

基于数理统计的煤矿区地下水化学特征及来源解析

赵祥¹, 孙林华^{1,2*}, 彭位华²

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

Email: *sunlinh@126.com

收稿日期: 2021年5月25日; 录用日期: 2021年6月28日; 发布日期: 2021年7月5日

摘要

通过对松散层第四含水层、煤系砂岩含水层和太原组灰岩含水层水化学组成的分析, 探讨了钱营孜煤矿地下水水岩相互作用与控制因素。结果表明, 三个含水层的水化学类型不同, 四含、煤系和太灰的主要水化学成分分别为Na-SO₄-HCO₃、Na-HCO₃和Na-SO₄型。主成分分析表明: 地下水水化学组成受易溶矿物的溶解和硅酸盐矿物的风化控制, 这一观点在离子相关性与聚类分析中得到了证实。Unmix模型分析表明煤系水水化学组成与硅酸盐矿物的风化、氯盐矿物的溶解有关, 而四含与太灰水水化学组成与硫酸盐矿物的溶解有关。

关键词

地下水, 水化学, 主成分分析

Chemical Characteristics and Source Analysis of Groundwater in Coal Mining Area Based on Mathematical Statistics

Xiang Zhao¹, Linhua Sun^{1,2*}, Weihua Peng²

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Email: *sunlinh@126.com

Received: May 25th, 2021; accepted: Jun. 28th, 2021; published: Jul. 5th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 赵祥, 孙林华, 彭位华. 基于数理统计的煤矿区地下水化学特征及来源解析[J]. 自然科学, 2021, 9(4): 405-413. DOI: 10.12677/ojns.2021.94046

Abstract

Hydrochemical composition and control factors were studied based on the analysis of 30 water samples in three aquifers (the fourth aquifer of loose layer, coal-bearing and limestone aquifer) to explore the water rock interaction and controlling factors in coal mine. The results showed that the hydrochemical types of the three aquifers are different; the main hydrochemical compositions of the fourth aquifer, coal-bearing aquifer, and limestone aquifer are Na-SO₄-HCO₃, Na-HCO₃, and Na-SO₄, respectively. The results of ion ratio, principal component analysis and cluster analysis showed that the hydrochemical composition of groundwater is controlled by the dissolution of soluble minerals and the weathering of silicate minerals, and the results of EPA Unmixmodel analysis also show that the chemical composition of coal-bearing aquifer water was mainly related to the weathering of silicate minerals and the dissolution of chloride minerals, while the chemical composition of fourth and limestone aquifer was mainly related to the dissolution of sulfate minerals.

Keywords

Groundwater, Water Chemistry, Principal Component Analysis

Copyright © 2021 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

煤炭是世界上最重要的能源之一，在中国更是如此，煤炭占中国一次能源消耗的 70%以上，煤炭影响国家的经济发展与人民的正常生活，因此国家特别重视煤炭的安全开采[1]。近年来，随着采矿深度的逐渐增加，矿区频繁的遭受突水等相关灾害的影响[2]。

因此，为了防治矿井水害，学者做了大量的研究工作[3] [4] [5]。目前，水文地球化学已经成为地下水研究中的一种重要的方法，通过分析测试地下水的组成，如宏量元素(Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻等)以及水化学指标(TDS、pH等)，寻找地下水中隐含的水文地球化学信息并分析地下水的演化规律以及水岩相互作用，这对矿区防治矿井水害具有重要意义。

作为重要的产煤基地，淮北煤田经过多年的开采，其地质条件异常复杂，含水层之间相互连通，水害防治形势严峻[6]。钱营孜煤矿位于淮北煤田南部，属于隐伏型煤矿，煤矿开采深度很深，水文地质条件复杂，含水层之间可能存在潜在的水力联系。

因此，鉴于水文地球化学方法对防治矿井水害的独特优势，本文对钱营孜煤矿四含、煤系和太灰 3 个含水层地下水常规离子进行了采样分析，利用数理统计分析方法进行了主成分、聚类、EPA Unmix 分析，目的是获得含水层地下水化学成分来源信息，探究地下水水岩相互作用与演化规律，这一研究对于钱营孜煤矿水害防治工作具有重要意义。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

