

ELEMENTOS TERRAS RARAS COMO RECURSOS ESTRATÉGICOS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: TECNOLOGIAS DE EXTRAÇÃO E PERSPETIVAS FUTURAS NA MINA DO LONGONJO, ANGOLA

RARE EARTH ELEMENTS AS STRATEGIC RESOURCES IN THE ENERGY TRANSITION: EXTRACTION TECHNOLOGIES AND FUTURE PERSPECTIVES AT THE LONGONJO MINE, ANGOLA

Domingos Maweze Gabriel 

¹ Mestrando em Engenharia Química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) - Brasil.

Email para correspondência: domingosgabriel@usp.br

RESUMO

A crescente demanda global por metais críticos tem impulsionado o interesse pelos elementos de terras raras (ETRs), essenciais para a transição energética, como turbinas eólicas, veículos elétricos. Este estudo apresenta uma análise abrangente sobre o cenário atual de produção e demanda de ETRs, com ênfase nas tecnologias do projeto do Longonjo. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão de literatura, utilizando bases científicas como Scopus, Science Direct e Web of Science, contemplando publicações recentes e relevantes. Os resultados indicam que a China domina aproximadamente 69% da produção mundial de ETRs, enquanto depósitos emergentes, como Longonjo, destacam-se pelo potencial geológico e localização estratégica. O depósito apresenta teor médio de 1,43% em ETRs, principalmente neodímio e praseodímio, sendo comparável a grandes minas carbonatíticas, como Bayan Obo (China). O desenvolvimento de estudos geoquímicos e de parcerias científicas são essenciais para fortalecer o potencial mineralógico e inserir o país na cadeia global de suprimentos desses metais críticos.

ABSTRACT

The growing global demand for critical metals has driven interest in rare earth elements (REEs), which are essential for the energy transition, including applications such as wind turbines and electric vehicles. This study presents a comprehensive analysis of the current scenario of REE production and demand, with emphasis on the technologies of the Longonjo project. The research was conducted through a literature review using scientific databases such as *Scopus*, *ScienceDirect*, and *Web of Science*, covering recent and relevant publications. The results indicate that China accounts for approximately 69% of global REE production, while emerging deposits such as Longonjo stand out for their geological potential and strategic location. The deposit shows an average grade of 1.43% REEs, mainly neodymium and praseodymium, comparable to large carbonatite mines such as Bayan Obo (China). The development of geochemical studies and scientific partnerships is essential to strengthen the mineral potential and integrate the country into the global supply chain of these critical metals. Keywords:

Palavras-chave: Elementos terras raras; projeto terras raras do Longonjo; transição energética.

Rare earth elements; Longonjo rare earth project; energy transition.

Introdução

A crescente demanda por materiais críticos essenciais para a transição da matriz energética tem levado os pesquisadores e indústrias a buscarem alternativas que visam diminuir a dependência das fontes de energia convencionais (combustíveis fósseis) e, por outro lado, o desenvolvimento de tecnologias de extração e purificação alinhadas à sustentabilidade [1, 2]. Neste contexto, os elementos de terras raras (ETRs), um conjunto de 17 elementos, nos quais 15 lantanídeos, além escândio (Sc) e ítrio (Y), que podem ser recuperados de fontes primárias, como minérios e concentrados [3], e de fontes secundárias, geralmente materiais finais à base de seus óxidos, como ímãs permanentes e lâmpadas fluorescentes, por exemplo, são tidos como metais importantes (Bian et al., 2022; Jowitt et al., 2018).

Conhecidos por suas propriedades únicas, como ópticas, magnéticas, elétricas [3] e biológicas, os ETRs são recursos estratégicos para diversas aplicações (Tabela 1), como componentes de baterias recarregáveis, turbinas eólicas, lâmpadas florescentes, veículos elétricos e híbridos [6], catalisadores heterogêneos [7], além de aplicações no diagnóstico e tratamento de doenças [8] Geologicamente, ETRs apresentam ocorrência mineralógica diversificada, podendo ser encontrados em depósitos de diferentes tipos, como carbonatitos, pegmatitos, depósitos hidrotermais, leteritos e rochas peralcalinas, associados a vários minérios, sendo os mais comuns bastnasita, monazita, apatita [9].

