

皖北煤矿区主要含水层岩石浸泡溶解释放规律研究

吴灿灿^{1,2}

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²宿州学院矿井水资源化利用安徽普通高校重点实验室, 安徽 宿州

收稿日期: 2024年6月4日; 录用日期: 2024年7月16日; 发布日期: 2024年7月25日

摘要

为研究皖北矿区地下水水岩相互作用过程, 本研究采取典型煤矿主要含水层砂岩、灰岩、松散层等岩石进行浸泡实验, 通过测试浸泡后水溶液离子含量、微量元素含量, 探究不同岩石溶解释放规律。结果表明, 研究区不同含水层岩石浸泡液中阳离子浓度最大的均为 Na^+ , 分别为68.82 mg/L, 20.86 mg/L, 32.18 mg/L, 8.72 mg/L; 阴离子浓度最大的均为 HCO_3^- , 分别为202.14 mg/L, 111.13 mg/L, 101.27 mg/L, 28.96 mg/L, 且 Na^+ 和 HCO_3^- 浓度随浸泡时间变化具有相似的增长趋势。除了松散层浸泡液中Fe浓度, 其他浸泡液元素浓度值均低于生活饮用水标准。灰岩、砂岩、松散层岩石浸泡液中Cr、Ni、Cu、Zn元素溶解比率大小为灰岩 < 砂岩 < 松散层。此研究对矿区地下水水质评价、重金属来源分析, 甚至地下水演化探讨及矿井水害防治均具有重要意义。

关键词

浸泡实验, 溶解释放, 含水层岩石, 皖北矿区

Study on the Dissolution and Release Pattern of Rock Immersion in the Major Aquifers in the Coal Mining Area of North Anhui Province, China

Cancan Wu^{1,2}

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

²Key Laboratory of Mine Water Resource Utilization of Anhui Higher Education Institutes, Suzhou University, Suzhou Anhui

Abstract

In order to study the process of groundwater-water-rock interaction in the mining area of northern Anhui Province, this study takes sandstone, tuff, loose layer and other rocks of the main water-bearing layers of a typical coal mine to carry out immersion experiments and explores the dissolution and release laws of different rocks by testing the ion content of the aqueous solution and the content of trace elements after immersion. The results showed that the largest cation concentration in the soaking solution of rocks from different aquifers in the study area was Na^+ , which was 68.82 mg/L, 20.86 mg/L, 32.18 mg/L, and 8.72 mg/L, respectively; the largest anion concentration was HCO_3^- , which was 202.14 mg/L, 111.13 mg/L, 101.27 mg/L, and 28.96 mg/L, respectively. The Na^+ and HCO_3^- concentrations had similar increasing trends with soaking time. Except for the Fe concentration in the loose layer leachate, the elemental concentration values of other leachates were lower than the standard for domestic drinking water. The dissolution ratios of Cr, Ni, Cu, and Zn in the leaching solution of gray rock, sandstone, and loose layer rocks were gray rock < sandstone < loose layer. This study is of great significance to the evaluation of groundwater quality in the mining area, the analysis of heavy metal sources, and even the exploration of groundwater evolution and the prevention and control of mine water hazards.

Keywords

Immersion Experiment, Dissolution and Release, Aquifer Rocks, Northern Anhui Mining Area

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

我国的煤矿区普遍坐落于水资源匮乏地区，煤炭作为我国的关键能源，其开采与水资源紧张之间的矛盾已成为煤矿工业及矿区经济全面发展的严重制约因素。地下水，作为矿区生活饮用、农业灌溉以及工业生产的主要水源，在煤矿地区的社会经济发展中扮演着至关重要的角色，具有不可忽视的战略地位。随着矿业活动以及人类活动的不断增加，对地下水的开采量也在逐年攀升[1]。然而，由于地下水与岩石的长期作用，岩石中的重金属元素逐渐渗入水中，使得地下水中的重金属含量升高，这对人体健康以及工农业生产都构成了潜在威胁[2] [3]。更为严重的是，地下水还对煤矿区的安全构成了直接威胁。水作为煤矿五大典型灾害中最为危险的因素之一(包括水、火、气、尘、顶)，其潜在的突水事故风险极高，给煤矿安全生产带来了极大的挑战。