淮北煤田在安徽省北部，年平均降水量 940 mm 左右，平均气温在 15℃以上。钱营孜煤矿处于宿州市西

南,地理坐标为东经 116°51'00"~117°00'00";北纬 33°27'00"~33°32'30"。研究区的地理位置如图 1 所示[7][8]。

钱营孜煤矿主要的突水含水层从浅到深分别为:松散层第四含水层、煤系砂岩含水层和下伏灰岩含水层。其中四含由含泥质中细砂、砂砾、砾石、粘土砾石等组成。含煤地层岩性为砂岩、砂泥岩互层、粉砂岩、泥岩和煤层。太灰厚度约为 115 m,由灰岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩及薄煤层组成,泥岩含黄铁矿结核,细砂岩成分以石英、长石为主。

2.2. 取样和分析

30 个样品分别采集于钱营孜煤矿的巷道与观察井,四含、煤系与太灰样品数量分别为 10、14、6。观察井采用自制的采样器采样,巷道中的水样则直接从水点采集,水样均经 0.45 μm 孔径的滤膜过滤后 24 小时内送到实验室分析,本次共测试了样品的常规水化学组成,主要为 Na^+ (由于 K^+ 测试浓度低,将 Na^+ 和 K^+ 共同以 Na^+ 表示)、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,其中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度以 ICS-600 和 ICS-900 离子色谱仪进行测试, HCO_3^- 浓度以酸碱中和滴定法测试。所有的测试均在国家煤矿水害防治工程技术研究中心进行。数据分析主要用 SPSS 软件对数据进行处理,包括因子分析、聚类分析。以及使用 EPA Unmix 6.0 软件对数据进行源解析。

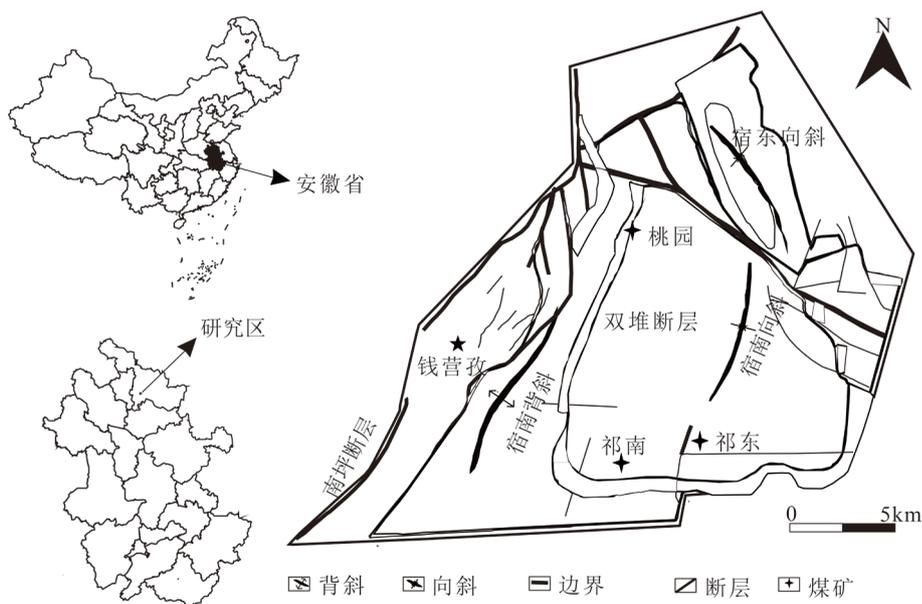


Figure 1. Location of the study area
图 1. 研究区地理位置

3. 结果与讨论

3.1. 常规离子含量

钱营孜煤矿各含水层主要离子浓度变化范围及平均值见表 1。从表 1 可以看出,地下水总体呈碱性,四含、煤系、太灰含水层的 pH 均值分别为 8.6、8.6、8.5。地下水阳离子均以 Na^+ 为主,煤系较四含、太灰更为富集 HCO_3^- ,而太灰则更为富集 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。阴离子中四含、太灰以 SO_4^{2-} 为主,煤系以 HCO_3^- 为主。矿区 3 个含水层阳离子含量关系均为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$,这表明含水层的水化学特性是与围岩组成是相一致的。

如图 2 所示,根据 Piper 三线图的划分,四含主要水化学类型为 $\text{Na-SO}_4\text{-HCO}_3$ 型(5 个,占 50%),煤

系主要的水化学类型为 Na-HCO₃ 型(10 个, 占 71%), 太灰水主要化学类型为 Na-SO₄ 型(4 个, 占 67%)。很显然, 四含、煤系和太灰水的水化学成分存在明显差异。

