全球稀土资源未来供应格局分析

杜光辉[1,2],李强峰[1],赵 燊[1],刘茜茜[1],汪 鹏[3],王 路[1*]

(1. 中国科学院赣江创新研究院,江西 赣州 341000;
2. 上海易碳数字科技有限公司,上海 200940;
3. 中国科学院城市环境研究所,福建 厦门 361021)

摘 要:稀土作为现代高新技术产业的关键原材料,广泛应用于新能源汽车、风力发电等领域。随着全球对清洁能源需求的不断增长,对稀土资源的需求也随之上升,促使各国加大对稀土的开采和研发投入。这一趋势使得稀土的供应格局受到广泛关注,在地缘政治、环境保护和技术创新等多重因素的影响下,确保稀土资源的稳定供应已成为各国战略考量的重要部分。本研究运用主体建模方法,构建了一个全球稀土资源开发模型,旨在预测未来 20 年全球稀土矿点供应潜力,以期为稀土资源的开发与利用提供科学依据,推动稀土资源的可持续发展。本研究得出以下结论:首先,未来全球稀土供应量将快速增长,预计到 2040 年全球供应量将达到 60 万吨至 100 万吨,其中,中国的供应比例逐年下降;其次,稀土矿产的分布将呈现多样化,除了中国,美国、越南、澳大利亚及南美等国家或地区的供应份额将逐步上升;第三,中重稀土的供应增长将成为未来矿产开发中的关键点,格陵兰岛及南美地区的开发潜力巨大,有望成为新的中重稀土供应地;最后,稀土供应的多样化将带来价格波动的挑战,建议各国加强资源调查与研究、推动技术创新、维持稀土供应的稳定性。

关键词:供应预测;主体建模;情景模式;开发潜力;稀土

中图分类号:TD955 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-0277(2026)01-0131-17

稀土作为现代高新技术产业的关键原材料,在新能源汽车、风力发电等领域中发挥着至关重要的作用[1,2]。这些领域的迅猛发展,尤其是随着环保意识的提升和清洁能源相关技术的进步,使得稀土在永磁电机中的应用愈加广泛[3]。伴随全球范围内超过 120 个国家或地区先后提出“碳中和”或“零碳”转型目标,全球对稀土的需求愈发强烈[4,5]。

然而,近年来稀土资源供需缺口达到 10%以上[6]。有研究表明,预计到 2040 年,除铕和钇过剩、镧和铈供需几乎平衡外,其他元素将全面出现供应不足的情形,特别是镨、钕、镝等元素的缺口均在 80%以上[7]。这一供需失衡不仅会影响稀土

收稿日期:2024-11-18
基金项目:国家自然科学基金项目(42061049;L2324212);中国科学院学部学科发展战略研究项目;中国科学院文献情报领域引进优秀人才计划项目;中国科学院赣江创新研究院自主部署项目(E355F004)
作者简介:杜光辉(1998-),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事关键矿产供应链仿真模拟相关研究,E-mail:dgh15001180626@163.com
*通信作者:王 路,副研究员,E-mail:lwang@gia.cas.cn
DOI: 10.3724/S1004-0277.20250006

资源环境的可持续利用,甚至可能对中国先进制造业和高新技术产业产生威胁。中国是全球最大的稀土生产国和出口国,如果未来稀土元素的短缺加剧,可能会导致中国在国际市场竞争中处于不利地位,并影响先进制造业和高新技术产业的持续发展[8~12]。此外,稀土的供应不足还可能引发供应链的波动,导致高新技术企业的生产成本上升,从而影响整个产业链[13,14]。在这种情况下,亟需对全球稀土资源的未来供应格局进行深入分析,识别中国未来稀土供应地位,以期为解决未来的稀土供应挑战、确保国家在全球高新技术产业竞争中的持续发展和领先地位提供科学依据[15~19]。

目前,针对稀土资源未来供应格局的分析方法主要包括统计分析法、经济模型法、系统动力学模型法以及主题建模法等。统计分析法通过收集历史数据进行趋势分析,可以较为直观地揭示供需变化的走势,便于理解和决策,但通常依赖历史数据,对于未发生过的情况如突发事件或政策变化等预判能力不足,可能导致预测不准确。经济模型法是通过建立经济模型如供需模型、价格模型等,来模拟市场行为和政策影响,有助于分析不同场景下的稀土供应变化[20]。然而,模型的参数和设定可能影响结果的准确性。系统动力学模型法是通过模拟复杂系统中元素之间的反馈关系,基于不同因素间相互作用,提供动态分析视角,但构建和调整系统动力学模型需要大量的研究和数据支持,且其结果依赖于模型的结构和设定。主体建模法可以综合考虑多个因素和变量,包括市场、政策、资源禀赋等,提供更为全面和精准的预测,需要复杂的算法和足够的数据支持,对于数据的质量和完整性有较高的要求。

由于稀土未来供应需要考虑多个因素和变量,包括市场、政策、资源禀赋等,本文收集了全球 1000 多个稀土矿点的储量、产量、开发状态、运营情况、销售情况等数据,通过综合评估,从中筛选出了 144 个在 2020—2040 年期间具有开采潜力的矿点进行主体建模分析,尽量更全面精准地预测全球稀土矿未来供应情况。

1 主体建模模型

基于 Riddle 对于关键矿产主体建模研究中部分模型参数[21~25],本研究建立全球稀土供应格局和价格预测仿真模型,如图 1 所示。

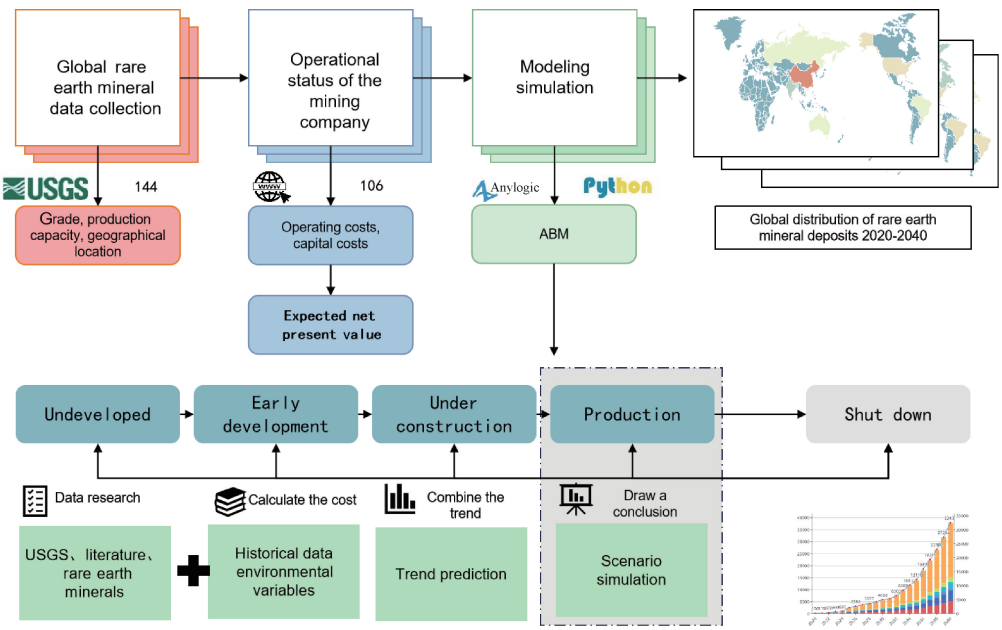


图 1 全球稀土资源供应格局仿真建模

Fig. 1 Simulation modeling of global rare earth resource supply pattern

1.1　供应预测仿真模型

供应预测主要是预测矿床在未来时间段内开始生产的概率以及生产每种产品的总量。

首先,计算每个矿床在未来时间段 tf 内生产的概率 $PD_{d,t,tf}$,如式(1)。公式中 0 表示未开发阶段,1 表示生产阶段,tf-t 表示时间因素,t_D 表示开发时间,这些因素共同决定矿床在未来时间段内开始生产的可能性。

$$PD_{d,t,tf} = \begin{cases} 0 & if\ DS_{d,t} + \left(\dfrac{tf-t}{t_D}\right) < 1 \\ p_I + DS_{d,t}(1-p_I) & if\ DS_{d,t} + \left(\dfrac{tf-t}{t_D}\right) \geqslant 1 \end{cases} \tag{1}$$

其次,根据矿床的产量和生产概率,计算每种产品在未来时间段内的总供应量 $SF_{p,t,tf}$,如式(2)。通过对具有开发潜力的矿床集合进行求和,将每个矿床的产量乘以其对应的生产概率得到每种产品的产量,并可得出总供应量。

$$SF_{p,t,tf} = \sum_{d \in \overline{D}} PC_{d,p} \times PD_{d,t,tf} \tag{2}$$

供应预测的准确性取决于开发阶段、产量、生产概率和时间间隔等参数的准确性。为提高预测的可靠性,需要根据历史数据、市场趋势和其他相关因素进行参数预估和调整,并进行反复迭代和更新。

