【环境与能源 / Environment and Energy】

基于生命周期分析的风电场 GHGs 减排效益

马 艺¹, 段华波^{1,2}, 李强峰¹, 谢明辉³

1) 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2) 深圳大学未来地下城市研究院, 广东深圳 518060; 3) 中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012

摘 要: 风电设备生产及风电场建设产生的环境影响备受关注. 本研究以中国东南沿海城市某 100 MW 陆上风电场为例, 基于生命周期评价方法, 对其风机产品生产制造、运输、风电配套设施建设和运营维护等阶段的环境影响 (以温室气体为归一化度量指标) 进行了量化分析. 研究表明, 该风电场生命周期温室气体排放总量约为 90 000 t (以 CO₂ 当量计, 排放强度为 17.8 g/(kW·h)). 其中, 生产制造阶段占比最大 (67.8%), 其次为建设施工阶段 (19.2%). 与其他能源发电方式对比表明, 风电温室气体排放强度明显高于水电 (以 CO₂ 当量计, 约 3.5 g/(kW·h)), 但与光伏发电 (以 CO₂ 当量计, 约 50 g/(kW·h))、生物质 (以 CO₂ 当量计, 约 200 g/(kW·h)) 和火力 (以 CO₂ 当量计, 约 800 g/(kW·h)) 等能源方式相比, 减排效益显著.

关键词: 环境工程; 可再生能源; 风力发电; 陆上风电场; 生命周期评价; 温室气体; 二氧化碳当量; 碳排放因子; 建造阶段; 节能减排

中图分类号: X828; X196

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.06653

Benefits of GHGs emission reduction of wind farm based on life cycle assessment

MA Yi¹, DUAN Huabo^{1,2}, LI Qiangfeng¹, and XIE Minghui³

1) Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) Key Laboratory of Eco-Industry of Ministry of Environmental Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China

Abstract: Wind power development is one of the main approaches and effective means to meet with the energy need. However, the negative environmental impacts by the production of wind power equipment and the construction phase of wind farm are also very pressing. In this paper, a 100 MW onshore wind farm in a coastal city in the Southeast China is taken as an example to quantify the environmental impacts measured by greenhouse gases emission, GHGs emission over its life cycle including the wind turbine production, transportation, wind farm facilities construction, operation and maintenance. The results show that the total GHGs emission of a 100 MW wind farm is approximately 90 000 tCO₂ eq, and the emission intensity is about 17.8 gCO₂ eq/(kW·h), of which the emission during the

Received: 2020-06-13; Accepted: 2020-09-10

Foundation: National Key R & D Program of China (2018YFB1502804)

Corresponding author: Associate professor DUAN Huabo. E-mail: huabo@szu.edu.cn

Citation: MA Yi, DUAN Huabo, LI Qiangfeng, et al. Benefits of GHGs emission reduction of wind farm based on life cycle assessment [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 653-660. (in Chinese)

stage of manufacturing accounts for the largest proportion (67.8%), followed by that during the construction stage (19.2%). Though the GHGs emission intensity of wind power is significantly higher than that of hydropower (about $3.5 \text{ gCO}_2 \text{ eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$), its GHGs emission reduction benefits are more significant over those of other power generation projects, such as photovoltaic power generation (about $50 \text{ gCO}_2 \text{ eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$), biomass (about $200 \text{ gCO}_2 \text{ eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$) and thermal power (about $800 \text{ gCO}_2 \text{ eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$).

