DOI: 10.20103/j.stxb.202306301400

杜文杰,关梦茜,江源,曹鹏鹤,王泽,康慕谊.新疆风力发电减碳效益全生命周期评估.生态学报,2024,44(8):3293-3302. Du W J, Guan M X, Jiang Y, Cao P H, Wang Z, Kang M Y.Whole lifecycle assessment of carbon reduction benefits of wind power in Xinjiang.Acta Ecologica Sinica,2024,44(8):3293-3302.

新疆风力发电减碳效益全生命周期评估

杜文杰,关梦茜,江 源*,曹鹏鹤,王 泽,康慕谊

北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

摘要:风力发电减碳效益评估有助于从减碳角度更好制定能源发展相关政策。以风力资源总体丰富且亟需发展风力发电以实现能源系统脱碳的新疆为研究区,将生命周期方法与风力发电模型结合,在省、市级尺度分别评估了风力发电全生命周期的排放水平及发电效益,核算了风力发电相对于火力发电和光伏发电的减碳效益,有效弥补了传统生命周期评估中空间差异考虑不充分的问题。结果表明,风机全生命周期平均发电量为13.1×10⁷ kWh,风力发电全生命周期共排放3944.24 tCO₂-eq,通过材料处置回收和循环再利用可减少1424.79 tCO₂-eq。新疆发展风力发电具有低排放强度和高减碳效益的特点,与火电相比可减少97.44%排放,减碳效益平均可达906.72 gCO₂-eq/kWh,并且应优先布局在哈密、巴音郭楞蒙古自治州和北屯市;与光伏相比,减碳效益可分别达到43.85 gCO₂-eq/kWh(衰减率 *DR*=1%)和169.84 gCO₂-eq/kWh(*DR*=3%),此情景下风电应主要部署在克改勒苏柯尔克改自治州、喀什和和田。在风电减碳效益较差地区如石河子市、铁门关市和双河市应考虑利用本地充足太阳能资源发展光伏发电。需注意风电的排放强度和减碳效益在局地小尺度评估中存在不确定性,获取更精细的结果仍需进一步评估。未来应大力发展新疆本地的风电产业,打造绿色供应链和加快发展处置回收技术以增加减碳效益。

Whole lifecycle assessment of carbon reduction benefits of wind power in Xinjiang

DU Wenjie, GUAN Mengxi, JIANG Yuan*, CAO Penghe, WANG Ze, KANG Muyi

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Assessment of carbon reduction benefits of wind power contributes to better policy-making of energy development from a decarbonization perspective. In this study, we employed a combination of the life cycle assessment and wind power generation model to evaluate the carbon emission and power generation at the provincial and municipal levels of the whole life cycle of wind power in Xinjiang, a region abundant in wind resources and in need of wind power development for achieving decarbonization of the energy system. We also quantified the carbon reduction benefits offered by wind power when compared to thermal power and photovoltaic power. This approach effectively addressed the insufficient consideration of spatial differences in traditional life cycle assessments. The results showed that the average electricity generation of wind power in different cities of Xinjiang was 13.1×10^7 kWh. The total carbon emission over the life cycle of wind power amounted to 3944.24 tCO₂-eq, of which 1424.79 tCO₂-eq could be reduced through material disposal and recycling. In terms of carbon reduction benefits, wind power in Xinjiang achieved an average reduction of 906.72 gCO₂-eq/kWh compared to thermal power, accounting for 97.44% of the total emissions of thermal power. The priority areas for wind power development include Hami, Bayingolin, and Beitun. Compared to photovoltaic power, the carbon reduction benefits can be as high as 43.85 gCO₂-eq/kWh (Degradation rate(DR) = 1%) and 169.84 gCO₂-eq/kWh (DR = 3%), respectively. In this scenario, wind power should be primarily deployed in the Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture, Kashgar, and Hotan.

基金项目:新疆维吾尔自治区科学技术厅重点研发项目(2021B03002-1)

收稿日期:2023-06-30; 网络出版日期:2024-01-29

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiangy@ bnu.edu.cn

It should be noted that there is uncertainty in assessing the emission intensity and carbon reduction benefit of wind power at a small local scale. Further evaluation is needed to obtain more refined results. In the future, there should be a strong emphasis on the development of the local wind power industry in Xinjiang, creating a green supply chain and accelerating the development of disposal and recycling technologies to enhance carbon reduction benefits.

