

离子吸附型稀土矿开发利用现状及研究进展

朱浩涵

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年7月14日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年8月24日

摘要

离子吸附型稀土矿是我国南方重要的矿产资源。矿石中的稀土元素多以可交换离子形式吸附于黏土矿物表面, 轻、重稀土配分较完整, 具有较高的工业价值。文章在已有研究基础上, 系统归纳该类矿床的地质特征、资源分布、开发利用技术及近期研究进展。研究表明, 富稀土母岩是成矿的物质基础, 表生风化、淋滤迁移、黏土矿物吸附以及地形地貌和水文条件共同控制矿体的形成与保存。矿床主要分布于华南地区, 开发工艺已由池浸、堆浸逐步转向原地浸出和绿色浸取, 资源回收效率得到提高, 但地下水污染、浸取盲区、边坡失稳和残留浸矿剂治理仍是制约绿色开发的主要问题。近年来, 相关研究正由单一成矿因素和浸出效率评价, 转向矿床系统分析、数字化勘查、智能开采、环境全过程监测及全球稀土供应链韧性研究。未来应重点推进绿色浸取剂研发、尾液循环和残留污染物治理, 并加强三维地质-水文建模、传感监测、数字孪生和数字化追溯等技术的协同应用, 实现资源高效利用、矿山生态安全与产业链稳定供应的统筹发展。

关键词

离子吸附型稀土矿, 矿床特征, 资源分布, 开发利用, 研究进展

Development and Utilization Status and Research Progress of Ion-Adsorption-Type REE Deposits

Haohan Zhu

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

Received: July 14, 2026; accepted: August 14, 2026; published: August 24, 2026

Abstract

Ion-adsorption-type rare earth element (REE) deposits constitute an important mineral resource in

South China. In these deposits, REEs occur mainly as exchangeable ions adsorbed onto clay-mineral surfaces, with relatively complete light- and heavy-REE distributions and considerable industrial value. Based on previous studies, this paper systematically reviews the geological characteristics, spatial distribution, development and utilization technologies, and recent research progress of this deposit type. Existing evidence indicates that REE-rich parent rocks provide the material basis for mineralization, whereas supergene weathering, leaching and migration, adsorption by clay minerals, topography, geomorphology, and hydrological conditions jointly control the formation and preservation of ore bodies. These deposits are concentrated mainly in South China. Their extraction technologies have evolved from tank leaching and heap leaching to in-situ leaching and environmentally compatible leaching, resulting in improved resource recovery. However, groundwater contamination, poorly leached zones, slope instability, and the remediation of residual leaching agents remain major constraints on green development. Recent studies have shifted from evaluating individual mineralization factors and leaching efficiency toward integrated mineral-system analysis, digital exploration, intelligent mining, whole-process environmental monitoring, and the resilience of the global rare earth supply chain. Future research should prioritize the development of environmentally compatible leaching agents, recycling of leachate, and remediation of residual pollutants, while strengthening the coordinated application of three-dimensional geological-hydrogeological modelling, sensor-based monitoring, digital twins, and digital traceability. These efforts are essential for achieving coordinated improvements in resource-use efficiency, mine ecological safety, and the stability of the rare earth supply chain.

Keywords

Ion-Adsorption-Type Rare Earth Deposits, Deposit Characteristics, Resource Distribution, Development and Utilization, Research Progress

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

我国稀土资源的储量、产量、销售量和消费量长期位居世界前列，也是全球多品种、多品级稀土产品的重要来源。随着全球能源转型和高技术产业竞争加剧，相关研究已由资源储量与产品供给拓展至绿色勘查、清洁开采、生态修复和产业链安全。离子吸附型稀土(iREE)矿主要赋存于华南风化壳中，稀土元素多以可交换离子形式吸附于黏土矿物表面，具有中重稀土占比较高、可直接浸取等特点，是我国重稀土稳定供应的重要基础[1]-[7]。

近三年研究表明，该类矿床并非由富稀土母岩或强烈风化单一控制，而是母岩供源、矿物分解、表生淋滤、水文迁移、黏土吸附及地貌保存共同作用的结果。赣南赣肚山花岗岩研究显示，高分异花岗岩及岩浆-热液演化可为重稀土成矿提供有利的物质基础[8]；足洞风化剖面研究进一步揭示，高岭石等次生矿物通过差异吸附和次生含稀土矿物形成，控制稀土富集及轻、重稀土分异[9]。云南高海拔和广东典型矿床的研究也表明，传统以南岭中生代花岗岩和低缓丘陵为核心的成矿认识需要拓展，资源评价应由稀土总量分析转向母岩性质、离子相比比例、垂向分带及单元素可浸取性的综合表征[8]-[11]。

开发技术已由池浸、堆浸转向原地浸出及低铵、无铵浸取，但矿体非均质、渗流路径不确定和经验式注液仍易造成浸取盲区、资源残留、浸出液泄漏及边坡失稳[4] [12]-[14]。近期研究从离子交换、溶液酸化和铵根残留等过程深化了浸矿机理认识[15]-[17]，并推动生物浸出、矿山废水脱氮及微生物-植物修

复等技术发展[18]-[21]。然而, 现有成果仍多聚焦单一矿床、单项工艺或局部环境问题, 成矿评价、精准浸取和污染治理之间缺乏全过程衔接。基于此, 本文对离子吸附型稀土矿的矿床特征、资源分布及开发利用技术进行归纳, 概述绿色浸取、数字化勘查、智能监测和生态修复等方面的研究进展, 并分析现阶段存在的主要问题, 为后续研究和开发实践提供一定参考。

