

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2021.04.015

硫酸铵浸出离子型稀土矿对土壤和地下水污染的研究现状

张 培 谢海云 曹广祝 晋艳玲 柳彦昊 孙 瑞 冯艳虎

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 我国的离子型稀土矿多采用硫酸铵原地浸出工艺富集, 该工艺对土壤和地下水均会造成污染。根据硫酸铵原地浸出稀土矿的机理和工艺现状, 分析了在浸出过程中对土壤和地下水环境所造成的氨氮污染、重金属污染、稀土元素污染及酸化等。总结了浸矿中所产生的 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 H^+ 、重金属离子、稀土离子等污染物在土壤和地下水中的迁移及转化路径。各污染物随浸出液通过渗透作用进入土壤和地下水, 在此过程中, 部分 NH_4^+ 被氧化为 NO_2^- 、 NO_3^- , SO_4^{2-} 被还原为 S^{2-} 以及 Ca^{2+} 反应生成 CaSO_4 。

关键词: 离子型稀土矿; 硫酸铵; 原地浸矿; 水土污染

中图分类号: X523; X53 文献标志码: A 文章编号: 1005-7854(2021)04-0095-08

Current status of research on soil and groundwater contamination by ammonium sulfate leaching of ionic rare earth ores

ZHANG Pei XIE Hai-yun CAO Guang-zhu JIN Yan-ling LIU Yan-hao
SUN Rui FENG Yan-hu

(Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Most of the ionic rare earth ores in China are enriched by ammonium sulfate in-situ leaching process, which may cause pollution to both soil and groundwater. According to the mechanism and process status of ammonium sulfate in-situ leaching of rare earth ores, the pollution of ammonia-nitrogen, heavy metals, rare earth elements and acidification caused to the soil and groundwater environment during the leaching process were analyzed. The migration and transformation paths of NH_4^+ , SO_4^{2-} , H^+ , heavy metal ions, rare earth ions and other pollutants produced in the leaching ore in soil and groundwater were summarized. Each pollutant enters the soil and groundwater with the leachate through percolation, and in this process some NH_4^+ is oxidized to NO_2^- and NO_3^- , SO_4^{2-} is reduced to S^{2-} and reacts with Ca^{2+} to form CaSO_4 .

Key words: ionic rare earth ore; ammonium sulfate; in-situ leaching; soil and water pollution

收稿日期: 2021-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41562012)

第一作者: 张培, 硕士研究生, 研究方向为矿物加工。E-mail: 2267902456@qq.com

通信作者: 谢海云, 博士, 副教授; E-mail: xie-haiyun@163.com

曹广祝, 博士, 教授; E-mail: 398759614@qq.com

稀土以其独特的性能广泛应用于高新科技领域, 是现代新能源汽车、人工智能以及国防事业等领域的关键元素^[1,2], 也是不可替代的战略矿产资源。随着高新技术产业的发展, 国际市场对稀土的需求量不断增加^[3,4]。我国素称“稀土王国^[5-7]”, 已探明的稀土储量约为 5 200 万 t, 占世界稀土总储量的 41.36%, 稀土产品在世界稀土

市场中占据主导地位, 约占世界生产量的 95.6%^[8-10]。我国的稀土矿以碱性岩-碳酸盐型、花岗岩型、砂矿型及风化壳离子吸附型为主^[11], 其中离子型稀土矿以重稀土元素为主, 其储量占我国重稀土资源的 90%, 主要分布在江西、福建、广东、浙江等地。

