

微生物技术在离子吸附型矿床中开采稀土元素的研究进展

毕然, 张海文, 董春放, 郭心荷, 傅旋霓, 黄海钊

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年8月11日; 录用日期: 2023年9月21日; 发布日期: 2023年10月16日

摘要

微生物采矿技术具有成本更低、更环保、更可持续的优点。本文综述了利用微生物技术从离子吸附稀土矿物中提取稀土元素的研究进展。为提高离子吸附稀土矿床稀土元素的回收率和效率, 提出了一种新的思路和方法。本文分析了现有的采矿技术, 讨论微生物在稀土元素生物矿化过程中的作用, 评价了该技术的优缺点, 并展望了其未来的应用前景。这对稀土元素的可持续开发利用具有重要意义。未来需要进一步加强微生物采矿技术的基础研究和应用开发, 以提高稀土元素的回收率和效率。

关键词

离子吸附型矿床, 稀土元素, 微生物技术, 嗜酸硫氧化亚铁杆菌

Research Progress of Rare Earth Elements Extraction in Ion-Adsorbed Rare-Earth Deposits by Microbial Technology

Ran Bi, Haiwen Zhang, Chunfang Dong, Xinhe Guo, Xuanni Fu, Haizhao Huang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Aug. 11th, 2023; accepted: Sep. 21st, 2023; published: Oct. 16th, 2023

Abstract

Microbial biomining technology has the advantages of lower cost, more environmental friendly and more sustainable. This paper is a review on the extraction of rare earth elements from ion-adsorbed rare-earth deposits minerals using microbial biomining methods. A new idea and

文章引用: 毕然, 张海文, 董春放, 郭心荷, 傅旋霓, 黄海钊. 微生物技术在离子吸附型矿床中开采稀土元素的研究进展[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(10): 1139-1146. DOI: 10.12677/ag.2023.1310108

method is proposed to improve the recovery and efficiency of rare earth elements in ion-adsorbed rare earth deposits. This paper analyzes the existing biomining technologies, discusses the role of microorganisms in the process of rare earth element biomining, evaluates the advantages and disadvantages of this technology, and looks forward to its future application prospects. This is of great significance for the sustainable development and utilization of rare earth elements. Basic research and application development in microbial biomining technology needs to be further strengthened in the future to improve the recovery and efficiency of rare earth elements.

Keywords

Ion-Adsorbed Rare-Earth Deposits, Rare Earth Element, Microbial Technology, *Acidobacterium*

Copyright © 2023 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

离子吸附型稀土矿床是一种重要的稀土资源类型，分布广、储量大、开采成本低。稀土元素是具有重要应用价值的元素[1]，共存于离子吸附型矿床中[2]，在粘土颗粒表面的吸附行为是离子吸附沉积物形成的主要机制之一[3]。离子吸附型稀土矿床在开采和生产过程中会产生大量废弃物和污染物，高效利用与环境治理成为当前研究的热点问题之一，微生物技术作为一种绿色环保技术受到广泛关注。

微生物技术通过微生物代谢物或生物吸附剂在细胞表面溶解富集稀土元素，包括浸出法、生物吸附法和微生物固定化法[4]。近年来，越来越多的微生物被发现可用于稀土元素的生物开采。酸杆菌在极酸性条件下生长并释放大量有机酸，有效从离子吸附型稀土矿物中浸出稀土元素[5]。某些细菌和真菌在一定条件下能产生大量生物吸附剂[6]，有效去除溶液中的稀土元素。He 等人基于藻类/聚乙烯胺珠的磷酸化设计了一种新型的功能水凝胶，有效浸出稀土元素[7]。Barnett 等人对比曲霉或芽孢杆菌吸附富稀土离子沉积物与未接种对照和盐浸的生物特性。生物溶解度的增加，稀土元素和主元素的释放量随时间的增加而增加，且重稀土元素与轻稀土元素的比例较大[8]。

微生物技术无需使用强酸或强碱等有害化学试剂，有效减少环境污染，节约成本，有望实现离子吸附型稀土矿物的高效开采，解决稀土元素开采过程中面临的问题，提高稀土元素的回收率和利用效率，为稀土元素工业可持续发展做出贡献。

