

陆上风电碳足迹动态变化的国际比较研究

杨敬言¹, 阮梓纹¹, 杨秀², 李朝君¹, 边少卿¹, 鲁玺^{1,3,4,5*}, 贺克斌^{1,3,4,5}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 北京 100084; 3. 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 4. 清华大学碳中和研究院, 北京 100084; 5. 环境前沿技术北京实验室, 北京 100084)

摘要: 碳中和目标下国际风电产业将继续扩大规模, 碳市场、碳关税等国际气候减排政策工具也在不断完善, 未来可再生能源碳足迹对相关产业成本与发展将产生重要影响。本文以中国、欧洲、美国等风电产业优势国家和地区作为研究对象, 构建陆上风电系统生命周期评价过程、生命周期清单, 完成相关地区陆上风电碳足迹的参数比较并总结变化趋势, 进一步分析趋势成因并阐明影响因素。结果表明, 在风力机大型化加速、发电效率提高、工业生产清洁化的态势下, 2011—2022 年世界优势地区的陆上风电碳足迹均呈下降趋势, 中国、欧洲、美国的平均降幅分别为 49.2%、46.2%、20.8%, 相应下降量均集中在设备生产阶段; 中国已将碳足迹下降至与欧洲接近的水平, 与美国的差距缩减到 3.63 g/kW·h, 其中工业生产清洁化水平不高、风机容量因子偏低分别是中国陆上风电碳足迹高于欧洲、美国的主要原因。中国在推进风电产业发展的过程中, 需着重提高风电系统发电效率、加快改善产业清洁化生产水平、支持风电系统退役回收产业发展, 以稳步降低陆上风电系统生命周期内的碳足迹。

关键词: 风电; 生命周期评价; 碳足迹; 国际比较; 风力机大型化; 工业生产清洁化

中图分类号: X828 **文献标识码:** A

International Comparative Study on Dynamic Change of Onshore Wind Power Carbon Footprint

Yang Jingyan¹, Ruan Ziwen¹, Yang Xiu², Li Chaojun¹, Bian Shaoqing¹,
Lu Xi^{1,3,4,5*}, He Kebin^{1,3,4,5}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Climate Change and Sustainable Development, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Beijing 100084, China; 4. Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. Beijing Laboratory of Environmental Frontier Technologies, Beijing 100084, China)

Abstract: The global wind energy industry is expected to expand in the context of carbon neutralization. Meanwhile, with the continuous improvement in carbon reduction tools such as carbon market and carbon tariffs, the carbon footprint of renewable energy may impact the cost and development of wind power in the future. Taking China, Europe, and the United States as the research object, this study constructs the lifecycle evaluation process and list of onshore wind power systems, conducts parameter comparison

收稿日期: 2024-02-08; 修回日期: 2024-04-19

通讯作者: *鲁玺, 清华大学环境学院教授, 研究方向为大气环境与低碳能源系统; E-mail: xilu@tsinghua.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3702902); 中国工程院咨询项目“碳达峰碳中和重大制度问题研究”(2022-PP-01); 国家自然科学基金项目(72243007, 72025401)

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

regarding the carbon footprint of onshore wind power in relevant regions, and summarizes the change trends. Moreover, it analyzes the cause of the trend and clarifies the influencing factors. The results indicate that the carbon footprint of onshore wind power shows a downward trend in the aforementioned regions from 2011 to 2022 owing to the large-scale wind turbines, improved generation efficiency, and cleanliness of industrial production. Specifically, the average decrease in China, Europe, and the United States was 49.2%, 46.2%, and 20.8%, respectively, and the decrease was concentrated in the equipment production stage. China has reduced its carbon footprint to a level close to Europe, and its gap with the United States has been reduced to 3.63 g/kW·h. However, China still lags behind Europe and the United States in terms of industrial production cleanliness and fan capacity factor, respectively. In the process of promoting industrial development, China should further promote the power generation efficiency of its wind power system, improve the cleanliness of industrial production, and support the recycling of decommissioned wind power systems, so as to steadily reduce the carbon footprints within the lifecycle of onshore wind power systems.

Keywords: wind power; lifecycle assessment; carbon footprint; international comparison; large-scale wind turbines; industrial production cleanliness

一、前言

在未来实现碳中和逐渐成为国际社会普遍共识的背景下,风能作为可再生、污染小、安全的清洁能源具有重要的发展价值。近年来,全球风电产业保持快速增长态势,未来增长潜力仍较为可观:全球风电累计装机量从2000年的24 GW增长至2022年的906 GW,年均增长率为18%^[1];联合国气候变化大会提出,2030年全球可再生能源装机量将增长至2022年年底的3倍。在世界范围内,中国、欧洲、美国3个国家和地区的风电产业最为发达。2022年,亚太、欧洲、北美等地区的风力发电量占全球总量的92.47%,其中亚太、北美地区分别以中国、美国的贡献为主^[2]。

纵观国际风电产业发展过程,欧洲、美国起步较早,在20世纪90年代即成为风电建设的主导力量。2010年之后为全球风电装机的扩张期,中国风电产业保持着高速发展,2022年的陆上风力机累计装机量位居世界第一(占比为40%);形成了完整的风电产业链,风电装备制造规模居世界首位,风电机组及关键大部件产量的全球占比超过60%。在国内市场以外,风电机组出口量逐年增加,海外市场的发展空间广阔。当前,我国风力机出口集中在东南亚地区,而面向欧美市场推广存在欧美本土制造商占有率高、技术标准要求高等阻碍。在全球碳减排的背景下,碳关税、碳市场等气候减排政策工具逐步完善并得到推广应用,在发挥全球减碳积极作用的同时也可能导致绿色壁垒等问题,未来可能基于碳足迹成本内化而对可再生能源的成本竞争力、全球合作等产生一定的影响^[3]。

风电碳足迹的高低受多种因素影响而显复杂,与所处地区的背景条件密切相关而具有明显的地区

差异性,主要表现在3个方面:地区工业生产背景,风电碳足迹涉及原材料的生产加工,受上游供应链与产业链的影响明显^[4];风力机大型化程度,增大风力机尺寸可使单位兆瓦风力机制造消耗物质减少,也带来更大的扫风面积、更优的(局部)风能资源条件,有利于提高风力机容量因子^[5];地区风能资源条件,全球不同地区的风能资源丰富度有差异,地区整体风速状况可直接影响地区风力机发电量,从而影响单位发电的碳足迹^[6]。