离子型稀土矿中稀土元素以离子形式稀散吸附于矿物中, 品位较低, 采用传统物理选矿工艺, 如浮选、磁选、重选、电选等^[12]很难实现对离子型稀土的富集。目前, 离子型稀土矿的提取主要采用原地浸矿工艺^[13], 该工艺最显著的特点是不进行稀土原矿的搬运, 对自然植被的破坏小。原地浸矿的原理是利用硫酸铵溶液中的 NH_4^+ 与稀土矿中的稀土离子发生离子交换反应, 使稀土组分进入浸出液, 再对收集到的浸出液进行除杂、澄清、沉淀、过滤、灼烧等工艺处理^[14], 最后得到稀土氧化物产品。《离子型稀土矿原地浸出开采技术规范》^[15]规定硫酸铵溶液与矿石体积比值为 0.33/1, 可见, 浸出过程中将向矿层中注入大量的硫酸铵溶液用于置换稀土离子。已有研究^[16,17]表明, 浸出过程中浸出剂 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 H_2SO_4 、稀土自身等均会对周边土壤和地下水带来污染。随离子型稀土矿原地浸出工艺的普及, 由其引起的环境污染问题也日益突出。鉴于此, 本文根据硫酸铵原地浸出稀土矿的机理和工艺现状, 全面分析浸出过程对土壤和地下水造成的污染, 以期对稀土矿提取过程中的污染防治提供一定的参考。

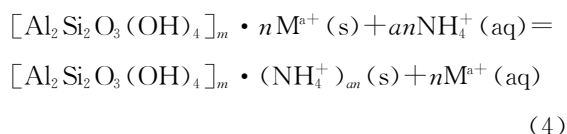
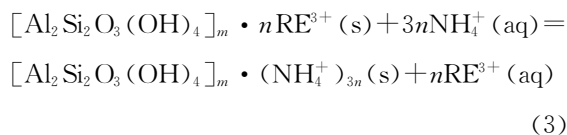
1 硫酸铵浸出稀土矿的机理

离子型稀土矿中 75%~95% 的稀土元素以离子状态吸附于高岭土、硅铝酸盐、蒙脱石、云母等矿物中。已有的研究^[18-20]表明, 硫酸铵是离子型稀土矿的高效浸出剂, 吸附在矿物表面的稀土离子能与化学性质更活跃的阳离子 (K^+ 、 NH_4^+ 、 Na^+ 等) 发生离子交换反应, 使稀土离子被置换出来进入溶液, 再对浸出母液进行一系列处理, 从而实现对离子型稀土的提取。硫酸铵原地浸矿及提取工艺主要过程及反应为:

1) 硫酸铵的电离与水解, 如式 1 和式 2。

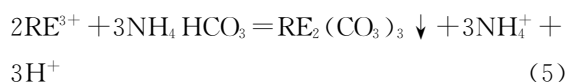


2) 硫酸铵浸出稀土矿时, 发生的主要化学反应见式 3 和式 4。

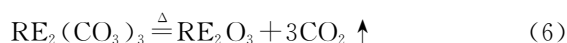


式中, RE^{3+} —稀土矿中的稀土离子; M^{a+} —稀土矿中的杂质离子 (Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 等); a —稀土矿中杂质离子的电荷数。

3) 向浸出液中加入碳酸氢铵溶液, 使其中的 RE^{3+} 离子转化为沉淀, 其反应见式 5。



4) 将得到的碳酸型稀土进行洗涤和灼烧处理, 其发生的反应方程式见式 6。



通过对浸出液进行除杂、澄清、沉淀、过滤、洗涤、灼烧等处理, 最终获得固体稀土氧化物产品。

2 硫酸铵原地浸矿工艺

目前, 我国硫酸铵浸出离子型稀土采用原地浸矿工艺, 主要包括浸矿剂注入系统、浸出液收集系统以及后续的一系列工作^[21,22]。硫酸铵原地浸矿工艺又被称为溶浸采矿^[23], 是指在较少破坏地表植被的情况下, 使稀土原矿处于天然的状态下, 直接在矿山上钻打孔洞使其到达矿山稀土原矿所存在的含矿层, 并在矿体下部布设浸出液收集沟, 然后向孔洞中注入硫酸铵溶液。在收集沟中收集含有一定稀土离子浓度的浸出液, 将浸出液导流至指定地点, 进行进一步的加工, 通过采用沉淀的方法把稀土离子分离出来, 然后经过灼烧得到稀土氧化物。硫酸铵原地浸矿工艺流程图如图 1 所示。