Key Words: wind power; life cycle assessment; carbon emission; power generation; Xinjiang

自工业革命以来,气候系统正在发生广泛而快速的变化,其中最主要的表现是全球变暖。人类活动导致的温室气体尤其是二氧化碳排放起着主导作用^[1-2]。为应对气候变化,人类需要采取措施迅速降低电力等能源系统的碳排放^[3]。风光发电等新能源技术作为替代传统火力发电的重要方式,在实现电力系统转型中具有重要意义。中国政府在 2021 年提出了"在沙漠、戈壁、荒漠地区加快规划建设大型风电光伏基地项目"。中国风电装机容量和平均单机容量均快速增长且速度位居世界第一,2021 年新增风电机组平均单机容量风机为 3514 kW^[4]。

风电作为一种清洁能源,与传统火电不同,在运营过程不产生碳排放,若从全生命周期角度考虑依然会产 生巨大碳排放。排放强度反映单位发电水平下的排放量,可实现不同能源系统环境影响的对比而被广泛应 用。生命周期评价(LCA)方法可以有效评估单个风机或单个风电场的风力发电的排放强度,其中,LCA系统 边界主要包括风机生产和建造安装、运输、运营^[5-6],生命末期管理考虑存在较大差异,主要体现在拆卸^[7]、运 输^[8]和回收处置^[9-10]阶段,部分学者还考虑了风电厂建设引起的植被碳汇影响^[11]。同时,发电量作为风电 排放强度评估的重要指标,在传统风电碳排放影响研究中对其考虑存在一定不足,主要通过假设或已有的容 量因子进行评估^[7,9-10,12],这是因为LCA难以量化空间差异。最新研究提出需在LCA越来越多地纳入更精 细的时空信息^[13],通过搜集高分辨率的区域风速等数据,部分学者也对发电量进行了详细评估,并将其与生 命周期评价结果相结合,得到区域尺度的风电排放强度和相应减碳效益^[6,14]。

通过文献综述,以下几点仍有待于进一步讨论:一是,目前风力发电碳排放影响的研究多围绕单个风机或 者单个风电场展开,较少从区域角度开展研究。二是,风力发电易受到风速、装机容量、功率曲线等自然和技 术因子的共同影响,但受制于 LCA 方法影响传统研究缺乏发电量详细评估。三是,LCA 中系统边界核算不够 完整且不同学者对风机退役后生命末期处置考虑详略不同,如考虑拆卸、运输、对金属材料回收等单一方式较 多,欠缺综合考虑。因此针对以上改进选择典型研究区开展风电减碳效益研究十分重要。

受西北季风和地形因素影响,新疆风力资源丰富并形成了全国的著名风区^[15]。随着从 100 m 升高至 140 m,新疆风能资源丰富区域面积明显增加^[16-17]。同时,新疆正在加快部署风力发电以满足电力增长需求 并减少发电侧的碳排放,以降低生态足迹并实现绿色发展^[18-19]。风机在新疆的快速发展将带来巨大的潜在 回收处置需求。考虑到已有研究评估了新疆光伏减碳效益^[20],其风电的减碳效益仍有待于准确评估且与光 伏评估结果进行对比分析。

综上所述,以新疆为研究区,将LCA、空间分析和发电量评估相结合,开展兼具生命末期处置的风电全生 命周期减碳效益评估十分必要,有利于准确核算风力发电量、排放强度及其减碳效益,从碳减排角度为新疆风 电产业的发展提供基础科学依据,服务于未来"双碳目标"在新疆地区的最终实现。

1 研究方法与数据处理

1.1 研究方法

1.1.1 发电潜力评估

根据研究^[21],风机生命周期发电量(LE,kWh)计算如下:

$$LE = \overline{P} \times AF \times Y$$

(1)

式中,*AF*表示年使用比例,取0.97^[22];*Y*表示风机一般寿命,取20年; *P*表示年平均功率(kW),由风速分布和功率曲线可求^[14,23]:

$$\overline{P} = \int (3, 22.5) P_w(u) \times f(u) \, du$$
 (2)

式中, *P_w(u)*表示拟合的风机功率曲线; *u* 表示切入风速到切出风速, 根据本研究所选择的风机类型为 3—22.5 m/s; *f(u)*表示不同风速 *u* 出现的概率, 即风速分布, 常见的威布尔分布模型如下:

$$f(u) = k/c \times (\overline{u}/c) \wedge (k-1) \times e^{(-\overline{u}/c)k}$$
(3)

式中,k为形状参数,c为尺度参数(m/s),可根据参数估计法求得 $c = 2 \times \overline{u}/\pi$ 。当 k = 2 时,f(u) 服从瑞利 分布:

$$f(u) = \pi/2 \times u/\overline{u}^{2} \times e^{((-\pi/4) \times (u/\overline{u})^{2})}$$

$$\tag{4}$$

式中, ū 表示该地的平均风速。

1.1.2 生命周期评价

根据生命周期评价方法,全生命周期风机碳排放(CE)计算如下:

$$CE = \sum_{i=1}^{i=1} CEi$$
(5)

