密切相关。TDS 值空间分布显示矿区西北部明显高于东南部, 可能与含水层径流条件差异导致的溶滤强度不同有关。稳定的水化学环境(变异系数 $\text{CV} < 0.3$) 揭示该含水系统处于相对封闭的水动力条件, 水-岩相互作用主导离子组成。这种高矿化度特征对煤矿井巷工程具有潜在腐蚀风险, 需在防治水设计中重点考虑。

3.2. 水质作用

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的演变规律

[11]。将 Piper 三线图的菱形分成 9 个区域，落在菱形不同区域的水样具有不同的化学特征。太原组灰岩水水样 Piper 三线图如图 2 所示。太原组灰岩水阳离子浓度主要是 Ca^{2+} 、 $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ 离子，主要分布在 1 号区域，碱金属离子大于碱土金属离子。阴离子浓度主要是 SO_4^{2-} ，主要分布在 4 号区域，占绝对优势且强酸根大于弱酸根。阴阳离子大多集中在 $\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} ，主要分布在 6 号区域，该区域非碳酸盐类硬度 $> 50\%$ 。主要化学类型是 $\text{Ca}\cdot\text{Na} + \text{K}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型，且该地区 pH 偏中性，所以化学成分较为稳定。太原组灰岩水 Piper 三线图分析表明，水化学组分具有显著的硫酸盐 - 氯化物复合特征。阳离子以 Ca^{2+} (均值占比 48%) 和 $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ (均值 42%) 为主，1 号区域的分布揭示钠、钾富集可能源于蒸发盐岩溶解或硅酸盐风化作用。阴离子中 SO_4^{2-} 占比高达 62%~85%，4 号区域的强酸根优势暗示石膏($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)溶解或硫化矿物氧化过程的影响。菱形区 6 号域的集中分布(非碳酸盐硬度占比 $> 70\%$)进一步印证了水化学受控于硫酸盐 - 氯化物型溶滤作用。这种 $\text{Ca}\cdot\text{Na} + \text{K}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型水质的形成，可能与灰岩层中夹层的蒸发岩矿物(如硬石膏)及深层滞流条件下硫化物氧化有关，同时反映了半封闭水文地质环境中溶质迁移 - 积累的长期效应。

