

风化壳型稀土矿开采工艺及稀土应用进展

陈国玉, 周 云

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月29日

摘 要

风化壳型稀土矿是我国优势战略资源, 供应全球90%以上的重稀土。其开采技术历经四代演变: 早期桶浸/池浸效率低且污染严重; 第二代堆浸与第三代原地浸出虽提升采收率, 但铵盐工艺造成氨氮污染, 于2018年被禁用。第四代技术实现根本性突破: 镁盐浸取从源头消除氨氮, 如广西崇左六汤矿; 电驱开采更以电场驱动离子定向迁移, 2025年开展的试采收率 > 95%、氨氮减排95%、浸取剂用量减少80%, 标志着开采理念从末端治理转向源头防控。稀土应用正从传统“工业味精”向战略性核心材料体系跃升: 在新能源领域支撑风电与电动汽车, 在高端制造领域助力航天器减重与激光器发展, 在电子信息领域赋能显示与催化材料。其角色已从“添加改良”转变为“功能主导”, 成为驱动绿色低碳转型的战略基石。未来开采技术将向智能化迈进, 应用研究需深化基础机制突破, 构建全产业链创新体系, 巩固我国在战略资源领域的引领地位。

关键词

风化壳型稀土矿, 电驱开采, 镁盐浸取, 稀土新材料, 绿色冶金

Advances in Extraction Technology and Rare Earth Applications from Weathered Crust Rare Earth Deposits

Guoyu Chen, Yun Zhou

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

Received: March 16, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Weathered crust rare earth deposits are a strategically advantageous mineral resource in China, supplying over 90% of the world's heavy rare earth elements. Their mining technology has evolved

through four generations. Early-stage tank leaching and pit leaching suffered from low efficiency and serious pollution. Although the second-generation heap leaching and the third-generation in-situ leaching improved recovery rates, the use of ammonium salts resulted in ammonia-nitrogen pollution, leading to their ban in 2018. The fourth-generation technology has achieved fundamental breakthroughs: magnesium-salt leaching eliminates ammonia-nitrogen at the source, as demonstrated at the Liutang Mine in Chongzuo, Guangxi; electrically-driven mining uses an electric field to induce directional ion migration. Pilot tests conducted in 2025 achieved a recovery rate of >95%, a 95% reduction in ammonia-nitrogen emissions, and an 80% decrease in leaching agent consumption, marking a paradigm shift in mining philosophy from end-of-pipe treatment to source control. The application of rare earths is also transitioning from their traditional role as “industrial monosodium glutamate” to a strategic core material system. In the new energy sector, they support wind power and electric vehicles; in high-end manufacturing, they contribute to spacecraft weight reduction and laser development; in electronic information, they enable display and catalytic materials. Their function has evolved from “additive modification” to “function-oriented dominance”, establishing them as a strategic cornerstone for driving the green and low-carbon transition. Future mining technologies will advance toward intelligent operations, while application research needs to deepen fundamental mechanisms and establish an innovation system covering the entire industrial chain, thereby consolidating China’s leading position in strategic resources.

Keywords

Weathered Crust Rare Earth Deposits, Electrically-Driven Mining, Magnesium-Salt Leaching, Advanced Rare Earth Materials, Green Metallurgy

Copyright © 2026 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

稀土元素是一组具有相似化学性质的 17 种金属亲石元素, 包括: 镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)、以及与镧系密切相关的元素 - 钇(Y)和钪(Sc) [1]。稀土在现代高科技产业中具有不可替代的地位, 在永磁材料、发光与显示、催化剂、冶金与合金等方面也都有着重要作用[2]-[4]。据包头稀土产品交易所和中国稀土行业协会稀土产品报价表显示, 重稀土(Gd~Lu)价格高于轻稀土(La~Eu)。我国南方所特有的风化壳型稀土矿蕴藏全球 70% 以上的重稀土资源并供应了 90% 的重稀土产量, 同时稀土配分齐全, 深刻影响着全球稀土资源供应格局[5]。作为我国重要的战略资源, 风化壳型稀土矿的传统开采铵盐工艺对环境危害较大, 随着深入的研究探索出了更为环保科学的绿色开采技术, 同时稀土应用也逐步向高附加值转型升级转换。为更好促进稀土资源的绿色可持续发展, 本文在总结稀土开采方式和稀土应用进展的基础上, 对其未来发展方向进行展望和探讨。