Tabela 1. Alguns ETRs e suas aplicações (Depraite & Goutte, 2023b).

Elemento	Símbolo	Aplicação
Neodímio	Nd	Usado em ímãs permanentes para turbinas eólicas e motores de veículos elétricos (VEs).
Praseodímio	Pr	Junto com Nd em ímãs do tipo Nd-pr; melhora a capacidade magnética e desempenho térmico.
Disprósio	Dy	Aditivos dos ímãs NdFeB para resistir à desmagnetização e capacidade térmica.
Térbio	Tb	Usados em fósforos para o fabrico de LEDs e telas.
Lantânio	La	Componentes de baterias do tipo níquel-hidreto metálico (NiMH) usados em veículos híbrido (VHs).
Cério	Ce	Usado em baterias NiMH, como agente de polímeros e catalisadores.
Európio	Eu	Componente de LEDs e fósforos.
Ítrio	Y	Componentes de LEDs e fósforos.

A produção mundial de ETRs (Figura 1) é estimada 390.000 toneladas. A China é o maior produtor, detém cerca de 69% da produção global, seguida pelos EUA e Austrália, com 11,5% e 3,3%, respetivamente (Geological Survey, 2025).

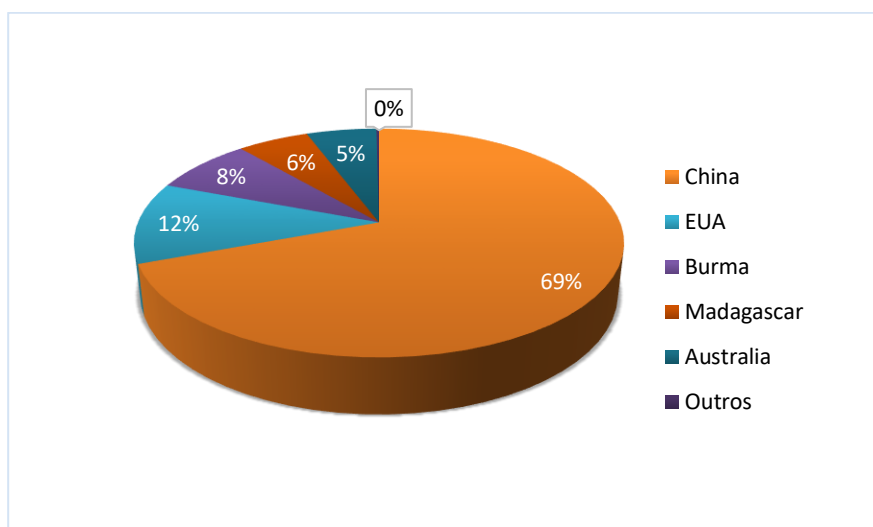


Figura 1. Distribuição da produção global de ETRs (Geological Survey, 2025).

Historicamente, as atividades de mineração de ETRs na mina de Longonjo, localizada a aproximadamente 50 km da cidade do Huambo e a 4 km do Corredor do Lobito [12], datam do período colonial, quando foram identificados e explorados os metais nióbio (Nb), ferro (Fe) e ETRs. Contudo, essas atividades foram interrompidas devido aos sucessivos conflitos armados no país (Calvo et al., 2011). Nos últimos anos, o interesse pela região foi retomado, foram conduzidos estudos de prospecção para avaliar o potencial económico dos depósitos contendo ETRs. Esses estudos indicam a presença significativa de ETRs, principalmente Nd e Pr, e o classificaram como um depósito estratégico para o mercado global, apresentado cerca de 447×10^4 toneladas dos recursos totais, com um teor médio de 1,43% (em peso), o que o coloca entre os 10 maiores projetos de ETRs, quanto a composição mineralógica, a nível mundial (Liu et al., 2023).

Este estudo explora o cenário atual dos ETRs frente às necessidades emergentes de descarbonização, as tecnologias e desafios relacionados à sua mineração, com ênfase no projeto do Longonjo. Além disso, aborda as características do depósito, os processos de recuperação e perspectivas sobre o seu potencial no contexto de transição energética. Com isso, pretendemos contribuir cientificamente para área de mineração e fornecer subsídios para a valorização destes metais em Angola.

