DOI：10.12474/cdlgzrkx.2026051801

非传统关键矿产开发利用若干发展方向

胡瑞忠[1,2*]，潘力川[1]，陈　伟[1]，阳杰华[1]

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室，贵阳 550081；
2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院，北京 100049

[摘要] 非传统关键矿产是指当前因技术经济制约暂难利用、但未来有望转化利用的潜在资源。全球关键矿产需求激增，亟需寻找接替资源。本文综述了碳酸盐黏土型锂矿、沉积型铌–锆–稀土–镓矿、磷块岩型稀土矿、风化壳型钪矿及海底关键金属等非传统关键矿产。碳酸盐黏土型锂矿由泥质碳酸盐岩风化产物在陆相和海陆交互相水体中沉积形成，资源前景巨大，但矿石难选；沉积型铌–锆–稀土–镓矿多由玄武岩风化沉积形成，品位较低、赋存复杂，需研发新工艺；磷块岩型稀土矿的重稀土占比高，资源量大，但提取技术尚处于实验阶段；风化壳型钪矿发育在热带–亚热带基性–超基性岩的风化壳中，中国已圈定多个靶区，但勘查与提取技术薄弱。海底多金属结核、富钴结壳、深海稀土和热液硫化物蕴藏巨量关键金属，但开采面临生态风险与国际法规限制。此外，煤系、黑色页岩、矿业废弃物及“呆矿”中也蕴含关键金属。总体而言，非传统关键矿产潜力巨大，亟待突破理论、技术与政策瓶颈，实现其向可利用资源的战略跨越。

[关键词] 非传统关键矿产；主要资源类型；开发利用；发展方向

[分类号] P612　　[文献标志码] A

Several development directions for the exploitation and utilization of unconventional critical minerals

HU Ruizhong[1,2*]，PAN Lichuan[1]，CHEN Wei[1]，YANG Jiehua[1]

1. *State Key Laboratory of Critical Mineral Research and Exploration, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang　550081, China*;
2. *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing　100049, China*

Abstract: Unconventional critical minerals refer to potential resources that are currently difficult to utilize due to techno-economic constraints, but are expected to be converted into usable resources in the future. The surging global demand for critical minerals urgently requires the search for substitute resources. This paper reviews several types of unconventional critical minerals, including argillaceous carbonate rocks derived from clay-type lithium resources,

收稿日期：2026-05-18；**改回日期：**2026-05-25。　**责任编辑：**黄维婷。　**期刊主页：**https://xbzrkx.cdut.edu.cn/
基金项目：国家自然科学基金项目（92562304）；中国科学院学部咨询评议项目。
***通信作者：**胡瑞忠（1958—），男，博士，中国科学院院士，研究方向：矿床学和矿床地球化学，E-mail：huruizhong@vip.gyig.ac.cn。
引用格式：胡瑞忠，潘力川，陈伟，等，2026. 非传统关键矿产开发利用若干发展方向[J]. 成都理工大学学报（自然科学版），53（4）：655—667.
Hu R Z, Pan L C, Chen W, et al., 2026. Several development directions for the exploitation and utilization of unconventional critical minerals[J]. Journal of Chengdu University of Technology（Science & Technology Edition），53（4）：655—667.

sedimentary niobium-zirconium, rare earth element, and gallium resources, phosphorite-type rare earth element resources, laterite-type scandium resources, and seafloor critical metals. Argillaceous carbonate rocks derived from clay-type lithium resources form by the sedimentation of weathered products from argillaceous carbonate rocks in continental and marine-terrigenous transitional water bodies; they hold substantial resource potential, but the ores are difficult to process. Sedimentary niobium-zirconium, rare earth element, and gallium resources are mostly formed by weathering and sedimentation of basalts. They have lower grades and complex occurrences, requiring the development of new processing technologies. Phosphorite-type rare earth element resources have a high proportion of heavy rare earth elements and large resource quantities, but extraction technologies are still at the experimental stage. Laterite-type scandium resources develop in the weathered crusts of mafic-ultramafic rocks in tropical to subtropical regions. Several target areas have been delineated in China, yet exploration and extraction techniques remain underdeveloped. Deep-sea polymetallic nodules, cobalt-rich crusts, deep-sea rare earth elements, and hydrothermal sulfides contain enormous quantities of critical metals, but their extraction faces ecological risks and international regulatory restrictions. In addition, coal beds, black shales, mining wastes, and refractory ores also hold significant potential for critical metals. Overall, unconventional critical minerals offer great potential, and it is imperative to break through the bottlenecks in theory, technology, and policy to achieve a strategic transition from these unconventional critical minerals to exploitable resources.

Key words: unconventional critical minerals; main types of resources; exploitation and utilization; development directions

关键矿产(critical minerals)是战略性矿产的重要组成部分,主要包括稀土、稀有、稀散和稀贵这“四稀”金属中的关键种类。当前,全球科技革命与产业升级方兴未艾,新能源、高端制造、国防科技等战略性新兴产业的迅猛发展,推动关键金属的需求持续攀升。美西方已将关键矿产上升为核心安全关切,以前所未有的力度加强相关研究布局(Gulley et al., 2018; 陈骏, 2019; 翟明国等, 2019; 侯增谦等, 2020; 胡瑞忠等, 2020; Sovacool et al., 2020)。中国锂(Li)、铍(Be)、钴(Co)、镍(Ni)、铌(Nb)、锆(Zr)等关键矿产的对外依存度高达 60%～99%,稀土(REE)、锗(Ge)、镓(Ga)等传统优势矿产探明储量的全球占比亦呈下降趋势(翟明国等, 2019; 陈甲斌等, 2022; USGS, 2025),对国家资源安全构成严峻挑战。

非传统(unconventional)关键矿产,特指受当前经济与技术等因素制约,暂难实现开发利用的潜在资源,未来随着科技进步或市场需求变化,有望转化为可用的关键矿产。例如,华南的离子吸附型稀土矿在 1969 年之前同样属于无法开发利用的非传统关键矿产,后因提取技术的突破,贡献了目前全球 90% 以上的重稀土,已成功转化为至关重要的关键矿产(何宏平和杨武斌, 2022; USGS, 2022)。初步研究表明,非传统关键矿产潜力巨大,是最具现实意义的关键矿产接替资源。

绝大多数关键矿产以“稀”为主要特征(翟明国等, 2019),全球探明储量与增储空间相对有限。为确保关键金属供应的可持续性,除需持续重视现有可利用关键矿产的开发利用外,也应未雨绸缪,前瞻布局,突破理论与技术瓶颈,推动非传统关键矿产向可利用关键矿产的转化。本文围绕碳酸盐黏土型 Li 矿、沉积型 Nb-Zr-REE-Ga 矿、磷块岩型 REE 矿、风化壳型 Sc 矿等新类型关键矿产和海底关键矿产等的开发利用做一扼要总结,旨在推动潜在关键矿产向可利用关键矿产的跨越,打造关键矿产的新增长极,提升关键矿产的自主保障能力。

1 碳酸盐黏土型 Li 矿

锂矿床主要分为花岗伟晶岩型、盐湖(卤水)型和黏土岩型 3 类(Kesler et al., 2012; Benson et al., 2017)。其中,黏土型锂矿床是指产于沉积岩中、锂以吸附、类质同象或矿物等形式赋存于黏土矿物中的锂资源。国际公认的黏土型锂矿主要分布在美国、墨西哥、塞尔维亚等国,资源前景可观,仅美国麦克德米特(McDermitt)黏土型锂矿床的锂资源量就已达到约 200×10^4 t(Castor and Henry, 2020)。此类矿床多发育于封闭的破火山口湖相盆地,成矿过程伴随热液活动,矿体周围发育低温热液蚀变,矿床中的锂主要来源于火山