生命周期评价(LCA)是一种通用的环境评估方法,通过明确研究对象生命周期内能源、材料输入/输出的废弃物和排放物,提供有关环境影响的量化结果。例如,当关注温室效应时,LCA可采用全球增温潜能(GWP)这一环境影响指标,量化与产品、服务、活动相关的温室气体排放情况,以获得研究对象对温室效应的贡献度。当前,已有较多研究采用LCA方法对风电系统碳足迹进行评估,建立了关于风电环境影响构成的成熟认识,如分析了某特定风场中风力机产生的环境影响^[7-11],评估了不同尺寸、技术方案、先进概念的风力机并探究对应环境影响的差异性^[12-15]。也要注意,已有研究主要面向风力机产业链,属于对特定风力机与风电场产生环境影响的静态研究,选择的系统边界、方法框架不尽相同,存在结果波动范围较大、可比性不佳的问题^[16];也未合理体现地区工业生产水平、机型大型化、风能资源不同带来的碳足迹差异性,对风电产业宏观态势研判及发展研究的支撑价值不明。

面对我国风电产业海外市场继续扩大、国际减排政策工具逐步推广的发展现状,广泛开展以风电为重点的可再生能源碳足迹研究,及时开展与具有产业竞争性及可比性的欧美地区的对比研究,具有

迫切性。考虑到海上风电场、陆上风电场的LCA具有显著的差异^[17]，且海上风力机发展更晚、当前的装机规模也远小于陆上风力机，本研究选取发展较早、应用规模更大的陆上风力机进行研究（下文的风力机均指陆上风力机）。本文以中国、欧洲、美国等风电产业优势国家和地区作为研究对象，结合风电产业链实际构建风电系统LCA模型，对风力机的尺寸、容量因子、工业生产等相关参数进行动态表征和区域差分，揭示并比较2011—2022年相关地区的风电系统生命周期内碳足迹变化趋势；总结碳足迹下降的国际经验，提出我国风电产业进一步降低碳足迹的发展建议，支持提高国际市场产业竞争力和可持续发展能力。

二、研究方法 with 数据来源

（一）风电系统生命周期评价目标与范围

本研究考虑风电技术随时间发展而变化、各地区生产运行条件存在差别等时空差异因素，采用LCA方法研究风电系统在不同地区与时间的碳足迹，以风电系统产生单位电力输送到电网为功能单元，相应风电场的运行周期设为20年^[18]。

根据风电产业链实际情况，本研究构建了风电系统的LCA系统边界（见图1），涵盖风电系统生命周期内的主要产业活动。① 风电场的生产制造环节，包含风力机的叶片、发电机、塔筒、齿轮箱等组成部件，变电站、输电电缆所需的材料；该环节

是材料的主要输入环节，较多耗费钢、铁、树脂、玻璃纤维等材料以及能源。② 风电场的建设与安装环节，主要包括基底建设、部件组装施工：前者主要消耗混凝土、钢等材料，后者耗费电能和水。③ 风电场的运行维护过程，输出风力机产生的电力，是主要的环境效益来源；还需对风电场进行维护，如例行检修和零部件更换，需耗费润滑油、冷却剂等材料。④ 回收处置环节，对寿命结束的风电场进行拆卸处理，对金属材料进行回收、填埋或焚烧等处理；其中的回收材料将产生负的碳排放，可对生产环节的碳足迹起到一定的抵消作用。⑤ 运输环节贯穿在风电系统生命周期中，如风力机组成部件、风电场建设材料通过运输到达建设场地，运行维护阶段中专业人员通勤、回收处置阶段的材料处理也涉及运输过程。

本研究的时间范围选取为2011—2022年，这是因为风电产业已越过起步探索期并进入成熟发展期。具体地，2007年全球风电累计装机量小于100 GW，2010年相应规模达到200 GW（接近2022年的1/5），因而研究时间范围起点选取为产业具有一定规模的2010年。2010年以来，随着风力机技术快速发展、风电成本稳步降低，风力机的容量因子、平均尺寸等技术参数表现出明显的变化趋势，契合研究需求。

（二）生命周期清单构建

本研究根据公开文献、国外风力机整机制造商发布的风力机LCA报告^[19-22]、中国风能协会和国内

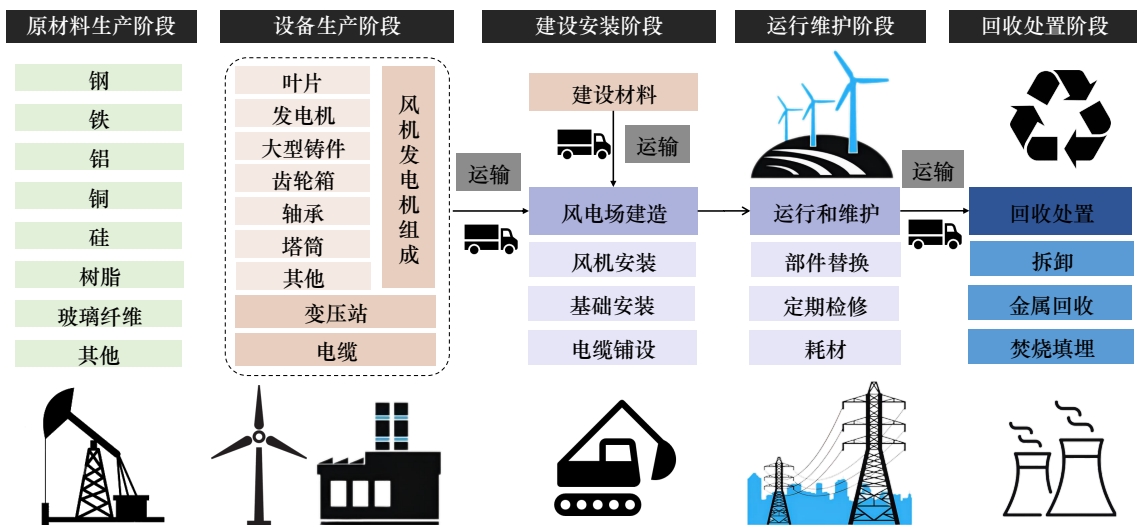


图1 风电系统的LCA系统边界

风力机整机制造商提供数据，构建风电系统生命周期清单数据。相关清单涵盖单台风力机制造所需的材料，整个风电场建造、后续运行维护等环节耗费的物料。不同尺寸（即不同额定功率）的风力机，在制造和后续建设过程中投入的物质与能量有差别，生命周期内的发电量也存在差异。为此，按照额定功率对风力机进行划分，构建不同尺寸风电系统生命周期清单数据。

设备生产阶段作为生命周期的上游环节，涉及风力发电机、变压器、电缆等设备的制造。风力发电机整体由叶片、齿轮箱、发电机、铸件、变频器、轴承、主轴、机舱罩等零部件组成。风电场具有变换电压的需求，假定每个风电场建有1台主变压器，每台风力机配有1台箱式变压器。风力发电机与箱式变电站、箱式变电站与变电站之间均通过电缆相连^[9]。