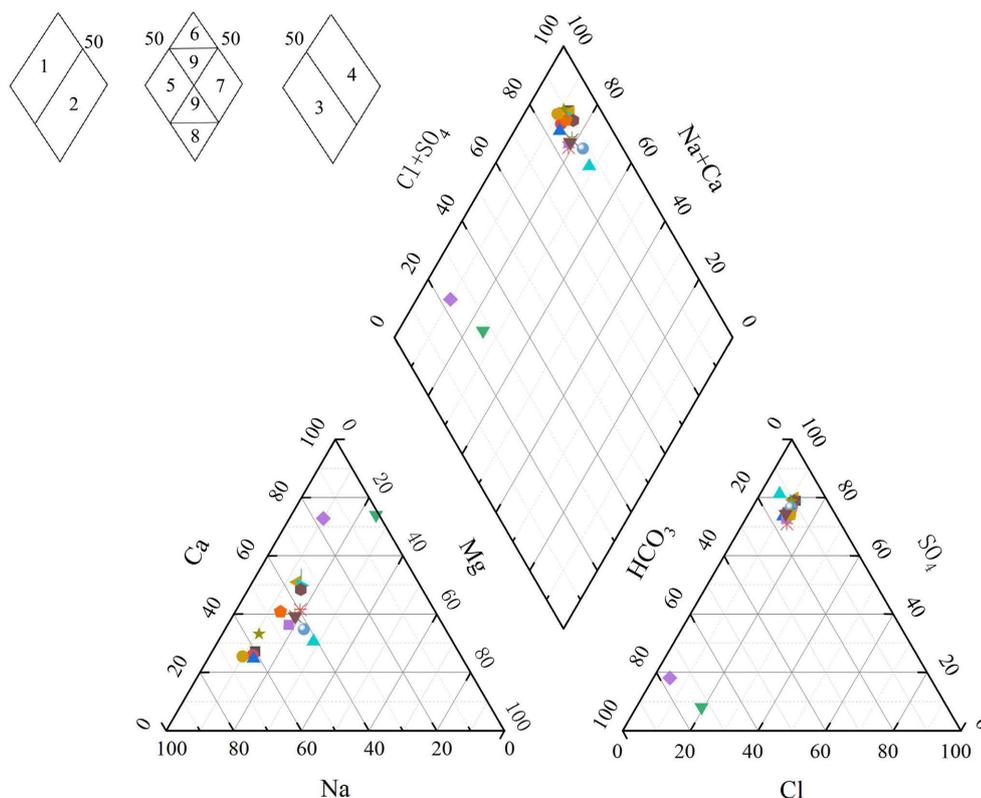


Figure 2. Piper diagram of a sandstone fissure water sample
图 2. 元素的空间分布特征

Gibbs 图可以确定控制水化学的主要机制，用于研究水化学组成与气候或地质特性之间的关系。Gibbs 在建立 TDS 与 $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$ 基础上依据世界湖泊、河流及主要海水常规组分含量分析将溶质来源的自然控制因素划分为三类，控制水化学的机制可分为以下 3 个区域：蒸发、大气降水和岩石风化。[12]可以直观看出不同因素对水化学的控制因素。太原组灰岩水 Gibbs 图，如图 3 所示。该地区灰岩水 TDS 含量在 557.88~3644.73 mg/l， $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$ 的范围在 0.01~0.72， $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$ 的范围在 0.06~0.54。采样点都集中在 Gibbs 图上部分，分布在蒸发浓缩区域内。表明蒸发浓缩是影响灰岩

水化学组分的主要因素。太原组灰岩水 Gibbs 图分析显示,所有采样点的 TDS 值与阳离子比值($\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$)及阴离子比值($\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$)均呈现显著正相关性,且集中分布于右上方蒸发浓缩区域。TDS 值跨度达 6.5 倍(557.88~3644.73 mg/L),表明地下水中溶解盐类经历了不同程度的蒸发富集过程。值得注意的是, Na^+ 占比最高达 72% (0.72), Cl^- 占比达 54% (0.54),暗示在蒸发浓缩主导作用下,易溶盐类(如 NaCl)优先富集。这种水化学特征可能与本区半干旱气候条件下强烈的蒸腾作用相关,同时灰岩裂隙系统中地下水径流滞缓的环境为盐分累积提供了有利条件。

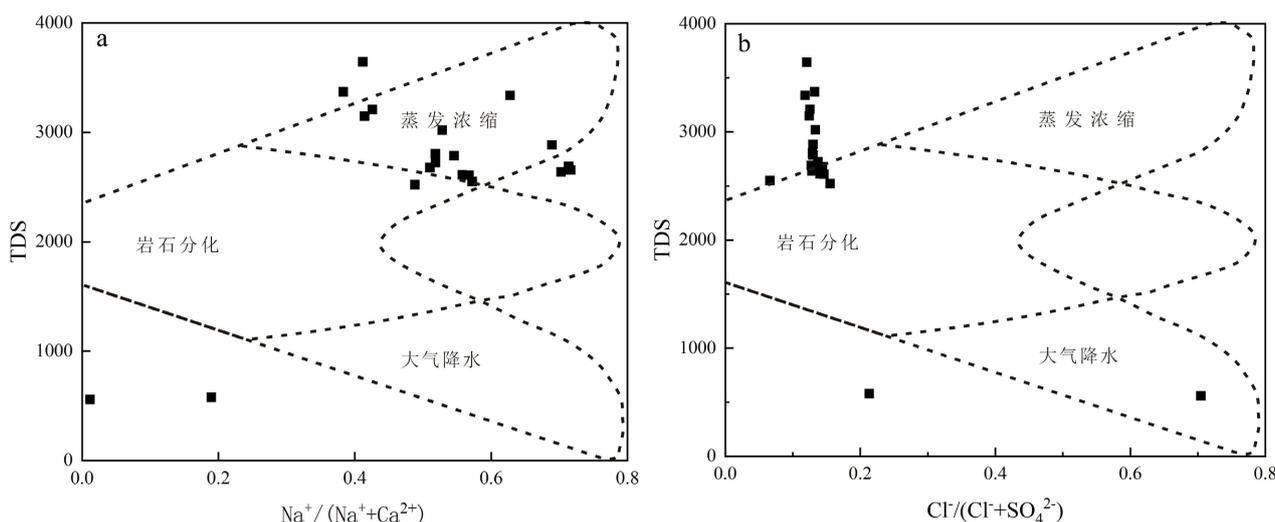


Figure 3. Gibbs diagram of limestone water

图 3. 灰岩水 Gibbs 图

3.3. 水岩机理作用

离子比值分析用于对地方水中离子的化学组成和离子浓度的分析。通过地下水各指标含量的比值关系,可以研究某些水文地球化学问题[13]。太原组灰岩水离子分析图,如图 4 所示。