1.2　需求预测仿真模型

需求预测的计算通常涉及以下几个步骤:

需求预测在稀土企业规划和决策中起着至关重要的作用,通过基于历史数据和过去需求趋势来估计未来产品或服务的需求,帮助组织优化生产、库存管理、资源分配和定价策略。需求预测包括长期趋势和短期调整两个主要组成部分。长期趋势代表需求随时间的基本增长模式,受起始值和增长率影响。起始值是预测期开始时的初始需求水平,增长率捕捉需求随时间增长或减少的速度。短期调整需考虑季节变化、促销活动、经济指标、竞争对手行为等因素,以捕捉预测期内的波动和变化。

首先计算了不同年份 t 对预测年份 tf 的起始值 $DFT_{t,t}$:

$$DFT_{t,t} = (1 - \alpha_{DT,DF})DFT_{t-1,t} + (\alpha_{DT,DF})D_t \tag{3}$$

根据初始值 $DFT_{t,t}$ 以及全球需求趋势的指数加权移动平均值的半衰期 $\alpha_{DT,DF}$ 可以得到需求增长率 DFG_t:

$$\ln(1 + DFG_t) = (1 - \alpha_{DG,DF})\ln(1 + DFG_{t-1}) + \alpha_{DG,DF}\ln\left(\frac{DFT_{t,t}}{DFT_{t-1,t-1}}\right) \tag{4}$$

根据初始值和增长率可以得到长期趋势 $DFT_{t,tf}$:

$$DFT_{t,tf} = DFT_{t,t} \times (1 + DFG_t)^{(tf-t)} \tag{5}$$

需求预测 $DF_{t,tf}$ 将从当前水平向这一长期趋势收敛:

$$DF_{t,tf} = DFT_{t,tf} + \exp[-r_{DF,DT}(tf-t)] \times (D_t - DFT_{t,t}) \tag{6}$$

对未来 20 年的需求预测进行多次迭代得到的结果如下:本研究通过综合长期趋势和短期调整,组织生成全面的需求预测。需求预测是迭代的过程,随着新数据和预测期限的临近,组织更新模型以提高准确性。最终的需求预测公式结合长期趋势和实际需求值,收敛到长期趋势。

1.3　价格预测仿真模型

价格预测的计算通常涉及以下几个步骤:

首先,确定当前时间 t 和未来时间序列 $tf \in \{t, t+\Delta t, t+2\Delta t, \cdots, t+n\Delta t\}$,其中,$\Delta t$ 表示时间间隔。其次,使用移动平均值来预测价格。通过计算过去价格的移动平均值 $PMAF_t$,可以得到当前时间的价格预测基准。移动平均值的计算公式需考虑衰减因子 $\alpha_{P,PF}$,以用于平滑价格变动。然后,根据移动平均值的衰减速率 $r_{PF,PMAF}$ 和时间间隔 Δt,计算当前时间总和上一个时间点之间的价格变动,得到价格预测的中间值 $\ln(PFM_{p,t,tf})$。

首先,PMAF 是过去价格的移动平均线,定义如下:

$$PMAF_t = \frac{\sum_{i=1}^{t}(1 - \alpha_{P,PF})^i P_{t-i}}{\sum_{i=1}^{t}(1 - \alpha_{P,PF})^i} \tag{7}$$

下面考虑供需平衡对价格预测的影响程度。使用价格预测范围的初始值 $PFR_{t,tf}$ 和价格预测范围的衰减速率 $r_{PFR,O}$,计算供需平衡对价格预测的调整因子 $PFR_{t,tf}$。价格预测范围 PFR 决定了供需平衡在每个时期的影响程度。

$$PFR_{t,tf} = \overline{PFR_{t,tf}} \times \frac{\Delta t}{r} \times \exp\left[- r_{PFR,O}\left(\frac{tf - t}{r}\right) \right] \tag{8}$$

$PFM_{p,t,tf}$ 是仅基于当前价格和过去价格的移动平均线进行系列预测的中间值。

$$\ln(PFM_{p,t,tf}) = \ln(PMAF_t) + \exp\left(- r_{PF,PMAF} \frac{\Delta t}{r}\right) \times [\ln(PF_{t,tf-\Delta t}) - \ln(PMAF_t)] \tag{9}$$

最后,根据中间值 $\ln(PFM_{t,tf})$、供需平衡调整因子 $PFR_{t,tf}$ 以及需求和供应比率的自然对数 $\ln(DF_{t,tf}/SF_{t,tf})$,计算未来时间段 *tf* 内的价格预测值 $SF_{t,tf}$。通过指数函数将中间值和调整因子转换为实际价格预测值。

$$PF_{t,tf} = \exp[\ln(PFM_{t,tf}) + PFR_{t,tf} \times \ln(DF_{t,tf}/SF_{t,tf})] \tag{10}$$

综上,价格预测的计算基于当前价格、过去价格的移动平均值以及供需平衡等因素。这些计算涉及衰减因子、衰减速率和需求供应比率等参数,用于估计未来时间段内的价格走势。

1.4 稀土矿产模型

在得到了需求 $DF_{t,tf}$、供应 $SF_{p,t,tf}$ 和价格 $PF_{t,tf}$ 预测的前提下,矿产代理人可结合自己的矿产盈利情况酌情开发矿产。

在评估盈利能力时,会定期对矿产进行评估,基于预测的价格 $PF_{t,tf}$ 来判断其是否具有盈利能力。氧化物价格每年预测一次,预测时间从 2020—2040 年,在每个矿产的价格预测中,使用所在矿区的价格而不是全球价格。

采用 GCMat 中有关矿产开发的模型方法,将主体开发稀土矿的过程分为 5 个阶段,如图 1,包括未开发阶段、早期开发阶段、正在建设阶段、生产阶段、关停阶段。当矿商主体处于不同阶段时,通过期望净现值来判断矿产是否继续运行,同时能否进入下一阶段。期望净现值的计算则依托于全球变量的影响。

对于给定的价格预测集合,构建和运营矿山的净现值计算公式如下:

$$NPV = \sum_{tf \in t} \exp(-r \times tf)\left(\sum_{O} PC_{O,tf} PF_{O,tf} - OC_{tf} - CC_{tf}\right) \tag{11}$$

式中,*r* 表示矿产进入不同阶段时所采用的折现率,在非关停阶段时采用 15%折现率,进入关停状态后采用 5%折现率。

PC 表示该稀土矿某种稀土产品 O 在当前年份 *tf* 的产能,该产能由全球变量中的供应预测得到,PF 表示该稀土矿的某种稀土产品 O 的预测价格,该价格预测由全球变量中的价格预测得到。二者相乘为该矿某种稀土产品 O 在 *tf* 年份的销售额。对该矿生产的每一种稀土产品求和可得到该矿的 *tf* 年收入。

OC_{tf} 表示该矿于 *tf* 年时的运营成本,CC_{tf} 表示该矿于 *tf* 年时的资本成本,将 *tf* 年的收入减去运营成本和资本成本可得到该年的总利润。

在矿产开发决策中,从长期合同中的确定性收入流与从短期市场中的不确定性收入流相比,所带来的风险降低。

1.5 模型数据校验

R 方检验(*R*-squared test)是一种统计方法,用于评估回归模型的拟合优度,衡量了因变量的变异中有多少可以被自变量解释的部分。*R* 方值的范围在 0 到 1 之间,其中,0 表示该模型无法解释因变量的变异,1 表示该模型完全能够解释因变量的变异。通常情况下,*R* 方值越接近 1,表示模型的拟合效果越好。

R 方值的计算方式如下:首先,计算实际观测值与模型预测值之间的差异,即残差;然后,计算观测值与观测值平均值之间的差异,即总变差;最后,通过将残差平方和除以总变差,得到 *R* 方值。

R 方检验的用途包括:(1)评估回归模型的拟合优度。*R* 方值可以帮助确定模型是否适合拟合数

据,较高的 R 方值表示模型能够较好地拟合数据,较低的 R 方值可能意味着模型不适合或者需要改进。(2)比较不同模型之间的拟合优度。通过比较不同模型的 R 方值,可以判断哪个模型最能解释观测数据的变异,较高的 R 方值通常表示相对较好的拟合效果。(3)评估自变量的影响。R 方值可以确定自变量对因变量的解释能力,如果某个自变量的系数显著且 R 方值较高,可以认为该自变量对因变量有较强的影响。

本研究中,通过历史数据基于本模型得到的线性曲线和供应量参数建立了 R^2,得到了 R^2 = 0.9679,说明模型使用的参数一定程度上与历史供应量为强相关关系,所以根据该模型可以较好地预测未来供应趋势。

