

# 矿区砂岩含水层水岩作用及水化学特征研究

## ——以青东煤矿为例

沈孝珂<sup>1</sup>, 马杰<sup>1\*</sup>, 冯松宝<sup>1</sup>, 王新军<sup>2</sup>, 孟志明<sup>2</sup>, 王新建<sup>3</sup>, 王亮<sup>3</sup>, 代涛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

<sup>2</sup>淮北矿业股份有限公司通防地测部, 安徽 淮北

<sup>3</sup>安徽省煤田地质局水文勘探队, 安徽 宿州

收稿日期: 2024年1月31日; 录用日期: 2024年4月17日; 发布日期: 2024年4月26日

### 摘要

本文以青东煤矿砂岩含水层23组样品为研究对象, 运用Piper三线图、离子浓度直方图、主成分分析、相关性分析等方法, 对该含水层的水化学特征、水岩相互作用以及离子来源等水文地球化学特征进行研究。结果表明: 常规离子含量排序为:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Mg}^{2+}$ , 阴阳离子的优势离子分别是 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ; 主成分表明主成分1中 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-$ 均有较强的正相关,  $\text{Cl}^-$ 含量与岩盐矿物溶解有关,  $\text{Ca}^{2+}$ 的含量较高说明阳离子交替吸附作用较为明显, 主成分2中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 荷载值较高, 其次为 $\text{SO}_4^{2-}$ , 说明其水化学作用主要为硫酸盐岩矿物溶解, 主成分3中 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 有强正相关, 与 $\text{Cl}^-$ 有中相关, 代表了硫酸岩矿物、岩盐等矿物的溶解; 相关性分析表明, 砂岩含水层中 $\text{CO}_3^{2-}$ 对pH起主要影响作用,  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 之间的正相关性较强, 主要源于硅酸盐矿物的风化和硫酸盐矿物的溶解,  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 呈中等正相关, 说明这些元素可能来自于岩盐。

### 关键词

砂岩含水层, 水化学分析, 主成分分析, 相关性分析

# Study on Water-Rock Interaction and Hydrochemical Features of Sandstone Aquifer in Mining Area

## —Taking Qingdong Coal Mine as an Example

Xiaoke Shen<sup>1</sup>, Jie Ma<sup>1\*</sup>, Songbao Feng<sup>1</sup>, Xinjun Wang<sup>2</sup>, Zhiming Meng<sup>2</sup>, Xinjian Wang<sup>3</sup>, Liang Wang<sup>3</sup>, Tao Dai<sup>3</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 沈孝珂, 马杰, 冯松宝, 王新军, 孟志明, 王新建, 王亮, 代涛. 矿区砂岩含水层水岩作用及水化学特征研究[J]. 地理科学研究, 2024, 13(2): 304-311. DOI: 10.12677/gser.2024.132029

<sup>1</sup>School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

<sup>2</sup>Section of Ventilation, Geology and Survey of Huaibei Mining (Group) Co., Ltd., Huaibei Anhui

<sup>3</sup>Hydrological Exploration Team of Coal Geological Bureau of Anhui Province, Suzhou Anhui

Received: Jan. 31<sup>st</sup>, 2024; accepted: Apr. 17<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 26<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this study, 23 sets of samples of sandstone aquifer in Qingdong Coal Mine were taken as the research object, and the hydro geochemical features such as hydrochemical features, water-rock interaction and ion source were studied by using Piper three-line diagram, ion content histogram, principal component analysis and correlation analysis. The results showed that the orders of ion contents were  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Mg}^{2+}$ , respectively, the dominant ions of anions and cations were  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ . The principal component indicated that  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Cl}^-$  had a strong positive correlation in principal component 1, and the content of  $\text{Cl}^-$  was related to the dissolution of rock salt minerals. The high content of  $\text{Ca}^{2+}$  suggested that the cation exchange was more obvious. The load values of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in principal component 2 were higher,  $\text{SO}_4^{2-}$  was lower than them, this indicated that the hydrochemistry action was mainly the dissolution of sulfate rock minerals.  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in principal component 3 had a strong positive correlation and were moderately correlated with  $\text{Cl}^-$ , it represented that the dissolution of sulfate rock minerals, rock salts and other minerals. The correlation analysis implied that  $\text{CO}_3^{2-}$  played a major role in the pH of sandstone aquifer. There was a strong positive correlation between  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ , also between  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ , which were mainly due to the weathering of silicate minerals and the dissolution of sulfate rock minerals.  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  showed a moderate positive correlation, indicating that these elements may come from the rock salt.