Table 1. Statistical analysis of the hydrochemical compositions of groundwater

表 1. 钱营孜煤矿常规离子组成与指标

含水层	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH
四含 (N = 10)	360~871 (659)	4~143 (69)	2~104 (47)	74~336 (195)	837~1247 (1070)	106~915 (457)	7.9~9.1 (8.6)
煤系 (N = 14)	435~783 (564)	0.4~7 (4)	0.6~7 (3)	104~243 (164)	23~602 (228)	566~1233 (824)	8.1~9.1 (8.6)
太灰 (N = 6)	858~943 (918)	97~148 (122)	87~144 (114)	268~307 (288)	1853~2060 (1978)	293~365 (337)	7.3~9.2 (8.5)

注: 数据表示方式为最小值~最大值(平均值), 除 pH 值以外, 所有离子浓度单位均为 mg/l。

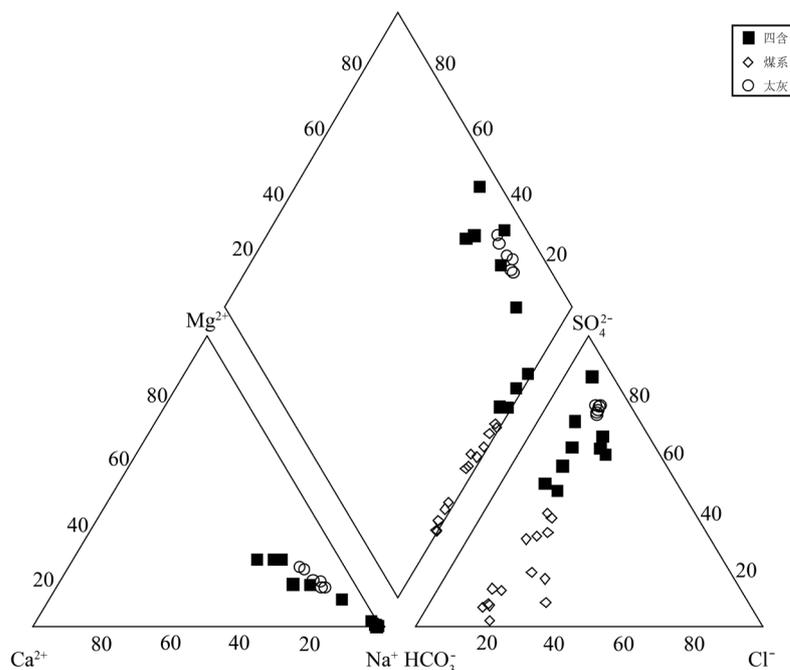


Figure 2. Piper diagram of groundwater samples from the Qianyingzi coal mine

图 2. 研究区 Piper 图

3.2. 离子比值分析

离子比值分析被用来研究地下水水化学的演化与来源, Cl⁻ 在地下水中非常稳定, 因此用 Na⁺/Cl⁻ 揭示 Na⁺ 的来源, 若 Na⁺ 来源于氯盐的溶解, 则 Na⁺/Cl⁻ = 1, 如图 3(a), 研究区 Na⁺/Cl⁻ 的比值全部大于 1, 表明 Na⁺ 的来源并非全部来源于 NaCl。结合研究区区域地质条件, 过多的 Na⁺ 可能与硅酸盐矿物的风化有关, 这是基于研究区含有大量的硅酸盐矿物, 如砂岩、长石等。

如图 3(b) 所示, 若 Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 全部来源于硫酸盐的溶解, 则其比值为 1:1。所有样品全部在 1:1 线以下, 表明 SO₄²⁻ 相对于 Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 过多, 这需要由 Na⁺ 平衡, 表明 Na⁺ 的来源与硫酸盐的溶解有关。如果地下水中的 Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 主要来源于碳酸盐的溶解, 则 (Ca²⁺ + Mg²⁺) 与 0.5HCO₃⁻ 的比值为 1, 从图 3(c) 可以看出, 全部太灰水与大部分四含水水样(60%)落在了 1:1 线以上, 表明太灰水中 Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 的来源除了

硅酸盐的风化外,可能还与易容矿物的溶解有关。而煤系含水层中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源有限,过多的 HCO_3^- 与含 Na^+ 的硅酸盐矿物的风化有关。

