

# 碳中和驱动下的全球风电发展稀土需求

陈立洋<sup>1</sup>, 杨宇瑶<sup>1</sup>, 汪鹏<sup>2,3,4</sup>, 郭咏梅<sup>5</sup>, 赵燊<sup>3,6</sup>, 陈丽华<sup>1</sup>, 陈伟强<sup>2,4\*</sup>

1. 北京大学光华管理学院, 北京 100871

2. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

3. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000

4. 中国科学院大学, 北京 100049

5. 包头稀土研究院, 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 包头 014020

6. 江西理工大学材料冶金化学学部, 赣州 341000

**摘要** 通过物质流分析方法, 预测了世界 10 个主要国家和地区到 2040 年风电发展的稀土需求, 研判了技术进步、回收等因素对稀土供需格局的影响, 探究了碳中和背景下中国稀土产业的优势和面临的问题。结果显示: (1) 碳中和气候目标将带来全球稀土资源需求的快速扩张, 约是既定政策下稀土需求的 2 倍; (2) 全球风电发展将导致稀土面临供不应求的压力, 风机材料技术进步及稀土回收可缓解稀土供应压力; (3) 未来 20 年中国在全球稀土产业链中仍将占据主导地位, 但也面临着全球稀土供应多元化的竞争和挑战, 澳大利亚、缅甸、越南等地将成为中国以外的主要稀土供应地区。建议中国积极统筹国内国外“2 种资源”“2 个市场”, 充分利用稀土冶炼加工产业集聚的优势, 加强高性能磁材及其关联产业的科技竞争力, 并加快推动稀土永磁回收产业链建设。

**关键词** 稀土金属; 碳中和; 风电发展

气候变化和油气能源安全问题正在驱动全球各国向低碳能源转型<sup>[1]</sup>。与其他可再生能源相比, 风电具有更高的容量因子, 可为电力需求不断增长的新兴市场提供更高的能源可靠性<sup>[2]</sup>。在全球能

源转型和碳中和目标的推动下, 中国、欧盟、美国<sup>[3]</sup>、日本等越来越多的国家和地区提出了风电发展战略。美国能源信息署 2021 年能源展望估计, 到 2050 年, 全球风电在电力结构中的比例将会从当

收稿日期: 2022-06-03; 修回日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(71961147003); 国家自然科学基金项目(71904182); 北方稀土横向咨询课题(BFXT/JL-SJ-01)

作者简介: 陈立洋, 博士研究生, 研究方向为资源经济学与供应链, 电子信箱: chenliyang@pku.edu.cn; 陈伟强(通信作者), 研究员, 研究方向为产业生态学与绿色系统工程, 电子信箱: wqchen@iue.ac.cn

引用格式: 陈立洋, 杨宇瑶, 汪鹏, 等. 碳中和驱动下的全球风电发展稀土需求[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 31-43; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.21.004

前的6%增长至18%<sup>[4]</sup>。稀土元素钕(Nd)、镨(Pr)和镝(Dy),是高性能永磁同步风力发电机的关键成份,风电的快速发展将引发这些稀土需求的快速增长,而稀土供应的地理集中性、贸易紧张局势等因素会进一步加剧人们对稀土供应链安全的担忧。

关键金属与低碳能源技术之间的关联关系日益受到学术界的关注<sup>[5-7]</sup>,部分研究揭示了风电发展带来的稀土元素供需不平衡问题。Kalvig等<sup>[8]</sup>评估了2030年全球风能领域钕、镨、铽和镝的供需情况,特别地评估了中国和世界其他地区存在稀土供需差异,即后者可能面临稀土供应不足的问题,需要依赖中国的氧化钕供应;Wang等<sup>[9]</sup>评估了2016—2050年中国风电稀土材料的累积需求,结果显示,与2011—2015年相比,累积需求将会大幅增加,并指出中国风电发展可能会受到稀土生产规模的限制;Farina等<sup>[10]</sup>和Imholte等<sup>[11]</sup>则评估了美国风电发展的稀土需求及其所面临的稀土供应压力;Li等<sup>[12]</sup>对世界10个地区风电发展和稀土供应的差异进行了对比,研究表明全球现有的稀土供应结构,以及日益加剧的地缘政治和环境约束可能会抑制风电的快速扩张。现有研究普遍聚焦于全球或单一国家稀土供需不平衡问题,认为全球风电发展将面临稀土供应压力,这将进一步引起稀土价格的上涨,并有可能制约风电的发展。中国作为风电最大

需求的经济体,拥有最完整的稀土产业链,且在冶炼和永磁环节占有最大的市场份额。现有研究尚缺乏在碳中和驱动下的风电稀土需求研究,及中国稀土永磁产业链战略的探讨。

本研究基于国际能源署(IEA)2021年最新提出的既定政策情景(STEPS)和可持续发展情景(SDS)探讨风电发展带来的稀土需求及地缘供应差异,研判全球风电发展是否会受到稀土供应的制约,评估风机材料技术进步、稀土回收等措施对降低稀土供应压力的作用,分析全球稀土供应地缘格局演变态势,并通过识别和评估中国风电发展的优势以及面临的问题,提出碳中和背景下中国稀土产业发展战略选择。

## 1 方法

基于气候目标、风机材料技术设置了4种情景,采用物质流分析方法刻画2020—2040年不同情景下各个国家和地区风电发展对Nd、Pr、Dy这3种稀土元素的需求,区域边界包括中国(CHN)、美国(US)、欧盟(EU)、欧洲其他国家(ROE)、拉丁美洲(LA)、加拿大(CAN)、澳大利亚(AUS)、印度(IND)、日本(JPN)和世界其他地区(ROW)。研究框架如图1所示。

