

# “双碳”目标下我国新能源行业关键金属供应分析

梁扬扬, 刘丽丽, 贺克斌, 黄斐, Moisés Gómez, 李金惠\*

(清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 风电、光伏发电等新能源行业是支撑实现“双碳”目标的关键领域, 我国风电、光伏发电的装机规模居世界首位, 保障关键金属材料供应、进行更精准的新兴固废管理具有重要意义。本文基于我国风电、光伏发电行业的历史数据和规划目标, 设定了不同的发展情景; 应用风电、光伏发电设备的寿命分布模型, 评估了我国新能源行业关键金属的需求、废弃和供应情况; 重点识别了银、铜、镓、银、钢铁、钕等金属的供应压力, 为2060年前构建绿色低碳能源发展格局提供了基础支撑。在基准情景下, 2035年的风电、光伏发电行业退役量分别为4.6 GW、28.3 GW; 2035年、2060年的风电、光伏发电设备退役量(按质量计)分别为 $2.54 \times 10^6$  t、 $1.048 \times 10^7$  t。从我国新能源行业的关键金属供应压力来看, 2030—2060年, 钢铁为低风险( $\leq 5\%$ ), 钕为中高风险(25%~50%), 铜、银为高风险(50%~100%), 镓、铟因需求峰值过高而被列为极度危险等级。改善新能源产业供应链的安全性和多样性, 既需要确保金属矿产资源的可持续供应, 也需要开展回收循环和高效利用; 为此建议将风电、光伏发电退役设备按照废弃电器电子产品进行管理, 将风电、光伏发电企业纳入《固定污染源排污许可分类管理名录》, 加快完善分布式新能源固废回收体系, 切实提高新兴固废回收技术水平。

**关键词:** 新兴固废; 风电设备; 光伏组件; 关键金属; 供应风险

**中图分类号:** X773 **文献标识码:** A

## Supply of Key Metals for China's New Energy Industries under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

Liang Yangyang, Liu Lili, He Kebin, Huang Fei, Moisés Gómez, Li Jinhui\*

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** New energy industries, such as wind and photovoltaic (PV) power generation, are key to supporting the carbon peaking and carbon neutrality goals of China. The installed capacity of wind and PV power in China is the largest worldwide; therefore, it is necessary to secure the supply of key metal materials and conduct a more accurate management of emerging solid wastes. This study sets different development scenarios based on the historical data and planning objectives of wind and PV power industries of China. It assesses the demand, waste, and supply of key metals in China's new energy industry using a life distribution model of wind and PV power generation equipment, and focuses on identifying the supply pressure of silver, copper, gallium, silver, steel, and neodymium, thereby providing a basic support for realizing the green and low-carbon development of the energy industry by 2060. In the baseline scenario, the decommissioned volume of the wind and PV power generation industries will reach 4.6 GW and 28.3 GW in 2035, respectively; and the total decommissioned volume (by mass) of both wind and PV power generation equipment will reach  $2.54 \times 10^6$  t

**收稿日期:** 2024-04-28; **修回日期:** 2024-05-29

**通讯作者:** \*李金惠, 清华大学环境学院教授, 研究方向为固体废物处置与资源化; E-mail: jinhui@tsinghua.edu.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“绿色低碳转型中废弃物循环利用问题研究”(2022-XZ-63)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and  $1.048 \times 10^7$  t in 2035 and 2060, respectively. In terms of the supply of key metals for the new energy industry during 2030–2060, iron and steel have a low supply risk ( $\leq 5\%$ ), neodymium has a medium-high supply risk (25%–50%), copper and silver have a high supply risk (50%–100%), and the supply of gallium and indium are at an extremely high risk owing to their excessive peak demand. To improve the security and diversity of the supply chain of the new energy industry, it is necessary to ensure the sustainable supply of metal mineral resources and promote material recycling and efficient use. Furthermore, we propose the following recommendations: (1) treating decommissioned equipment for wind and PV power generation as waste electrical and electronic products, (2) incorporating wind and PV power generation enterprises into the *Catalogue of Classified Management of Pollutant Discharge Permits for Stationary Pollution Sources*, (3) improving the distributed new-energy solid-waste recycling system, and (4) developing recycling technologies for emerging solid wastes.

**Keywords:** emerging solid waste; wind turbines; photovoltaic modules; key metal; supply risk

### 一、前言

随着碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标的提出，包括风电、光伏发电在内的新能源产业成为关键发展领域，在支撑能源结构调整方面发挥了重要作用。我国风电、光伏发电的装机规模连续多年居世界首位，2023年风电新增装机容量为75.9 GW、光伏发电新增装机容量为216.3 GW<sup>[1]</sup>，2050年的非化石能源消费占比将达85%<sup>[2]</sup>。风电机组、光伏组件的设计寿命通常分别为20年<sup>[3]</sup>、25年<sup>[4]</sup>，国内在役的风电机组、光伏电站普遍没有达到设计使用寿命，批量退役的情况尚未发生。风电机组、光伏电站的退役条件也受到政策影响，如多地发布地方性政策，推进“以大代小”项目<sup>[5]</sup>，鼓励并网运行超过15年、单台机组容量 $<1.5$  MW的风电场开展改造升级。

新能源产业发展与金属资源密切相关，如风力发电机使用的铜、钕等金属，光伏电池板使用的铟、镓等金属。面对绿色低碳转型的紧迫要求，通过多种途径保障清洁能源供应链、战略性矿产资源的安全已成为国际共识<sup>[6,7]</sup>，如美国确定了关键矿物及其他战略材料（包括稀土元素）供应链中的风险源，欧盟《关键原材料法案》（2024年）提出了确保安全和可持续的关键原材料供应目标<sup>[8,9]</sup>。

针对新能源领域材料需求和废弃量的研究主要涉及大宗材料、稀土材料<sup>[10]</sup>。风电机组的塔架和地基大量使用钢铁和混凝土<sup>[11]</sup>，仅到2018年我国风电行业累计材料用量即达到 $1.722 \times 10^8$  t（混凝土占75.9%、钢铁占17.9%）<sup>[12]</sup>。对于稀土金属，2010年的国外评估表明<sup>[13]</sup>，清洁能源设施约占世界关键材料消费量的20%，风电机组、光伏电站等使用的材料在短期内有供应中断的风险。到2030年，世界退役光伏组件的累计质量将为 $8 \times 10^6$  t；到2050年，世界退役光伏组件的累计质量将为 $8 \times 10^7$  t<sup>[14]</sup>，超过电子