## Keywords

Sandstone Aquifer, Hydrochemical Analysis, Principal Component Analysis, Correlation Analysis

Copyright © 2024 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

水是地球上珍贵的自然资源之一，它承载着生物的生命活动，同时也是各种产业不可或缺的要素。不同类型的水资源，如工业用水、灌溉用水、水产养殖用水等都在各自的领域中发挥着重要的作用。然而，近年来随着社会的快速发展，人类对水资源的大规模开采和利用产生了双重影响。一方面，水资源为居民生活和社会发展提供了有力保障，是确保健康生活的核心要素之一；另一方面，它也带来了一些不利因素，成为了影响安全生产的隐患。

随着水资源利用目标的不同，许多领域的研究都在不断深入。这些领域包括水资源管理、水污染防治、水文地球化学、水质监测等。在这些研究中，水污染问题逐渐被揭露出来，它与农药、化肥的使用以及工业废水排放等因素密切相关。这些问题不仅对水资源本身造成污染，还会对整个生态环境产生深远的影响。

地下水的水化学特性及其组成是地下水与其周围环境长期相互作用的结果。这些特性可以反映特定区域的演化历史,而水化学信息也为研究者提供了线索,帮助其了解地下水的起源和形成过程。通过使用 Piper 图、Stiff 图、平均当量变化雷达图、描述性统计、重金属污染指数等方法,我们可以有效地解释地下水的起源、演化和污染程度等,这些方法有助于相关管理和决策部门更好地管理和保护地下水资源[1] [2]。

煤炭是世界上储量最丰富的化石能源,全球约有 80 多个国家拥有丰富的煤炭资源。在中国,矿井突水是六大矿难(水灾、火灾、瓦斯爆炸、粉尘危害、地热灾害和顶板垮塌)中最为严重的灾害之一。矿井突水是指掘进或采矿过程中,巷道揭穿导水断裂、富水溶洞、积水老空,大量地下水突然涌入矿山井巷的现象。矿井突水是煤矿生产过程最具威胁的灾害之一,人员伤亡大,经济损失列于煤矿三大事故的榜首。一旦矿井发生突水,如何及时准确地判断突水成因,查找突水水源,是解决和进一步预防突水灾害的关键问题。通过分析离子浓度,我们可以更好地了解含水层内隐藏的水化学信息。因此,将丰富的水化学数据与水文地球化学分析方法相结合,可帮助我们更有效地识别突水含水层水化学特征及突水水源,精准的水源判别分析结果将为实施有效的突水防治措施提供重要的参考依据。

两淮煤田煤炭资源丰富,开采出的煤炭资源是华东地区经济持续发展的重要能源保障。青东煤矿是淮北煤田的井工煤矿之一,随着煤炭资源的开采,矿井地质条件水文地质条件发生了一定的变化,受采掘作业的扰动下,其含隔水层组性能及水流场、水化学场等多场环境也发生了明显变化。含水层(组)流场及水化学场变化给矿山的安全生产带来了挑战,因此深入研究和理解矿井含水层(组)的特性对于制定有效的突水控制措施至关重要[3]。近年来,研究区及周边相继开展了土壤、塌陷塘、河流、地下水等相关研究。孙浩运用地累积指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态风险评价法等多种方法评价了淮北矿区土壤的生态环境质量,揭示了微量元素在固废堆积区周边土壤中的分布规律,探讨了固废类型和堆积时间对土壤中微量元素分布的影响[4];李涛通过对淮北地区塌陷区水域渔业开发及利用现状的分析,探讨了渔业可持续发展的对策[5];李兴旺等人采用有限单元法、面状井系法、水均衡法、系统分析等方法,研究地表水与地下水联合运用,建立了亳州涡河以北地下水位预测模型[6];潘强通过对不同土壤侵蚀类型区的各项水土流失影响因子统计、归纳,来研究调查水土流失现状、水土流失规律、水土保持措施及其生态建设模式,并提出平原地区水土保持生态建设模式[7]。陈家玉等人利用  $^{16}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$  基因 V4 区测序方法开展深层地下水微生物群落多样性测试与分析,结果显示煤系水、太灰水是淮北煤田煤矿开采的主要充水水源,而且具有不同的微生物群落特征[8];张杰等人采用水化学及同位素测试并收集相关成果进行数据补充研究华北型煤田奥陶系岩溶水文地球化学特征及其对地热的指示意义,结果表明淮北煤田岩溶地热水主要来源于大气降水补给,北部闸河矿区以直接入渗补给为主,水化学表现为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型,水-岩作用以溶滤溶解为主[9]。煤矿砂岩含水层作为矿井充水水源之一,虽有相关矿区主要充水含水层的相关报到,但针对青东矿砂岩含水层的研究较少。基于此,本文以青东矿主采煤层的直接充水水源-砂岩含水层常规离子浓度作为研究对象,讨论了该含水层的水化学类型和水岩相互作用,以期能为矿井突水水源的快速识别提供水文地球化学判别依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