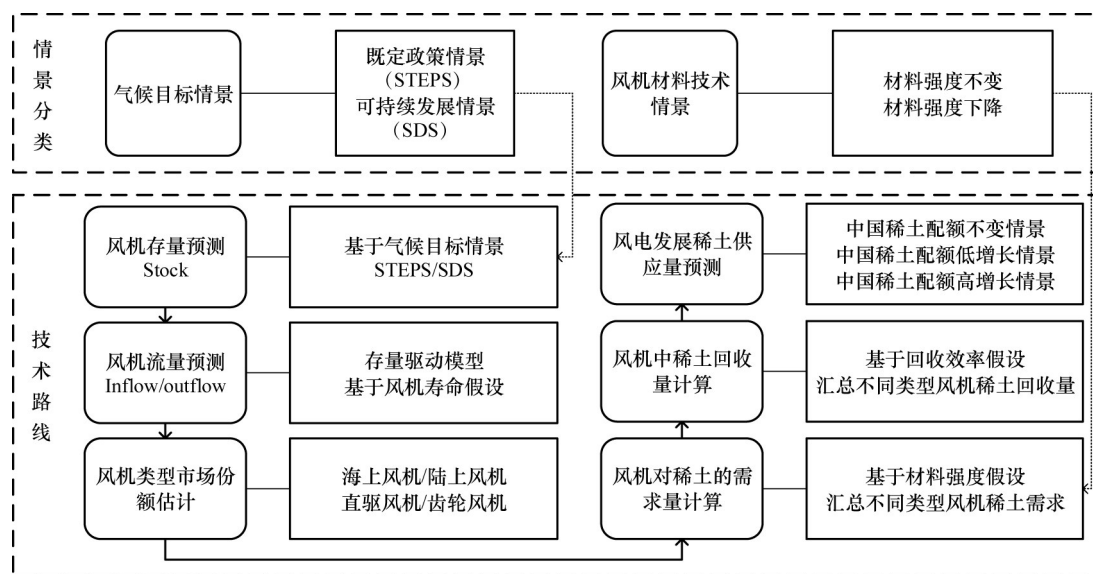


图1 研究框架

## 1.1 风电发展的稀土需求情景设置

气候目标影响风电装机目标,风机材料技术影响风电稀土材料强度,二者是风电稀土需求的重要决定因素。因此本研究从气候目标和风机材料技术2个层面分别设置多种情景预测风电发展的稀土需求。

### 1.1.1 气候目标情景

各国风电的发展与其能源转型政策和碳中和

气候目标息息相关,本研究基于IEA的情景分类将气候目标分为STEPS和SDS,其中STEPS反映了当前的政策设置,SDS反映了发达国家经济体、中国和世界其他地区分别于2050、2060、2070年达到碳中和目标<sup>[13]</sup>。相比于Li等<sup>[12]</sup>研究的新政策情景(NPS)、450情景(450S)、稳健情景(MS)、超前情景(AS)4种情景,本研究的情景能够更好地追踪各国最新的政策目标和更为可行的碳中和目标情形(表1)。

表1 情景假设

情景	来源	假设	装机容量/GW
STEPS	国际能源署(IEA), World Energy Outlook 2021 <sup>[13]</sup>	该情景提供了一个保守的基准,因为并不是所有的政府都会完成他们对外宣称的目标,其探索了能源系统在没有政策制定者的重大额外引导下可能走向何方	2030年:1603 2040年:2357 2050年:2995
		该情景假设所有的净零排放承诺将全部实现,发达经济体、中国和世界其他国家分别于2050、2060、2070年达到净零排放	2030年:2378 2040年:4471 2050年:5881
		该情景以2015年国际能源、环境政策的导向与目标为依据,假设全球风电市场基本保持当前的发展水平到2020年,在2020年之后逐渐下降并稳定在2010年的发展规模到2030年	2030年:1260 2040年:2053 2050年:2870
450S	国际能源署(IEA), World Energy Outlook 2015	该情景在2010年的世界能源发展展望中首次提出,旨在将全球温室气体排放限制在 $450 \times 10^{-6}$ mg/L CO <sub>2</sub> 当量	2030年:1454 2040年:2459 2050年:3546
MS	全球风能理事会(GWEC), Global Wind Energy Outlook 2016 <sup>[15]</sup>	该情景考虑了全球可再生能源所有已经推行的或在计划阶段的政策,并且假设各国政府会真正长期实施在巴黎协定上签订的减排方案(尽管是一个较为温和方案)	2030年:1676 2040年:2767 2050年:3984
AS	全球风能理事会(GWEC), Global Wind Energy Outlook 2016	该情景比MS更具有野心,假设风力发电工业在未来成为主力能源,符合风能愿景	2030年:2110 2040年:3721 2050年:5806

### 1.1.2 风机技术类型及材料强度情景

根据安装场景的不同,可以将风电分为陆上(onshore)风电和海上(offshore)风电,由于海上风电具有更高的容量因子和稳定性,其系统价值通常高于陆上风电<sup>[16]</sup>,预计海上风电的市场份额将会越来越高。根据GWEC的估计,每年海上风电装机容量将从2020年的6.1 GW增长到2025年的23.9 GW,到2025年,其在全球新增装机中的份额将从目前的6.5%提高到21.0%<sup>[2]</sup>。基于IEA于2019年发布的海上风电展望报告<sup>[16]</sup>和世界能源展望报

告<sup>[13]</sup>,假设各地区海上风电的市场份额将不断增长,到2040年中国、美国、欧盟、印度、日本的海上风电市场份额将分别达到23.0%、19.4%、47.6%、9.5%、38.3%,全球平均水平达到24.7%(假设欧洲其他地区的海上风电市场份额与欧盟一致,其他地区与世界平均水平一致)。

直驱永磁同步发电机(direct drive permanent magnet synchronous generator, DDPMSG)和齿轮传动永磁同步发电机(gear-drive permanent magnet synchronous generator, GDPMSG)是2种主要的永磁

同步风力发电机,其基本部件(磁体)使用稀土作为关键材料制造<sup>[17]</sup>。陆上和海上风电中2种风机的市场份额参考Li等<sup>[12]</sup>和Nassar等<sup>[18]</sup>研究。

出于对稀土供应中断和价格上涨的担忧,新型无稀土/少稀土风机技术正在不断改进<sup>[19-20]</sup>,西门子盖姆可再生能源(SGRE)和中国金风科技已经宣称将发电机中Dy的含量降到1%之下<sup>[21]</sup>。Viebahn等<sup>[22]</sup>认为直驱风机中Nd的含量将从2013年的201.5 kg/MW降低到2050年的130 kg/MW,Dy的含量将从2013年的15 kg/MW降低到2050年的11.7 kg/MW。欧盟委员会联合研究中心Alves Dias等<sup>[23]</sup>在—项风电与电动汽车综合预测的研究中假设了稀土永磁体中Nd和Dy的占比从2015年的28%、2%下降到2030年的20%、1%的目标。部分学者认为目前风机的材料技术已经很难有改进的空间<sup>[24-25]</sup>。因此,基于对风机稀土材料技术的考虑,本研究讨论了稀土材料强度不变和材料强度下降2种情景。

综合气候目标情景和风机材料技术情景,分析STEPS、STEPS-TP(technology progress)、SDS和SDS-TP 4种情景,其中STEPS和SDS表示2种气候目标的基准情景(风机稀土材料强度不变),STEPS-TP、SDS-TP表示风机稀土材料强度下降的技术进步情景。

## 1.2 风电发展的稀土需求、退役与回收测算

基于IEA的风电装机容量预测计算每年的新增风电装机量和退役量,给出不同类型风机市场份额的假设,进而预测全球10个国家和地区每年风电发展的稀土需求量及回收量,最后通过对稀土供应量预测以对比全球10个国家和地区的风电发展稀土供需差异。

### 1.2.1 风电装机量与退役量

基于存量驱动模型(stock-driven model),预测2020—2040年的新增风电装机量(inflow)和退役量(outflow),计算模型为

$$\text{inflow}_{i,t} = \text{stock}_{i,t} - \text{stock}_{i,t-1} + \text{outflow}_{i,t} \quad (1)$$

$$\text{outflow}_{i,t} = \sum_{m < t} \text{inflow}_{i,m} \times L(t-m) \quad (2)$$