2　结果与讨论

根据已构建的矿产开发模型,对全球 144 个稀土矿山在 2025—2040 年期间的开矿概率进行了深入的分析,绘制了未来 15 年的全球稀土矿点供应潜力图,重点分析了全球稀土矿开发利用情况,并对未来轻重稀土的产能进行了预测。

2.1　全球稀土矿山开矿概率分析

本节基于上述章节的建模,对在 2025—2040 年期间具有开采潜力的矿点的开矿概率进行了深入的分析,数据见表 1。

研究结果显示,从时间维度来看:(1)2025 年:由于全球经济复苏和新能源产业的快速发展,稀土需求逐渐上升。预计将有 35 个矿山开始开采,以满足市场需求。此时,大多数矿山仍处于勘探和开发阶段,开矿活动相对平稳。(2)2030 年:随着技术进步和环保要求的提高,一些原先技术难度较大或环保风险较高的矿山开始具备开采条件。预计开矿个数将增长至 52 个,增长速度较快。(3)2035 年:随着稀土资源在高科技产业中的广泛应用,市场需求持续增长。同时,政策环境不断优化,推动稀土产业的健康发展。预计将有 71 个矿山进行开采,继续保持增长态势。(4)2040 年:由于稀土资源的稀缺性和开采难度的增加,部分矿山可能面临资源枯竭或开采成本过高的问题。预计开矿个数将增长至 88 个,但增长速度有所放缓。

从空间维度来看:(1)亚洲作为稀土资源最为丰富的地区之一,其开矿活动始终保持在较高水平。随着技术进步和市场需求的增长,亚洲地区的开矿数目不断增加。从 2025 年的 15 个矿点增至 2040 年的 38 个。其中,中国作为最主要的矿产开发者,始终保持了 7 个。(2)非洲拥有丰富的稀土资源潜力,但受到基础设施和技术水平的限制,开矿活动相对滞后。然而,随着国际合作的加强和投资力度的增大,非洲地区的开矿个数呈现稳步增长。从 2025 年的 8 个矿点增至 2040 年的 21 个。(3)北美洲、南美洲和欧洲的稀土资源相对较少,但技术水平和市场环境较为成熟。因此,开矿个数呈现出平稳增长的特点,从 2025 年 11 个矿点增至 2040 年的 27 个。(4)大洋洲的稀土资源主要集中在澳大利亚等国家,由于资源分布较为集中且开采条件较好,开采活动及规模保持相对稳定。

2.2　全球各区域稀土供应量分析

根据已开发的矿产资源开发模型,并结合全球稀土矿产信息,本研究对全球各区域的稀土供应量进行了系统分析。研究结果显示,预计在 2025 年前,全球稀土矿供应将主要集中于中国、美国、越南和俄罗斯等国家,如图 2。其中,中国的矿产供应量占全球总量的 62%,主要来自内蒙古、南方七省、四川的牦牛坪以及山东的微山等 10 个主要稀土矿的生产地。与此同时,北美地区仅有位于加利福尼亚州的 Mountain Pass 矿处于生产状态,其市场占有率约为 14%。俄罗斯的 Lovozero 矿贡献了约 8%的供应量。此外,亚洲其他地区,如越南的 Dongpao 矿和 Nam Xe 矿,合计占全球供应量的 7%。值得注意的是,缅甸北部和印度的少量稀土矿也对东南亚和南亚地区的供应做出了贡献,使得该区域的供应量达到全球总量的 10%,其他地区的稀土产量合计约占 5%。因此,在这一阶段,中国仍然是全球稀土资源的主要供应国。

表1 稀土矿开矿概率

Table 1 Probability of rare earth mineral mining

Project	Continent	2025	2030	2035	2040	Project	Continent	2025	2030	2035	2040
Mt Weld Rare Earth Deposit	Oceania	1.00	1.00	1.00	1.00	John Galt	Oceania	0.20	0.20	0.30	0.20
Mountain Pass Rare Earth Mine	North America	1.00	1.00	1.00	1.00	Boulder Ridge	Oceania	0.15	0.15	0.30	0.15
Eneabba	Oceania	0.50	0.60	0.80	0.60	Round Top (Sierra Blanca)	North America	0.55	0.60	0.80	0.60
WIM100 (Wimmera、Mallee)	Oceania	0.80	1.00	1.00	1.00	Nolans	Oceania	0.60	0.65	0.75	0.65
Dubbo (Toongi)	Oceania	0.55	0.60	0.85	0.60	Bokanmountain (Bokan-Dotson Ridge)	North America	0.55	0.60	0.75	0.60
Kvanefjeld	Europe	0.10	0.15	0.40	0.15	Strange Lake	North America	0.55	0.60	0.80	0.60
Longonjo	Africa	0.40	0.40	0.60	0.40	Serra Verde	South America	0.60	0.65	0.80	0.65
Bahia Project	South America	1.00	1.00	1.00	1.00	Monazite Sand	Oceania	0.40	0.45	0.60	0.45
Tanbreez/Kringlerne	Greenland	0.20	0.20	0.40	0.20	Bear Lodge	North America	0.60	0.85	1.00	0.70
Norra Kärr	Europe	0.60	0.65	0.95	0.65	Cummins Range	Oceania	0.20	0.20	0.40	0.20
Fen	Europe	0.30	0.30	0.45	0.30	Yangibana (Gifford Creek)	Oceania	0.60	0.65	0.85	0.65
Aksu Diamas	Asia	0.10	0.10	0.30	0.10	Brockman	Oceania	0.40	0.40	0.60	0.40
Nechalacho/Thor Lak	North America	0.15	0.20	0.35	0.20	Mt Clere	Oceania	0.20	0.20	0.40	0.20
Kipawa (Zeus)	North America	0.40	0.45	0.60	0.45	Rand	Oceania	0.10	0.10	0.35	0.10
Ngualla	Africa	0.85	0.95	1.00	0.95	Gascoyne (Edmund & Lyons)	Oceania	0.30	0.30	0.55	0.30
Lofda	North America	0.75	0.85	1.00	0.80	Murraydium	Oceania	0.00	0.10	0.20	0.10
Otjiwarango	South America	0.20	0.25	0.40	0.30	Mt Clere	Oceania	0.10	0.15	0.30	0.15
Browns Range (Wolverine)	Oceania	0.60	0.65	0.95	0.55	Kingfisher	Oceania	0.10	0.15	0.30	0.15
Browns Range (Gambit)	Oceania	0.10	0.10	0.30	0.10	Mick Well	Oceania	0.10	0.15	0.30	0.15
Browns Range (Gambit West)	Oceania	0.15	0.15	0.30	0.15	Arthur River	Oceania	0.10	0.15	0.30	0.15
Browns Range (Area 5)	Oceania	0.10	0.10	0.20	0.10	Mangaroon	Oceania	0.10	0.15	0.30	0.15
Browns Range (Cyclops)	Oceania	0.20	0.20	0.30	0.20	Koppamurra	Oceania	0.70	0.80	1.00	0.75
Browns Range (Banshee)	Oceania	0.20	0.20	0.30	0.20	Miter Hill	Oceania	0.30	0.35	0.60	0.35
Browns Range (Dazzler)	Oceania	0.25	0.25	0.45	0.25	Phalaborwa	Africa	0.20	0.20	0.40	0.20
Browns Range (Total)	Oceania	0.10	0.10	0.20	0.10	Gakara (Murambi South)	Africa	0.80	1.00	1.00	1.00

表 1(续)

