

陈雅禾,丁宁,白孝轩,等.风力发电及储能系统碳足迹分析[J].中国环境科学,2025,45(5):2926-2931.

Chen Y H, Ding N, Bai X X, et al. Carbon footprint analysis of wind power system with generation and storage [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2926-2931.

风力发电及储能系统碳足迹分析

陈雅禾^{1,2},丁宁¹,白孝轩³,李朋³,李超³,杨建新^{1,2*} (1.中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085; 2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 101499; 3.国网冀北电力有限公司电力科学研究院,北京 100045)

摘要: 采用生命周期评价方法,核算我国典型风力发电及储能系统碳足迹,以揭示其不同生命周期阶段的碳减排潜力.结果表明,我国风力发电及储能系统的碳足迹为 8.44gCO₂/(kW·h),其中组件制造阶段的碳足迹贡献最大,为 6.25gCO₂/(kW·h),占整个系统碳足迹的 74.05%.而系统建设、运营维护和废弃处理处置阶段的碳足迹分别为 1.04,1.91,-0.74gCO₂/(kW·h).通过系统边界调整分析,发现在原有的发电系统上增加储能系统可以降低系统的总电力碳足迹.

关键词: 风力发电; 储能系统; 生命周期评价; 碳足迹

中图分类号: X828 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2926-06

Carbon footprint analysis of wind power system with generation and storage. CHEN Ya-he^{1,2}, DING Ning¹, BAI Xiao-xuan³, LI Peng³, LI Chao³, YANG Jian-xin^{1,2*} (1.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China; 3.Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2926-2931

Abstract: Based on the methodology of life cycle assessment (LCA), the carbon footprint of the typical wind power system with generation and electricity storage (WPSGES) in China was calculated, so as to identify the reduction potential of carbon emission from life cycle stages. The results showed that the carbon footprint of WPSGES was 8.44gCO₂/(kW·h), which mainly came from the manufacturing process by 6.25gCO₂/(kW·h)(74.05%). Such processes as construction, operation, and end of life only contributed 1.04, 1.91 and -0.74gCO₂/(kW·h), respectively. It was also confirmed that expanding the system boundary, including power generation and storage, could reduce gross carbon footprint of WPSGES.

Key words: wind power generation; electricity storage system; life cycle assessment; carbon footprint

21 世纪以来,我国大力发展风力发电等清洁能源,已成为世界第一风电大国^[1].虽然风能在发电过程中基本不产生污染物,但从生命周期角度,风电场在生产、建设与回收处置等环节仍然存在温室气体与环境污染排放.因此,开展风力发电全生命周期碳排放(碳足迹)研究对我国新能源战略的推进有重要的支撑作用.

风能具有随机性和间歇性的特点,在发电时会带来电能不稳定、不可持续等问题,造成大量电能浪费,对风力发电的安全稳定运行构成巨大威胁.储能技术为解决弃风问题提供了新的方案.然而,目前将风力发电及储能系统作为一个整体,评估其对气候变化的环境影响的研究尚未发现于公开文献.

有关风力发电碳足迹的研究包含从设备生产到废弃处置的生命周期全过程.研究表明,风力发电生

命周期的碳足迹大约为 18~31.4gCO₂/(kW·h)^[2-3],相比传统煤炭发电大约减少温室气体排放约 435~1035gCO₂/(kW·h),碳减排效益显著.^[4]生产阶段是风力发电碳足迹的主要来源,可贡献生命周期 70%以上的碳足迹^[5],其中风电机组的制造过程较其他设备的贡献最大^[6].而建设和运营阶段的贡献较少,通常只占总碳足迹的不到 15%.^[7]对于风电设备退役后的回收处理环节,钢和铜的回收可以削减二氧化碳排放总量的 12.3%~22.7%^[8],减少量受到回收率、回收工艺等因素的影响^[9].鉴于风力发电的随机性与间歇性,越来越多的风电场开始安装储能系统以应对电能耗损问题.储能电站的碳足迹仅为风力

收稿日期: 2024-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3901700)

* 责任作者, 研究员, yangjx@rcees.ac.cn

发电的不到 5%^[10],但考虑到储能电站的电力消纳功能,其对整个风电系统的碳减排效益仍然具有较大影响^[11].