式中,stock<sub>i,t</sub>为t年国家/地区i的风电装机容量;

inflow<sub>i,t</sub>为新增风电装机量;outflow<sub>i,t</sub>为风电退役量;L(t-m)为风机寿命概率分布函数,为m年安装的风机在t年退役的概率,在本研究中假设其服从均值为μ=20<sup>[24]</sup>,标准差为0.25μ的正态分布。

### 1.2.2 稀土需求量

各国风电发展的稀土需求量d<sub>i,t</sub>计算公式为

$$d_{i,t} = \text{inflow}_{i,t} \times \sum_j \sum_k s_{ij} t_{ijk} m_k \quad (3)$$

式中,i为国家或地区编号;t为年份;j(j=0,1)为风机安装场景——陆上风电或海上风电;k(k=0,1)为发电机技术类型,为DDPMSG或GDPMSG;s<sub>ij</sub>为地区i不同安装场景的风机市场份额(s<sub>i0</sub>+s<sub>i1</sub>=1,∀i);t<sub>ijk</sub>为地区i在安装场景j中发电机技术k的市场份额;m<sub>k</sub>为发电机技术k的稀土材料强度,如表2<sup>[12,18]</sup>所示。

表2 2020年基准及技术进步情景下稀土材料强度

风机技术类型	年份	材料强度/(kg·MW <sup>-1</sup> )		
		Nd	Dy	Pr
DDPMSG	2020	175.5	29.3	43.9
	2040	140.0	23.0	34.0
GDPMSG	2020	32.4	5.4	8.1
	2040	25.9	4.3	6.3

### 1.2.3 稀土回收量

各国每年退役风电中的稀土回收量re<sub>i,t</sub>计算公式为

$$re_{i,t} = \left( \sum_{m < t} d_{i,m} L(t-m) \right) cr \quad (4)$$

式中,re<sub>i,t</sub>为地区i在第t年的回收量,为第t年之前每一年新增量所对应的退役量之和;c为退役风机永磁体的收集率(collection rate);r为稀土的回收率(recovery rate),两者的乘积表示稀土的回收效率(recycling efficiency)。

参考Schulze等<sup>[26]</sup>的假设,风机在收集过程中损失10%的磁铁材料,在拆卸过程中也损失10%的磁铁材料,因此假设退役风机永磁体的收集率为80%。通过文献调研可知,在实验室环境下永磁体中稀土的回收率可以超过80%<sup>[27-29]</sup>,因此假设稀土的回收率为80%,风机稀土的回收效率为64%。

## 2 结果

分析全球 10 个国家和地区 2021—2040 年的风电装机量和稀土需求量,评估各个国家和地区风电稀土回收潜力,最后分析全球稀土供应地缘格局的演变。

### 2.1 风电发展基础设施装机容量

全球各地区在 SDS 情景下的风电装机容量远远

高于 STEPS 情景(图 2),这意味着在“双碳”目标的驱动下,全球风电将有巨大的增长空间。2019 年 5 月 25 日,国家发改委发布《关于完善风电上网电价政策的通知》,明确提出,2018 年底之前核准的陆上风电项目,2020 年底前仍未完成并网的,国家不再补贴,因此,为了享受最后的政策红利,2020 年中国的风电装机量出现了暴涨,处于一个较高的水平(图 2)。

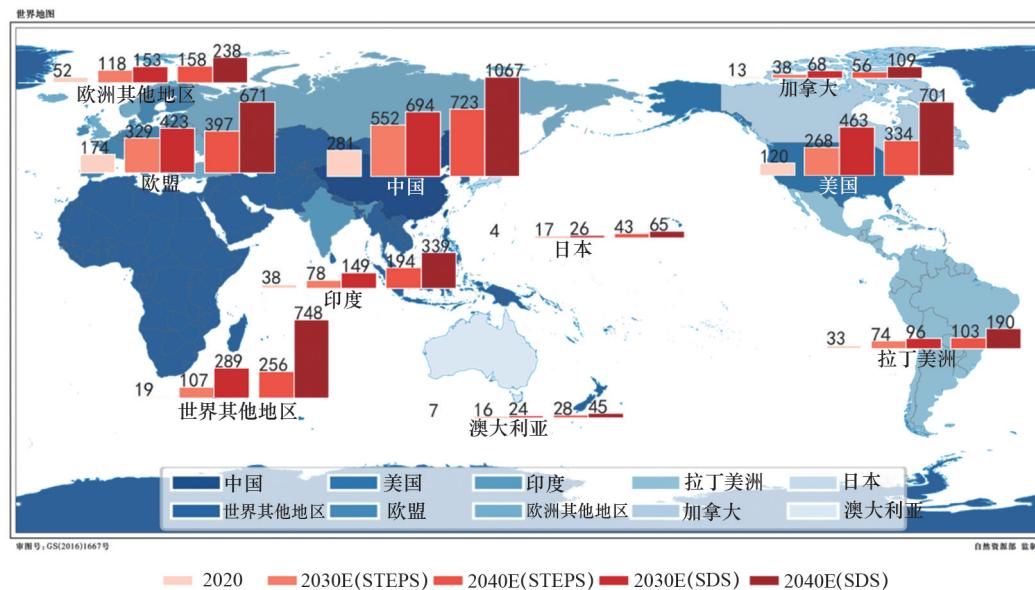


图 2 国家或地区在用风电装机容量(单位:GW)

### 2.2 风电发展的稀土金属需求量

全球各地区在 2021—2040 年风电发展对 Nd、Pr、Dy 这 3 种稀土元素的累积需求量如表 3 所示,结果显示:(1) 从地区分布来看,全球风电发展对稀土的需求具有高度的地理集中性,中国风电发展的稀土需求最高,欧盟和美国次之,3 个地区的稀土需求超过了全球总需求的 60%;(2) 相较于 STEPS 情景,SDS 情景下的稀土需求高出 80% 左右,这意味着在“双碳”目标的驱动下,全球的稀土需求将有可能迎来爆发式甚至翻倍扩张;(3) 从稀土元素需求分布来看,3 种稀土元素的需求量差异很大,其中 Nd 的需求量约是 Pr 需求量的 4 倍,是 Dy 需求量的 6 倍;(4) 风机材料技术进步能够降低 11%~15% 的稀土需求,在全球稀土供不应求的背景下,风机材料技术进步对于降低各个地区的供应压力具有重要意义,也能够降低欧洲、美国、印度等