废物总质量的10%<sup>[15]</sup>。在我国，2050年光伏发电行业累计需求金属的预计值<sup>[16]</sup>为：钢， $1.414 \times 10^8 \sim 1.867 \times 10^8$  t；铝， $7.23 \times 10^7 \sim 9.54 \times 10^7$  t；铜， $1.32 \times 10^7 \sim 1.74 \times 10^7$  t；相应需求量是2018年的17.3~22.8倍。

资源的供应风险源自不同的约束，如资源的地质可用性、资源的地缘政策可用性等<sup>[17]</sup>。在资源的地质可用性方面，通常将金属需求量同已查明的金属储量或储量基础进行对比<sup>[16,18]</sup>，分为静态储量（静态方法）、动态储量（动态方法）<sup>[19]</sup>：前者按照公平分配原则定义地区材料消耗限制，如根据人口占比或国内生产总值占比<sup>[20]</sup>进行分配；后者进一步考虑目前处于闲置状态的次经济储备（鉴于采矿技术的改进和市场压力的驱动，相应储量在未来可能具有经济吸引力和可运营性）。在资源的地缘政策可用性方面，主要关注与地理相关的政策障碍对有关资源供应和可得性的影响<sup>[21,22]</sup>。

循环利用是提高金属安全供应水平、减少采矿影响的重要方式<sup>[23]</sup>。评估我国新能源产业的关键金属需求、废弃和供应情况，识别安全保供面临的压力，对2060年前实现能源绿色低碳转型具有重要意义。在此背景下，尽管单一类型可再生能源技术相关的研究众多，而面向我国新能源行业整体的直接研究依然匮乏。

本文聚焦我国新能源行业中长期发展的金属供应安全问题，对风电、光伏发电行业退役设备产生和关键金属供应情况进行研究。基于行业历史数据、不同情景下行业发展预测结果，结合发电设备寿命分布模型，测算风电、光伏发电设备退役量；采用物质流模型和供应压力评估方法，分析新能源行业新兴固废关键金属供应情况，重点关注风电行业的钢铁、铜、钕，光伏发电行业的银、铜、镓等关键金属；立足评估结果和管理现状，进一步提出我国新兴固废管理发展建议。

## 二、研究方法情景设置

### (一) 研究方法

#### 1. 风电、光伏发电设备退役量计算

以我国风电、光伏发电的历史装机容量（见图1）为基础<sup>[1]</sup>，结合我国相关产业发展规划，科学设置未来装机情景；再考虑风电机组、光伏电站的退役情况，对2022—2060年的风电、光伏发电退役设备量进行计算。

目前研究中将光伏组件的退役情况分为3类：故障原因报废、经济动因报废、正常老化报废。风电机组的可靠性和发电效率随着服役年限的增长而衰减，服役15~20年后面临寿命到期问题<sup>[24]</sup>，其退役也受到政策、市场、技术水平等因素的影响；本研究暂不考虑因政策因素导致的设备更换情况。针对一般的故障或老化情况，Weibull分布模型<sup>[25,26]</sup>被视为评估风电机组、光伏组件等设备退役的最佳模型；通过连续型随机变量的分布描述，定义产品的使用时间，据此预测产品在未来的使用寿命；风电机组、光伏组件的相关计算参数引用文献<sup>[25,26]</sup>数据。

#### 2. 关键金属供应分析

基于“自上而下”的物质流模型<sup>[27]</sup>，估算了我国风电和光伏发电的装机容量、使用存量、废弃量以及其中的关键金属物质流。物质流平衡主要采用

存量流量模型，针对特定物质（如金属、塑料等），在代谢过程中建立从产品到废弃物转化过程中的关联变化，分析相应物质质量平衡情况。

评估风电机组、光伏组件中关键金属的供应压力，有助于把握我国风电、光伏发电等细分行业面临的金属供应态势。供应压力可基于储量或产量，本研究采用国内产量，相关公式引自文献<sup>[16,28]</sup>，相应等级划分如表1所示。

风电机组的主要零部件有叶轮、轮毂、低速轴、高速轴、齿轮箱以及二次安装的机械刹车、发电机、液压系统、冷却系统、偏航系统、风速仪、风向标等，还包括整机装配环节的风力机塔筒、电缆、钢筋、混凝土等。典型风电机组的零部件及材料构成如表2所示<sup>[29]</sup>，混凝土材料的占比最高，钢铁等金属的占比次之，树脂材料也占有一定的比

表1 关键金属供应压力和风险等级

供应压力	≤5%	5%~25%	25%~50%	50%~100%	≥100%
风险等级	低风险	中低风险	中高风险	高风险	极度危险

表2 典型风电机组的零部件及材料构成

主部件	子部件	总质量/t	材料	质量/t
叶轮	叶片（3片）	19.5	树脂	11.7
			玻璃纤维	7.8
	叶片轮毂	14	铸铁	14
	桨距变化支承	0.31	玻璃纤维	0.124
			树脂	0.186
基础	地基	725	混凝土	700
			铁	25
塔筒	基础环	15	钢铁	15
			塔筒（3节）	143
机舱	机舱外壳	10.5	铁	10.5
			主轴	6.1
	变压器	5	硅	0.149
			铜	1.5
			钢铁	3.3
发电机	6.5	硅	0.195	
		铜	2	
齿轮箱	16	钢铁	4.29	
		铁	8	
机舱罩	2	钢铁	8	
		玻璃纤维	0.8	
			树脂	1.2

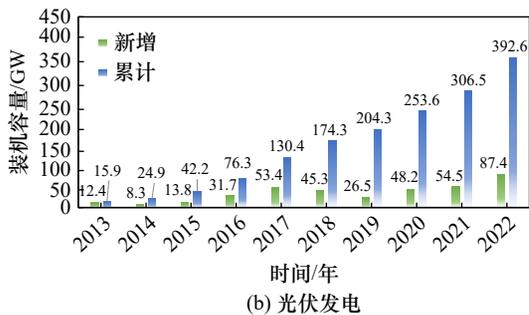
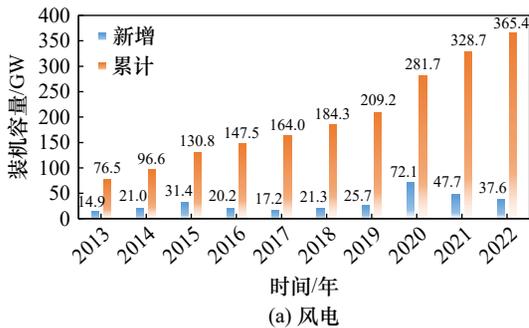