式中,*CEi*分别表示第*i*阶段的排放(tCO₂-eq),从*i*=1到7分别表示生产、建造、运输、运营、维护、拆卸、生命 末期处置与再利用阶段,对于每一阶段的碳排放(*CEi*)使用排放因子法进行核算:

$$CEi = \sum Cj \times EFj \tag{6}$$

式中,*Cj*表示第*i*阶段第*j*种物质、能源的消耗量;*EFj*表示对应的碳排放因子,通过整理生产工艺和产品的环境影响评价文献得到^[7, 24–38]。

1.1.3 风力发电排放强度及其减碳效益

由新疆风力发电潜力和排放量,可得风电碳排放强度(WCEI, gCO₂-eq/kWh):

$$WCEI = CE \times 10^6 / LE \tag{7}$$

式中,LE为1.1.1小节中的风机寿命内总发电量,CE为1.1.2小节中的排放总量。

新疆风力发电减碳效益(gCO,-eq/kWh)计算如下:

$$CER_1 = WCEI - TPCEI$$
(8)

$$CER_2 = WCEI - PVCEI$$
 (9)

式中,CER₁表示风电较火电减碳效益,TPCEI表示新疆火电碳排放,据统计^[39-45],该值为 930.5 gCO₂-eq/kWh;CER₂表示风电较光伏发电减碳效益;PVCEI表示新疆光伏发电碳排放强度,由与风电碳排放强度同样核算方法得到^[20],并考虑 1%和 3%两种衰减率(*DR*)。

1.1.4 敏感性分析

以未来技术进步为目标进行敏感性分析。首先,发电量和重要材料消耗作为影响碳排放计算的重要因 子,考虑发电量增加1%和重要物质消耗减少1%,对比原发电量和原消耗水平下的风电减碳效益差异。其 次,排放因子由于核算边界、地区差异等不同导致结果有所差异,会带来结果的不确定性。研究主要以中国为 研究区对相关文献进行检索,分别选取低、中、高三个值作为低、中、高排放因子进行碳排放核算,以中排放因 子为基础情景,对比低排放因子和高排放因子两种情景对风电减碳效益的影响。最后,目前哈密地区成为西 北规模最大、产业链最全的风电装备制造基地,在未来实现本地化生产的条件下,风机运输将以省内为主,因 此本研究将省内省外两种运输格局加以研究对比。

1.2 数据处理与分析

由于风机类型与发电潜力评估和生命周期评价密切相关,考虑到当前平均新增单机容量,选择额定功率为 3.45 MW 的 Vestas V126 作为参考机型(生命周期评价对象),风机高度为 117 m。

对于发电潜力评估,首先将来自 Global Wind Atlas 数据集的 10 m 风速数据经过拼接和裁剪,并根据指数

经验公式在垂直高度上推到117 m。其次利用非线性拟合方法(S形曲线)^[47]对风机功率曲线进行拟合,拟合 决定系数(*R*²)为0.99。最后通过117 m高度平均风速数据、拟合得到的功率曲线及瑞利分布完成年发电量 的计算。以上过程均在 Python 中完成。

对于全生命周期排放评估,风机生产和建造阶段物质消耗清单来自维斯塔斯公司(Vestas)提供的风机材 料使用清单^[48],能源消耗来自有关文献^[7,31]。对于运输,由于 Vestas 在天津建设风电设备一体化生产基地, 故考虑风机及其配套设备由天津运输到新疆。风机基础物质如混凝土考虑从本地供给,平均运输距离为 50 km^[10],大型半挂车油耗为 0.7 L/100 t·km^[49]。风机运营过程中考虑人员对水和能源日常消耗产生的排放, 其中风电场运营过程中单位装机容量(MW)人数为 0.15 人^[50],单位消耗量按 2020 年人均水平计算。拆卸过 程以能源消耗产生的排放为主,与建造安装过程的能源消耗排放相同^[51]。最后,考虑位置、交通和经济发展水 平,将处置中心设置在新疆首府乌鲁木齐,并考虑处置后可再利用、焚烧和填埋三种策略对每种材料进行了回收 处置分析。其中,对金属材料包括钢、铁、铝、铜和建筑材料水泥考虑循环再利用,对聚乙烯、聚氯乙烯和润滑油 类考虑作为燃料燃烧利用其能量,对复合材料如环氧树脂、玻璃纤维等进行填埋,对电子设备考虑折旧利用。

2 结果分析

2.1 新疆风力发电潜力

新疆各地市风机全生命周期平均发电量为 13.1×10⁷ kWh,13 个地市发电量高于新疆平均水平(表 1),并 且在这些地区普遍形成著名风区。风力发电潜力空间趋势(图 1)表现为东南部最高、其次是西南和北部,中 西部最低。



图 1 新疆各地市风电发电量、碳排放及排放强度空间分布 Fig.1 Spatial distribution of *LE*, *CE* and WCEI of wind power of cities in Xinjiang

本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改;图中符号所代表的地区:1 阿克苏地区,2 阿拉尔市,3 阿勒泰地区,4 巴音郭楞蒙古自治州,5 北屯市,6 博尔塔拉蒙古自治州,7 昌吉回族自治州,8 哈密地区,9 和田地区,10 胡杨河市,11 喀什地区,12 可克达拉市,13 克拉玛依市,14 克孜勒苏柯尔克孜自治州,15 昆玉市,16 石河子市,17 双河市,18 塔城地区,19 铁门关市,20 吐鲁番地区,21 图木舒克市,22 五家渠市,23 乌鲁木齐市,24 伊犁哈萨克自治州