2. 开采工艺的绿色化演变

第一代技术(1970 年代)以桶浸和池浸为代表, 采用氯化钠(NaCl)溶液作为浸出剂。该技术工艺简单、成本较低, 但浸出效率低下(仅约 60%~70%), 且产生大量高盐度废水, 对环境造成严重污染, 目前已基本被淘汰[6]。

第二代技术(1980 年代)以堆浸技术为代表, 开始采用硫酸铵((NH₄)₂SO₄)替代氯化钠作为浸出剂。浸

出率显著提高至 80%~90% [6]。堆浸技术的典型工艺流程如下：第一阶段：矿石准备。风化壳型稀土矿主要赋存于地表浅层，分布面积较大。堆浸工艺要求剥离矿体上部的腐殖层土壤，将赋矿层矿体挖出后，将矿土浸泡于水泥池中，或堆积在底部铺有塑料膜的堆场上。随后将原矿破碎至适宜粒度(通常 < 50 mm)，以增加比表面积和渗透性。在预先铺设防渗层的堆浸场上筑堆，堆高通常为 3~10 m。

第二阶段：浸出。配制适宜浓度的硫酸铵溶液浸出剂(通常为 2%~4%)，采用喷淋或滴灌方式将浸出剂均匀分布于矿堆表面。浸出液在重力作用下渗透矿堆，通过底部收集系统收集含稀土的浸出液，并对浸出液进行补加浸出剂后循环使用。

第三阶段：浸出液处理和产品制备。首先采用调节 pH 值、沉淀等方法去除浸出液中的铁、铝等杂质。随后利用草酸、碳酸铵或碳酸氢铵作为沉淀剂，将稀土元素沉淀为稀土草酸盐或碳酸盐。对沉淀产物进行过滤、洗涤后在高温下进行干燥煅烧(如 800~1000 $^{\circ}$ C)，获得稀土氧化物产品。矿体开采完毕后，还需对浸出后的尾矿进行稳定化处理或回填，并对堆浸场地进行生态修复[7]-[10]。堆浸工艺虽浸出率较高，但对地表植被和生态环境会产生毁灭性的破坏：大约每生产 1 t 稀土氧化物，便会破坏地表植被 160~200 m^2 ，剥离地表土达 300 m^3 ，形成尾砂 1000~1600 m^3 [11]。浸出剂中的氨氮也可能会造成水体污染，同时还存在“沟流”和“死区”问题[6]。

第三代技术(1980 年至 2018)以原地浸出技术为代表，原地浸出技术的原理：查明矿体的分布、厚度、品位及地下水分布、流向、渗透性后，将浸出剂溶液通过注液孔注入地下矿体，浸出剂在矿体孔隙中渗透流动，与吸附在黏土矿物表面的稀土离子发生离子交换反应，将稀土离子解吸进入溶液相。含稀土的浸出液在重力或压力作用下流向收液系统(如收液巷道、收液孔)，汇集后输送至地面处理设施。最后对残留浸出剂进行治理，并恢复地表植被[6] [12] [13]。该技术较第二代，无需剥离表土，环保性有所提高，浸出率可达 90%~95% (工程实践)甚至 98% (实验室条件) [6]。