地对中国稀土的依赖程度。然而,这一目标的实现需要依赖于风机及永磁材料技术的突破。

### 2.3 风电退役稀土回收潜力

未来 20 年风电发展始终处于增量时代,风电退役稀土金属量远远无法作为稀土供应的主要来源,全球仍然需要依赖稀土原矿的大量开采;但回收的重要性将随着风电存量规模的提高快速显现,这对于减少各国的稀土供应压力、保护稀土资源和生态环境具有重要意义。中国的风电装机增长最快,因此也是全球最早迎来稀土大规模回收的国家。2031 年以后,中国稀土回收量就已经超过了需求量的 10%;2036 年以后,中国来自退役风机中的稀土回收量能够覆盖 17%~27% 左右的风电稀土需求,欧洲地区为 13%~24%,印度为 8%~10%,美国为 10%~15%(图 3)。

表3 2021—2040年稀土累积需求量(单位:kt)

国家或地区	STEPS			STEPS-TP			SDS			SDS-TP		
	Nd	Pr	Dy	Nd	Pr	Dy	Nd	Pr	Dy	Nd	Pr	Dy
中国	74.3	18.6	12.4	65.4	16.1	10.8	113.6	28.4	18.9	99.7	24.5	16.5
美国	23.0	5.8	3.8	20.3	5.0	3.4	50.0	12.5	8.3	43.9	10.8	7.3
欧盟	45.9	11.5	7.6	40.7	10.0	6.7	80.1	20.0	13.3	70.4	17.3	11.6
欧洲其他地区	18.3	4.6	3.0	16.2	4.0	2.7	28.3	7.1	4.7	24.9	6.1	4.1
拉丁美洲	8.1	2.0	1.3	7.0	1.7	1.2	15.6	3.9	2.6	13.5	3.3	2.2
加拿大	4.4	1.1	0.7	3.8	0.9	0.6	8.5	2.1	1.4	7.5	1.8	1.2
澳大利亚	2.4	0.6	0.4	2.1	0.5	0.3	3.8	1.0	0.6	3.3	0.8	0.5
印度	19.7	4.9	3.3	17.0	4.2	2.8	34.8	8.7	5.8	30.3	7.4	5.0
日本	4.4	1.1	0.7	3.8	0.9	0.6	6.5	1.6	1.1	5.7	1.4	0.9
世界其他地区	21.7	5.4	3.6	18.8	4.6	3.1	64.1	16.0	10.7	55.5	13.6	9.2
总计	222.0	55.5	37.0	195.1	48.0	32.3	405.3	101.3	67.5	354.8	87.3	58.7

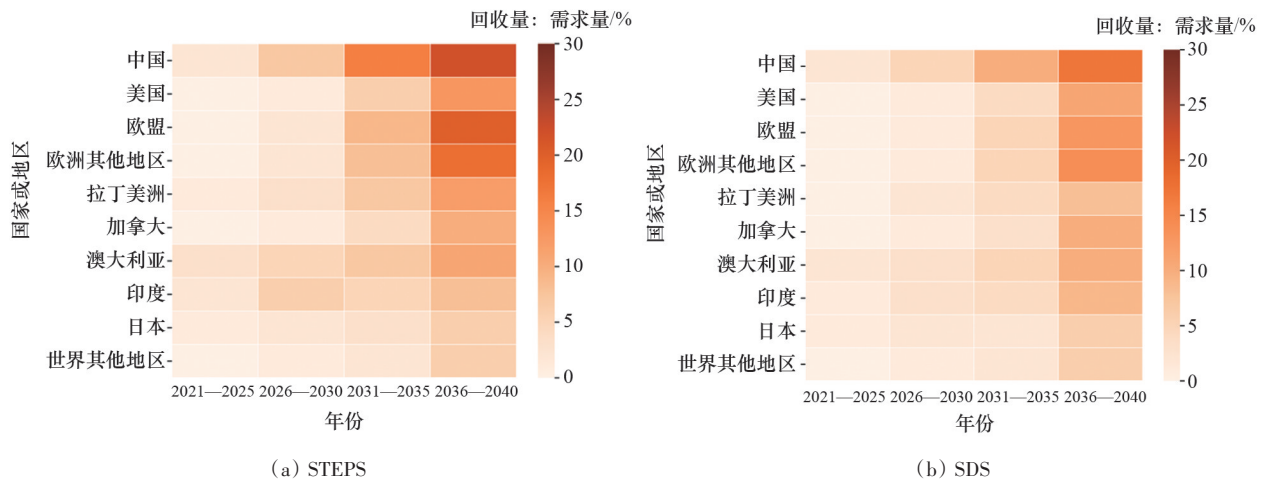


图3 2021—2040年稀土回收量对需求量占比

## 2.4 全球风电稀土供需格局

Roskill<sup>[30]</sup>预测2020—2030年除中国之外世界其他地区的稀土供应量年复合增长率约为1.65%，其中主要的增长来源是澳大利亚。中国的稀土供应量主要取决于中国政府制定的稀土总量控制计划。基于此，本研究设定了3种供应情景：(1) 基准情景，中国配额不增长，其他地区的产量则基于Roskill的预测结果；(2) 低增长情景，亚洲地区(含中国、东南亚等国家)的产量保持1%，其他地区产量与基准情景一致；(3) 高增长情景，亚洲地区(含中国、东南亚等国家)的产量保持3%的年复合增长率，其他地区产量与基准情景一致。

全球各地区矿藏中各稀土氧化物含量不同，因

此Nd、Pr和Dy这3种稀土元素在各地区的供给量需要按照不同矿区中的稀土氧化物分布份额<sup>[31]</sup>以及相应的稀土元素的元素质量分数进行折算，结果如表4所示。

除了风电之外，稀土金属Nd、Pr、Dy还应用于电动汽车、节能电梯、电动两轮车、空调、硬盘驱动器等其他产品中，根据Schulze等<sup>[26]</sup>的预测，2025年风电在所有永磁体终端应用中的市场份额为20.6%，到2030年达到22.5%(高需求情景)，按照这一趋势，假设2021—2040年全球用于风电的稀土供应量占稀土总产量的份额从20%上升到26%，从而推断出全球用于风电发展的各稀土元素供应量(表4)。

表4 2021—2040全球累积稀土元素产量

供给情景	稀土元素总产量/kt			可用于风电的稀土元素产量/kt		
	Nd	Pr	Dy	Nd	Pr	Dy
基准情景	584.7	163.3	39.7	137.7	38.4	9.3
低增长情景	623.5	174.1	42.3	147.2	41.1	10.0
高增长情景	722.8	201.9	49.1	171.9	48.0	11.7

未来20年全球风电稀土的产量与需求对比见图4,全球风电发展将面临严峻的稀土供应压力,即便是在产量高增长情景中,也无法满足STEPS情景下的风电稀土需求,更无法满足SDS情景下的风电稀土需求,且稀土供应的增速不及稀土需求的增速。此外,3种稀土元素的供应压力不尽相同,虽