其中东南部地区的哈密及巴音郭楞由于地势开阔且受盛行季风影响,风力发电效益分别达到 23.5×10⁷ kWh与 20.3×10⁷ kWh,均高出平均水平 50%以上。就西南部而言,和田地区多属塔里木盆地腹地,克孜勒苏柯尔克孜自治州则位于天山山脉、帕米尔高原和昆仑山交汇处,受地形影响风速较大,发电量较高。北部的北屯市与阿勒泰同受北部季风和盛行西风影响,大部分地区由于地处山地和盆地边缘,风速较低,发电量较东南与西南部小。中西部受天山等山地地形阻挡影响,风速及发电量水平普遍较低,其中双河市最低,只有平均水平的 32.68%。

2.2 风机全生命周期碳排放

以新疆(各市)平均水平将所有生命周期排放汇总(图 2),共产生 3944.24 tCO₂-eq 排放,其中生产过程排放最多,为 1963.27 tCO₂-eq,占总排放量的 49.78%,主要原因是钢、铝和铜等物质消耗产生的排放。建造安装过程次之,排放 711.43 tCO₂-eq,其中排放源为混凝土等物质消耗和能源消耗。处置阶段排放 678.16 tCO₂-eq,以钢和混凝土处置排放为主,铝处置排放最少。其他阶段排放则仅占排放总量的 14.99%。





以材料再利用为主要原则,通过循环再利用可减少 2102.95 tCO₂-eq,其中扣除处置阶段排放后可净减少 排放 1424.79 tCO₂-eq。其中,在所有材料中,钢因为其消耗量巨大的特点,在处置排放量最大,短流程处置方 式产生的排放为 287.51 tCO₂-eq,同时再利用减排也最多,可净减少 838.16 tCO₂-eq 排放。电子设备以 10%的 折旧率再利用可减少 184.86 tCO₂-eq。铝具有良好的可回收性,再生铝生产的温室气体排放仅约为原铝的 4.45%,因此在处置阶段排放量最小(8.5 tCO₂-eq),同时重熔再利用可净减少 177.94 tCO₂-eq。这三者净减排 量占总净排放量(1424.79 tCO₂-eq)的 84.29%。铁再利用可净减少排放 113.58 tCO₂-eq。利用二段法再生铜 可净减少 80.25 t 排放。聚乙烯、聚氯乙烯和润滑油作为燃料燃烧可分别净减少 15.35、14.3 和 1.93 tCO₂-eq。 混凝土再生产产生的排放相较抵消的原排放稍多,可产生正排放 1.59 tCO₂-eq。

综上可得,扣除净减排后,风机全生命周期净排放量为2519.45 tCO2-eq。

空间上,受运输影响,风力机全生命周期排放呈现出由中部先向东部和北部,再向西南部递增的格局 (图1)。中部和东部各市距离原产地和回收处置地较近,运输排放少,导致全生命周期排放少,其中乌鲁木齐 市发展风机全生命周期排放约为 2490.45 tCO₂-eq(表 1),处于新疆最低水平。北部排放居中,西南部排放较 多,其中最大值位于喀什地区,全生命周期排放为 2561.28 tCO₂-eq,与最小值相差约 70.83 tCO₂-eq。

					-		-
市 Cities	发电量/ ×10 ⁷ kWh <i>LE</i>	碳排放/ tCO ₂ -eq <i>CE</i>	排放强度/ (gCO ₂ -eq/kWh) WCEI	市 Cities	发电量/ ×10 ⁷ kWh <i>LE</i>	碳排放/ tCO ₂ -eq <i>CE</i>	排放强度/ (gCO ₂ -eq/kWh) WCEI
阿克苏地区	11.79	2538.38	21.53	克拉玛依市	13.70	2506.08	18.29
阿拉尔市	8.39	2537.72	30.26	克孜勒苏柯尔克孜自治州	18.77	2559.48	13.63
阿勒泰地区	17.50	2514.92	14.37	昆玉市	13.54	2560.77	18.91
巴音郭楞蒙古自治州	20.28	2511.48	12.39	石河子市	5.40	2497.50	46.26
北屯市	19.84	2512.45	12.67	双河市	4.29	2513.95	58.66
博尔塔拉蒙古自治州	11.81	2515.36	21.31	塔城地区	14.59	2518.41	17.27
昌吉回族自治州	14.33	2492.24	17.39	铁门关市	5.26	2513.48	47.74
哈密市	23.51	2507.19	10.67	图木舒克市	11.04	2549.30	23.09
和田地区	19.91	2557.03	12.84	吐鲁番市	16.96	2495.79	14.71
胡杨河市	8.10	2504.66	30.93	乌鲁木齐市	15.53	2490.45	16.04
喀什地区	16.46	2561.28	15.56	五家渠市	7.24	2492.94	34.44
可克达拉市	7.51	2523.98	33.59	伊犁哈萨克自治州	8.97	2524.98	28.15