矿区地下水系统是一个复杂的多层含水层结构[4] [5]，其形成受到多种自然和人为因素的综合影响，包括气象条件、地表水文特征、地质构造、含水层岩性等，共同塑造了矿区地下水系统的复杂性和多样性[6] [7]。在长期的演化过程中，矿区地下水在不同地层运移和赋存过程中，与沉积物接触，发生水岩(水土)相互作用，进行成分的交流，造成水体中阴阳离子成分及浓度、重金属元素含量、溶解性固体总量、pH值等发生变化。

水岩相互作用研究展开较早,起源于20世纪50年代[8],主要集中于两个方向:一是根据水化学特征反演水岩相互作用,二是实验模拟。目前,在皖北矿区进行的水岩相互作用研究较少,特别是水岩相互作用的实验模拟研究。在其他矿区的水岩作用实验研究主要针对重金属元素的迁移。如肖利萍等[9]研究煤矸石在淋滤作用下的释放规律,建立了溶解释放模型;邓为难等[10]通过煤矸石模拟浸泡和淋溶实验,发现,煤矸石模拟淋溶渗透水与煤矸石浸泡液中释放的主要污染物一致;周辰昕等[11]对广西合山某矿的煤矸石进行静态浸泡和动态淋滤实验,揭示了重金属溶出与样品中物质含量、赋存形态的关系。

基于此,从皖北矿区典型矿井——朱仙庄煤矿中选取主要含水层砂岩、灰岩、松散层等岩石进行浸泡实验,模拟水岩相互作用过程,测试浸泡后水溶液离子含量、微量元素含量,探究不同岩石溶解释放规律,对水质评价、重金属来源分析,甚至地下水演化探讨及矿井水害防治均具有重要意义。

2. 区域概况

朱仙庄煤矿位于宿州市东南13 km处,处于宿县矿区东部,宿东向斜的北部,南以芦岭煤矿为邻,西南以桃园矿为邻。区内地势平坦,地面标高23~27 m,整体上北高南低。矿区南北走向长9 km,东西倾向宽1.5~5.8 km,面积21.555 km²。研究区具体位置见图1。



Figure 1. Location of the study area

图1. 研究区位置

矿井地层由老至新包含奥陶系、石炭系、二迭系、侏罗系、第三系和第四系。地层剖面上可划分为四个含水层(组)和三个隔水层。具体为新生界松散层孔隙含水层(组)、二叠系各煤层砂岩裂隙含水层(段)和石炭系太原组及奥陶系石灰岩岩溶裂隙含水层(段),其中二叠系煤层顶、底板砂岩裂隙含水层(段)是煤矿开采的直接充水水源,富水性较弱。

3. 实验样品及实验方法

从朱仙庄煤矿钻孔中采集新生界松散层岩石、二叠系各煤层砂岩和石炭系太原组石灰岩、煤矸石,将样品送至实验室粉碎成粒径为 ≤ 10 mm的颗粒,各自均匀混合,以备浸泡使用。并对各种岩石样品进行地球化学元素测试。

称取砂岩、灰岩、松散层岩石、煤矸石样品各600 g,分别均匀分为6份,放置于1 L试剂瓶中,加

超纯水 500 ml, 使其固液质量比为 1:5。每种岩石浸泡时间均分别为 1 天、3 天、7 天、12 天、20 天、100 天, 岩石浸泡过程中每天搅动 1 次, 浸泡时间满后取上清液进行测定。将上清液通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 测定其主要离子浓度及重金属浓度。主要离子(Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 和 SO_4^{2-})通过离子色谱法测定, 而 HCO_3^{-} 通过酸碱滴定法测定。重金属元素(Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn)浓度通过等离子色谱仪测定。在样品测试之前, 使用标准方法测试仪器的稳定性, 使平行样品的相对偏差小于 5%。

4. 实验结果及分析

4.1. 不同含水层岩石离子随浸泡时间的实验结果

地下水中主要离子的浓度容易受到含水层围岩、结构条件、水动力条件等因素的影响, 其浓度来源于岩石(矿物)的溶解和地下水的混合[8]-[10]。地下水中主要离子的来源对识别矿井突水和防治水害至关重要。