2. 矿床特征及用途

2.1. 母岩与矿石特征

离子吸附型稀土矿的母岩主要为花岗岩类, 也可包括火山岩和浅变质岩。母岩中的稀土元素主要赋存于独居石、磷钇矿等稀土矿物及部分造岩矿物中, 经长期风化分解释放并迁移至风化壳。矿石多呈疏松的砂粒状或土状, 主要由石英、长石及高岭石、埃洛石、伊利石等黏土矿物组成。稀土元素主要以可交换离子形式吸附于黏土矿物表面, 同时含少量残余稀土矿物[1] [22], 其形成可概括为稀土物源、活化迁移、黏土吸附和矿体保存四个相互衔接的环节(图 1)。

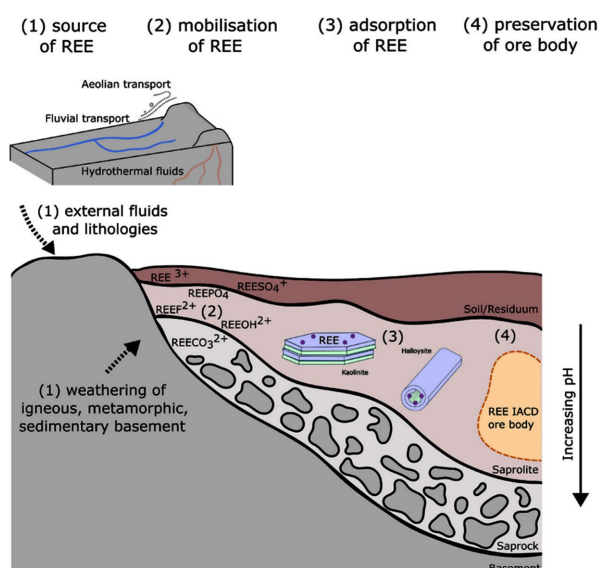


Figure 1. Conceptual mineral-system framework for the formation of ion-adsorption-type REE deposits [22]

图 1. 离子吸附型稀土矿床形成的矿床系统概念框架[22]

2.2. 矿石的物理化学特征

矿石的物理化学特性主要体现在以下几方面。首先, 黏土矿物含有吸附水、层间水和结构水, 使矿石具有较强的多水性。吸附态稀土离子较为稳定, 遇水后通常不会直接溶解或水解; 原矿本身还具有一定缓冲能力, 能在一定 pH 范围内调节淋出母液的酸碱度。最后, 吸附离子的可交换性则是化学浸出的基础: 加入电解质溶液后, 黏土矿物活性中心上的稀土离子和杂质离子会与溶液中的阳离子交换, 继而进入液相[23]。

2.3. 稀土配分特征

离子吸附型稀土矿的稀土配分总体上继承原岩特征, 但铈普遍亏损, 矿体下部重稀土配分通常略高于上部。离子相稀土配分主要表现为铈亏效应、分馏效应和钆断效应。铈亏效应与 Ce^{4+} 易以 CeO_2 、氟碳

铈矿或难溶 $\text{Ce}(\text{OH})_4$ 等矿物相、胶态相保存有关，因此离子相及提取产品中的铈含量偏低。

分馏效应是指原矿风化解离产生的稀土离子形成水合或羟基水合离子后，随地下水迁移，并在不同深度与黏土矿物持续发生吸附-脱附和离子交换，最终形成上部轻稀土含量较高、下部重稀土富集增强的垂向分异。

钐断效应与稀土元素电子构型及地壳丰度差异有关。以钐为界，La-Eu 轻稀土组内部多呈正相关，Gd-Lu、Y 重稀土组内部也多呈正相关，而轻、重稀土组之间常表现为负相关。

离子吸附型稀土矿的配分类型可依据 ΣYO ($<50\%$ 、 $\geq 50\%$)、 $\text{Pr}_6\text{O}_{11} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ ($<25\%$ 、 $\geq 25\%$ 而 $<35\%$ 、 $\geq 35\%$ 而 $<60\%$)和 $\text{Tb}_4\text{O}_7 + \text{Dy}_2\text{O}_3$ ($<4\%$ 、 $\geq 4\%$ 而 $<7\%$ 、 $\geq 7\%$)三项指标划分，理论上可组合出 18 种类型。赣南目前已识别 12 种(表 1)，较常见的有高铽镱低镨钕重稀土、中铽镱低镨钕重稀土、中铽镱中镨钕轻稀土、中铽镱低镨钕轻稀土、低铽镱高镨钕轻稀土和低铽镱中镨钕轻稀土 6 类[24]。

Table 1. Statistics on the types of rare earth allocations discovered in Southern Jiangxi

表 1. 赣南已发现的稀土配分类型归属统计表

No.	配分类型	ΣYO	$\text{Tb}_4\text{O}_7 + \text{Dy}_2\text{O}_3$	$\text{Pr}_6\text{O}_{11} + \text{Nd}_2\text{O}_3$
1	高铽镱低镨钕重稀土	$\geq 50\%$	$\geq 7\%$	$<25\%$
2	中铽镱低镨钕重稀土	$\geq 50\%$	$\geq 4\%$, $<7\%$	$<25\%$
3	中铽镱中镨钕重稀土	$\geq 50\%$	$\geq 4\%$, $<7\%$	$\geq 25\%$, $<35\%$
4	低铽镱低镨钕重稀土	$\geq 50\%$	$<4\%$	$<25\%$
5	高铽镱低镨钕轻稀土	$<50\%$	$\geq 7\%$	$<25\%$
6	高铽镱中镨钕轻稀土	$<50\%$	$\geq 7\%$	$\geq 25\%$, $<35\%$
7	中铽镱低镨钕轻稀土	$<50\%$	$\geq 4\%$, $<7\%$	$<25\%$
8	中铽镱中镨钕轻稀土	$<50\%$	$\geq 4\%$, $<7\%$	$\geq 25\%$, $<35\%$
9	中铽镱高镨钕轻稀土	$<50\%$	$\geq 4\%$, $<7\%$	$\geq 35\%$
10	低铽镱低镨钕轻稀土	$<50\%$	$<4\%$	$<25\%$
11	低铽镱中镨钕轻稀土	$<50\%$	$<4\%$	$\geq 25\%$, $<35\%$
12	低铽镱高镨钕轻稀土	$<50\%$	$<4\%$	$\geq 35\%$