然Dy元素的需求最少,但由于其在稀土矿中的含量更少,因此面临巨大的供应压力,Nd作为需求量最高的稀土元素,供应压力也较高,Pr元素次之。

从地区维度来看,除澳大利亚外,全球主要风电市场都将面临稀土供不应求的局面(图5)。欧洲、美国、印度等国家和地区均将面临严重的稀土供应压力,必须依赖大量进口稀土资源或产品,然而在全球稀土供应紧缺下进口能力或将难以得到保障;拉丁美洲、加拿大、日本虽然本土稀土产量很少,但由于这些国家和地区的稀土需求量不高,进口压力相对较小;在“双碳”目标下,世界其他地区也将产生巨大的稀土需求,进一步加剧全球稀土的供应压力。中国作为全球稀土储量和产量最大的国家,同样面临着稀土供应压力。在基准供应情景下,中国基本能够实现STEPS情景下稀土的自给自足(Dy这一重稀土元素除外);但在SDS情景下未来中国稀土供应赤字将非常巨大。

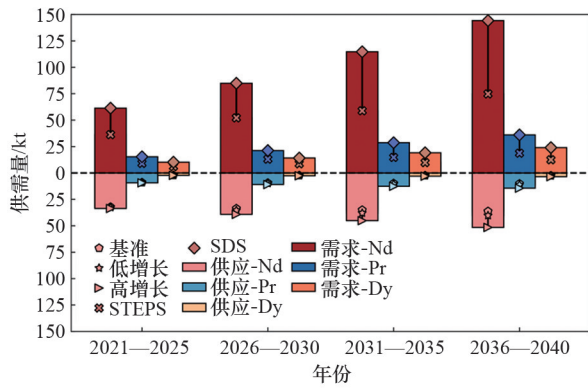


图4 全球风电稀土需求与风电市场可获得稀土供应量

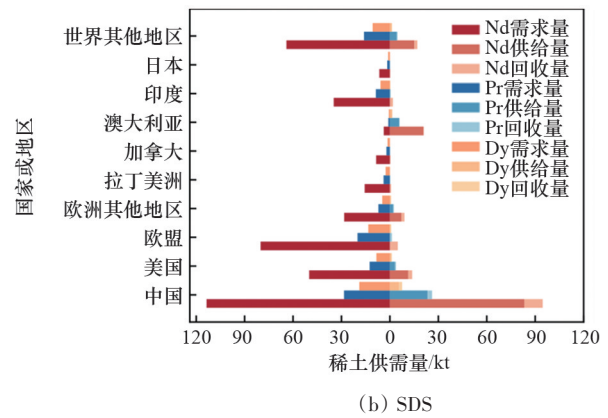
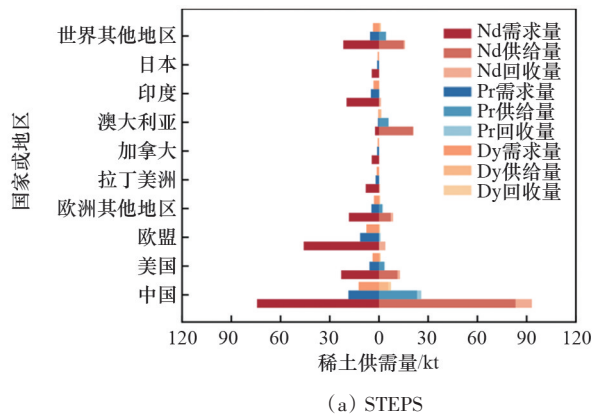


图5 世界各个国家和地区风电发展的稀土供需格局(基准供应情景)

### 3 讨论

#### 3.1 中国稀土开采总量控制政策何去何从

2000—2016年中国每年稀土产量占全球总产量比重始终超过80%<sup>[32]</sup>,2009年高达97%<sup>[33]</sup>,而期

间未记录的非法开采的稀土产量至今无法有效估计。大量的稀土开采和国际新矿勘探导致中国稀土储量从全球的76%下降至35.2%<sup>[34]</sup>。在政府打击非法开采卓有成效的同时,在2018年,中国首次成为至少7种稀土材料的净进口国<sup>[35]</sup>。这表明,中

国有意保护本土稀土资源禀赋,同时美国、欧盟等对中国也存在同样的政策预期。

如图6所示,在SDS情景中,中国若维持当前的稀土总量控制计划,将使3种稀土元素均面临较大的供应赤字;在STEPS情景中,重稀土元素Dy仍然存在较高的供应赤字。如图7所示,如果中国稀土开采配额保持低增长态势,那么可以在风机材料

技术进步与稀土回收的共同作用下保证Nd的供需平衡(图7(d)),但如果风机技术和稀土回收技术发展不及预期,那么就需要中国稀土开采配额保持高增长态势(图7(c))。Dy在STEPS和SDS 2种情景下都面临供不应求的局面,因此中国必须加快部署Dy品位较高的重稀土矿的开采,布局海外优质稀土矿,并且增加重稀土进口,同时通过技术研发

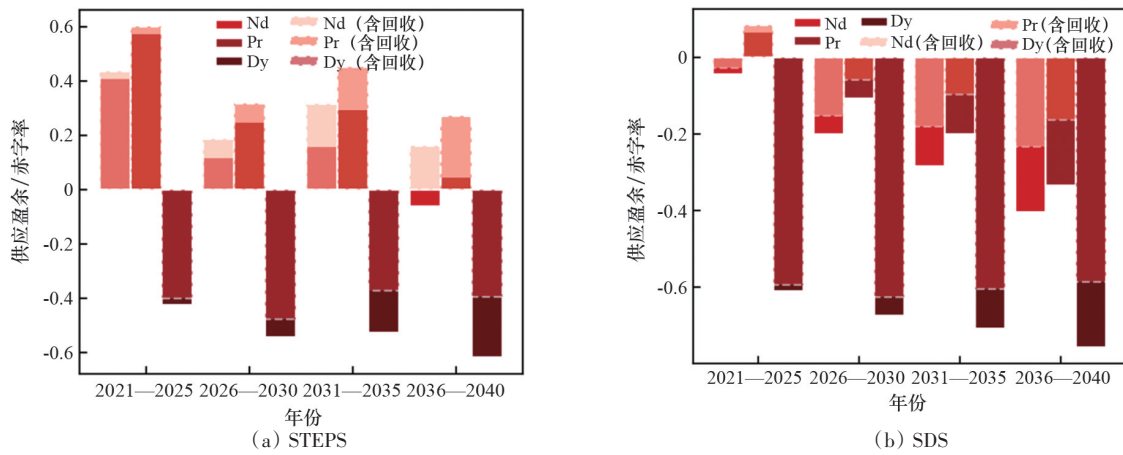


图6 中国风电发展的稀土供应盈余/赤字率(基准供应情景)