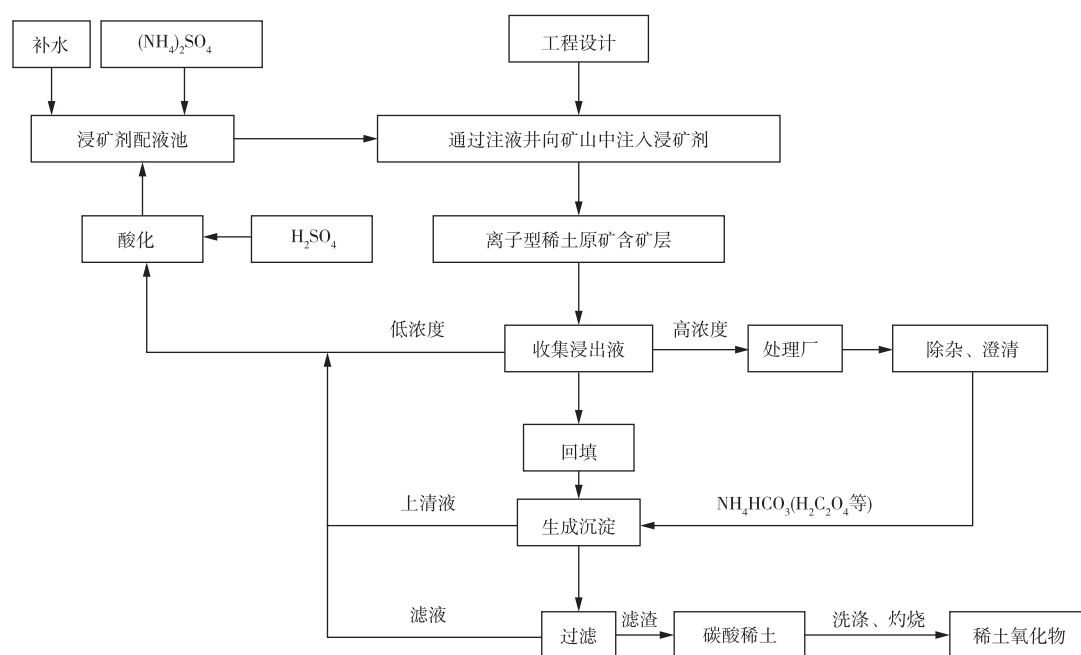


图1 硫酸铵原地浸矿工艺流程

Fig. 1 Flowsheet of in-situ leaching of ammonium sulfate

3 硫酸铵浸出稀土矿对土壤和地下水的污染现状

硫酸铵原地浸矿工艺具有操作简单及成本低等优点，但由于浸出过程中需要向矿层中注入大量的硫酸铵溶液来置换稀土离子，在这一过程中，产生 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 H^+ 、稀土离子 RE^{3+} 以及 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等离子污染源，因此该工艺会造成土壤污染及水体污染等环境问题。

3.1 土壤污染分析

土壤指岩石圈表面的一层疏松物质，是生物圈中物质交换和能量循环的重要场所，也是我们生活中不可缺少的物质财富^[24,25]。在稀土的原地浸矿过程中，浸矿剂硫酸铵、硫酸及含稀土的浸出液直接进入矿层，通过雨水冲刷及渗透，残留在矿层中的硫酸铵溶液、未被置换的稀土离子以及伴生在稀土矿中的重金属离子等随雨水进入到矿区的土壤中，对土壤造成氨氮污染、酸化、重金属超标及板结和贫瘠化等影响。

3.1.1 氨氮污染

浸矿剂以及废水进入土壤，由于其中含有大量的 NH_4^+ ，在土壤中微生物的作用下发生硝化反应生成 NO_2^- 和 NO_3^- ，从而导致土壤中的氨氮

含量增加，造成土壤的氨氮污染^[26]。刘斯文等^[27]研究了离子型稀土矿浸出对周边土壤的影响，发现进入土壤中的 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 呈底部富集趋势，分光光度分析结果显示 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量远超过背景值， NO_2^- 含量是背景值的3~6倍，土壤中大量 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 富集主要是因为浸出离子型稀土矿过程中使用大量的硫酸铵溶液所致。

