

郭慧娟,唐守娟,孔令强,等.技术要素耦合作用下我国退役风电设备资源化潜力研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2358-2368.

Guo H J, Tang S J, Kong L Q, et al. Research on The resource utilization potential of decommissioned wind power equipment under the coupling of technical elements in China [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2358-2368.

## 技术要素耦合作用下我国退役风电设备资源化潜力研究

郭慧娟<sup>1</sup>,唐守娟<sup>1,2\*</sup>,孔令强<sup>3</sup>,郭云<sup>4</sup>,刘广鑫<sup>5</sup>,张力小<sup>6</sup>,石磊<sup>1,2\*\*</sup> (1.南昌大学资源与环境学院,江西 南昌 330031; 2.南昌大学流域碳中和教育部工程研究中心,江西 南昌 330031; 3.浙江财经大学公共管理学院,浙江 杭州 310018; 4.浙江省嘉兴生态环境监测中心,浙江 嘉兴 314001; 5.浙江清华长三角研究院,浙江 嘉兴 314006; 6.北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875)

**摘要:** 基于 Stella 系统动力学建模平台,耦合风机单机容量、发电方式等技术要素以及使用寿命的影响,构建了我国退役风机报废量预测模型,系统分析与模拟不同情景下风机设备的报废量,并量化回收废旧风机设备资源化规模及其碳减排潜力.结果表明,(1)设计寿命情景下,我国风机安装量 2006-2038 年快速增长,2047 年到达波谷后再次增长,风机报废规模快速上升,不同单机容量的风机报废量达峰时间随着单机容量的增大逐渐后移;(2)设计寿命情景下 2060 年风机及基础废弃物各组成成分产生量分别为:钢铁 1367.24 万 t、铝 19.72 万 t、铜 76.23 万 t、塑料 13.77 万 t、玻璃钢 176.44 万 t、电子器件 16.23 万 t、永磁体 2.77 万 t、润滑油 1.10 万 t、混凝土 3476.36 万 t;(3)2025-2060 年,短寿命、设计寿命、长寿命情景下报废风机材料累计闭环回收利用可分别满足总材料需求的 49.5%、41.1%、32.7%,以报废风机中钢铁、铝、铜及永磁体为例,短寿命、设计寿命、长寿命情景下 2025-2060 年 100%资源化利用累计碳减排量分别为 24654.2, 17594.7 和 12218.4 万 t.延长风机寿命,并根据直驱和双馈以及不同单机容量风机的报废结果建立健全风机设备回收体系,同时强化资源再生利用能力,提高资源循环利用效率,推进报废风机中钢铁等高值设备再制造,将有效降低风机产业生命周期温室气体排放,助力于我国碳达峰碳中和战略目标的实现.

**关键词:** 风电; 报废量预测; 系统动力学模型; 资源化潜力; 碳减排

中图分类号: X773 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)04-2358-11

**The resource utilization potential of decommissioned wind power equipment under the coupling of technical elements in China.** GUO Hui-juan<sup>1</sup>, TANG Shou-juan<sup>1,2\*</sup>, KONG Ling-qiang<sup>3</sup>, GUO Yun<sup>4</sup>, LIU Guang-xin<sup>5</sup>, ZHANG Li-xiao<sup>6</sup>, SHI Lei<sup>1,2\*\*</sup> (1.School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2.Engineering Research Center of Watershed Carbon Neutrality of Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3.School of Public Administration, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018, China; 4.Jiaxing Ecological and Environmental Monitoring Center of Zhejiang Province, Jiaxing 314001,China; 5.Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 6.State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2025,45(4): 2358~2368

**Abstract:** Based on the STELLA platform, a system dynamic model was constructed based on technology iteration, service life, and other influencing factors. This model systematically analyzed and simulated wind turbine waste generation under various scenarios, while quantifying the recycling scale of wind turbine waste and its potential carbon emission reduction effects. The results showed that: (1) Under the design lifetime scenario, the new-installed capacity of wind turbines in China were found to be increasing rapidly from 2006 to 2038, reached a trough in 2047, and then increased again. The scale of wind turbine scrapping was rising rapidly, and the peak time of wind turbines wastes with different unit capacities gradually occurred later as the unit capacity increased. (2) Under the design lifetime scenario, the amounts of waste generation components of wind turbines in 2060 were identified as follows: steel (13.67 million tons), aluminum (197200 tons), copper (762300 tons), plastic (137700 tons), fiberglass (1.7644 million tons), electronic devices (162300 tons), permanent magnets (27700 tons), lubricating oil (11000 tons), and concrete (34.76 million tons), respectively. (3) From 2025 to 2060, the cumulative closed-loop recycling of decommissioned wind turbine materials could meet 49.46%, 41.13%, and 32.67% of the total material demand under the short lifetime, design lifetime, and the long lifetime scenario, respectively. The cumulative carbon emission reductions from 2025 to 2060 with 100% resource utilization of steel, aluminum, copper and permanent magnets in scrapped wind turbines under the short lifetime, design lifetime, and the long lifetime scenario were calculated as 246.54 million tons, 175.95 million tons and 122.18 million tons respectively. Extending the wind turbine lifespan,

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE020850002);国家自然科学基金项目(52200215, 52270182);江西省社会科学基金项目(24ZXST06)

\* 责任作者, 讲师, tangshoujuan@ncu.edu.cn; \*\*教授, shilei@ncu.edu.cn

establishing and improving the recycling system for wind power equipment, strengthening the resource recycling capabilities, and promoting advanced recycling technologies such as steel remanufacturing would reduce greenhouse gas emissions effectively. These efforts are considered significant in achieving China's goals of peak energy production before 2030 and carbon neutrality by 2060.

**Key words:** wind power; waste generation forecasting; system dynamic model; resource potential; carbon emission reduction

风能是可再生能源技术中最成熟、规划开发条件最好、最具商业发展前景的发电方式之一<sup>[1-4]</sup>。根据全球风能理事会(GWEC)统计,2023 年全球范围内风力发电装机总量已达到 1021GW,其中我国风电装机规模居全球首位,约占全球装机规模的 43%<sup>[5]</sup>。在“双碳”战略目标背景下,我国风电装机规模仍将保持快速增长<sup>[6-8]</sup>。随着风机服役年限增长、产业升级和技术迭代,风电设备将面临批量退役和循环利用挑战<sup>[9]</sup>。精确预测风机设备退役和报废回收规模,量化风机设备回收所产生的资源化潜力及其生态环境效益,是可再生能源设备循环利用体系构建和相关政策制定的基础。