图1 我国风电、光伏发电的历史装机容量

重。风力发电机主要有直接驱动（使用同步发电机的电励磁或高含量永磁体）、齿轮箱驱动（使用电磁铁或低份额永磁发电机）两种技术路线<sup>[30]</sup>；基于高温超导体的直接驱动处于早期研究阶段，故本研究暂不考虑。关键金属主要指钢铁、铜、发电机中的稀土金属钕（见表3）。

光伏组件是光伏电站的基本单元，主要由电池和电池组件（含框架、逆变器、输电线路）组成。主流的光伏技术路线有：晶体硅（c-Si，细分为多晶硅（mc-Si）、单晶硅（sc-Si））、薄膜（细分为非晶硅（a-Si）、铜铟镓硒化物（CIGS）、碲化镉（CdTe））。c-Si 电池称为第一代太阳能电池，占世界累计装机容量的85%以上，占2020年世界新增装机容量的95%<sup>[31]</sup>；其余市场主要是称为第二代太阳能电池的薄膜电池。不同技术类型使用的金属差异较大，本研究重点关注晶体硅和薄膜电池<sup>[27]</sup>，不考虑正在发展中的第三代太阳能电池；聚焦铜、银、镓、铟4种金属的光伏发电行业需求及废弃情况（见表3）。

## （二）情景设置

### 1. 未来风电和光伏发电装机情景

我国风电新增、累计装机容量分别在2009年、2010年升至世界首位，随后保持至今。我国风电行业先后经历3轮高速发展期，国家能源局发布的统计数据表明，截至2022年年底的风电累计装机容量约为370 GW。在光伏发电方面，2013—2022年我国累计装机容量由15.9 GW增长至392.6 GW，年均增长率约为45%（见图1）；尤其是2022年，受政策利好驱动，新增装机容量为87.4 GW，达到历史

高位。大力发展新能源、加快建设风电和光伏发电基地是我国碳达峰行动的规划任务<sup>[38]</sup>，这表明从中长期看，“双碳”目标下风电、光伏发电行业仍有较大的发展空间。

本研究参考国家发展和改革委员会的相关数据、中国能源转型展望相关报告<sup>[39]</sup>，设置了风电和光伏发电行业未来装机的基准情景、碳中和情景。在基准情景下，“十三五”规划纲要、《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》等政策全面实施，我国为世界2℃温度控制目标作出积极贡献，在2070年左右实现碳中和；在碳中和情景下，对照2030年前碳排放达峰、2060年前排放碳中的目标，确定新能源装机容量。为此，在基准情景下，2030年将安装707 GW的风电机组、880 GW的光伏电站，2060年将安装2500 GW的风电机组、3070 GW的光伏电站；在碳中和情景下，2030年的风电、光伏发电累计装机容量分别为760 GW、890 GW，2060年的风电、光伏发电累计装机容量分别增加到3300 GW、3845 GW。Logistic 增长模型可以较好拟合风电、光伏发电行业发展动态，由最初的逐渐增长到快速增长再到达到碳中和目标后的平衡状态<sup>[28]</sup>；两种情景下的风电、光伏发电装机容量模拟结果如图2所示。

### 2. 技术情景

风电、光伏发电相关技术路线的市场份额，是决定新能源行业未来金属需求、最终实现新能源装机情景的主要因素之一。在研究过程中，材料含量采用恒定情景，即假设所有风电、光伏发电设备中的材料含量恒定，金属需求量变化主要根据政策情景、技术情景的变化进行分析。

随着技术进步，风力发动机的叶轮尺寸不断增

表3 风电机组、光伏组件中的金属含量数据

类别	技术	金属	含量/(kg·MW <sup>-1</sup> )
风电机组 <sup>[31]</sup>	直接驱动	钕	175.5
	齿轮箱驱动	钕	32.4
光伏组件 <sup>[32-37]</sup>	c-Si	银	15
		铜	884
	a-Si	银	47
		铜	804
	CIGS	铜	92
		铟	15.5
		镓	4
	CdTe	铜	5181
铟		7.95	

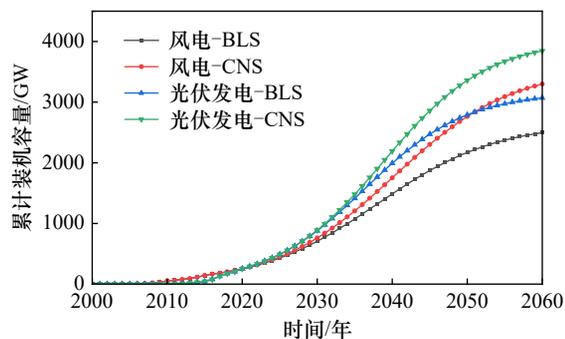


图2 不同情景下我国风电和光伏发电的累计装机容量模拟  
注：BLS表示基准情景；CNS表示碳中和情景。

大，具有更高的塔架和更长的叶片，以捕获和转换更多的风能<sup>[12]</sup>。2007年以来，1.5 MW 风电机组成为陆上装机的主流机型，2015年后2 MW 机组开始主导陆上市场<sup>[40]</sup>，2022年新增陆上主流机型普遍为4~5 MW<sup>[41]</sup>。2021年，陆上机组以2~4 MW 为主，对应占比为陆上装机量的80%以上；海上机组以5~7 MW 为主，对应占比为海上装机量的68%以上。依据未来风电行业发展趋势<sup>[42]</sup>，设定相应市场份额（见表4），反映未来陆上和海上不同规格风电机组的占比以及金属材料用量的差异<sup>[11]</sup>。

当前，c-Si、a-Si、CIGS、CdTe是4种代表性的光伏技术，但未来光伏技术发展走向依然具有不确定性。针对我国光伏市场设定了3种技术情景：基准情景、高晶硅情景（c-Si、a-Si 占比较高）、低晶硅情景（CIGS、CdTe 占比较高）。在不同的情景下，各类技术路线的市场份额不同（见表5）；所有情景均假设市场份额呈线性变化<sup>[28]</sup>。

### 三、我国新能源行业关键金属供应分析

#### （一）风电、光伏发电设备退役情况

基于我国风电、光伏发电装机量的历史数据、未来情景设置、Weibull分布模型结果，测算了风电、光伏发电设备的退役情况（见图3）。在风电行业，2025年的退役量为10.9 GW；2035年的基准情景、碳中和情景退役量分别为28.3 GW、30.7 GW；2060年