2. 离子吸附粘土环境中微生物的多样性与活性

2.1. 与离子吸附型稀土矿床相关的微生物群落

多金属浓缩生物浸出反应器内存在丰富的铁、硫、氧化亚氮和硝酸盐还原菌[9]，在矿物表面形成复杂的生物膜，加速金属的溶解，在多金属浓缩生物反应器中发挥重要的催化作用。

微生物在稀土元素循环中具有不可替代的作用，稀土元素作为催化甲醇氧化制甲醛的关键酶，对微生物非常重要。一些微生物利用稀土元素作为电子受体或供体来参与到氧化还原反应中；通过吸附和沉淀稀土元素来控制它们的迁移和转化。依赖镧系元素的微生物普遍存在于陆地和海洋环境中，Bayon 等人[10]在几个深海化学合成生态系统中采集了一个管螺壳，发现微生物在冷泉活动中对轻稀土元素的积极消耗与甲烷氧化过程有关，反映了镧系依赖的甲烷氧化活性，为稀土元素在古化石和海洋微生物群落历

史研究中的应用开辟了新视角。微生物在酸性矿山废水的净化中也起着重要的作用[10],产生酸性代谢物,降低环境 pH 值,并参与矿物溶解转化过程。一些微生物还可以利用废水中的硫化物、铁和氨氮等化合物为生长提供能量和碳源。

Table 1. Advantages of extraction of rare earth elements by different microorganisms

表 1. 不同微生物提取稀土元素的优点

文献	优点	菌种
Barnett [8]	产生的酸对矿石进行浸出,生物浸出稀土元素的潜力大	曲霉、芽孢杆菌
Sarswat [14]	提高稀土浸出率	深海微生物
Brisson [28]	优先溶解稀土元素,将钍留残留物	磷酸盐溶解真菌、黑曲霉 ATCC 3、曲霉菌株 ML1-3、 <i>Paecilomyces</i> spp.菌株 WE3-F
Meas [34]	连续循环提取,选择性提取 Nd、La	拟青霉菌株

2.2. 稀土元素生物矿化过程中微生物的多样性

原位浸出技术广泛应用于离子吸附型稀土矿床的开采,但造成了严重的环境问题和采矿土壤生态系统的恶化。原位浸出后土壤中的原核微生物和氢氧化微生物[11]、微生物的群落和功能基因,离子型稀土元素和铵态氮是细菌群落结构的最强预测因子,有机质是古细菌群落变化的关键预测因子。微生物之间的良性互动可以提高它对这种恶劣环境的适应性或抵抗力。

在生物降解过程中,微生物与植物根际微生物之间存在密切关系,研究表明[12]青霉素,产气肠杆菌,多菌杆菌和腐菌、聚聚潘妥菌、假单胞菌等溶磷微生物可以有效地浸出独居石中的稀土元素。天然微生物群与已知 pms 结合使用比单独使用更有效。低分子量有机酸可以通过降低介质的 pH 值来促进稀土元素的释放,并可能与根际微生物有关。

植物群落的物种丰富度是影响微生物结构的主要因素,受采矿活动影响的土壤生态系统中,微生物多样性非常重要。研究发现[13],不同环境条件下利用高通量测序技术探究经过 10 年的自然恢复,废弃稀土矿区的微生物群落结构与未开发矿区仍有显著差异,稀土矿床微生物群落具有高度多样性,包括大量的铁载体菌和磷溶菌。

2.3. 微生物浸出稀土元素的代谢途径

Sarswat 等人[14] (表 1)概述了利用天然黄铁矿流进行生物氧化浸出所产生的酸和铁离子有助于提高稀土浸出率并去除残余硫化物,从而减少未来的环境问题和成本。M. J. Barnett 等人[15] (表 1)重点探索微生物代谢途径,有机酸、还原和氧化三种生物浸出技术对不同岩溶型铝土矿的试验结果,分析其优缺点,并探讨了未来改进的可能性。其中重稀土元素(通常是 Nd 至 Gd)的回收率最高,具体取决于铝土矿样品,尽管这些稀土元素可以通过有机和无机酸浸出,但生物浸出的回收率还有进一步提高的潜力。有机酸浸法操作简单,但稀土元素回收率较低。还原浸出需要氢气作还原剂,操作难度大,成本高。氧化浸出法需要大量的电力,并且使稀土元素的回收率相对较高。Keekan 等人[16]从实验的角度探讨了特定菌株在特定条件下的浸出效果,为促进稀有金属元素的可持续开发利用提供了重要的参考信息。