Project	Continent	2025	2030	2035	2040	Project	Continent	2025	2030	2035	2040
Gakara (Gashirwe West And East)	Africa	0.15	0.25	0.40	0.25	Gakara (Gasagwe)	Africa	1.00	1.00	1.00	1.00
Gakara (Bigugo)	Africa	0.15	0.25	0.40	0.25	Gakara (Rusutama)	Africa	0.15	0.25	0.40	0.25
Gakara (Gasenyi)	Africa	0.15	0.25	0.40	0.25	Gakara (Gakara)	Africa	0.15	0.25	0.40	0.25
Gakara (Kiyenzi)	Africa	0.15	0.25	0.40	0.25	Gakara (Gomvyi Central)	Africa	0.15	0.25	0.40	0.30
Makuutu	Africa	0.20	0.30	0.60	0.30	Ashram (Eldor)	North America	0.40	0.50	0.60	0.50
La Paz	North America	0.30	0.35	0.45	0.35	Dongpao	Asia	0.60	0.70	0.85	0.65
Halleck Creek (Laramie)	North America	0.00	0.20	0.40	0.20	Nam Xe	Asia	0.20	0.20	0.40	0.20
Searchlight Nevada Project	North America	0.10	0.10	0.30	0.10	Uranium Mine Tailings In Kazakhstan	Asia	0.00	0.10	0.30	0.10
Chavara (Kerala)	Asia	1.00	1.00	0.35	1.00	Alces Lake	North America	0.10	0.10	0.30	0.10
Manvalkurichi	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00	Teasdale (Elliot Lakea)	North America	0.15	0.20	0.50	0.20
Chhatrapur	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00	Foxtrot	North America	0.20	0.30	0.40	0.30
Amba Dongar	Asia	0.20	0.25	0.40	0.25	Deep Fox	North America	0.10	0.20	0.60	0.20
Songwe Hill	Africa	0.25	0.30	0.45	0.30	Henley Harbour	North America	0.10	0.10	0.40	0.10
Nkalonje Hill	Africa	0.10	0.25	0.60	0.25	Tomtor	Asia	0.55	0.65	0.85	0.65
Matamulas	Europe	0.15	0.20	0.40	0.20	Monazite Inventory of the former USSR	Asia	0.10	0.10	0.35	0.10
Steenkampskraal	Africa	0.75	0.85	1.00	0.85	Zashikhinskoye/Zashikhinsky	Asia	0.70	0.80	1.00	0.80
Diamond Creek	Oceania	0.10	0.20	0.40	0.20	Lovozersky/Lovozero	Asia	1.00	1.00	1.00	0.85
Roberts Rare Earth Element	Oceania	0.20	0.30	0.60	0.30	Khibiny	Asia	0.00	0.10	0.40	0.10
Elk Creek	Oceania	0.10	0.10	0.40	0.10	Khibiny (Yuksporskoe/Yukspor)	Asia	0.00	0.00	0.00	0.00
Pea Ridge	North America	0.15	0.15	0.50	0.15	Khibiny (Apatitovy Cirque)	Asia	0.00	0.00	0.00	0.00
Red Wine (Two Tom)	North America	0.00	0.10	0.30	0.10	Khibiny (Koashvinskoe)	Asia	0.00	0.10	0.30	0.20
Bom Futuro	North America	1.00	1.00	1.00	1.00	Khibiny (Deer Creek)	Asia	0.00	0.15	0.45	0.15
Brightlands Milo	North America	0.00	0.00	0.20	0.00	Khibiny (Partomchorrskoye)	Asia	0.20	0.30	0.45	0.30
Northern Myanmar	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00	Chuktokun	Asia	0.00	0.10	0.20	0.10
South Central Thailand	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00	Seligdar	Asia	0.00	0.10	0.20	0.10
Perak	Asia	0.00	0.10	0.00	0.10	Beloziminskoe	Asia	0.00	0.00	0.00	0.00

表 1(续)

Project	Continent	2025	2030	2035	2040	Project	Continent	2025	2030	2035	2040
Olympic Dam (OC Sulphide)	Oceania	0.00	0.10	0.20	0.10	Yaregskoe	Asia	0.10	0.20	0.30	0.20
Olympic Dam (UG Sulphide)	Oceania	0.00	0.10	0.20	0.10	Araxá	South America	1.00	1.00	1.00	1.00
Wicheeda	North America	0.40	0.50	0.65	0.50	Area Zero (In Araxá)	South America	0.70	0.80	1.00	0.80
Hoidas Lake	North America	0.10	0.15	0.30	0.15	Zandkopsdrift	Africa	0.30	0.40	0.60	0.40
Pocos De Caldas	South America	0.50	0.55	0.95	0.55	Glenover	Africa	0.00	0.00	0.00	0.00
Pitinga	South America	0.10	0.15	0.40	0.15	Ambohimirahavavy	Africa	0.00	0.00	0.00	0.00
Catalúo I	South America	0.30	0.35	0.40	0.35	Mandena	Africa	1.00	1.00	1.00	1.00
Catalúo II	South America	0.30	0.35	0.45	0.35	Kesya	Asia	0.40	0.50	0.65	0.50
Paraı ′Ba (Guaju Mine)	South America	0.40	0.45	0.60	0.45	Cascade	North America	0.30	0.40	0.65	0.40
Rio De Janeiro (Buena Mine)	South America	0.10	0.15	0.30	0.15	Circle Valley	North America	0.20	0.20	0.45	0.20
Penco Module (Biolantanidos)	South America	0.30	0.70	1.00	0.70	Mangaroon	Oceania	0.20	0.30	0.60	0.30
Jemi	South America	0.20	0.25	0.40	0.25	Mt Ridley	Oceania	0.10	0.15	0.25	0.15
Monte Muambe	Africa	0.15	0.20	0.30	0.20	Narraburra	Oceania	0.20	0.20	0.40	0.20
Fosse Du Labrador	North America	0.23	0.30	0.40	0.30	Lake Labyrinth Shear Zone	Oceania	0.10	0.15	0.40	0.15
Kwyjibo	Oceania	0.10	0.10	0.30	0.10	Comet	Oceania	0.10	0.15	0.40	0.15
Kirra	Oceania	0.10	0.15	0.40	0.15	Lort River	Oceania	0.60	0.70	1.00	0.70
Rex-Duquet	Oceania	0.30	0.35	0.30	0.35	Kızılcaören	Asia	0.60	0.70	1.00	0.70
Yangfang	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00	Bayan Obo	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00
Maoniuping	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00	Weishan	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00
Muluozhai	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00	Dalucao	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00
South China Seven Proveinces	Asia	1.00	1.00	1.00	1.00						

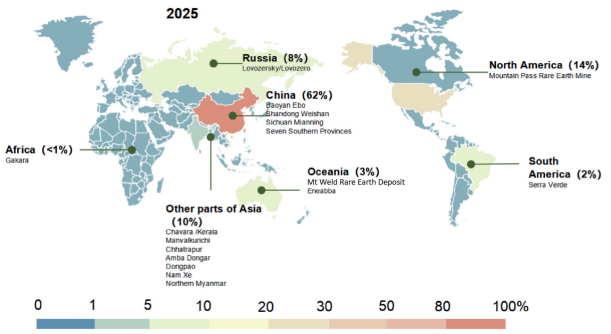


图 2　2025 年全球稀土开采热力图

Fig. 2　Global rare earth mining heat map for 2025

到 2030 年,加拿大、澳大利亚以及巴西等国家的矿产开发呈现出显著的增长趋势,如图 3,此时,中国的稀土供应量预计将下降至约 44%。与此同时,澳大利亚的稀土矿产数量将增加至 8 个,新增矿床包括 Yangibana 和 Olympic Dam 等,其全球供应量从 3%上升至 8%。尽管北美洲的稀土开采量有所增加,但由于矿石品位较低及产能有限,导致其在全球供应中的份额反而下降至 12%。南美洲的稀土供应的增长最为迅猛,新增的 Bahia、Araxá、Cataláo I 和 Cataláo II 等矿产使该地区的全球供应量占比达到 11%,增长幅度约为 9%。在亚洲地区,俄罗斯的稀土供应量仍维持在较高水平,约为 10%。其他亚洲地区的稀土供应量则占据全球市场的 12%,成为仅次于中国和北美的第三大供应区域。同时,格陵兰岛上的稀土矿也开始加入全球供应体系。在这一时期内,中国始终是全球最大稀土供应国,但其他地区矿业逐步发展,全球稀土产业将进入新阶段。

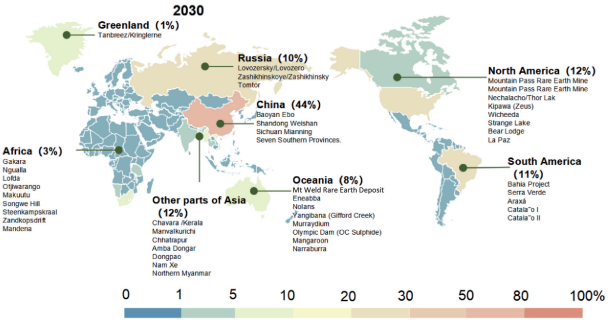


图 3　2030 年全球稀土开采热力图

Fig. 3　Global rare earth mining heat map for 2030

到 2035 年,如图 4 所示,中国的稀土供应量预计将降至全球供应总量的 28%。与此同时,巴西的稀土供应量将显著增长到 13%,北美地区的稀土供应量也将增至 12%,其他地区的稀土供应量则保持在过去的水平。在这一阶段,全球稀土供应体系正在逐步展现出多元化的特征,反映了供应来源的分散与竞争的加剧。