Table 1	Life cycle electricity.	carbon emission.	and carbon	emission	intensity of	' wind nowe	r of cities i	in Xiniia

LE: 生命周期发电量 Life cycle electricity; CE: 碟排放 Carbon emission; WCEI: 风电排放强度 Wind electricity carbon emission intensity

2.3 新疆风力发电排放强度

根据排放强度模型,新疆风力发电排放强度(WCEI)整体表现出东部、北部和西南部排放强度低,中西部 排放强度高的特点(图1),平均水平为23.78 gCO₂-eq/kWh,16 个地市的排放强度低于此数值(表1)。东部的 哈密市、巴音郭楞蒙古自治州、吐鲁番市表现出高发电量、低排放的特点,排放强度低。单位发电量下,哈密市 排放较平均值减少55%,排放强度仅为10.67 gCO₂-eq/kWh。北部的北屯市、阿勒泰地区和塔城地区则表现 出高发电量、中排放和低排放强度的特点。南部的和田地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州和喀什地区虽然排放 大,但得益于发电能力强,排放强度依然较低。中西部的石河子市、铁门关市和双河市三个地区排放较少,低 于新疆均值,但由于发电潜力处于所有地市的最低水平,排放强度大于45 gCO₂-eq/kWh,其中双河市达到 58.66 gCO₂-eq/kWh,较平均值高147%。

2.4 减碳效益分析

鉴于新疆火电排放强度为930.5 gCO₂-eq/kWh,风电减碳效益平均可达906.72 gCO₂-eq/kWh,占火电总排放的97.44%,表明新疆发展风电极具减碳潜力。在假设新疆各地市火电排放水平一致条件下,减碳效益空间分布与排放强度相反,即东部、西南部和北部减碳效益高,中西部减碳效益相对较低(图3)。其中哈密市发展风电减排效果最好,高达919.83 gCO₂-eq/kWh(表2),较火电排放低98.85%。最低值位于双河市,减排量为871.84 gCO₂-eq/kWh,较哈密市少 50 gCO₂-eq/kWh,但减排比例依然达到93.7%。

与光伏排放强度对比,有以下两种情况:1)当 DR 为 1%时,发展风电可较光伏发电减少排放 43.85 gCO₂-eq/kWh,占光伏碳排放强度的 64.84%。高值主要分布于西南部和北部如克孜勒苏柯尔克孜自治州和北屯市 (图 3),次高值分布在东部,其余地区减碳效益低于平均水平,主要为呈点状分布的新疆生产建设兵团区域, 如阿拉尔市、可克达拉市等。其中减碳效益最低值位于双河市,只有 9.5 gCO₂-eq/kWh(表 2),仅少 13.93%的 排放。2)当 DR 为 3%时,同样生产 1 kWh 电,风电可较光伏发电减少排放 169.84 gCO₂-eq,减碳效益提高至 87.72%。减碳效益空间分布与前一种情况发生较大变化(图 3),西南部和北部地区风电减碳效益依然较高, 克孜勒苏柯尔克孜自治州的减碳效益最高。但东部地区如巴音郭楞蒙古自治州、昌吉回族自治州、吐鲁番市 和哈密市的风电减碳效益相对区域内其他地区下降。而伊犁哈萨克自治州、阿拉尔市、可克达拉市三市随着

光伏衰减率的提高,发展风电所带来的减碳效益水平在区域内提升较多,这是由于这些地区光伏发展受衰减 率影响更大,排放强度也增加更快。

Table 2 Carbon e	mission reduction o	f wind power	compared to t	thermal power/PV ($DR = 1$	$\%) / \mathbf{PV} (DR = 3\%)$	b) of cities in	Xinjiang
	风电较	风电较光伏差异/			风电较	风较电光伏差异/	
市	火电差异	(gCO_2-eq/kWh)		市	火电差异/	(gCO_2-eq/kWh)	
Cities	$/(\text{gCO}_2\text{-}eq/kWh)$	CER ₂		Cities	(gCO_2-eq/kWh)	CER ₂	
	CER ₁	(DR = 1%)	(DR = 3%)		CER ₁	(DR = 1%)	(DR = 3%)
阿克苏地区	908.97	48.99	180.39	克拉玛依市	912.21	48.49	172.89
阿拉尔市	900.24	39.54	169.57	克孜勒苏柯尔克孜自治州	916.87	61.28	200.85
阿勒泰地区	916.13	55.74	186.36	昆玉市	911.59	52.40	185.25
巴音郭楞蒙古自治州	918.11	49.39	164.47	石河子市	884.24	18.78	139.96
北屯市	917.83	57.07	186.99	双河市	871.84	9.50	136.48
博尔塔拉蒙古自治州	909.19	47.56	175.87	塔城地区	913.23	52.35	182.05
昌吉回族自治州	913.11	45.56	162.83	铁门关市	882.76	17.37	138.67
哈密市	919.83	47.77	156.64	图木舒克市	907.41	49.26	184.06
和田地区	917.66	57.29	187.95	吐鲁番市	915.79	44.81	155.71
胡杨河市	899.57	35.24	158.52	乌鲁木齐市	914.46	47.44	165.70
喀什地区	914.94	59.02	197.98	五家渠市	896.06	30.36	151.08
可克达拉市	896.91	35.71	164.84	伊犁哈萨克自治州	902.35	41.42	171.03