青东煤矿位于淮北煤田(图 1),气候属于暖温带半湿润季风气候区。该区域气候温和,年气温约为  $14.5^\circ\text{C}$ ,降水量达到 254.4 毫米。研究区位于东经  $116^\circ25'44''\sim 116^\circ34'44''$ ,北纬  $33^\circ36'34''\sim 33^\circ40'29''$  的范围内。该煤矿地层形成的顺序从古老的奥陶纪开始,历经石炭纪、二叠系,直至第四纪[10]。其中,二叠系下石盒子组 5 号煤层和山西组 6 号煤层均形成于二叠系,是该矿区最主要的可开采煤层。该层位的煤层不仅具有重要的工业价值,也为当地经济发展提供了有利保障。

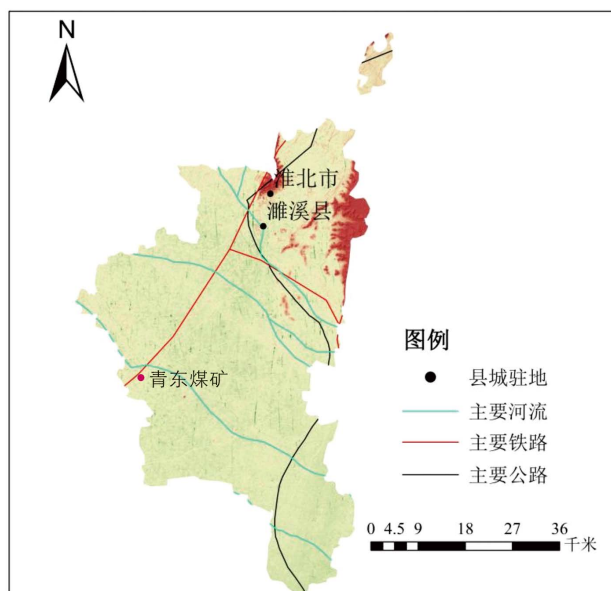


Figure 1. Map of study area  
图 1. 研究区概况图

青东煤矿矿井突水的四种主要类型，即 1) 第四系松散含水层：该含水层松散且易于渗透，含水量丰富，在浅部煤层开采时因覆岩破坏或岩层岩性变化导致突水；2) 5 号煤顶板砂岩含水层：该含水层位于 5 号煤层的顶部，因其形成于陆源环境，其含水量以静储量为主；3) 6 号煤底板灰岩含水层：该含水层位于 6 号煤层的底部，因沉积环境为浅海环境，故其含水量以动储量为主；4) 采空区积水：当工作面回采完成后，开采后形成的空间易形成高位积水区，当老空水未及时疏放时，可对接替采区或工作面形成安全隐患。

## 2.2. 采样与分析

本次主要研究煤系砂岩含水层，共收集 23 个样品，样品采集均来井下出露点。现场采集的水用聚乙烯瓶进行密封，随后运至指定的测试中心(具备 CMA 实验室资质)进行常规离子测试工作，各常规离子的测试方法参照相关规范进行[11]。离子平衡误差精度控制在 $\pm 5\%$ 以内。

## 2.3. 描述性统计

本文拟采用多元统计分析软件 SPSS，进行矿区砂岩水的描述性统计、主成分分析和相关性分析。描述性统计可用于讨论常规离子含量的变化；主成分分析用于提取出控制含水层水化学特征的影响因素；相关性分析用来检验变量之间的相互关联性，以皮尔逊系数来反映变量之间的关系程度[12]。

## 2.4. 水化学分析

采用 Origin 软件，绘制 Piper 三线图，对砂岩含水层的水化学类型进行分析；利用离子含量图对砂岩含水层的常规离子含量进行对比分析。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 水化学类型分析