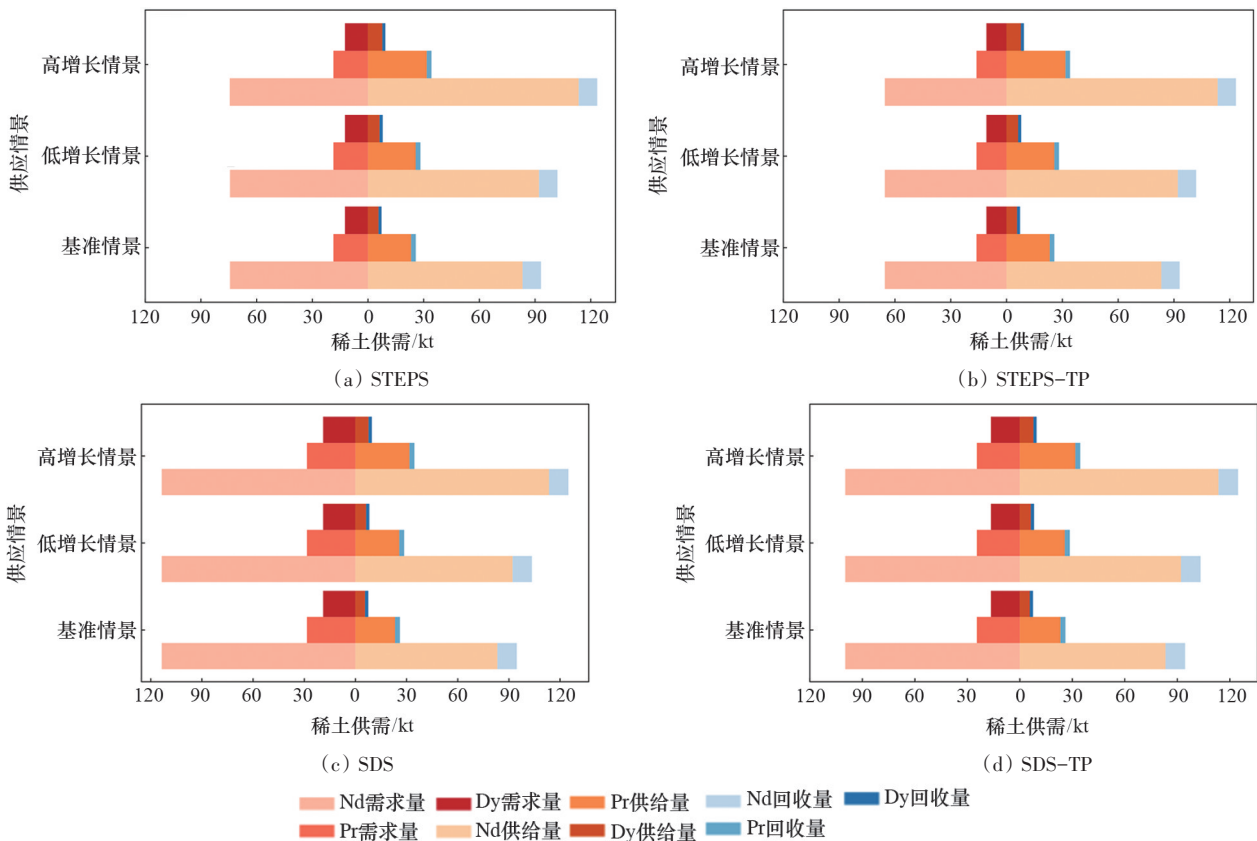


图7 中国风电发展的稀土供需格局

降低风机中 Dy 的材料强度,或者寻找 Dy 的替代材料以缓解日益增长的 Dy 的供应压力。如图 5 所示, Dy 在全球均属于供应紧缺的稀土元素,未来国际争夺的压力将愈发严峻。Dy 供应紧俏的基本面将导致其价格在未来持续升高,因此 Dy 品位较高的矿山(如中国江西的龙南稀土矿)将获得较高的经济效益和竞争力,这也将一定程度上影响国际稀土地缘供应格局。

综上所述可知,中国稀土开采总量限制或将成为“双碳”目标下中国风电发展的制约因素;同时,作为稀土储量大的中国,依然有严峻的“走出去”的任务,如盛和集团收购了越南稀土有限公司,以获得更多海外优质矿权或进口资源。

### 3.2 “探矿”热潮下的国际市场能否摆脱中国稀土依赖

在供应端,中国的稀土产量约将占据全球总产量的 60%(图 5),反观需求端,除中国外其他国家的风电发展带来的稀土需求约占全球总需求的 70%左右(表 3),因此国际风电的发展仍将对中国稀土产生高度依赖,这也将进一步加大中国稀土的供应压力。欧盟、美国、印度等国际主要风电市场将产生大量的稀土需求,并均因储量有限而稀土进口依赖度较高。

美国<sup>[36]</sup>、欧盟<sup>[37]</sup>等国家或地区均有意建设中国以外的稀土供应链,以弱化对中国稀土的依赖,提高供应安全。澳大利亚将有可能对中国稀土产业产生直接竞争,全球稀土地缘格局将会发生变化。同时,随着全球各地区不断发现的新增稀土储量,中国稀土储量资源优势将持续受到冲击。

根据美国地质调查局<sup>[34]</sup>2022 年 1 月更新的储量和产量数据:相比于稀土氧化物储量第一的中国(4400 万 t),越南(2200 万 t)、俄罗斯(2100 万 t)、巴西(2100 万 t)是已探明储量的第二梯队,其中只有俄罗斯有每年 2700 t 的产能,而巴西和越南的产能处于刚刚起步的建设阶段;缅甸和泰国在 2021 年分别开采了 26000、8000 t 的稀土氧化物,然而这 2 个国家的稀土总储量资源仍然没有得到有效探明。缅甸的生产方式仍然是以依赖人工开采为主,因此也很大程度上没有可靠记录,其中每年运到中国大

约 22000 t 稀土氧化物,相当于中国年产量的 1/5 左右。目前无论从已探明储量、年产量和产能增长预期上,作为历史“海上丝绸之路”上的东南亚,都将成为全球稀土开采供应的重要角色,也是中国稀土“走出去”的重要合作伙伴。

然而,矿产资源从储量到形成供应仍需面临诸多问题。

1) 从损耗角度看,虽然在地壳中稀土矿产资源丰富,但大多数分布于品位较低的矿石中<sup>[38]</sup>,且整个提炼过程非常复杂,常伴随大量的损耗。

2) 从开发周期看,矿产从最初被发现,经过开发到可形成生产,一般都至少需要 7 年<sup>[39]</sup>。

3) 从环境污染角度看,稀土矿石中经常含有钍(thorium)和铀(uranium),因此带来了处理放射性废弃物的问题。这是在中国之外等技术不够完善的地区,采矿扩张的最主要的遏制因素<sup>[23]</sup>。

4) 从伴生矿的成本负担角度看,最丰富的稀土元素之二——镧(lanthanum)和铈(cerium)作为伴生矿被大量提取出来,导致供应过剩,这为矿产开采带来了提取和废弃处理的额外成本<sup>[40-41]</sup>。

5) 从产业供应链角度看,从稀土开采、冶炼,到永磁体、永磁发电机乃至风电设备的生产,稀土开采仅仅是一个源头,各国满足自身稀土材料需求,需要全产业链的环节来保障。此外,本研究中的 Nd、Pr、Dy 等稀土金属需求,是以最终产品——风机中的使用量为度量,各国的稀土需求在贸易层面的实例,更多的是以永磁体、发电机乃至风电机组等最终设备的产品形态。