Na^+/Cl^- 比例常用来揭示地下水中 Na^+ 的来源。表明存在特定的岩石矿物成分、离子交换作用或局部蒸发浓缩。图 4a 是 Na^+ 与 Cl^- 主要来源于岩盐的溶解。 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 的比值在 1:1 线以下,表明 Na^+ 不仅来源于岩盐的溶解,还存在其他来源,如钠盐的溶解,或者该含水层中发生阳离子交替吸附作用, Na^+ 可能被优先释放到水中,而 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 可能被吸附到矿物表面。这种交换作用可能导致水中 Na^+ 浓度高于 Cl^- 。局部蒸发也可能导致 Na^+ 和 Cl^- 的浓缩。然而,由于 Na^+ 和 Cl^- 的溶解度不同, Cl^- 可能更容易被吸附或沉淀,导致 Na^+ 浓度相对较高。因而 Na^+ 含量大于 Cl^- 。

Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 的离子比值表明存在硫酸盐矿物的溶解、人为污染、特定的水文地质条件或天然矿化作用。图 4b 是 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 的离子比值图,煤系水样中 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 主要来源于硫酸盐的溶解, $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 的比值在 1:1 线以上, SO_4^{2-} 的含量明显大于 Mg^{2+} 的含量,说明灰岩中含有硫化物矿物,地下水在流动过程中经过富含硫酸盐矿物的地质层,这些矿物在氧化过程中会产生硫酸,进一步增加水中的 SO_4^{2-} 浓度。较长的流动路径和较长的停留时间都会增加矿物溶解的机会。

灰岩水中, Ca^{2+} 离子和 HCO_3^- 离子是常见的离子。 Ca^{2+} 的含量大于 HCO_3^- 的含量,说明 Ca^{2+} 还来源于其他含 Ca^{2+} 矿物的溶解灰岩的主要成分是碳酸钙,其溶解过程会产生等摩尔的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 。图 4c 是 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 的 1:1 离子图, $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 的比值大度,而不相应地增加 HCO_3^- 的浓度。

在地质学中,灰岩水钙离子含量通常比镁离子含量高。

图 4d 所示 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 的 1:1 离子图, $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})$ 的比值大于 1, Ca^{2+} 的含量大于 Mg^{2+} 的含量, 灰岩主要是由方解石组成的岩石, 说明方解石主要由钙组成, 而镁则较少出现在这种矿物中。当灰岩与水接触时, 水可以溶解岩石中的矿物质, 导致水中的 Ca^{2+} 浓度高于 Mg^{2+} 。