建设安装阶段指设备与材料运送到场地后，开展主体工程建设、风力机设备吊装/安装的阶段，需要大量使用混凝土、钢筋等材料，也会消耗电能和水资源。清单数据为单台风力机对应的风电场建设所需投入。

风电场需要进行定期检查与维护，运行维护阶段包含在20年的生命周期中，主要消耗润滑油、液压油、冷却液、风力机备件等材料，维修检查人员的通勤也会产生一定的碳排放^[10]。根据文献调研结果，合理假设风力机相关零部件替换率（见表1）^[13]。

回收处置阶段主要对风力机构成材料进行拆卸、回收和处置，回收材料视为从风电系统中输出材料，在清单中用负值表示，起到减少碳足迹的作用。本研究假设：风力机构成（包含塔筒）中的钢、铁、铝、铜等金属材料具有90%的回收率，但回收带来的减排效益产生于下次使用，故此次采用减碳效益的50%；树脂、硅、玻璃纤维等采取焚烧方式处理；建设阶段耗材材料采用填埋方式处理^[23]。

表1 风力机零部件的故障率与替换率设定

零部件	齿轮箱		发电机		叶片和转子	
	2011年	2021年	2011年	2021年	2011年	2021年
故障率/ 20年	2%	1.6%	2.4%	1.92%	0	0
替换率/ 20年	50%	40%	24%	19.2%	30%	24%

已有风电系统LCA研究表明，运输环节在生命周期内碳排放中的占比通常不高，对时空差异的影响也有限。本研究同样不细致刻画运输环节的影响，对同一地区采用合理数据进行衡量即可：①对于中国，根据风力机整机制造商、中国风能协会提供的风电设备生产基地与风电场位置，采用最短距离法估算各省份的平均运输距离，再结合各省份累计装机量进行加权平均，得到的平均运输距离为476.91 km；②对于欧洲，文献调研而得的设备运输距离为125 km^[14,15]；③对于美国，考虑到区域整体面积与中国相当，直接采用中国数据进行对应计算。建设安装阶段的混凝土、钢等材料从风电场附近就近运输，3个地区的运输距离均设为50 km。对于回收处置阶段，假设金属等回收材料的运输距离为100 km，环氧树脂、玻璃纤维等材料运送到焚烧场的距离为10 km。用于风电场基地建设的混凝土等材料，就地填埋^[18]。运输方式为公路货车运输，消耗燃料为柴油。

根据以上生命周期阶段划分，本研究分别针对1.5 MW以下、1.5~2 MW、2~3 MW、3~4 MW、4~5 MW、5~7 MW等6类尺寸的风力机进行生命周期清单构建（见表2~5）。建立生命周期清单后，还需结合物质和能量的特征化因子来计算碳足迹。通过中国产品生命周期温室气体排放系数库、Gabi professional数据库、文献调研^[9,24]获得中国、欧洲、美国3个国家和地区清单中主要物质与处理方式的碳排放因子。对于冷却液、液压油等用量小且影响低的物质，欧洲、美国均沿用中国数据。对于填埋、焚烧处理等缺乏地区差异性的环节排放因子，均采用Gabi professional数据库提供的数据。

值得说明的是，由于钢、铁等原材料生产过程中电力投入产生的碳足迹包含在此处物质的整体碳排放因子中，故生命周期清单中的电力仅为建设组装过程中单独的电力消耗，不包括钢、铁等原材料生产过程中的电力投入量；实际物质生产与处理方式的碳排放因子存在时间动态变化，本研究因着重关注地区差异而假定不存在时空动态变化，这与实际情况是存在一定偏差的。

碳足迹计算方法为风力机生命周期产生的总碳足迹除以风力机在20年运行时间内的总发电量^[25]。1个地区的风力机生命周期内总碳排放量，通过该地区对应年份的风力机平均尺寸下生命周期各环节

表2 不同尺寸风力机对应的风电系统设备生产阶段清单

设备	材料	1.5 MW 以下	1.5~2 MW	2~3 MW	3~4 MW	4~5 MW	5~7 MW
风力机	钢/t	73.2	150	160	240	283.52	534.76
	铁/t	11.87	29.3	40	49.71	65.04	77
	铜/t	2.41	1.99	3	3.99	5.2	9.6
	树脂/t	5.29	10	10.44	12.6	17.64	34
	玻璃纤维/t	4.8	21.77	21.2	23	27.32	40.18
	硅/t	0.4	0.1	0.5	0.5	0.75	1
	铝/t	0.6	2.6	2.1	2.31	6	11.47
	润滑油/t	—	—	0.56	0.77	1.12	2.82
	冷却液/t	—	—	0.16	0.43	0.28	0
	稀土/t	0.7	1.2	1.6	2.4	3.2	4
主变压器	电/MW·h	7.2	15.77	17.34	22.32	29.64	51.75
	硅/t	0.01	0.03	0.04	0.05	0.07	0.11
	钢/t	0.21	0.42	0.56	0.84	1.12	1.68
	铜/t	0.1	0.2	0.27	0.41	0.54	0.81
	铁/t	0.16	0.31	0.42	0.62	0.83	1.25
35 kV 箱式 变压器	润滑油/t	0.14	0.29	0.38	0.57	0.76	1.14
	铜/t	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	铁/t	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
	硅/t	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
线缆	钢/t	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	铜/t	0.34	0.7	0.91	0.98	1.6	1.65
	铝/t	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
	树脂/t	—	0.37	14.2	14.1	14	14.23

注：设备生产阶段主要数据来源于中国风能协会和风力机整机制造商。

表3 不同尺寸风力机对应的风电系统建设安装阶段清单

材料	1.5 MW 以下	1.5~2 MW	2~3 MW	3~4 MW	4~5 MW	5~7 MW
混凝土/t	644	805	751	987	1186	2174
钢/t	21.6	27	38.28	45	63.96	104.12
电/MW·h	7.5	9.38	8.74	11.49	13.81	25.32
水/t	1125	1406	1994	2344	4321	5423

注：建设安装阶段数据参考风力机整机制造商的公开报告进行测算。

表4 不同尺寸风力机对应的风电系统运行维护阶段清单

材料	1.5 MW 以下	1.5~2 MW	2~3 MW	3~4 MW	4~5 MW	5~7 MW
润滑油/t	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66
液压油/t	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
冷却液/t	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
柴油/t	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2