中国在稀土精炼、钕铁硼永磁体制造的市场份额分别高达 91%、94%<sup>[42]</sup>,其中钕铁硼永磁体制造环节是整个产业链中附加值最高且是风机直接依赖的环节。当前,只有中国和澳大利亚 Lynas 公司拥有稀土精炼的生产线,因此中国和澳大利亚将是全球风电市场的主要稀土供应国<sup>[23]</sup>;而永磁体除中国之外的主要供应国为日本。

综上所述,全球各国稀土需求的满足,多是以风电机组、发电机、永磁体等供应链中下游产品的形态,因此在短期内仍很难摆脱对于中国产业链的依赖;同时,中国仍需抓住全球“探矿”热潮的机遇,

发挥产业链完整度、技术与人才、资本等相对优势,加速与东南亚、俄罗斯等中国地缘政治优势的国家或地区建立稀土资源开采合作,在补充中国日益增长的本土稀土需求的同时,成为稀土永磁产业链发展的支撑。

### 3.3 中国稀土产业发展仍需解决的问题

中国风力发电、光伏、电动汽车等领域均是全球最大且增长最快的稀土需求市场,这在过去20年间为中国稀土永磁产业发展带来源源不断的内在动力;另一方面,本土资源禀赋带来的稀土成本优势,形成了全球稀土精炼企业与永磁生产企业向中国迁移的稀土永磁产能集聚。依靠资源禀赋的粗放开采式的工业发展,已经逐渐成为历史,中国在稀土产业发展的历史中已经收获了完整的产业链规模优势。中国的磁铁比欧洲制造的磁铁便宜20%~30%,但在附加值最高的钕铁硼永磁体制造企业中,中国主要头部磁材厂商,仍然很难完全摆脱日本日立金属的专利授权。中国仍需进一步将产业集聚的规模经济优势强化为技术壁垒优势。

目前发达国家普遍建立了稀土废料的回收体系,日本、德国和法国稀土回收技术比较成熟,代表企业有日本利泰姆株式会社、德国西门子公司、戴姆勒公司及法国罗地亚集团等。当前中国风电退役稀土永磁体回收市场规模较小,企业参与意愿较低;同时,相较于欧美日等发达国家,中国的稀土回收处理技术还有待提高。未来中国需要加强稀土回收政策激励,鼓励探索稀土永磁体器件回收商业模式,加快推动风电稀土回收技术研发和回收供应链的建设,以应对很快到来的风电稀土的大规模回收需求。在回收产业尚未成熟之际,则需要通过政府的力量做好退役稀土永磁体的回收储备工作,以待技术成熟时大量回收稀土资源。

2022年3月,青山集团在伦敦期货交易所,镍期货“套期保值”的操作中过度投机导致风险敞口过大,因现货库存交割标准不一,导致被提前持有大量镍现货库存的国际金融巨头恶意逼空。整个事件导致的伦敦交易所镍期货价格暴涨和暴跌,使得产业链上下游企业(包括汽车动力电池等行业)大规模处于半停滞状态,对整个产业链参与者造成了

伤害。在这个事件中,存在一类资本玩家:与传统大宗交易商靠差价的盈利模式不同,他们以生产商和交易商的双重身份打通产业链,通过产能和库存左右市场价格,拥有庞大物流存储网络和遍布全球的交易网络,通过金融衍生品套利实现交易盈利。

相比于大宗金属,稀土金属期货交易市场规模更小,更容易被操纵。中国在解决海外稀土供应补充的同时,应该同时对稀土金属元素进行战略储备,这不仅能作为市场短期价格工具,成为反制国际资本游猎中国稀土产业相关企业的一张挡箭牌,从中长期角度,也能为中国低碳能源产业发展带来的日益增长的稀土需求进行战略储备。

综上所述,中国稀土产业链在未来发展中,仍需要自主研发形成核心技术壁垒,建立健全稀土及永磁体回收技术与体系,建立科学有效应对国际金属期货交易市场的稀土战略收储体系等关键问题,以帮助中国从“稀土大国”真正走向“稀土强国”。

## 4 结论

“双碳”目标的实现需要降低化石能源的使用,转向使用新型可再生能源,而风能作为一种重要的可再生能源,其在“双碳”目标的驱动下将在各国的能源结构中占据越来越高的地位,也因此带来了稀土需求的快速增长。考虑到碳、能源、金属的关联关系,从既定政策和包含碳中和目标的可持续发展情景下,分析了全球10个国家和地区风电发展对稀土的需求量,探讨了风机材料技术进步、回收等措施对减轻稀土供应压力的作用,分析了中国稀土产业发展的优势与面临的问题,并为中国在“双碳”目标背景下稀土产业发展提供了战略层面的建议。

结果表明:在碳中和目标的驱动下,全球风电扩张的稀土需求约是既定政策下稀土需求的2倍,未来20年全球风电扩张将面临稀土供不应求的难题,尤其是Dy这一重稀土元素将面临格外严峻的供应压力;风机材料技术进步和稀土回收能够有效缓解稀土供应压力,风机材料技术进步能够降低13%左右的稀土需求,稀土回收能够覆盖全球风电扩张所需6%~10%左右的稀土需求,且稀土回收的

作用随着时间的推移逐渐扩大;在“双碳”目标背景下,风电的扩张可能使中国面临本土稀土供应不足的局面,同时国际社会对中国稀土永磁全产业链的依赖进一步加剧了中国稀土供应压力;随着澳大利亚稀土产量的提高和全球“探矿”热潮,世界稀土地缘供应格局也将发生变化。

面对全球风电的快速扩张与稀土供应压力的持续提高,中国应该充分利用稀土资源优势、市场优势和全产业链优势,在海外投资稀土矿山,进口海外稀土资源,推动钕铁硼磁体制造环节技术研发,充分利用“2种资源”“2个市场”,通过技术创新提高中国在稀土产业链的竞争力;并逐渐建设稀土逆向供应链,在保护本土稀土资源的同时稳固在国际稀土产业链中的话语权;建立稀土战略收储,为稀土产业链企业在国际资本市场中构想安全保障。稀土资源与产业优势的重要性,绝不仅仅体现在全球稀土贸易中的领先地位,更在于服务中国能源安全与能源转型,保障中国风电发展目标顺利实现。