Metodologia

Para o presente estudo, seguimos uma abordagem de revisão da literatura com foco na tecnologia de extração e separação aplicados à produção sustentável de óxidos de ETRs, aplicação, o depósito do Longonjo e seu potencial diante da demanda mundial por fontes de energia limpa. A pesquisa bibliográfica é embasada em bases de dados científicas como Science Direct e Web of Science, Scopus, Google Scholar. Foram utilizados como critérios de busca termos relacionados ao tema, tais como: "rare earth elements", "energy transition", "sustainable energy", "Technologies for rare Earth extration", "rare earth Project in Longonjo. A Figura 2 mostra um fluxograma simplificado da metodologia utilizada neste estudo.

As fontes foram filtradas utilizando os seguintes critérios de inclusão:

- Artigos publicados nos últimos dez anos, na sua maioria;
- Textos completos em inglês;
- Impacto dos artigos com base ao número de citações;
- Estudos que abordam diretamente o uso de tecnologias de membranas em processos de produção e separação de biocombustíveis;

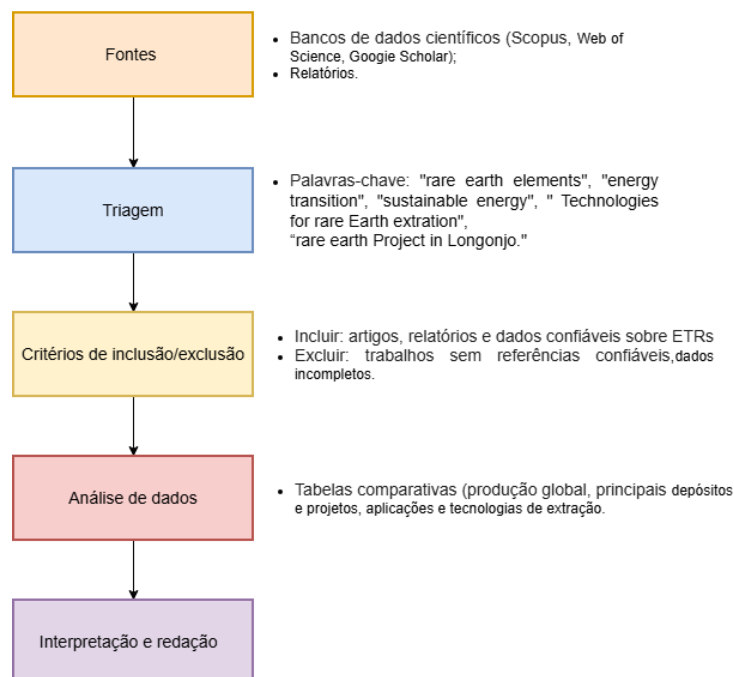


Figura 2. Fluxograma representando, de forma simplificada, a metodologia adotada neste estudo.

Resultados e Discussão

Produção e demanda

Segundo dados *do United States Geological Survey* (USGS, 2025), a produção global de ETRs atingiu cerca de 390 mil toneladas em 2024. Ainda assim, existem inúmeros depósitos que não são explorados ou mesmo desconhecidos, o que gera incertezas quanto à real produção mundial, além das atividades ilegais clandestinas [15]. Conforme mostrado na Figura 1, o domínio da China no mercado internacional não só reflete a abundância e superioridade dos seus depósitos, mas também o desenvolvimento de tecnologias de extração e refino, o que consolida a sua posição como líder na cadeia de suprimentos desses elementos (Shuai et al., 2022).

A demanda por ETRs, impulsionada pela tendência global de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e expandir fontes de energia limpa, como eólica, solar e a eletrificação veicular, tem crescendo rapidamente nos últimos anos [17, 18]. Estima-se que o mercado de ETRs aumente de US\$ 5,3 bilhões (2021) para US\$ 9,6 bilhões até 2026, apresentando uma taxa de crescimento anual de 12,3% (Filho et al., 2023). Neste sentido, torna-se imperativo reaproveitamento dos recursos existentes e desenvolver tecnologias que possibilitem a extração e purificação desses metais, tanto a partir de fontes primárias quanto de fontes secundárias por métodos de reciclagem.