表5 不同尺寸风力机对应的风电系统回收处置阶段清单

项目	材料	1.5 MW 以下	1.5~2 MW	2~3 MW	3~4 MW	4~5 MW	5~7 MW
90%回收	铜/t	-3.28	-5.13	-5.14	-7.73	-7.32	-11.57
	铁/t	-12.32	-28.14	-37.87	-36.10	-60.78	-71.92
	钢/t	-68.32	-137.63	-146.75	-219.01	-258.43	-485.04
	铝/t	-0.95	-2.75	-7.61	-8.41	-11.05	-16.04
焚烧	树脂/t	5.29	10.37	24.64	14.13	31.64	48.23
	硅/t	0.49	0.21	0.62	0.63	0.90	1.19
	玻璃纤维/t	4.69	21.28	20.72	11.73	26.70	39.27
填埋	建设材料/t	665.6	832	789.16	1032	1269	2278

注：回收处置阶段数据基于上述阶段材料投入进行测算。

投入的物质及能量与对应排放因子相乘并加总获得。总发电量通过风力机额定功率与对应的容量因子和总发电小时数连续相乘获得。

三、主要地区风电碳足迹的参数比较及变化趋势

1个地区风电碳足迹的高低，受风力机大型化程度、风能资源优劣、地区工业生产清洁程度等背景因素的直接影响。本研究选取中国、欧洲、美国作为研究对象，分析2011—2022年的风力机平均尺寸、风力机容量因子、一次能源中化石能源占比、电网碳排放因子4个参数，剖析相应参数表现优越的原因，直观体现不同地区背景因素的差异性，总结形成国际发展经验。

（一）各国风力机平均尺寸均逐年提升

本研究涉及的风力机历年新增装机平均尺寸数据，来源于中国风能委员会发布的《2022年中国风电吊装容量统计简报》、美国能源部发布的风力机技术市场报告^[26]、欧洲风能协会发布的欧洲（含英国）风电数据报告^[27]（见图2(a)）。近年来，在制造技术和工艺进步、行业补贴水平下降、市场竞争增强的背景下，持续提升单台风力机的发电额定功率成为世界风电产业的重要趋势。增大风力机尺寸，有利于降低单位兆瓦风力机制造需消耗的材料数量，带来更大的扫风面积、高处更优的风能资源条件，直接提高风力机容量因子，相关数据显示，全球风电容量因子从2011年的27%增长至2021年的39%^[28]。

2011—2022年，中国、欧洲、美国的风力机均

呈现大型化趋势，平均尺寸（对应的发电额定功率，下同）从2011年的1.82 MW提升至2022年的3.87 MW。在2020年前，一直维持着欧洲的尺寸最大、美国其次、中国最小的格局。欧洲的风力机大型化程度更加迅速，2021年平均尺寸率先达到4 MW，美国自2019年以来的年均尺寸增长率约为4%。在中国，风电产业起步较晚、相关技术不够成熟导致风力机平均尺寸较小，2011年的平均尺寸（1.5 MW）明显小于欧洲和美国；通过积极引进国际先进的产品与技术、加快研发并构建自主技术体系，风力机大型化逐步加快：2021年的平均尺寸为3.1 MW，已与美国相当；2022年的平均尺寸增长至4.3 MW，已超过欧洲。

（二）美国风力机容量因子显著占优

容量因子是风力机实际发电量与额定发电量的比值，用于衡量风力机运行稳定性和发电效率，与风电场选址、场地风能资源质量、风力机尺寸、风力机设计性能等因素有关。本研究涉及的风力机容量因子，中国数据来源于《中国能源大数据报告（2022）》公布的全国整体风电利用小时数，2017年以来的欧洲、美国数据来源于欧洲风能协会和美国能源部发布的相关报告^[26,27]，2017年之前的欧洲数据根据陆上风力机发电量与装机量估算而得（见图2(b)）。中国、欧洲、美国的风力机容量因子变化趋势存在较大差异：2011年，3个地区的容量因子均为20%~27%；随后，中国、欧洲的风力机容量因子变化缓慢，而美国在2011—2014年快速提高并率先达到40%。

中国的风力机容量因子经历了先增长、后降低、再增长的变化过程。其中，2013—2015年由于

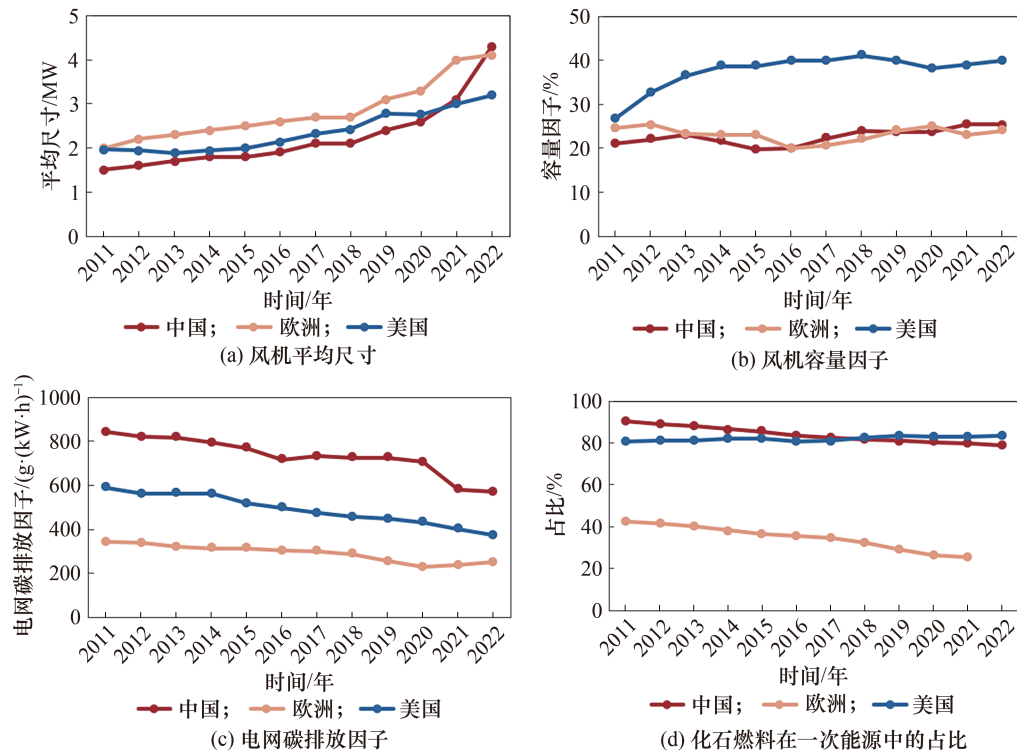


图2 不同地区风力机平均尺寸、容量因子、电网排放因子变化趋势

新能源装机与负荷分布不匹配、电网跨区外送能力不高、灵活性电源装机占比较低，产生了较为严重的弃风问题，使风力机容量因子从23%下滑至20%左右。为此，国家不断优化风电产业布局、出台措施促进风电消纳，使弃风问题有所改善。2017年、2018年的容量因子较2016年明显提高，2018—2020年基本保持平稳，2021年、2022年因风力机平均尺寸的快速增长而使容量因子增长到25%。