风电系统在能源基础设施建设阶段消耗了大量的金属和矿产资源,达到退役年限后,经过适当的处理和加工,报废风机中的钢铁、铜、稀土等材料可重新进入生产循环,从而减少原生材料及一次资源开采量<sup>[10]</sup>。然而,受限于风电设备大型化、回收技术成熟度等因素影响,精确量化和评估资源化规模和减排效益是一项具有挑战的工作。动态物质流分析(DMFA)是目前广泛使用的废弃物产生量预测方法<sup>[11-12]</sup>,根据质量守恒原则,基于历史和未来装机容量,可量化风电系统中的物质流量和存量。采用该方法,在全球、国家、省级尺度上展开了大量案例研究。其中在全球尺度,Liu 等<sup>[13]</sup>、Lefevre 等<sup>[14]</sup>分别对全球风电行业的风机叶片、碳纤维增强复合材料(CFRP)废弃物产生量及分布区域进行了深入分析,指出中国地区将是风机废弃物的主要来源国家之一。在国家尺度,相关研究主要聚焦在中国<sup>[15]</sup>、美国<sup>[16]</sup>、丹麦<sup>[17]</sup>、瑞典<sup>[18]</sup>、加拿大<sup>[19]</sup>等风机的物质代谢。Cooperman 等<sup>[16]</sup>预测了美国风机叶片的废弃物产生量,指出风机寿命对风机叶片废弃物产生量具有显著影响;Andersen 等<sup>[18]</sup>量化了瑞典风电行业的废弃物产生量并探讨了风机及其零件循环利用情景,表明良好的再生利用将会延迟风机废弃物带来的影响。Tazi 等<sup>[20]</sup>量化分析了法国退役风机废弃物产生量及其材料流动,结果显示,废弃物材料主要为黑色和有色金属、聚合物材料(塑料)、玻璃纤维

及混凝土。省级尺度上,Heng 等<sup>[19]</sup>对加拿大国家和省级风机叶片废弃物进行了估算;Chen 等<sup>[11]</sup>在高、中、低装机容量预测情景下量化了广东省风电行业的废弃物产生量。近年来温室气体排放已成为全球关注的焦点,对退役风机设备的研究不再局限于废弃物产生量的核算,逐渐延伸至废弃处置及回收产生的环境影响<sup>[21]</sup>。Yang 等<sup>[15]</sup>、Cong<sup>[6]</sup>等预测了未来中国的风机叶片废弃物产生量,并评估了不同处置方法产生的碳排放,相比传统的填埋和焚烧,回收将大大减少处置阶段产生的碳排放。

目前我国对风电行业废弃物质流的研究未充分考虑技术迭代对风机设备寿命和机型的影响、风机大型化变化趋势和直驱机组与双馈机组对材料强度系数的影响,忽视了不同单机容量机型的异质性,导致未来关键材料需求、报废风机设备的复合材料组成比例等预测结果存在显著偏差。基于此,以陆上风机为对象,本研究充分考虑了陆上风机设备技术迭代、使用寿命和风机大型化变化趋势等影响因素,采用 Stella 软件构建了我国风机设备报废规模预测模型,并基于历史数据验证了模型的精确性,分析了不同使用寿命情景下,不同型号风机设备装机量-存量-报废量发展演化趋势。此外,进一步量化了风机设备回收过程中各种材料资源化利用规模及其温室气体减排潜力,研究结果将为我国可再生能源设备循环利用管理体系建设和助力于“双碳”战略目标实现提供数据支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 预测模型构建

风机设备运行存量的动态变化取决于风机新安装和报废拆除两个流量过程。Stella 正是基于存量-流量建模模式的动态模拟软件平台,它通过诸如累积质量、能量、原料等库来描述存量,不同的库间用各种流进行连接,这些流可以使不同的库之间进行互相转移和变化。这种建模模式,使 Stella 在进行风机设备流量-存量动态模拟方面独具优势,展现出较好的交互性和通用性。本文以我国陆

上风机新装机-运行-报废为系统边界,构建了我国风机流量-存量系统动力学模型,如图 1 所示.其中,模型示意图中数字 1、2、3.....分别代表了不同单机容量的机型.受限于 1989 年以前我国风机

整体装机规模较小,装机量系统性数据统计始于 1989 年,并以此作为本研究时间系统边界的起始年份,以双碳目标设定的 2060 年作为模型运行区间的终止时间.

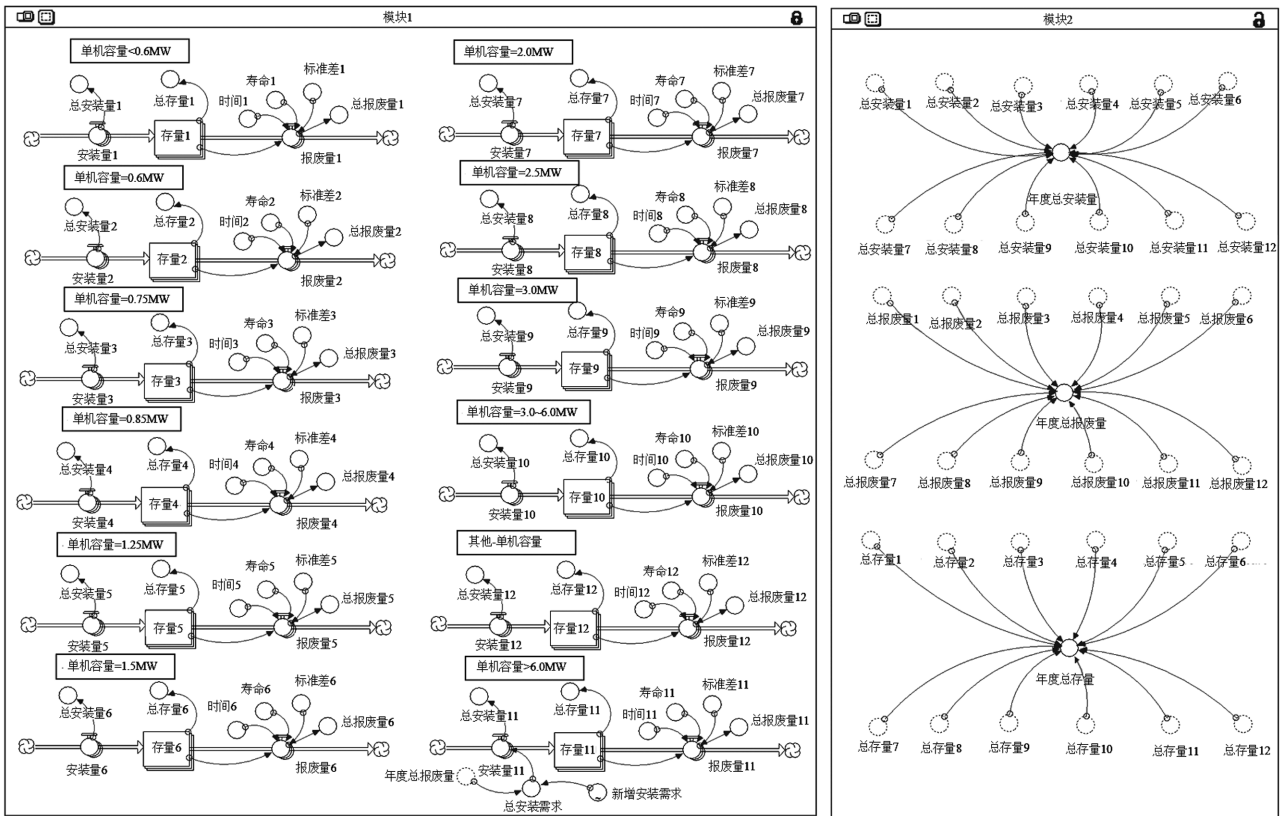


图 1 我国风机流量-存量模型

Fig.1 Wind turbines flow-stock model in China

1-小于 0.6MW;2-0.6MW;3-0.75MW;4-0.85MW;5-1.25MW;6-1.5MW;7-2.0MW;8-2.5MW;9-3.0MW;10-3.0-6.0MW;11-大于 6MW;12-其它单机容量