第四代技术(2018 至今)，一是改变浸出剂，二是创新电驱开采，传统的硫酸铵浸取虽然普遍，但存在氨氮污染和浸出选择性差的问题。镁盐浸取体系主要利用硫酸镁($MgSO_4$)作为无氨盐浸出剂。镁盐体系不会产生氨氮废水，浸出后生成的镁或钙离子可以直接用于土壤修复或回收利用，避免了矿山植被死亡和土壤养分失衡的问题，更加绿色环保，例如广西崇左地区的六汤矿便已采用镁盐浸取[13] [14]。研究发现，镁离子(Mg^{2+})对稀土离子的置换效果优于一价离子，且在浸出液中加入还原性离子(如亚铁离子)或有机酸(如抗坏血酸、乙酸)可以强化浸出，显著提高胶态相稀土的浸出率，甚至将稀土浸出率提高至 98% [13] [15]。该工艺钻孔注入的硫酸镁溶液，常用浓度范围为 0.15 mol/L~0.3 mol/L；注液流速通常控制在 0.6 mL/min 左右，液固比(溶液体积与矿石质量的比)需要根据矿体渗透性进行优化，过高的液固比会导致稀土浓度峰值降低。与硫酸铵不同，镁盐体系对 pH 值的要求更为严格，通常需要在 pH 为 5.5~6.0 的弱酸性条件下进行，以优化稀土的浸出效率并抑制铝的共浸出。为了提高稀土浸出率，常加入的抗坏血酸(ASC)或乙酸(Acetate)等有机酸作为配位剂，可与稀土形成络合物，促进离子相和胶态相稀土的浸出[14] [15]。在此基础上，由池汝安等人牵头，获有色金属工业科学技术一等奖的团队成果“风化壳淋积型稀土矿绿色高效浸出技术开发及应用”中还提出了风化壳型稀土矿分层收液与渗流液三级截流技术，减少了浸取剂溶液和浸出液渗漏。

2023 年，何宏平/朱建喜团队[16]首次提出电驱开采概念技术原理(图 1)。该技术利用电场力(电渗流)和电泳力来驱动浸出剂在地下矿体中的迁移和稀土离子的解吸。其核心是通过在地表和矿体内部设置电极(正极和负极)，利用直流电流产生的电场力将离子迁移至收集区。电场的作用下，水分子分解产生的氢离子(H^+)或氢氧根离子(OH^-)与稀土离子发生离子交换，促进稀土的解吸。通过调节电场强度和极性，可以有效控制浸出剂的渗流方向和速率。2025 年在广东平远地区的 5000 吨土方规模的稀土矿中试开采，通过 60 天的通电开采，工业试验的稀土采收率达到了 95%以上，地下水和地表水中的氨氮排放量相比传

统开采工艺减少了 95%，浸取剂用量减少 80%，开采时间缩短 70%，电能节约 60%，极大降低了稀土开采的环境污染影响[17][18]。这两项技术的创新为解决稀土资源开采的环境污染瓶颈提供了切实可行的解决方案。

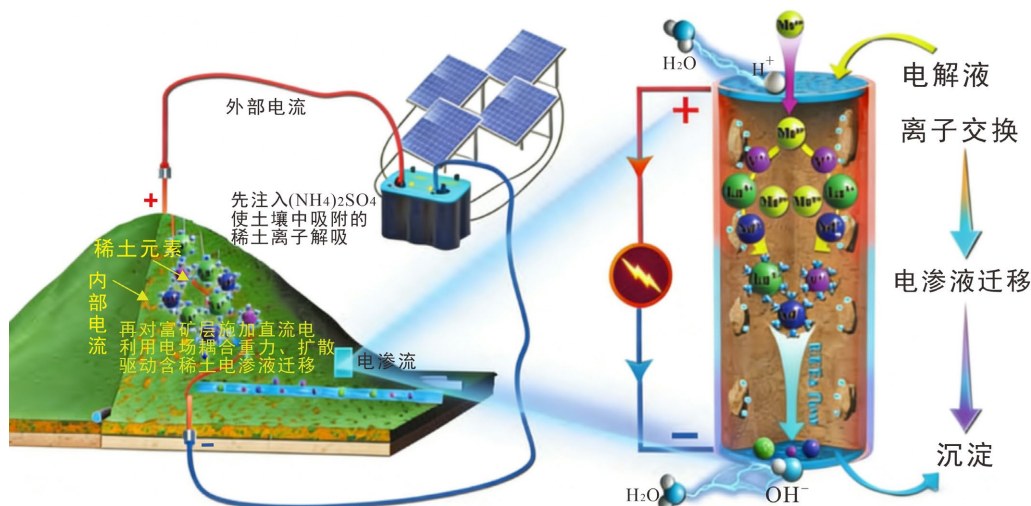


Figure 1. Schematic diagram of electrically-driven mining for weathered crust rare earth deposits (Base Map Based on [17])

图 1. 风化壳型稀土矿电驱开采示意图(底图根据[17])

在实际生产中，稀土浸出效率和后期环境治理成本是影响经济效益的关键因素，浸出效率每提高 1%，对大型矿山而言可能意味着数百甚至数千万元的额外收益，越低的污染追求更是对国家环保绿色政策的积极响应。不同技术的浸出效率和主要污染如下(表 1)：