Key words: environment engineering; renewable energy; wind generation; onshore wind farm; life cycle assessment (LCA); greenhouse gases (GHGs); carbon dioxide equivalent; carbon emission factor; construction phase; energy-saving and emission reduction

风电具有资源潜能丰富、产业基础好、经济竞争力强和环境影响低等优势,是最有可能支撑经济发展的清洁能源技术之一,现已成为中国继煤电、水电之后的第3大电源^[1].作为全球最大的风电装机市场,中国装机容量从2000年的 $3.4 \times 10^5 \text{ kW}$ 增长到目前的 $2.1 \times 10^9 \text{ kW}$,年平均增长率58%,累计装机容量占全球比重从2000年的2.0%增长至2018年的35.4%.此外,中国风电发展路线图指出,到2050年风电装机容量将达到 $10 \times 10^9 \text{ kW}$ ^[2].随着风电技术的大规模推广应用,在发电过程中引起的相应生态环境问题,如植被破坏、水土流失、光污染及噪声污染等^[3-4]也备受关注;风电场运行也会改变局地气象条件以及地表和大气的热交换,大面积运行风电场还会对全球气候变化产生影响^[5-6].风能是一种分散型资源,在开发利用过程会造成产业链上的资源、能源消耗.除运行期间会直接影响环境,在风电场设备生产、建设施工和拆除等各个环节,也会导致的大量资源、能源消耗和污染物排放,产生间接环境影响.因此,除考虑风电场运行期间的环境影响外,关注风电场风机零部件生产到风电场建设、运营和拆除等生命周期过程的环境影响,能更全面、有效地对风能开发利用进行环境影响评价,客观认识其环境成本与节能减排潜力.

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是系统评价综合环境影响的主要方法.如JUNGBLUTH等^[7]采用LCA量化分析了欧盟国家风力发电生命周期的环境负荷,包括温室气体(greenhouse gases, GHGs)排放、能源消耗和生态毒性等.AMPONSAH等^[8]系统评价了海上风电场及陆上风电场的GHGs排放影响,结果显示,陆上风电场GHGs平均排放高于海上风电场GHGs平均排放.此外,KUMAR等^[9]利用投入-产出型(input-output) LCA方法对美国某风电场的GHGs排放进行研究,发现期限较长的运营维护以及拆除处置阶段的影响应视为风电场

的整体环境影响.王晓天^[10]基于LCA对内蒙古某风电场生产制造、运输、运行维护和报废处置阶段的能耗以及GHGs排放进行研究.XUE等^[11]根据中国的清单标准对风力发电的GHGs排放进行了生命周期分析.而WANG等^[12]则对中国的陆上风电项目和海上风电项目的生命周期GHGs排放量分别进行LCA分析.

通过对比上述文献发现,当前针对风力发电的LCA研究中,由于系统边界和研究阶段的差异,部分生命周期阶段的环境影响并未充分体现.例如,现有研究主要侧重于风力发电机组本身的环境影响,而忽略了配套的升压变压系统、电线电缆和配电装置等其他输电设施.此外,风电场建设过程中基础设施工程的施工,也基本未考虑在边界范围之内.为综合全面分析与评价风力发电生命周期过程的环境影响或效益,本研究以中国东南沿海城市某100 MW的风电场为研究对象,采用LCA方法,从风电场的主要生产建设活动出发,核算风电场生产制造、运输、建设施工、营运与维护、拆除与处置生命周期阶段的GHGs排放量(以 CO_2 当量计),综合考虑该风电场的生命周期环境效益,提出相应减排策略,以期为我国能源政策制定、电网规划以及风电项目发展提供一定的参考和决策依据.

1 方法和数据

1.1 研究对象

本研究以中国东南沿海城市某100 MW陆上风电场为研究对象,该风电场共安装50台单机容量为2 MW的风电机组.风力发电机组含3片叶片,风轮直径121 m,轮毂高度为120 m,设计使用寿命期为20年.该风电场共设4回35 kV集电线路,设2次升压站.

1.2 系统边界与范围

根据国际标准化组织(International Organization

for Standardization, ISO) 的定义, LCA 是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价. 为全面评估风电场整体环境效益, 根据“从摇篮到坟墓”的生命周期评价理论, 将风电场的生命周期过程分为生产制造、运输、建设施工、运营与维护、拆除处置(从完整生命周期考虑, 为预估阶段) 5 个阶段, 其系统边界如图 1.