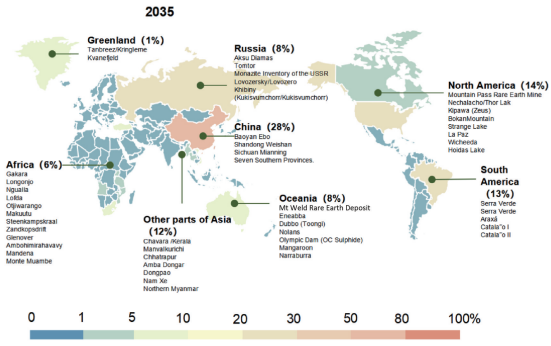


图 4　2035 年全球稀土开采热力图

Fig. 4　Global rare earth mining heat map for 2035

到 2040 年,如图 5 所示,随着稀土需求的进一步增长,俄罗斯、北美地区、巴西以及亚洲其他地区的稀土供应量基本保持不变。同时,非洲和澳大利亚相继开发出更多具有巨大潜力的稀土矿床。欧洲也开始参与全球稀土供应,格陵兰岛的 Kringlerne 矿和 Kvanefjeld 矿通过提升产能,积极贡献于市场。此外,瑞典的 Norra Kärr 矿和西班牙的 Matamulas 矿也相继加入稀土供应体系。在此背景下,全球稀土产业的多元供应格局或将形成,呈现出多路径、多目标的特点。这一发展标志着全球稀土市场格局的显著变化及多元化趋势的进一步加强。

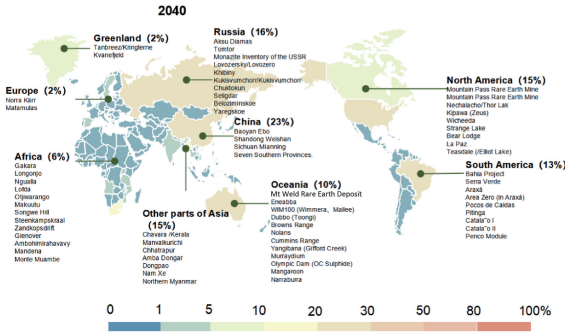


图 5　2040 年全球稀土开采热力图

Fig. 5　Global rare earth mining heat map for 2040

在 2020—2040 年期间,亚洲地区(除中国外)的稀土产量呈现出持续增长的趋势,从 2020 年的 4917 吨增长至 2040 年的 146097 吨,供应比例从 18%上升至 31%,增长速度显著。这一增长主要得益于亚洲地区,特别是中国,在稀土开采和加工方面所具备的技术优势和产业规模。作为亚洲的核心国家,中国的稀土产量在亚洲乃至全球范围内占据主导地位,并对全球稀土市场产生了重要影响,其产量从 2020 年的 110000 吨增长至 2040 年的 180039 吨,尽管增幅稳定,但供应比例却从 62%下降至 23%,显示全球稀土产业多元化供应格局逐渐形成。

非洲地区的稀土产量在 2020—2040 年期间也呈现出增长趋势,从 2020 年的 239 吨增长至 2040 年的 36183 吨,供应比例从不足 1%升至 6%。尽管增长速度低于亚洲地区,但显示出非洲稀土资源的开发潜力。随着非洲国家经济发展以及资源开发的加速,其稀土产量在未来可能会实现更快速地增长。

北美洲的稀土产量在 2020—2040 年期间内呈现先增后减的趋势,从 2020 年的 1404 吨增长到 2039 年的 65897 吨,随后在 2040 年略有下降,供应比例保持在 14%左右,这种波动或与北美地区的市场动荡以及政策调整有关。尽管如此,北美洲仍然具备丰富的稀土资源,未来具有较大的开发潜力。

南美洲的稀土产量在 2020—2040 年期间快速增长,从 2022 年的 1994 吨增至 2040 年的 59505 吨,供应比例从 2%提升至 13%,显示出较快的增长速度。这主要归因于南美洲稀土资源的丰富性以及开采力度的加大,未来南美洲的稀土产量有望持续上升以满足全球需求。

欧洲地区的稀土产量在报告期内稳步增长,尽管起点较低,但随着时间推移,产量逐渐增加。这与欧洲对稀土资源的重视及环保政策的推动密切相关。需注意的是,欧洲地区自身的稀土资源相对有限,未来可能需加强与其他地区的合作以满足市场需求。

大洋洲的稀土产量在报告期内呈现波动性增长,整体规模较小,但某些年份却出现显著增加。这可能与该地区稀土资源的分布特性和开发进度紧密相关。未来,随着对稀土资源开发力度的加大,大洋洲的稀土产量有望进一步提升。

格陵兰岛作为欧洲的一部分,在报告期内的稀土产量呈稳定增长趋势,虽然起始数量较低,但随着时间推移,其产量逐渐增加,显示出该地区稀土资源开发潜力的逐步释放。

本研究还对不同时间跨度和地理维度的全球稀土矿开发利用进行了详细的预测模拟,涵盖了中国、北美洲、澳大利亚、亚洲(不包括中国)、非洲及南美洲的稀土矿未来开发利用及生产潜力的相关分析。

对于北美洲而言,未来 20 年,美国将会占据北美总稀土产量的 96%。美国最大的稀土矿点 Mountain Pass Rare Earth Mine 预计将在 2040 年达成 12 万吨稀土的总产量,占据美国稀土供应的 90%。除了 Mountain Pass 之外,美国还有 Bokan Mountain、La Paz、Halleck Creek、Circle Valley、Round Top、Cascade 等矿点具有巨大的开发潜力,这些矿点将为美国的稀土产能提供重要补充。而加拿大则拥有 Kipawa、Eliot Lake、Thor Lake、Strange Lake、Alces Lake 等多个矿点,拥有较为丰富的稀土储备。

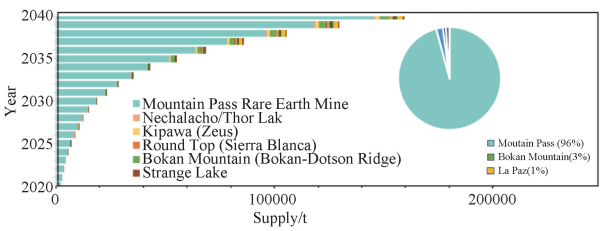


图 6 北美洲稀土供应情况及累计占比

Fig. 6 Rare earth supply situation and cumulative proportion in North America

作为重要的独立稀土供应源,中国在稀土资源的开发上具有显著优势,包括多个重要矿点,如白云鄂博、山东微山、四川冕宁以及南方七省的多个稀土矿。在过去的 20 年中,中国累计生产了约 227 万吨稀土。

其中,白云鄂博矿是全球较为主要的轻稀土生产地,贡献了约 37%的生产量。山东微山和四川冕宁同样是重要的稀土矿点,分别累计生产了 26%和 14%的稀土矿。南方七省则以生产离子型中重稀土为主,这七个省份的稀土矿累计生产占比为 21%。这一系列矿点的丰富资源使中国在全球稀土供应中保持着举足轻重的地位。

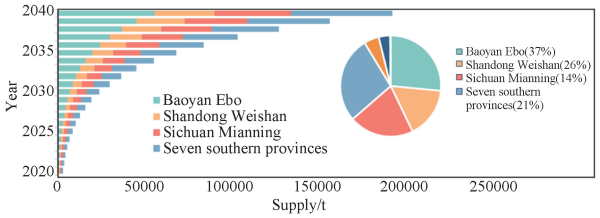


图 7　中国稀土供应情况及累计占比

Fig. 7　Rare earth supply situation and cumulative proportion in China

澳大利亚的稀土资源得益于其独特的地质构造和漫长的地质历史。这片古老的大陆经过亿万年的地质变化,稀土元素逐渐富集在特定的地层和岩石中,形成了丰富的稀土矿藏,其关键的稀土矿产包括 Mt Weld、Eneabba、Nolans、Yangibana 和 Olympic Dam 等。

其中,Mt Weld 矿的供应量占据了总供应量的 37%,Nolans 矿和 Yangibana 矿分别占据 34%和 13%的供应量,而 Olympic Dam 矿则占据 3%。需要特别关注的是,澳大利亚的稀土矿产还富含中重稀土,预示着其未来将成为中重稀土的重要开采基地。这一特点不仅增强了澳大利亚在全球稀土市场中的竞争力,也为全球稀土供应的多元化提供了可靠支持。

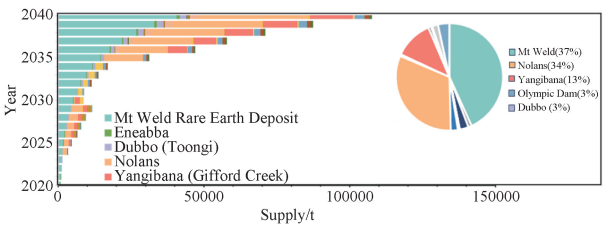


图 8　大洋洲稀土供应情况及累计占比

Fig. 8　Rare earth supply situation and cumulative proportion in Oceania

俄罗斯的稀土矿资源同样非常丰富,其稀土矿床分布广泛,主要包括 Lovozero、Tomtor、Zashikhinsky、Khibiny、Chuktokun 和 Yaregskoe 等。其中,Lovozero 矿在过去 20 年中累计生产了亚洲其他地区 31%的稀土矿,而 Tomtor 矿的累计供应量也占到 9%。