Projeto de ETRs da mina do Longonjo

O projeto de refinaria de ETRs do Longonjo está localizado em uma área estratégica (Figura 3), o que favorece a logística de escoamento dos produtos obtidos, bem como as práticas sustentáveis: dista a aproximadamente 4 km do Corredor Ferroviário do Lobito e 307 km do Porto do Lobito, também se encontra interligado à rede elétrica nacional alimentada pelo aproveitamento hidroelétrico de Laúca, além de condições de reaproveitamento da energia solar, garantindo energia limpa nas atividades de mineração (Maponga & Nsakaza, 2025).



Figura 3. Projeto de processamento de PrNd do Longonjo , (Adaptado de Pensana metals, 2019).

Estudos de prospeção indicam que a mina tem uma capacidade de 447×10^4 toneladas dos recursos totais, com um teor médio de 1,43% (em peso) em depósitos dos tipos carbonatitos, o mesmo tipo geológico da mina de Bayan Obo, na China, considerada a maior e mais produtiva do mundo, com capacidade de $10,000 \times 10^4$ toneladas (Liu et al., 2023). Um estudo conduzido por [21] revelou que o depósito de Longonjo é do tipo carbonatito fortemente alterado, onde os ETRs apresentam ocorrência associadas a minerais como apatita, barita e pirocloro. Essas características conferem a mina um alto potencial estratégico, posicionando-o como uma fonte importante para cadeia a cadeia de suprimento global.

Os métodos conhecidos de extração e recuperação geralmente envolvem etapas de beneficiamento físico, onde são removidas as impurezas, seguido de técnicas como lixiviação, purificação e refino [22]. A Figura 4 apresenta um esquema simplificado das etapas de recuperação de ETRs.

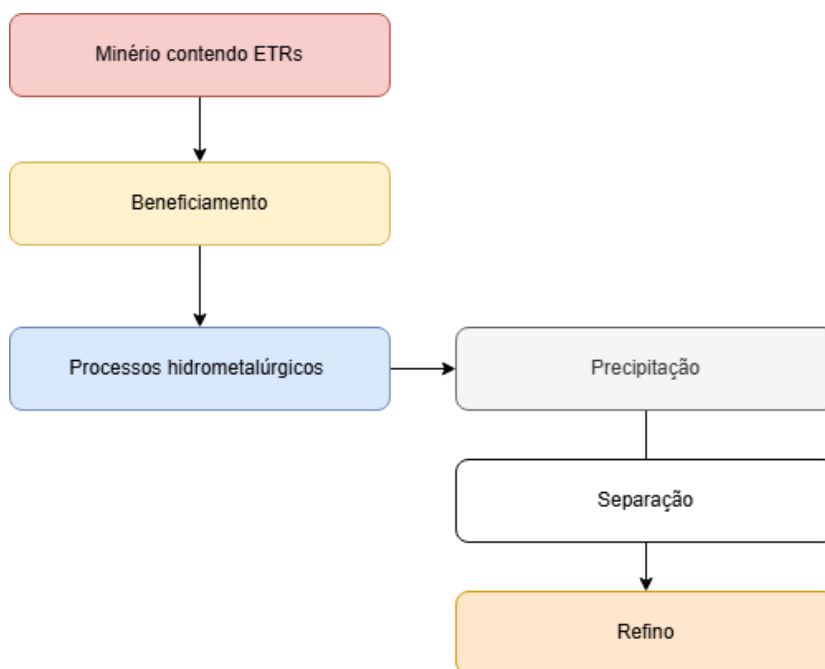


Figura 4. Esquema simplificado das etapas de tratamento mineral contendo ETRs (Adaptado de McNulty et al., 2022).

No caso específico da Projeto do Longonjo, a rota de beneficiamento envolve etapas de beneficiamento físico, como britagem e moagem, flotação do minério de barita, onde são separados dos minerais de gangas, flotação de ETRs, onde são separadas impurezas como Fe e quartz, e obtenção do concentrado de Nd-Pr (Calvo et al., 2011b).