绘制不同含水层岩石阳离子随浸泡时间的变化曲线见图 2 和图 3。煤矸石、砂岩浸泡液中 Na^{+} 浓度整体上随浸泡时间增加而增加, 灰岩、松散层浸泡液中 Na^{+} 浓度基本不随浸泡时间而改变。灰岩、煤矸石、砂岩浸泡液中 K^{+} 浓度随浸泡时间增加而增加, 松散层浸泡液中 K^{+} 浓度在 12 天时达到峰值, 2.08 mg/L, 随后逐渐减少。煤矸石、灰岩、砂岩、松散层浸泡液中 Mg^{2+} 浓度均随浸泡时间增加而增加, 灰岩浸泡液中 Mg^{2+} 增幅较大, 主要因为灰岩中白云石矿物 Mg^{2+} 的释放。灰岩、煤矸石、砂岩浸泡液中 Ca^{2+} 浓度整体上随浸泡时间增加而增加, 灰岩浸泡液中 Ca^{2+} 增幅较大, 主要因为灰岩中方解石矿物 Ca^{2+} 的释放。松散层浸泡液中 Ca^{2+} 浓度在 12 天时达到峰值, 4.12 mg/L, 随后逐渐减少。

不同含水层岩石阴离子随浸泡时间的变化曲线见图 4, 煤矸石、灰岩、砂岩浸泡液中 HCO_3^{-} 浓度整体上随浸泡时间增加而增加, 松散层浸泡液中 HCO_3^{-} 浓度基本不随浸泡时间而改变。煤矸石、灰岩、砂岩、松散层浸泡液中 Cl^{-} 浓度随浸泡时间变化不大。煤矸石、砂岩、松散层浸泡液中 SO_4^{2-} 浓度随浸泡时间变化不大, 灰岩浸泡液中 SO_4^{2-} 浓度刚开始增大, 急剧减小, 又呈缓慢增加趋势。

煤矸石、灰岩、砂岩、松散层阳离子浓度最大的均为 Na^{+} , 分别为 68.82 mg/L, 20.86 mg/L, 32.18 mg/L, 8.72 mg/L; 阴离子浓度最大的均为 HCO_3^{-} , 分别为 202.14 mg/L, 111.13 mg/L, 101.27 mg/L, 28.96 mg/L。浸泡溶液的水化学类型为 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Na}$ 型, 验证了矿井水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Na}$ 型这一现象[12]。

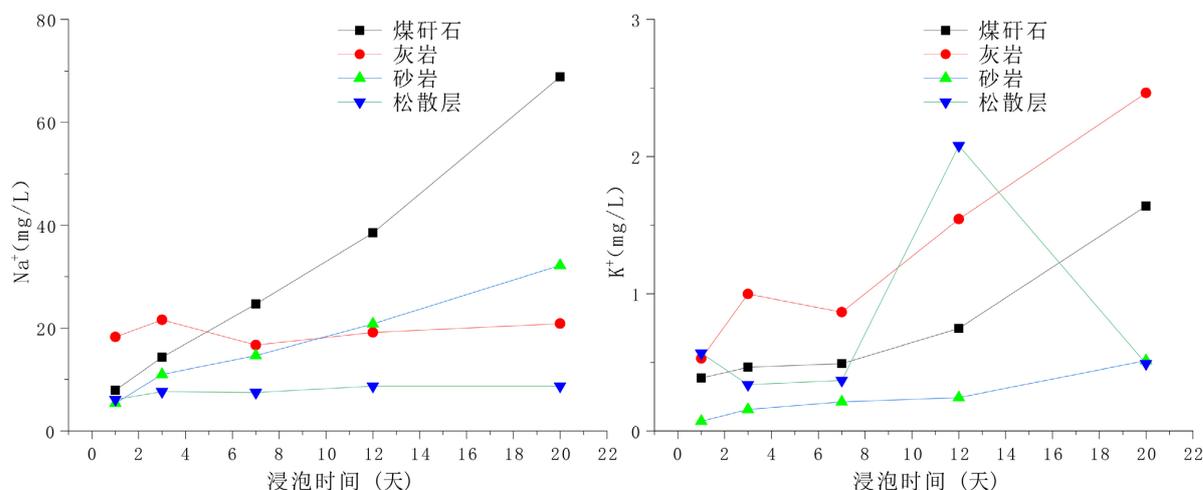


Figure 2. Changes in Na^{+} and K^{+} concentrations in rock soaking solutions from different aquifers