Tb、Dy 占比较高的重稀土类型具有较高的战略敏感性，应优先开展离子相品位、单元素可浸取率和分层资源量评价；Pr、Nd 占比较高的轻稀土类型更直接对应永磁材料需求，其经济性则更依赖矿体规模、平均品位和低成本回收。

2.4. 离子吸附型稀土矿用途

离子吸附型稀土矿床富含中重稀土元素，是国防军工和高技术产业的重要原料来源。镱、铽能够提高钕铁硼磁体的矫顽力和耐温性，可用于混合动力汽车驱动马达；二者也是 Terfenol-D 超磁致伸缩材料的核心组分，可服务于高精度传感器和燃料喷射系统。

在光电信息领域，铕、铽、钐等可作为三基色荧光粉的激活离子，用于彩电显像管、荧光灯和激光器。铕、钐、镱、铽具有较强的中子吸收能力，可用于核反应堆控制棒和安全停堆装置。中重稀土的用途还包括核磁共振造影剂、高温合金、特种光学玻璃、陶瓷色剂和医用激光器等[23]。

3. 矿床资源分布情况

3.1. 矿床分布地区

我国于 1969 年在江西首次发现离子吸附型稀土矿床, 此后广东、福建、广西、湖南和云南等地也陆续发现同类矿床。越南、老挝、泰国和美国等地已有相关矿床或矿化线索报道[25]-[27]。就已掌握的资料而言, 我国南岭地区仍是该类矿床最集中的区域。

江西 iREE 资源丰富, 花岗岩、火山岩和浅变质岩型矿床均有发育, 赣南为集中分布区, 其中龙南以重稀土为主, 信丰以中稀土为主, 寻乌以轻稀土为主。广西的 iREE 资源保存较好, 矿床主要分布在崇左、钦州、玉林、贵港、梧州和贺州等东南部地区。福建 iREE 主要见于龙岩、三明等地, 在漳州长泰、泉州德化、宁德古田和南平光泽等地也有分布; 龙岩矿床多属中钇富铈型, 中重稀土约占稀土总量的 50%。广东已发现 26 个矿床, 包括 6 个大型、9 个中型和 11 个小型矿床, 集中分布于粤北和粤东, 清远、揭阳、和平、鹤山、惠东、大埔、英德、平远和高明等地较为典型, 重稀土资源约占离子吸附型稀土资源总量的 1/3。云南已发现的矿床数量相对较少, 包括陇川 LB-LL 大型矿床、临沧 QN 中型矿床和个旧 WQ 小型矿床。其中, 临沧 QN 矿床产于临沧巨型花岗岩基风化壳, 海拔超过 1500 m, 是目前已知的高海拔稀土矿床之一。浙江庆元还发现了大型 iREE 矿床, 安徽已知 17 处矿化点, 海南岛亦圈定了找矿远景区[28]。

3.2. 矿床分布特征

离子吸附型稀土矿床通常以含矿花岗岩为母岩。第四纪以来的强烈风化促使稀土元素从母岩中释放, 经迁移后吸附富集成矿。已知矿床多与燕山中晚期花岗岩有关, 例如姑婆山各期侵入体的年龄为 162~107 Ma, 广东佛冈岩体相关矿床的成矿年龄为 155~100 Ma, 二者大体一致[29]。当母岩中难风化物较多时, 稀土可能以砂矿型或风化壳矿物型矿床保存, 广东阳江 - 电白地区即有此类矿床, 其成矿年龄差异较小[30][31]。

矿床出露与地形地貌关系密切。低品位含稀土花岗岩需要经过充分风化富集, 才可能形成工业矿体; 散流剥蚀作用较强的地区常形成宽广剥蚀地貌, 有利于深厚残积风化壳保存。尖顶低山和低山丘陵地貌(海拔 200~500 m)相对有利于成矿, 其中海拔 252~350 m、相对高差 50~150 m 的条件较优。丘陵、圆缓山包和剥蚀低山区若残积风化壳保存完整、厚度较大且品位较高, 通常可作为离子吸附型稀土找矿的重要标志。

华南地区兼有富稀土母岩、强烈表生风化和较好的风化壳保存条件, 因而形成了较多离子吸附型稀土矿床。华南显生宙岩浆活动强烈, 中酸性岩浆岩分布广泛。区域内气候温暖湿润, 年均气温 18~22℃, 年降水量 1400~1800 mm, 且地貌多为海拔 500 m 以下的低缓丘陵, 有利于厚层风化壳大面积形成和保存。据此开展资源预测时, 不宜只看岩性或气候等单项指标, 还应综合考虑物源、风化释放、水文迁移、黏土吸附和地貌保存等环节[1][22]。

4. 开发利用现状

4.1. 矿床开采现状

我国 iREE 资源开采大致可分为三个时期: 第一阶段为 20 世纪 70 年代至 80 年代中叶的起步发展期; 第二阶段为 20 世纪 80 年代中叶至 90 年代后期的快速扩张期; 第三阶段为 20 世纪 90 年代末以来的整合治理期[32]。

