

Hydrochemistry of Groundwater from the Huainan Coalfield and Their Hydrological Implications

Tanjie Liu¹, Guangquan Xu¹, Linhua Sun^{1,2*}

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

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

Email: paddingtonliu@126.com, sunlinh@126.com

Received: Mar. 25th, 2020; accepted: Apr. 8th, 2020; published: Apr. 15th, 2020

Abstract

For getting the information about the hydrogeochemical compositions and influencing factors of groundwater in different aquifers (loose layer, coal-bearing sandstone and limestone aquifer of Taiyuan formation) in Huainan coalfield, the major ion concentrations of groundwater have been analyzed by a series of methods based on the systematic collection of data. The results show that the hydrochemical compositions of groundwater from the three aquifers are different from each other, indicating that the controlling factors (sources of major ions) of hydrochemical compositions are different from each other. The main hydrochemical types are Na-Cl and Na-HCO₃ types, reflecting that the study area is located in the drainage area or the groundwater supply is insufficient. Gibbs diagram, the relationship between major ions and factor analysis suggest that the weathering of silicate minerals, the dissolution of Ca and Mg containing chloride minerals (source 1) and the dissolution of Na containing sulfate and chloride minerals (source 2) are the main contribution sources of hydrochemistry. The result has been further confirmed by the analysis of UNMIX model, and the results of UNMIX model analysis also show that the groundwater from the coal-bearing sandstone aquifer has the highest contribution from the source 1, whereas the groundwater from the loose layer aquifer has the highest contribution from the source 2.

Keywords

Hydrochemistry, Aquifer Difference, Source of Major Ions, Water Rock Interaction

淮南矿区地下水水化学组成及其水文地质意义

刘谭杰¹, 许光泉¹, 孙林华^{1,2*}

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

*通讯作者。

摘要

为查明淮南矿区不同含水层(松散、煤系砂岩和太原组灰岩含水层)地下水的水文地球化学组成及其影响因素,在系统收集资料的基础上,对其常规离子组成进行了综合分析。结果表明,三个含水层地下水的水化学组成存在差异,表明其水化学组成控制因素(主要离子来源)互不相同。其水化学类型以Na-Cl型和Na-HCO₃型为主,反映矿区整体处于排泄区域或地下水补给不充分。Gibbs图、离子之间的相互关系及因子分析结果表明硅酸盐矿物的风化和含Ca、Mg氯化物矿物的溶解(源1)以及含Na硫酸盐及氯化物矿物的溶解(源2)是水化学组成的主要贡献来源。这一结果在Unmix模型分析中得到了进一步的证实,且Unmix模型分析结果表明源1对煤系砂岩含水层地下水贡献率最高,而源2对松散含水层地下水贡献率最高。

关键词

水文地球化学, 含水层差异性, 离子来源分析, 水岩相互作用

Copyright © 2020 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

作为世界上最为重要的水资源组成部分,地下水在人类的生产、生活中扮演了重要角色[1]。但对于煤矿而言,地下水是一把双刃剑:一方面,矿区水资源的严重缺乏使得地下水尤为重要[2]。另一方面,地下水又是煤矿安全开采的重要威胁之一[3]。因此,如何在防治水的同时利用好矿井水是当前煤矿生产中面临的重要问题。

在过去的20多年里,作为最为重要、也最为有效的工具之一,水文地球化学在探讨煤矿区地下水演化以及应用(水源识别及资源化)方面发挥了至关重要的作用:出于煤矿突水水源识别的需要,早期的研究者对煤矿深部地下水(深度 < 1000 m 且与煤矿防治水密切相关的部分)开展了大量水源识别模型的研究工作,主要是基于不同含水层水化学组成的差异性,在方法上则以特征元素/离子及数理统计分析(如判别分析、神经网络等)为主[4]-[10],而缺乏了对造成这种差异性原因的探讨。基于此,在后续的研究中,以水岩相互作用为主导的矿区水文地球化学演化研究得以展开,并在元素/离子来源、水文地质条件、含水层水力联系分析等方面取得了一系列进展[11][12][13][14][15]。