欧洲的风力机容量因子在20%~25%内小幅波动，未见明显变化。这是因为，欧洲风电场选址的风力资源质量普遍不高，旧的风力机数量较多且升级改造力度不足，稀释了新建风力机对容量因子的提升作用。

美国风力机容量因子的快速提高，主要源于风力机平均比功率急剧下降（即风力机具有更高的能量利用效率）、新建风电场选址的风能资源质量显著改善、风力机大型化带来更好的风能资源利用能力。美国针对风电市场份额增长可能带来更高的弃风率问题采取了有效应对措施，如得克萨斯州新建输电系统，使2014年的电力市场弃风率仅为0.5%，较2009年的17%大幅下降。2018年以来，美国风力机平均比功率略有上升、风电场选址被动转向风

力资源质量偏低的地区，导致风力机容量因子小幅下降，但整体上维持在约40%的高位^[26]。

（三）各国电网碳排放因子均降低

本研究涉及的2011—2022年中国电网碳排放因子，根据国际能源机构（IEA）统计的中国电力生产产生的CO₂排放总量^[29]、中国电力企业联合会发布的中国每年发电量、生态环境部发布的相关数据等计算而得。欧洲电网的碳排放因子直接采用欧洲环境署公布的欧盟电力生产温室气体排放强度^[30]。美国的部分数据直接来源于美国国家环境保护局发布的温室气体排放因子中的电力部分数据，缺失年份的数据同样利用IEA数据、美国对应年份的总发电量等进行计算^[31]。（见图2(c)）

2011—2022年，中国、美国、欧洲的电网碳排放因子均呈显著下降趋势，2022年较2011年分别下降32%、37%、27%。从电网碳排放因子水平看，欧洲具有最清洁的电力生产条件，2022年为251 g/kW·h，美国为373 g/kW·h，中国为570 g/kW·h。2011—2022年，中国电网碳排放因子的平均水平分别比欧洲、美国高442 g/kW·h、243 g/kW·h。

电力碳排放因子的高低与一次能源结构密切相

关，中国、美国、欧洲碳排放因子下降与能源结构中碳排放强度更低的能源占比提高有关，相关数据源自《中国能源大数据报告（2022）》、Eurostat Statistics Explained^[32]、美国能源信息管理局^[33]（见图2(d)）。欧洲电力生产最为清洁，主要原因是一次能源结构中化石燃料占比一直显著低于中国和美国，也从2011年的42.6%显著下降至2021年的25.4%，碳排放强度较低的风电、光伏发电、核能发电等被大量使用。中国、美国的一次能源中化石燃料占比相当：前者在80%~85%的范围内波动；后者从2011年的90.4%下降至2022年的78.9%，从2018年开始低于前者。然而，中国化石燃料构成中以碳排放强度最高的煤炭为主体，煤炭的相应占比尽管保持下降趋势，但2022年仍高于65%，更为清洁的天然气占比低于7%。美国化石燃料构成中以碳排放强度最低的天然气为主，且在一次能源中的占比从2011年的33.8%提升至2022年的46.1%；碳排放强度介于天然气和煤炭之间的石油占比呈增加态势，从2011年的16%提升至2022年的25.1%。

四、主要地区风电碳足迹结果及影响因素分析

（一）主要地区风电碳足迹的变化趋势与成因

2011—2022年，中国、欧洲、美国各年度风电系统产生单位电力的碳足迹变化情况如图3所示。风电碳足迹整体上均呈下降趋势，2022年较2011年的降幅分别为49.2%、20.8%、46.2%；2022年，3个地区的风电碳足迹平均值分别为13.96 g/kW·h、11.15 g/kW·h、7.69 g/kW·h。中国、欧洲、美国的风电系统生命周期内各环节的碳足迹分布差异不大（见图4），主要来自设备生产阶段；该阶段也是碳足

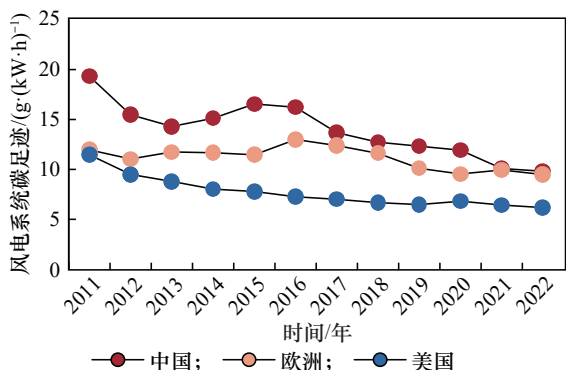
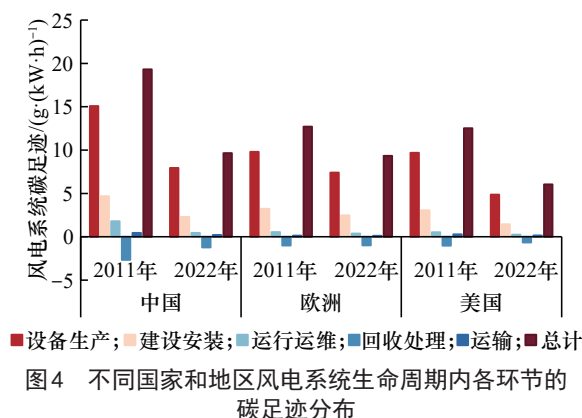


图3 不同国家和地区风电系统碳足迹（2011—2021年）



迹下降贡献最多的环节，贡献度约占75%。设备生产环节碳足迹下降的部分原因为，随着风力机尺寸的增大，单位兆瓦风力机制造需消耗材料的数量整体呈（波动）下降趋势（见图5）。

2011—2022年，中国碳排放强度表现出先下降、后增长、再稳定下降的变化过程，相应原因分别为：风力机容量因子上升、风力机平均尺寸（小幅）增长；较严重的弃风问题导致风力机容量因子下滑；受国家相关政策驱动，风力机容量因子有所提高并趋稳，同时在风力机快速大型化的推动下风电系统碳足迹稳定下降。

欧洲的风电碳足迹整体上呈小幅波动变化，近年来缓慢下降。2011—2016年，风力机容量因子保持下降态势，风电系统利用的不充分与大型化带来的减碳效益互相抵消，使得风电碳足迹处于平稳波动状。2016年以来，新装风力机尺寸快速增大，推动容量因子从20%逐渐上升到24%的水平，使风电