物质及相关的深部岩浆活动，并以赋存于锂皂石中为主（Benson et al., 2017; Castor and Henry, 2020）。

近年来，中国西南地区发现了一种新型锂矿——碳酸盐黏土型锂矿（温汉捷等, 2020）。该类矿床由出露地表的泥质碳酸盐岩的风化产物沉积形成。具体过程为：上游蚀源区中锂含量较高的泥质碳酸盐岩在风化过程中，碳酸盐组分（$CaCO_3$ 或 $MgCO_3$）溶解进入水体，溶解态的锂与不溶的泥质组分一并被搬运；泥质组分在下游水体中沉积，形成黏土层；在搬运与沉积过程中，蒙脱石等泥质组分持续吸附锂，经成岩作用最终形成富锂黏土岩。可见，该类矿床的成矿过程与上述与火山作用有关的黏土型锂矿存在显著差异，因其成矿与碳酸盐岩风化密切相关，故命名为碳酸盐黏土型锂矿。

温汉捷等（2020）研究指出，该类矿床的成矿物质主要来源于基底不纯碳酸盐岩（如白云岩和灰岩）的风化产物；锂与富镁黏土矿物（如蒙脱石、柯绿泥石、伊利石等）密切相关，蒙脱石的伊利石化和柯绿泥石化是成岩过程中锂得以保存的关键（崔燚等, 2022; Yang et al., 2025）；还原、低能、滞留的滨海沼泽、潟湖等局限陆相及海陆过渡相古地理环境，对锂的富集具有重要控制作用；除锂外，矿床中常伴有 Ga 和 REE 的富集；锂矿常与铝土矿相伴产于同一层位，二者关系密切，均为泥质碳酸盐岩基底风化沉积的产物。相较于铝土矿，富锂黏土岩的铝硅比（A/S）更小，A/S 在 1 左右的黏土岩中锂最为富集，被称为“锂窗效应”。

该类矿床具有较大的找矿潜力。以滇中玉溪地区为例，倒石头组黏土岩中 Li_2O 平均质量分数约为 0.3%，最高可达 1.1%，通过局部区域的科研勘查已获得 Li_2O 资源量 34×10^4 t，达到超大型锂矿床规模（温汉捷等, 2020），预测 Li_2O 资源可达 500×10^4 t（赵汉斌, 2019）。中国贵州、广西、重庆、四川、河南、陕西等主要铝土矿产区，均具备形成此类新类型锂矿的地质条件，显示出巨大的资源前景。

碳酸盐黏土型锂矿具有厚度大、分布稳定、资源前景良好、适宜露天开采等特点，被认为是缓解中国锂资源对外依存度高、保障新能源等产业供应链安全的重要潜在方向（胡瑞忠等, 2020; 温汉捷等, 2020）。然而，由于该类矿石粒度极细、矿物组成复杂，属于难选矿石，亟需开发适用于锂、镓及稀土元素多组分协同回收的绿色选冶技术，以实现资源的高效利用。

2　沉积型 Nb-Zr-REE-Ga 矿

传统上，全球 Nb 和 REE 资源主要与碳酸岩−碱性岩有关（Xie et al., 2019; 王强等, 2024），而 Zr 资源则主要分为两类：一类是由分异充分的碱性花岗质岩浆−热液系统形成的内生矿床；另一类是外生作用形成的砂矿床（尹传凯等, 2024）。二叠纪晚期（260～255 Ma），地幔柱活动形成了覆盖扬子地块西南部四川、云南、贵州和广西等省区、面积约 50×10^4 km^2 的巨厚玄武岩，以及部分镁铁−超镁铁侵入岩、花岗岩和正长岩，共同构成峨眉山大火成岩省（Xu et al., 2001; 胡瑞忠等, 2005; Zhong et al., 2011）。峨眉山玄武岩之上沉积了上二叠统宣威组湖相地层，该套地层底部在较多区域富集 Nb、REE、Zr、Ga 等多种关键金属元素（胡瑞忠等, 2020）。其中，铌平均质量分数为 220×10^{-6}（Nb_2O_5），局部超常富集至 $1\,000\times10^{-6}$，已超过风化壳型铌（钽）矿床的工业品位［（160～200）$\times10^{-6}$，《矿产地质勘查规范 稀有金属类》（DZ/T 0203—2020）］；稀土含量亦较高，轻稀土（LREE）质量分数为（850～5 500）$\times10^{-6}$，达到风化壳型稀土矿床工业品位［（800～1 500）$\times10^{-6}$］；镓平均质量分数约 50×10^{-6}，超过铝土矿中镓的工业品位（20×10^{-6}）（胡瑞忠等, 2020）。该类矿化分布广、厚度大、延伸稳定，在滇东昭通—宣威—富源、黔西赫章—威宁、川南沐川—美姑—昭觉等地均发育宣威组多金属富集层，显示出巨大的资源前景（Dai et al., 2010; Zhang et al., 2016; Deng et al., 2022; Wang et al., 2025）。

这些多金属富集层中有用组分的赋存状态复杂：Nb 主要赋存于金红石、铌铁金红石、铌铁矿、板钛矿和白钛矿中；REE 的载体矿物包括磷铝铈矿、水磷铈矿、独居石、磷钇矿、锆石、磷灰石和稀土碳酸盐矿物；Zr 主要赋存于锆石中；Ga 则以替代 Al 的方式进入高岭石、勃母石、三水铝石等自生矿物。此外，这些元素还可能以离子吸附态被黏土矿物吸附（Dai et al., 2010; 代世峰等, 2014; Zhang et al., 2016; Zhao et al., 2016, 2017; 袞民汕等, 2021; Deng et al., 2022）。关于 Nb-Zr-REE-Ga 的来源，目前主要有 3 种观点：（1）多金属富

集层底部峨眉山玄武岩直接风化的结果(王伟等, 2011; Deconinck et al., 2014; 杜胜江等, 2019; Wang et al., 2025);(2)来自峨眉山大火成岩省顶部的酸性岩(He et al., 2007; Deng et al., 2022);(3)来自碱性火山灰-热液流体的混合作用(Dai et al., 2010, 2018)。上述观点仍有待进一步研究证实。例如,侯明才等(2011)发现,宣威组底部的峨眉山高钛玄武岩中,除钛铁矿和磁铁矿外,还存在一类重要的高钛矿物——榍石。杜胜江等(2019)对这类榍石的研究表明,其极为富集 Nb、REE、Zr 等元素,很可能是成矿物质的主要贡献者。然而,研究区玄武岩中广泛发育的榍石如何形成,以及在风化剥蚀和沉积过程中如何控制这些元素的富集,目前尚不明确。

总之,该类沉积型矿床与 Nb、Zr、REE 等的传统矿床类型在成因和矿物学上截然不同,属于一种新的矿床类型,资源潜力大,但其成因仍存在较大争议。由于矿石品位相对较低、元素赋存状态复杂,传统物理选矿和湿法冶金技术难以实现经济高效的分选与提取,开发利用尚处于技术研发与探索阶段,未实现大规模工业化开采。因此,亟需开展成矿机制的精细刻画,并研发绿色高效的选冶联合工艺,以实现多元素的综合回收利用。

3 磷块岩型 REE 矿

全球当前利用的轻稀土资源主要集中于碳酸岩-碱性岩型矿床,而中重稀土则主要来源于离子吸附型矿床。然而,后者在全球稀土总储量中占比较低,存在较大的供应风险(Hoshino et al., 2016)。因此,开发新型中重稀土资源具有重要意义。全球部分磷块岩矿床中的中重稀土元素高度富集,显示出巨大的开发利用潜力。

全球磷矿资源分布广泛,但其稀土质量分数差异显著。从地质时代来看,前寒武纪磷矿稀土质量分数普遍较低($<400\times10^{-6}$),而自古生代以来形成的一些磷块岩,尤其是晚泥盆世矿床,稀土质量分数最高可达 $18\,000\times10^{-6}$(Emsbo et al., 2015)。从空间分布看,非洲磷矿稀土质量分数普遍较低($<1\,000\times10^{-6}$),巴西磷矿稀土质量分数最高可达 $16\,000\times10^{-6}$(Haneklaus et al., 2024),中国什邡磷矿稀土质量分数最高为 $5\,000\times10^{-6}$(Zhang et al., 2022)。目前,关于磷块岩型稀土资源的系统数据仍较为有限,亟需进一步开展资源潜力评估。美国磷块岩中估算蕴藏稀土资源约 130×10^4 t,其中中重稀土约占 1/3;中国贵州织金磷矿稀土平均质量分数为 0.11%,资源量达 350×10^4 t,中重稀土占比超过 30%(贵州省地矿局 104 地质大队, 2016)。这些矿床是除目前可利用的离子吸附型矿床之外,具有重要潜力的中重稀土来源。