淮南矿区在华东地区经济发展中发挥了重要作用。然而,矿区的安全生产同样面临瓦斯和水害等一系列安全问题。因此,大量相关研究得以展开,为矿区安全生产提供了大量优异的科学信息。然而,这些研究主要集中于瓦斯演化及防治[16][17][18][19][20],对于水文地球化学的研究极其有限[21][22]。基于此,本研究以淮南矿区四个煤矿(板集矿、刘庄矿、口孜矿和杨村矿)的三个代表性含水层(主要与煤炭安全开采有关,包括松散含水层、煤系砂岩含水层和太原组灰岩含水层)地下水为研究对象,利用多种方法分析其水化学组成以获取其主要影响因素及离子来源,并结合Unmix模型定量分析不同来源对其水化学组成的贡献率。

2. 材料与方法

2.1. 研究区简介

淮南矿区位于安徽省中北部, 区域横跨淮南和阜阳。正因为煤炭资源的高度丰富, 区内交通四通八达。矿区面积近 3000 km² (其东西长 100 公里, 南北宽 30 公里, 图 1)。其探明煤炭总储量占安徽省的 74%, 且品位优良, 被誉为绿色能源和环保煤。淮南煤田属于华北赋煤区南缘, 该区煤炭资源主要富集在二叠系地层。由于该区缺少中生代地层, 导致二叠系含煤地层直接与上覆新生界松散层和下伏石炭系太原组灰岩相接触。因此, 在煤炭开采过程中, 松散层、含煤二叠系和太原组灰岩中的含水层就成为潜在危险含水层[22]。

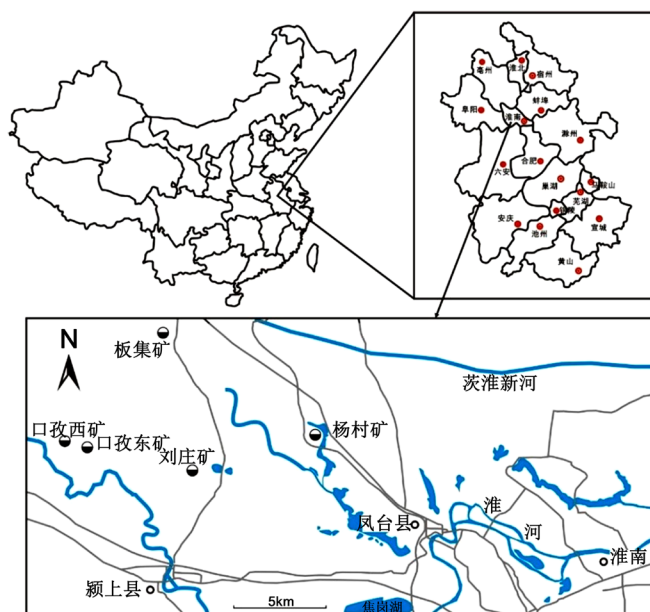


Figure 1. Location of the study area

图 1. 研究区地理位置图

2.2. 数据收集与分析

本研究从板集矿、刘庄矿、口孜矿和杨村矿共收集了 48 个样品的常规离子组成, 其中阳离子包括 $K^+ + Na^+$ (因为 K^+ 含量普遍较低, 所以和 Na^+ 合并)、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 阴离子包括 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 。在数量分布上, 松散含水层、煤系砂岩含水层和太原组灰岩含水层分别为 18、10 和 20 个。

数据分析共分为两个部分: 首先是水化学组成主要影响因素的定性分析, 主要通过 Gibbs 图[23]先确定水岩相互作用是否对于水化学具有决定性作用, 然后利用离子之间的相互关系[24]分析其主要的水岩相互作用类型, 进而利用因子分析[25]做进一步的确认。其次是水化学组成主要影响因素的定量分析, 主要利用 Unmix 模型[26]完成。

3. 结果与讨论

3.1. 水化学组成与类型划分

研究数据汇总于表 1, 包括各常规离子的含量范围及平均值。从表中可以看出: 松散含水层水样的平均 $K^+ + Na^+$ (634 mg/l)、 Cl^- (712 mg/l) 和 SO_4^{2-} (147 mg/l) 相比其他两个含水层样品最高, 但其 Mg^{2+} (8.54 mg/l) 和 HCO_3^- (278 mg/l) 平均含量最低。相比之下, 煤系砂岩含水层水样具有最高的 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 平均含