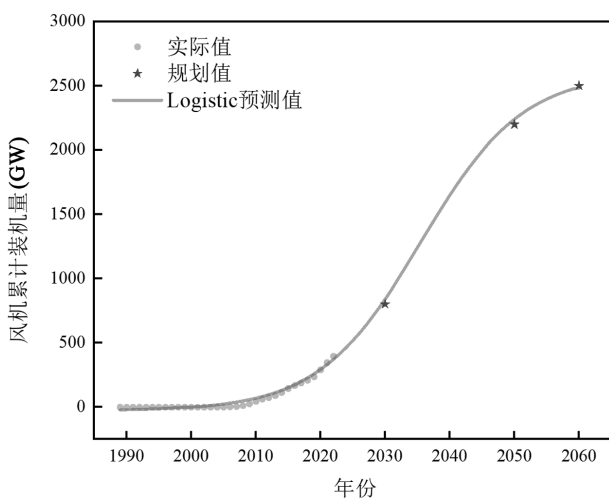


图 2 1989~2060 年我国陆上风机累计装机容量历史数据与趋势预测

Fig.2 Historical figures and projection of cumulative installed capacity of onshore wind turbines in China from 1989 to 2060

基于我国风电历史装机数据<sup>[22]</sup>、未来 2060 年的风机装机容量预测值<sup>[23-24]</sup>,本研究采用 Logistic 函数模拟我国风机累计装机容量的动态变化(图 2).

模型中的当年新安装风机等于当年新增需求风机与当年报废风机之和<sup>[25]</sup>(式 1).风机设备的设计寿命一般为 20~25 年<sup>[26-28]</sup>,相关研究<sup>[29]</sup>发现其寿命曲线符合正态分布(式 2),由风机寿命概率函数可建立拆除曲线(式 3),从而获得拆除流量.

$$\text{Inflow}(t)_{i,j} = \text{Stock}(t)_{i,j} - \text{Stock}(t-1)_{i,j} + \text{Outflow}(t)_{i,j} \quad (1)$$

$$f(t,t')_{i,j} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t')^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$\text{Outflow}(t)_{i,j} = \sum_{t_0}^{t'} \text{Inflow}(t')_{i,j} \times f(t,t')_{i,j} \quad (3)$$

式中: $\text{Inflow}(t)_{i,j}$  为  $i$  单机容量型号  $j$  技术类型的风机在  $t$  年的新装机容量, $\text{Stock}(t)_{i,j}$  为  $i$  单机容量型号  $j$

技术类型的风机在  $t$  年的累计装机容量,  $\text{Outflow}(t)_{i,j}$  为  $i$  单机容量型号  $j$  技术类型的风机在  $t$  年的报废量,  $f(t,t')_{i,j}$  为  $t'$  年安装的  $i$  单机容量型号  $j$  技术类型的风机在  $t$  年报废的概率。

### 1.2 报废风机资源化及生态环境效益评估

根据风机材料强度系数(Material Intensity)(表 1),可核算报废风机废弃物中钢铁、铝等材料的含量,评估其回收潜力(式 4)。

$$W_{t,x} = \sum_{i=1}^{12} \frac{\text{Inflow}(t)_{i,j}}{C_{i,j}} \times I_{i,j,x} \quad (4)$$

式中:  $W_{t,x}$  为  $t$  年退役风机中  $x$  材料的废弃物产生量,  $t$ ;  $C_{i,j}$  为  $i$  单机容量型号  $j$  技术类型风机的单机容量,

$\text{kW}$ ;  $I_{i,j,x}$  为  $i$  单机容量型号  $j$  技术类型风机中  $x$  材料的材料强度系数,  $t$ /台。

循环利用风机废弃物材料能够减少温室气体排放,产生良好的资源环境效益<sup>[31]</sup>。风机材料的回收效率将随着回收技术的进步而提高,评估理想情况潜力最大值,可为分析风机设备回收利用及其资源环境效益提供参考。本研究仅探讨回收过程理想状态下 100% 资源化利用方案的环境影响,而实际回收效率受回收技术等多因素影响。假设报废风机设备中所含资源能够被 100% 回收利用,根据资源化利用废弃风机材料的碳减排量<sup>[21]</sup>,结合上述研究得到的报废风机中每种材料的产生量,可量化其资源化利用环境效益(式 6)。

表 1 风机材料强度<sup>[30]</sup>

Table 1 Material intensity of wind turbines material<sup>[30]</sup>

装机容量 (kW)	发电机	风电机(t)							风电机合计 (t)	基础	
		钢铁	铝	铜	塑料	玻璃钢	电子器件	永磁体		混凝土	钢铁
150	齿轮箱	16.3	0.3	0.3	0.2	2.4	0.2		20	192	8
250	齿轮箱	45.30	0.8	0.8	0.5	4.1	0.6		52	288	12
600	齿轮箱	70.6	1.2	1.2	0.8	7.2	1		82	384	15
750	齿轮箱	85.7	1.5	1.4	1	11	1.2		102	432	17
850	齿轮箱	86	1.5	1.3	1	7.6	1.2		99	447	18
1250	齿轮箱	131.4	2.1	2.4	1.3	14.6	1.7		154	557	26
1500	齿轮箱	194	3.2	3.1	2	21.5	2.5		227	1023	41
	直驱	172.7	2.6	22.9	2	21	2.2	0.99	225	1023	41
2000	齿轮箱	262.3	4.3	4.4	2.7	34.3	3.4		312	1200	47
	直驱	232.5	3.5	30.7	2.7	34.2	2.9	1.32	308	1200	47
2500	齿轮箱	300.1	4.9	4.8	3.1	43	4		360	1544	53
	直驱	272.3	4.1	31.7	3.1	44.4	3.4	1.65	361	1544	53
3000	齿轮箱	399.9	6.6	6.6	4.1	48.8	5.3		472	1792	78
	直驱	353.7	5.4	42.7	4.1	49.1	4.5	1.98	462	1792	78
3600	齿轮箱	480.7	7.9	8	4.9	64.6	6.3		573		
	直驱	425.6	6.4	52.8	4.9	65	5.4	2.38	563		
4000	齿轮箱	537.7	8.9	8.7	5.7	68.9	7.2		638		
	直驱	481	7.4	58.3	5.7	69.4	6.2	2.64	632		
4500	齿轮箱	595.4	10	9.6	6.3	80.4	8		711		
	直驱	533.6	8.2	63.7	6.3	81	7	2.97	704		
5000	齿轮箱	645.3	10.9	10.1	7.1	90	8.8		773		
	直驱	602.5	9.2	77.6	7.1	92.2	7.8	3.3	801		

$$W_x = \sum_0^t W_{t,x} \quad (5)$$

$$\text{GHG}_x = W_x \times \text{EF}_x \quad (6)$$

式中:  $W_x$  为  $x$  材料的累积废弃物产生量,  $t$ ;  $\text{EF}_x$  为  $x$  材料资源化循环利用减少碳排放的环境系数,  $t\text{CO}_2\text{eq}/t$ ;  $\text{GHG}_x$  为  $x$  材料资源循环利用累积减少的碳排放量,  $t$ 。