Payam Rasoulia [17]利用微生物提取矿物中稀土元素分为 4 个步骤(见图 1),微生物分泌代谢产物 HL,代谢产物解离出 H^+ 促使阴离子 X^{3-} 和稀土离子 Ln^{3+} 从矿物中释放, Ln^{3+} 与 H^+ 结合形成络合物,阴离子 X^{3-} 由微生物吸收,从而形成正向循环加速稀土元素从矿物中释放。

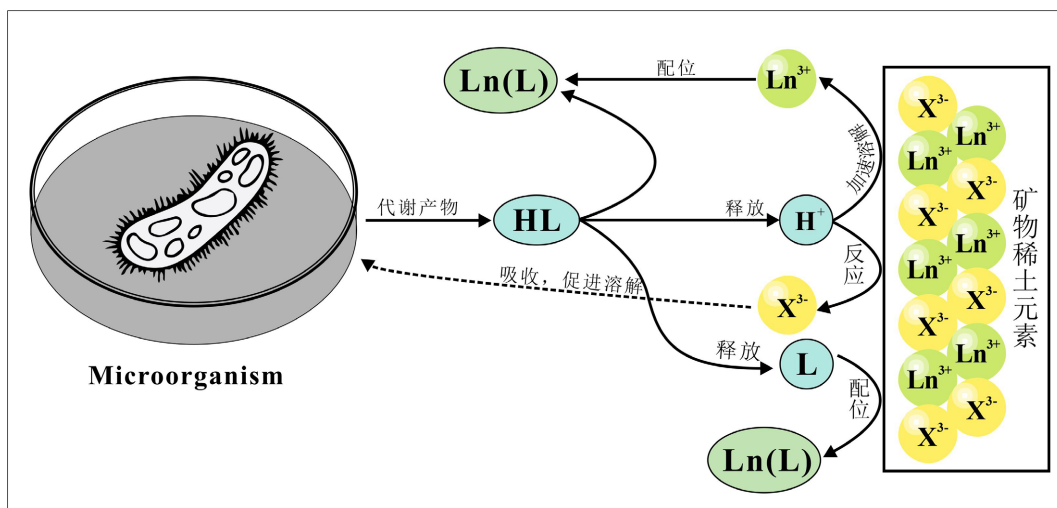


Figure 1. Schematic diagram of steps for extracting rare earth elements from minerals by microorganisms
图 1. 微生物提取矿物中稀土元素步骤示意图(据文献[17]修改)

3. 具有高生物矿化潜力的新型微生物与生物反应器设计与运行参数优化

在不同的环境中存在许多具有高生物利用潜力的新型微生物物种，在提高各种生物技术的效率方面发挥着重要作用，并逐渐应用于生物浸出、生物表面活性剂等领域。Bento 等人[18]从受石油污染的土壤和水样中分离出多种类型的微生物，具有产生生物表面活性剂的能力，可用于石油烃污染土壤的生物修复。Pereira 等人[19]报道了一株能有效生产生物表面活性剂的枯草芽孢杆菌新菌株，生产的表面活性剂结构与其表面活性相符，并对其最佳生产条件进行了研究。生物表面活性剂具有更好的界面活性和油藏增采效率，更适合用于微生物增强采油。Baba 等人[20]从尼日利亚闪锌矿和方铅矿沉积物中分离出一些酸性细菌，能有效促进 Zn 和 Pb 金属元素的生物降解。

微生物的繁殖和代谢活动对反应器参数的要求较高。其中，pH 值和温度之间存在显著交互作用，酸性介质、温度、氧化还原电位等因素对生物浸出效率具有重要影响。温度和 pH 值的最佳水平取决于浆密度的水平，在采用摇床生物反应器优化这些参数时，应仔细选择浆密度的水平[21]。旋转鼓生物反应器提供低颗粒碰撞效应的浆料中的微生物，具有出色的气液质量传递性能和低功耗，适用于生物浸出过程，气液固微生物反应系统[22]。回收这些金属可以降低废催化剂的环境影响，利用嗜酸硫氧化亚铁杆菌在悬浮气泡柱生物反应器中从加氢裂化废催化剂中回收重金属，缩短生物浸出过程的时间；在摇瓶中进行微生物对废催化剂的适应性实验，根据中心复合设计的要求，选取颗粒大小、浆密度和曝气率这三个因素进行实验，在最佳条件下，经过仅 7 天的批处理反应，就获得了金属元素的最大提取率，进一步用于工业目的[23]。微生物种类和浓度也是影响生物浸出的关键因素生物浸出过程受到许多生物因素的影响，如微生物群体和类别、生长速率、代谢活性等[24]。硫氧化细菌在一个空气升降式反应器中对沉积物中重金属生物浸出过程中，硫浓度增加可以提高 pH 值的下降速率、硫酸盐产生率和金属溶解率[25]。