量, 分别为 11.7 mg/l 和 20.4 mg/l, 但其 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 平均含量最低, 分别为 19.3 mg/l 和 56.2 mg/l。对于太原组灰岩含水层而言, 其具有最高的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 平均含量, 分别为 34.7 mg/l 和 366 mg/l, 但与此同时, 其有着最低的 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ (537 mg/l)、 Cl^- (526 mg/l) 和 CO_3^{2-} (14.1 mg/l) 平均含量。上述差距表明, 对于这三个含水层而言, 其水岩相互作用可能存在明显差异, 包括水岩相互作用类型上的差异, 且反应程度上也可能存在不同。

Table 1. Major ion concentrations (mg/l) and pH values of samples

表 1. 样品常规水化学组成(mg/l)及 pH 值

含水层	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	pH
松散层	71.0~946 (634)	1.20~40.3 (27.4)	0.610~17.2 (8.54)	0~1170 (712)	0~384 (147)	0~370 (278)	0~86.1 (15.3)	7.81~9.73 (8.45)
煤系砂岩	178~865 (566)	7.94~34.5 (19.3)	7.54~16.7 (11.7)	70.9~984 (628)	0~98.2 (56.2)	115~463 (299)	0~49.2 (20.4)	8.00~9.07 (8.44)
太原组灰岩	4.25~1058 (537)	8.02~151 (34.7)	0.00~17.0 (9.80)	22.0~1110 (526)	18.7~528 (134)	154~1116 (366)	0~48.0 (14.1)	7.91~9.23 (8.58)

注: 数据表示方式为最小值~最大值(平均值)。

对于地下水而言, 其水化学组成在受多种因素的影响, 但归根结底是溶解程度的影响。而溶解程度则又受制于固体(岩石、矿物)、水量的大小、温度和 pH 等。对于水量而言, 其影响非常明显, 对于很多地下水而言, 在水量充足时(如补给区), 其水化学类型主要为 HCO_3^- 型, 随着水量的减少(如排泄区), 水化学类型会逐渐向 SO_4^{2-} 、 Cl^- 型转变[27]。对于淮南矿区地下水而言, Na-Cl 型是主要的类型(34 个, 占比 71%), 然后是 Na- HCO_3^- 型(12 个, 占比 25%) (图 2)。这种特征表明, 淮南矿区整体处于排泄区域的可能性较大, 或间接反映了地下水补给不充分的特点。

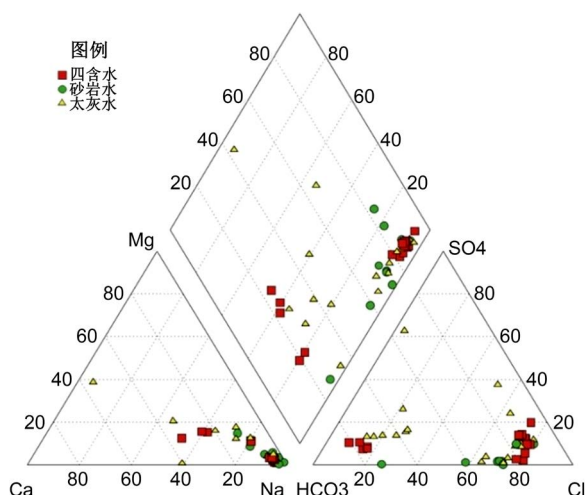


Figure 2. Piper diagram

图 2. Piper 图解

3.2. 影响因素分析

3.2.1. 基于常规水化学的影响因素分析

Gibbs 图最早被用于研究地表水化学组成的影响因素, 但后来也逐渐被纳入到地下水研究领域[23]。Gibbs 值的计算公式如下:

$$\text{Gibbs I} = \text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-) \quad (1)$$

$$\text{Gibbs II} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}) \quad (2)$$