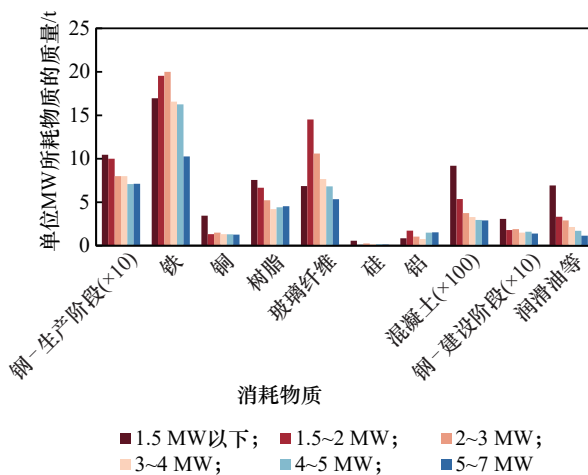


图5 不同尺寸风力机单位兆瓦所耗物质

碳足迹平稳下降。

美国的风电碳足迹以平稳态势持续下降。2011—2015年，美国风力机尺寸变化不明显，但因容量因子从26.7%快速提升至38.7%，碳足迹以较高的平均速度下降；此后，美国的风力机容量因子维持在40%的较高水平，碳足迹主要由风力机大型化驱动，容量因子的下降速度趋于平缓。2020年的风电碳足迹出现微小幅上升，这是因为风力机平均尺寸从2019年的2.77 MW下降为2020年的2.75 MW，容量因子从2019年的40%下降至2020年的38%。

比较3个国家和地区的风电碳足迹可见，中国因风力机容量因子偏低、早期风力机大型化程度滞后，碳排放一直处于最高水平；随着中国风力机大型化加速、有效处理弃风问题，2022年的碳足迹仅为2011年的49.3%，已接近欧洲水平，也显著缩小了与美国的差距（从7.85 g/kW·h缩减至3.63 g/kW·h）。

值得指出的是，本研究获得的风电系统生命周期内碳足迹为6.16~19.32 g/kW·h，而文献结果为6.57~51.6 g/kW·h^[5,9,11,14,15,34-40]，也表明本研究结果处于合理范围。

（二）主要地区风电碳足迹影响因素分析

以2022年的风电系统为对象，对中国、欧洲、美国的风电碳足迹进行影响因素分析，讨论风电系统生命周期清单各组分的贡献占比、其他因素的影响程度，以识别影响风电碳足迹的主要因素，中国与欧洲、美国风电碳足迹存在差距的关键因素。

1. 清单组分敏感性分析

中国、欧洲、美国的风力机技术组成差异不大，各自风电系统生命周期清单中的物质与能量分布相近。以平均尺寸3 MW风力机对应的风电系统为例，分析各类组分对风电碳足迹的贡献度（见图6）。钢、树脂材料、铝、混凝土为主要的碳排放来源，合计占比达到82%。其中，仅钢就贡献了45%的风电碳足迹，即钢用量变化10%会导致风电碳足迹结果变化4.5%；树脂材料具有较高的碳排放因子，对风电碳足迹的贡献度为18%；铝贡献的风电碳足迹占比为10%；混凝土用量虽大，但碳排放因子较低，在风电碳足迹中的贡献度仅为9%。

2. 其他影响因素分析

除了清单组分的碳排放强度，地区电网结构、风力机容量因子、零部件替换率、回收处理阶段金

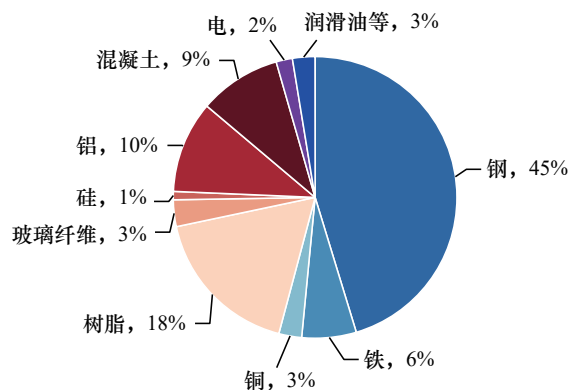


图6 3 MW风力机对应风电系统的各组分碳足迹

属材料回收率4个因素也会影响风电碳足迹。考虑到清单中的电力不包含钢、铁等原材料生产过程的电耗，本研究基于中国、欧洲、美国近年来钢、铁、铝、混凝土、树脂材料单位产量的电耗水平，并结合电网碳排放因子，对电网结构影响缺失的部分进行补充。

分析结果表明，风力机容量因子的影响程度最高并显著强于其他因素；除了电网结构，另外3个因素的影响程度不存在明显的地区差异（见图7）。风力机容量因子每提高10%，中国、欧洲、美国的功能单元碳足迹均下降约9%，即分别下降0.93 g/kW·h、0.87 g/kW·h、0.59 g/kW·h。金属材料的回收率提高10%（接近完全回收水平），中国、欧洲、美国的碳足迹分别下降2.55%、2.28%、2.37%。电网清洁化程度每提高10%，中国、欧洲、美国的碳足迹分别下降1.15%、0.53%、0.67%；电网清洁化程度越高，对功能单元碳足迹的影响程度越低。零部件替换率的影响程度最低，每提高10%则碳足迹分别下降0.28%、0.29%、0.27%；若不发生部件替换，则功能单元碳足迹的下降程度为替换条件下影响程度的2%。

3. 不同地区碳足迹差异的主要成因

中国与欧洲碳足迹的差异，主要是后者的工业生产清洁化程度更高。从清单组分的碳排放因子可见，中国钢、铝材料的生产制造以及电网的碳排放因子较欧洲、美国更高，而树脂、混凝土略低于欧洲、美国。若采用欧洲、美国清单组成的碳排放因子对中国的相关参数进行替换，计算的中国风电碳足迹可分别下降6.9%、2.1%；相关数据已低于欧洲碳足迹水平，但与美国仍有显著差距。这表明，