根据系统边界确定本研究对该 100 MW 风电场 GHGs 排放的核算范围, 各阶段核算范围如表 1.

图 1 风电场 LCA 系统边界
Fig. 1 System boundary for life cycle assessment of wind farm

表 1 100 MW 风电场 GHGs 核算范围
Table 1 Greenhouse gases accounting scope of the wind farm (100 MW)

LCA 阶段	范 围
生产制造	风电机组构件（转子、塔架和机舱）生产过程产生的当量排放；现场配电装置和输电设备等构件生产过程产生的当量排放
运 输	风电场所需物资从生产厂商到风电场运输过程产生的当量排放
建设施工	建设施工材料消耗产生的当量排放；建设施工期间电、柴油等能源消耗产生的当量排放
运营与维护	风电场零部件维修及更换的材料产生的当量排放
拆除与处置	风电场设备及设施拆除环节产生的当量排放；废弃物从风电场到处置场地运输过程的当量排放

1.3 计算方法

1.3.1 生产制造阶段

生产制造阶段的 GHGs 排放包括风机生产排放、配电站及输电设施生产排放. 风电场总装机容量

量 100 MW, 共安装 50 台单机容量为 2 MW 的风电机组, 其构成包括转子(50 t)、机舱(61 t)和塔架(255 t). 由于风电机组部件的专有性质, 其生产制造涉及一系列先进技术工艺以及设备装置, 技术手册并没有提供所有部件的材料构成比例. 因此, 本研究基于 SMOUCHA 等^[13-14] 的风力发电 LCA 研究, 对风电机组部件的主要材料构成进行推断分析, 该风电场单台 2 MW 风机材料构成如图 2. 除风机外, 风电场还包括变压器、电缆、杆塔架、避雷器和配电柜等电气设备(配电站及输电设施主要材料清单: 塑料 0.01 t、锌 0.02 t、聚乙烯 0.57 t、环氧树脂 2.70 t、铝 37.62 t、铜 53.79 t、钢 1 306.76 t).

图 2 2 MW 风机材料构成
Fig. 2 Materials composition of a 2 MW wind turbine

风电场设备构件生产过程中产生的 GHGs 可根据材料的 GHGs 排放系数和材料的消耗量进行计算. 生产制造阶段 GHGs 排放量测算公式为

$$E_1 = \sum_i (m_i \times f_i) \tag{1}$$

其中, E_1 为生产制造阶段 GHGs 排放量 (单位: t, 以 CO_2 当量计); m_i 为第 i 种材料的消耗量 (单位: t); f_i 为第 i 种材料的 GHGs 排放系数.

1.3.2 运输阶段

运输阶段 GHGs 排放主要来源于运输过程中能源消耗产生的排放. 该风电场的物资运输方式均为公路运输 (卡车), 本阶段的运输特指物资从工厂产地运至风电场所在地. 其中, 风电场道路工程所需的碎石在风电场所在地区就近获取, 假设其运输距离为 10 km; 根据风电场位置、材料和设备的供应商及该风电场的后评价报告, 假设其他所有材料和设备的平均运输距离为 500 km. 由运输产生的 GHGs 排放为

$$E_2 = \sum_i (m_i \times d_i \times f_i) \quad (2)$$

其中, E_2 为运输阶段 GHGs 排放量 (单位: t, 以 CO_2 当量计); d_i 为第 i 种材料运至风电场的距离 (单位: km); f_i 为运输车辆的排放系数.