Table 1. Rare earth leaching rate and primary pollution of different mining technologies

表 1. 不同开采技术的稀土浸出率和主要污染

开采技术	开采方式和浸取剂	稀土浸取率	主要污染	资料来源
第一代	桶浸、池浸; NaCl	60%~70%	植被完全破坏、水土流失, 土地严重盐碱化	[6][11]
第二代	堆浸; (NH ₄) ₂ SO ₄	80%~90%	尾砂堆积如山、污染了河水及下游土地	[6][11]
第三代	原地浸出; (NH ₄) ₂ SO ₄	90%~95% (工程实践); 98% (实验室)	地表水、地下水污染为主要隐患, 氨氮浓度长期超标, 治理难度大	[6][11][12][13]
第四代	原地浸出、电驱开采; MgSO ₄	镁盐浸取 > 98%; 电驱开采 > 95%	大幅减少氨氮污染, 属于“绿色浸出”工艺	[14][15][17][18]

尽管镁盐浸取与电驱开采在绿色化方向上取得突破，但其规模化应用仍面临多重挑战。技术瓶颈方面，镁盐浸取对矿体水文地质条件要求较高，在渗透性不均或裂隙发育矿体中，浸取剂易发生优先流与渗漏，降低浸出效率；同时浸出液的提取富集工艺还不够完善。电驱开采虽中试表现优异，但电极系统长期稳定性、电极腐蚀与钝化问题尚待验证；复杂矿体中电场分布均匀性、电流效率维持及大规模电极布设优化，均是工业化推广的关键技术难题。经济可行性方面，镁盐浸取剂(硫酸镁)单位成本高于硫酸铵，且用量更大，直接物料成本上升。电驱开采的一次性设备投入显著高于传统工艺，其经济优势主要依赖环境修复成本的节约，而该部分收益在现行政策下尚未完全内部化。中小型矿山企业面临较高投资门槛，

技术采纳意愿受限。第四代技术的经济可行性高度依赖于矿体规模、电价水平及环境监管严格程度。在环境风险方面, 镁盐浸取虽消除氨氮污染, 但大量镁离子引入可能改变土壤盐基离子平衡, 长期累积易致土壤盐渍化或钙镁失衡, 影响植被恢复。电驱开采中电场对地下微生物群落结构与功能的影响缺乏系统评估, 长期通电可能改变土壤酶活性及生物地球化学循环; 电极降解产物、电场诱导次生矿物形成的影响均需长期监测予以明确。

综上, 第四代技术的绿色化突破值得肯定, 但从“试验成功”迈向“工业推广”仍需跨越技术、经济与生态多重门槛。未来需强化基础机理研究, 加快建立全产业周期评价体系, 推动技术、政策与市场机制的协同优化。

3. 稀土的最新应用

稀土元素作为现代工业和科技的核心资源, 凭借其独特的物理和化学特性, 在科技、材料与工业领域发挥着“工业味精”的关键作用, 目前稀土主要应用在以下几个方面(图 2)。



Figure 2. Schematic diagram of rare earth-related applications
图 2. 稀土相关应用示意图

在新能源技术中稀土有着极其重要的作用, 稀土永磁体(尤其是钕铁硼)是风力发电机组和新能源汽车电机中不可替代的核心材料。镨(Dy)、铽(Tb)作为其核心添加剂, 它们能显著提高磁体的矫顽力(抗退磁能力)和最高工作温度, 是电动汽车驱动电机、风力发电机等高温运行环境应用的必需品。添加少量(通常为 2~6%)即可使磁体工作温度提升至 150℃ 以上[19]。随着稀土储氢材料的研究, 稀土元素也开始用于开发高效储氢装置, 为氢能汽车提供技术支撑[20]。稀土元素如镧(La)、镨(Dy)、铽(Tb)等正在被用于开发新型电池材料, 用以替代钴酸锂, 减少对稀有金属钴的依赖, 提升电池的性能和安全性[20] [21]。

在高端制造方面, 氧化铈作为玻璃抛光剂的主要成分, 同时还用于玻璃的脱色和着色[21]。部分稀土元素(如 Ce、La)可用于钢铁的除杂和晶粒细化, 提升材料的机械性能和抗腐蚀性[22]。镍氢电池(NiMH)