通过高通量基因测序技术解析微生物基因组，构建特定功能的微生物菌株[26] [27]，为进一步探索微生物在金属和矿物提取中的作用机理提供了新思路，更好地应用于生物浸出等领域。

4. 利用微生物技术从离子吸附型矿床中提取稀土元素

4.1. 生物浸出稀土元素的效率和选择性

关于稀土元素的浸出效率和选择性有大量研究。为从稀土磷矿物中生物浸出稀土元素提供了一种可

持续、环保的方法, Brisson 等人[28]利用真菌从独居石中提取稀土元素,发现 1015 株真菌菌株能够利用稀土磷矿作为磷酸盐源从独居石中提取稀土元素,包括一种已知的磷酸盐溶解真菌和两种新分离的真菌,其生物淋滤优先溶解稀土元素,将钍留在固体残留物中。采用无细胞废介质浸出法或生物浸出法对独居石中稀土元素的释放效果较好。通过调节生长培养基的组成,可以提高生物浸出效果。有机酸在从独居石中释放稀土方面起着重要作用,其他尚未确定的化合物也有助于改善浸出性能,由生物体外部释放的化合物,包括乙酸、柠檬酸、葡萄糖酸、标志酸、草酸和琥珀酸,对浸出有很大的贡献。Schmitz 等人[29]建立了氧化葡萄糖杆菌 B58 的全基因组敲除集,并对多基因敲除突变菌株进行了研究,发现 304 个基因可以显著影响氧化葡萄糖杆菌的酸提物产量,包括 165 个与野生型显著不同的基因。其中,底物特异性转运系统 *pstSCAB*、*PQQ* 辅助因子合成基因和 *PQQ* 依赖膜结合葡萄糖脱氢酶基因是对稀土元素双溶效率影响最大的基因。

4.2. 与传统化学浸出方法的比较

微生物技术在提取稀土元素方面具有吸附污染物、处理固体废物等独特优势,与传统化学浸出方法相比,微生物技术具有更高的效率和更低的成本。但在实际应用中,微生物技术的可行性、稳定性和经济性有待进一步研究。

传统的稀土元素浸出和提取方法需要大量化学试剂和能源,产生大量固体和液体废物,难以处理和处置,增加环境问题和经济成本,对环境造成很大的污染影响[30]。离子吸附型矿床中稀土元素分散在沉积层中,含较多杂质,采用传统提取方法会产生大量废渣和低纯度稀土产品,且其他离子的干扰会降低提取效率;采用标准化的程序,在室温下快速有效地提取稀土元素,提高浸出液中稀土元素的浓度,但会降低稀土元素的提取率,固体残留物中含有非常少量的稀土元素和溶剂[3]。在传统方法中,操作复杂,需要专业人员和设备,成本高。例如,熔体氧化需要高温高压反应条件[31],浸出需要大型反应器和设备,增加制备过程的成本和时间。微生物技术在离子吸附型矿床的生长和代谢过程中提取稀土元素,是一种更可持续、更优越的提取方法,易于操作、环保、节能、产生的废物和污染物更少。

5. 离子吸附型矿床中稀土元素生物矿化的挑战与机遇

稀土元素在微生物采矿中的还原机理尚不完全清楚。由于稀土元素结构复杂、化学性质多变、微生物还原过程中涉及的酶和代谢物种类繁多,对微生物开采机理的认识仍然有限,在实际应用中存在一定的局限性。例如,微生物开采要求矿石必须具有一定的水分,细菌的生长条件需要特定的温度、pH 值等环境因素[32],影响微生物开采的效果。