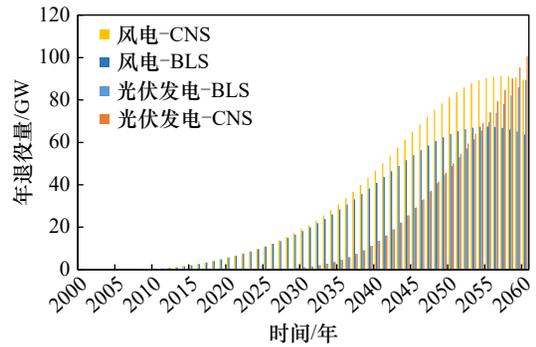


图3 我国风电、光伏发电设备的退役量

的基准情景、碳中和情景退役量分别为63.7 GW、89.6 GW，年退役量趋于平稳。在光伏发电行业，2025年开始退役（0.16 GW），2030年为1.1 GW，基准情景、碳中和情景的退役量差异较小；2035年（4.6 GW）后开始大规模退役并持续快速增长，2060年的基准情景、碳中和情景退役量分别为89.5 GW、100.6 GW。2035年、2060年的风电和光伏发电合计退役量将分别为 $2.54 \times 10^6$  t、 $1.048 \times 10^7$  t（不含风力机塔筒和地基）。

#### （二）关键金属需求

结合我国风电、光伏发电设备的装机容量、使用寿命以及不同技术路线的金属使用情况，完成未来我国新能源行业金属需求和退役情况分析（见图4、图5）。

在风电行业，不同技术路线发展情景对金属的

表4 不同类型风电机组的市场份额

(单位: %)

应用场景	2021年	2060年		
	基准情景	中等情景 (MO)	高海上情景 (HO)	低海上情景 (LO)
陆上风电	74.1	40	49	29.5
海上风电	25.9	60	50	70.5

表5 不同类型光伏组件的市场份额

(单位: %)

技术路线	2021年	2060年		
	基准情景	中等情景 (MSi)	高晶硅情景 (HSi)	低晶硅情景 (LSi)
c-Si	92.4	50	48.3	16.7
a-Si	0.5	16.7	28.3	16.7
CIGS	1.4	16.7	11.7	50
CdTe	5.3	16.7	11.7	16.7

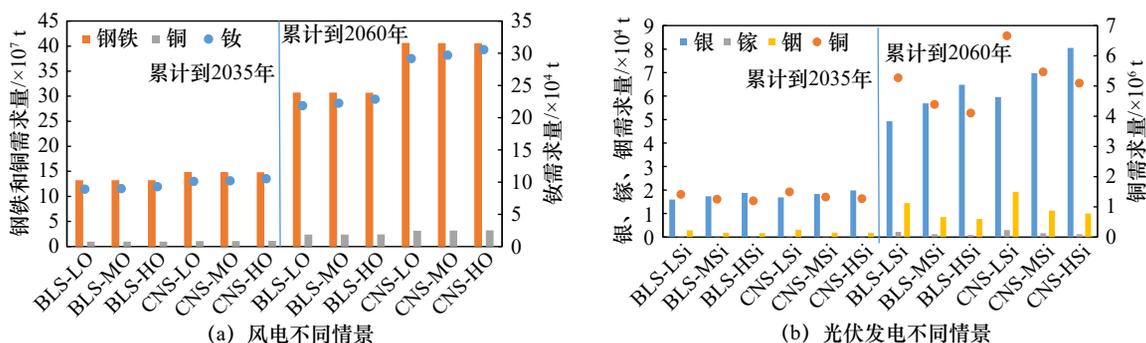


图4 各类方案与主要子技术的风电设备和光伏组件所需金属

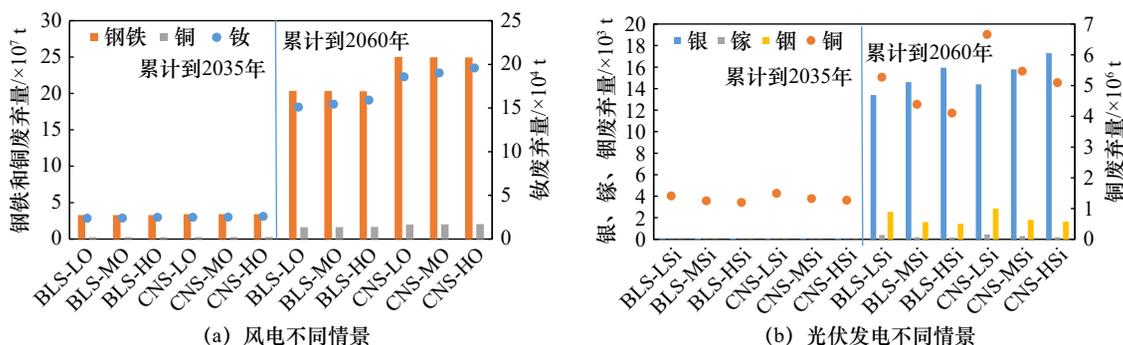


图5 各类方案与主要子技术的退役风电设备和光伏组件中的金属

需求差异较小，HO、LO情景下海上风电机组的钕需求量仅相差4%左右。2060年，退役风电机组中的金属高于在使用库存中的金属，这表明报废组件将在2060年达到高峰；风电机组的钕累计需求量将超过 $2.2 \times 10^5$  t。2035年的退役风电机组已有一定的规模，退役设备中的金属存量为整体需求量的23%~27%；碳中和情景相较于基准情景需要更多的金属，如钕在两种发展情景下的需求量分别为 $1.01 \times 10^5$  t、 $8.9 \times 10^4$  t。

在光伏行业，从2035年所需金属和报废组件中的金属积累情况可见，不同装机情景下的金属需求量差异较小，如基准情景、碳中和情景的银需求量分别为 $1.7 \times 10^4$  t、 $1.8 \times 10^4$  t，铜需求量分别为 $1.249 \times 10^6$  t、 $1.323 \times 10^6$  t。不同技术情景对特定金属的需求量差异较大，以基准情景为例，LSi的镓（437 t）、钢（2850 t）需求量均高于His值（200 t、1630 t）。2060年，光伏发电退役设备中的金属存量为整体需求量的17%~26%，累计的镓、钢需求量分别为1200 t、8500 t。2035年，光伏组件退役量并不大，废弃量的相应占比仅为0.3%左右；退役设备中的