表 2 新疆各市风电较火电、光伏(DR=1%)、光伏(DR=3%)减碳效益

CER1: 风电较火电差异 Carbon emission reduction1; CER2: 风电较光伏差异 Carbon emission reduction2; DR:衰减率 Degradation rate



图 3 新疆各地市风电相较火电、光伏(DR=1%)、光伏(DR=3%)减碳效益空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon emission reduction of wind electricity compared with thermal power/PV(DR=1%)/PV(DR=3%) of cities in Xinjiang

3 讨论

3.1 研究结果对比及研究尺度影响探究

本文根据实地风速数据核算的新疆各地市风电的排放强度在 10—59 gCO₂-eq/kWh(均值为 23.78 gCO₂-eq/kWh),与国外风电 LCA 文献综述结果 1.7—81 gCO₂-eq/kWh^[52]和 5—30 gCO₂-eq/kWh^[5,53](>1 MW)接近 并整体处于低排放水平,表明新疆风力发电具有优越性。需注意,提高研究的空间分辨率有利于得到更丰富 的风电排放强度和减碳效益信息,以适应局地小尺度的评估。若以 250 m×250 m 空间分辨率分析可发现:风 电排放强度最小值为 5.08 gCO₂-eq/kWh,超过 68%的区域单位发电量排放小于中国平均水平 19.88 gCO₂eq^[54]并远小于光伏发电排放,97.26%地区排放强度小于 100 gCO₂-eq/kWh,远小于火力发电排放。但局部地 区受平均风速极小的影响,其排放强度最大值远超 930.5 gCO₂-eq。

3.2 未来 2025 年减碳总量评估

假设 2020—2025 年各市电力消费水平和风电比重以与 2015—2020 年同样的幅度变化,根据 2015 年各市电力消费水平以及新疆风力发电数据可推算 2025 年各市风力发电数据并进一步核算 2025 年风力发电相较于火力发电的减碳效益,考虑到新疆生产建设兵团(兵团)设立时间不同导致的相关数据不足,为简化计算将兵团进行合并处理。结果表明,2025 年新疆发展风电的减碳总量为4.2×10⁷ tCO₂-eq,占 2019 年新疆化石燃料燃烧碳排总量(数据来自 CEADs 数据库)的 9.31%。受电力需求和风电减碳效益不同,各市减碳总量也不同。昌吉回族自治州减碳总量最大,达到 1.26×10⁷ tCO₂-eq,其次是兵团和乌鲁木齐市。减碳总量最少的是克 改勒苏柯尔克孜自治州,只有 8.1×10⁴ tCO₂-eq。

3.3 减碳效益因子影响分析

据敏感性分析结果,排放因子对风力发电碳排放强度和减碳效益影响最大。与火电相比,高排放因子情 景减碳效益较基础情景低 0.95%,为 898.15 gCO₂-eq/kWh,低排放因子情景减碳效益较基础情景稍高 0.19%。 在新疆光伏低衰减率(1%)情景下,高排放因子情景减碳效益与低排放因子情景减碳效益分别较基础情景减 少 19.56%和增加 3.93%。随着光伏衰减率增加,高排放因子情景与低排放因子情景较基础情景变化减小,分 别为减少 5.05%和增加 1.01%。

其次是运输和风力发电量。与火电相比,运输格局改变(实现省内运输)可使风电减碳效益增加0.03%。 与光伏发电比,运输格局改变可使新疆风电减碳效益增加0.58%(*DR*=1%)和0.15%(*DR*=3%)。当发电量 增加1%,风电各减碳效益可增加0.03%(与火电比)、0.54%(与光伏比,*DR*=1%)和0.14%(与光伏比,*DR*= 3%),与运输改变相比略小。

最后是重要材料消耗。当钢消耗减少1%时,与火电相比,风电减碳效益较原来增加0.004%。与光伏发电相比,在1%和3%衰减率下,新疆风电减碳效益分别增加0.09%和0.02%。其次是混凝土,最后是铝,这是由于铝具有很强的可回收性,当铝消耗减少1%时,单位风电碳排放仅下降了0.002 gCO₂-eq,其使用量减少带来的减碳效益几乎可忽略。