### 1.3 情景设置

风机设备寿命是本模型构建的关键参数之一,实际风机服役寿命受技术、设备质量、使用环境、

运营维护状态等因素影响<sup>[16,32]</sup>。在生产制造过程中,由于机型更新迭代较快,一方面,技术升级可延长风机寿命;另一方面,由于产业工人的培养无法跟上技术迭代速度,可能导致人工无效检查等问题,进而造成制造质量偏差,影响设备寿命。在运输与安装环节,风电机组大型化给运输安装带来了诸多挑战,例如运输过程中造成部分设备损伤难以及时发现、叶片吊装不当损坏,进而影响设备使用。在运行过程中,外

部环境是影响设备寿命的关键因素,高温、高湿及极端天气等环境会加速风机的老化和损坏,已有研究<sup>[13]</sup>探讨了极端大风天气等环境因素将导致叶片故障断裂,减少设备服役时间.在风电机组运行后期,达到设计退役年限时,一些检查评估合格的风电机组可延长使用寿命,例如部分风电机组在更换叶片、发动机等部件进行改造升级后可继续运行.

现有研究通常假设风电设备寿命服从正态分布<sup>[15,29]</sup>,通过寿命概率分布函数,可得到安装的风机在运行某一年的拆除概率.本研究充分考虑了以上影响因素对风机寿命的影响,设置了短寿命、设计寿命、长寿命 3 种模拟情景,可以囊括风电设备使用和报废所涉及的各种复杂因素.设计寿命情景设定风机寿命为 25 年.然而,在实际风机运行中,存在早期风电设备产品质量参差不齐、环境条件作用及后期维护不良等情况,导致风机实际寿命短于设计寿命,设定短寿命情景为 20 年.随着风电产业的大规模发展,技术水平不断提升,安装维护趋于规范化、标准化,风机预期寿命得到延长,设定长寿命情景为 30 年.在三种情景下,本研究分别假设风机寿命服从平均使用年限为 20、25、30 年的正态分布(式 2),并据此建立风机的报废曲线.

#### 1.4 数据支持

我国 1989~2022 年不同单机容量型号风机历史新增装机容量、累计装机容量及市场份额数据来源于中国风能协会(CWEA)发布的报告,未来风电累计装机容量预测基于《中国 2060 年前碳中和研究报告》的碳中和实现路径规划.风电技术演变随时间呈现产品大型化的特点和趋势<sup>[33]</sup>,我国陆上风电机组单机容量平均功率从上世纪八十年代至今由 0.15MW 增长至 6.0MW 以上,不同单机容量型号的风机材料强度<sup>[30]</sup>、及报废风机设备材料资源化利用碳减排量<sup>[21]</sup>来源于文献调研数据.国内市场中的风电机组主要为高速双馈风电机(齿轮箱)与直驱风电机,两种风电机组之间消耗的材料强度存在差异,早期及目前安装较多的为高速双馈风电机,由于直驱机组具有效率高、故障率低等特点,近年来其市场份额不断增长,两种风机的历史与未来市场份额参考杨举华<sup>[34]</sup>和 Nassar 等<sup>[24]</sup>的研究.

#### 1.5 模型验证

运行模型后,可得到我国风机运行存量的动态

变化结果,如图 3 所示.将模型模拟值与统计值进行比较,发现模拟值与统计值存在较好的一致性,模型具有较高的可靠性.但统计值略大于模拟值,可能是因为模型输出的存量值考虑了风机使用寿命的影响,少量风机已经进入了报废周期,报废后输出了系统,而统计风机存量是累计的装机量,没有考虑风机的报废量.

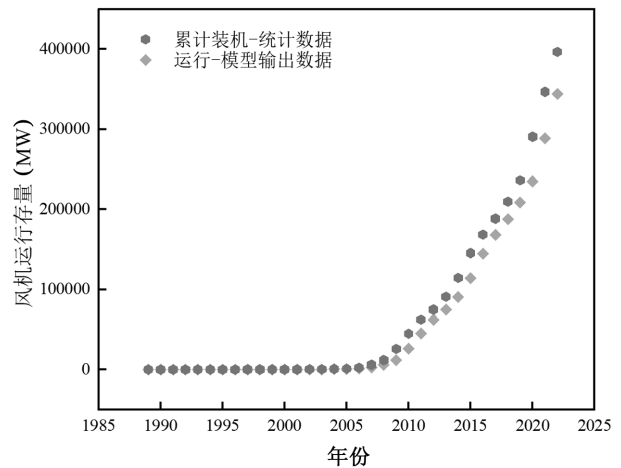


图 3 模型验证分析

Fig.3 Model validation analysis diagram

## 2 结果与讨论

### 2.1 风机安装量-存量-报废量模拟结果

我国风机安装量-存量-报废量模拟结果如图 4 所示,其中包括了双馈机组、直驱机组以及总机组(双馈+直驱)模拟结果.由模拟结果可知,2006 年前我国风机新安装量总体上增长缓慢;2006 年后,随着可再生能源法和一系列可再生能源产业政策的颁布和实施<sup>[35]</sup>,以及风机生产技术的进步和生产成本的降低,风机新安装量呈现波动上升趋势,我国风电装机规模实现快速增长;特别是 2020 年后,在“双碳”战略的驱动下,我国风电装机规模仍将持续快速上升.短寿命情景下,新安装风机快速上升且处在高值区间,2059 年达峰,峰值为 130.84GW.设计寿命情景下于 2038 年达到第一个峰值(108.46GW),长寿命情景下于 2037 年达到第一个峰值(107.43GW).直驱机组和双馈机组的模拟结果变化趋势的幅度略有差异.

风机报废模拟结果显示,2020 年前我国风机报废规模处于低位值且增长缓慢,整体呈上升趋势,在

设计寿命情景下表现为两个快速上升期,第一个快速上升期为 2020~2038 年,报废规模将从 0.55GW 增长至 26.74GW,此后进入短暂的平稳增长阶段(2038~2045 年),2045 年后,我国将迎来更大规模的风机报废量,报废量由 2045 年的 30.62GW 迅速增长至 97.00GW,报废量的迅速增加驱动了风机安装量再次上升.相较于其他两种情景,短寿命情景下,风机报废量持续快速增长,因而风机安装量也呈现为快

速增长趋势,直至 2060 年增速有所放缓,模拟结果表明 2060 年报废规模将达到 116.33GW.长寿命情景下,2037 年前我国风机报废量趋势与设计寿命情景差异不大,随后由于风机服役时间更久,报废规模小幅度下降,到 2060 年报废规模将达到 76.50GW.可见延长风机使用寿命,我国风机报废规模的增长速度将有效缓解.需要强调的是,三种寿命情景下风机运行存量的模拟结果相同,模拟期内逐渐饱和.