1.3.3 建设施工阶段

建设施工阶段的 GHGs 主要来源于工程建设材料消耗、施工机械运行及施工照明的能源消耗等所产生的排放. 现场建筑工程包括风机基础、箱变基础、升压变电站工程和道路工程等, 其材料消耗分别为钢 0.26 万 t、水 0.55 万 t、碎石 4.36 万 t、混凝土 6.75 万 t. 建设施工阶段的 GHGs 排放为

$$E_3 = \sum_j (C_j \times f_j) + \sum_i (m_i \times f_i) \quad (3)$$

其中, E_3 为建设施工阶段 GHGs 排放量 (单位: t, 以 CO_2 当量计); C_j 为第 j 种能源的消耗量, f_j 为能源消耗的排放系数; m_i 为建设施工阶段第 i 种材料的消耗量 (单位: t); f_i 为第 i 种材料的排放系数.

1.3.4 运营与维护阶段

风机的设计使用寿命为 20 年, 此阶段的 GHGs 排放主要来源于风机叶片、电缆等设备或配件的检修和更换. 运营期间风电场操作人员日常用水消耗 $3.5 \text{ m}^3/\text{d}$. 维修期间的活动主要是将人员与更换的材料、部件运送到现场进行定期检修或更换, 由于运输距离短、运量小, 其 GHGs 排放量相对较小, 可忽略不计. 基于 CHEN 等^[15-16]的风电场 LCA 研究, 假设在本风电场 20 年的运营期内, 平均每台风力发电机组更换 1 个叶片; 其他零部件和电力耗材更换比例为 15%.

1.3.5 拆除与处置阶段

拆除与处置 (废弃) 阶段为预估阶段, 其 GHGs 排放主要来源于风电场内设备与设施拆除过程施工机械耗能以及废弃物运输过程中运输车辆 (按平均 20 km 计) 耗能产生的影响^[14]. 本项目的设计生产期为 20 年, 该风电场的拆除与处置尚未实际发生, 且风机的报废处理工作是个复杂的过程, 无法合理预测. 因此, 此阶段的测算是基于现有研究进行模糊假设. 即保留风电场建设施工阶段所建设的道路设施, 而其他基础设施拆除过程的投入产出数据则参照建设施工等资料, 拆除后的铜、钢、铁等金属将会运送至风电场外交由资源化企业进行处理; 树脂等高分子材料以及混凝土等建筑材料均运送至填埋场进行处置^[17-18].

1.3.6 生命周期总排放

基于以上分析, 风电场的生命周期 GHGs 总排

放为

$$E_{\text{total}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (4)$$

其中, E_{total} 为生命周期 GHGs 排放总量 (单位: t, 以 CO_2 当量计); E_4 和 E_5 分别为运营与维护阶段、拆除处置阶段的 GHGs 排放量 (单位: t, 以 CO_2 当量计).

1.4 数据来源及不确定性分析

本研究风电场生命周期 GHGs 核算的主要数据类型及数据来源见表 2, 各环节 GHGs 排放系数如表 3.

表 2 风电场 LCA 研究数据来源

Table 2 Data sources for LCA of wind farm

数据类型	数据来源
风机设计参数	厂商技术手册
设备材料参数	调研数据
运输距离	假设数据
建设施工阶段能源消耗	风电场环境影响评价报告
维修技术参数	文献[12-13]
拆除材料处置	文献[1, 14]
GHGs 排放系数	GaBi 数据库

表 3 GHGs 排放系数¹⁾

Table 3 GHGs emission factors

材料/能源	排放系数
钢	3.35 t/t
铜	4.84 t/t
锌	2.81 t/t
铝	19.2 t/t
铸铁	2.2 t/t
塑料	3.98 t/t
聚乙烯	3.05 t/t
混凝土	0.12 t/t
玻璃纤维	1.172 t/t
环氧树脂	0.571 t/t
水	$5.62 \times 10^{-4} \text{ t/t}$
柴油	0.472 t/t
电	$0.861 \times 10^{-3} \text{ t}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
运输车辆	$0.054 \times 10^{-3} \text{ t}/(\text{t} \cdot \text{km})$

¹⁾ 以 CO_2 当量计

由于现实因素的影响,本研究结果存在一定的不确定性.通过 Crystal ball 软件进行蒙特卡洛模拟分析,可提高评估结果的可靠性.假设输入变量(材料消耗量和 GHGs 排放系数等指标)呈现正态分布,规定 GHGs 排放量为预测单元(即输出变量),采用 95% 的置信度,进行了 10 000 次的迭代模拟计算,最终得到含误差范围的相关结果值.