4 结论

本文通过将发电量模型 LCA 结合,对风机运营期内的发电量和全生命周期碳排放进行评估,得出新疆不同地区风力发电的碳排放强度及其空间分异特征,并将其与新疆火电和光伏发电排放水平对比,从而得出以下结论:新疆发展风力发电在国内和国际都具有优越性,并且与火力发电和光伏发电相比均表现出较大的减碳效益,分别可达 906.72 gCO₂-eq/kWh,43.85 gCO₂-eq/kWh(*DR*=1%)和 169.84 gCO₂-eq/kWh(*DR*=3%),减排比例分别达 97.44%,64.84%和 87.72%,对减少电源端的碳排放具有十分重要的意义。若考虑较火电的减碳效益水平,风电应更多布局在哈密市、巴音郭楞蒙古自治州、北屯和和田等地区。若考虑较光伏的减碳效益,风电应优先布局在克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什、和田和北屯等地区,且不同衰减率会对减碳效益格局

产生影响。在风电减碳效益较差地区如石河子市、铁门关市和双河市应考虑利用本地的充足太阳辐射资源发展光伏发电。由于本研究在省级和市级尺度评估风电减碳效益,在空间规划尤其是具体选址时应注意进一步提高研究精度。从降低新疆风电全生命周期排放并增加其减碳效益角度考虑,未来应优先建立上游绿色供应链,降低风机生产和运输过程中各物质和能源的排放因子,其次是大力发展本地风电产业实现省内运输替代省外运输并提高风力发电效率增加风力发电量,最后还应加快发展处置回收技术特别是材料循环再利用技术以减少物质消耗,降低新疆风电的排放强度和增加减碳效益。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. 2021-8.
- [2] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2022). 北京:科学出版社, 2022.
- [3] Zheng X Q, Lu Y L, Yuan J J, Baninla Y, Zhang S, Stenseth N C, Hessen D, Tian H Q, Obersteiner M, Chen D L. Drivers of change in China' s energy-related CO₂ emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(1): 29-36.
- [4] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2021年中国风电吊装容量统计简报.风能, 2022(05): 38-52.
- [5] Arvesen A, Hertwich E G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 5994-6006.
- [6] Khoie R, Bose A, Saltsman J. A study of carbon emissions and energy consumption of wind power generation in the Panhandle of Texas. Clean Technologies and Environmental Policy, 2021, 23(2): 653-667.
- [7] Yang J, Chen B. Integrated evaluation of embodied energy, greenhouse gas emission and economic performance of a typical wind farm in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 559-568.
- [8] 马艺,段华波,李强峰,谢明辉.基于生命周期分析的风电场 GHGs 减排效益. 深圳大学学报:理工版, 2020, 37(6): 653-660.
- [9] 杨举华,张力小,王长波,蔡宴朋,郝岩.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.环境科学学报,2017,37 (2):786-792.
- [10] 向宁, 王礼茂, 屈秋实, 熊琛然, 王博. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比. 资源科学, 2021, 43(04): 745-755.
- [11] 戢时雨,高超,陈彬,李胜男.基于生命周期的风电场碳排放核算.生态学报,2016,36(04):915-923.
- [12] Chen Y S, Cai G T, Bai R X, Ke S J, Wang W X, Chen X Y, Li P, Zhang Y T, Gao L P, Nie S, Liu G. Spatiotemporally explicit pathway and material-energy-emission nexus of offshore wind energy development in China up to the year 2060. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 183: 106349.
- [13] Jordaan S M, Combs C, Guenther E. Life cycle assessment of electricity generation: A systematic review of spatiotemporal methods. Advances in Applied Energy, 2021, 3: 100058.
- [14] Jung C, Schindler D. Modeling wind turbine-related greenhouse gas payback times in Europe at high spatial resolution. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114334.
- [15] 邓铭江,明波,李研,黄强,李鹏,吴萌."双碳"目标下新疆能源系统绿色转型路径. 自然资源学报, 2022, 37(05): 1107-1122.
- [16] 朱蓉, 王阳, 向洋, 孙朝阳, 常蕊, 胡高硕, 高梓淇. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究. 太阳能学报, 2021, 42(06): 409-418.
- [17] 朱蓉,徐红,龚强,孙朝阳,常蕊.中国风能开发利用的风环境区划.太阳能学报,2023,44(03):55-66.
- [18] 鲁钰,赵银娣,董霁红.西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析.生态学报,2022,42(04):1354-1367.
- [19] Guan M X, Jiang Y, Du W J, Cao P H, Wang Z, Lei J Q. A modified ecological footprint calculation method for drylands and its application to Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. Journal of Cleaner Production, 2023, 419: 138176.
- [20] 杜文杰, 江源, 关梦茜, 刘相兰, 康慕谊. 新疆多晶硅光伏减碳效益的全生命周期评估. 自然资源学报, 2023, 38(03): 694-706.
- [21] Siyal S H, Mörtberg U, Mentis D, Welsch M, Babelon I, Howells M. Wind energy assessment considering geographic and environmental restrictions in Sweden; A GIS-based approach. Energy, 2015, 83: 447-461.
- [22] Conroy N, Deane J P, Ó Gallachóir B P. Wind turbine availability: Should it be time or energy based?: A case study in Ireland. Renewable Energy, 2011, 36(11): 2967-2971.
- [23] Redlinger R Y, Andersen P, Morthorst P. Wind Energy in the 21st Century. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2002.
- [24] 刘宏强,付建勋,刘思雨,谢欣悦,杨笑楹.钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践.钢铁,2016,51(04):74-82.
- [25] 上官方钦,张春霞,胡长庆,郦秀萍,周继程.中国钢铁工业的 CO₂排放估算.中国冶金, 2010, 20(05): 37-42.
- [26] Zhang Y L, Sun M X, Hong J L, Han X F, He J, Shi W X, Li X Z. Environmental footprint of aluminum production in China. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 1242-1251.
- [27] 曾广圆,杨建新,宋小龙,吕彬.火法炼铜能耗与碳排放情景分析——基于生命周期的视角.中国人口・资源与环境,2012,22(4): 46-50.
- [28] Xu L, Zhang S F, Yang M S, Li W, Xu J. Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011 2016: A life cycle assessment approach. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 310-329.