磷块岩中稀土元素的富集受源区特征、矿物结构、成岩过程及后期改造等多种因素控制。稀土来源主要为陆源风化输入与海水自生沉淀的两端元混合(Zhang et al., 2023; Zivak et al., 2024),其富集程度受控于风化源岩的稀土含量(Valetich et al., 2022)。在成岩过程中,氧化还原条件的波动促使稀土通过铁-锰氧化还原泵机制富集于孔隙水中,进而被磷灰石吸附(Liao et al., 2019);重结晶、海绿石化等后期变化也可能引起稀土的二次富集(Kechiched et al., 2018)。然而,并非所有磷矿均富集稀土(Zhang et al., 2022),其主控因素因矿床而异,涉及氧化还原、生物作用、古地貌条件及热液活动等多重机制(Ferhaoui et al., 2022; Xing et al., 2024)。

在磷块岩中,稀土元素主要通过类质同象替换磷灰石晶格中的钙离子而赋存(Liao et al., 2019)。由于稀土含量较低且以类质同象形式存在,其提取与分离难度较大。传统硫酸酸解法易使稀土进入磷石膏,增加回收成本(Kandil et al., 2010);盐酸、硝酸和磷酸法虽可降低成本,但工艺复杂。液-液萃取等传统方法存在能耗高、杂质多、废水废气污染等问题(Wu et al., 2018; 梁惠佳等, 2024)。目前,浮选法可使稀土回收率超过 80%,但酸浸法仍面临环保与成本压力。近期研究表明,微生物选矿与稀土电化学转换技术,可能为磷块岩中稀土的综合利用提供新方向(Balaram, 2025)。例如,微生物选矿利用溶磷微生物的代谢活动(产酸/络合)靶向破坏矿物晶格,可在温和条件下实现低品位矿和工业废渣中稀土的绿色、低成本回收,展现出显著的应用潜力(Vijayarathna et al., 2026)。

全球磷矿资源储量约为 700×10^8 t,主要分布于美国、澳大利亚、巴西、中国和摩洛哥(USGS, 2022)。基于现有成矿模型的评估显示,磷块岩具有较好的中重稀土成矿潜力。尽管当前磷矿中稀土的提取技术多处于实验阶段,但由于磷矿资源分布广泛、储量巨大,且部分矿床中重稀

土占比较高，磷块岩型稀土资源有望成为未来中重稀土供应的重要补充。未来应聚焦成矿机制与成矿规律研究，构建系统性的成矿模型，并发展绿色、高效、低成本的稀土分离提取技术，以推动该资源的潜在战略价值向现实产业优势转化。

4　风化壳型 Sc 矿

Sc 作为稀土元素中的重要关键金属，其价格高达黄金的 4～5 倍（Wang et al., 2021; Zhou et al., 2022），但在自然界中高度分散，极少能富集形成以 Sc 为主的矿床（Wang et al., 2021; Zhou et al., 2025）。钪的原子半径（0.087 nm）远小于其他稀土元素（0.097～0.116 nm）（Shannon, 1976），其地球化学行为也与多数稀土元素存在显著差异。除中国白云鄂博稀土矿床中伴生较为丰富的钪资源外，钪通常并不与稀土矿床密切共生（Williams-Jones and Vasyukova, 2018; Wang et al., 2021）。此外，由于提取难度大，来自黑钨矿、伟晶岩、矿山尾矿、赤泥及煤渣等来源的钪供应存在不稳定、可靠性低的问题（Ercit, 2005; Dushyantha et al., 2020）。当前钪的供需矛盾已引起广泛关注，预计未来 10 年内对 Sc 的需求将进一步增加 10 倍（Phoung et al., 2023），亟需寻找新型钪资源。

近年来，世界各地陆续发现多种富钪火成岩，如俄罗斯科拉半岛的磁铁橄磷岩-碳酸岩杂岩体（Kalashnikov et al., 2016）、芬兰基维涅米地区的铁质闪长岩（Halkoaho et al., 2020）、加拿大火山口湖地区的铁质正长岩（Beland and Williams-Jones, 2023）、中国峨眉山大火成岩省中的碱性辉石岩（Zhou et al., 2022）以及雷—琼地区的新生代洋岛玄武岩（Zhou et al., 2025）等。然而，这些传统岩浆岩型钪资源普遍存在“品位低、难利用、成本高”的问题。最新研究发现，富钪母岩在经历长期风化作用后，钪可在风化壳中发生超常富集，形成风化壳型钪矿，其钪含量可比基岩提高 5～10 倍，尤其是在炎热潮湿的热带至亚热带地区，例如澳大利亚新南威尔士州发育于镁铁-超镁铁质岩之上的风化成因红土型钪矿（Chassé et al., 2019）。

近年来，中国科学院地球化学研究所科研团队在风化壳型钪资源研究与找矿勘查方面取得重要进展，已在华东、华南及西南地区成功圈定多个找矿远景区和靶区。其中，在峨眉山大火成岩省的云南鸡街和水口镜碱性杂岩体风化壳中圈定出 2 个钪资源靶区，风化壳平均钪品位为新鲜富钪基岩的 2～5 倍，预测并经钻孔验证，在 15 m 以浅区域内氧化钪资源量为 1 100～3 500 t（Zhao et al., 2023）；在华南武夷—云开造山带东南缘的兰排镁铁-超镁铁质岩体风化壳中圈定 1 个钪资源靶区，其氧化钪品位最高可达 450×10^{-6}，远超目前工业利用的边界品位（90×10^{-6}），是中国目前已报道品位最高的风化壳型钪资源，钻孔验证表明，5 m 以浅高品位（氧化钪 > 230×10^{-6}）区段的氧化钪资源达 730 t（周美夫等，2024）。

研究表明，母岩中辉石等富钪矿物在风化壳形成过程中经历了活化-迁移-沉淀的多阶段富集过程。风化早期，从母岩中释放出的钪常以类质同象形式赋存于蒙脱石等黏土矿物中；至风化中期，伴随磁铁矿和蒙脱石的溶解，钪逐渐转变以铁（氢）氧化物矿物为主要载体，富集程度达到最高；至风化晚期，铁（氢）氧化物进一步溶解，部分钪表现出继续向下迁移、在特定层位进一步聚集的趋势（Zhao et al., 2023; 周美夫等，2024）。

风化壳型钪资源分布广泛、埋藏较浅，被视为具备重要经济潜力的新型钪资源。然而，目前其勘查与可利用性评价工作仍较为薄弱，相关提取技术几乎处于空白状态，亟需建立完善的勘查标准体系，研发绿色高效提取技术，以推动该类重要新型资源的开发利用。

5　海底关键金属

至今，海底已发现多金属结核、富钴结壳、深海稀土和热液硫化物等 4 种非传统关键金属矿产（Vadakkepuliyambatta et al., 2024; 图 1），蕴藏巨量的 Cu、Ni、Co、PGE 和 REE 等关键金属。这些海底关键金属尚未得到开发利用，由于其资源量巨大，可作为陆地相关矿产资源的战略接替。

5.1　多金属结核

海底多金属结核又称锰结核或铁锰结核，由核心和同心环状壳层构成，呈球状、椭球状、菜花状等形态，直径从数厘米到十余厘米。核心为岩石碎屑或生物残骸，壳层主要由铁锰氧化物和氢氧化物组成。结核富含 Fe、Mn、Ni、Co、Pt、Te、REE、Cu 等多种金属元素，广泛分布于太平洋、印度洋和大西洋水深 3 000～6 000 m、沉积速率