1.5 局限性

风电场生命周期中涉及环节较多,且其 GHGs 排放数据和影响因素众多,由于现实条件限制,未能将所有数据和影响因素纳入到系统之内,而对一些情况进行了简化和假设.此外,设备生产过程中存在部分材料损耗,考虑到数据获取困难,核算中有部分损耗未包括在内.今后应改进数据获取方法,优化模型计算结果.

2 结果及分析

2.1 风电场 GHGs 排放总量测算

基于风电场各阶段 GHGs 排放测算方法和基础

数据,对该 100 MW 风电场生命周期内各阶段的 GHGs 排放量进行测算,最终得到该 100 MW 风电场生命周期内的 GHGs 排放总量为 90 306 t(以 CO₂ 当量计).根据调查数据,年平均上网电量 25 400 万 kW·h,以风电场运营周期 20 年为测算基础,可估算该风电场的 GHGs 排放强度为 17.8 g/(kW·h)(以 CO₂ 当量计).

将本研究结果与其他风力发电技术相关研究进行比较结果如表 4,由表 4 可见,本研究的风电场 GHGs 排放强度高于其他研究(8.6~10.3 g/(kW·h),以 CO₂ 当量计).主要原因在于研究范围的差异,以往的研究忽略了风电场配套设施生产和建设施工产生的影响.本研究在进行生命周期分析时考虑了材料用量大但较易被忽略的电气设备等配套设施生产及运输产生的排放以及建设施工阶段产生的排放.其中,建设施工阶段的排放包括了用量较大的钢筋、混凝土的生产及运输排放、施工机械能源消耗产生的排放.因此,本研究风电场生命周期 GHGs 排放总量相对较高,其排放强度要高于其他研究.

表 4 与其他开展风电场(含风机产品) LCA 研究的比较

Table 4 Comparison with other LCA studies on wind farm (with wind turbines)

基准年	国家/地区	风机类型	GHGs 排放强度/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	研究范围的差异性
2019	中国	2 MW	17.8	100 MW 风电场;生产制造阶段、运输阶段、建设施工阶段、运营维护阶段、拆除与处置阶段(不含回收产生的正效益)
2009	澳大利亚	3 MW	9.3	仅风机产品;不含建设施工阶段 ^[19]
		800 kW	10.3	
2016	中国	1.5 MW	8.6	含风机产品及部分配电设备(变压器)生产;不含建设施工阶段 ^[16]
		750 kW		
2012	奥地利	1.8 MW	9.0	仅风机产品;不含建设施工阶段 ^[17]
		2 MW		

2.2 不同生命周期阶段排放情况

该 100 MW 风电场生命周期内各阶段产生的 GHGs 排放情况如图 3.其中,生产制造阶段是风电场生命周期 GHGs 排放的主要阶段,共 61 250 t(以 CO₂ 当量计),占生命周期 GHGs 排放量的 67.8%;其次是建设施工阶段,该环节的 GHGs 排放量为 17 358 t(以 CO₂ 当量计,19.2%);相比之下,运输阶段、运营维护阶段、拆除处置阶段的 GHGs 排放量要明显低于前两个环节,其 GHGs 排

放量分别为 2 444(以 CO₂ 当量计,2.7%)、9 187(以 CO₂ 当量计,10.2%)和 67 t(以 CO₂ 当量计,0.1%).