3.1.2 土壤酸化

在对稀土矿原地浸出过程中，由于可能存在防渗层破损以及收集系统不完善等原因导致浸矿剂直接进入土壤。黄园英等^[25]采用土壤原位pH计对浸矿后的离子型矿山周围土壤的pH值进行了检测，结果显示矿山周边土壤的pH值为3.2~3.6，与原始土壤的pH值相比，土壤酸化严重。原地浸矿后残留的硫酸铵和硫酸浓度较高，岩土体长期处在含水量饱和的状态下，使岩土软化^[28]、酸化。矿层中残留的硫酸和酸性硫酸铵经过雨水的冲刷作用进入到土壤中，导致土壤的pH值下降，改变了土壤的环境特性。

3.1.3 重金属污染

罗海霞等^[29]运用环境污染指数法，对川南某稀土矿区土壤中的重金属污染程度进行评价，结果显示该稀土矿区土壤中的 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 等重金属

离子污染程度已达到重度污染范围。经分析,土壤的重金属污染主要来源于两个方面,一是酸性浸矿剂使土壤被酸化,进而诱导土壤中原本不活跃的重金属离子析出^[30];另一方面,在稀土矿浸出过程中,稀土离子以及伴生在稀土矿中的重金属离子随着浸出液进入到土壤,造成土壤中的重金属含量超标。

3.1.4 土壤板结和贫瘠化

浸出过程中, SO_4^{2-} 会结合土壤中游离的 Ca^{2+} 等,在土壤中生成稳定的 CaSO_4 等硫酸盐,使游离状态的钙离子等减少,加速土壤中矿物质营养元素的流失,使土壤的肥力、功能严重退化并改变土壤结构以及物理化学性质,导致土壤贫瘠化。此外,由于所生成的硫酸钙等物质的粘结性强、透水透气性较差,长期逐渐沉积于土壤中造成土壤板结。与此同时,土壤的通气性是影响土壤氧化还原电位的主要因素之一^[31],土壤板结降低了土壤通气性,使土壤氧化还原电位降低,土壤中的重金属元素发生吸附反应,从而影响重金属在土壤中的形态分布。

3.2 地下水污染分析

地下水资源作为人类生活用水最主要的淡水资源,水质的优劣状况是确保人们能否正常生活饮用以及身体健康的根本保证。地下水由于本身处于地表以下,出现污染情况时不易被发现,具有隐蔽性;同时由于地下水的流动性很慢以及自身的自我净化能力较弱^[32,33],地下污染具有不可逆性。采用稀土原地浸出工艺,由于受到地质条件的影响以及施工条件、施工技术的限制等因素,浸矿剂进入稀土矿层中渗漏或者未被完全的收集,部分浸矿液会经过土壤入渗到地下水环境中,造成地下水氨氮污染、酸化、重金属污染及稀土离子污染等问题。

3.2.1 水体氨氮污染及酸化

由于原地浸矿工艺所需的浸矿剂量比较大,在矿山中残留的浸矿剂的含量也比较多,废水中氨氮的含量严重超标。稀土浸出液及废水通过渗透作用逐渐扩散到地下含水层中,其中的 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 在土壤中易随淋滤过程向下入渗迁移,使地

下水中的氨氮浓度增加,造成地下水的氨氮污染^[34]。此外,由于硫酸铵溶液呈酸性,进一步加重了水体的酸化,导致地下水中的溶解性总固体含量增多,碳酸盐类物质的溶解使总硬度升高,影响人们正常的生活饮用。