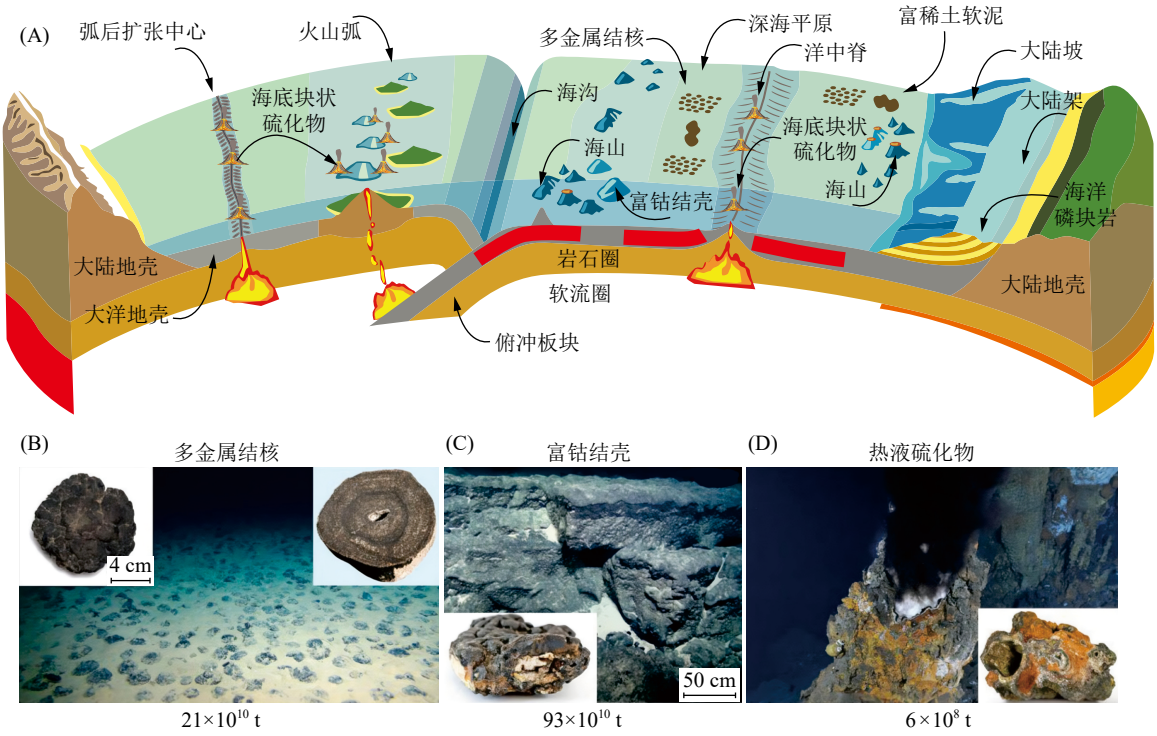


图 1 海底关键矿产类型与形成构造背景

Fig. 1 Subsea critical minerals: types and tectonic controls

(A)深海矿产资源地质背景;(B)太平洋 CCZ 多金属结核图像;(C)北大西洋 Tropic 海山富钴结壳图像;(D)太平洋某硫化物矿化黑烟囱热液喷口图像

(图 1-B～D 下方数字为相关资源的矿石量)

极低(<20 mm/ka)的深海平原(Vadakkepuliyambatta et al., 2024; 图 1-A、D)。结核生长速率极其缓慢,约为几毫米至几厘米每百万年(Halbach et al., 1980),受物源供给、沉积物的沉积与改造、底水流动状态与组成、生物扰动等多因素控制(Hein and Koschinsky, 2014)。关于结核的形成,主要有水成和成岩 2 种观点:水成观点认为金属直接从海水中氧化沉淀;成岩作用则涉及沉积物孔隙水中金属离子的迁移和再沉淀(Vadakkepuliyambatta et al., 2024)。此外,热液活动、生物作用及宇宙尘埃输入也可能提供物质来源。

最新估算显示,全球海底结核矿石总量约 21×10^{10} t(Mizell et al., 2022)。太平洋 Clarion-Clipperton 断裂带之间(CCZ)是资源最富集、最具经济价值的区域,蕴藏约 211×10^{8} t 多金属结核,其中 Co、Ni、Y、Te、Tl、Mn 的资源量巨大,分别约为其陆地总储量的 3.4 倍、1.8 倍、3.3 倍、1.6 倍、6 000 倍和 1.2 倍(Hein et al., 2013, 2015, 2020)。

5.2 富钴结壳

海底富钴结壳也称富钴铁锰结壳,产于水深 800～3 000 m、缺少沉积物的海山、海沟、洋脊和海底高原等斜坡基岩表面。其物质组成以 Fe、Mn 氧化物为主,同时富含 Co、Ni、Pt、REE 等,由周围水体中的金属沉淀而形成(Vadakkepuliyambatta et al., 2024; 图 1-A、C)。结壳生长极其缓慢,速率为 1～7 mm/Ma,厚度为 1～260 mm,需要长期稳定的氧化环境和低沉积速率(Hein et al., 2000, 2010)。由于生长速率极慢且表面积巨大,结壳通常能吸附多种关键金属,使其浓度远高于其他环境。例如,结壳中的 Co 含量通常是陆地钴矿床的 3～10 倍(Hein et al., 2010),因而极具吸引力。

中、西太平洋的海山是最具潜力的富钴结壳区域,因而被称为“主壳带”(prime crust zone, PCZ)(Petersen et al., 2016)。富钴结壳通常具有比多金属结核更高的钴及其他关键金属含量(Hein and Koschinsky, 2014),但其资源量的现有数据仍较为有限。最新估算显示,全球海底富钴结壳总量约为 93×10^{10} t(Mizell et al., 2022)。仅 PCZ 的富钴结壳估计达 75×10^{8} t,其中 Co、Y、Te、Tl 资源量巨大,分别约为其陆地探明总储量的 4 倍、

3.5 倍、9 倍和 1 700 倍（Hein et al., 2013）。

5.3 深海稀土

深海稀土也称深海富稀土软泥或沉积物，产于水深超过 4 000 m 的深海盆地中（图 1-A）。其全岩稀土元素质量分数一般大于 700×10^{-6}，最高接近 $8\,000\times10^{-6}$，且以富含重稀土为特征（石学法等，2021）。深海稀土由日本科学家首次发现于太平洋（Kato et al., 2011）；中国自 2011 年启动该项工作，是国际上第二个开展深海稀土调查并取得重大发现的国家（石学法等，2021）。深海稀土资源潜力巨大，仅太平洋深海稀土资源量就达陆地探明储量的 1 000 倍以上（Kato et al., 2011；石学法等，2021）。稀土元素主要赋存于生物磷灰石中，其次是铁锰（氢）氧化物，另有少量稀土以离子吸附形式存在于黏土矿物中，或赋存于独居石、褐帘石等独立矿物内（Kon et al., 2014；王汾连等，2016；Liao et al., 2019；石学法等，2021；付宇等，2024）。

目前，全球大洋中已初步划分出西太平洋成矿带、中—东太平洋成矿带、东南太平洋成矿带和中印度洋海盆—沃顿海盆成矿带等四大深海稀土成矿带（石学法等，2021）。富稀土沉积物厚度因区域而异：西太平洋多位于海底以下 5～10 m，而中印度洋则多分布于 0～5 m。

海水是稀土元素的主要来源。稀土元素通过生物颗粒吸附自上而下迁移，在海水−沉积物界面附近释放。在早期成岩阶段，孔隙水作为关键介质，将稀土富集于磷灰石等矿物中。大水深、低沉积速率和强底流活动是控制其大规模成矿的主要因素（石学法等，2021）。