Piper 三线图是研究地下水化学类型常用的方法。如图 2 所示，阳离子三角图显示  $\text{Na}^+$  的含量均高于

其他离子, 阴离子三角图显示  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量最大。水化学类型中, 20 个样品为 Na- $\text{HCO}_3$  型、3 个样品为 Na- $\text{SO}_4$  型[13]。从水化学类型分析可得, 研究区水岩相互作用主要以碳酸盐岩、硫酸盐岩及硅酸盐岩矿物的风化溶解为主。

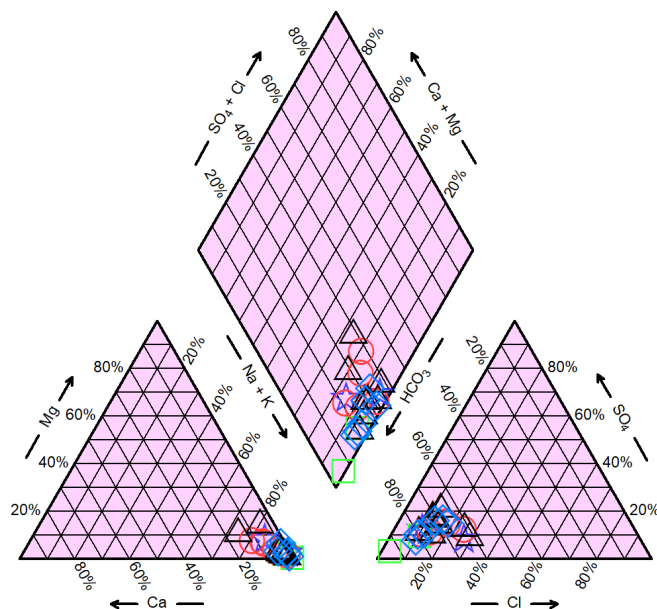


Figure 2. Piper trilinear diagram of sandstone aquifer  
图 2. 砂岩含水层 Piper 三线图

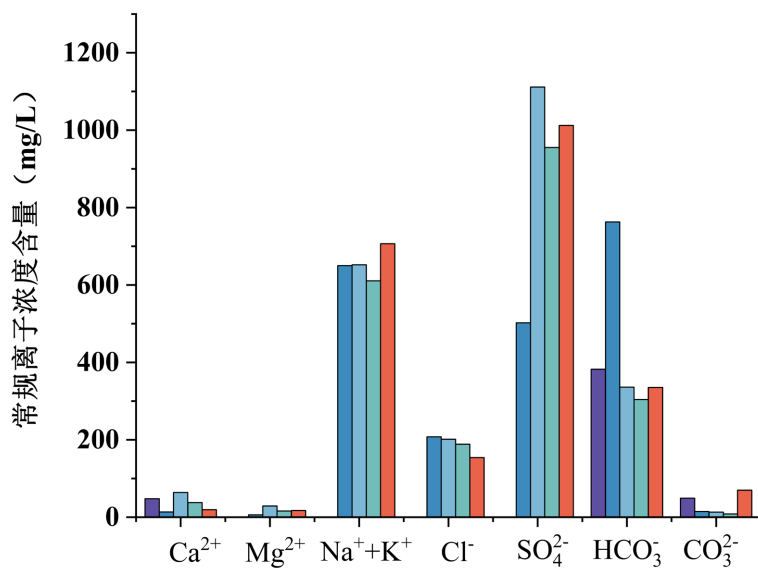


Figure 3. Distribution histogram of conventional ion concentration in sampling area  
图 3. 采样区常规离子浓度含量分布直方图

由图 3 研究区离子浓度含量可知, 采样点离子含量排序:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{CO}_3^{2-} > \text{Mg}^{2+}$ 。阳离子  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  含量明显高于其他阳离子含量, 阴离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  以及  $\text{Cl}^-$  为主要阴离子。在阳离子中,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  的含量占比大, 占总体阳离子含量的 92%, 主要来源于盐岩矿物溶

解或钠长石等硅酸岩矿物风化； $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量占比相同，相对于总体阳离子含量占比较低，主要来源于碳酸岩矿物风化；在阴离子中， $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 的含量相对于 $\text{Cl}^-$ 占比大，主要来源于硫酸盐矿物和盐岩矿物溶解； $\text{CO}_3^{2-}$ 的含量占比低于其他阴离子含量占比，主要来源于碳酸岩矿物或硅酸岩矿物风化溶解。