综上所述,现有研究明确了风力发电的碳足迹,但在划定系统边界时仅重点考虑风力发电机的生产过程,对其他设备的生产制造,以及建设、运营维护与废弃处理处置等环节的碳足迹分析不够深入;另外,在风力发电系统上增加储能系统是我国当前风电场建设重点推荐的一种新模式.新模式下,从生命周期的角度,新增的储能系统对风电场发电系统的碳减排潜力究竟如何,也是一个亟待回答的科学问题.

因此,本文采用生命周期评价方法,选择我国典型的 200MW 规模的风电场(包括风力发电及储能系统)作为数据来源,开展碳足迹核算,以揭示风电系统不同生命周期阶段的碳排放,为我国新能源产业的发展提供支持.

1 方法和数据

1.1 系统边界与功能单位

研究的系统边界采用全生命周期的思想,包括原材料的获取与生产至退役期设备的回收与处置.碳足迹核算模型主要包含 5 个生命周期阶段,即原材料获取阶段、组件制造阶段、建设阶段、运营维护阶段与废弃处理处置阶段(图 1).其中,受数据限制,风机等设备的生产过程未考虑部件生产组装过程的资源损耗与能源投入.道路新建、消防工程以及储能系统的制冷设备等配套基础设施未纳入系统边界;设备材料的运输阶段由于占生命周期的环境影响很小,直接忽略^[12].

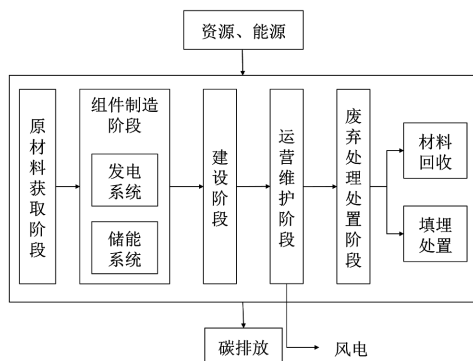


图 1 风力发电及储能系统边界

Fig.1 Boundary of wind power system with generation and storage

本研究的功能单位定义为 1kW·h 风力发电量.

1.2 数据来源

本研究建模的现场数据主要来自青海省尖扎县尖扎滩乡 200MW 风力发电项目.该风电场位于青海省黄南藏族自治州尖扎县,安装 40 台 SI-200500 机型风力发电机组,项目总装机容量为 200MW,并配备磷酸铁锂电池储能系统,预计年上网发电量为 44000 万 kW·h.选择该风力发电项目作为研究对象的原因包括:青海风能资源丰富,风力发电量大,约占全省发电量的 22%,具有地域代表性;该风电场采用 5MW 风力发电机组,符合目前风力发电机组大型化的发展趋势,并配备磷酸铁锂电池储能系统,以应对弃风问题.

其他背景数据来源于官方统计数据、CAS-RCEES 数据库、GaBi 数据库等.CAS-RCEES 数据库是中国科学院生态环境研究中心开发生命周期清单数据库,涵盖能源、交通等行业的清单背景数据,可广泛应用于生命周期评价领域.

1.3 清单分析

1.3.1 原材料获取阶段 原材料的投入主要依据组件物料清单(表 1).能源和基础原材料的碳排放数据主要根据 CAS-RCEES 数据库中材料单元数据由模型计算.

1.3.2 组件制造阶段 组件制造阶段作为风力发电及储能系统生命周期的上游阶段,主要涉及发电系统和储能系统设备及材料的生产制造^[7].组件制造阶段各类设备消耗材料清单如表 1 所示.数据来源为文献[13-14].

1.3.3 建设阶段 风力发电及储能系统在建设阶段所需主要能源物资有混凝土、钢筋、水资源等,工程建设使用机械设备所消耗的能源主要为电能和柴油.建设阶段消耗的基础材料与能源清单见表 2.