3.2.2 重金属污染

pH值对地下水中锰元素的转移和富集起着重要作用。地下水中锰离子的含量会随地下水pH值的降低而增加^[35],pH值越低,地下水中的氢氧根离子含量少,以致无法使锰元素沉淀。HAO等^[36]对安远县某稀土矿开采区的浅层地下水的水质进行了评价,结果表明稀土矿开采区浅层地下水水样中的锰含量远超过地下水环境质量标准中的规定值。陈志澄等^[37]对南方某稀土矿区周围环境水系中的重金属检测结果表明,铅、铜、锌、镉重金属离子对地下水的污染较为严重。综合以上分析,由于稀土矿中伴生有铜、锌、铅、锰、镉等重金属离子,在原地浸矿工艺,残留在注入井的浸矿剂,在雨水的作用下,将会携带着稀土以及重金属离子进入到土壤和下游地表水中,再通过入渗的方式进入到地下水中,使地下水遭到重金属的污染。

3.2.3 稀土元素对水体的污染

稀土元素会随着浸矿母液进入地下水中,由于稀土元素具有富集作用,而且能够通过食物链进入人体,当含量达到一定程度时会对人体产生毒害作用。刘斯文等^[27]使用等离子质谱仪对离子型稀土矿区周边水体中的稀土元素含量进行了检测,结果表明处于矿区的水体水样中均检测出稀土元素,且远超过非矿区水体中稀土元素总量的平均值,最高达到千倍以上。

3.3 硫酸铵原地浸出稀土矿时污染物在土壤、地下水中的迁移转化

目前,我国广泛采用硫酸铵原地浸矿工艺来浸出离子型稀土矿。浸矿过程中由于地质结构复杂、施工技术限制、浸出液跑、冒、滴、漏及雨水冲刷等因素的影响,导致含有硫酸铵、硫酸及稀土元素的浸出液逐渐渗入土壤和地下水中,各污染物在土壤、地下水中的迁移转化形态及路径如图2所示。

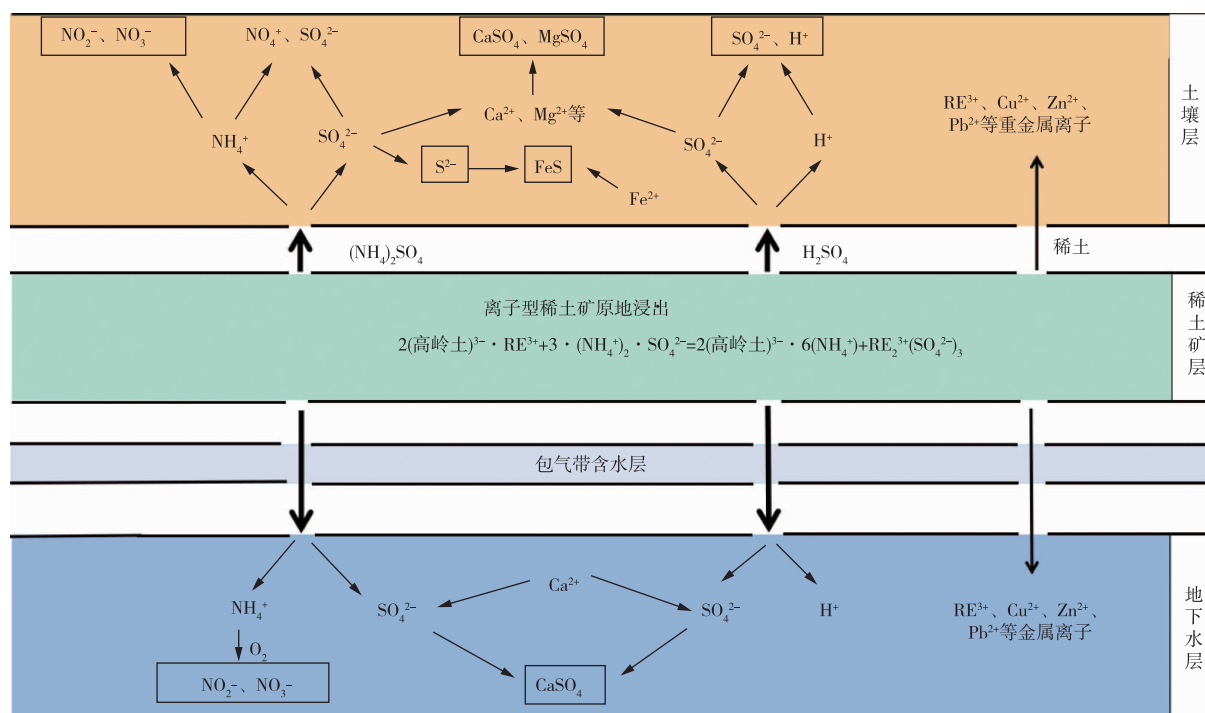


图2 硫酸铵浸出离子型稀土矿时各污染物在土壤和地下水中的迁移转化

Fig. 2 Translocation and transformation of pollutants in soil and groundwater during leaching of ionic rare earth ore with ammonium sulfate