生产制造阶段是风电场生命周期内 GHGs 主要排放环节,主要原因在于风电机组、变压器、配电柜、电力电缆等电力设备的生产过程中,需要消耗大量的铜、钢和铝等排放强度高相对较高的资源.风电场生产制造阶段 GHGs 排放如图 4,风电机组物资(含转子、机舱及塔架)生产的 GHGs 在该阶段

图3 100 MW 风电场生命周期 GHGs 排放
Fig. 3 GHGs emission of 100 MW during the life cycle of wind farm

占比最大,达 55 900 t (以 CO_2 当量计),约占生产阶段 GHGs 排放量的 91%; 配电站及输电设施物资的生产排放为 5 360 t (8.8%, 以 CO_2 当量计)。本风电场案列选用较大功率的 2 MW 风机,其 GHGs 排放总量一般随着风机额定功率的增加而增加^[13]。此外,在风电机组中塔架生产环节的 GHGs 排放 (42 710 t, 以 CO_2 当量计)明显高于其他部件生产环节的 GHGs 排放,占生产阶段排放的 69.7%,如图 4。风机的塔架由钢材制成,其制造需要消耗大量的钢材。

图4 风电场生产制造阶段 GHGs 排放
Fig. 4 GHGs emission in the production stage of wind farm

在风电场物质设备的运输过程中,其 GHGs 排放量为 2 444 t (以 CO_2 当量计)。其中,风电机组

物资的运输排放占 20%; 配电站及输电设施物资的运输排放占 2%; 工程建设物资的运输排放占 78%。

通过对风电场建设施工阶段 GHGs 排放量的估算,由工程建设物资、电力和柴油产生的 GHGs 分别为 16 900、414 和 36 t (以 CO_2 当量计),分别占该阶段总 GHGs 排放的 97.4%、2.4% 和 0.2%,即建设施工阶段过程中, GHGs 的主要贡献源是大量使用工程建设材料及电力消耗产生的影响。

针对各阶段和生命周期材料消耗量,混凝土的消耗量最大 (129 954 t),其次是钢材消耗 (21 627 t),玻璃纤维 (1 287 t)、环氧树脂 (1 051 t)、铸铁 (592 t) 的消耗量明显低于前 2 种材料。但针对材料使用产生的 GHGs 排放,钢材消耗造成的 GHGs 排放最大 (72 450 t), 占有材料消耗总排放的 77.0%; 其次是混凝土造成的排放 (15 595 t), 占 16.6%; 玻璃纤维 (2 213 t)、铸铁 (1 303 t) 和铜 (1 145 t) 分别占 2.4%、1.4% 和 1.2%, 其他材料消耗造成的排放仅占 1.4%。因此,控制钢材、混凝土、玻璃纤维、铸铁和铜的消耗量,以及 GHGs 排放系数等相关参数,是控制风电场 GHGs 排放的重要途径。

2.3 与其他能源比较

为更全面地了解风力发电系统的环境效益概况,将本研究的结果与其他能源发电项目的 GHGs 排放强度进行比较,包括水电、核电、火电、太阳能光伏发电和生物质发电,其中,水力发电的 GHGs 排放强度最小 ($3.5 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$),核电次之 ($11.9 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$),风力发电的 GHGs 排放强度 ($17.8 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$) 略高于核电,而火电 ($810 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)、太阳能光伏发电 ($50 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$) 和生物质发电 ($200 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$) 均高于风力发电^[20-24]。生物质发电和火力发电的 GHGs 排放强度分别是风力发电的 13 和 52 倍。

与风力发电项目相比,传统的火力发电是以消耗不可再生能源来发电,在其运行期间,化石燃料的使用会产生较高的 GHGs 排放。同时,从生命周期的角度考虑,化石燃料开采过程会排放较多的 GHGs,而风力发电生命周期过程中不存在此类排放,导致火力发电除运行阶段排放大量 GHGs 以外,整个生命周期中其他环节的 GHGs 排放也比风力发电要高。按照消耗标准煤 $360 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,本研究中的 100 MW 风电场每年可节约标准煤约 $9.1 \times 10^4 \text{ t}$ 。我国的电力生产中,电源结构以火力发电为主,故本研究以火力发电作为比较对象,计

算风电项目的 GHGs 减排量. 以火力发电 GHGs 排放强度 $810 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 为参照, 风电场 GHGs 排放为 $17.8 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 可减少 GHGs 排放 $792.2 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$. 在同等发电量的条件下, 该风电场生命周期内可减少 GHGs 排放约 $402.5 \times 10^4 \text{ t}$ (以 CO_2 当量计).