1.3.4 运营维护阶段 运营维护阶段的碳排放主要来自资源投入、运行耗能以及配件更新替换.其中,资源投入主要考虑润滑油和生活用水;运行耗能主要考虑照明系统、通风空调系统、通讯设备等用电;配件更新替换考虑风机的叶片和机舱,设定风机叶片更新比例为 1/3,即每台风机在运营周期内需要更换一片叶片,机舱的更新比例为 15%^[15].风电场的运行寿命设定为 20 年,自身用电

由国家电网提供.运营维护阶段的资源投入以及耗能清单见表 3.

表 1 组件制造阶段材料清单[g/(kW·h)]

Table 1 Material list of the manufacturing process[g/(kW·h)]

系统	设备	材料	数值
发电系统	风机	钢	1.55
		铁	3.09×10^{-1}
		铬	1.95×10^{-1}
		铜	1.52×10^{-2}
		铝	1.09×10^{-3}
		玻璃纤维	8.63×10^{-2}
		碳纤维	7.33×10^{-2}
		PVC	2.27×10^{-4}
		树脂	8.65×10^{-4}
		变压器油	1.20×10^{-2}
	箱变	铜	8.55×10^{-3}
		硅钢	1.72×10^{-2}
		铁	1.52×10^{-2}
	接地网	镀锌扁钢	4.06×10^{-3}
	架空线路	铝	6.22×10^{-3}
		铜	3.64×10^{-3}
	防腐涂料	硅酸盐	2.27×10^{-5}
	主变	钢铁	1.21×10^{-2}
		铜	3.41×10^{-3}
		树脂	3.79×10^{-4}
玻璃纤维		1.14×10^{-3}	
陶瓷/玻璃		3.79×10^{-4}	
变压器油		4.92×10^{-3}	
通信光缆	环氧树脂	1.41×10^{-5}	
	二氧化硅	2.50×10^{-6}	
开关柜	冷轧钢板	2.33×10^{-4}	
	涂层锌板	8.30×10^{-4}	
	铜	6.37×10^{-4}	
绝缘子	陶瓷	2.05×10^{-4}	
母线	铜	5.35×10^{-5}	
储能系统	磷酸铁锂电池	磷酸铁锂	1.40×10^{-2}
		炭黑	9.41×10^{-4}
		PVDF	1.17×10^{-3}
		石墨	7.33×10^{-3}
		六氟磷酸锂	1.45×10^{-3}
		EC	4.04×10^{-3}
		DMC	4.04×10^{-3}
		PET	8.82×10^{-4}
		铝	1.72×10^{-2}
		铜	1.55×10^{-2}
	变压器	铜	2.56×10^{-3}
		硅钢	5.16×10^{-3}
		铁	4.55×10^{-3}
	电池舱集装箱	变压器油	3.60×10^{-3}
	PCS 升压舱	钢板	6.82×10^{-3}
PCS 升压舱	钢板	3.00×10^{-3}	

1.3.5 废弃处理处置阶段 废弃处理处置阶段是风力发电及储能系统结束运行退役后对不同设备材料进行处理处置的阶段.

表 2 建设阶段材料与能源清单

Table 2 Material and energy list of the construction process

材料/能源	数量	单位
混凝土	2.01	g/(kW·h)
钢筋	3.82×10^1	g/(kW·h)
水资源	6.27	g/(kW·h)
柴油	8.53×10^{-2}	g/(kW·h)
电力	1.09×10^{-4}	kW·h/(kW·h)

表 3 运营维护阶段消耗资源与能源清单

Table 3 Material and energy list of the operation process

资源/能源	数量	单位
润滑油	1.50×10^{-2}	g/(kW·h)
水资源	6.22	g/(kW·h)
电力	1.71×10^{-3}	kW·h/(kW·h)

表 4 资源处理处置方式及比例

Table 4 Resource processing methods and proportions

序号	资源类型	处理方式	比例(%)
1	高分子材料(树脂等)	填埋	100
2	建筑材料(混凝土等)	填埋	100
3	金属材料(钢、铁、铜、铝等)	回收利用	50