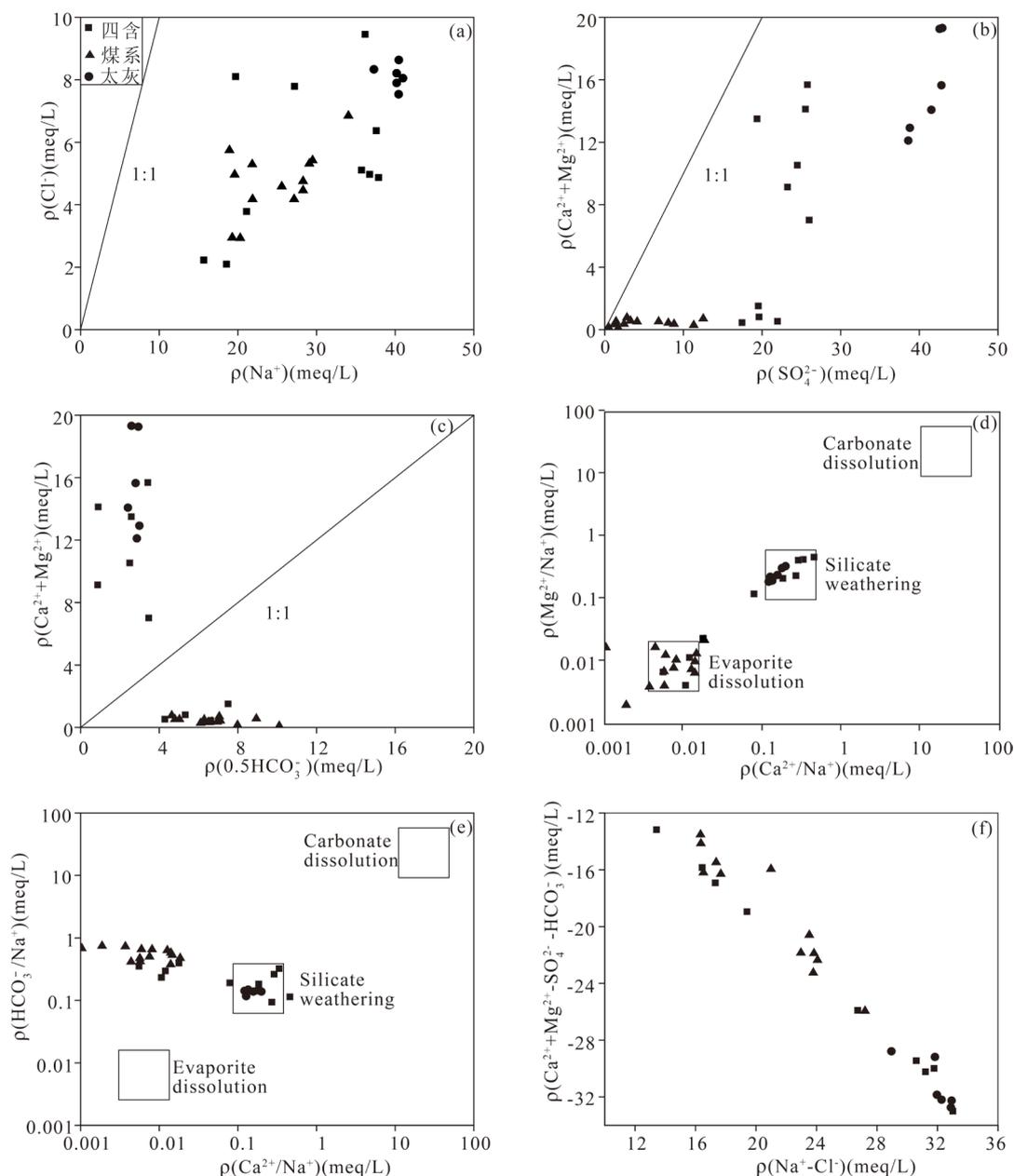


Figure 3. Study on ions correlation of groundwater samples in qianyingzi coal mine