金属低于在使用库存中的金属，也表明2035年并非退役的高峰期，随后退役量才呈上升趋势。

### （三）关键金属供应压力分析

在测算关键金属的报废和库存情况外，还需要分析我国关键金属生产对新能源产业发展的保障情况。

在风电行业，金属的供应压力在2032—2045年达到较高水平，2040年达到峰值（见图6）。在碳中和情景下，钢铁供应压力不大（3%左右）。钢铁被列为低风险，这是因为年供应量小于国内钢铁产量的5%。基准情景、碳中和情景下的铜供应压力在2030年后均保持在较高水平，如2035年的对应值分别为45%、58%，2060年的供应压力峰值为67%。风电机组产能增长在铜供应上面临大的供应压力，主要是因为我国铜资源储量不足（2022年为 $2.6 \times 10^7$  t，仅占全球总储量的3%），铜矿原料依赖进口<sup>[43,44]</sup>。属于稀土金属的钕，2021—2060年的供应风险为14%~50%，处于中高风险等级。

在光伏发电行业，光伏组件产能增长可能面临较

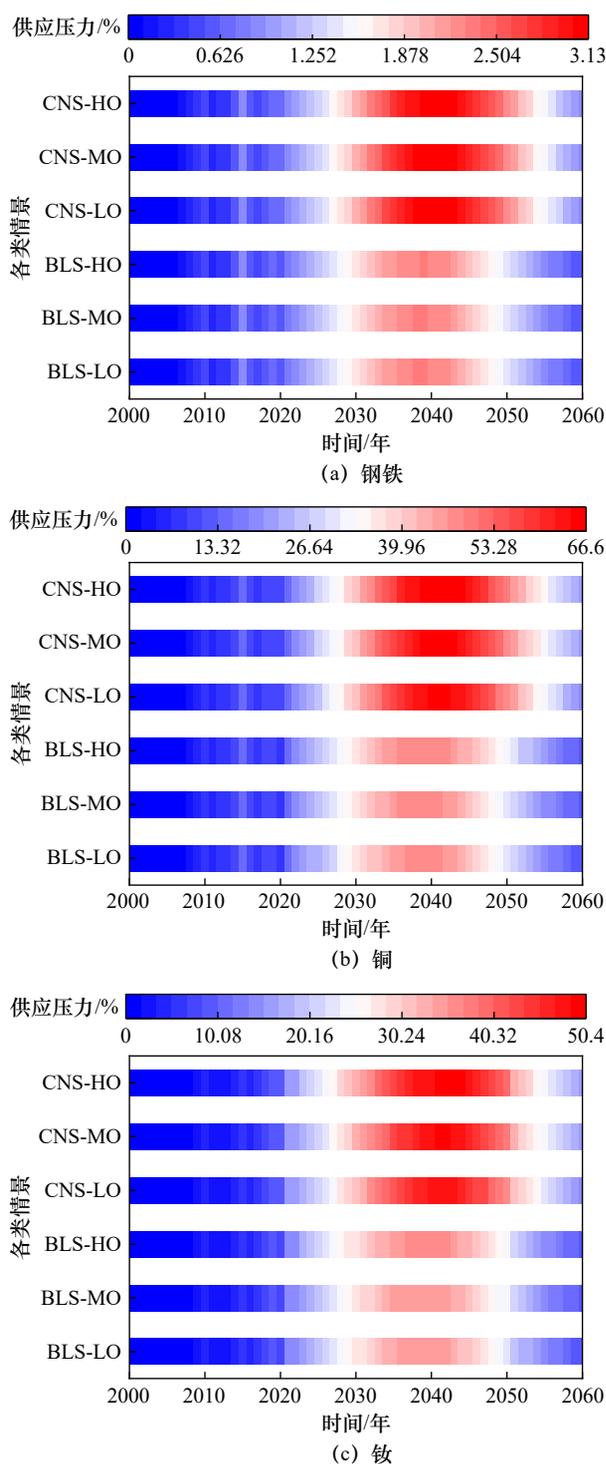


图6 风电行业关键金属供应压力

大的关键金属供应压力，相应压力在2030—2060年处于较高水平，2040年左右达到峰值（见图7）。2021年，铜的供应压力为2%，银的供应压力为16%，镓的供应压力超过国内产能，铟的供应压力为4%~5%。2035年，铜的供应压力为7%~11%，银的供应

压力为45%~67%，镓的需求量远超国内产能，铟的供应压力为41%~88%。2035—2060年，铜被列为中低风险（5%~25%），银被列为高风险（50%~100%），需求量超过国内产能的镓、铟被列为极度危险（3722%、135%）。薄膜电池中的CIGS、CdTe生产需要金属，LSi下金属供应压力明显增大。

表6给出了我国新能源行业的关键金属累计需求和相应金属储量的对比<sup>[45-47]</sup>。2035年，基准情景下我国新能源行业的银、铜、铟需求量分别为 $1.7 \times 10^4$  t、 $1.104 \times 10^7$  t、2000 t，分别达到探明储量的41%、42%、25%左右；钕需求量为 $9 \times 10^4$  t，已超过我国探明金属储量。镓需求量虽然占我国镓储量比例较低，但由于镓主要作为铝土矿加工的副产品和锌加工的残渣生产，而铝土矿、锌资源中只有不到10%的镓是可回收的，故镓的市场供应同样面临极高的风险。这些金属都需要从城市矿产中进行回收以保障稳定供应。

#### (四) 回收体系金属循环供应

在风电、光伏发电设备的应用过程中，产业加快升级、技术更新换代，设备退役高峰将提前到来，风力机叶片、光伏组件等废弃物的回收和循环利用获得更多的关注。我国部分战略性金属资源的对外依存度居高不下，为了确保长期稳定供应，除了构建自主可控的全球矿产资源供应体系，还需加强战略性金属资源的回收再利用。目前是我国新能源行业新兴固废回收处理体系的建设初期，回收再利用体系不健全，尚处于回收示范产线建设阶段。已有企业开始探索风电和光伏发电退役设备的回收处理技术，但回收利用专业化水平不高、商业模式也不成熟，亟需建立全过程监管的回收体系。参考相关研究中的金属回收率<sup>[17]</sup>，以风电设备中的钕为例，完成不同回收情景下的供应压力分析。