1973 年至 20 世纪 70 年代末, 江西仅有少数矿点开展小规模生产, 混合稀土氧化物累计产量不足 100

t。20 世纪 80 年代初矿山规模开始扩大,1983 年产量已超过 100 t/a。1984 年以后,国外需求增长和生产工艺改进带动矿山数量迅速增加;至 1987 年,仅江西就有约 200 个矿山,混合稀土生产能力超过 5000 t [33]。1988~1997 年,我国离子型稀土年产量基本低于 1 万 t;1997 年首次超过 1 万 t,占当年中国稀土产量的 11%和全球产量的 7.6%;2007 年进一步增至 4.5 万 t,占比分别达到 37%和 33%。过度开采及其环境影响逐渐显现后,我国自 2007 年起实施稀土开采总量限制。到 2012 年末,iREE 采矿权已由上百个整合为 56 个,其中江西 45 个、福建 5 个、广东 3 个、云南 2 个、广西 1 个。2013~2016 年,行业进入兼并重组和规范整顿期,采矿权、生产指标及冶炼分离能力逐步向大型稀土企业集团集中,无序开采受到一定遏制[2] [3]。2017~2020 年,总量控制和生态约束继续加强。原地浸矿仍是主要开采方式,但环保或安全设施不完善的矿山被要求停产整改,实际开采能力受到更严格的限制[2] [4]。2021 年以来,随着中国稀土集团成立和南方中重稀土资源进一步整合,iREE 开采朝集团化、集约化和绿色化方向调整[3]。2024 年我国稀土开采总量控制指标增至 27 万 t,离子型稀土开采指标仍为 1.915 万 t,新增指标主要投向岩矿型轻稀土,说明中重稀土资源仍实行保护性开采。现阶段,iREE 矿山正在探索低铵或无铵浸取、渗流精准控制以及开采与修复协同,但氨氮残留、地下水污染和闭矿场地生态修复仍制约着绿色开采,原地浸矿造成的污染风险具有明显空间差异,矿场内部及周边区域均可能存在不同程度的人体健康风险[34]。

4.2. 矿床开发技术现状

离子吸附型稀土矿中的稀土主要以水合或羟基水合离子形式吸附于黏土矿物表面,常规浮选、重选和磁选难以将其有效富集,因此生产中主要采用离子交换化学浸出。相关工艺大致经历了池浸、堆浸、原地浸出和绿色浸取四个阶段(表 2)。早期池浸以 6%~8% NaCl 为浸矿剂,容易造成土壤盐化,且矿区生态难以修复,后来逐渐被淘汰。第二代工艺以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 取代 NaCl,池浸与堆浸一度并用,随后池浸退出。第三代原地浸出工艺适用于具有假底板、矿石分布均匀且节理不发育的矿体。典型原地浸出流程由注液、矿体内渗流与离子交换、浸出液汇集三个环节组成(图 2)。不过,原地浸出仍存在浸取速度慢、浸出液泄漏和浸取盲区等问题,注液控制不当还可能诱发滑坡或破坏农田,因而必须同时考虑资源回收、污染控制和矿体稳定[35]。第四代绿色浸取技术着眼于降低传统铵盐浸取剂对土壤和地下水的影响,并维持必要的浸出效率[36]。相较于硫酸铵浸取,这类技术更重视浸取剂的环境影响、残留控制和尾液循环,以减少铵氮残留、土壤酸化及地下水污染。相应的研究重点也已从寻找单一替代剂,扩展到浸出效率、污染控制、尾液处理和工程适应性的综合优化,不同体系的比较见表 3。

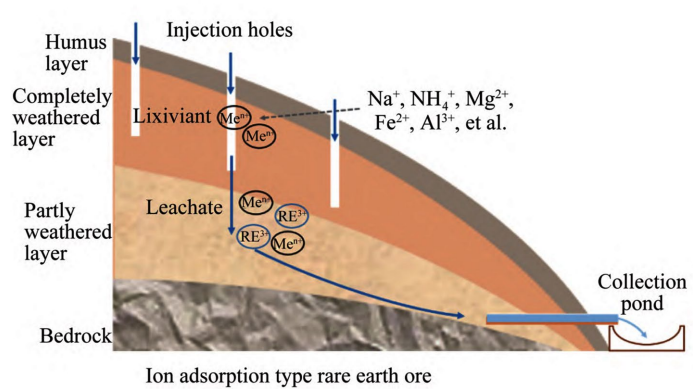


Figure 2. Flow diagram of the in-situ leaching process for ion-adsorption-type REE deposits [36]
图 2. 离子吸附型稀土矿原地浸出工艺流程[36]

Table 2. Comparison of major development technologies and characteristics of ion-adsorption-type REE deposits
表 2. 离子吸附型稀土矿主要开发技术及特征对比

开发技术	主要浸取剂	技术特点	优点	主要问题	现状
池浸	NaCl	将矿石采出后集中浸取	工艺简单	土壤盐化、生态破坏严重	已淘汰
堆浸	硫酸铵	采出矿石后堆积浸取	浸取效率较池浸提高	仍需剥离矿体，环境扰动大	基本淘汰
原地浸出	硫酸铵等	直接向矿体注液浸取	不需大规模采挖，资源回收效率较高	易造成地下水污染、浸取盲区、滑坡等问题	目前主要工艺
绿色浸取技术	镁盐、复合浸取剂等	强调低污染、高效率	环境友好性较好	成本和工业化稳定性仍需提高	研究热点

Table 3. Comparison of major green leaching systems and their application maturity
表 3. 主要绿色浸取体系及其应用成熟度对比

浸取体系	主要优势	主要局限	技术成熟度与应用判断
硫酸铵体系	浸出快、工艺成熟	铵氮残留和地下水污染风险高	工业应用成熟，但不宜作为长期绿色路线
硫酸镁体系	无铵氮污染，浸出率接近硫酸铵	药剂用量及镁盐富集液处理仍需优化	正由试验研究向工业验证推进，应用前景较好[12]
铵盐-镁盐分段体系	兼顾快速浸出与减污	未完全消除铵氮，参数控制较复杂	可作为传统铵盐向无铵工艺的过渡方案[13]
生物浸出体系	污染较低，具有选择性浸出潜力	周期长、稳定性和放大效果不足	以机理和试验研究为主，短期难以工业替代[18]
电场强化等新技术	可调控离子迁移，减少浸取盲区	能耗及复杂矿体适应性尚不明确	处于试验或示范阶段，需解决能耗与工程放大问题[4]