### 3.2. 主成分分析

经过旋转后，选取特征值大于1的主成分，得到3个主成分组成(表1)。结果表明：3个主成分方差累计为80.757%，主成分1的方差贡献率为28.35%，总计为2.268，其中主成分1中 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-$ 均有较强的正相关， $\text{Cl}^-$ 含量与岩盐矿物溶解有关，而 $\text{Ca}^{2+}$ 含量较高则说明阳离子交替吸附作用也较为明显[14]。主成分2的方差贡献率为27.45%，总计为2.196，其中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 荷载值较高，其次为 $\text{SO}_4^{2-}$ ，说明主成分2的水化学作用主要为硫酸盐岩矿物溶解[15]。主成分3的方差贡献率为24.957%，总计为1.997，其中 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 有强正相关，与 $\text{Cl}^-$ 有中相关，代表了硫酸岩矿物、岩盐等矿物的溶解[16]。一般情况下，碳酸盐岩矿物的溶解也会在水岩相互作用中发生一定程度的作用，但从主成分分析未发现明显的作用，说明该含水层中的碳酸盐岩矿物风化溶解作用强度较低。

Table 1. Principal component analysis of each index

表1. 各指标主成分分析

指标	旋转前			旋转后		
	成分1	成分2	成分3	成分1	成分2	成分3
pH	-0.755	0.156	0.341	-0.777	-0.327	0.033
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	0.165	0.928	0.183	0.001	-0.158	0.947
$\text{Ca}^{2+}$	0.841	-0.245	0.049	0.564	0.671	0.027
$\text{Mg}^{2+}$	0.71	-0.468	0.247	0.33	0.808	-0.153
$\text{Cl}^-$	0.425	0.59	-0.506	0.665	-0.299	0.504
$\text{SO}_4^{2-}$	0.548	0.637	0.514	0.039	0.421	0.889
$\text{HCO}_3^-$	-0.469	0.187	-0.702	0.158	-0.832	-0.173
$\text{CO}_3^{2-}$	-0.653	0.013	0.588	-0.878	-0.043	0.006
总计	2.934	1.954	1.572	2.268	2.196	1.997
方差百分比%	36.678	24.428	19.651	28.35	27.45	24.957
累积%	36.678	61.106	80.757	28.35	55.8	80.757

### 3.3. 相关性分析

相关性分析可指示出两个参数之间的相关性，从而判定两个参数是否属于同源物质，从而更好地了解水质的影响因素，是一种研究事物之间相互依存关系的数理统计方法。由表2分析可知，pH和 $\text{CO}_3^{2-}$ 在 $\alpha = 0.01$ 相关性显著，相关系数为0.713，说明它们有极高的相关性，表明研究砂岩含水层中 $\text{CO}_3^{2-}$ 对pH起主要影响作用[17]。在显著水平0.01上， $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$  (0.774)、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$  (0.812)之间的正相关性较强，主要源于硅酸盐矿物的风化和硫酸盐岩矿物的溶解[18]。 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$  (0.441)呈中等正相关，说明这些元素可能来自氯化盐和岩盐。在显著水平0.05上，pH和 $\text{Ca}^{2+}$  (-0.465)呈负相关，说明上述离子可能与 $\text{CO}_3^{2-}$ 发生了交换吸附[19]。 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$  (-0.500)呈负相关[20]。

**Table 2.** Correlation analysis of each index**表 2.** 各指标相关性分析

指标	pH	K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
pH	1							
K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup>	0.056	1						
Ca <sup>2+</sup>	-0.465*	-0.107	1					
Mg <sup>2+</sup>	-0.413	-0.182	0.812**	1				
Cl <sup>-</sup>	-0.282	0.441*	0.346	-0.118	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.155	0.774**	0.291	0.203	0.297	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.246	0.06	-0.356	-0.379	0.235	-0.500*	1	
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.713**	0.005	-0.372	-0.262	-0.424*	-0.1	-0.017	1

注: \*在 0.05 级别(双尾), 相关性显著, \*\*在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

#### 4. 结论

本文采用多元统计分析(包括描述性统计分析、相关性分析和主成分分析)和水化学类型分析, 讨论了矿区砂岩含水层的水文地球化学特征及水岩相互作用类型。研究得出结论如下:

1) 水化学类型分析中, 20 个样品为 Na-HCO<sub>3</sub> 型、3 个样品为 Na-SO<sub>4</sub> 型。

2) 砂岩含水层中的 Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> 来自钠长石等硅酸盐矿物的风化, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 以及 Cl<sup>-</sup> 为主要阴离子, 来自石膏、盐岩等硫酸盐矿物以及碳酸盐岩矿物的溶解。