设定钕的低、中、高回收水平3种情景，对应的回收率设定为40%、60%、80%。回收风电退役设备中的钕，作为新能源设备中相应需求的补充，计算得到不同情景下钕的供应压力（见图8）。2025—2050年，在回收风电退役设备中的钕后，低回收水平情景下钕的供应压力为12%~29%，显著低于未进行回收情景；在不同回收水平情景下，2050年后回收的钕均可满足需求量；在高回收水平情景下，2050年的原生钕供应仅占需求量的0.3%。

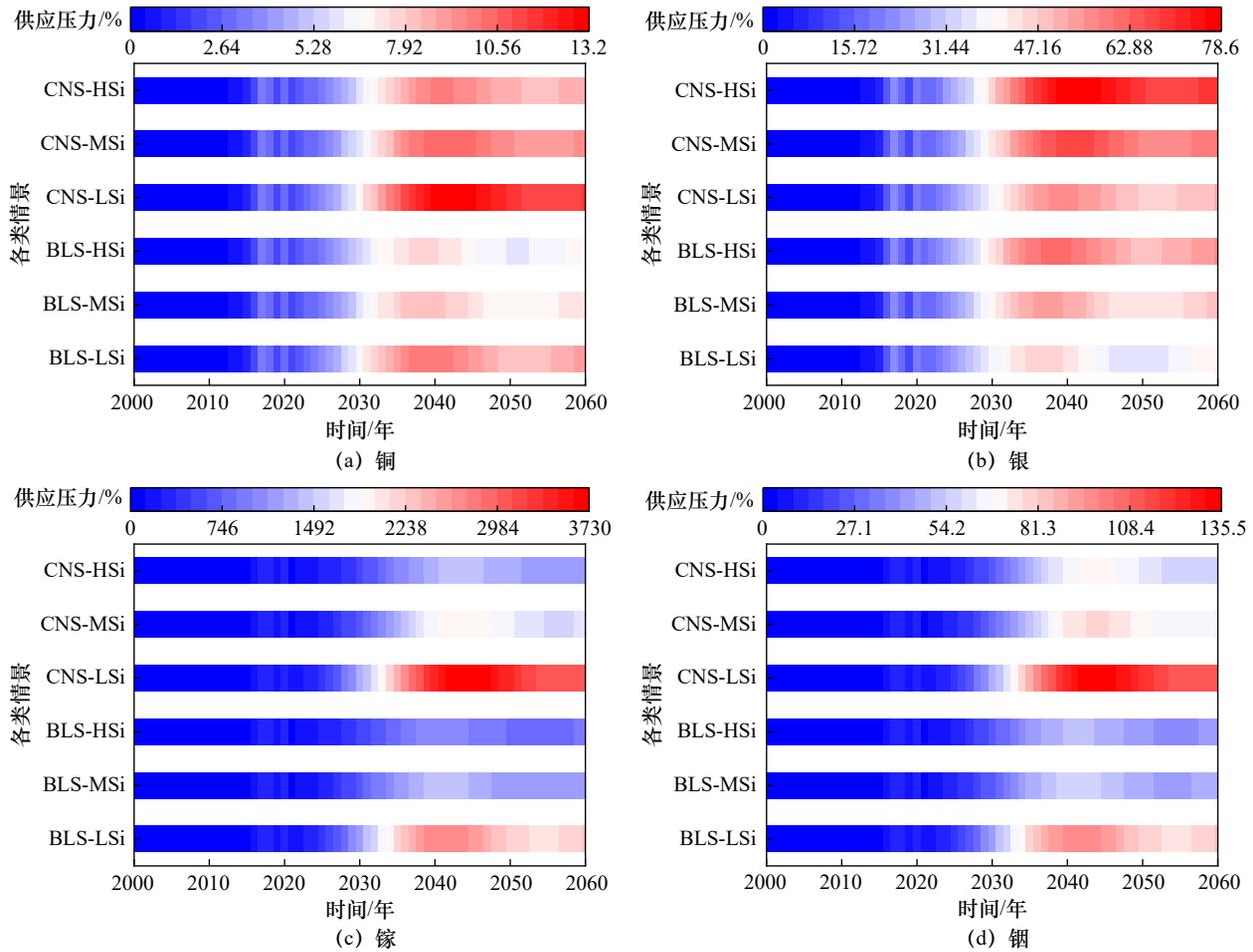


图7 光伏发电行业关键金属供应压力

表6 我国新能源行业金属需求与金属储量<sup>[45-47]</sup>

(单位:  $\times 10^4$  t)

项目	银	铜	镓	钢	钢铁	钨
2035年累计需求量(基准情景)	1.7	1104.4	0.01	0.2	13 221	9
我国金属储量	4.1	2600	29.5	0.8	1 624 600	6.7

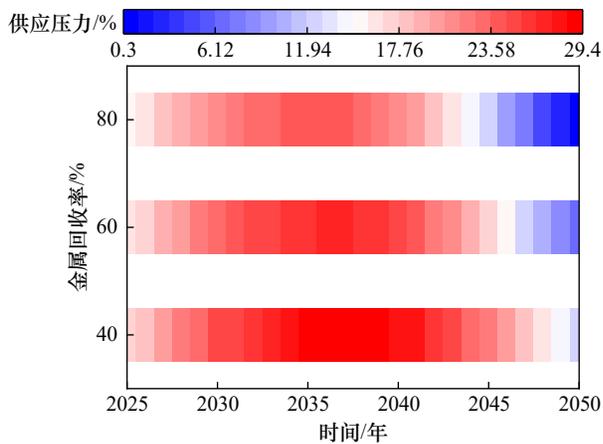


图8 不同回收水平情景下风电行业钨的供应压力

## 四、研究结论与应对建议

### (一) 研究结论

我国风电、光伏发电设备将迎来退役高峰期, 2035年、2060年的合计退役量将分别为 $2.54 \times 10^6$  t、 $1.048 \times 10^7$  t (不含风力机塔筒和地基)。对于风电行业, 基准情景下的2025年、2035年退役量分别为10.9 GW、28.3 GW, 2030—2050年退役量较大但之后基本平稳, 2060年退役量为63.7 GW; 2060年, 碳中和情景的退役量较基准情景提高41%。对于光伏发电行业, 2025年开始逐步退役, 基准情景下的