硫酸镁替代硫酸铵，并不等同于实现绿色开发。相同质量分数条件下，硫酸铵和硫酸镁的浸出率分别可达 91.37%和 89.22%，二者较为接近；但采用镁盐后，后续富集、除杂和稀土回收流程仍需作相应调整。评价绿色浸取剂时，也不能只比较实验室浸出率，还需计入单位稀土产品的药剂消耗、浸矿周期、杂质释放、尾液回用率、残留离子脱除难度和全过程成本。

5. 研究进展

5.1. 成矿与浸取研究进展

离子吸附型稀土矿的成矿研究已逐渐越过单纯描述矿床现象的阶段，开始从母岩、风化、迁移、吸附到保存的完整过程考察矿床形成。余金杰等认为，高分异富稀土母岩构成物质基础，而缓坡地貌、持续风化、充足降水和适宜的地下水条件共同影响工业矿体的形成与保存[1]。

云南邦棍尖山花岗岩的锆石 U-Pb 年龄约为 50.33 Ma。这一结果说明，iREE 矿床的成矿母岩并非只有传统认识中的中生代花岗岩，高海拔地区的新生代岩体同样可能具有找矿潜力[10]。广东韶关红岭矿床的研究则表明，母岩稀土丰度、配分特征和风化壳垂向分异共同控制矿化富集。资源评价除稀土总量外，还应纳入离子相比例、垂向分带和单元素可浸取性[11]。

在开发利用方面，硫酸镁柱浸的稀土浸出率与硫酸铵接近，残留镁离子也较易洗脱；然而，镁盐浸出液的富集、除杂和产品制备还需要相应的工艺配套[12] [37]。生物浸出等低污染技术也开始受到关注，

但浸出效率、过程稳定性和工程放大仍限制其应用[18]。由此可见,相关研究正在由单一成矿因素或浸出率比较,转向对母岩条件、表生风化、资源评价、浸取过程与环境风险的综合分析。不同研究对母岩物质基础与表生富集条件相对重要性的认识仍存在侧重差异,有必要进一步辨析其适用范围和相互关系。生物浸出可通过酸解、基于酸解的离子交换、络合促溶和胞内摄取等机制促进稀土释放(图3)[18]。

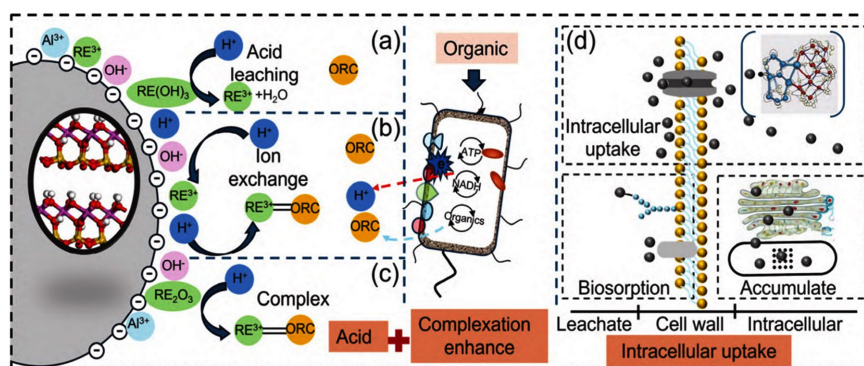


Figure 3. Main bioleaching mechanisms for ion-adsorption-type REE deposits [18]

图3. 离子吸附型稀土矿的主要生物浸出机制[18]

5.2. 成矿认识的差异与研究局限

现有研究对离子吸附型稀土矿成矿主控因素的认识侧重点并不完全一致。一类研究强调富稀土母岩及原岩继承作用,认为母岩的稀土丰度、矿物组合、岩浆分异程度及稀土配分特征构成了风化壳成矿的物质基础,并在较大程度上控制矿床类型和元素组合[1][10][11][22];另一类研究强调表生风化和地貌-水文条件,认为即使母岩具有较高的稀土含量,若缺乏持续风化、适宜降水、地下水迁移、黏土矿物吸附及稳定的风化壳保存条件,也难以形成具有工业价值的矿体[1][22][30][35]。前者主要回答“稀土从何而来”,后者重点解释“稀土如何迁移、富集并保存”,二者并非相互排斥,而是分别对应离子吸附型稀土矿成矿系统中的物源供给和表生富集两个关键环节。

当前研究的主要不足在于,不同矿区对母岩条件、风化强度、水文迁移和黏土吸附作用的评价指标尚不统一,多数成果仍以单矿床或单因素分析为主,难以定量区分各因素对成矿的相对贡献。因此,未来需要建立能够同时表征母岩供源、风化释放、水文迁移、黏土吸附和地貌保存的综合评价体系[10]。

5.3. 数字化、智能化及全球供应链展望

5.3.1. 数字化勘查与资源评价

离子吸附型稀土矿体品位较低,形态明显受地形控制;钻探和化验数据往往稀疏,来源、格式与尺度也不一致。数字化方法可用于整合这些资料,提高已有信息的利用率。例如,将区域地质、遥感、高光谱和DEM地貌数据共同输入机器学习模型,可辅助识别异常、评价成矿远景和优选钻探靶区。已有研究显示,卷积神经网络等模型能够缩小勘查搜索范围,但结果对样本数量、负样本选择、特征工程和具体工作流程十分敏感,统计精度高并不意味着空间预测一定可靠[38][39]。因此,人工智能更适合作为地质推理的辅助工具。实际应用中还需引入矿床系统约束,重视模型可解释性、空间交叉验证、迁移学习和不确定性量化,并保留专家复核,以免所谓“黑箱高精度”导致靶区误判。卷积神经网络成矿预测通常包括训练、验证和测试三个阶段,并以已知矿点对高概率区进行空间校核;该流程可为离子吸附型稀土数字化勘查提供方法借鉴(图4)[38]。