图 3. 钱营子煤矿地下水样品离子相关性

从图 3(d)和图 3(e)可看出, 含水层系统中水岩相互作用的主要类型为硅酸盐矿物的风化以及蒸发矿物的溶解。说明硅酸盐矿物的风化与蒸发作用的影响是钱营子煤矿含水层的主要水岩相互作用类型。另外, 如图 3(f)所示, $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 之间的比值关系可以反映含水层是否存在阳离子交替吸附, 研究区水样品 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 值与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 值相关关系良好, 表明阳离子交换作用也是影响矿区地下水水化学组分来源的一个重要机制。

根据离子组合分析, 矿区地下水化学受多种因素影响, 其水化学环境受区域地质背景条件与采矿活动影响, 含水层水化学成分的影响因素主要有硫酸盐、氯盐溶解、阳离子交替吸附以及硅酸盐的风化等。

3.3. 数理统计分析

3.3.1. 主成分分析

主成分分析是将多数指标降维成为少量指标的一种方法。如表 2 所示, 在特征值大于 1 的前提下, 共得到了 2 个主成分: F1 与 F2, 其方差贡献率分别为 68.51%、21.89%, 方差贡献率累计达到 90.40%。F1 中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 具有较高的正载荷, 其次为 Na^+ 、 Cl^- , 说明主成分 F1 可能与硫酸盐、氯岩等易溶矿物的溶解有关。主成分 F2 中 Na^+ 、 Cl^- 和 HCO_3^- 具有较高的正载荷, Cl^- 荷载值高说明氯盐的溶解可能对 Na^+ 有着重要的贡献, HCO_3^- 荷载值高这可能与硅酸盐矿物的风化有关。因此, F2 可用于表示氯盐的溶解与硅酸盐矿物的风化。

样品的得分图是由样品的荷载值与样品的指标求和得出的, 如图 4 所示, 煤系水样品主要受 F2 影响, 表明煤系水水化学组成受氯盐的溶解与硅酸盐矿物的风化控制。太灰水则分布在右上方, 表明太灰水可能受到两个因素的共同影响, 而四含的分布差异较大, 表明四含部分样品可能受到了其他含水层混合作用的影响, 并非纯净的水样。也有可能是四含与其他含水层存在潜在的水力联系。

Table 2. Chemical principal component analysis of groundwater

表 2. 地下水化学主成分分析

种类	主成分 1	主成分 2
Na^+	0.57	0.77
Ca^{2+}	0.90	-0.38
Mg^{2+}	0.94	-0.21
Cl^-	0.70	0.55
SO_4^{2-}	0.97	0.09
HCO_3^-	-0.80	0.47
特征值	4.11	1.31
方差贡献率	68.51%	21.89%

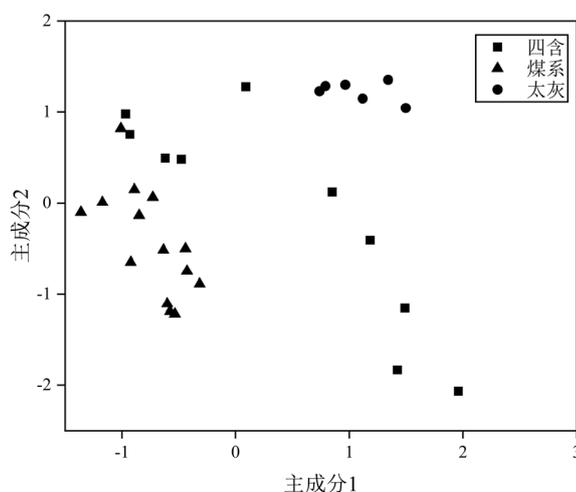


Figure 4. Plots of factor scores

图 4. 因子得分图

3.3.2. EPA Unmix 模型分析

Unmix 是计算地下水化学的源组成以及样品源贡献的模型, 经过计算, 模型共确定了 2 个来源(表 3), 其 $\text{Min Rsq} = 0.95$, $\text{Min Sig/Noise} = 6.11$, 高于模型使用的最低标准, 表明本文计算结果是有效的。

如表 3 所示, 源 1 对 Na^+ 、 HCO_3^- 和 Cl^- 具有较高的贡献率(>60%), 这表明源 1 与硅酸盐矿物的风化、氯盐矿物的溶解有关。而源 2 具有高含量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 SO_4^{2-} , 表明源 2 可能由硫酸盐矿物的溶解所引起的。如图 5 所示, 样品的源贡献率表明源 1 对煤系水样的贡献最高, 其次为太灰, 四含。而源 2 对四含与太灰水样的贡献较高, 其次为煤系, 表明煤系水水化学组成与硅酸盐矿物的风化、氯盐矿物的溶解有关, 而四含与太灰水水化学组成主要与硫酸盐矿物的溶解有关。