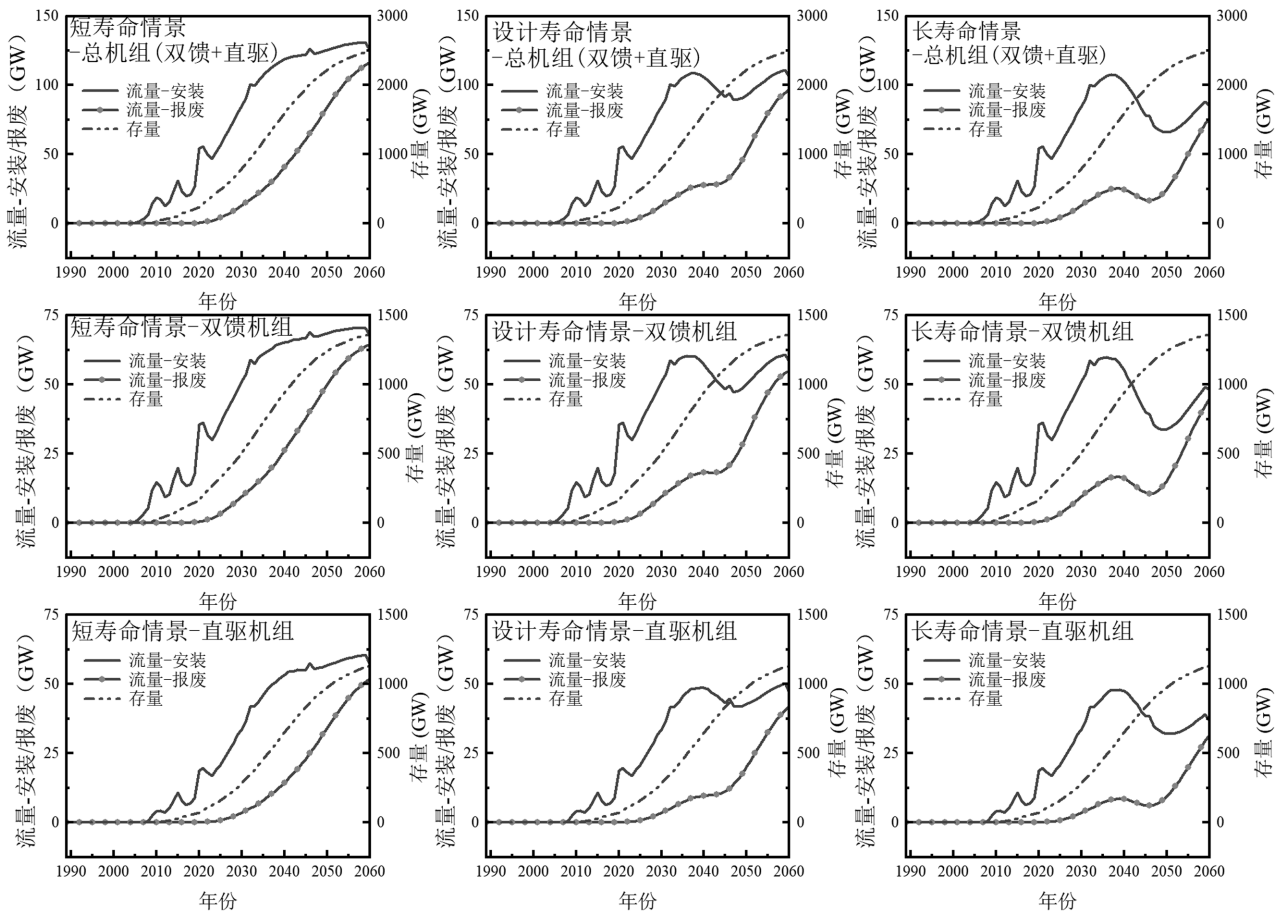


图 4 1989~2060 年不同寿命情景下我国风机流量-存量动态模拟结果

Fig.4 Dynamic simulation results of flow-stock for wind turbines in China under different lifetime scenario from 1989 to 2060

双馈机组和直驱机组安装量-存量-报废量在不同寿命情景下的流量-存量变化趋势总体相似.短寿命情景下,双馈机组新装机量在 2058 年达峰,峰值为 70.40GW;直驱机组新装机量在 2059 年达峰,峰值为 60.50GW.设计寿命情景下,双馈机组新装机量于 2036 年达到峰值(60.24GW),直驱机组新装机量于 2039 年达到峰值(48.72GW).长寿命情景下,双馈机组新装机量于 2036 年达到峰值

(59.89GW),直驱机组新装机量于 2037 年达到峰值(47.97GW).需要说明的是,由于早期双馈机组的市场份额占比高,其安装量在 2038 年前增长迅速,变化趋势相对更加明显;直驱机组市场份额自 2005 年起逐渐增大,2038 年后安装量下降幅度较小.三种寿命情景下不同类型机组的新安装量模拟结果可以为后续材料需求量的核算提供基础,进而预测未来资源需求量.

众所周知,随着风机技术的迭代衍生出不同单机容量、发电机类型的风电设备,彼此间材料强度系数存在显著差异,进而影响了不同型号报废风机材料产生量.目前已有研究<sup>[20]</sup>对报废风机设备废弃物中不同材料的产生量进行了粗略估计,但未充分考虑风电设备大型化发展趋势下,单机容量增加以及风电机组发电方式比例变化等因素,对报废风机材料的种类、体量等结果的影响,即精细化考虑技术迭代对模型输出结果的影响.本研究充分考虑了两个参数,并将其嵌入模型之中,精细化考虑了二者对风机设备物质材料强度产生的影响.图 5 分别展示了不同单机容量直驱机组、双馈机组以及总机组(双馈+直驱)报废量的变化趋势.就总机组报废量而言,模拟结果表明单机容量小的风机报废量率先达峰,单

机容量大的风机报废量达峰时间逐渐后移,值得注意的是,随着我国风机技术迭代速度的加快,单机容量大的风机报废量达峰时间的间距逐渐缩短,特别是,单机容量 6MW 的风机在 2060 年左右报废量才会达到峰值,且达峰速率相对较慢,达到峰值的规模也最大.这主要取决于近年我国不同单机容量机组的快速迭代、快速推向市场,以及在可再生能源政策驱动下,市场上单机容量较大的风机装机规模占风机总装机规模的比重逐渐增大.对比直驱和双馈机组的模拟结果,2020 年之前双馈机组的市场份额占有率较高,因此,双馈机组的风机报废量远大于直驱机组,且报废风机的单机容量较小.随着风机大型化以及直驱机组市场份额的提升,模拟期内,直驱机组的报废量逐渐变大.