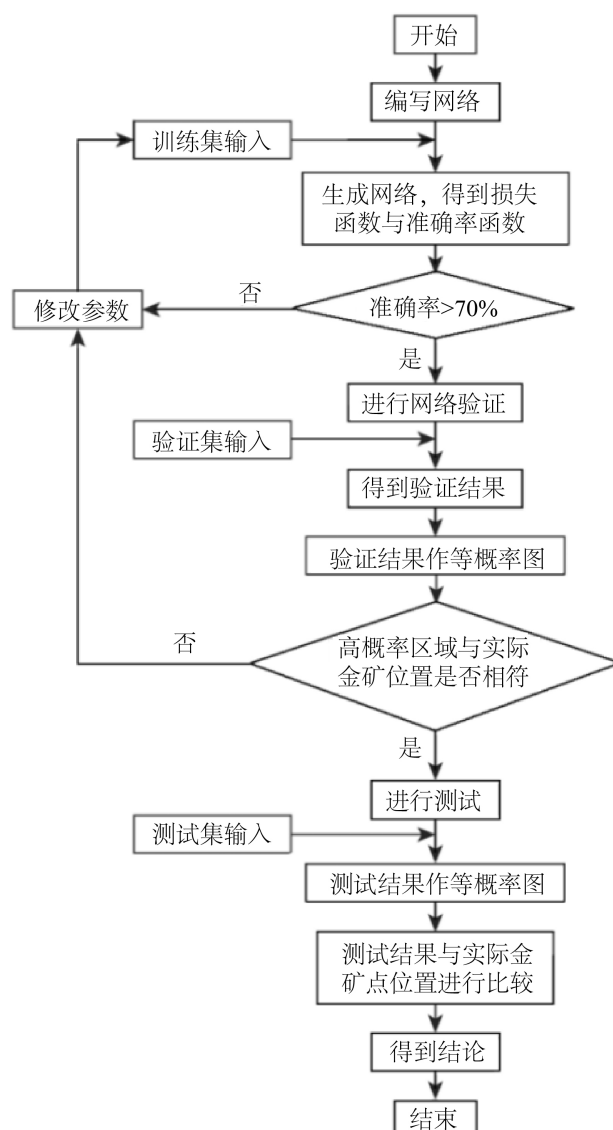


Figure 4. General workflow of convolutional-neural-network-based mineral prospectivity prediction [38]

图 4. 基于卷积神经网络的成矿预测一般流程[38]

5.3.2. 智能开采与环境监控

原地浸出过程难以直接观察，数字化和物联网技术在这一环节有较大的应用空间。依托三维地质-水文地质模型，可布设注液压力、流量、含水率和孔隙水压力等传感器，建立从注液、渗流、收液到尾液处理和边坡响应的实时数据链，再借助数字孪生和优化算法调整井网、注液强度、浸取周期及收液方案。无人机和卫星遥感数据结合深度学习，还可用于识别地表扰动、植被恢复和污染扩散，提高矿山生态监管的时效性[4] [40] [41]。这些技术在矿山环境中的应用并不成熟：传感器需耐受酸性和高湿环境，山区通信稳定性、数据标准、模型漂移、网络安全和初期投入也都有待解决。较为稳妥的做法是先在高风险或高价值环节进行模块化示范，同时设置人工校核和失效保护，确保智能决策不超出地下水、边坡和排放安全阈值。从产业链视角看，资源链、产品链、供应链、技术链、产业链、循环链与资本链相互耦合，共同影响高技术矿产供应的韧性与绿色转型(图 5) [7]。

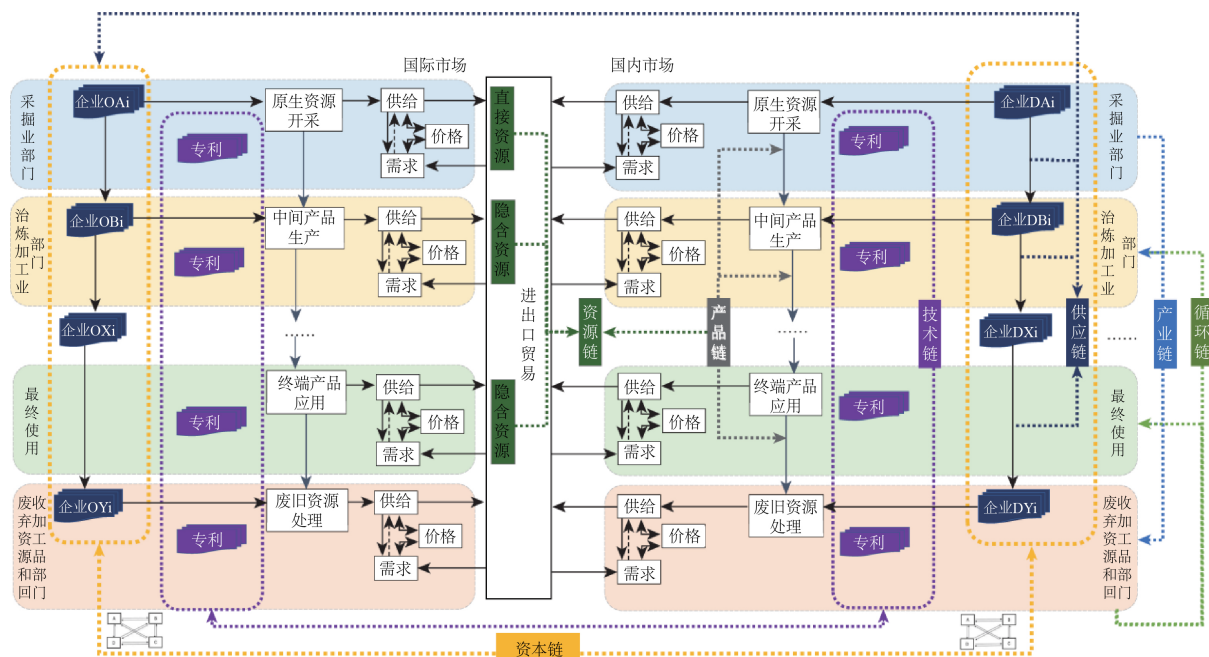


Figure 5. Multi-chain coupling system of the high-tech mineral industry [7]