Table 3. Source compositions (mg/l) and proportions (%)

表 3. 源组成(mg/l)及其比例(%)

离子种类	源 1 (mg/l)	源 2 (mg/l)	比例 1/%	比例 2/%
Na^+	490	180	73	27
Ca^{2+}	-5.75	50.9	0	100
Mg^{2+}	-4.4	42.5	0	100
Cl^-	133	66.7	67	33
SO_4^{2-}	238	620	28	72
HCO_3^-	647	-45.7	100	0

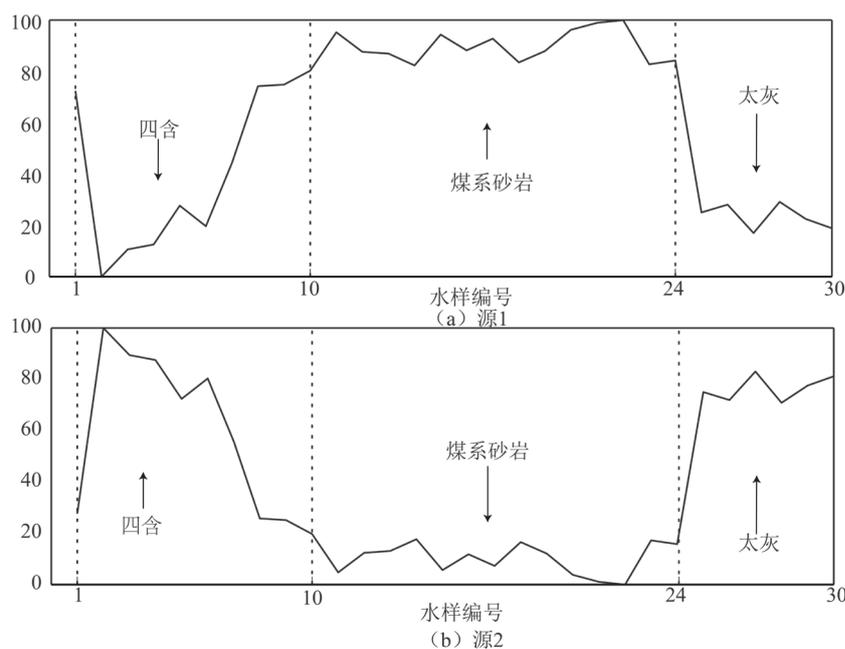


Figure 5. Source contributions in qianyingzi coalmine

图 5. 变量源贡献

3.3.3. 聚类分析

对样品进行聚类分析是根据物以类聚的特点。本次采用 Ward 聚类方法和平方欧氏距离对 30 个样品进行分析。结果见图 6, 30 个样品分为 3 类, 第 1 类为四含水, 第 2 类为煤系砂岩水, 第 3 类为太灰水, 表明 3 个含水层之间没有显著的水力联系。

图7为R型聚类，本文涉及的6个指标中大体上可以分为两组，第一组包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} ，第二类包括 Na^+ 、 Cl^- 和 HCO_3^- ，表明3个含水层的化学成分受两类不同的因素所控制，第1类包括硫酸盐等矿物，第2类则为氯盐矿物以及硅酸盐矿物的风化。