中的高性能稀土合金——稀土镧系合金, 可作为镍氢电池的负极材料, 是该类电池的核心技术; 稀土氧化物制造的耐火材料、光学陶瓷(如激光陶瓷), 被运用在航空发动机和激光器件中[20][23]。稀土光纤(如掺镱(Yb)光纤)在激光通信和光纤传感器中具有低损耗和高稳定性的优势, 被广泛应用于光纤通信系统[20]; 稀土掺杂有源光纤(如掺铒(Er))可发射出极高的光束质量[24]。掺铒(Er)光纤放大器(EDFA)作为光纤通信系统的核心器件, 解决了光信号长距离传输的衰减问题, 支撑了全球互联网基础设施的运行。Er³⁺掺杂的 3 μm 中红外激光可用于医疗外科的微创手术、环境气体检测、军事上红外检测和自动目标识别等方面[25]。钇(Y)作为激光晶体的理想基质材料, 钇铝石榴石(YAG)是固体激光器最常用的工作物质。YAG 晶体具有优异的光学均匀性和热导率, 可掺杂 Nd³⁺、Er³⁺等激活离子, 广泛应用于激光切割、激光焊接、激光医疗等领域。YAG 晶体光纤结合了晶体和光纤的优点, 有效减小了非线性效应和热损伤[26]。掺铽(Tb)氟化物晶体激光器由于可直接产生覆盖 500~700 nm 可见光波段激光输出, 相对于传统变频可见光激光器, 具有结构紧凑、转换效率高等优势[27]。铥(Tm)、钬(Ho)掺杂的 2 μm 固体激光具有宽带宽、高增益、模式灵活选择以及波长可被大气分子吸收等特点, 在光电对抗、医疗诊断、新波段通信和阿秒光源等领域有着重要的应用前景[28]。

在电子信息与工业材料中, 稀土元素(如镝 Dy、铽 Tb、铕 Eu)是液晶显示(LCD)、发光二极管(LED)和有机发光二极管(OLED)中荧光粉的核心, 决定了屏幕的颜色鲜艳度和亮度[20][23]。稀土钕(Nd)被用于硬盘的磁记录介质, 支持大容量数据存储。稀土催化剂因其高活性和选择性, 广泛应用于石油的催化裂化、脱硫和异构化过程, 提高燃油品质[22]。稀土氧化物制备的催化剂, 还可催化汽车尾气燃烧, 帮助降低有害气体排放[29]。铈(Sc)作为目前铝合金中最具强化效果的微合金化元素之一, 使得铝合金显著提升强度并保持良好韧性, 更加耐磨和耐腐蚀, 在高温使用环境下仍可维持优良性能[30]。钆(Gd)作为吸收中子的能力最强的元素, 目前全世界计划兴建的核反应堆 149 座中, 有 115 座压水堆是应用稀土氧化钆。稀土钐(Sm)、铕(Eu)和镝(Dy)已用作中子增殖反应堆的中子吸收剂[31]。

总的来看, 目前稀土需求呈现多领域共振态势, 结构性增长动力强劲。新能源汽车销量稳步提升, 单车钕铁硼用量约 2~3 kg, 其中重稀土(Dy/Tb)占磁体质量 2%~6%。风电与工业电机对高温稳定型磁体的需求持续增长。人形机器人产业进入规模化发展阶段, 单台磁材用量 2~3 kg, 有望成为稀土需求第二增长极。稀土钛合金、镁合金广泛应用于航空航天装备, 稀土氧化物在固态电池、激光器、光纤通信等领域的应用亦将持续扩大。

同时重稀土的供给面临多重刚性约束。全球 70%以上重稀土资源集中于风化壳型稀土矿。2025 年《稀土开采和稀土冶炼分离总量调控管理暂行办法》实施后, 国内配额增速放缓, 供给收缩效应显现。海外项目虽规划产能可观, 但开发进度缓慢, 新矿开发需 8~10 年, 短期内难以形成有效补充。2025 年 4 月中重稀土出口管制实施后, 海外价格大幅上涨, 同年 7~12 月我国稀土磁材出口量同比增加 16%, 显示海外反向收储需求持续向国内传导。在供给受限、需求扩张的背景下, 叠加海外军工刚性需求与人形机器人量产带来的备储意愿增强, 未来国内稀土经济价值与战略价值将进一步增强。