图 2. 不同含水层岩石浸泡液中 Na^{+} 、 K^{+} 浓度变化曲线

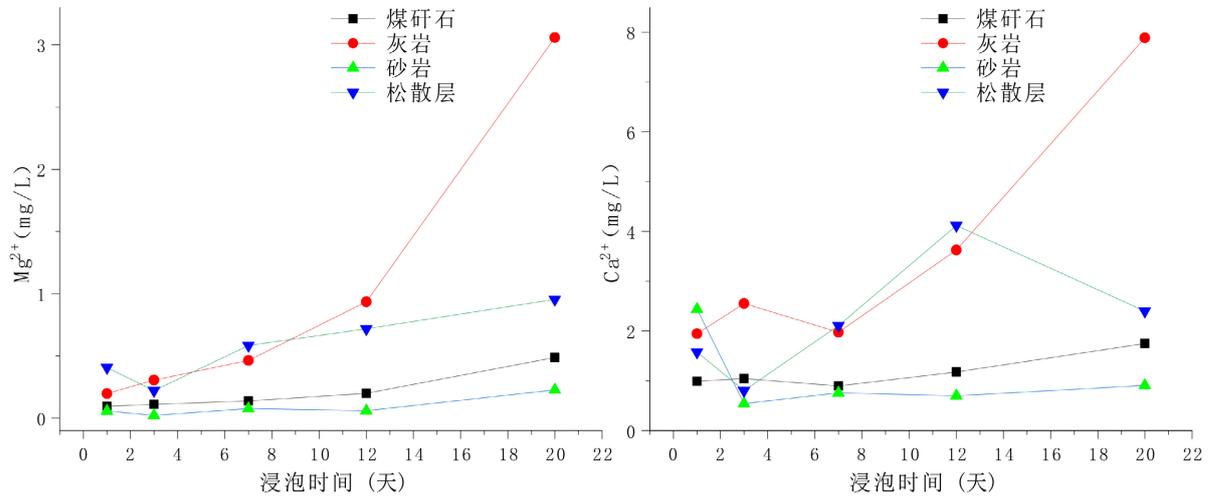


Figure 3. Changes in Mg²⁺ and Ca²⁺ concentrations in rock soaking solutions from different aquifers
图 3. 不同含水层岩石浸泡液中 Mg²⁺、Ca²⁺浓度变化曲线

煤矸石、灰岩、砂岩、松散层浸泡液中 Na⁺和 HCO₃⁻ 浓度随浸泡时间变化具有相似的趋势。可能由于煤矸石和砂岩中一些矿物，如钠长石等随着浸泡时间释放至水溶液中，导致浓度增加，如化学式所示：

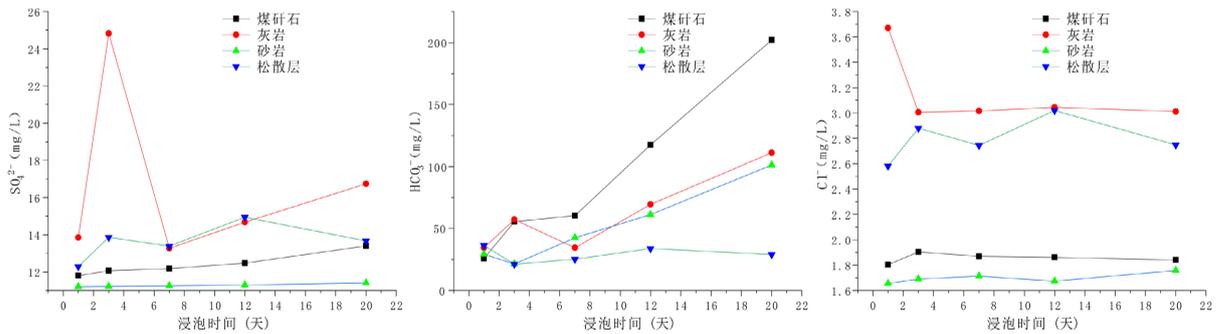
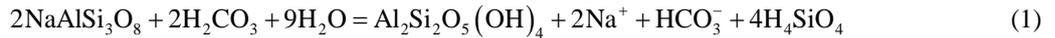