3 结 论

本研究以中国某 100 MW 的陆上风电场作为典型案例, 通过生命周期评价方法, 划分为生产制造、运输、建设施工、运营与维护以及拆除与处置 5 个阶段, 对其 GHGs 排放进行了清单核算, 进而评价了其环境效益. 主要结论如下:

1) 100 MW 风电场的生命周期 GHGs 总排放量约为 $9 \times 10^4 \text{ t}$ (以 CO_2 当量计); 以运营周期 20 年以及年发电量 $2.540 0 \times 10^9 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 计算, 该风电场单位发电量的 GHGs 排放量为 $17.8 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ (以 CO_2 当量计).

2) 在风电场生命周期中, 生产制造阶段的 GHGs 排放最高, 占风电场生命周期 GHGs 排放的 67.8%; 在风机部件中, 塔架的生产对生产制造阶段 GHGs 排放贡献最大.

3) 风电场的 GHGs 排放强度高于水电与核电, 但低于火电、太阳能光伏发电与生物质发电. 与传统火力发电相比, 100 MW 风电场在生命周期内可减少 GHGs 排放量近 $402 \times 10^4 \text{ t}$ (以 CO_2 当量计).

4) 风电场仍存在一定的 GHGs 减排潜力. 为有效降低风电设备生产制造阶段的 GHGs 排放量, 可推广使用绿色设备材料, 如风机叶片可使用碳纤维材料; 减少风电场物资运输阶段的 GHGs 排放, 如在满足风电场需求和物资运输经济型要求的基础上尽量选用轻量型材料, 同时选择低排放的运输方式或缩短运输距离. 此外, 风电场辅助设施建造阶段选择绿色建筑材料, 合理编制施工方案, 提高施工机械利用效率或使用清洁能源, 以减少风电场建设施工阶段的 GHGs 排放.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB1502804)

作者简介: 马 艺 (1996—), 深圳大学硕士研究生, 研究方向: 城市环境管理与可持续建设. E-mail: 451400887@qq.com

引 文: 马 艺, 段海波, 李强峰, 等. 基于生命周期分析的风电场 GHGs 减排效益[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(6): 653-660.

参考文献 / References:

- [1] 杨举华, 张力小, 王长波, 等. 基于混合生命周期分析的我国海上风电场能耗及温室气体排放研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 786-792.
YANG Juhua, ZHANG Lixiao, WANG Changbo, et al. Energy consumption and greenhouse gas emission of an offshore wind farm in China: a hybrid life cycle assessment perspective [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(2): 786-792. (in Chinese)
- [2] 王仲颖, 时璟丽, 赵勇强. 中国风电发展路线图 2050 [R]. 国家发展和改革委员会能源研究所, 2011.
WANG Zhongying, SHI Jingli, ZHAO Yongqiang. China wind roadmap in 2050 [R]. Energy Research Institute National Development and Reform Commission, 2011. (in Chinese)
- [3] 朱 蓉, 石文辉, 王 阳, 等. 我国风电开发利用的生态和气候环境效应研究建议[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 39-43.
ZHU Rong, SHI Wenhui, WANG Yang, et al. Research suggestions for ecological and climatic environmental effects of wind power development in China [J]. Engineering Science, 2018, 20(3): 39-43. (in Chinese)
- [4] 李国庆, 李晓兵. 风电场对环境的影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35(8): 1017-1026.
LI Guoqing, LI Xiaobing. Research progress of wind farm impact on the environment [J]. Progress in Geography, 2016, 35(8): 1017-1026. (in Chinese)
- [5] 赵宗慈, 罗 勇, 江 滢. 风电场对气候变化影响研究进展[J]. 气候变化研究进展. 2011, 7(6): 400-406.
ZHAO Zongci, LUO Yong, JIANG Ying. Advances in Assessment on Impacts of Wind Farms upon Climate Change [J]. Advances in Climate Change Research, 2011, 7(6): 400-406. (in Chinese)
- [6] BALOG I, PAOLO M R, ISABELLE T. A numerical approach for planning offshore wind farms from regional to local scales over the Mediterranean [J]. Renewable Energy. 2016, 85: 395-405.
- [7] JUNGBLUTH N, BAUER C, ROBERTO D, et al. Life cycle assessment for emerging technologies: case studies for photovoltaic and wind power (11 pp) [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2005, 10(1): 24-34.
- [8] AMPONSAH N Y, TROLDBORG M, KINGTON B, et al. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: a review of lifecycle considerations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 461-475.