2035 年退役量为 4.6 GW，随后退役量持续快速增长，2060 年的退役量为 89.5 GW；2060 年，碳中和情景的退役量较基准情景提高 12%。

我国关键金属供应将制约新能源行业发展。基准情景下风电和光伏发电行业 2035 年的银、铜、镓、铟、钕、钢铁累计需求量分别为  $1.7 \times 10^4$  t、 $1.104 \times 10^7$  t、300 t、2000 t、 $9 \times 10^4$  t、 $1.322 \times 10^8$  t，2060 年的累计金属需求量将为 2035 年的 2.3~4.8 倍；碳中和情景下的金属需求量比基准情景增长 6%~12%。在风电、光伏发电行业发展过程中（2030—2060 年），从关键金属供应的角度看，钢铁为低风险等级，钕为中高风险等级，铜、银为高风险等级，镓、铟为极度危险等级。

我国新能源产业发展需要大量的关键金属，部分金属矿产资源依赖进口，增加了供应链风险。改善新能源产业供应链的安全性和多样性，既需要确保金属矿产资源的可持续供应，也需要开展回收循环和高效利用。以钕为例，不同回收水平情景下的供应压力从最高的 50% 下降到 29%；2050 年后，不同回收水平情景下退役设备中的金属回收量可逐步覆盖新能源设备的金属需求量。构建新能源固废回收体系至关重要，将是保障我国关键金属供应的重要路径。

## （二）应对建议

将风电、光伏发电退役设备按照废弃电器电子产品进行管理。明确风电、光伏发电退役设备的固废属性并纳入《废弃电器电子产品处理目录》，参照《废弃电器电子产品回收处理管理条例》（2019 年）相关规定对回收处理企业进行管理。探索生产者责任延伸制度在新能源行业固废回收领域的适用性，依据风电、光伏发电退役设备与其他电子产品的差异性，开展专门研究，制定单独的技术指南和实施细则。基于政策引导，在具备条件的地区试点跨区域或行业联合体模式，探索新能源行业固废与一般工业固废、电子废物处理基础设施的共建/共享。

将风电、光伏发电企业纳入《固定污染源排污许可分类管理名录》。对运维、天气灾害、项目技术改进过程中产生的风电、光伏发电废弃设备，按照《排污许可管理条例》等规章进行管理。采用登记管理方式，由发电企业在“全国排污许可证管理信息平台”上填报维修、技术改进、退役等产生的

废旧设备去向信息。

加快完善分布式新能源固废回收体系。结合现有的生活垃圾分类和再生资源回收体系，布局分布式光伏发电退役设备回收体系；支持重点地区建立新能源退役设备循环利用产业集聚区，其位置选取需考虑新能源设备的报废规模和集中度。基于新能源设备分布和报废预测模型，预估新能源设备报废的时间和空间分布，据此优化回收中心布局、降低回收成本。建立全国及区域新能源行业固废回收利用信息管理平台，汇集包括设备更新、改造、延寿、退役在内的动态信息；开展退役设备和材料产生量的监测、统计及预测，溯源并监管回收产品流向，确保规范化回收利用处理，防止二次污染。

切实提高新兴固废回收技术水平。设置风电、光伏发电退役设备的循环利用技术研发项目，加强科技支撑。在新能源产业链上游，联合原材料生产加工企业、设计和研究机构等，推进易拆解、可替换设备，可回收、可降解材料等的研发、设计和推广。关注新能源设备的金属材料使用强度，探索减少使用金属的技术方法，在不降低性能的条件下由一种元素或材料代替另一种元素或材料以降低供应风险。在风电、光伏发电退役设备回收设施方面，兼顾开发集中式、移动式设备，重点解决玻璃纤维与大体量碳基材的同步高值化利用、偏远地区退役设备回收运输等问题。加快风电机组再制造、叶片再生纤维/粉末的高值化应用研究，突破退役光伏组件的光伏玻璃高值化利用、硅材料循环利用等技术。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** April 28, 2024; **Revised date:** May 29, 2024

**Corresponding author:** Li Jinhui is a professor from the School of Environment, Tsinghua University. His major research field is solid waste disposal and recycling. E-mail: jinhui@tsinghua.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on Waste Recycling in the Green and Low Carbon Transition” (2022-XZ-63)

### 参考文献

- [1] 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2024-01-18)[2024-05-22]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202401/content\\_6928723.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202401/content_6928723.htm).  
National Energy Administration releases national power industry statistics for 2023 [EB/OL]. (2024-01-18)[2024-05-22]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202401/content\\_6928723.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202401/content_6928723.htm).