Figure 4. Changes in SO₄²⁻, HCO₃⁻ and Cl⁻ concentrations in rock soaking solutions from different aquifers
图 4. 不同含水层岩石浸泡液中 SO₄²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻浓度变化曲线

4.2. 不同含水层岩石重金属随浸泡时间的实验结果

不同含水层岩石重金属元素含量见表 1。松散层岩石 Cr、Ni、Cu、Zn 元素含量相对其他岩性较低。

Table 1. Heavy metal element content in rocks from different aquifers (10⁻⁶)
表 1. 不同含水层岩石重金属元素含量(10⁻⁶)

	Cr	Ni	Cu	Zn
灰岩	29.6	55.9	11.8	61.1
砂岩	33.9	8.11	5.88	62.3
松散层岩石	16.0	10.3	4.87	23.2

绘制不同含水层岩石重金属元素随浸泡时间的变化曲线见图 5。除了松散层浸泡液中 Fe 浓度值大于 0.3 mg/L，高于饮用水标准，其他浸泡液中各种元素浓度值均低于生活饮用水标准[13]。煤矸石、灰岩、砂岩浸泡液中 Mn、Fe、Ni 元素浓度随浸泡时间变化不大；Cr 和 Cu 元素浓度随浸泡时间增加逐渐增加；Zn 元素浓度随浸泡时间增加逐渐减小。

松散层浸泡液中 Cr、Ni、Cu、Zn 元素浓度随时间变化具有相似的规律，在第 7 天浓度达到较大的值，然后第 12 天浓度较低，100 天浓度达到极致，分别为 8.38 ng/g，6.22 ng/g，2.53 ng/g，16.9 ng/g。松散层浸泡液中 Fe 元素浓度最大值出现在第 7 天，为 2070 ng/g，然后随浸泡时间增加降低，在第 12 天为最小值，为 415 ng/g，继而浓度随浸泡时间增加。松散层中黏土矿物吸附的 Fe，由于水岩作用进入水溶液，导致浓度的增加。松散层浸泡液中 Mn 元素浓度变化与 Fe 较为相似。

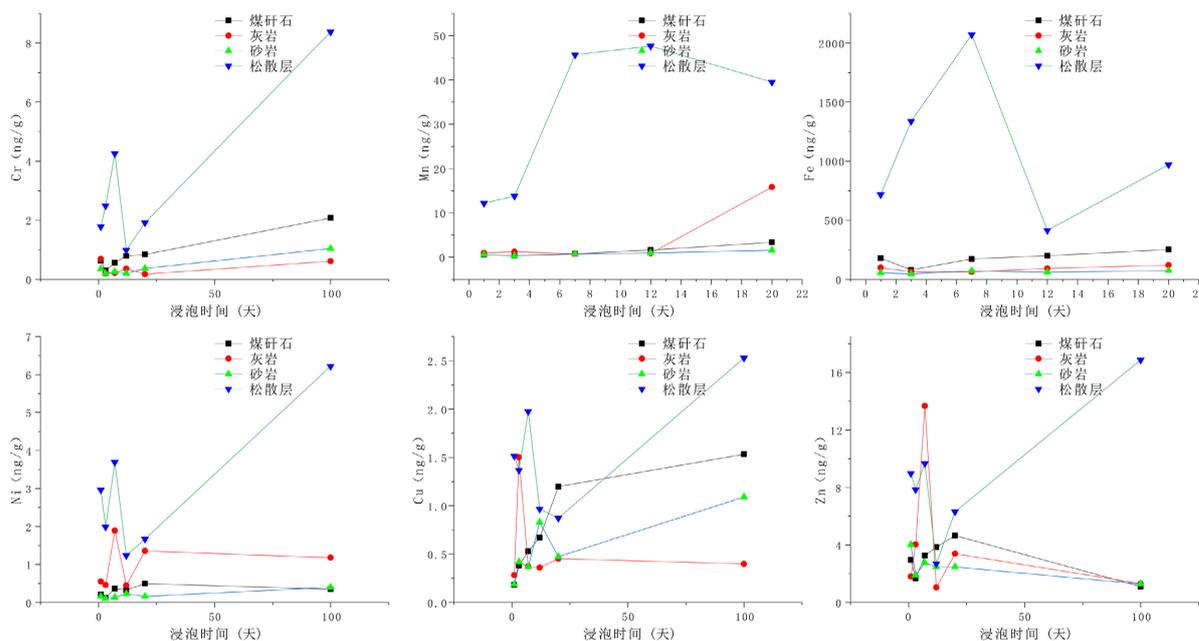


Figure 5. Changes in Cr, Mn, Fe, Ni, Cu and Zn concentrations in rock soaking solutions from different aquifers
图 5. 不同含水层岩石浸泡液中 Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn 浓度变化曲线