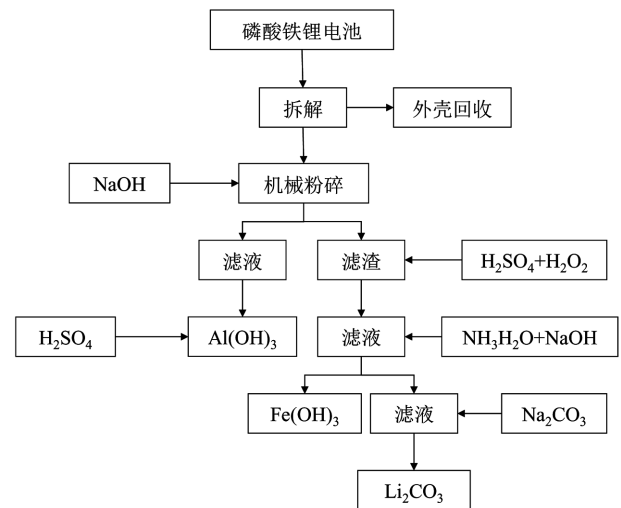


图 2 磷酸铁锂电池湿法回收工艺流程

Fig.2 Wet recovery process of lithium iron phosphate battery

发电系统:目前国内对风电设备处理处置的研究较少,因此参考国外风力发电退役阶段的情况.假设树脂等非金属材料采用填埋方式处理;钢筋混凝土基础直接废弃;钢、铁、铜等金属材料进行再生利用.理论上金属材料的回收利用率可以达到 85%及以上,本文设定金属材料的回收利用率为 50%^[16-17]

(表 4).

废金属再生过程考虑能源与材料的消耗,工艺流程数据来自文献[18-21].

储能系统:湿法工艺是目前回收废弃锂离子电池的主要工艺.本研究假定储能系统废弃的磷酸铁锂电池采用典型的湿法回收工艺(图 2)^[22-24].

磷酸铁锂电池湿法工艺消耗的资源种类和数量如表 5 所示,数据来源为文献[22,25-26].

表 5 磷酸铁锂电池湿法工艺消耗资源清单

Table 5 Material list of wet process of lithium iron phosphate battery

原料	数量	单位
氯化钠	1.88×10^{-4}	g/(kW·h)
氢氧化钠	2.98×10^{-4}	g/(kW·h)
硫酸(98%)	9.55×10^{-3}	g/(kW·h)
工业水	8.87×10^{-2}	g/(kW·h)
双氧水(30%)	2.09×10^{-3}	g/(kW·h)
碳酸钠	7.26×10^{-3}	g/(kW·h)
氢氧化钙	2.00×10^{-4}	g/(kW·h)
电力	1.57×10^{-5}	kW·h/(kW·h)
天然气	2.10×10^{-5}	g/(kW·h)

1.4 碳足迹计算方法

本研究采用 Gabi 软件对风电场的生命周期过程进行建模,并选用 IPCC 推荐的全球变暖潜势(GWP)来表征碳足迹,单位为 $gCO_2/(kW \cdot h)$.

计算公式为:

$$GWP = E_{\text{原材料获取}} + E_{\text{组件制造}} + E_{\text{建设}} + E_{\text{运营维护}} + E_{\text{废弃处理处置}}$$

2 结果与分析

2.1 风力发电及储能系统碳足迹

经过模型计算,我国典型风电场(包括风力发电及储能系统)生命周期碳排放(碳足迹)为 $8.44gCO_2/(kW \cdot h)$.与其他文献风力发电的碳足迹计算结果进行比较($4.4 \sim 28.2g/(kW \cdot h)$),本文的研究结果位于其他研究结果的区间之内,是相对合理的^[8,26-29].

通过与其他发电方式的碳足迹进行对比,风力发电的碳足迹远低于火力发电,也低于光电、水电等其他清洁能源发电(图 3)^[4].相比煤电等传统发电,风力发电每度电可减少碳排放约 $0.5 \sim 1kg$,碳减排潜力巨大.