4. 结语与展望

风化壳型稀土矿开采技术历经四代演变, 实现了从“资源掠夺式”向“绿色集约化”的根本转型。第四代镁盐浸取与电驱开采技术的突破, 标志着开采理念从末端治理转向源头防控, 为破解稀土开采环境瓶颈提供了中国方案, 奠定了稀土在国际上的战略地位。稀土应用正从传统“工业味精”向战略性核心材料体系跃升: 在新能源、高端制造、电子信息三大领域, 其角色已从“添加改良”转变为“功能主导”, 成为驱动全球绿色低碳转型与高科技竞争的战略基石。

稀土应用的未来前景和展望可能在于开采技术将向智能化、精准化方向发展, 结合人工智能优化注

液参数与电场调控, 实现全产业周期绿色管控; 稀土应用研究需深化基础科学问题突破, 推动材料从单一功能向多功能集成演进; 同时, 应加快构建“资源开采-材料制备-器件应用-循环利用”全产业链创新体系, 巩固我国在战略资源和稀土技术创新领域的引领地位, 为全球可持续发展贡献中国方案。

致 谢

感谢审稿专家和编辑提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- [1] 王学求, 周建, 迟清华, 等. 中国稀土元素地球化学背景与远景区优选[J]. 地球学报, 2020, 41(6): 747-758.
- [2] Pinto, J., Colónia, J., Abdolvaseci, A., Vale, C., Henriques, B. and Pereira, E. (2023) Algal Sorbents and Prospects for Their Application in the Sustainable Recovery of Rare Earth Elements from E-Waste. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 74521-74543. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27767-8>
- [3] Cobelo-García, A., Filella, M., Croot, P., Frazzoli, C., Du Laing, G., Ospina-Alvarez, N., et al. (2015) COST Action TD1407: Network on Technology-Critical Elements (NOTICE)—From Environmental Processes to Human Health Threats. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**, 15188-15194. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5221-0>
- [4] Preinfalk, C. and Morteani, G. (1989) The Industrial Applications of Rare Earth Elements. In: Möller, P., Černý, P., Saupé, F., Eds., *Lanthanides, Tantalum and Niobium: Mineralogy, Geochemistry, Characteristics of Primary Ore Deposits, Prospecting, Processing and Applications*, Springer, 359-370. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87262-4_19
- [5] 付伟, 董春放, 许成, 等. 广西离子吸附型重稀土找矿突破方向研究与科研性示范勘查进展[J]. 地球科学, 2024, 49(6): 1931-1945.
- [6] Luo, X., Zhang, Y., Zhou, H., He, K.Z., Luo, C.G., Liu, Z.H., et al. (2022) Review on the Development and Utilization of Ionic Rare Earth Ore. *Minerals*, **12**, Article No. 554. <https://doi.org/10.3390/min1205054>
- [7] Zhang, Z.Y., Yang, J., Guo, W.D., Jiang, L., Chen, W.D., Liu, D.F., et al. (2024) Analysis and Prediction of the Leaching Process of Ionic Rare Earth: A Data Mining Study with Scarce Data. *Minerals*, **14**, Article No. 596. <https://doi.org/10.3390/min14060596>
- [8] Zhang, J., Zhao, B. and Schreiner, B. (2016) Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements. Springer International Publishing.
- [9] Xiao, Y.F., Feng, Z.Y., Hu, G.H., Huang, L., Huang, X.W., Chen, Y.Y., et al. (2015) Leaching and Mass Transfer Characteristics of Elements from Ion-Adsorption Type Rare Earth Ore. *Rare Metals*, **34**, 357-365. <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0481-x>
- [10] Kang, K., Kim, D., Kim, S. and Khim, J. (2013) Characteristics of Pollutants by Rare Earth Mine Decomposition/Purification Process, and of Treatment Technology. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **13**, 375-385. <https://doi.org/10.9798/kosham.2013.13.5.375>
- [11] 蔡奇英, 刘以珍, 管毕财, 等. 南方离子型稀土矿的环境问题及生态重建途径[J]. 国土与自然资源研究, 2013(5): 52-54.
- [12] Navarro, J. and Zhao, F. (2014) Life-Cycle Assessment of the Production of Rare-Earth Elements for Energy Applications: A Review. *Frontiers in Energy Research*, **2**, Article No. 45. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00045>
- [13] 肖燕飞. 离子吸附型稀土矿镁盐体系绿色高效浸取技术研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [14] 肖燕飞, 邱江, 赖富国, 等. 离子型稀土矿镁钙盐体系绿色高效提取技术研究[C]//中国稀土学会, 江西省科学技术协会, 赣州市人民政府. 中国稀土学会 2020 学术年会暨江西(赣州)稀土资源绿色开发与高效利用大会摘要集. 2020: 19.
- [15] 陈金发. 离子型稀土矿镁盐-乙酸体系强化浸取-高效除铝过程研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [16] Wang, G.F., Xu, J., Ran, L.Y., Zhu, R.L., Ling, B.W., Liang, X.L., et al. (2023) A Green and Efficient Technology to Recover Rare Earth Elements from Weathering Crusts. *Nature Sustainability*, **6**, 81-92. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00989-3>
- [17] 康石长, 王高峰, 凌博闻, 等. 离子吸附型稀土矿开采机制研究进展[J]. 中国稀土学报, 2025, 43(2): 268-283.
- [18] Wang, G.F., Zhu, J.X., Liang, X.L., Ling, B.W., Xu, J., Yang, Y.Q., et al. (2025) Industrial-Scale Sustainable Rare Earth Mining Enabled by Electrokinesis. *Nature Sustainability*, **8**, 182-189. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01501-9>
- [19] Bradshaw, A.M., Reuter, B. and Hamacher, T. (2013) The Availability of Rare Elements for Advanced Energy Technologies.