通过不同含水层岩石浸泡液中重金属浓度变化曲线可以看出，在浸泡 100 天后，不同含水层岩石重金属浓度仍存在区别。进一步计算不同含水层岩石重金属元素溶解比率(浸泡液中重金属浓度/岩石重金属含量)，见表 2，Cr、Ni、Cu、Zn 等 4 种重金属元素的溶解比率在不同岩石中差别较大，松散层岩石这 4 种重金属溶解比率最大，其次为砂岩，灰岩最小。这种重金属元素溶解比率的差异可能是岩石粒度、孔隙率、成分等差异造成。如：松散层岩石浸泡后松散，粒度变小，水接触面积增大，溶解率较大。

Table 2. Dissolution ratios of heavy metal elements in rocks from different aquifers (10^{-3})

表 2. 不同含水层岩石重金属元素溶解比率(10^{-3})

	Cr	Ni	Cu	Zn
灰岩	0.02	0.02	0.03	0.02
砂岩	0.03	0.05	0.19	0.02
松散层岩石	0.52	0.60	0.52	0.73

5. 结论

基于皖北矿区水岩相互作用研究较少的现象,本研究采取典型煤矿主要含水层砂岩、灰岩、松散层等岩石进行浸泡实验,探究不同岩石溶解释放规律,得出以下结论:

1) 煤矸石、灰岩、砂岩、松散层阳离子浓度最大的均为 Na^+ , 阴离子浓度最大的均为 HCO_3^- , 且 Na^+ 和 HCO_3^- 浓度随浸泡时间变化具有相似的增长趋势。

2) 不同含水层岩石浸泡溶液的水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型, 可能由于岩石中钠长石矿物随着浸泡时间释放至水溶液中, 导致 Na^+ 和 HCO_3^- 浓度较高。

3) 松散层浸泡液中 Fe 浓度值大于 0.3 mg/L , 高于生活饮用水标准, 其他浸泡液中各种元素浓度值均低于生活饮用水标准。

4) 灰岩、砂岩、松散层岩石浸泡液中 Cr 、 Ni 、 Cu 、 Zn 元素溶解比率大小为灰岩 < 砂岩 < 松散层岩石。

基金项目

安徽省高校自然科学基金项目(2023AH052232), 矿井水资源化利用安徽普通高校重点实验室开放课题(KMWRU202202)。

参考文献

- [1] 令狐昌卫, 寸得欣, 尹林虎, 等. 滇东典型煤矿区地表水地下水化学特征及控制因素[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13728-13740.
- [2] 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.
- [3] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304-316.
- [4] 殷晓曦. 采动影响下宿县-临涣矿区地下水循环-水化学演化及其混合模型研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [5] 谢文苹, 冯晓青, 张能钦, 等. 皖北矿区地下水稀土元素地球化学特征研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(6): 1562-1569.
- [6] 陈松, 桂和荣, 孙林华, 等. 皖北卧龙湖煤矿多含水层地下水稀土元素特征及其意义[J]. 稀土, 2014, 35(3): 94-100.
- [7] 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, 818.
- [8] 王周锋, 郝瑞娟, 杨红斌, 等. 水岩相互作用的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 210-216.
- [9] 肖利萍, 梁冰, 陆海军, 等. 煤矸石中某些物淋溶释放特点的实验分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 19-22.
- [10] 邓为难, 伍昌维. 煤矸石模拟浸泡和淋溶实验污染物释放特点的研究[J]. 煤炭技术, 2013, 32(5): 142-144.
- [11] 周辰昕, 李小倩, 周建伟. 广西合山煤矸石重金属的淋溶实验及环境效应[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 135-141.
- [12] 琚棋定. 宿南矿区地下水环境地球化学演化机理及健康风险研究[D]: [博士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [13] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB5749-2022 生活饮用水卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.