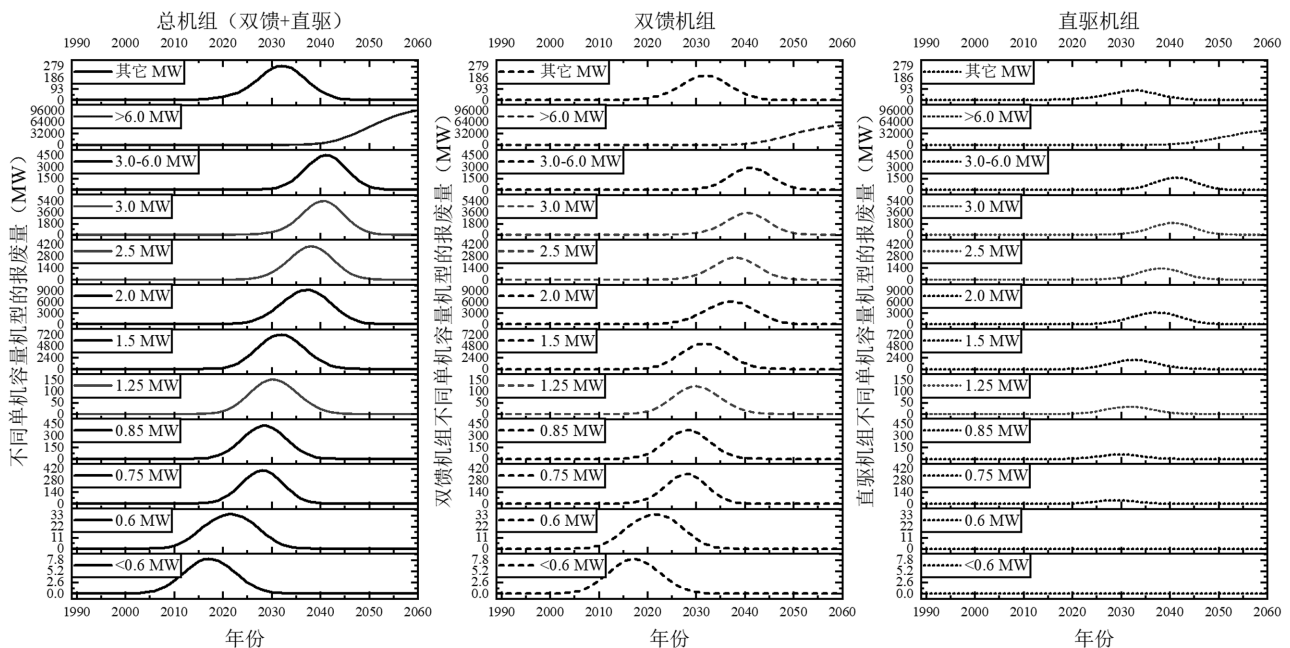


图 5 设计寿命情景下不同单机容量风机型号报废量预测结果

Fig.5 Prediction results of scrap volume of different single-machine capacity wind turbines models under design lifetime scenario

## 2.2 报废风机设备产生量分析

随着安装的风机设备陆续达到退役阶段,风机存量中的金属、永磁体等高附加值材料将逐渐转变为二次资源<sup>[36]</sup>.不同寿命情景下我国退役风机设备废弃物产生量结果如图 6 所示,在不同使用寿命影响下,风机报废规模逐渐呈现分异性.到 2060 年,短寿命、设计寿命、长寿命情景下我国退役风机废弃物产生量分别为 1827.57, 1523.06, 1200.47 万 t.

进一步解析风机设备废弃物中的组成成分,如

钢铁、铝、铜、塑料、玻璃钢、电子器件、永磁体、润滑油以及混凝土,其动态变化结果如图 7 所示.需要解释说明的是,三种寿命情景下 9 种物质报废量模拟结果变化趋势整体上相似,由于直驱机组不需要润滑油且市场安装份额逐渐提高,导致润滑油的报废量增加速度较缓.此外,就混凝土报废结果而言,由于直驱和双馈机组混凝土材料强度系数相同,且随着单机容量的提升变化不大,因此混凝土的报废量增加速度也相对较缓.

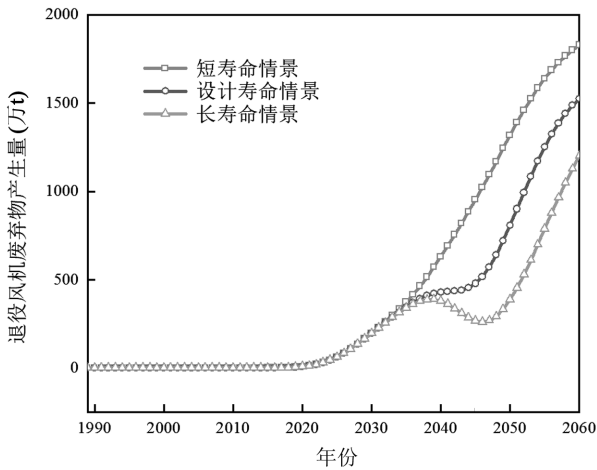


图 6 不同使用寿命情景下我国风机报废量预测

Fig.6 Prediction of scrap volume of wind turbines in China under different service lifetime scenario

在设计寿命情景下,报废风机废弃物产生总量自 2020 年开始迅速增长,且 9 种物质的报废量变化趋势相似,到 2060 年,风机及基础废弃物各组成成分产生量分别为:钢铁 1367.24 万 t、铝 19.72 万 t、铜 76.23 万 t、塑

料 13.77 万 t、玻璃钢 176.44 万 t、电子器件 16.23 万 t、永磁体 2.77 万 t、润滑油 1.10 万 t、混凝土 3476.36 万 t,相较于 2023 分别增长约 44.72, 47.34, 92.37, 50.67, 60.33, 48.98, 133.76, 33.09, 26.48 倍.铜和永磁体废弃物产生量增长倍数明显高于其他材料,主要是因为风机的大型化和技术迭代过程中,单位装机铜和永磁体的材料消耗强度系数在上升,增长速度加快.短寿命情景下,风机废弃物产生量将持续快速增长,到 2060 年,风机及基础废弃物各组成成分产生量分别为:钢铁 1638.51 万 t、铝 23.60 万 t、铜 93.50 万 t、塑料 16.52 万 t、玻璃钢 211.68 万 t、电子器件 19.44 万 t、永磁体 3.42 万 t、润滑油 1.29 万 t、混凝土 4169.44 万 t.相较于设计寿命情景,长寿命情景下风机废弃物产生量显著减少,2038 年左右风机废弃物产生量趋势下降幅度更加明显,到 2060 年,风机及基础废弃物各组成成分产生量分别为:钢铁 1079.65 万 t、铝 15.60 万 t、铜 58.15 万 t、塑料 10.86 万 t、玻璃钢 139.10 万 t、电子器件 12.83 万 t、永磁体 2.09 万 t、润滑油 0.90 万 t、混凝土 2741.93 万 t.