由图2可见,浸出剂 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 H_2SO_4 和稀土是造成水土环境污染的主要污染源。在土壤层中,各污染物的迁移转化路径为:1) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 先转化为 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} , NH_4^+ 在微生物的作用下发生硝化反应转变为 NO_2^- 和 NO_3^- ,部分 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 结合分别生成 CaSO_4 、 MgSO_4 ,部分 SO_4^{2-} 被还原为 S^{2-} 后再与土壤中的金属离子反应生成相应的硫化物(如 FeS);2) H_2SO_4 先转化为 SO_4^{2-} 和 H^+ ,部分 SO_4^{2-} 与土壤中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 结合分别生成 CaSO_4 、 MgSO_4 ;3)稀土元素及其伴生的重金属离子随浸出液入渗到土壤中。在地下水层中,污染物的迁移转化路径为:1)进入地下水中的 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} , NH_4^+ 被进一步氧化为 NO_2^- 和 NO_3^- , SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 结合生成 CaSO_4 ;2) H_2SO_4 先转化为 SO_4^{2-} 和 H^+ , SO_4^{2-} 与地下水中的 Ca^{2+} 生成 CaSO_4 ;3)进入土壤的稀土元素及其伴生的重金属离子通过渗透作用进入到地下水。

4 结论与展望

1)硫酸铵浸出离子型稀土矿通过离子交换反应来实现对稀土的逐步富集。浸矿过程中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 以及 H^+ 是最主要的污染源;同时,稀土矿

中伴生的重金属离子和溶出的稀土离子,如 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 及 RE^{3+} 均会污染土壤和地下水。

2)硫酸铵原地浸矿工艺对土壤造成的污染主要体现在氨氮污染、土壤酸化、重金属污染、土壤板结和贫瘠化等方面。

3)浸出液通过渗透作用进入地下含水层中,造成地下水酸化及氨氮污染、总硬度上升、重金属污染、硫酸盐含量增加以及稀土元素污染等。

4)应进一步开发复配浸出剂、无铵浸出剂等绿色浸出剂,完善稀土原地浸出技术工艺,尽可能从源头上减少对土壤和地下水等生态环境的影响。

参考文献

- [1] 张丹琳. 当前稀土资源现状与供需形势分析[J]. 国土资源情报, 2020(5): 37-41.
ZHANG D L. Current situation of rare earth resources and analysis of supply and demand [J]. Land and Resources Information, 2020(5): 37-41.
- [2] MOLDOVEANU G A, PAPANGELAKIS V G, GOODENOUGH K. An overview of rare-earth recovery by ion-exchange leaching from ion-adsorption clays of various origins[J]. Mineralogical Magazine, 2016, 80(1): 63-76.