5.4 热液硫化物

海底热液硫化物亦称海底块状硫化物，主要分布于大洋中脊（如东太平洋海隆、大西洋中脊、西南印度洋脊）、弧后扩张中心（如冲绳海槽）及海底火山弧（Hannington et al., 2011；Syverson et al., 2023；图 1-A、D）。全球已发现 200 余个热液硫化物产地，其中太平洋分布最为广泛（Vadakkepuliyambatta et al., 2024）。根据羽流和矿床分布模型估算，海底热液喷口及相关矿床数量应为 500～5 000 个（Hannington et al., 2011）。其形成过程为：海水沿裂隙下渗，被深部岩浆房加热后向上循环，淋滤出围岩中的金属元素，形成高温酸性成矿热液；热液喷出海底后与冷海水混合，物理化学条件剧变，导致金属硫化物快速沉淀，形成“黑烟囱”或块状硫化物堆积体（Hannington et al., 2011；Syverson et al., 2023）。近期研究强调，岩浆脱气过程可直接为热液系统贡献硫和铜、金、银等关键金属（Hector et al., 2024）。

物质组成以金属硫化物和硫酸盐矿物为主，如黄铁矿、白铁矿、闪锌矿、黄铜矿以及硬石膏、重晶石等，富含铜、铅、锌、金、银等多种金属元素。不同构造环境下的成分差异显著。Hannington et al.（2011）估算，在全球约 10 000 km 长的洋脊、海底火山弧和弧后扩张带的新火山带中，块状硫化物总量约为 6×10^{8} t，其中 Cu、Zn 资源量约 3×10^{7} t，仅与陆地新生代块状硫化物矿床的 Cu、Zn 总储量相当，难以满足全球日益增长的需求。

随着人类对关键金属需求的日益增长，近年来人们对上述 4 类深海矿产的开采兴趣显著提升（Hein et al., 2020；Snelgrove and Metaxas, 2025）。例如，2025 年 4 月美国总统特朗普签署第 14285 号行政令，授权加速海底矿产开发许可审批（The White House, 2025）；2025 年 7 月日本宣布将于 2026—2027 年在西太平洋南鸟岛附近海域开展深海稀土试采（Anadolu Agency, 2025）。然而，这些海底矿产通常与独特而脆弱的生态系统相伴而生，因此需要研发对环境影响最小的采矿技术。国际海底管理局（ISA）负责监管国家管辖范围以外区域（ABNJ）的所有海底采矿活动，目前正在制定《采矿守则》，以规范 ABNJ 内矿产的勘探与开采。ISA 已制定了针对多金属结核、多金属硫化物及富钴结壳的勘探法规，并正在制定开采法规。这些区域同样属于《〈联合国海洋法公约〉下国家管辖范围以外区域海洋生物多样性的养护和可持续利用协定》的管辖范围。不断完善中的治理方案，为未来深海采矿与海洋生态环境的协调发展提供了契机（Snelgrove and Metaxas, 2025）。

6 其他非传统关键矿产

除上述重要潜在矿产外，以下非传统关键矿产亦具有巨大潜力。

6.1 煤系关键金属

煤不仅是重要的化石燃料，也是一种能够富集多种关键金属的特殊沉积有机岩石。在煤形成与演化的复杂地质过程中，受富关键金属蚀源区向泥炭沼泽持续供给有用组分、火山灰喷发

改造及热液流体侵入等特殊地质作用的叠加影响,煤中可富集大量关键金属,进而形成煤系关键金属矿床或煤型关键金属矿床(Hu et al., 2009;代世峰, 2025)。这些关键金属主要包括 REE、Ge、Ga、Li、U、Al 等。随着全球对关键金属需求的急剧增长及供应链安全风险的上升,从煤及其副产物(如粉煤灰、煤矸石)中提取关键金属,已成为国际资源竞争与科技研发的新前沿(代世峰, 2025)。

6.2 关键金属“呆矿”

“呆矿”是指已探明资源量、但在当前技术经济条件下尚无法经济利用的矿产资源。中国在关键金属领域存在较多此类资源。以铌为例,全球可利用的铌储量约为 $1\,700\times10^4$ t(USGS, 2025),主要来自巴西的碳酸岩-碱性岩型矿床,其中铌多赋存于结晶粗大的烧绿石中,易选冶(Mitchell, 2015)。中国铌需求量的 99% 依赖进口,而内蒙古白云鄂博矿床已探明的铌资源量达 660×10^4 t(尹兆波等, 2024),占全球已探明铌储量的 1/3 以上。该矿床中铌目前难以利用的主要原因是矿石铌品位较低,且铌铁矿、烧绿石等有用矿物嵌布粒度细,解离与分选困难。一旦突破该矿床铌的经济高效提取瓶颈,铌有望成为中国的优势关键矿产。

6.3 黑色页岩关键金属

黑色页岩是氧化还原敏感元素(Mo、Ni、V、U、Cu 等)、稀散金属(如 Se、Re)及稀贵金属(如 Co、PGE)等关键金属易于富集的重要载体(Lehmann et al., 2016),展现出巨大的资源潜力(温汉捷等, 2024),其中部分关键金属的资源量甚至可能超过其他任何类型矿床(Emsbo, 2022)。尤其当这些具良好关键金属赋存禀赋的黑色页岩暴露地表并经历强烈风化作用后,更可能导致关键金属的进一步富集。尽管全球大部分黑色页岩中关键金属的含量尚未达到当前的边界品位或工业品位,但其分布广、厚度大,一旦选冶技术获得突破,将成为关键金属的重要来源(Dewers et al., 2019)。

6.4 矿业废弃物关键金属

矿产资源的开发利用会产生大量废石、尾矿和矿渣等矿业废弃物。特别是早期开采的矿石,因开采品位较高或伴生关键金属未被利用,废弃物中常残留大量关键金属。例如,瑞典基律纳(Kiruna)铁矿床堆存的尾矿近 1×10^8 t,其中稀土元素品位高达(1 200~1 500)$\times10^{-6}$(Peelman et al., 2018);智利全国铜矿堆存尾矿约 390×10^8 t,铜平均品位约 0.2%,接近目前斑岩铜矿的开采品位(Dold, 2020);在铝冶炼过程中,全球已堆存约 40×10^8 t 赤泥,其中含有大量 Li、Ga、REE 等关键金属(Archambo and Kawatra, 2021)。矿业废弃物中关键金属的再利用成本远低于绿地矿业开发,其循环利用已引起各国高度重视(Dold, 2020;van der Ent et al., 2021)。

7 展望

非传统关键矿产是保障关键金属供应链安全的重要接替资源。本文概述了若干主要类型非传统关键矿产的基本特征。总体而言,这类资源潜力巨大。例如,近年来在中国西南及山西、河南等省区相继发现碳酸盐黏土型锂矿,仅滇中地区氧化锂潜在资源量就高达 500×10^4 t,约占全球可采锂储量的 10%。全球探明铌储量仅为 17×10^6 t,中国 99% 依赖进口,而内蒙古白云鄂博矿床已探明铌资源量达 660×10^4 t,超过全球铌储量的 1/3,但目前仍属于难以利用的“呆矿”。此外,仅太平洋海底蕴藏的稀土、镍和钴资源量,分别达到陆地探明储量的 1 000 倍、3 倍和 12 倍。这些资源一旦经由科技创新实现经济可采,将大幅改变甚至重塑全球关键矿产的供给格局。

非传统关键矿产的开发利用已引起中外高度关注。以人工干预技术为例,利用微生物作用可加速关键金属的富集与分离,使低品位矿石变废为宝;通过培育超富集特定关键金属的植物,可从矿业废弃物中提取资源,同时实现环境修复。美国正加快建设提取设施,目标是到 2040 年从煤灰中回收稀土 2×10^4 t/a,满足美国约 1/3 的需求。2025 年,美国和日本政府先后颁布行政令,授权加速海底矿产开发。由此可见,非传统关键矿产的开发利用布局正在全面提速。

尽管非传统关键矿产的研究与开发利用已取得重要进展,但仍面临诸多关键科技问题亟待突破。一是资源家底不清。潜在关键矿产种类多样,富集环境与机制复杂,制约了资源的精准预测、勘查与资源量的准确评价。二是开发利用技术储备不足。关键金属在载体中的微观赋存状态尚不明确,系统的开采、强化分离理论与