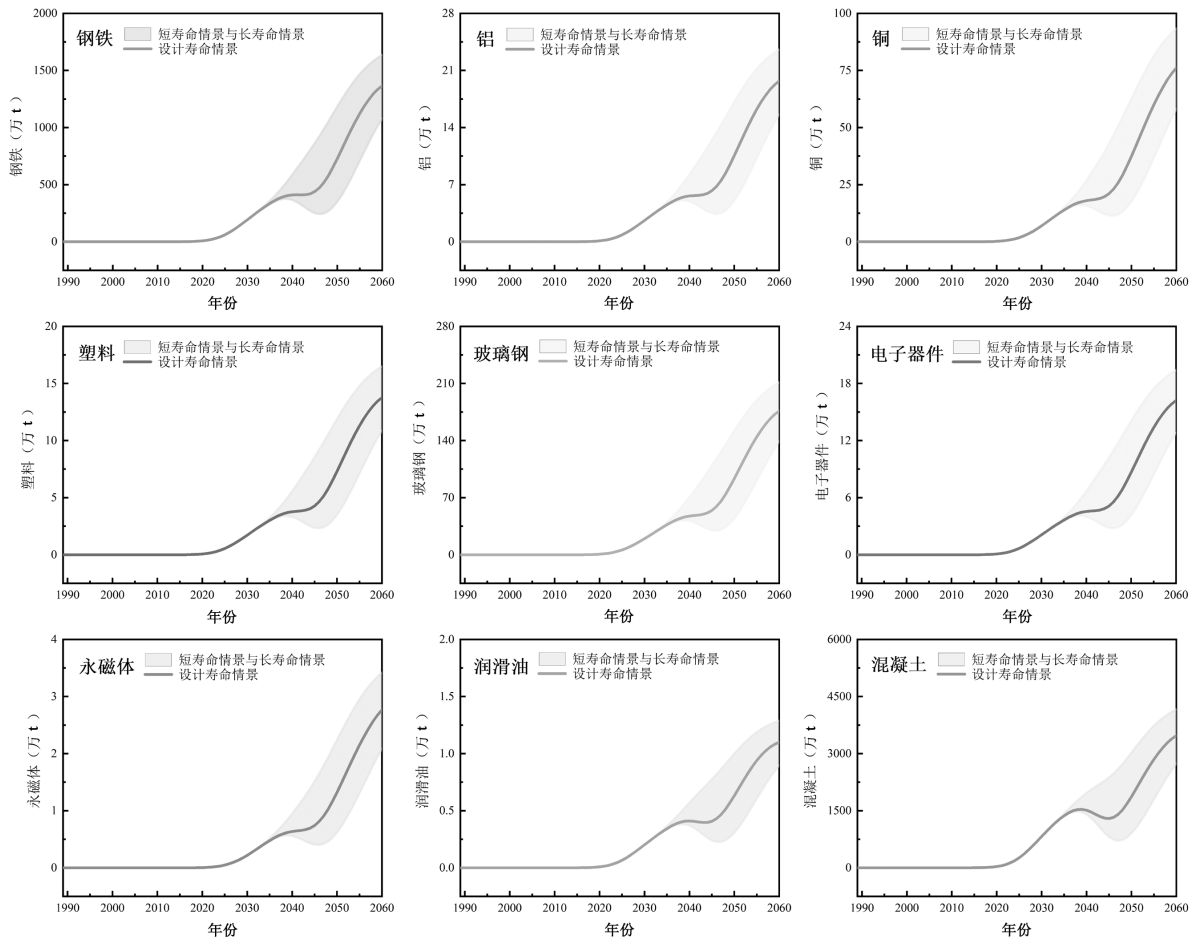


图 7 不同寿命情景下报废风机及风机基础组成成分分析

Fig.7 Analysis of scrap wind turbines and wind turbines foundation component under different lifetime scenario

### 2.3 报废风机资源化利用及其降碳潜力分析

基于上述风机安装量-存量-报废量模拟结果,核算了 2025~2060 年风电设备装机累计资源需求量及退役废弃物产生量(表 2).若报废风机材料实现闭

环回收,短寿命、设计寿命和长寿命情景下将可满足生产风机总材料需求的 49.46%、41.13%和 32.67%,风机寿命从设计值 25 年延长到 30 年,将累计减少 12.56% 的材料需求.

表 2 2025~2060 年风电设备装机资源需求量及退役废弃物产生量(万 t)

Table 2 Install resource demand and decommission waste generation of wind power equipment from 2025 to 2060(万 t)

材料	短寿命情景		设计寿命情景		长寿命情景	
	装机资源需求量	废弃物产生量	装机资源需求量	废弃物产生量	装机资源需求量	废弃物产生量
风机合计	63056.46	31185.89	54137.80	22267.23	47337.08	15466.50
钢铁	50292.54	25040.80	43174.09	17922.34	37737.55	12485.81
铝	814.86	406.04	699.44	290.62	611.17	202.35
铜	3204.90	1467.70	2756.79	1019.59	2423.73	686.53
塑料	570.05	280.60	489.40	199.96	427.88	138.43
玻璃钢	7304.04	3563.03	6270.88	2529.88	5482.93	1741.93
电子器件	671.08	332.79	576.06	237.77	503.43	165.15
永磁体	117.04	52.41	100.74	36.11	88.74	24.11

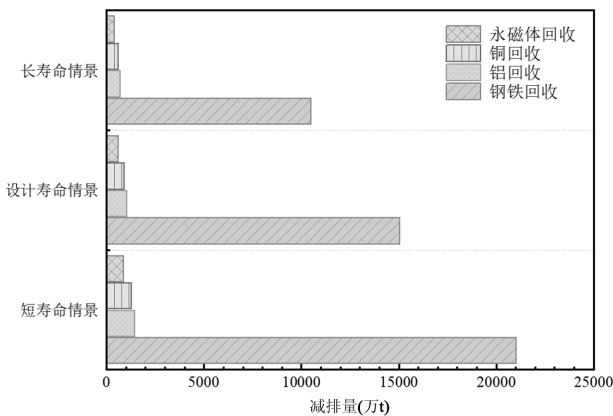


图 8 不同寿命情景下 2025~2060 年 100%资源化利用报废风机设备的累计碳减排量分析

Fig.8 Analysis of cumulative carbon emission reduction of scrap wind turbine equipment for 100% resource utilization from 2025 to 2060 under different lifetime scenario

资源化利用可再生能源设备中的钢铁、铝等材料,使其重新进入生产循环将显著减少环境影响.如前所述,风机材料的回收效率将随着回收技术的进步而提高,评估理想情况潜力最大值,可为分析风机设备回收利用及其资源环境效益提供参考.图 8 显示了 2025~2060 年在不同情景下 100%资源化利用报废风机设备的累计碳减排量,以报废风机中钢铁、铝、铜以及永磁体为例,设计寿命情景下碳减排量共 17594.74 万 t,其中钢铁碳减排贡献力度最大,为 15054.77 万 t,占比 85.56%.此外,材料铝、铜以及永磁体累计碳减排量分别为 1028.81 万 t、897.24 万 t 和 613.92 万 t.短寿命情景下及长寿命情景下碳减排

量分别为 24654.22 万 t 和 12218.40 万 t.短寿命情景下的碳减排累计值最高,长寿命情景下碳减排累计值最低,主要是因为短寿命情景下风电设备更新速度更快,在模拟期内,报废量持续快速增长,没有平稳过渡阶段,导致短寿命情景下风机设备产生量规模最大,可资源化利用的量也最大,进而碳减排量更高.但就可再生能源设备全生命周期分析而言,延长寿命整体碳排放更低,而不能仅关注报废阶段的碳减排效益.

### 3 结论

3.1 设计寿命情景下,我国风机安装量 2006~2038 年间快速增长,2047 年到达波谷后又再次增长.风机报废趋势表现为两个快速上升期,分别为 2020~2038 年和 2045~2060 年,且第二阶段上升速度更快,中间调整期应充分做好废旧资源处置技术积累与管理体系建设.不同单机容量的风机报废量达峰时间随着单机容量的增大逐渐后移,单机容量 6MW 的风机在 2060 年左右报废量才会达到峰值,且达峰速率相对较慢,达到峰值的规模也最大.