3) 主成分分析提取出三个主成分, 主成分 1 的方差贡献率为 28.35%, 总计为 2.268; 主成分 2 的方差贡献率为 27.45%, 总计为 2.196; 主成分 3 的方差贡献率为 24.957%, 总计为 1.997。成分 1 与岩盐矿物溶解和阳离子交替吸附作用有关; 主成分 2 与硫酸盐岩矿物溶解有关, 主成分 3 与硫酸岩矿物、岩盐等矿物的溶解有关。

4) 相关性分析中, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 对 pH 起主要影响作用, K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>, 以及 Mg<sup>2+</sup> 之间的正相关性较强, 主要源于硅酸盐矿物的风化和硫酸盐岩矿物的溶解; 在显著水平 0.05 上, pH 和 Ca<sup>2+</sup> (-0.465) 呈负相关, 说明上述离子可能与 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 发生了交换吸附。

#### 基金项目

项目资助: 宿州学院大学生创新创业训练计划项目, YBXM23-022; 宿州学院课程思政建设研究项目, szxy2021ksjy031; 宿州学院新建专业质量提升项目(szxy2023xjzy02)。

#### 参考文献

- [1] 康文辉, 周殷竹, 雷米, 等. 新疆玛纳斯河流域地下水砷氟碘分布及共富集成因[J/OL]. 中国环境科学, 2024: 1-13. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240016.001>, 2024-01-28.
- [2] 杨智淇, 胡雪峰, 刘述友. 中关铁矿地下水水化学特征简析[J]. 地下水, 2023, 45(5): 26-29.
- [3] 于鹏, 孟淑英, 王延忠. 柳塔煤矿煤层上覆含水层特征及其对矿山充水影响分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(10): 248-250.
- [4] 孙浩. 淮北固废堆积区土壤中微量元素的环境地球化学研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [5] 李涛. 浅析淮北地区塌陷区渔业发展[J]. 安徽农学通报, 2005, 11(4): 130-131.
- [6] 李兴旺. 安徽淮北地区地下水动态预测及水资源优化配置研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.

- [7] 潘强. 安徽省淮北地区水土流失规律及防治措施研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [8] 陈家玉, 桂和荣, 郭艳, 等. 淮北煤田深层地下水微生物群落特征及其水源示踪意义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3503-3512.
- [9] 张杰, 陈陆望, 侯晓伟, 等. 华北型煤田奥陶系岩溶水水文地球化学特征及其对地热的指示意义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3831-3844.
- [10] 张品刚, 孙贵, 邵军战, 等. 淮北煤田青东煤矿构造特征及层滑构造研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(8): 154-155+160.
- [11] 陈陆望, 郑忻, 张杰, 等. 基于断层量化隐伏型煤矿基岩含水层水化学空间演化机制研究[J/OL]. 地质学报, 2024: 1-13. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023058>, 2024-01-28.
- [12] 潘江勇. 基于统计学方法的某铝矿周围地下水水质监测及评价[J]. 山西化工, 2023, 43(10): 195-198.
- [13] 刘海, 康博, 管政亭, 等. 淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(11): 6038-6049.
- [14] 王浩然, 李海明, 李梦娣, 等. 北大港水库水体和地下水水化学特征及成因[J]. 人民黄河, 2023, 45(8): 107-113.
- [15] 郭高轩, 代垠东, 许亮, 等. 北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析[J/OL]. 环境科学, 2024: 1-16. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202303190>, 2024-01-28.
- [16] 陈成勇, 赵红金, 郑蕾, 等. 基于主成分分析与 ArcGIS 的地下水质量分析[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(9): 171-176.
- [17] 张宏博, 蒋亚军. 石羊河流域浅层地下水水化学特征及水质评价[J]. 农业科技与信息, 2023(12): 79-82.
- [18] 高胜强, 刘凯, 孙文洁, 等. 花岗岩带状热储水化学与锶同位素地球化学特征[J]. 人民长江, 2022, 53(8): 36-42+49.
- [19] 韩佳明, 高举, 杜坤, 等. 煤矿地下水库水体水化学特征及其成因解析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 223-231.
- [20] 彭飞. 某地地下水污染时空变化特征及来源分析[J]. 地下水, 2023, 45(3): 32-36.