Brisson 等人[28]发现生物碱可以在砂矿中提取稀土元素,但会导致重金属和化学物质污染土壤和水体。在实践中,需要控制浸出过程的 pH 和温度,减少废物产生,并实施回收和再利用策略,以减轻生物开采稀土元素对环境的影响。在生物矿化过程中,对地下水和地表水产生影响,并通过食物链影响人体健康。酸冶金产生大量的酸洗和泄漏,对当地环境产生负面影响。Chen 等人[33]提出应采取措施减少生物矿化对环境的影响,使用中和剂调节 pH 值,利用微生物生态系统减少稀土元素的浪费,推广可持续开采方法,提高回收利用率。Meas [34] (图 2) 等人使用拟青霉菌株分泌代谢物的上清液与柠檬酸对独居石矿尾砂进行七次连续循环提取稀土元素,第一次循环就将焙烧独居石样品中的 Nd、La 元素快速浸出,而 Th、Ce 回收率极低。考虑到 Th 作为放射性元素,将其作为留在尾矿中,有益于其他稀土元素的回收。

稀土元素是一类具有重要应用价值的材料,利用微生物技术从离子吸附型矿床中提取稀土元素的方法具有较高的实际意义、较低的环境污染风险和资源浪费风险。其生物效率和选择性优于传统的化学浸出方法,但也面临着技术挑战与环境问题。离子吸附型矿床中涉及的微生物具有活性以及群落的多样性,

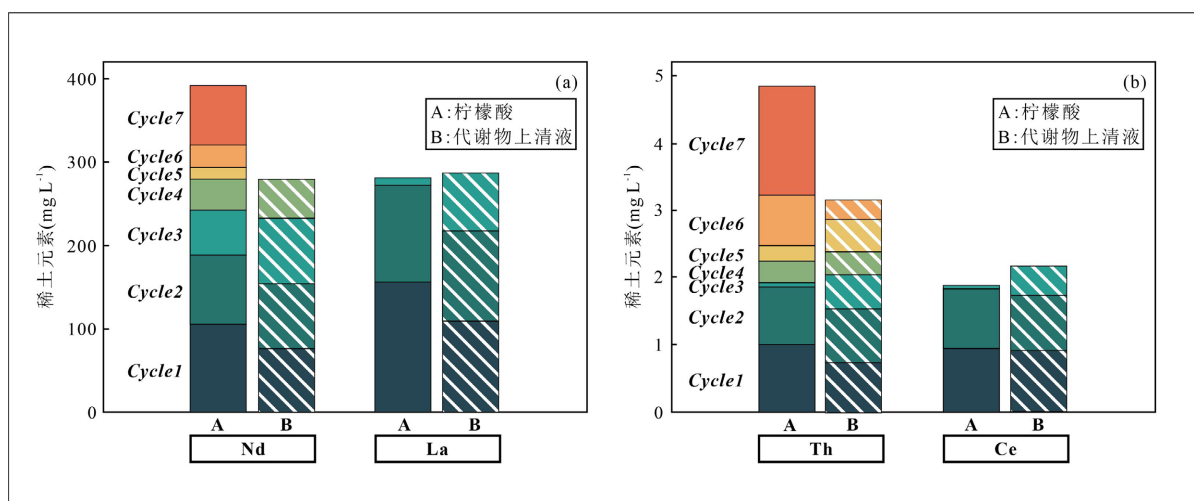


Figure 2. Schematic diagram of extracting rare earth elements from fungal secretions

图 2. 真菌分泌物提取稀土元素示意图(据文献[34]修改)

具有高生物利用潜力的新型微生物通过基因工程可以构建理想微生物，调整生物反应器的设计和操作参数的优化，选取颗粒大小、浆密度和曝气率以及 pH 值、温度、氧化还原电位等参数，达到适合的环境条件来实现从离子吸附型矿床中高效开采稀土元素。