- [2] 项目综合报告编写组.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11):1-25.  
Project Synthesis Report Writing Team. Synthesis report on *China's long-term low-carbon development strategy and transition path* [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(11):1-25.
- [3] Cong N, Song Y, Zhang M, et al. Life cycle assessment of carbon reduction potential of EoL wind turbine blades disposal scenarios in China [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 100: 107072.
- [4] Huang W H, Shin W J, Wang L D, et al. Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules [J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 22-31.
- [5] 国家能源局关于印发《风电场改造升级和退役管理办法》的通知[EB/OL]. [2023-04-15]. [https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue\\_10626/202308/content\\_6897055.htm](https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10626/202308/content_6897055.htm).  
National Energy Administration on the issuance of *Measures for the management of wind farm upgrading and decommissioning* [EB/OL]. [2023-04-15]. [https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue\\_10626/202308/content\\_6897055.htm](https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10626/202308/content_6897055.htm).
- [6] Tong Y D, Huynh T D X, Khong T D. Understanding the role of informal sector for sustainable development of municipal solid waste management system: A case study in Vietnam [J]. *Waste Management*, 2021, 124: 118-127.
- [7] 霍文敏, 陈甲斌, 聂宾汗. 美国关键性矿产战略与政策演进研究——对我国矿产资源保供的启示[J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(9): 40-46.  
Huo W M, Chen J B, Nie B H. Research on the evolution of critical mineral strategies and policies in the United States—Enlightenment on China's mineral resources security [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2023, 36(9): 40-46.
- [8] 刘刚, 刘立涛, 欧阳铎, 等. 绿色低碳转型背景下关键金属循环利用战略与对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1566-1576.  
Liu G, Liu L T, Ouyang X, et al. Recycling of critical metals in green and low-carbon transition: Strategies and countermeasures [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(11): 1566-1576.
- [9] The European critical raw materials act: A quick summary on what it does and when it's coming [EB/OL]. (2023-09-08)[2024-04-15]. <https://riskandcompliance.freshfields.com/post/102in5d/the-european-critical-raw-materials-act-a-quick-summary-on-what-it-does-and-when>.
- [10] Fishman T, Graedel T E. Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 332-338.
- [11] Majewski P, Florin N, Jit J, et al. End-of-life policy considerations for wind turbine blades [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 164: 112538.
- [12] Yang J H, Zhang L X, Chang Y, et al. Understanding the material efficiency of the wind power sector in China: A spatial-temporal assessment [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155: 104668.
- [13] U. S. Department of Energy critical materials strategy [EB/OL]. (2010-12-01)[2024-04-15]. <https://www.osti.gov/biblio/1000846>.
- [14] Weckend S, Wade A, Heath G. End-of-life management: Solar photovoltaic panels [R]. Paris: International Energy Agency, 2016.
- [15] The global e-waste monitor—2017 [EB/OL]. [2024-04-15]. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Toolbox/Global-E-waste-Monitor-2017.aspx>.
- [16] Ren K P, Tang X, Höök M. Evaluating metal constraints for photovoltaics: Perspectives from China's PV development [J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116148.
- [17] Zhang L G, Chen Z Y, Yang C Y, et al. Global supply risk assessment of the metals used in clean energy technologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331: 129602.
- [18] Habib K, Wenzel H. Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective—using the case of direct-drive wind turbines [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 3852-3863.
- [19] Shammugam S, Gervais E, Schlegl T, et al. Raw metal needs and supply risks for the development of wind energy in Germany until 2050 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 221: 738-752.
- [20] Viebahn P, Soukup O, Sama di 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.
- [21] Zhou Y J, Li J W, Rechberger H, et al. Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121599.
- [22] Yuan P F, Li D, Feng K S, et al. Assessing the supply risks of critical metals in China's low-carbon energy transition [J]. *Global Environmental Change*, 2024, 86: 102825.
- [23] Ciacci L, Vassura I, Cao Z, et al. Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 143-152.
- [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] Faulstich S, Berkhout V, Mayer J, et al. Modelling the failure behaviour of wind turbines [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 749: 012019.
- [26] The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential [EB/OL]. [2024-04-15]. [https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM\\_2020\\_def.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf).
- [27] Elshkaki A, Shen L. Energy-material nexus: The impacts of national and international energy scenarios on critical metals use in China up to 2050 and their global implications [J]. *Energy*, 2019, 180: 903-917.
- [28] Gómez M, Xu G C, Li Y, et al. Navigating the future: China's photovoltaic roadmap challenges [J]. *Science Bulletin*, 2023, 68(21): 2491-2494.
- [29] Martínez E, Sanz F, Pellegrini S, et al. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(3): 667-673.
- [30] Månberger A, Stenqvist B. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development [J]. *Energy Policy*, 2018, 119: 226-241.
- [31] 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.
- [32] Alves D P, Pavel C, Plazzotta B, et al. Raw materials demand for

- wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system [M]. Brussels: Publications Office of the European Union, 2020.
- [33] Allouhi A, Rehman S, Buker M S, et al. Up-to-date literature review on Solar PV systems: Technology progress, market status and R&D [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132339.
- [34] Gervais E, Shammugam S, Friedrich L, et al. Raw material needs for the large-scale deployment of photovoltaics—Effects of innovation-driven roadmaps on material constraints until 2050 [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110589.
- [35] International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV): Results 2019 including maturity report 2020 [EB/OL]. [2024-04-15]. [https://kosen.kr/file/down/FILE\\_00000000050993/1](https://kosen.kr/file/down/FILE_00000000050993/1).
- [36] Kavlak G, McNerney J, Jaffe R L, et al. Metal production requirements for rapid photovoltaics deployment [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(6): 1651–1659.
- [37] Louwen A, van Sark W, Schropp R, et al. A cost roadmap for silicon heterojunction solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 147: 295–314.
- [38] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知方案 [EB/OL]. (2021-10-24)[2024-04-15]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content\\_5649731.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm).  
State Council on the issuance of the program of action on carbon peaking by 2030 notice program [EB/OL]. (2021-10-24) [2024-04-15]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content\\_5649731.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm)
- [39] 中国宏观经济研究院能源研究所. 中国能源转型展望 2021 [R]. 北京: 中国宏观经济研究院能源研究所, 2022.  
Energy Research Institute of Chinese Academy of Macroeconomic Research. Outlook for China's energy transition 2021 [R]. Beijing: Energy Research Institute of Chinese Academy of Macroeconomic Research, 2022.
- [40] 赵靛. 1.5 MW、2 MW 风电机组风轮直径发展趋势 [J]. *风能*, 2014 (3): 34–37.  
Zhao L. Development trend of rotor diameter of 1.5 MW and 2 MW wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2014 (3): 34–37.
- [41] 2018 中国风电产业地图 [EB/OL]. [2024-04-15]. [http://www.cwea.org.cn/industry\\_data\\_2018.html](http://www.cwea.org.cn/industry_data_2018.html).  
Map of China's wind power industry in 2018 [EB/OL]. [2024-04-15]. [http://www.cwea.org.cn/union\\_introduce.html](http://www.cwea.org.cn/union_introduce.html).
- [42] Global wind energy council [EB/OL]. [2024-04-15]. <https://gwec.net/>.
- [43] 黄洁, 邓思杨, 马晓婷, 等. 全球铜产业发展现状与建议 [J]. *现代矿业*, 2021, 37(6): 1–5.  
Huang J, Deng S Y, Ma X T, et al. Current situation of global copper industry development and suggestions [J]. *Modern Mining*, 2021, 37(6): 1–5.
- [44] 李鹏远, 周平, 唐金荣, 等. 中国铜矿资源供应风险识别与评价: 基于长周期历史数据分析预测法 [J]. *中国矿业*, 2019, 28(7): 44–51.  
Li P Y, Zhou P, Tang J R, et al. Identification and evaluation of copper supply risk for China: Using method of long-term historical data analysis [J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(7): 44–51.
- [45] Minerals yearbook—Metals and minerals [EB/OL]. [2024-04-15]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/minerals-yearbook-metals-and-minerals>.
- [46] 刘麦, 李伊兰, 张睿, 等. 全球镓资源现状及供需形势 [J]. *国土资源情报*, 2020 (10): 50–54, 26.  
Liu M, Li Y L, Zhang R, et al. Analysis of supply and demand situation of global gallium resource [J]. *Land and Resources Information*, 2020 (10): 50–54, 26.
- [47] 霍文敏, 陈甲斌. 全球镉矿资源供需形势分析 [J]. *国土资源情报*, 2020 (10): 34–38.  
Huo W M, Chen J B. Analysis of supply and demand situation of indium resources in the world [J]. *Land and Resources Information*, 2020 (10): 34–38.