- [9] KUMAR I, WALLACE E T, KUMARES C S. Input-output life cycle environmental assessment of greenhouse gas emissions from utility scale wind energy in the United States [J]. *Energy Policy*, 2016, 89(12): 294-301.
- [10] 王晓天. 基于全生命周期评价方法的风电环境效益测算——以内蒙古某风电场为例[J]. *科技管理研究*, 2012, 32(18): 259-262.
- WANG Xiaotian. Analysis on environmental benefit of wind turbines using life cycle assessment: case study of some wind farm in Inner Mongolia [J]. *Science and Technology Management Research*, 2012, 32(18): 259-262. (in Chinese)
- [11] XUE Bing, MA Zhixiao, GENG Yong, et al. A life cycle co-benefits assessment of wind power in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 338-346.
- [12] WANG Shifeng, WANG Sicong, LIU Jinxiang. Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 804-810.
- [13] SMOUCHA E A, FITZPATRICK K. Life cycle analysis of the embodied carbon emissions from 14 wind turbines with rated powers between 50 kW and 3.4 MW [J]. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2016, 6(4): 100021.
- [14] ALSALEH A, SATTLER M. Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2019, 21(4): 887-903.
- [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 and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(5): 2322-2329.
- [16] XU Lei, PANG Mingyue, ZHANG Lixiao, et al. Life cycle assessment of onshore wind power systems in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 361-368.
- [17] 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.
- [18] KERSTIN B O, SERGIO P. Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil [J]. *Renewable Energy*. 2013, 53: 60-70.
- [19] 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.
- [20] WANG Like, YUAN Wang, DU Huibin, et al. A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: a China study [J]. *Applied Energy*, 2019, 249(4): 37-45.
- [21] 姜子英, 潘自强, 邢江, 等. 中国核电源链的生命周期温室气体排放研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3502-3510.
- JIANG Ziyang, PAN Ziqiang, XING Jiang, et al. Greenhouse gas emissions from nuclear power chain life cycle in China [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3502-3510. (in Chinese)
- [22] ZHAO Xiaoli, QIONG Cai, ZHANG Sufang, et al. The substitution of wind power for coal-fired power to realize China's CO₂ emissions reduction targets in 2020 and 2030 [J]. *Energy*, 2017, 120: 164-178.
- [23] 廖夏伟, 谭清良, 张雯, 等. 中国发电行业生命周期温室气体减排潜力及成本分析[J]. *北京大学学报自然科学版*, 2013, 49(5): 885-891.
- LIAO Xiawei, TAN Qingliang, ZHANG Wen, et al. Analysis of life-cycle greenhouse gas emission reduction potential and cost for China's power Generation sector [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(5): 885-891. (in Chinese)
- [24] GAO Chengkang, NA Hongming, SONG Kaihui, 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.

【中文责编: 晨 兮; 英文责编: 天 澜】