单位为 meq/l。对于地表水而言，可以通过 Gibbs 图将其影响因素划分为三个部分：蒸发、水岩相互和降水作用[23]。但对于地下水而言，这三个因素则更大程度上对应于蒸发盐类溶解、水岩相互和补给作用。从本次研究数据来看，其 Gibbs I 值在 0.09 和 0.92 之间(平均值 = 0.63)，Gibbs II 值在 0.10 和 0.99 之间(平均值 = 0.90)。在图 3 中，所有的样品都位于蒸发作用与水岩相互作用区域。这种情况表明，淮南矿区地下水主要受蒸发作用(或蒸发盐类的溶解)与水岩相互作用的影响。这与上文所得认识(整体位于排泄区或补给不充分)是相一致的。

此外，因为地下水中的离子来源主要为水岩相互作用，因此离子之间的相互关系(如 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 及 HCO_3^-)经常被用于探讨地下水水岩相互作用的具体类型，其典型代表为 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 及 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 图解[24]。从图 4 可以发现，绝大部分的样品都落在了蒸发盐矿物溶解区域，并有部分样品位于蒸发盐矿物溶解和硅酸盐矿物风化之间，仅 1 个样品靠近碳酸盐矿物溶解区域。这种情况表明，蒸发盐矿物溶解和硅酸盐矿物风化是淮南矿区地下水水化学作用的主要类型。

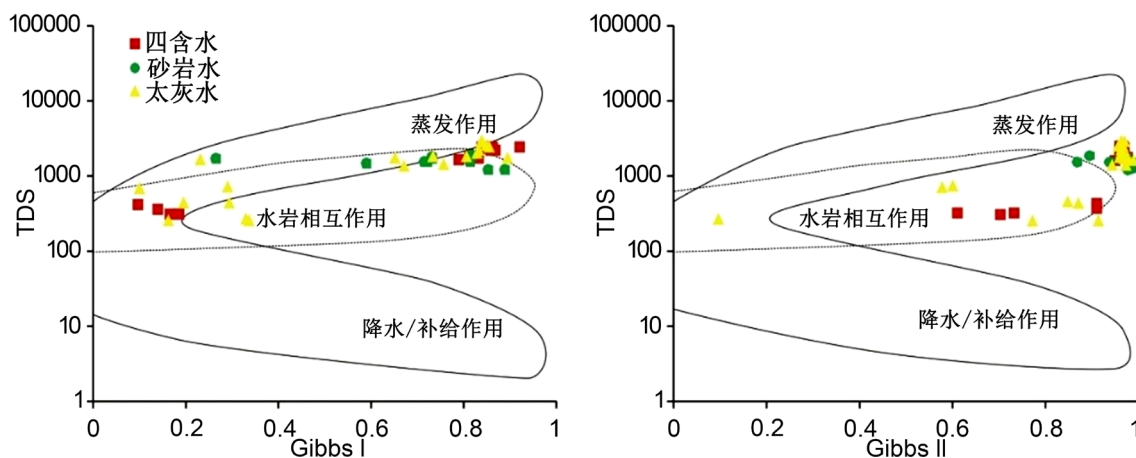


Figure 3. Gibbs diagram

图 3. Gibbs 图解

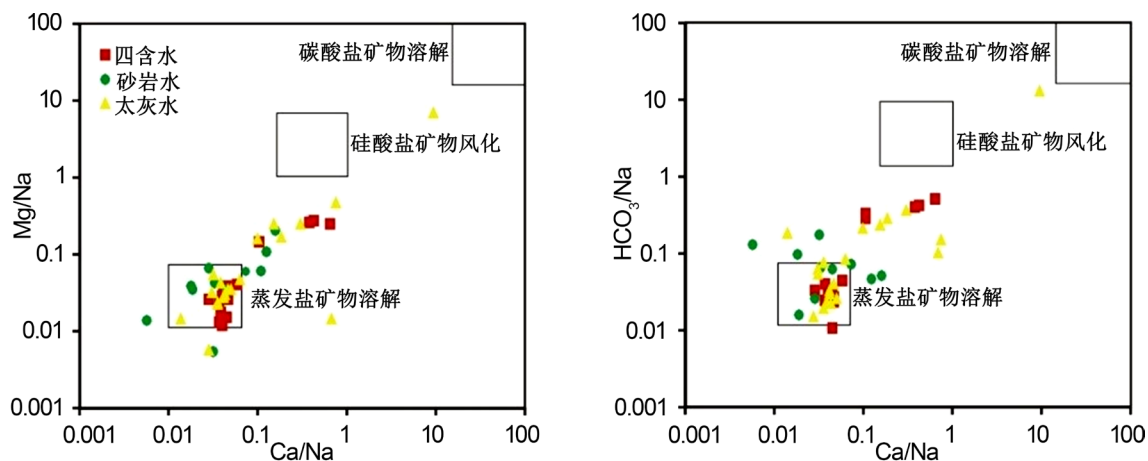


Figure 4. Diagrams of $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$

图 4. $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 及 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 图解