图 5. 高技术矿产产业链多链耦合系统[7]

5.3.3. 全球稀土供应链变化及其对中国的影响

全球稀土供应链的关注重点已不再局限于效率，安全、韧性和低碳也成为重要考量。美国、日本和澳大利亚等通过财政支持、长期采购、产业联盟及本土加工能力建设，推动供应来源多元化。亚太地区由此形成了澳大利亚资源、东南亚加工与美日韩终端制造相衔接的替代性布局[42]。不过，供应链的集中度仍然很高。高度集中带来了规模、技术和产业配套优势，也使稀土行业更容易受到贸易摩擦、出口管制、投资审查和地缘政治风险的影响[5] [6]。海外供应链扩张可能挤压中国部分中低端产品的市场份额，加剧价格竞争；另一方面，这也促使国内产业将优势从资源和规模进一步转向绿色开采、高效分离、高性能材料、装备与标准。对南方中重稀土优势资源进行保护性利用的同时，还需协调资源安全、绿色开发和产业升级。矿山技术研究则应关注浸取剂迁移、稀土离子交换、杂质释放和溶液渗流之间的耦合关系，改进注液与收液工艺，查明残留浸矿剂的赋存、迁移及环境效应，并完善环境友好型淋洗、铵盐脱除、尾液脱氮和母液循环利用体系。在国际层面，可借助碳足迹、数字追溯和责任矿业标准，将产业韧性建立在技术、绿色成本、循环供应和稳定合作能力之上[7]。

6. 结论

离子吸附型稀土矿以稀土离子吸附于黏土矿物表面为主要赋存特征，具有中重稀土占比高、可直接浸取和战略价值突出的资源优势。本文系统梳理了其母岩条件、风化淋滤-迁移吸附成矿过程、华南集中分布格局，以及开发工艺由池浸、堆浸向原地浸出和绿色浸取演进的历程。

当前开发利用的核心矛盾已由“能否高效采出”转向“如何在安全、绿色和经济约束下实现精准回收”。原地浸出虽减少了大规模剥采并提高了资源回收效率，但仍面临矿体非均质导致的浸取盲区、浸出液泄漏、地下水污染、氨氮残留、边坡失稳及闭矿修复困难；同时，资源评价仍偏重稀土总量，对离子相比例、垂向分带和单元素可浸取性的刻画不足。

未来发展的重要机遇在于，将绿色浸取剂、尾液循环和残留离子脱除，与三维地质-水文模型、传

感监测、数字孪生及智能优化相结合,推动勘查、开采与治理全过程协同。立足资源安全与绿色发展的总体要求,应由单一资源开发转向“资源安全-生态约束-产业升级-循环供应”一体化战略,以矿床系统认识提升找矿与评价精度,以全过程环境成本约束技术选择,并通过高效分离、再生稀土、数字追溯和责任矿业标准增强产业链韧性,最终实现中重稀土资源的保护性开发与长期稳定供给。