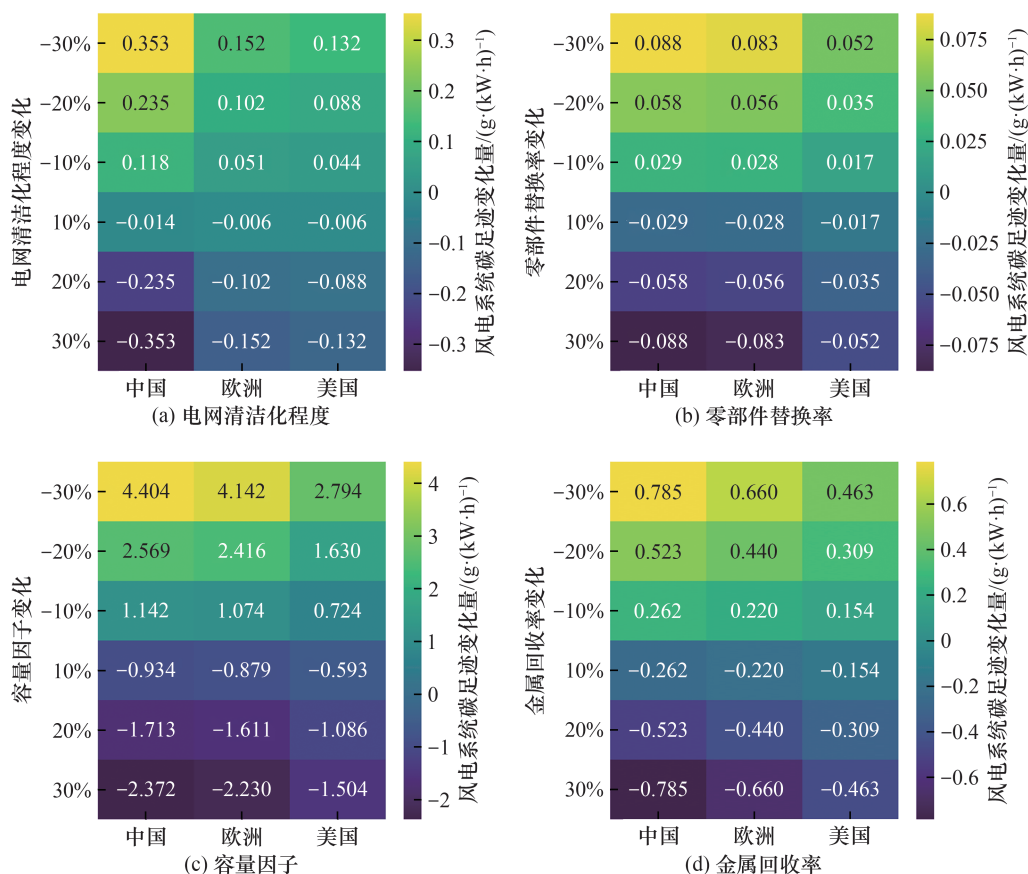


图7 不同地区风电系统敏感性分析结果（2022年）

电网与工业生产清洁化水平偏低是中国风电系统碳足迹略高于欧洲的主要原因，而不是导致美国功能单元碳足迹显著低于中国的主要原因。

中国与美国碳足迹差距的主要原因是风力机容量因子偏低。2022年，美国风力机平均容量因子为40%，显著高于中国的25%。若采用美国的风力机容量因子对中国的相关参数进行替换，计算的中国风电系统运行周期中发电量可增长57%，功能单元碳足迹则从10.28 g/kW·h下降至6.51 g/kW·h（降幅为36.6%），已低于美国碳足迹水平。这表明，风力机容量因子的差距是中国风电系统碳足迹显著高于美国的主要原因。

五、研究结论与发展建议

（一）研究结论

近年来，国际风电产业快速发展，优势地区的风电碳足迹背景参数既有相似的变化趋势，也有一定的差异性。在风力机尺寸上，中国、欧洲、美国

均表现出大型化趋势，平均尺寸从2011年的1.82 MW提升至2022年的3.87 MW；中国因风电产业起步晚而使早期风力机尺寸低于欧洲和美国水平，但大型化速度更快，2022年成为大型化程度最高的地区。风力机容量因子整体呈波动上升趋势，如美国通过风力机技术提升、风能资源改善、有效控制弃风问题等措施，在2011—2014年持续提升容量因子并显著优于中国、欧洲；近年来，中国、欧洲也呈现风力机大型化趋势，使容量因子有所提升。在工业清洁化生产程度方面，中国、欧洲、美国的电网碳排放因子均持续下降；欧洲由于化石燃料在一次能源中占比最低，清洁化程度最高，美国次之，中国仍存在一定差距。

在上述风电产业发展背景下，2011—2022年世界优势地区的风电系统碳足迹均呈下降趋势，中国、欧洲、美国的降幅分别为49.2%、20.8%、46.2%，相应下降量均集中在设备生产阶段。中国通过改善弃风问题、加速风力机大型化等措施，将风电碳足迹下降至与欧洲接近的水平，与美国的差

距从 7.85 g/kW·h 缩减到 3.63 g/kW·h。在风电系统生命周期内,钢、树脂、铝、混凝土等材料的工业生产清洁化程度以及发电效率对整体碳足迹影响显著;当前,中国在风力机大型化程度最高的情况下,与欧洲、美国的碳足迹仍存在差距,主要原因是工业生产整体清洁化程度不高、风力机容量因子显著低于美国水平。

上述结论直观体现出风力机大型化直接带来减碳效益、提高容量因子对降低风电碳足迹较为重要,可为国内风电产业发展提供直接启示。然而,绿色低碳成为当前及未来国际产业竞争的关键因素,欧盟碳边境调节机制、美国碳关税等国际气候机制对工业产品碳足迹提出了检测、认证、征税要求,现有研究无法指导风电零部件出口型企业应对国际单边绿色贸易机制。随着中国风电功能单元碳足迹与发达经济体的差距逐步缩小甚至抹平,未来研究需关注将中国风电产业的比较优势转化为国际贸易和标准制定中的竞争优势。

(二) 发展建议

中国是风电系统出口大国,在世界风电市场中的占比较高,如世界 60%~70% 的相关零部件产自中国;与此同时,中国风电碳足迹与欧洲、美国相比仍具有进一步提升空间。面对未来的碳中和目标、基本明确的碳市场和碳关税挑战,中国在推进风电产业发展过程中,需着重关注风电系统生命周期内碳足迹降低事项。

一是着重提高风电系统发电效率。风力机大型化有利于获得更好的风力资源,在风电应用端合理布局风电系统,根据风能资源分布情况科学规划风力机部署,优先在风力资源丰富的地区进行装机,增加风力机生命周期的发电量,整体性提高风力机容量因子。加强风力机技术研发,优化风力机性能,提高风能利用效率。在可再生能源渗透率快速提高的背景下,发布专门政策引导新型电力系统构建,将可再生能源发电维持在较高的消纳水平。

二是加快提高风电产业的清洁化生产水平。合理规划风力机生产端、应用端布局,实施积极的政策引导。在成本可行的基础上,鼓励供应链优先采用碳排放影响更低的材料类型。风力机整机制造商需加快清洁技术应用、零碳技术研发,逐步减少生产过程中的能源消耗与污染物排放。在风电产业布