3.2.2. 基于因子分析的影响因素分析

在环境地球化学领域, 作为最常用的数理统计分析方法, 因子分析常被用于污染物来源分析[25]。本次研究中, 以特征值大于 1 为因子数量的确定标准, 共获得了 2 个因子, 总的方差解释率为 65.5% (表 2)。经正交旋转后, 因子 1 在 Na^+ + K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 有较高的正载荷, 方差解释率为 38.8%, 因子 2 在 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 上具有较高的正载荷, 在 SO_4^{2-} 上具有中等的正载荷, 而在 HCO_3^- 上具有较高的负载荷, 方差解释率为 26.8%。

Table 2. Results of factor analysis

表 2. 因子分析结果

项目	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	特征值	方差解释率
因子 1	0.966	0.003	0.036	0.927	0.731	0.005	2.33	38.80%
因子 2	-0.177	0.734	0.704	-0.044	0.342	-0.651	1.61	26.80%

前人研究表明, 对于两淮矿区地下水而言, 硅酸盐矿物的风化、碳酸盐、硫酸盐及氯化物(矿物)的溶解是主要的水岩相互作用类型[28]。基于此, 因子 1 可以被解释为氯盐(尤其是石盐 NaCl)和硫酸盐矿物(如芒硝 Na_2SO_4)。因子 2 则可以解释为含 Ca 和 Mg 的硫酸盐矿物的溶解(如石膏 CaSO_4)。但从因子 2 中 HCO_3^- 的载荷来看, 碳酸盐矿物(如方解石、白云石等)的溶解可能未能明显体现, 因为 HCO_3^- 为较高的负载荷。但值得注意的是, HCO_3^- 虽然在因子 1 中的载荷也很低, 但与因子 2 负值相比明显不同, 考虑到前文分析结果(图 4), 因子 1 可能还包含着硅酸盐矿物风化的信息。

3.3. 离子来源定量化分析

3.3.1. Unmix 来源解析

Unmix 模型是美国环保局提出的一种用于定量分析污染物来源的受体模型, 且被广泛应用于土壤、大气及水体的研究中[26]。该模型的主要思路: $C = \sum X_n \times S_n$ 。其中 C 为样品总含量, S_n 为每个源的含量, X_n 为 S_n 在总的贡献中的比例。因为地下水中的化学组成主要来源于水岩相互作用, 因此可以将其化学组成理解为多种水岩相互作用不同程度的叠加, 因此也可以考虑用这一模型进行分析。

经过模型计算, 对于淮南矿区地下水化学组成而言, 共确定了两个来源(表 3)。从表中可以看出, 源 1 对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 具有很高的贡献率(>80%), 其次是 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 。这种情况表明, 源 1 可能与碳酸盐矿物的溶解、硅酸盐矿物的风化和含 Ca 、 Mg 氯盐矿物的溶解有关。但考虑到前文分析中碳酸盐矿物溶解基本上已经被排除, 因此源 1 主要与硅酸盐矿物风化(如斜长石)和含 Ca 、 Mg 氯盐矿物(如石膏、白云石)的溶解有关。对于源 2 而言, 其对 SO_4^{2-} 有 100% 的贡献率, 然后是 Cl^- 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, 其贡献率分别为 59.6% 和 57.5%。结合前文认识来看, 源 2 可能主要与含 Na 硫酸盐矿物(芒硝)及氯盐矿物(如石盐)的溶解有关。