参考文献

- [1] Weng, Z., Jowitt, S.M., Mudd, G.M. and Haque, N. (2015) A Detailed Assessment of Global Rare Earth Element Resources: Opportunities and Challenges. *Economic Geology*, **110**, 1925-1952. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.8.1925>
- [2] Wang, D.H., *et al.* (2018) Exploration and Research Progress on Ion-Adsorption Type REE Deposit in South China. *China Geology*, **1**, 415-424. <https://doi.org/10.31035/cg2018022>
- [3] Moldoveanu, G.A. and Papangelakis, V.G. (2016) An Overview of Rare-Earth Recovery by Ion-Exchange Leaching from Ion-Adsorption Clays of Various Origins. *Mineralogical Magazine*, **80**, 63-76. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.051>
- [4] Panda, S., *et al.* (2021) Biotechnological Trends and Market Impact on the Recovery of Rare Earth Elements from Bauxite Residue (Red Mud)—A Review. *Resources, Conservation and Recycling*, **171**, Article ID: 105645. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105645>
- [5] Tang, S., Zheng, C., Chen, M., Du, W. and Xu, X. (2020) Geobiochemistry Characteristics of Rare Earth Elements in Soil and Ground Water: A Case Study in Baotou, China. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 11740. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68661-4>
- [6] Lefticariu, L., Walters, E.R., Pugh, C.W. and Bender, K.S. (2015) Sulfate Reducing Bioreactor Dependence on Organic Substrates for Remediation of Coal-Generated Acid Mine Drainage: Field Experiments. *Applied Geochemistry*, **63**, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.08.002>
- [7] He, C., *et al.* (2021) Efficient Recovery of Rare Earth Elements (Pr(III) and Tm(III)) from Mining Residues Using a New Phosphorylated Hydrogel (Algal Biomass/PEI). *Metals*, **11**, Article No. 294. <https://doi.org/10.3390/met11020294>
- [8] Barnett, M.J., Palumbo-Roe, B. and Gregory, S.P. (2018) Comparison of Heterotrophic Bioleaching and Ammonium Sulfate Ion Exchange Leaching of Rare Earth Elements from a Madagascan Ion-Adsorption Clay. *Minerals*, **8**, Article No. 236. <https://doi.org/10.3390/min8060236>
- [9] Gouin, P., *et al.* (2009) Bioleaching of an Organic-Rich Polymetallic Concentrate Using Stirred-Tank Technology. *Hydrometallurgy*, **99**, 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.07.011>
- [10] Bayon, G., *et al.* (2020) Microbial Utilization of Rare Earth Elements at Cold Seeps Related to Aerobic Methane Oxidation. *Chemical Geology*, **555**, Article ID: 119832. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119832>
- [11] Liu, J., *et al.* (2021) Microbial Communities in Rare Earth Mining Soil after *in-Situ* Leaching Mining. *Science of the*