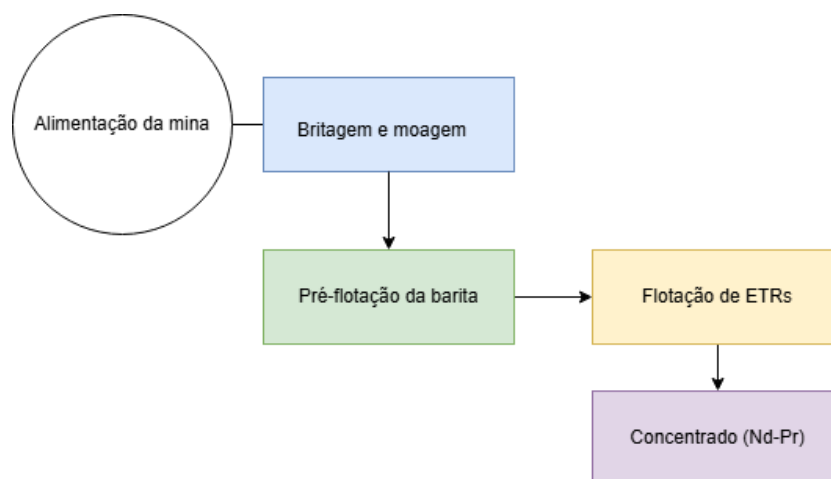


Figura 5. Etapas de processamento de ETRs da mina de Longonjo (Calvo et al., 2011b).

Esta abordagem segue as tecnologias modernas de recuperação, que geralmente envolve várias etapas de beneficiamento físico, processos pirometalúrgicos e

hidrometalúrgicos. No entanto, aspectos operacionais específicos, como tipo de reagente empregado (ácidos ou alcalinos, por exemplo), condições de extração e recuperação (por exemplo, concentração do reagente, temperatura e tempo), bem como o tratamento de resíduos sólidos e efluentes gerados, constituem fatores determinantes para avaliar se a rota adotada é economicamente viável e ambientalmente sustentável. Dados sobre a estabilidade de fases, solubilidade e comportamento químico dos ETRs do projeto de Longonjo não foram reportados na literatura, o que, até certo ponto, limita a compreensão sobre as rotas adequadas para alcançar altas eficiências de recuperação. Ainda assim, os dados disponíveis sobre caracterização geológica do depósito indicam um potencial significativo, como uma importante fonte de ETRs que contribuam para a transição.

Conclusões e Recomendações

Este estudo destacou a importância estratégica dos ETRs no atual cenário de transição energética global, evidenciando tecnologias limpas e sustentáveis, como aplicação em turbinas eólicas, VEs e VHS. Observou-se também que, além da China e outros depósitos já estabelecidos e com atividades de mineração conhecidas, depósitos promissores (como o caso da mina do Longonjo) constituem alternativas viáveis para ampliar a cadeia de suprimentos global.

Os dados disponíveis indicam que o projeto apresenta, geológica e mineralogicamente, características comparáveis a grandes minas do tipo carbonatíticas, como Bayan Obo, na China, possuindo um teor de 1,43% de ETRs, além da localização estratégica extração sustentável. Contudo, ainda existem limitações de natureza científicas sobre caracterização completa das fases minerais, comportamento químico, estabilidade e solubilidade dos ETRs presentes, fatores cruciais para a definição de rotas eficientes e ambientalmente seguras de extração e recuperação. Dessa forma, reforça-se a necessidade de desenvolver estudos sobre:

- Caracterização mineralógica e geoquímica detalhada, visando compreender melhor a mobilidade e a associação dos ETRs com outros minerais;
- Parcerias estratégicas com as instituições de ensino e centros de pesquisas que favoreçam o desenvolvimento e transferência tecnológica, assim como o fortalecimento da indústria nacional de materiais críticos.