3.3.2 基于贡献率的含水层差异性分析

源 1 和源 2 对不同含水层地下水水化学组成的贡献率见表 4。从表 4 可以看出, 两个不同源对三个不同含水层地下水化学组成的贡献率变化很大。其中源 1 (硅酸盐矿物风化和含 Ca 、 Mg 氯盐矿物的溶解)对煤系砂岩含水层地下水的平均贡献率最高, 其次为太原组灰岩含水层和松散含水层, 其平均贡献率分别为 63.3%、55.4% 和 51.0%。源 2 (含 Na 硫酸盐矿物及氯盐矿物)对松散含水层地下水的平均贡献率最高, 达到了 49.0%, 其次为太原组灰岩含水层(44.6%)和煤系砂岩含水层(36.7%)。这种情况表明, 煤系砂岩含水层中水岩相互作用里硅酸盐矿物风化和含 Ca 、 Mg 氯盐矿物的溶解程度较高, 侧面反映了其硅酸盐矿物含量相较另外两个含水层更高。这与事实是相一致的, 煤系砂岩含水层因为砂岩, 尤其是长石砂岩的

存在, 其硅酸盐矿物要显著高于其他两个含水层[29]。反之, 松散含水层中的含 Na 硫酸盐矿物及氯盐矿物则要高于其他两个含水层。

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	源 2	比例 1	比例 2
Na ⁺ + K ⁺	240	325	42.5	57.5
Ca ²⁺	30.2	3.78	88.9	11.1
Mg ²⁺	12	1.84	86.7	13.3
Cl ⁻	250	369	40.4	59.6
SO ₄ ²⁻	0	154	0	100
HCO ₃ ⁻	303	44.9	87.1	12.9

Table 4. Source contributions for the groundwater hydrochemistry (%)

表 4. 源对含水层地下水化学组成的贡献率(%)

来源	松散层	煤系砂岩	太原组灰岩
源 1	13.8~100 (51.0)	34.1~83.3 (63.3)	0~91.3 (55.4)
源 2	0~86.1 (49.0)	16.7~65.9 (36.7)	8.62~100 (44.6)

注: 数据表示方式为最小值-最大值(平均值)。

4. 结论

基于对淮南矿区代表性煤矿三个含水层(松散、煤系砂岩和太原组灰岩)地下水水化学组成的分析, 共取得了以下认识:

1) 三个含水层地下水的水化学组成存在差异, 表明其水化学组成控制因素(主要离子来源)互不相同。其水化学类型以 Na-Cl 型和 Na-HCO₃ 型为主, 反映矿区整体处于排泄区域或地下水补给不充分。

2) Gibbs 图、离子之间的相互关系及因子分析结果表明硅酸盐矿物的风化和含 Ca、Mg 氯盐矿物的溶解(源 1)以及含 Na 硫酸盐及氯盐矿物的溶解(源 2)是水化学组成的主要贡献来源。这一结果在 Unmix 模型分析中得到了进一步的证实, 且 Unmix 模型分析结果表明源 1 对煤系砂岩含水层地下水贡献率最高, 而源 2 对松散含水层地下水贡献率最高。

基金项目

本研究得到了安徽省大学生创新创业项目(201810361142)和安徽省高校学科(专业)拔尖人才项目(gxjZD48)的资助。

参考文献

- [1] 中国地下水科学战略研究小组. 中国地下水科学的机遇与挑战[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 桂和荣, 姚恩亲, 宋晓梅, 等. 矿井水资源化技术研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [3] 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.
- [4] 武强, 董书宁, 张志龙. 矿井水害防治[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [5] 王广才, 段琦, 卜昌森, 等. 水文地球化学方法在煤矿水害研究中的某些应用——以平顶山、肥城矿区研究为例[J]. 地质论评, 2001, 47(6): 653-657.