- Total Environment*, **755**, Article ID: 142521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142521>
- [12] Corbett, M.K., Eksteen, J.J., Niu, X.Z. and Watkin, E.L. (2017) Incorporation of Indigenous Microorganisms Increases Leaching Rates of Rare Earth Elements from Western Australian Monazite. *Solid State Phenomena*, **262**, 294-298. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.262.294>
- [13] Chao, Y., et al. (2016) Structure, Variation, and Co-occurrence of Soil Microbial Communities in Abandoned Sites of a Rare Earth Elements Mine. *Environmental Science & Technology*, **50**, 11481-11490. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02284>
- [14] Sarswat, P.K., et al. (2020) Efficient Recovery of Rare Earth Elements from Coal Based Resources: A Bioleaching Approach. *Materials Today Chemistry*, **16**, Article ID: 100246. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100246>
- [15] Barnett, M.J., Palumbo-Roe, B., Deady, E.A. and Gregory, S.P. (2020) Comparison of Three Approaches for Bioleaching of Rare Earth Elements from Bauxite. *Minerals*, **10**, Article No. 649. <https://doi.org/10.3390/min10080649>
- [16] Keekan, K.K. and Jalondhara, J.C. (2015) *Aspergillus niger* PSSG8 Mediated Bioleaching of Monazite for the Recovery of Rare Earth and other Metal Constituents. *Advanced Materials Research*, **1130**, 238-242. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1130.238>
- [17] Rasoulnia, P., Barthen, R. and Lakaniemi, A.-M. (2020) A Critical Review of Bioleaching of Rare Earth Elements: The Mechanisms and Effect of Process Parameters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **51**, 1064-3389. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1727718>
- [18] Bento, F.M., de Oliveira Camargo, F.A., Okeke, B.C. and Frankenberger Jr., W.T. (2005) Diversity of Biosurfactant Producing Microorganisms Isolated from Soils Contaminated with Diesel Oil. *Microbiological Research*, **160**, 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2004.08.005>
- [19] Pereira, J.F.B., et al. (2013) Optimization and Characterization of Biosurfactant Production by *Bacillus subtilis* Isolates towards Microbial Enhanced Oil Recovery Applications. *Fuel*, **111**, 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.040>
- [20] Baba, A.A., Adekola, F.A., Atata, R.F., Ahmed, R.N. and Panda, S. (2011) Bioleaching of Zn(II) and Pb(II) from Nigerian Sphalerite and Galena Ores by Mixed Culture of Acidophilic Bacteria. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**, 2535-2541. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61047-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61047-9)
- [21] Haghshenas, D.F., Bonakdarpour, B., Alamdari, E.K. and Nasernejad, B. (2012) Optimization of Physicochemical Parameters for Bioleaching of Sphalerite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* Using Shaking Bioreactors. *Hydrometallurgy*, **111**, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.09.010>
- [22] Jin, J., Liu, G.-L., Shi, S.-Y. and Cong, W. (2010) Studies on the Performance of a Rotating Drum Bioreactor for Bioleaching Processes—Oxygen Transfer, Solids Distribution and Power Consumption. *Hydrometallurgy*, **103**, 30-34. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.02.013>
- [23] Shahrabi-Farahani, M., Yaghmaei, S., Mousavi, S.M. and Amiri, F. (2014) Bioleaching of Heavy Metals from a Petroleum Spent Catalyst Using *Acidithiobacillus thiooxidans* in a Slurry Bubble Column Bioreactor. *Separation and Purification Technology*, **132**, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.04.039>
- [24] Minimol, M., Shetty K.V. and Saidutta, M.B. (2020) Process Engineering Aspects in Bioleaching of Metals from Electronic Waste. In: Jerold, M., Arockiasamy, S. and Sivasubramanian, V., Eds., *Bioprocess Engineering for Bioremediation. The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol. 104, Springer, Cham, 27-44. https://doi.org/10.1007/978_2020_575
- [25] Chen, S.-Y. and Lin, J.-G. (2004) Bioleaching of Heavy Metals from Contaminated Sediment by Indigenous Sulfur-Oxidizing Bacteria in an Air-Lift Bioreactor: Effects of Sulfur Concentration. *Water Research*, **38**, 3205-3214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.04.050>
- [26] Sharma, P., Sirohi, R., Tong, Y.W., Kim, S.H. and Pandey, A. (2021) Metal and Metal(Loids) Removal Efficiency Using Genetically Engineered Microbes: Applications and Challenges. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, Article ID: 125855. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125855>
- [27] Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Ramesh, B. and Srinivasan, S. (2022) Removal of Toxic Heavy Metals Using Genetically Engineered Microbes: Molecular Tools, Risk Assessment and Management Strategies. *Chemosphere*, **298**, Article ID: 134341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134341>
- [28] Brisson, V.L., Zhuang, W.-Q. and Alvarez-Cohen, L. (2016) Bioleaching of Rare Earth Elements from Monazite Sand. *Biotechnology and Bioengineering*, **113**, 339-348. <https://doi.org/10.1002/bit.25823>
- [29] Schmitz, A.M., et al. (2021) *Gluconobacter oxydans* Knockout Collection Finds Improved Rare Earth Element Extraction. BioRxiv: 2021.07.11.451920. <https://doi.org/10.1101/2021.07.11.451920>
- [30] Sadri, F., Nazari, A.M. and Ghahreman, A. (2017) A Review on the Cracking, Baking and Leaching Processes of Rare Earth Element Concentrates. *Journal of Rare Earths*, **35**, 739-752. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(17\)60971-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60971-2)

- [31] Nakamoto, M., Kubo, K., Katayama, Y., Tanaka, T. and Yamamoto, T. (2012) Extraction of Rare Earth Elements as Oxides from a Neodymium Magnetic Sludge. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **43**, 468-476. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9618-y>
- [32] Lallemand, C., Ambrosi, J.P., Borschneck, D., *et al.* (2022) Potential of Ligand-Promoted Dissolution at Mild pH for the Selective Recovery of Rare Earth Elements in Bauxite Residues. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **10**, 6942-6951. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08081>
- [33] Chen, J., Liu, Y., Diep, P. and Mahadevan, R. (2022) Genetic Engineering of Extremely Acidophilic *Acidithiobacillus* Species for Biomining: Progress and Perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, **438**, Article ID: 129456. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129456>
- [34] Synthia, M., Zhuang, W.-Q., Rabaey, K., Alvarez-Cohen, L. and Hennebel, T. (2017) Concomitant Leaching and Electrochemical Extraction of Rare Earth Elements from Monazite. *Environmental Science & Technology*, **51**, 1654-1661. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03675>