- [3] MOLDOVEANU G A, PAPANGELAKIS V G. Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: I. Desorption mechanism[J]. Hydrometallurgy, 2012(117): 71-78.
- [4] 李恒凯. 南方稀土矿区开采与环境影响遥感监测与评估研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2016: 1-137.
- LI H K. Study on remote sensing monitoring and assessment of rare earth mining and environmental impact in southern China [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016: 1-137.
- [5] 刘琦, 周芳, 冯健, 等. 我国稀土资源现状及选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 76-83.
- LIU Q, ZHOU F, FENG J, et al. Current situation of rare earth resources in China and progress of mineral processing technology [J]. Protection and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 76-83.
- [6] 刘祖文, 张军. 离子型稀土矿区土壤氮化物污染机理[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(2): 2.
- LIU Z W, ZHANG J. Mechanism of soil nitrite pollution in ionic rare earth mining areas [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(2): 2.
- [7] 徐水太, 项宇, 刘中亚. 离子型稀土原地浸矿地下水氨氮污染模拟与预测[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 7(2): 140-146.
- XU S T, XIANG Y, LIU Z Y. Simulation and prediction of groundwater ammonia nitrogen pollution in in-situ leaching of rare earth ions [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2016, 7(2): 140-146.
- [8] 李文龙. 我国稀土产业可持续发展问题研究[J]. 科学管理研究, 2011, 29(1): 102-105.
- LI W L. Research on sustainable development of rare earth industry in China [J]. Scientific Management Research, 2011, 29(1): 102-105.
- [9] 伍红强. 离子型稀土矿抑杂浸出工艺及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012: 1-70.
- WU H Q. Research on leaching process and mechanism of ionic rare earth ore [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2012: 1-70.
- [10] 杨卓凡. 我国稀土资源开采现状及发展趋势[J]. 西部资源, 2015, (5): 50-81.
- YANG Z F. Current situation and development trend of rare earth resources exploitation in China [J]. Western Resources, 2015(5): 50-81.
- [11] 张苏江, 张立, 张彦文, 等. 国内外稀土矿产资源及其分布概述[J]. 无机盐工业, 2020, 52(1): 9-16.
- ZHANG S J, ZHANG L, ZHANG Y W, et al. Overview of rare earth mineral resources and their distribution at home and abroad [J]. Inorganic Salt Industry, 2020, 52(1): 9-16.
- [12] 黄金. 离子型稀土矿浸出过程及工艺优化研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015: 1-104.
- HUANG J. Research on leaching process and process optimization of ionic rare earth ore [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015: 1-104.
- [13] 陈斌, 祝怡斌, 翟文龙. 某离子型稀土矿采矿活动对地下水的影响分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(2): 63-66.
- CHEN B, ZHU Y B, ZHAI W L. Analysis of the influence of mining activities on groundwater in an ion-type rare earth mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2015, 67(2): 63-66.
- [14] 万广越. 赣南某离子型稀土矿土壤质量退化特征及修复[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017: 1-69.
- WAN G Y. Soil quality degradation characteristics and remediation of an ionic rare earth mine in southern Jiangxi [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017: 1-69.
- [15] 秦磊, 王观石, 罗嗣海, 等. 离子型稀土矿浸矿剂用量计算模型[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1781-1789.
- QIN L, WANG G S, LUO S H, et al. Calculation model of leaching agent amount for ionic rare earth ore [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(8): 1781-1789.
- [16] 王瑞苹. 江西赣南离子型稀土矿原地浸矿可能引发的环境问题[J]. 科技资讯, 2012(33): 150-151.
- WANG R P. Environmental problems caused by in-situ leaching of ion-type rare earth ore in southern Jiangxi Province [J]. Science and Technology Information, 2012(33): 150-151.
- [17] 郭钟群, 赵奎, 金解放, 等. 离子型稀土矿环境风险评估及污染治理研究进展[J]. 稀土, 2019, 40(3): 115-126.
- GUO Z Q, ZHAO K, JIN J F, et al. Research progress on environmental risk assessment and pollution control of ionic rare earth ore [J]. Rare Earth, 2019, 40(3): 115-126.
- [18] 李先柏. 风化淋积型稀土矿原地浸出原理及方法探讨[J]. 湖南有色金属, 1993(3): 157-161.