除了俄罗斯,东南亚的一些国家如越南和缅甸,同样拥有丰富的稀土资源,尤其是中重稀土矿。越南的 Dongpao 矿位居东南亚地区第一,累计供应量达到 28%。相较之下,缅甸北部由于地质和社会情况复杂,统计数据并不完整,只能预测出约 3%的供应量。

此外,印度、土耳其、蒙古等国也被视为未来稀土生产的重要源地,这些地区的潜在稀土资源为全球稀土市场的发展增添了新的动力。随着这些地区的资源开发和市场需求的增加,预计将对全球稀土供应格局产生积极影响。

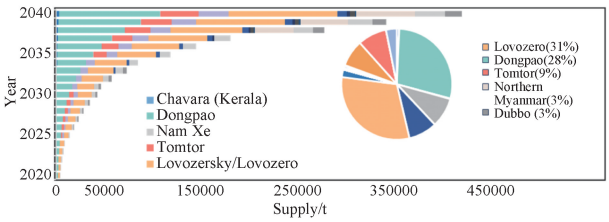


图 9　亚洲其他地区稀土供应情况及累计占比

Fig. 9　Rare earth supply situation and cumulative proportion in other regions of Asia

非洲的稀土矿资源分布比较分散,涉及多个国家,但由于复杂的政治、军事和领土问题,非洲的稀土资源一直受到国际社会的广泛关注。在未来的发展中,南非的 Steenkampskraal 矿预计将在 2030 年前成为非洲主要的稀土供应来源,预计其供应量将占非洲稀土总需求的 57%。

除了 Steenkampskraal 矿外,其他矿场如 Glenover 矿和 Makuutu 矿也表现出良好的供应潜力,吸引了各国关注。非洲丰富的稀土资源以及相对较低的开采成本,使得该地区在全球稀土市场中越来越具有吸引力。随着资源的逐步开发和国际

市场需求的增加,非洲的稀土产业或将在未来日益重要。

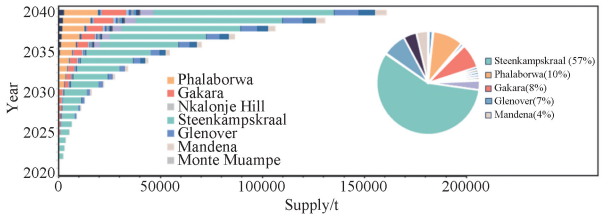


图 10 非洲稀土供应情况及累计占比

Fig. 10 Rare earth supply situation and cumulative proportion in Africa

南美洲的稀土矿资源主要由巴西提供,巴西境内多个重要矿床的开发使其在全球稀土供应中占有一席之地。具体来看,Serra Verde 矿累计提供了 22%的稀土,而 Cataláo I 矿的供应量更是达到了 29%。此外,Bahia Project 矿达到 14%,Araxá 矿占据 9%,而 Cataláo II 矿同样贡献了 14%的稀土供应。

巴西不仅拥有丰富的稀土矿产,其地理位置也相对优越,这为稀土矿的开采和运输提供了良好的条件。更为重要的是,巴西与多个国家建立了良好的贸易关系,这为其稀土的出口创造了便利的条件。随着全球对稀土需求的不断增加,巴西的稀土资源将继续在国际市场中发挥越来越重要的作用。

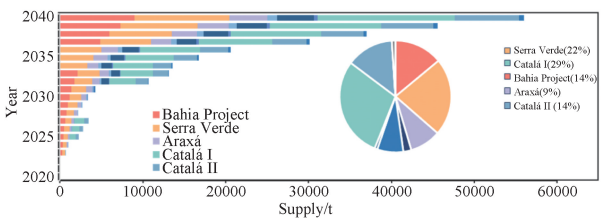


图 11 南美洲稀土供应情况及累计占比

Fig. 11 Rare earth supply situation and cumulative proportion in South America

2.3 全球稀土元素供应量分析

全球稀土元素的供应量分析至关重要,因为稀土元素在现代科技、电子产品、清洁能源和军事装备等领域中扮演着关键角色[26~28]。通过对各个元素的供应量进行详细分析,可以帮助了解稀土市场的供需状况和资源分布,从而为产业链的优化、战略决策、投资规划提供科学依据。因此,本研究对全球稀土元素供应量进行了分析。

2024 年之后,全球对稀土的需求显著提升,届时中重稀土与轻稀土的需求共同受到下游终端应用的显著影响,并呈现出明显的增长趋势,如图 12 所示。从 2034 年起,全球稀土的总供应量中,中重稀土的增长趋势将超过轻稀土,可能原因如下:(1)新能源领域的需求激增。随着全球对可再生能源需求的持续上升,电动汽车、风力发电和太阳能光伏等领域对中重稀土的需求也在迅速增加。(2)高科技领域应用的扩展。中重稀土元素在航空航天、电子信息和国防等高科技领域中发挥着广泛的应用,尤其在航空航天领域,例如用于制造高性能永磁材料和高温超导材料等。(3)稀土资源的战略地位。作为全球战略资源之一,稀土元素对于国家安全和经济发展具有重要意义。中重稀土作为稀土资源的关键组成部分,其供应与需求的稳定对维护国家的战略利益至关重要,因此,各国纷纷加强对中重稀土的开采、冶炼和应用研究,旨在提升自身的稀土资源储备和技术水平。(4)环保与可持续发展的需求。伴随全球环保意识的提升和可持续发展呼声的增强,中重稀土作为清洁、高效的材料在可持续发展方面显现出重要作用。例如,在电动汽车领域,中重稀土元素能够提高电池的能量密度和循环寿命,从而降低对环境的影响和资源浪费。这些因素共同决定了中重稀土在未来的重要性。

从 2020 年至 2035 年,中重稀土的全球供应格局发生了显著变化,如图 13 所示。这一变化受到资源分布、开采技术、市场需求及地缘政治等多重因素的共同影响。

(1)2020—2025 年,传统供应国家的稳定输出。在此期间,全球中重稀土的主要供应来源为缅甸、越南、澳大利亚和中国。这些国家凭借丰富的稀土资源和成熟的开采技术,能够有效满足当时市场的需求。然而,随着全球新能源及高科技产业的迅速发展,稀土的需求开始显现出快速增长的趋势。

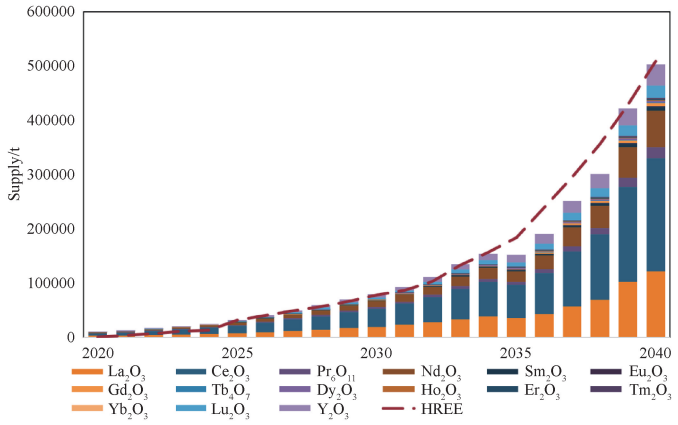


图 12　稀土分元素未来供应趋势

Fig. 12　Future supply trends of rare earth elements

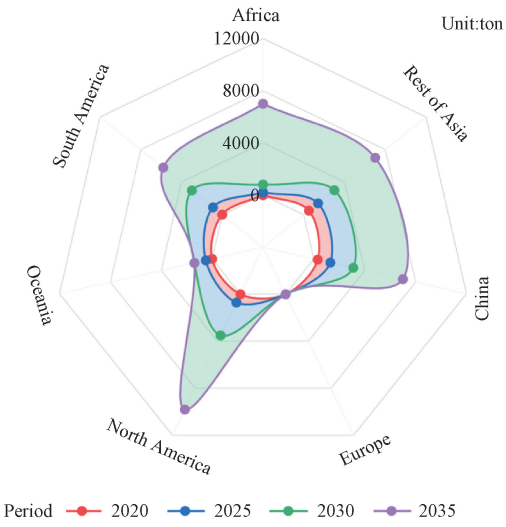


图 13　全球各地区中重稀土未来供应趋势

Fig. 13　Future supply trends of medium and heavy rare earths in different regions of the world

(2)2025—2030 年,新矿区的开发与产能增长。随着稀土需求的持续上升,开始大规模开发格陵兰岛及南美洲的矿产资源,尽管这些地区之前未成为稀土主要供应国,其丰富的资源储量和良好的开采条件使其逐渐成为新的供应热点。同时,南美洲和亚洲的中重稀土产能也迅速提升,预计增加约 20%。这一增长主要源于这些地区对稀土产业的持续投资。