- [29] Ye L P, Qi C C, Hong J L, Ma X T. Life cycle assessment of polyvinyl chloride production and its recyclability in China. Journal of Cleaner Production, 2017, 142; 2965-2972.
- [30] 蔡晓萍,段华波,马艺,李强峰,谢明辉.基于生命周期分析的风机叶片环境影响评价.深圳大学学报(理工版),2023,40(01):40-47.
- [31] 杨东,刘晶茹,杨建新,丁宁.基于生命周期评价的风力发电机碳足迹分析.环境科学学报,2015,35(03):927-934.
- [32] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. http:// www.ipcc -nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html. 2007-4.
- [33] 章玉容,徐雅琴,姚泽阳,王龙龙.配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响.浙江工业大学学报,2020,48(6):648-653.
- [34] Peng T D, Ou X M, Yan X Y, Wang G H. Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China. Energy Procedia, 2019, 158: 3937-3943.
- [35] 樊欢欢, 王洪涛, 谢阿弟, 侯萍. 精炼铜行业的生命周期节能减排目标评价. 生态毒理学报, 2014, 9(4): 737-743.
- [36] Astrup T, Fruergaard T, Christensen T H. Recycling of plastic: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste Management & Research, 2009, 27(8): 763-772.
- [37] Ding T, Xiao J Z, Tam V W Y. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China. Waste Management, 2016, 56: 367-375.
- [38] Tsai W T. An analysis of used lubricant recycling, energy utilization and its environmental benefit in Taiwan. Energy, 2011, 36(7): 4333-4339.
- [39] 国家发展和改革委员会. 2013 中国区域电网基准线排放因子. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/index_3.shtml, 2018-12-20.
- [40] 国家发展和改革委员会. 2014 中国区域电网基准线排放因子. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/index_3.shtml, 2018-12-20.
- [41] 国家发展和改革委员会. 2015 中国区域电网基准线排放因子. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/index_3.shtml, 2018-12-20.
- [42] 国家发展和改革委员会. 2016 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/index_3.shtml, 2018-12-20.
- [43] 中华人民共和国生态环境部. 2017 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/index_3. shtml, 2018-12-20.
- [44] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/index_1. shtml, 2020-12-29.
- [45] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/index_1. shtml, 2020-12-29.
- [46] Technical University of Denmark. Global Wind Atlas 3.0, a free, web-based application developed. (2021-4) [2022-6]. For additional information; https://globalwindatlas.info.
- [47] Marčiukaitis M, Žutautaité I, Martišauskas L, Jokšas B, Gecevičius G, Sfetsos A. Non-linear regression model for wind turbine power curve. Renewable Energy, 2017, 113: 732-741.
- [48] Razdan P, Garrett P. Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V126- 3.45 MW Wind Plant. https://dokumen.tips/ documents/life-cycle-assessment-of-electricity-mediavestasabout-2-life-cycle-assessment.html? page = 1. 2017-7.
- [49] 郭瑞玲, 苑林, 谢东明, 梁荣亮, 刘建军. 载货汽车燃油经济性与整车质量的相关性研究. 汽车工程, 2015, 37(06): 613-616.
- [50] 王丽琼. 库伦风电场运行后经济评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [51] Garcia-Teruel A, Rinaldi G, Thies P R, Johanning L, Jeffrey H. Life cycle assessment of floating offshore wind farms: An evaluation of operation and maintenance. Applied Energy, 2022, 307: 118067.
- [52] Whitaker M, Heath G A, O'Donoughue P, Vorum M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(s1): S53-S72.
- [53] Mendecka B, Lombardi L. Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 111: 462-480.
- [54] Xu K, Chang J F, Zhou W J, Li S C, Shi Z, Zhu H W, Chen Y Y, Guo K W. A comprehensive estimate of life cycle greenhouse gas emissions from onshore wind energy in China. Journal of Cleaner Production, 2022, 338: 130683.