技术以及配套装备缺乏足够储备，严重制约了非传统关键矿产的产业化。三是科技布局与政策法规缺位。相较于已有可利用的关键矿产，非传统关键矿产总体缺乏系统性科技布局，阻碍了理论与技术的突破；同时，缺少相应的勘探规范、行业标准和矿权管理制度，制约了大规模开发利用；在国际区域层面，缺乏法律依据，难以有效推进非传统关键矿产的合作开发。亟需加强上述工作，突破理论、技术与政策瓶颈，实现非传统关键矿产向可利用资源的战略跨越。

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明：胡瑞忠负责论文构思和写作；陈伟、阳杰华、潘力川参与数据收集分析和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

致谢：前期研究工作得到代世峰院士、王汝成教授、温汉捷教授、周美夫研究员、石学法研究员、范宏瑞研究员、王焰研究员、毕献武研究员、张覃研究员、朱建喜研究员、张华研究员、樊海峰研究员、朱经经研究员、付山岭研究员和韩涛研究员等的大力帮助。谨以此文热烈庆贺成都理工大学建校 70 周年。

[参 考 文 献]

陈骏, 2019. 关键金属超常富集成矿和高效利用[J]. 科技导报, 37(24): 1.

Chen J, 2019. Metallogenesis and effective utilization of strategic-critical metals[J]. Science & Technology Review, 37(24): 1. (in Chinese)

陈甲斌, 刘超, 冯丹丹, 等, 2022. 矿产资源安全需要关注的六个风险问题[J]. 中国国土资源经济, 35(1): 15—21.

Chen J B, Liu C, Feng D D, et al., 2022. Six risk problems of mineral resources security need to focus on[J]. Natural Resource Economics of China, 35(1): 15—21. (in Chinese)

崔燚, 温汉捷, 于文修, 等, 2022. 滇中下二叠统倒石头组富锂黏土岩系锂的赋存状态及富集机制研究[J]. 岩石学报, 38(7): 2080—2094.

Cui Y, Wen H J, Yu W X, et al., 2022. Study on the occurrence state and enrichment mechanism of lithium in lithium-rich clay rock series of the Daoshitou Formation of Lower Permian in Central Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(7): 2080—2094. (in Chinese)

代世峰, 2025. 煤系关键金属矿产研究：中美对比[J]. 煤炭学报, 50(1): 506—515.

Dai S F, 2025. Critical metals in coal and coal-bearing sequences: a comparison between China and the United States[J]. Journal of China Coal Society, 50(1): 506—515. (in Chinese)

代世峰, 任德贻, 周义平, 等, 2014. 煤型稀有金属矿床：成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 39(8): 1707—1715.

Dai S F, Ren D Y, Zhou Y P, et al., 2014. Coal-hosted rare metal deposits: genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 39(8): 1707—1715. (in Chinese)

杜胜江, 温汉捷, 罗重光, 等, 2019. 滇东—黔西地区峨眉山玄武岩富 Nb 榍石矿物学特征[J]. 矿物学报, 39(3): 253—263.

Du S J, Wen H J, Luo C G, et al., 2019. Mineralogy study of Nb-rich sphene generated from the Emeishan basalts in Eastern Yunnan–Western Guizhou area, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 39(3): 253—263. (in Chinese)

DZ/T 0203—2020 矿产地质勘查规范 稀有金属类[S].

DZ/T 0203—2020 Specifications for rare metal mineral exploration[S]. (in Chinese)

付宇, 孙晓明, 李登峰, 等, 2024. 深海沉积物中稀土元素的富集成矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 43(1): 79—89.

Fu Y, Sun X M, Li D F, et al., 2024. Enrichment and mineralization of rare earth elements in deep-sea sediments[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 43(1): 79—89. (in Chinese)

贵州省地矿局 104 地质大队, 2016. 贵州省织金地区磷(稀土)矿整装勘查报告[R]. 都匀：贵州省地矿局 104 地质大队.

衮民汕, 蔡国盛, 曾道国, 等, 2021. 贵州西部二叠系峨眉山玄武岩顶部古风化壳钪-铌-稀土矿化富集层的发现与意义[J]. 矿物学报, 41(4/5): 531—547.

Gun M S, Cai G S, Zeng D G, et al., 2021. Discovery and significance of the Sc-Nb-REE-enriched zone in the paleocrust of weathering atop the Permian Emeishan basalt in the western Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(4/5): 531—547. (in Chinese)

何宏平, 杨武斌, 2022. 我国稀土资源现状和评价[J]. 大地构造与成矿学, 46(5): 829—841.

He H P, Yang W B, 2022. REE mineral resources in China: review and perspective[J]. Geotectonica et Metallogenia, 46(5): 829—841. (in Chinese)

侯明才, 邓敏, 张本健, 等, 2011. 峨眉山高钛玄武岩中主要的赋钛矿物——榍石的产状、特征及成因[J]. 岩石学报, 27(8): 2487—2499.

Hou M C, Deng M, Zhang B J, et al., 2011. A major Ti-bearing mineral in Emeishan basalts: the occurrence, characters and genesis of sphene[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2487—2499. (in Chinese)

侯增谦, 陈骏, 翟明国, 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 65(33): 3651—3652.

Hou Z Q, Chen J, Zhai M G, 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3651—3652. (in Chinese)

胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 等, 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例[J]. 地学前缘, 12(1): 42—54.

Hu R Z, Tao Y, Zhong H, et al., 2005. Mineralization systems of a mantle plume: a case study from the Emeishan igneous province, southwest China[J]. Earth Science Frontiers, 12(1): 42—54. (in Chinese)

胡瑞忠, 温汉捷, 叶霖, 等, 2020. 扬子地块西南部关键金属元素成矿作用[J]. 科学通报, 65(33): 3700—3714.

Hu R Z, Wen H J, Ye L, et al., 2020. Metallogeny of critical metals in the Southwestern Yangtze Block[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3700—3714. (in Chinese)

梁惠佳, 杨杰, 韩昌业, 等, 2024. 磷矿中伴生稀土的提取和利用探析[J]. 云南化工, 51(增刊 1): 49—51.

Liang H J, Yang J, Han C Y, et al., 2024. Analysis of the extraction and utilization of the associated rare earth in phosphate ore[J]. Yunnan Chemical Technology, 51(S1): 49—51. (in Chinese)

石学法, 符亚洲, 李兵, 等, 2021. 我国深海矿产研究: 进展与发现(2011—2020)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 40(2): 305—318.

Shi X F, Fu Y Z, Li B, et al., 2021. Research on deep-sea minerals in China: progress and discovery (2011—2020)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40(2): 305—318. (in Chinese)

王汾连, 何高文, 孙晓明, 等, 2016. 太平洋富稀土深海沉积物中稀土元素赋存载体研究[J]. 岩石学报, 32(7): 2057—2068.

Wang F L, He G W, Sun X M, et al., 2016. The host of REE+Y elements in deep-sea sediments from the Pacific Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(7): 2057—2068. (in Chinese)

王强, 李五福, 王秉璋, 等, 2024. 与碱性岩-碳酸岩杂岩共生的铌-稀土成矿作用——兼论东昆仑大格勒铌-稀土矿床中的碱性岩-碳酸岩杂岩成因[J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 1—37.

Wang Q, Li W F, Wang B Z, et al., 2024. Nb-REE mineralization associated with alkaline rock-carbonatite complex—on the genesis of the alkaline rock-carbonatite complex in the Dagele Nb-REE deposit, East Kunlun[J]. Geotectonica et Metallogenia, 48(1): 1—37. (in Chinese)

王伟, 杨瑞东, 栾进华, 等, 2011. 贵州西部玄武岩风化壳中稀土矿成矿机理及成矿模式[J]. 四川地质学报, 31(4): 420—423.