3.2 报废风机设备产生量分析结果显示,2060 年短寿命、设计寿命、长寿命情景下我国退役风机废弃物产生量分别为 1827.57, 1523.06 1200.47 万 t.在设计寿命情景下,2060 年风机及基础废弃物各组成成分产生量分别为:钢铁 1367.24 万 t、铝 19.72 万 t、铜 76.23 万 t、塑料 13.77 万 t、玻璃钢 176.44 万 t、

电子器件 16.23 万 t、永磁体 2.77 万 t、润滑油 1.10 万 t、混凝土 3476.36 万 t,资源回收潜力巨大.在技术迭代的影响下,相对 2023 年,2060 年铜和永磁体废弃物产生量的增长倍数明显高于其他材料.

3.3 2025~2060 年,短寿命、设计寿命、长寿命情景下报废风机材料累计闭环回收利用可分别满足总材料需求的 49.46%、41.13%、32.67%;若风机寿命从设计值 25 年延长到 30 年,将有助于减少 12.56% 的累计材料需求.以报废风机中钢铁、铝、铜及永磁体为例,设计寿命情景下 100%资源化利用累计碳减排量共 17594.74 万 t,其中钢铁累计碳减排贡献力度最大(15054.77 万 t),铝、铜及永磁体累计碳减排量则分别为 1028.81、897.24 和 613.92 万 t.短寿命情景下及长寿命情景下累计碳减排量分别为 24654.22、12218.40 万 t.短寿命情景下的碳减排累计值最高,长寿命情景下碳减排累计值最低,但就可再生能源设备全生命周期分析而言,延长寿命整体碳排放更低.

#### 参考文献:

- [1] Liu P, Meng F, Barlow C Y. Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022,180:106202.
- [2] Spini F, Bettini P. End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024,275: 111290.
- [3] Elshkaki A, Graedel T E. Dysprosium, the balance problem, and wind power technology [J]. *Applied Energy*, 2014,136:548-559.
- [4] Panwar N L, Kaushik S C, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011,15(3):1513-1524.
- [5] GWEC. Global wind report 2024 [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2023.
- [6] 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.
- [7] 张雅娟,王 铮,李双成.能源电力系统转型对中国环境影响评估 [J]. *资源科学*, 2023,45(9):1830-1843.  
Zhang Y J, Wang Z, Li S C. Environmental impact assessment of energy and power system transformation in China [J]. *Resources Science*, 2023,45(9):1830-1843.
- [8] 何 则,周彦楠,刘 毅.2050 年中国能源消费结构的系统动力学模拟——基于重点行业的转型情景 [J]. *自然资源学报*, 2020,35(11): 2696-2707.  
He Z, Zhou Y N, Liu Y. System dynamics simulation on China's energy consumption in 2050:Based on the policy scenarios of key industries [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020,35(11): 2696-2707.
- [9] 国家发展改革委等部门关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见 [J]. *资源再生*, 2023,7:20-52.  
Guiding opinions of the National Development and Reform Commission and other departments on promoting the recycling of retired wind and photovoltaic equipment [J]. *Resource Regeneration*, 2023,7:20-52.
- [10] Ortegon K, Nies L F, Sutherland J W. Preparing for end of service life of wind turbines [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013,39:191-199.
- [11] Chen Y, Cai G, Zheng L, et al. Modeling waste generation and end-of-life management of wind power development in Guangdong, China until 2050 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 169:105533.
- [12] 宋璐璐,陈伟强,代 敏.中国汽车、船舶和家电中钢铁的存量与流量 [J]. *自然资源学报*, 2020,35(4):895-907.  
Song L L, Chen W Q, Dai M. Stocks and flows of steel in automobiles, vessels and household appliances in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(4):895-907.
- [13] Liu P, Barlow C Y. Wind turbine blade waste in 2050 [J]. *Waste Management*, 2017,62:229-240.
- [14] Lefeuvre A, Garnier S, Jacquemin L, et al. Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019,141:30-39.
- [15] Yang J, Meng F, Zhang L, et al. Solutions for recycling emerging wind turbine blade waste in China are not yet effective [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023,4(1):466.
- [16] Cooperman A, Eberle A, Lantz E. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021,168:105439.
- [17] Cao Z, O'Sullivan C, Tan J, et al. Resourcing the fairytale country with wind power: A dynamic material flow analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019,53(19):11313-11322.
- [18] Andersen N, Eriksson O, Hillman K, et al. Wind turbines' end-of-life: Quantification and characterisation of future waste materials on a national level [J]. *Energies*, 2016,9(12):999.
- [19] Heng H, Meng F, Mckechnie J. Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada [J]. *Waste Management*, 2021,133: 59-70.
- [20] Tazi N, Kim J, Bouzidi Y, et al. Waste and material flow analysis in the end-of-life wind energy system [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019,145:199-207.
- [21] Jensen J P. Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2018,22(2):316-326.
- [22] 中国风能协会.中国风电产业数据 [EB/OL]. <http://cwea.org.cn/index.html>.  
China Wind Energy Association. Data on China's wind power industry [EB/OL]. <http://cwea.org.cn/index.html>.
- [23] 全球能源互联网发展合作组织.中国 2060 年前碳中和研究报告 [M]. 北京:中国电力出版社, 2021.  
Global Energy Interconnection Development Cooperation Organization. China's carbon neutral research report before 2060 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.

- [24] Nassar N T, Wilburn D R, Goonan T G. Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios [J]. *Applied Energy*, 2016,183:1209–1226.
- [25] Li J, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions [J]. *One Earth*, 2020,3(1):116–125.
- [26] Rani M, Choudhary P, Krishnan V, et al. A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021,215:108768.
- [27] 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.
- [28] Jensen J P, Skelton K. Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018,97:165–176.
- [29] Li C, Mogollón J M, Tukker A, et al. Future material requirements for global sustainable offshore wind energy development [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022,164:112603.
- [30] Yang J, Zhang L, 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.
- [31] Doerffer K, Baldowska-Witos P, Pysz M, et al. Manufacturing and recycling impact on environmental life cycle assessment of innovative wind power plant Part 1/2 [J]. *Materials (Basel)*, 2021,14(1):220.
- [32] Liu P, Meng F, Barlow C Y. Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,212:1268–1281.
- [33] 刘平,张媛,莫堃,等.风力发电设备技术现状与发展趋势 [J]. *中国重型装备*, 2022,(4):1–6.
- Liu P, Zhang Y, Mo K, et al. Current situation and development trend of wind power generation equipment technology [J]. *China Heavy Equipment*, 2022,(4):1–6.
- [34] 杨举华.我国风电系统资源流动过程及其生命周期环境影响研究 [D]. 北京:北京师范大学, 2020.
- Yang J H. Study on resource flow and life cycle environmental impacts of wind power system in China [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2020.
- [35] 秦海岩.加快发展新能源,支撑落实“双碳”目标 [J]. *可持续发展经济导刊*, 2021,(Z2):23–25.
- Qin H Y. Accelerate the development of new energy sources and support the implementation of the goal of "double carbon"[J]. *China Sustainability Tribune*, 2021,(Z2):23–25.
- [36] Topham E, Mcmillan D, Bradley S, et al. Recycling offshore wind farms at decommissioning stage [J]. *Energy Policy*, 2019,129:698–709.

**作者简介:** 郭慧娟(1999-),女,江西赣州人,南昌大学硕士研究生,主要研究方向为能源系统转型与可持续发展,ghj\_525@163.com.