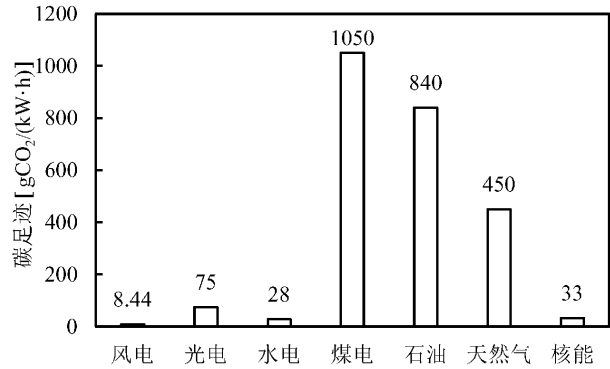


图 3 不同发电方式碳足迹

Fig.3 Carbon footprint of different power generation methods

分析风电场各生命周期阶段的碳足迹,结果表明组件制造阶段(含材料)的碳足迹最大,达到 $6.25gCO_2/(kW \cdot h)$,占比 74.02%;其次是运营维护阶段($1.91gCO_2/(kW \cdot h)$),占比 22.61%;而建设阶段的碳足迹相对较小,仅为 $1.04gCO_2/(kW \cdot h)$ (12.30%);废弃处理处置阶段由于对金属材料进行再生利用,减少了对应材料的生产制造,该阶段的碳足迹为负值($-0.74gCO_2/(kW \cdot h)$),即减少了总碳足迹的 8.75%.因此,组件制造阶段(含原材料)和废弃处理处置阶段是影响风力发电及储能系统碳足迹的重要阶段.

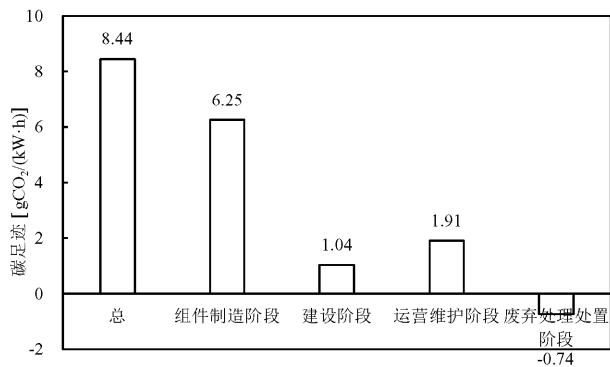


图 4 风力发电及储能系统碳足迹

Fig.4 Carbon footprint of wind power system with generation and storage

进一步分析组件制造阶段,93.82%的碳足迹来自发电系统,6.18%来自储能系统.而发电系统中,风力发电机的碳足迹贡献最大,其主要来源于材料的碳足迹.例如本研究中所分析的 5.0MW 风力发电机涉及的碳足迹较高的材料包括钢、铬、铁等金属材料以及碳纤维、玻璃纤维等非金属材料,其中钢对风力发电机碳足迹的贡献最大(图 5).因此,降低组件制

造阶段的碳足迹可以优先考虑减少金属材料尤其是钢的用量。

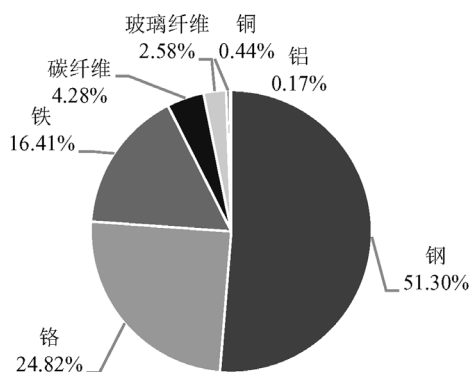


图5 5.0MW风力发电机不同材料的碳足迹贡献

Fig.5 Carbon footprint contribution of different materials for 5.0MW wind turbine

废弃处理处置阶段通过对金属材料进行再生利用,减少对应材料的消耗,可减少碳足迹约 $0.74\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。图6显示了金属材料回收利用对碳足迹的贡献,其中贡献最大的是钢($-0.50\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$),其次是铬($-0.24\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$)和铁($-0.16\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$)。