Wang W, Yang R D, Luan J H, et al., 2011. Genetic mechanism and genetic model for REE ores in basalt weatheriong crust in west Guizhou[J]. Acta Geologica Sichuan, 31(4): 420—423. (in Chinese)

温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等, 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 65(1): 53—59.

Wen H J, Luo C G, Du S J, et al., 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance[J]. Chinese Science Bulletin, 65(1): 53—59. (in Chinese)

温汉捷, 周正兵, 马万平, 等, 2024. 黑色岩系型战略性关键矿产资源研究进展及主要科学问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 43(1): 14—34.

Wen H J, Zhou Z B, Ma W P, et al., 2024. Research progresses and main scientific issues of strategically critical minerals in black rock series[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 43(1): 14—34. (in Chinese)

尹传凯, 王春连, 游超, 等, 2024. 中国锆矿资源特征、矿床类型、关键应用及找矿远景[J]. 中国地质, 51(6): 1930—1945.

Yin C K, Wang C L, You C, et al., 2024. Zircon resource characteristics, deposit types, key applications and prospecting prospects in China[J]. Geology in China, 51(6): 1930—1945. (in Chinese)

尹兆波, 高利坤, 饶兵, 2024. 我国铌矿资源概况及选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用, 44(1): 115—125.

Yin Z B, Gao L K, Rao B, 2024. Overview of niobium resources and progress in mineral processing technology in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 44(1): 115—125. (in Chinese)

翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(2): 106—111.

Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, et al., 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 106—111. (in Chinese)

赵汉斌, 2019. 云南滇中发现世界级锂资源基地[N]. 科技日报, 2019-06-04(A1).

周美夫, 赵文, 周岱, 等, 2024. 武夷—云开造山带早古生代镁铁-超镁铁质岩富钪风化壳的首次发现及其意义[J]. 矿物学报, 44(3): 303—316.

Zhou M F, Zhao W, Zhou D, et al., 2024. Identification and significance of the Sc-rich regolith on Early Paleozoic mafic-ultramafic intrusions in the southeastern Wuyi-Yunkai Orogenic Belt, South China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 44(3): 303—316. (in Chinese)

Anadolu Agency, 2025. Japan mulls mining rare earths at record ocean depths: report[EB/OL]. (2025-07-03)[2026-05-18]. https://www.aa.com.tr/en/asia-pacific/japan-mulls-mining-rare-earths-at-record-ocean-depths-report/3621038.

Archambo M, Kawatra S K, 2021. Red mud: fundamentals and new avenues for utilization[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 42(7): 427—450.

Balaram V, 2025. Rare earth elements, resources, applications,

extraction technologies, chemical characterization, and global trade—a comprehensive review[J]. Treatise on Geochemistry (Third Edition), 6: 193—233.

Beland C M J, Williams-Jones A E, 2023. The genesis of a potential scandium ore deposit at Crater Lake, Canada[J]. Chemical Geology, 615: 121223.

Benson T R, Coble M A, Rytuba J J, et al., 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins[J]. Nature Communications, 8(1): 270.

Castor S B, Henry C D, 2020. Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin[J]. Minerals, 10(1): 68.

Chassé M, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al., 2019. Australian laterites reveal mechanisms governing scandium dynamics in the critical zone[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 260: 292—310.

Dai S F, Nechaev V P, Chekryzhov I Y, et al., 2018. A model for Nb–Zr–REE–Ga enrichment in Lopingian altered alkaline volcanic ashes: key evidence of H-O isotopes[J]. Lithos, 302/303: 359—369.

Dai S F, Zhou Y P, Zhang M Q, et al., 2010. A new type of Nb(Ta)-Zr(Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the Late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, Southwestern China: possible economic significance and genetic implications[J]. International Journal of Coal Geology, 83(1): 55—63.

Deconinck J F, Crasquin S, Bruneau L, et al., 2014. Diagenesis of clay minerals and K-bentonites in Late Permian/Early Triassic sediments of the Sichuan Basin (Chaotian section, Central China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 81: 28—37.

Deng W, Wen H J, Du S J, et al., 2022. Provenance of Late Permian Nb-Zr-REE-Ga enrichment in western Guizhou: implications for the waning volcanism of Emeishan large igneous province[J]. Ore Geology Reviews, 150: 105160.

Dewers T, Heath J, Sánchez M, 2019. Shale: subsurface science and engineering[M]. Hoboken: Wiley: 1—299.

Dold B, 2020. Sourcing of critical elements and industrial minerals from mine waste—the final evolutionary step back to sustainability of humankind?[J]. Journal of Geochemical Exploration, 219: 106638.

Dushyantha N, Batapola N, Ilankoon I M S K, et al., 2020. The story of rare earth elements (REEs): occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production[J]. Ore Geology Reviews, 122: 103521.

Emsbo P, 2022. New insights into the origin of critical mineral resources in organic-rich black shales[C]//The 56th Annual North-Central and 71st Annual Southeastern Section Meeting. Denver: Geological Society of America: 374890.

Emsbo P, McLaughlin P I, Breit G N, et al., 2015. Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: solution to the global REE crisis?[J]. Gondwana Research, 27(2): 776—785.

Ercit T S, 2005. REE-enriched granitic pegmatites[M]//Linnen R L, Samson I M. Rare-element geochemistry and mineral deposits. St. John's: Geological Association of Canada: 175—199.

Ferhaoui S, Kechiched R, Bruguier O, et al., 2022. Rare earth elements plus yttrium (REY) in phosphorites from the Tébessa region (Eastern Algeria): abundance, geochemical distribution through grain size fractions, and economic significance[J]. Journal of Geochemical Exploration, 241: 107058.

Gulley A L, Nassar N T, Xun S A, 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(16): 4111—4115.

Halbach P, Marchig V, Scherhag C, 1980. Regional variations in Mn, Ni, Cu, and Co of ferromanganese nodules from a basin in the Southeast Pacific[J]. Marine Geology, 38(4): M1—M9.

Halkoaho T, Ahven M, Rämö O T, et al., 2020. Petrography, geochemistry, and geochronology of the Sc-enriched Kiviniemi ferrodiorite intrusion, Eastern Finland[J]. Mineralium Deposita, 55(8): 1561—1580.

Haneklaus N H, Mwalongo D A, Lisuma J B, et al., 2024. Rare earth elements and uranium in Minjingu phosphate fertilizer products: plant food for thought[J]. Resources, Conservation and Recycling, 207: 107694.

Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al., 2011. The abundance of seafloor massive sulfide deposits[J]. Geology, 39(12): 1155—1158.

He B, Xu Y G, Huang X L, et al., 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section[J]. Earth and Planetary Science Letters, 255(3/4): 306—323.

Hector S, Patten C G C, Beranoaguirre A, et al., 2024. Magmatic evolution of the Kolumbo submarine volcano and its implication to seafloor massive sulfide formation[J]. Mineralium Deposita, 59(6): 1229—1248.

Hein J R, Conrad T A, Staudigel H, 2010. Seamount mineral deposits: a source of rare metals for high-technology industries[J]. Oceanography, 23(1): 184—189.

Hein J R, Koschinsky A, 2014. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules[J]. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 13: 273—291.

Hein J R, Koschinsky A, Bau M, et al., 2000. Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific[M]//Cronan D S. Handbook of marine mineral deposits. Boca Raton: Routledge: 239—273.

Hein J R, Koschinsky A, Kuhn T, 2020. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 1(3): 158—169.

Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, et al., 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources[J]. Ore Geology Reviews, 51: 1—14.

Hein J R, Spinardi F, Okamoto N, et al., 2015. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions[J]. Ore Geology Reviews, 68: 97—116.

Hoshino M, Sanematsu K, Watanabe Y, 2016. REE mineralogy and resources[J]. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, 49: 129—291.

Hu R Z, Qi H W, Zhou M F, et al., 2009. Geological and geochemical constraints on the origin of the giant Lincang coal seam-hosted germanium deposit, Yunnan, SW China: a review[J]. Ore Geology Reviews, 36(1/2/3): 221—234.