参考文献

- [1] 余金杰, 陈绍聪, 陈小丹. 中国稀土矿床的矿床类型、时空分布和找矿方向[J]. 地质学报, 2025, 99(8): 2493-2512.
- [2] 朱文兴, 胡恒祺, 徐水太. 中国稀土政策演进分析及评价研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(1): 171-178.
- [3] 罗翔, 李政, 祝爽. 我国稀土企业集团整合赋能产业链延伸的历程、机制、效应与展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(6): 70-81.
- [4] 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.
- [5] 高平风, 李倩, 刘业娇, 等. 国际稀土产业链安全研究: 来自境外亚太地区的潜在挑战[J]. 中国矿业, 2025, 34(6): 57-69.
- [6] 李鹏, 刘岩, 汤辰昱, 等. 中国高科技矿产资源供应安全现状与保障路径[J]. 工程科学学报, 2026, 48(4): 697-719.
- [7] 李华姣, 李政, 郑欣欣, 等. 全球高技术矿产产业链供应链重构研究[J]. 资源科学, 2025, 47(7): 1393-1402.
- [8] 张举, 丁枫, 孙培均, 等. 赣南赣肚山花岗岩地球化学特征及对稀土成矿的指示[J]. 地质论评, 2025, 71(5): 1666-1686.
- [9] 刘文斌, 田世洪, 何川, 等. 高岭石对富稀土花岗岩风化过程中 Li 同位素分馏和稀土富集成矿的制约: 以赣南足洞地区为例[J]. 地质学报, 2025, 99(6): 2096-2111.
- [10] 陆蕾, 王成辉, 王登红, 等. 云南邦棍尖山花岗岩的岩石学、地球化学和年代学特征对离子吸附型稀土成矿的制约[J]. 地质学报, 2023, 97(5): 1494-1507.
- [11] 郭敏, 黄玲玲, 孙社良, 等. 广东韶关红岭黑云母花岗岩和离子吸附型稀土矿床地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(4): 561-578, 595.
- [12] 李超, 舒荣波, 程蓉, 等. 离子型稀土不同浸出剂柱浸对比试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4): 38-43.
- [13] 黎佳文, 胡世丽, 王观石, 等. 离子吸附型稀土矿浸矿剂溶液优化试验研究[J]. 中国稀土学报, 2025, 43(4): 788-796.
- [14] 魏明远, 秦磊, 王观石, 等. 原地浸矿经验注液下离子型稀土残留规律[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(4): 1287-1296.
- [15] 林福明, 安厚睿, 王观石, 等. $\text{La}^{3+}/\text{NH}_4^+$ 在双电层内交换过程中铵的吸附规律[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(8): 2762-2772.
- [16] 胡思涛, 秦磊, 王观石, 等. 影响离子型稀土矿浸出液 H^+ 浓度的因素[J]. 化工进展, 2025, 44(7): 4267-4273.
- [17] 林福明, 王观石, 秦磊, 等. 黏土矿物表面扩散双电层中物理吸附态铵赋存位置分析[J]. 化工进展, 2025, 44(10): 6093-6101.
- [18] 赵梦飞, 韩赫兴, 杨幼明, 等. 离子吸附型稀土矿生物浸出技术研究进展[J]. 化学学报, 2025, 83(4): 415-427.
- [19] 罗凡, 严加永, 梁健, 等. 稀土资源领域物探技术应用现状及展望[J]. 中国稀土学报, 2024, 42(6): 1088-1101.
- [20] 范存文, 郭佩洁, 胡予佳, 等. 离子型稀土矿山氨氮废水生物脱氮技术研究进展[J]. 工业水处理, 2025, 45(1): 9-16.
- [21] 黄金, 肖信锦, 王慧娟, 等. AM 真菌对离子型稀土矿山废弃地土壤修复改良效果研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(1): 132-141.
- [22] Russo, S.C., González-Álvarez, I., Cocker, H.A. and McCoy-West, A.J. (2025) The Fundamentals of Rare Earth Element Ion Adsorption Clay Deposits: A Mineral Systems Approach for Exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **278**, Article ID: 107845. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107845>
- [23] 池汝安, 田君, 罗仙平, 等. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(4): 1-13.
- [24] 彭琳琳, 陈斌锋, 邹新勇, 等. 离子型稀土矿稀土配分特征及类型划分新方案[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(4): 624-632.
- [25] Ishihara, S., Hua, R., Hoshino, M. and Murakami, H. (2008) REE Abundance and REE Minerals in Granitic Rocks in

- the Nanling Range, Jiangxi Province, Southern China, and Generation of the REE-Rich Weathered Crust Deposits. *Resource Geology*, **58**, 355-372. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00070.x>
- [26] Maulana, A., Yonezu, K. and Watanabe, K. (2014) Geochemistry of Rare Earth Elements (REE) in the Weathered Crusts from the Granitic Rocks in Sulawesi Island, Indonesia. *Journal of Earth Science*, **25**, 460-472. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0449-z>
- [27] Bern, C.R., Yesavage, T. and Foley, N.K. (2017) Ion-Adsorption REEs in Regolith of the Liberty Hill Pluton, South Carolina, USA: An Effect of Hydrothermal Alteration. *Journal of Geochemical Exploration*, **172**, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.009>
- [28] 赵芝, 王登红, 王成辉, 等. 离子吸附型稀土找矿及研究新进展[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1454-1465.
- [29] 苑鸿庆, 李社宏, 缪秉魁, 等. 广东惠东地区离子吸附型稀土矿床地球化学特征[J]. 现代地质, 2016, 30(6): 1267-1275.
- [30] 冯梦, 许成, 王睿, 等. 南岭西段姑婆山-花山花岗岩基差异剥蚀机理与风化矿床分布特征[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(4): 670-679.
- [31] 李社宏, 严松, 缪秉魁, 等. 中南地区与花岗岩有关的离子吸附型稀土矿床成矿预测[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(1): 9-16.
- [32] 丁嘉榆. 离子型稀土矿开发的历史回顾——纪念赣州有色冶金研究所建所 60 周年[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(4): 14-19.
- [33] 贺伦燕, 王似男. 我国南方离子吸附型稀土矿[J]. 稀土, 1989(1): 39-44.
- [34] 孙正, 曹亚非, 刘峰, 等. 离子型稀土矿原地浸矿场地分类及人体健康风险预测[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1186-1195.
- [35] 池汝安, 张臻悦, 余军霞, 等. 风化壳淋积型稀土矿研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1178-1192.
- [36] 陈昕, 贺强, 陈金发, 等. 离子吸附型稀土矿绿色高效浸取工艺及原理研究进展[J]. 中国稀土学报, 2022, 40(6): 936-947.
- [37] 柯兆华, 郭安, 邱小英, 等. 从离子型稀土镁盐富集物中提取稀土工艺初探[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(1): 61-67.
- [38] 郑孝诚, 张明华, 任伟. 卷积神经网络在山东金矿勘查预测中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1433-1440.
- [39] 张振杰, 成秋明, 杨玠, 等. 机器学习与成矿预测: 以闽西南铁多金属矿预测为例[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 221-235.
- [40] 黄彬, 陈斌锋, 马艳平, 等. 基于地质条件的离子型稀土矿原地浸矿工艺适用性评价模型构建研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2025, 77(6): 87-97.
- [41] 李兴梅, 李恒凯, 刘锟铭, 等. 融合全局特征 YOLOv8n 网络的稀土矿区复垦植被检测方法[J]. 遥感学报, 2026, 30(3): 493-506.
- [42] Hamed, M.M., Turan, H.H. and Elsawah, S. (2024) Balancing Supply Diversification and Environmental Impacts: A System Dynamics Approach to De-Risk Rare Earths Supply Chain. *Resources Policy*, **92**, Article ID: 105038. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105038>