- LI X B. Discussion on the principle and method of in-situ leaching of weathered and eluviated rare earth ores [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 1993(3): 157-161.
- [19] 史晓燕, 陈宏文. 废弃池浸堆浸离子型稀土矿污染途径及其修复研究[J]. *中国稀土学报*, 2019, 37(4): 409-417.
- SHI X Y, CHEN H W. Research on pollution pathway and remediation of ion-type rare earth ore by waste tank heap leaching [J]. *Chinese Journal of Rare Earth Sciences*, 2019, 37(4): 409-417.
- [20] 胡胜龙, 刘静. 赣南离子型稀土矿的开采及其对环境的影响[J]. *磁性材料及器件*, 2018, 49(3): 61-63.
- HU S L, LIU J. Mining of ionic-type rare earth ore in southern Jiangxi Province and its influence on environment [J]. *Magnetic Materials and Devices*, 2018, 49(3): 61-63.
- [21] NIE W, ZHANG R, HE Z, et al. Research progress on leaching technology and theory of weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 193: 105295.
- [22] 邹国良, 吴一丁, 蔡嗣经. 离子型稀土矿浸取工艺对资源、环境的影响[J]. *有色金属科学与工程*, 2014, 5(2): 100-106.
- ZOU G L, WU Y D, CAI S J. Effect of leaching process on resources and environment of ionic rare earth ore [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2014, 5(2): 100-106.
- [23] 刘凯, 邓祥义, 左小华. 风化壳淋积型稀土矿浸取工艺及其发展趋势[J]. *湖北理工学院学报*, 2013, 29(2): 32-36.
- LIU K, DENG X Y, ZUO X H. Leaching process of eluviation type rare earth ore in weathering crust and its development trend [J]. *Journal of Hubei Institute of Technology*. 2013, 29(2): 32-36.
- [24] 高咪. 稀土钇和浸矿剂硫酸铵胁迫对土壤理化性质和微生物群落的影响研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016: 1-81.
- GAO M. Effects of rare earth yttrium and leaching agent ammonium sulfate stress on soil physical and chemical properties and microbial community [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016: 1-81.
- [25] 文士茵. 矿山开采对地下水污染风险评估研究[J]. *环境与发展*, 2019, 31(1): 54-55.
- WEN S Y. Research on groundwater pollution risk assessment of mining[J]. *Environment and Development*, 2019, 31(1): 54-55.
- [26] 王凡, 朱云集, 路玲. 土壤中的硫素及其转化研究综述[J]. *中国农学通报*, 2007(5): 249-253.
- WANG F, ZHU Y J, LU L. A review of sulfur and its transformation in soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007(5): 249-253.
- [27] 刘斯文, 黄园英, 朱晓华, 等. 离子型稀土采矿对矿山及周边水土环境的影响[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(6): 25-32.
- LIU S W, HUANG Y Y, ZHU X H, et al. Influence of ion rare earth mining on soil and water environment of mine[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 38(6): 25-32.
- [28] 尚锦燕. 离子型稀土矿开采工艺对环境的影响及综合治理[J]. *现代矿业*, 2020, 36(12): 234-238.
- SHANG J Y. Influence of mining technology on environment and comprehensive treatment of ionic rare earth ore [J]. *Modern Mining*, 2020, 36(12): 234-238.
- [29] 张军. 离子型稀土矿区重金属污染调查及Pb形态转化过程研究[D]. 江西 赣州: 江西理工大学, 2019: 1-63.
- ZHANG J. Investigation on heavy metal pollution and Pb speciation transformation process in ionic rare earth mining area [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019: 1-63.
- [30] LIU Z W, LU C B, YANG S, et al. Release characteristics of manganese in soil under ion-absorbed rare earth mining conditions[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2020, 29(7): 1-18.
- [31] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. *矿产综合利用*, 2017(6): 5-9.
- HAN Z X, WAN D J, HU J P, et al. Migration and transformation of heavy metals in soil and its influencing factors [J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2017(6): 5-9.
- [32] 刘滢雪. 地下水污染的主要途径、危害及其防治问题探究[J]. *资源节约与环保*, 2017(11): 50-58.
- LIU Y X. Research on the main ways, harms and prevention of groundwater pollution[J]. *Resources Conservation and Environmental Protection*, 2017(11): 50-58.
- [33] 罗家珂. 风化壳淋积型稀土矿提取技术的进展[J]. *国外金属矿选矿*, 1993(12): 19-28.
- LUO J K. Progress in extraction technology of eluviated rare earth ores from weathering crust [J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 1993(12): 19-28.