- [6] 冯利军, 李竞生, 邵改群. 具有线性功能函数的神经元在矿井水质类型识别中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(4): 35-37.
- [7] 张许良, 张子戌, 彭苏萍. 数量化理论在矿井突(涌)水水源判别中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 251-254.
- [8] 宫凤强, 鲁金涛. 基于主成分分析与距离判别分析法的突水水源识别方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 236-242.
- [9] 温廷新, 张波, 邵良杉. 矿井突水水源识别的 QGA-LSSVM 模型[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 111-116.
- [10] 周健, 史秀志, 王怀勇. 矿井突水水源识别的距离判别分析模型[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 278-282.
- [11] 陈松, 桂和荣, 孙林华, 等. 灰岩含水层中稀土元素在地下水与围岩间的分异: 以皖北任楼煤矿太原组灰岩含水层为例[J]. 现代地质, 2011, 25(4): 802-807.
- [12] 黄平华, 陈建生, 宁超. 焦作矿区地下水中氢氧同位素分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 770-775.
- [13] Gui, H. and Sun, L. (2013) Chemistry of Groundwater from the Taiyuan Formation Aquifer in Liuyi Coal Mine, Northern Anhui Province, China and Its Implications for Water Rock Interaction in Deep Seated Environment. *Asian Journal of Chemistry*, **15**, 5941-5944. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.14190>
- [14] Sun, L. and Gui, H. (2013) Groundwater Quality and Evolution in a Deep Limestone Aquifer, Northern Anhui Province, China: Evidence from Hydrochemistry. *Fresenius Environmental Bulletin*, **22**, 1126-1131.
- [15] Sun, L., Gui, H. and Peng, W. (2014) Heavy Metals in Groundwater from the Wolonghu Coal Mine, Northern Anhui Province, China and Their Hydrological Implications. *Water Practice & Technology*, **9**, 79-87. <https://doi.org/10.2166/wpt.2014.009>
- [16] 袁亮, 刘泽功. 淮南矿区开采煤层顶板抽放瓦斯技术的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 149-152.
- [17] 张国成, 熊明富, 郭卫星, 汤友谊. 淮南矿区井田小构造对煤与瓦斯突出的控制作用[J]. 焦作工学院学报 (自然科学版), 2003, 22(5): 329-333.
- [18] 方良才. 淮南矿区瓦斯卸压抽采理论与应用技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(8): 56-62.
- [19] 黄晖, 蒋法文, 韩必武, 张平松. 淮南矿区 A 组煤层底板灰岩钻孔瓦斯喷孔综合探查分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1988-1992.
- [20] 万宗启, 李平, 翟艳鹏, 徐超, 刘桂建. 淮南煤田潘北煤矿 4-1 煤层瓦斯组分和碳同位素特征及其成因意义[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(5): 20-23.
- [21] 傅先杰. 淮南煤田太原组灰岩岩溶地下水化学场特征[J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2015, 35(2): 72-77.
- [22] 汪子涛, 刘启蒙, 刘瑜. 淮南煤田地下水水化学空间分布及其形成作用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 40-47.
- [23] Gibbs, R.J. (1970) Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, **170**, 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- [24] Nagaraju, A., Balaji, E., Sun, L. and Thejaswi, A. (2018) Processes Controlling Groundwater Chemistry from Mulakalacheruvu Area, Chittoor District, Andhra Pradesh, South India: A Statistical Approach Based on Hydrochemistry. *Journal of the Geological Society of India*, **91**, 425-430. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-0875-0>
- [25] Sun, L., Chen, S. and Gui, H. (2016) Source Identification of Inrush Water Based on Groundwater Hydrochemistry and Statistical Analysis. *Water Practice and Technology*, **11**, 448-458. <https://doi.org/10.2166/wpt.2016.049>
- [26] Yin, H. and Yang, W. (2014) Source Apportionment of PAHs Using Unmix Model for Yantai Coastal Surface Sediments, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **92**, 30-35. <https://doi.org/10.1007/s00128-013-1164-7>
- [27] Tóth, J. (1999) Groundwater as a Geologic Agent: An Overview of the Causes, Processes, and Manifestations. *Hydrogeology Journal*, **7**, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>
- [28] Sun, L. and Gui, H. (2012) Establishment of Water Source Discrimination Model in Coal Mine by Using Hydrogeochemistry and Statistical Analysis: A Case Study from Renlou Coal Mine in Northern Anhui Province, China. *Journal of Coal Science & Technology (China)*, **18**, 385-389. <https://doi.org/10.1007/s12404-012-0409-0>
- [29] An, S., Jiang, C., Zhang, W., Chen, X. and Zheng, L. (2020) Influencing Factors of the Hydrochemical Characteristics of Surface Water and Shallow Groundwater in the Subsidence Area of the Huainan Coalfield. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, 191. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5140-3>