(3)2030—2035 年,非洲矿区的崛起与供应链的多元化。进入 2030—2035 年,非洲的稀土矿开始大规模融入全球供应链。非洲拥有丰富的稀土资源,尤其是中重稀土元素,其开采与利用对全球稀土市场的稳定性具有重要意义。随着非洲矿区的崛起,全球中重稀土供应链进一步多元化,降低了对单一来源的依赖风险。

(4)产能受限与地区差异。尽管全球中重稀土的供应格局在不断演变,但不同地区之间仍存在明显的产能差异。由于中重稀土资源相对稀缺,大洋洲和北美洲受到产能限制的影响,因此在 2035 年以后,北美洲的供应能力可能出现下降的趋势。相比之下,亚洲、南美洲和非洲等地区则因为中重稀土需求的增加而迅速发展,逐渐成为全球稀土供应的重要力量。

总体而言,从 2020—2035 年,全球中重稀土的供应格局经历了从传统供应国家的稳定输出到新矿区的开发与产能增长,再到非洲矿区崛起与供应链多元化的演变过程。这一演变过程受资源分布、开采技术、市场需求及地缘政治等多重因素影响。展望未来,随着全球新能源和高科技产业的持续发展,中重稀土的需求仍将保持增长趋势,供应链的多元化和产能的提升将是满足这一需求的关键。

3　结论与建议

3.1　主要结论

通过对全球稀土资源供需格局的深入分析和

梳理,系统研究全球主要稀土供应区域的未来发展规划及可能增加的产能,并采用主体建模模型(ABM)预测未来全球稀土矿的开发潜力,得出以下结论:

1. 未来全球稀土供应量的快速增长。根据模型预测,综合考虑需求、价格和供应等多个因素,并参考国际能源署(IEA)提出的三种情景对稀土供应量进行预测。研究表明,未来全球稀土供应量将呈现快速增长的趋势,其中,中国的供应占比逐年下降。在既定政策情景(STEPS 情景)下,预计到 2040 年全球稀土供应量将达到 60 万吨,而亚洲及北美将成为主要的供应来源。然而,2034 年北美地区的供应量快速减少,原因在于该时段稀土价格较低,导致一些北美低品位稀土矿因成本问题而停产或减产。随着需求迅速增长,北美的供应量将在价格上升后恢复,同时格陵兰岛、非洲和南美洲的供应比例也将增加。在可持续发展情景(SDS 情景)下,全球对稀土的需求更加旺盛,2040 年供应量预计将接近 100 万吨。稀土供应的快速增长阶段将提前于 2035 年前后爆发,但总体增势保持相对平稳。在零排放情景(NZE 情景)中,预计 2040 年全球对稀土的需求将超过先前的情景,几乎是 STEPS 情景的两倍,全球稀土供应呈现出明显的阶段性增长。总体而言,在 2020—2030 年间中国将继续作为主要供应国,而之后亚洲其他地区、南美和北美地区的供应比例将显著增加。到 2035—2037 年,亚洲其他地区的供应量将超过中国,并且在 2037 年后全球供应将再次迎来爆发式增长。

2. 未来多样化的稀土矿产分布。根据主体建模模型(ABM)研究,未来全球稀土的开采将呈现出多样化的矿产分布。在早期阶段,中国将继续扮演主要的稀土供应国角色,其供应程度保持较高水平。美国、越南和澳大利亚等国也将一定程度参与稀土开采。在中期阶段,巴西、非洲及加拿大等国家或地区的稀土供应逐渐增加。进入后期阶段,格陵兰岛、西班牙和瑞典等国或地区的稀土开采逐步增加,开采程度逐渐上升。这些国家将依据自身稀土资源的丰富程度及技术能力,逐步开发更具潜力的稀土矿产,以满足全球对稀土的需求。这一趋势表明全球稀土市场正在经历结构性变化,各地区的开采活动对全球供应的重要性日益增强,全球稀土供应呈现出多元化的趋势,逐步减少对中国主导地位的依赖。

3. 中重稀土供应增长的关键性。研究显示,在 2020—2025 年期间,中国、越南和澳大利亚是全球中重稀土的主要供应地,拥有丰富的中重稀土资源。随着全球对稀土需求的不断增长,格陵兰岛、南美洲及亚洲地区显示出中重稀土资源的巨大开发潜力,未来将成为新的中重稀土供应地。预计到 2035 年,全球中重稀土的供应增长趋势将超过总体稀土供应的增长趋势,表明中重稀土供应将在未来矿产开发中占据重要地位。因此,密切关注中重稀土资源的供应状况和需求趋势,对未来稀土市场及产业的发展至关重要。

4. 稀土供应的多样化与价格波动挑战。研究结果表明,随着未来稀土需求的不断增长,全球稀土供应将呈现多样化的发展趋势,中国也将面临稀土价格剧烈波动的挑战。当总量控制计划较低时,各地区的供应较为平衡。然而,随着中国实施更高的稀土总量控制计划,中国的全球稀土供应量占比可能会随之增加,导致其他地区的供应能力减弱甚至消失。在高总量控制计划的情况下,可促进稀土价格保持低位振荡,这对于维持稀土市场稳定及推动全球经济可持续发展具有重要意义。

3.2 政策建议

根据上述结论,本研究提出的政策建议如下:

1. 加强稀土矿产资源的调查与研究。各国应加大对稀土矿产资源的调查与研究投入。通过科学、全面的勘探与评估,能够发现新的稀土矿产资源,进而减少对现有资源的过度依赖,增强供应的多样性。同时,各国应加强环境保护和可持续开采的管理。稀土开采与加工过程中产生的环境问题应引起充分重视,并采取有效措施以降低对生态环境的影响,确保开采活动的可持续性。

2. 加强中重稀土资源评估与技术创新。面对

中重稀土供应与需求的变化,各国应加强对中重稀土资源的评估。了解各国的中重稀土资源潜力及储量分布,有助于合理制定开采规划与战略,确保资源的可持续开发。此外,各矿区应加大对中重稀土矿产开采技术的研发与创新。通过提高开采效率、降低环境影响以及开发新的提取和加工技术,来更有效地利用中重稀土资源。最后,全球应积极推动中重稀土替代技术的研究与应用。通过开发和采用替代品或替代技术,减少对中重稀土的依赖,从而降低对中重稀土供应的依赖性,确保市场的稳定性。

3. 保障中国中重稀土资源供应安全与产业链稳定。中国应继续维护稀土供应的稳定性,特别是中重稀土资源的供应安全。中重稀土在高科技产业中具有不可替代的作用,保障其稳定供应对于维护中国稀土产业链的安全和规模优势至关重要。首先,应加大对国内中重稀土矿产资源的勘探力度,寻找新的矿床资源,提高资源保障能力。同时,在确保生态环保的前提下,合理开发现有中重稀土矿山,延长其服务年限,确保国内资源的持续供应。其次,积极拓展与中重稀土资源丰富的国家合作,如缅甸、越南等东南亚国家,以及非洲、南美洲等地区,建立稳定的进口渠道,降低对单一国家或地区的依赖,增强资源供应的稳定性。通过进口多元化,可以有效缓解国内中重稀土资源短缺的压力,保障产业链的顺畅运行。最后,建立和完善国家中重稀土战略储备体系,合理储备中重稀土资源,以应对市场波动和突发事件带来的供应风险。战略储备可以在市场价格异常波动或供应中断时,及时释放储备资源,稳定市场供应,保障产业链的持续稳定运行。

致谢

衷心感谢中国科学院城市环境研究所陈伟强研究员在本文研究方法上给予的悉心指导,以及在论文数据校准过程中提供的宝贵建议。

参考文献:

[1] Cheng S K, Li W B, Han Y X, et al. Recent process developments in beneficiation and metallurgy of rare earths: A review[J]. Journal of Rare Earths, 2024, 42(4): 629-642.

[2] Deng H. Assessing the Supply Risk and Environmental Impacts of Rare Earths Oxides with Criticality and Life Cycle Assessment Methodologies[M]. Los Angeles, University of California, 2018.

[3] 罗欣,李强. 中国稀土永磁电机关键技术研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(10): 30-34.
Luo X, Li Q. Research on key technologies of rare earth permanent magnet motor in China[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(10): 30-34.

[4] 吴巧生,周娜,杨铖, 等. 碳中和驱动下的战略性矿产资源全球治理[J]. 环境经济研究, 2024, 9(1): 130-148.
Wu Q S, Zhou N, Yang C, et al. Global governance of critical minerals driven by carbon neutrality[J]. Journal of Environmental Economics, 2024, 9(1): 130-148.

[5] 杨宇瑶. “稀土城市矿产与碳中和转型”交叉研究取得重要进展[J]. 供应链管理, 2024, 5(1): 95-96.
Yang Y Y. An important progress in the interdisciplinary research on “Rare earth urban minerals and carbon neutral transition”[J]. Supply Chain Management, 2024, 5(1): 95-96.