### 参考文献(References)

- [1] Goldthau A, Westphal K, Bazilian M, et al. How the energy transition will reshape geopolitics[J]. *Nature*, 2019, 569(7754): 29–31.
- [2] Lee J, Zhao F. Global wind report 2021[R]. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council, 2021.
- [3] U.S. DoE. A new era for wind power in the United States (Wind Vision)[R]. Washington D. C.: US Department of Energy, 2015.
- [4] U.S. EIA. International energy outlook 2021[R]. Washington D. C.: U.S. Energy Information Administration, 2021.
- [5] Sovacool B K, Ali S H, Bazilian M, et al. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. *Science*, 2020, 367(6473): 30–34.
- [6] 汪鹏, 王翹楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属-低碳能源关联研究综述及其启示[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 669–681.
- [7] IEA. The role of critical minerals in clean energy transitions[R]. Paris: International Energy Agency, 2022.
- [8] Kalvig P, Machacek E. Examining the rare-earth elements (REE) supplydemand balance for future global wind power scenarios[J]. *GEUS Bulletin*, 2018, 41: 87–90.
- [9] Wang P, Chen L Y, Ge J P, et al. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113612.
- [10] Farina A, Anctil A. Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 176: 105938.
- [11] Imholte D D, Nguyen R T, Vedantam A, et al. An assessment of US rare earth availability for supporting US wind energy growth targets[J]. *Energy Policy*, 2018, 113: 294–305.
- [12] Li J S, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. *One Earth*, 2020, 3(1): 116–125.
- [13] IEA. World energy outlook 2021[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [14] IEA. World energy outlook 2015[R]. Paris: International Energy Agency, 2015.
- [15] GWEC. Global wind energy outlook 2016[R]. Belgium: Global Wind Energy Council, 2016.
- [16] IEA. Offshore wind outlook 2019[R]. Paris: International Energy Agency, 2019.
- [17] Fishman T, Graedel T E. Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(4): 332–338.
- [18] Nassar N T, Wilburn D R, Goonan T G, et al. Byproduct metal requirements for US wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 1209–1226.
- [19] Pavel C C, Lacial-Arategui R, Marmier A, et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines[J]. *Resources Policy*, 2017, 52: 349–357.
- [20] Eklund P, Sjölund J, Berg M, et al. Experimental evaluation of a rare earth-free permanent magnet generator [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(1): 3–10.
- [21] Dodd J. Rethinking the use of rare-earth elements[EB/OL]. [2022-05-31]. <https://www.windpowermonthly.com/article/1519221/rethinking-use-rare-earth-elements>.
- [22] Viebahn P, Soukup O, Samadi S, et al. Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 655–

- 671.
- [23] Alves Dias P, Bobba S, Carrara S, et al. The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility, an analysis of future supply/demand balances[R]. Luxembourg: Publication Office of the European Union, 2020.
- [24] Elshkaki A, Graedel T E. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 59: 260–273.
- [25] Lacał-Arúntegui R. Materials use in electricity generators in wind turbines—state-of-the-art and future specifications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 275–283.
- [26] Schulze R, Buchert M. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2016, 113: 12–27.
- [27] Venkatesan P, Vander Hoogerstraete T, et al. Selective electrochemical extraction of REEs from NdFeB magnet waste at room temperature[J]. *Green Chemistry*, 2018, 20(5): 1065–1073.
- [28] Liu B, Zhu N, Li Y, et al. Efficient recovery of rare earth elements from discarded NdFeB magnets[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 124: 317–325.
- [29] Lorenz T, Bertau M. Recycling of rare earth elements from FeNdB-Magnets via solid-state chlorination[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 131–143.
- [30] Roskill Information Services Ltd. Rare earths outlook to 2030[R]. London: Roskill Information Services Ltd., 2021.
- [31] Gielen D, Lyons M. Critical materials for the energy transition: Rare earth elements[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.
- [32] Fortier S M, Nassar N T, Ryker S J, et al. USGS critical minerals review[J]. *Mining Engineering*, 2021, 73(5): 32–47.
- [33] Hedrick J B. Mineral commodity summaries 2010[D/OL]. [2022-05-31]. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/rare-earth/mcs-2010-raree>.
- [34] Cordier D J. Mineral commodity summaries 2022[D/OL]. [2022-05-31]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-rare-earths>.
- [35] Nakano J. The geopolitics of critical minerals supply chains[R]. Washington D. C.: The Center for Strategic and International Studies, 2021.
- [36] U.S. DoE. Critical minerals and materials: U.S. department of energy's strategy to support domestic critical mineral and material supply chains[R]. Washington D. C.: U.S. Department of Energy, 2021.
- [37] European Commission. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study [R]. Luxembourg: European Commission, 2020.
- [38] Van Gosen B S, Verplanck P L, Seal R R, et al. Rare-earth elements[R]. Reston: U.S. Geological Survey, 2017.
- [39] Riddle M, Macal C M, Conzelmann G, et al. Global critical materials markets: An agent-based modeling approach[J]. *Resources Policy*, 2015, 45: 307–321.
- [40] Barakos G, Mischo H, Gutzmer J. A forward look into the US rare-earth industry: How potential mines can connect to the global REE market[J]. *Mining Engineering*, 2018, 70(8): 30–37.
- [41] Wang Q C, Wang P, Qiu Y, et al. Byproduct surplus: Lighting the depreciative Europium in China's rare earth boom[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(22): 14686–14693.
- [42] Gauß R, Burkhardt C, Carencotte F, et al. Rare earth magnets and motors: A European call for action[R]. Berlin: Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance, 2021.

## Analysis of rare earth demand for global wind power development under carbon neutrality

CHEN Liyang<sup>1</sup>, YANG Yuyao<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2,3,4</sup>, GUO Yongmei<sup>5</sup>, ZHAO Shen<sup>3,6</sup>, CHEN Lihua<sup>1</sup>, CHEN Weiqiang<sup>2,4\*</sup>

1. Guanghua School of Management, Peking University, Beijing 100871, China
2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Urban Environment and Health, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
3. Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
5. State Key Laboratory of Rare Earth Resources Research and Comprehensive Utilization in Bayan Obo, Baotou Rare Earth Research Institute, Baotou 014020, China
6. Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

**Abstract** To clarify the rare earth demand growth driven by global rapid expansion of wind power under carbon neutrality and make the rare earth resource strategic planning for wind power development, this paper intends to predict global 10 major countries and regions' rare earth demand for wind power development by 2040 through material flow analysis, studies the implications of technology progress and recycling on rare earth supply and demand structure, and explores the advantages and issues of China's rare earth industry under carbon neutrality. Our results show that: 1) carbon neutrality climate target will bring about a rapid expansion of global demand for rare earth elements, which is about twice that under the stated policies; 2) global wind power development will lead to severe rare earth supply pressure, and material technology progress and recycling will play important roles in alleviating this pressure; 3) China will still occupy a leading position in the global rare earth industry chain in the next 20 years, but face competition and challenges from global diversified rare earth suppliers, such as Australia, Myanmar, Vietnam, North America, etc. We propose that China should coordinate "two resources" and "two markets" at home and abroad, make full use of the advantages of rare earth processing industry agglomeration, strengthen technological competitiveness of high-performance magnet materials and their related industries, and accelerate the construction of rare earth permanent magnet recycling industrial chain.

**Keywords** rare earth; carbon neutrality; wind power development ●



(责任编辑 刘志远)