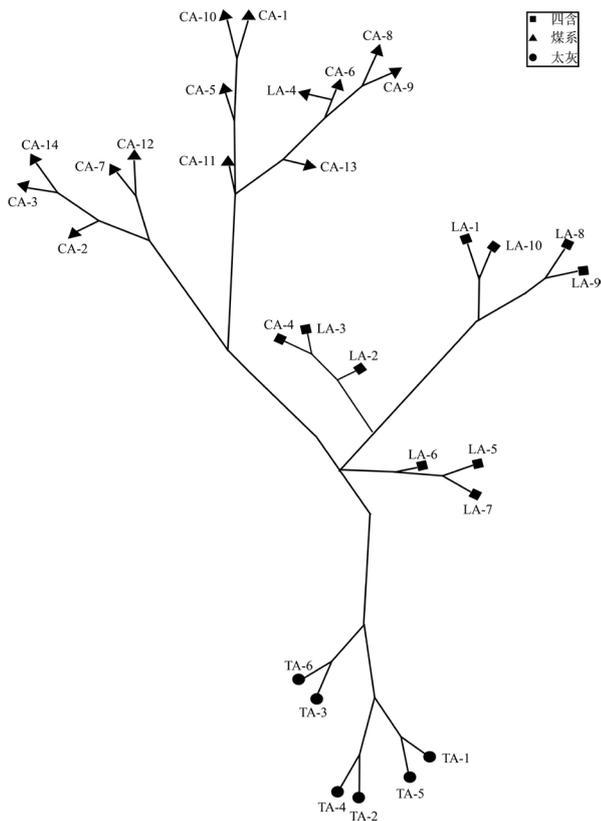


Figure 6. Result of Q-mode cluster analysis
图 6. Q 型聚类分析

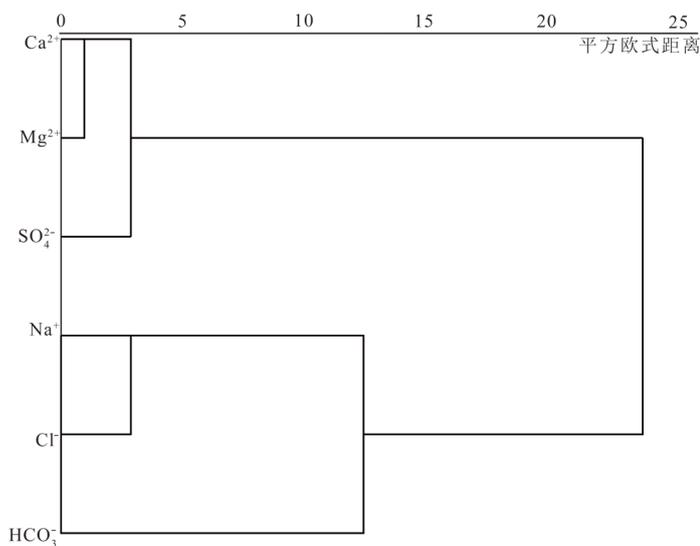


Figure 7. Result of R-mode cluster analysis
图 7. R 型聚类分析

4. 结论

通过对钱营孜煤矿三个含水层地下水样品中主要离子浓度的统计分析, 得出以下结论:

1) 研究区四含主要水化学类型为 Na-SO₄-HCO₃ 型, 煤系主要水化学类型为 Na-HCO₃ 型, 太灰主要水化学类型为 Na-SO₄ 型。三个含水层水化学类型有明显差异。

2) 离子比值、主成分分析和聚类分析结果表明, 地下水水化学组成受方解石、白云石、石膏、石盐等可溶性矿物的溶解和硅酸盐矿物的风化作用控制。

3) 使用 Unmix 模型表明煤系水水化学组成可能与硅酸盐矿物的风化、氯盐矿物的溶解有关。而四含、太灰水化学组成可能是由硫酸盐矿物的溶解所引起的。

基金项目

本研究得到安徽省高等学校自然科学研究重大项目(KJ2020ZD64)、安徽省高等学校自然科学研究重点项目(KJ2020A0740)、宿州学院博士科研启动基金(2019jb15)的支持。

参考文献

- [1] Wu, Q., Tu, K., Zeng, Y.F. and Liu, S.Q. (2019) Discussion on the Main Problems and Countermeasures for Building an Upgrade Version of Main Energy (Coal) Industry in China. *Journal of China Coal Society*, **44**, 1625-1636.
- [2] 桂和荣, 陈陆望. 矿区地下水水文地球化学演化与识别[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [3] 马雷, 钱家忠, 赵卫东. 基于 GIS 和水质水温的矿井突水水源快速判别[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(2): 49-53.
- [4] 高柏, 王广才, 周来逊, 刘成龙, 张倩. 华北型煤田岩溶水水文地球化学研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(3): 59-63.
- [5] 张群利, 郭会荣, 吴孔军, 韩国童. 荣巩矿区岩溶地下水系统的水文地球化学特征及其指示意义[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(2): 1-7.
- [6] 许冬清. 宿县矿区地下水化学演化特征与控制因素研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [7] 郭艳. 宿县矿区地温场分布特征及其控制因素研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [8] 林中月. 华北赋煤区煤田构造与构造控煤作用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2012.