- In: Bruhns, H., Ed., *Energie: Technologien und Energiewirtschaft. Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2013*, Deutsche Physikalische Gesellschaft, 29-46.
- [20] 詹伟, 陈瑞强, 李庚, 等. 稀土新材料在新能源技术领域的应用[J]. 稀土, 2024, 45(6): 145-154.
- [21] 何琪光. 稀土在新能源汽车中的应用和前景分析[J]. 中国有色金属, 2024(S2): 224-227.
- [22] Ikeh, O. (2025) Advancing Technology and Addressing Toxicity: The Dual Impacts of Rare Earth Elements on Materials and the Environment. *NIPES Journal of Science and Technology Research*, 7, 275-286.
<https://doi.org/10.37933/nipes/7.2.2025.19>
- [23] Abdullah, S.A.A., Abdel-Hamid, I.M. and Elwan, W.I. (2025) Importance of Using Some Critical Minerals in Green Energy Transitions in China: A Review. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 52, 861-876.
<https://doi.org/10.21608/zjar.2025.451798>
- [24] 苏航, 郭刚, 张艳文, 等. 稀土掺杂光纤的抗辐照技术研究进展[J/OL]. 激光与光电子学进展, 1-31.
<https://link.cnki.net/urlid/31.1690.tn.20260305.1544.026>, 2026-04-22.
- [25] 刘永岩, 田颖, 杨雪莹, 等. 3 μm 波段 Er^{3+} : ZBLAN 光纤激光器研究进展及展望[J]. 发光学报, 2024, 45(1): 125-138.
- [26] 申冰磊, 王中跃, 于春雷, 等. 稀土掺杂钇铝石榴石晶体激光光纤的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9123-9132.
- [27] 刘子琪, 徐学森, 蒋艳梅, 等. 掺铽氟化物晶体可见光激光器研究进展[J]. 发光学报, 2024, 45(11): 1871-1882.
- [28] 宋晓钊, 朱强, 康惠, 等. 2 μm 固体激光器多维度调控研究进展[J]. 发光学报, 2025, 46(8): 1468-1484.
- [29] 于学华, 迟克彬, 王斓懿, 等. 铈基、镧基稀土催化剂催化燃烧柴油炭烟颗粒的研究进展[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(6): 693-714.
- [30] 金会心, 蒋佳君, 黄润, 等. 铝合金中 Sc 微合金化的作用机制与性能提升研究进展[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2026, 43(2): 50-65.
- [31] 朱铭岳, 崔中倪. 全球稀土市场分析及未来的发展和需求[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(6): 686-694.