局方面,促成产业链上游与下游就近布局,节约运输成本,降低运输环节的碳排放,促进风电产业链碳足迹的进一步降低。

三是支持风电系统退役回收产业发展。风电机组运行时间为 15~20 年,我国首批规模化开发的风电机组面临退役,对风力机机组材料进行回收再利用与后处理,有助于直接碳减排。在政策维度上,提前引导相关回收产业链的布局与建设,保障风电机组退役后相关材料的高回收率,有效实现回收处置阶段的减碳效益。

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: February 8, 2024; **Revised date:** April 19, 2024

Corresponding author: Lu Xi is a professor from the School of Environment, Tsinghua University. His major research fields include atmospheric environment and low carbon energy system. E-mail: xilu@tsinghua.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2022YFC3702 902); Chinese Academy of Engineering project “Research on Major Institutional Issues of Carbon Peaking and Carbon Neutrality” (2022-PP-01); National Natural Science Fund Project (72243007, 72025401)

参考文献

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2023 [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2023.
- [2] BP p.l.c. Statistical review of world energy 2022 [R]. London: BP p.l.c., 2022
- [3] 中国人民银行广东省分行金融研究处课题组. 发达经济体碳关税政策冲击与中国的应对之策——基于 GTAP-E 模型的模拟分析 [J]. 南方金融, 2023 (8): 3–21.
Research Group of the Financial Research Division of PBoC, Guangdong Branch. The impact of carbon tariff policy in developed economies and China's countermeasures: A simulation study based on GTAP-E model [J]. South China Finance, 2023(8): 3–21.
- [4] Hertwich E G, Gibon T, Bouman E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(20): 6277–6282.
- [5] Crawford R H. Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2653–2660.
- [6] 马敏杰. 全球风能资源时空分布特征及开发潜力评价 [D]. 成都: 电子科技大学(硕士学位论文), 2018.
Ma M J. Temporal and spatial distribution characteristics and development potential of global wind energy resource [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (Master's thesis), 2018.
- [7] Schleichner L. Life cycle assessment of a wind farm and related ex-

- ternalities [J]. *Renewable Energy*, 2000, 20(3): 279–288.
- [8] Vargas A V, Zenón E, Oswald U, et al. Life cycle assessment: A case study of two wind turbines used in Mexico [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 1210–1216.
- [9] 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 and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(5): 2322–2329.
- [10] Yang J, Chen B. Integrated evaluation of embodied energy, greenhouse gas emission and economic performance of a typical wind farm in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 559–568.
- [11] Liu P T, Liu L Y, 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.
- [12] 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.
- [13] Uddin M S, Kumar S. Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 69: 153–164.
- [14] Schreiber A, Marx J, Zapp P. Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 561–572.
- [15] Tremeac B, Meunier F. Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8): 2104–2110.
- [16] Arvesen A, Hertwich E G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(8): 5994–6006.
- [17] 向宁, 王礼茂, 屈秋实, 等. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比 [J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 745–755.
Xiang N, Wang L M, Qu Q S, et al. Comparison of emissions from offshore and onshore wind power systems based on life cycle assessment [J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 745–755.
- [18] 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.
- [19] Razdan P, Garrett P. Life cycle assessment of electricity production from an onshore V117-4.2 MW wind plant [R]. Aarhus: Vestas Wind Systems A/S, 2019.
- [20] Razdan P, Garrett P. Life cycle assessment of electricity production from an onshore V100-2.0 MW wind plant [R]. Aarhus: Vestas Wind Systems A/S, 2015.
- [21] Razdan P, Garrett P. Life cycle assessment of electricity production from an onshore V90-3.0 MW wind plant [R]. Aarhus: Vestas Wind Systems A/S, 2013.
- [22] Razdan P, Garrett P. Life cycle assessment of electricity production from an onshore V150-6.0 MW wind plant [R]. Aarhus: Vestas Wind Systems A/S, 2023.
- [23] Gomaa M R, Rezk H, Mustafa R J, et al. Evaluating the environmental impacts and energy performance of a wind farm system utilizing the life-cycle assessment method: A practical case study [J]. *Energies*, 2019, 12(17): 3263.
- [24] Li J Y, Li S S, Wu F. Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on life cycle assessment theory [J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 456–468.
- [25] Mendecka B, Lombardi L. Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 462–480.
- [26] Land-based wind market report: 2023 edition [EB/OL]. (2023-08-15) [2024-04-15]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-08/land-based-wind-market-report-2023-edition.pdf>.
- [27] Wind Europe Intelligence Platform. Wind energy in Europe: Statistics [R]. Belgium: Wind Europe Intelligence Platform, 2023.
- [28] International Renewable Energy Agency. Renewable generation power costs in 2021 [EB/OL]. [2024-04-15]. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>.
- [29] International Energy Agency. IEA CO₂ emissions from fuel combustion statistics: Greenhouse gas emissions from energy [EB/OL]. [2024-04-15]. <https://doi.org/10.1787/df8c491e-en>.
- [30] European Environment Agency. Greenhouse gas emission intensity of electricity generation [EB/OL]. (2023-10-25)[2024-04-15]. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-14#tab-chart_7.
- [31] United States Environmental Protection Agency. GHG emission factors hub [EB/OL]. [2024-04-15]. <https://www.epa.gov/climate-leadership/ghg-emission-factors-hub>.
- [32] Eurostat Statistics Explained. Energy statistics-an overview [EB/OL]. (2023-05-15)[2024-04-15]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production.
- [33] U.S. Energy Information Administration. Total energy: Annual energy review [EB/OL]. [2024-04-15]. <https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/index.php>.
- [34] Guezuraga B, Zauner R, Pölz W. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines [J]. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 37–44.
- [35] Demir N, Taşkın A. Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı–Kayseri [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 54: 253–263.
- [36] Zhao X L, Liu S W, Yan F G, et al. Energy conservation, environmental and economic value of the wind power priority dispatch in China [J]. *Renewable Energy*, 2017, 111: 666–675.
- [37] Siddiqui O, Dincer I. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: A life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 848–860.
- [38] Xu L, Pang M Y, Zhang L X, et al. Life cycle assessment of onshore wind power systems in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 361–368.
- [39] 余潜跃, 张玉琼, 赵强, 等. 综合能源生产单元的全生命周期碳足迹评价与技术经济性评估 [J/OL]. *中国电机工程学报*, [2024-04-26]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223326>.

Yu Q Y, Zhang Y Q, Zhao Q, et al. Life-cycle carbon footprint assessment and techno-economic analysis of integrated energy production unit [J/OL]. Proceedings of the CSEE, [2024-04-26]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223326>.

[40] Gao C K, Na H M, Song K H, et al. Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 102: 307–317.