[6] 王路,汪鹏,王翘楚, 等. 稀土资源的全球分布与开发潜力评估[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 27-39.
Wang L, Wang P, Wang Q C, et al. Global distribution and development potential of rare earth resources[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(8): 27-39.

[7] 杨斌清,张贤平. 世界稀土生产与消费结构分析[J]. 稀土, 2014, 35(1): 110-118.
Yang B Q, Zhang X P. Analysis of global rare earth production and consumption structure[J]. Chinese Rare Earths, 2014, 35(1): 110-118.

[8] 陈璐,李怀国,梁丽霞. 稀土市场形势及供应格局浅析[J]. 稀土信息, 2023, (5): 21-26.
Chen L, Li H G, Liang L X. Analysis on the market situation and supply pattern of rare earths[J]. Rare Earth Information, 2023, (5): 21-26.

[9] 代涛,高天明,文博杰. 元素视角下的中国稀土供需格局及平衡利用策略[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1586-1594.

Dai T, Gao T M, Wen B J. China's rare earth supply and demand pattern and balanced utilization strategy from perspective of elements[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1586-1594.

[10] 李仲学,周宝炉,赵怡晴. 未来世界稀土供需格局分析及对策[J]. 稀土, 2016, 37(3): 153-158.
Li Z X, Zhou B L, Zhao Y Q. Analysis on the world's future rare earths supply and demand situation and recommendations[J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(3): 153-158.

[11] 尚恒. 稀土:双碳目标下形成巨量需求[J]. 股市动态分析, 2022, (4): 52-53.
Shang H. Rare earth: Huge demand under the goal of double carbon[J]. Stock Market Trend Analysis Weekly, 2022, (4): 52-53.

[12] 张望. 稀土产业链新逻辑:上下游"联姻"重塑供需格局[N]. 21世纪经济报道, 2022-03-09 (011).
Zhang W. The New Logic of The Rare Earth Industry Chain: The Upstream and Downstream "Marriage" Reshapes the Supply and Demand Pattern[N]. 21st Century Business Herald, 2022-03-09 (011).

[13] 刘小芳, 伊志慧. 2023年全球各国稀土资源开发情况及发展态势[J]. 稀土信息, 2024, (6): 26-32.
Liu X F, Yi Z H. Development situation and development trend of rare earth resources in countries around the world in 2023[J]. Rare Earth Information, 2024, (6): 26-32.

[14] 刘峰,李琳穗. 烧结钕铁硼磁性性能提升研究进展[J]. 铜业工程, 2023, (1): 121-126.
Liu F, Li L S. Research progress on magnetic properties improvement of sintered Nd-Fe-B[J]. Copper Engineering, 2023, (1): 121-126.

[15] 饶先发,郭诚君. 低重稀土、高矫顽力烧结钕铁硼磁体研究进展[J]. 广东化工, 2015, 42(17): 87-88.
Rao X F, Guo C J. The development of sintered NdFeB magnets with low heavy rare earths and high coercivity [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(17): 87-88.

[16] 闫一诺,严红燕,井振威, 等. 高矫顽力烧结钕铁硼永磁材料的进展及展望[J]. 热加工工艺, 2025, 54(1): 24-27, 32.
Yan Y N, Yan H Y, Jing Z W, et al. Progress and prospect of sintered Nd-Fe-B permanent magnetic material with high coercivity [J]. Hot Working Technology, 2025, 54(1): 24-27, 32.

[17] 钟勇妹,张立新,包风. 智能电器钕铁硼磁体[J]. 浙江南磁实业股份有限公司, 2022, 11(5): 1-5.
Zhong Y M, Zhang L X, Bao F. NdFeB magnets for intelligent electrical appliances[J]. Zhejiang NanCi Industrial Co., Ltd., 2022, 11(5): 1-5.

[18] 杜朋鑫,刘波,范丽华, 等. 稀土永磁同步电机的轻量化技术分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(6): 341-343.
Du P X, Liu B, Fan L H, et al. Analysis of progress on lightweighting technology of rare earth permanent magnet synchronous motor[J]. Applications of IC, 2024, 41(6): 341-343.

[19] 杨丹辉,高风平,刘思艺, 等. 地缘政治与战略资源产业链重构——以关键稀土矿产和材料为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(5): 19-33.
Yang D H, Gao F P, Liu S Y, et al. Geopolitics and critical resource industrial chain restructuring: A study of rare earth minerals and materials[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(5): 19-33.

[20] 张忠,李振宏. 国家实施稀土资源战略储备的意义及方式建议[J]. 稀土信息, 2010, (3): 32-33.
Zhang Z, Li Z H. Significance and suggestions on the implementation of strategic reserve of rare earth resources by the state[J]. Rare Earth Information, 2010, (3): 32-33.

[21] 孔繁超,刘慧. 基于主体的建模:数智环境下的图书馆政策仿真研究[J]. 图书馆学研究, 2023, (7): 34-40, 70.
Kong F C, Liu H. Agent-based modeling: Library policy simulation in digital intelligence environment[J]. Research on Library Science, 2023, (7): 34-40, 70.

[22] 李雪利. 基于主体建模的新药研发外包仿真研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2023.
Li X L. Simulation Reasearch on New Drug R&D Outsourcing Based on Agent Modeling [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[23] 梁婧. 基于复杂网络演化分析与多主体建模的风险投资机构表现研究[D]. 北京:北京化工大学,

2023.
Liang J. Research on the Performance of Venture Capital Instituions Based on Complex Network Evolution Analysis and Multi-agent Modeling[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
[24] 王佳. 基于主体的建模方法在通信仿真中的应用研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(14): 216-220.
Wang J. Research on the application of agent-based modeling method in communication simulation[J]. Information & Computer, 2023, 35(14): 216-220.
[25] 李广昊,黄魁华,杨耀东, 等. 一种基于联邦学习的供应链需求预测方法 [J]. 工程管理科技前沿, 2024, 43(5): 49-58.
Li G H, Huang K H, Yang Y D, et al. A supply chain demand forecasting method based on federated learning [J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management, 2024, 43(5): 49-58.
[26] 宋天立,缪林鑫,黄阮明, 等.“双碳”目标下上海市中远期经济增长和电力需求预测[J]. 上海节能, 2024, (10): 1588-1595.
Song T L, Miao L X, Huang R M, et al. Forecast of medium and long-term economic growth and electricity demand in Shanghai under the “Double carbon” goal [J]. Shanghai Energy Saving, 2024, (10): 1588-1595.
[27] Agency I E. World Energy Outlook 2023[M]. Paris: OECD, 2023.
[28] Agency I E. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector[R]. Paris, 2021.

Analysis of the Future Supply and Demand Pattern of Global Rare Earth Resources

DU Guang-hui[1,2], *LI Qiang-feng*[1], *ZHAO Shen*[1], *LIU Xi-xi*[1], *WANG Peng*[3], *WANG Lu*[1*]

(1. *Ganjiang Innovation Academy*, *Chinese Academy of Sciences*, *Ganzhou* 341000, *China*;
2. *Shanghai Easy Carbon Digital Technology Co.*, *Ltd.*, *Shanghai* 200940, *China*;
3. *Institute of Urban Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xiamen* 361021, *China*)

Abstract: Rare earth elements, serving as crucial raw materials for modern high-tech industries, are extensively utilized in fields such as new energy vehicles and wind power generation. As global demand for clean energy continues to grow, the demand for rare earth resources also increases, urging countries to boost their investments in rare earth mining and research and development. This trend has drawn widespread attention to the supply pattern of rare earths, particularly under the influence of multiple factors such as geopolitics, environmental protection, and technological innovation. Ensuring a stable supply of rare earth resources has become a significant part of strategic considerations for various countries. This study employs an agent-based modeling approach to develop a global rare earth resource development model, aiming to predict the global rare earth mineral supply potential over the next 20 years. This findings are intended to provide a scientific basis for the development and utilization of rare earth resources an to support their sustainable management. This study reaches the following conclusions: Firstly, the global supply of rare earths is expected to grow rapidly in the future, reaching between 600,000 tons to 1 million tons by 2040, with China′s supply proportion decreasing annually. Secondly, the distribution of rare earth minerals will become diversified, with the supply share of regions such as China, the United States, Vietnam, Australia, and South America gradually increasing. Thirdly, the increase in the supply of medium and heavy rare earths will become a pivotal aspect of future mineral development. Greenland and South America possess significant development potential and are poised to emerge as new suppliers of medium and heavy rare earths. Finally, the diversification of rare earth supply is likely to introduce challenges related to price volatility. It is recommended that countries strengthen resource investigation and research, promote technological innovation, and maintain the stability of rare earth supply.

Key words: supply-demand forecasting; agent-based modeling; scenario modeling; development potential; rare earths