Referências Bibliográficas

- Balaram, V. (2022). Sources and applications of rare earth elements. *Environmental Technologies to Treat Rare Earth Elements Pollution: Principles and Engineering*; IWA Publishing: London, UK, 113, 75–113.
- Bian, Y.-Y., Guo, S.-Q., Xu, Y.-L., Tang, K., Lu, X.-G. & Ding, W.-Z. (2022). Recovery of rare earth elements from permanent magnet scraps by pyrometallurgical process. *Rare Metals*, 41(5), 1697–1702. <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0554-x>
- Calvo, A., Melgarejo, J. C., Alfonso, P., Bambi, A., Gonçalves, A. O. & Barra, F. (2011a). Nb and REE mobilization at the Longonjo carbonatite, Angola. *Let's Talk Ore Deposits: Antofagasta, Universidad Católica Del Norte*, 681–683.
- Calvo, A., Melgarejo, J. C., Alfonso, P., Bambi, A., Gonçalves, A. O. & Barra, F. (2011b). Nb and REE mobilization at the Longonjo carbonatite, Angola. *Let's Talk Ore Deposits: Antofagasta, Universidad Católica Del Norte*, 681–683.
- Cherepovitsyn, A. & Solovyova, V. (2022). Prospects for the development of the Russian rare-earth metal industry in view of the global energy transition—a review. *Energies*, 15(1), 387.
- Depraite, L. & Goutte, S. (2023a). The role and challenges of rare earths in the energy transition. *Resources Policy*, 86, 104137.
- Depraite, L. & Goutte, S. (2023b). The role and challenges of rare earths in the energy transition. *Resources Policy*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104137>
- Depraite, L. & Goutte, S. (2023c). The role and challenges of rare earths in the energy transition. *Resources Policy*, 86, 104137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104137>
- Filho, W. L., Kotter, R., Özuyar, P. G., Abubakar, I. R., Eustachio, J. H. P. P. & Matandirotya, N. R. (2023). Understanding rare earth elements as critical raw materials. *Sustainability*, 15(3), 1919.
- Geological Survey, U. (2025). *mcs2025.pdf - Mineral Commodity Summaries 2025*.
- Ghosh, B., Vapnik, H., Kim, H.-E., Kim, Y., Birawat, R., Lu, Y., Su, X. & Yang, H. (2025). Electrochemical Separation and Clean Energy Applications of Rare Earth Elements. *Chemical Reviews*, 125(16), 7965–8023. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5c00103>
- Gielen, D. & Lyons, M. (2022). Critical materials for the energy transition: Rare earth elements. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*, 1–48.
- Jowitt, S. M., Werner, T. T., Weng, Z. & Mudd, G. M. (2018). Recycling of the rare earth elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 1–7.
- Liu, S.-L., Fan, H.-R., Liu, X., Meng, J., Butcher, A. R., Yann, L., Yang, K.-F. & Li, X.-C. (2023). Global rare earth elements projects: New developments and supply chains. *Ore Geology Reviews*, 157, 105428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428>
- Maponga, O. & Nsakaza, K. (2025). Sustainable exploitation of rare earth minerals in Southern Africa: Exploring the linkages. *Extractive Industries and Society*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101754>
- McNulty, T., Hazen, N. & Park, S. (2022). Processing the ores of rare-earth elements. *MRS Bulletin*, 47(3), 258–266. <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00288-4>
- Pensana Metals. (2019). *Preliminary Feasibility study*. <https://pensana.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/PFS-15.11.2019-1.pdf>
- Shuai, J., Peng, X., Zhao, Y., Wang, Y., Xu, W., Cheng, J., Lu, Y. & Wang, J. (2022). A dynamic evaluation on the international competitiveness of China's rare earth products: An industrial chain and tech-innovation perspective. *Resources Policy*, 75, 102444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102444>
- Talan, D. & Huang, Q. (2022). A review of environmental aspect of rare earth element extraction processes and solution purification techniques. *Minerals Engineering*, 179, 107430. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107430>
- Vitta, S. (2021). Electric cars—Assessment of 'green' nature vis-à-vis conventional fuel driven cars. *Sustainable Materials and Technologies*, 30, e00339.
- Wang, J. & Li, S. (2022). Applications of rare earth elements in cancer: Evidence mapping and scientometric analysis. *Frontiers in Medicine*, 9, 946100.
- Zhang, N., Yan, H., Li, L., Wu, R., Song, L., Zhang, G., Liang, W. & He, H. (2021). Use of rare earth elements in single-atom site catalysis: A critical review — Commemorating the 100th anniversary of the birth of Academician Guangxian Xu. *Journal of Rare Earths*, 39(3), 233–242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.11.013>