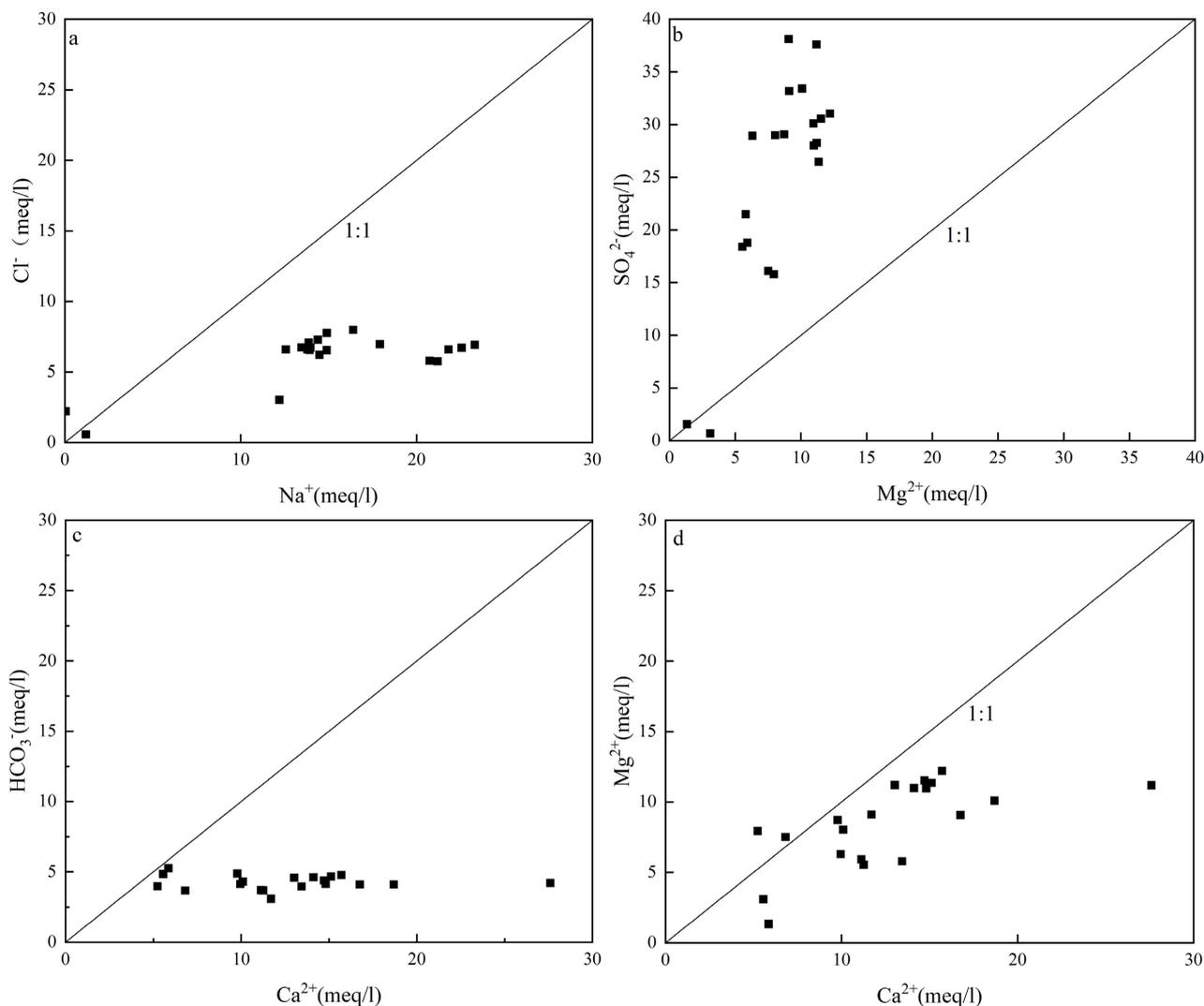


Figure 4. Ion analysis diagram of limestone water

图 4. 灰岩水离子分析图

4. 结论

根据青东煤矿太原组灰岩水采集的数据, 对矿井水的水化学特征进行分析, 利用统计分析、Piper 图、Gibbs 图和离子分析图进行分析, 得出以下结论。

(1) 通过统计分析结果表明, 阳离子主要是钠离子和钙离子, 阴离子主要是硫酸根离子和氯离子, 水体为弱碱水, 且为淡咸水。水体主要化学类型是 $Ca \cdot Na + K \cdot SO_4 \cdot Cl$ 型。

(2) 通过吉布斯函数, 表明蒸发浓缩是影响灰岩水化学组分的主要因素。过离子比值分析, 表明煤系水样中镁与硫酸根离子主要来源于硫酸盐的溶解, 钠和氯来自钠盐的溶解及其岩盐的溶解, 以及蒸发浓缩的影响。钙主要来源于碳酸盐和其他含钙矿物的溶解。

基金项目

宿州学院大学生创新创业计划项目(ZCXM24-252), 项目名称“青东煤矿太原组岩溶水的水文地球化学分析”, 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(szxy2022ctzy01), 安徽省高校理工科教师赴企业挂职实践计划(2024jsqygz117), 宿州学院校企合作实践教育基地(szxy2023xxhz01), 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”。

参考文献

- [1] 汪名鹏. 江苏泗阳城区浅层地下水化学特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2014, 28(6): 1329-1336.
- [2] 武强, 赵苏启, 孙文洁, 等. 中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 901-905.
- [3] Sun, L. (2017) Statistical Analysis of Groundwater Chemistry in Coal Mine and Its Hydrological Implications. *Journal of Applied Science and Engineering*, **20**, 335-344.
- [4] 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.
- [5] 庞园, 曾慧, 张明珠, 等. 流溪河流域地下水三氮分布特征及影响因素分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(12): 17-23.
- [6] 周中枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2675-2685.
- [7] 原升艳, 朱爱萍, 曾红平, 等. 广州市浅层地下水水化学特征及水质评价[J]. 人民珠江, 2022, 43(11): 51-59.
- [8] 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]. 合肥工业大学报(自然科学版), 2022, 45(12): 1693-1698.
- [9] 闵宁, 任瑾, 林曼利. 淮北平原区城市浅层地下水化学特征及成因分析——以宿州市为例[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2018, 33(1): 14-17.
- [10] 周宁生. 第二次“水和废水监测分析方法”协作组扩大会议在南京召开[J]. 中国环境监测, 1986(2): 65.
- [11] 胡春华, 周文斌, 夏思奇. 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1620-1626.
- [12] Gibbs, R.J. (1970) Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, **170**, 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- [13] 柳凤霞, 史紫薇, 钱会, 等. 银川地区地下水水化学特征演化规律及水质评价[J]. 环境化学, 2019, 38(9): 2055-2066.