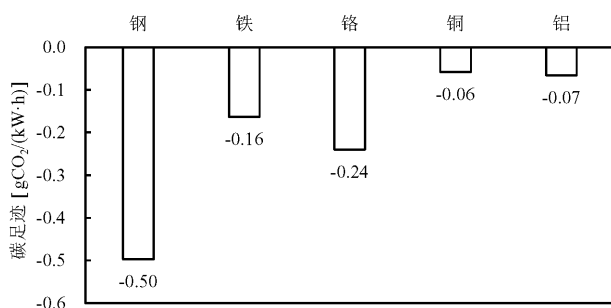


图6 金属材料的回收利用的碳足迹

Fig.6 Carbon footprint of metal material recycling

2.2 储能系统对碳足迹的影响

由于风能具有随机性和间歇性的特点,在发电时会导致电能不稳定、不可持续等问题,造成弃风问题。目前我国新建的风电场均采用增加储能系统来解决弃风问题。增加的储能系统的本身一定会直接增加二氧化碳排放,但由于储能系统的引入会增加系统的有效发电量,从生命周期的角度需要评估储能系统对风电场碳足迹的影响。

本研究风电场采用磷酸铁锂储能电池的容量为 60MWh ,假设年充放电次数为400次。按照目前的

弃风比率,风电场20年的运行期内不安装储能系统共浪费约48000万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电量,风电场的总发电量由880000万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 降至832000万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,而二氧化碳排放由74300t降至71219t,通过模型计算无储能系统的风电场碳足迹变为 $8.56\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$,比原来的系统碳足迹($8.44\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$)略微增加。^[30]这证明在风电场安装储能系统一方面减少了弃风问题,增加有效发电量,另一方面降低了系统碳足迹,同时具备经济和环境效益。

2.3 展望

本研究仍存在一些不足:由于国内目前LCA数据库尚不完善,目前国内外针对风力发电机、变压器等设备的生产制造数据质量有待提高,可能对最终计算结果造成一定的不确定性。

未来研究可以从以下两方面进行完善:(1)可采用生命周期评价方法,进一步对风力发电的其他环境影响进行测算,如酸化潜力、生态毒性、资源消耗等,对风力发电环境影响进行全面评价;(2)本文仅研究磷酸铁锂电池作为风电场的储能系统,随着储能市场的扩大,液流电池储能、飞轮储能、压缩空气储能等新型储能技术不断出现。未来可考虑开展风力发电与不同储能技术的碳足迹情景分析研究,对我国新能源高质量发展,实现“双碳”目标具有重要意义。

3 结论

3.1 风力发电及储能系统的碳足迹为 $8.44\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$,相比火电等传统发电方式可降低95%以上,碳减排效益明显。

3.2 系统碳足迹的95.85%来自发电系统,4.15%来自储能系统;组件制造阶段对碳足迹的贡献最大(74.02%),其次为运营维护阶段(22.61%)和建设阶段(12.30%),废弃处理处置阶段碳足迹为 $-0.74\text{gCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

3.3 安装储能系统一方面减少了弃风问题,增加有效发电量,另一方面降低了降低单位风力发电量的碳排放,即减少碳足迹,同时具备经济和环保效益。

参考文献:

- [1] Hutchinson M, Zhao F. Global wind report 2023 [R]. Brussels, Belgium, 2023.
- [2] Ardente F, Beccali M, Cellura M, et al. Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm [J]. Renewable & Sustainable