Kalashnikov A O, Yakovenchuk V N, Pakhomovsky Y A, et al., 2016. Scandium of the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): mineralogy, spatial distribution, and potential resource[J]. Ore Geology Reviews, 72: 532—537.

Kandil A T, Aly M M, Moussa E M, et al., 2010. Column leaching of lanthanides from Abu Tartur phosphate ore with kinetic study[J]. Journal of Rare Earths, 28(4): 576—580.

Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, et al., 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements[J]. Nature Geoscience, 4(8): 535—539.

Kechiched R, Laouar R, Bruguier O, et al., 2018. Glauconite-bearing sedimentary phosphorites from the Tébessa region (eastern Algeria): evidence of REE enrichment and geochemical constraints on their origin[J]. Journal of African Earth Sciences, 145: 190—200.

Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al., 2012. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. Ore Geology Reviews, 48: 55—69.

Kon Y, Hoshino M, Sanematsu K, et al., 2014. Geochemical characteristics of apatite in heavy REE-rich deep-sea mud from Minami-Torishima area, Southeastern Japan[J]. Resource Geology, 64(1): 47—57.

Lehmann B, Frei R, Xu L G, et al., 2016. Early Cambrian black shale-hosted Mo-Ni and V mineralization on the rifted margin of the Yangtze Platform, China: reconnaissance chromium isotope data and a refined metallogenic model[J]. Economic Geology, 111(1): 89—103.

Liao J L, Sun X M, Li D F, et al., 2019. New insights into nanostructure and geochemistry of bioapatite in REE-rich deep-sea sediments: LA-ICP-MS, TEM, and Z-contrast imaging studies[J]. Chemical Geology, 512: 58—68.

Mitchell R H, 2015. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites[J]. Ore Geology Reviews, 64: 626—641.

Mizell K, Hein J R, Au M, et al., 2022. Estimates of metals contained in abyssal manganese nodules and ferromanganese crusts in the global ocean based on regional variations and genetic types of nodules[M]//Sharma R. Perspectives on deep-sea mining: sustainability, technology, environmental policy and management. Cham: Springer: 53—80.

Peelman S, Kooijman D, Sietsma J, et al., 2018. Hydrometallurgical recovery of rare earth elements from mine tailings and WEEE[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 4(3): 367—377.

Petersen S, Krätschell A, Augustin N, et al., 2016. News from the seabed—geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. Marine Policy, 70: 175—187.

Phoung S, Williams E, Gaustad G, et al., 2023. Exploring global supply and demand of scandium oxide in 2030[J]. Journal of Cleaner Production, 401: 136673.

Shannon R D, 1976. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. Acta Crystallographica Section A, 32(5): 751—767.

Snelgrove P V R, Metaxas A, 2025. Mining of the deep ocean[J]. Annual Review of Environment and Resources, 50(1): 455—481.

Sovacool B K, Ali S H, Bazilian M, et al., 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. Science, 367(6473): 30—33.

Syverson D D, Awolayo A N, Tutolo B M, 2023. Seafloor spreading and the delivery of sulfur and metals to Earth's oceans[J]. Geology, 51(12): 1168—1172.

The White House, 2025. Unleashing America's offshore critical minerals and resources[EB/OL]. (2025-04-24)[2026-05-18]. https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/unleashing-americas-offshore-critical-minerals-and-resources/.

USGS, 2022. Mineral commodity summaries 2022[R]. Reston: U. S. Geological Survey.

USGS, 2025. Mineral commodity summaries 2024[R]. Reston: U. S. Geological Survey.

Vadakkepuliyambatta S, Roy P, Ingole B S, et al., 2024. Potential

of deep-sea mineral resources for the blue economy[J]. Current Science, 126(2): 192—199.

Valetich M, Zivak D, Spandler C, et al., 2022. REE enrichment of phosphorites: an example of the Cambrian Georgina Basin of Australia[J]. Chemical Geology, 588: 120654.

van der Ent A, Parbhakar-Fox A, Erskine P D, 2021. Treasure from trash: mining critical metals from waste and unconventional sources[J]. Science of the Total Environment, 758: 143673.

Vijayarathna S P, Rathnayake I V N, Samarasekere P W, 2026. Microbial bioleaching of rare earth elements from phosphate minerals: a biotechnology-driven systematic review of mechanisms, bioprocess determinants, and opportunities for sustainable recovery[J]. BMC Biotechnology, 26(1): 40.

Wang L, Yang C C, Huang H, et al., 2025. Eruption of the Emeishan large igneous province and associated climate change forced intense weathering of Emeishan flood basalts and the formation of overlaying Nb-Zr-Ga-rare earth element and Y polymetallic deposits[J]. GSA Bulletin, 137(9/10): 4299—4308.

Wang Z C, Li M Y H, Liu Z R R, et al., 2021. Scandium: ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration[J]. Ore Geology Reviews, 128: 103906.

Williams-Jones A E, Vasyukova O V, 2018. The economic geology of scandium, the runt of the rare earth element litter[J]. Economic Geology, 113(4): 973—988.

Wu S X, Wang L S, Zhao L S, et al., 2018. Recovery of rare earth elements from phosphate rock by hydrometallurgical processes—a critical review[J]. Chemical Engineering Journal, 335: 774—800.

Xie Y L, Verplanck P L, Hou Z Q, et al., 2019. Rare earth element deposits in China: a review and new understandings[M]// Chang Z S, Goldfarb R J. Mineral deposits of China. Littleton: Society of Economic Geologists: 509—552.

Xing J Q, Jiang Y H, Xian H Y, et al., 2024. Rare earth element enrichment in sedimentary phosphorites formed during the Precambrian–Cambrian transition, Southwest China[J]. Geoscience Frontiers, 15(2): 101766.

Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al., 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian–Triassic Emeishan flood basalts in Southwestern China[J]. Lithos, 58(3/4): 145—168.

Yang J H, Wen H J, Luo C G, et al., 2025. Host minerals of lithium in Jiujialu Formation Li-rich claystones in South China, and implications for the genesis[J]. Journal of Geochemical Exploration, 278: 107865.

Zhang F, Fan H F, Liu X Q, et al., 2023. Distinct REY sources recorded in the Doushantuo phosphorite[J]. Ore Geology Reviews, 157: 105470.

Zhang H J, Fan H F, Wen H J, et al., 2022. Controls of REY enrichment in the Early Cambrian phosphorites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 324: 117—139.

Zhang Z W, Zheng G D, Takahashi Y, et al., 2016. Extreme enrichment of rare earth elements in hard clay rocks and its potential as a resource[J]. Ore Geology Reviews, 72: 191—212.

Zhao L X, Dai S F, Graham I T, et al., 2016. Clay mineralogy of coal-hosted Nb-Zr-REE-Ga mineralized beds from Late Permian strata, eastern Yunnan, SW China: implications for paleotemperature and origin of the micro-quartz[J]. Minerals, 6(2): 45.

Zhao L X, Dai S F, Graham I T, et al., 2017. Cryptic sediment-hosted critical element mineralization from eastern Yunnan Province, Southwestern China: mineralogy, geochemistry, relationship to Emeishan alkaline magmatism and possible origin[J]. Ore Geology Reviews, 80: 116—140.

Zhao W W, Zhou M F, Wang Z C, et al., 2023. Potentially important regolith-hosted Sc deposits related to alkaline igneous complexes of the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 252: 105698.

Zhong H, Campbell I H, Zhu W G, et al., 2011. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(5): 1374—1395.

Zhou M F, Wang Z C, Zhao W W, et al., 2022. A reconnaissance study of potentially important scandium deposits associated with carbonatite and alkaline igneous complexes of the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 236: 105309.

Zhou M F, Zhao W W, Wang Z C, et al., 2025. Scandium and gallium in weathered basalts as unconventional resources[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 290: 106629.

Zivak D, Spandler C, Valetich M, 2024. Geochemical and isotopic (Nd, Sr) tracing of the origin of REE enrichment in the Cambrian Georgina Basin phosphorites[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 25(2): e2023GC011207.