- Energy Reviews, 2008,12(1):200–217.
- [3] Raadal H L, Vold B I, Myhr A, et al. GHG emissions and energy performance of offshore wind power [J]. *Renewable Energy*, 2014,66: 314–324.
- [4] Kaldellis J K, Apostolou D. Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart [J]. *Renewable Energy*, 2017,108:72–84.
- [5] 杨东,刘晶茹,杨建新,等.基于生命周期评价的风力发电机碳足迹分析 [J]. *环境科学学报*, 2015,35(3):927–934.
- Yang D, Liu J R, Yang J X, et al. Carbon footprint of wind turbine by life cycle assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015,35(3): 927–934.
- [6] Demir N, Taskin A. Life cycle assessment of wind turbines in Pinarbai-Kayseri [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013,54:253–263.
- [7] 吴凡.基于LCA理论的风电项目碳减排效果分析 [D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- Wu F. Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on LCA Theory [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [8] Li Q, Duan H, Xie M, et al. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40MW wind farm with consideration of the infrastructure [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021,138:110499.
- [9] Arvesen A, Hertwich E G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012,16(8): 5994–6006.
- [10] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径 [J]. *中国电机工程学报*, 2023,43(5):1663–1672.
- Shu, Y B, Zhao, Y, Zhao, L, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2023, 43(5):1663–1672.
- [11] Deng C, Zhang L, Gan M, et al. Economic and environmental feasibility of coupled wind power–subsurface compressed CO₂ energy storage system in China: An LCA approach [J]. *Gas Science and Engineering*, 2024,128:205399.
- [12] Tremecac B, Meunier F. Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009,13(8): 2104–2110.
- [13] Sagar Mali P G. Life cycle assessment of electricity production from an onshore V136–4.2MW Wind Plant [R]. 2022.
- [14] van Hagen L, Petrick K, Wilhelm S, et al. Life-cycle assessment of a multi-megawatt airborne wind energy system [J]. *Energies*, 2023, 16(4):1750–1772.
- [15] Chen G Q, Yang Q, Zhao Y H. Renewability of wind power in China: A case study of nonrenewable energy cost and greenhouse gas emission by a plant in Guangxi [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011,15(5):2322–2329.
- [16] Martinez E, Jimenez E, Blanco J, et al. LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine [J]. *Applied Energy*, 2010,87(7):2293–2303.
- [17] Weinzettel J, Reenaas M, Solli C, et al. Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2009,34(3): 742–747.
- [18] Na H, Qiu Z, Sun J, et al. Revealing cradle-to-gate CO₂ emissions for steel product producing by different technological pathways based on material flow analysis [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2024,203:107416.
- [19] Burchart-Korol D. Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013,54:235–243.
- [20] 丁宁,高峰,王志宏,等.原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比 [J]. *中国有色金属学报*, 2012,22(10):2908–2915.
- Ding N, Gao F, Wang Z H, et al. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012,22(10):2908–2915.
- [21] 王涛,岳波,孟棒棒,等.再生铜生产的生命周期评价 [J]. *环境工程*, 2024,42(7):225–232.
- Wang T, Yue T, Meng B B, et al. A life cycle assessment of secondary copper production [J]. *Environmental Engineering*, 2024,42(7):225–232.
- [22] 程冬冬.基于绿色发展理念的锂离子电池生命周期环境效益研究 [D]. 广州:广东工业大学, 2019.
- Cheng D D. Study on environmental benefits of lithium-ion batteries in life cycle based on green development concept [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [23] 李响.基于全生命周期的电动汽车锂电池环境效益评价 [D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2022.
- Li X. Environmental benefit evaluation of electric vehicle lithium battery based on life cycle [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2022.
- [24] Tao Y, Sun T, Wang Z. Uncovering various paths for environmentally recycling lithium iron phosphate batteries through life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,393:136263.
- [25] Jiang S, Hua H, Zhang L, et al. Environmental impacts of hydrometallurgical recycling and reusing for manufacturing of lithium-ion traction batteries in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,811:152224.
- [26] 于海洋.“双碳”目标下风储电站全生命周期碳排放评估方法研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2022.
- Yu H Y. Research on life cycle carbon emission assessment method of wind storage power plant under carbon peaking and carbon neutrality goals [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [27] Velez-Henao J-A, Vivanco D F. Hybrid life cycle assessment of an onshore wind farm including direct and indirect services: A case study in Guajira, Colombia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,284:112058.
- [28] Ozsahin B, Elginoz N, Germirli Babuna F. Life cycle assessment of a wind farm in Turkey [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022,29(47):71000–71013.
- [29] Liu P, Liu L, Xu X, et al. Carbon footprint and carbon emission intensity of grassland wind farms in Inner Mongolia [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,313:127878.
- [30] Lima L d S, Quartier M, Buchmayr A, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021,46:101286.

作者简介: 陈雅禾(2000-),女,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为环境经济与环境管理.yhchen_st@rcees.ac.cn.