

DOI: 10.5846/stxb201406111207

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(4): - .

Ji S Y, Gao C, Chen B, Li S N. Carbon Emission Accounting for Wind Farm based on Life Cycle Assessment. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

基于生命周期的风电场碳排放核算

戢时雨, 高超, 陈彬*, 李胜男

北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 风电是实现低碳战略的主力能源技术之一。为全面分析其对环境的影响, 本研究将自然植被纳入系统边界, 计量风电场建设前后植被破坏及恢复带来的影响。在清单分析中, 本研究重点考虑对碳排放影响较大的配件生产及运输、建设期工程车耗油排放, 更加合理地核算风电场碳排放和量化其环境影响。核算结果表明: 案例风电场全生命周期排碳量为 $2.97 \times 10^4 \text{ tC}$; 运营期由于电能损耗造成的 CO_2 排放量远大于其它阶段, 占全过程的 57.74%; 整个过程中, 能源消耗造成的碳排放远大于资源损耗排放。

关键词: 风力发电; 生命周期评价; 碳排放; 植被碳汇

Carbon Emission Accounting for Wind Farm based on Life Cycle Assessment

Ji Shiyu, GAO Chao, CHEN Bin*, LI Shengnan

School of Environment, Beijing Normal University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875, China

Abstract: In 2009, China became the world's largest carbon emitting country and therefore needs to work more actively to explore low-carbon development. Wind power is considered one of the major renewable energy technologies to achieve low-carbon goals. With the other rapid development in China, wind farms have been constructed around the country, both onshore and offshore, to resolve energy resource and environmental challenges. The aim of this program is to develop wind power capacity to 200 million kilowatts in 2020 and to 1 billion kilowatts in 2050, to provide 17% of the electricity demand. In this study, the carbon emission of wind farms was analyzed using life cycle assessment, which is a powerful tool for energy system management and environmental emission mitigation. It has been widely used for environmental impact assessment of renewable energy systems. The life cycle of a wind turbine is assumed to be 21 years. The natural vegetation is incorporated into the system boundary, quantifying the impact of destruction and restoration of vegetation on carbon emissions before and after the construction stage. In the inventory analysis, the carbon emissions from production and transportation of accessories, as well as the fuel consumption of construction vehicles are considered, to provide a reasonable account of associated carbon emissions and to quantify the associated environmental impact. Then, carbon emissions from the three phases of the life cycle (construction, operation, and dismantling) were determined. The construction phase covers changes in vegetation, building, and transportation. The operation stage includes emissions from energy produced for the daily life activities of staff and for operating the main building and electrical equipment (e.g., wind farm lighting systems, ventilation and air conditioning systems, and primary and secondary communication equipment). Regarding the dismantling phase, waste material disposal may still produce carbon emissions. The calculation of carbon emissions is based on the amount of energy used and on various emission factors. Part of the carbon emissions derived from

基金项目: 国家自然科学基金(91325302, 41271543); 国家基金委创新研究群体科学基金(51121003); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130003110027); 美国能源基金会项目(G-1407-21749)

收稿日期: 2014-06-11; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

recycled materials was subtracted to avoid double accounting. The carbon emissions caused by laying fiber optic cables, diesel consumption of the mobile machinery shop, and consumption of electric energy were also considered. The results show that the carbon emissions of the whole life cycle of the concerned wind farm, from vegetation damage to scrap disposal, was $2.97 \times 10^4 \text{ tC}$, with the carbon emission intensity being $2.98 \times 10^{-4} \text{ tC/kWh}$. This is close to the value for thermal power generation. The contribution by change in vegetation was almost zero, while those of building, transportation, and dismantling were 35.54%, 0.58%, 6.15%, respectively. The emission from consumption of electricity during operation was far larger than that for the other categories, making up 57.74% of total emissions. In contrast to the results from previous studies, we found that the carbon emissions from energy consumption are far larger than those from resource consumption. The methodology used in this paper may help provide a more comprehensive and detailed carbon emission inventory of wind farms. It could thus be considered a benchmark for further comparison of typical wind farm performance. In particular, the inclusion of the ecosystem services provided by the natural vegetation is the first step in calculating the potential support to be derived from the area surrounding the wind farm, which was often ignored in previous studies.

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

当下中国经济社会发展对能源利用与生态保护施加极大压力。为解决能源资源和环境挑战,中国已经明确提出低碳能源发展战略和目标,到 2020 年风电装机容量达到 2 亿千瓦,2050 年达到 10 亿千瓦并满足 17% 的电力需求^[1]。风电已经开始并将继续成为实现低碳能源战略的主力能源技术之一。尽管风能是取之不尽用之不竭的天然资源,但人类对于风能的开发利用方式存在一定弊端,间接影响着生态环境。

经过近 30 年的发展,生命周期评价已发展成为系统评价产品(材料)或活动(服务)的环境影响和环境管理的重要工具。同时,关于风电场的生命周期分析也已从不同视角广泛开展。王晓天^[2]指出风电场产电过程本身并不排放污染物和温室气体,但风电设备从原材料开采到设备的报废处理整个过程中,需要消耗一定的能量,在评价其对环境的影响时,必须考虑偿还这部分能量所产生的大气污染物的排放。Pehnt et al.^[3]认为利用风能发电可以减少碳排放量,相比传统能源降低发电过程对于自然环境的影响,对于制造建设阶段消耗的能量与污染气体排放,仅需 12 个月左右的运营时间即可完成偿还。Yang et al.^[4]考虑风电机组部件、变电站、运输过程、建筑建设工程、运营维护和拆解处置六个部分,对风电场的不可再生能源消耗量及温室气体排放量进行全过程分析,发现 67% 的温室气体排放来自建筑建设,30% 是由于风机制造,而运营维护温室气体排放仅占 3%,Ardente et al.^[5]对意大利风电场的环境影响及效益分析也得出类似结论。而部分研究则认为风电机组的生命周期环境影响占整个风电场生命周期过程最大^[6-7]。郭敏晓^[8]核算得到风机生产阶段耗能和 CO_2 排放占风电场生命周期总耗能及 CO_2 排放比例最大,分别为 68.23% 和 67.18%,因此可用风机全过程的排放代表风电场总排放进行建模。对于风机制造这一耗能排碳重要阶段,对叶片、变速器及零件的回收再利用将有效减少其能耗^[9-10]。在风机制造与运输部分,若调整风机制造厂的供电能源,或风电场选址考虑临近风机制造厂或重要配件制造厂,则可有效减少风机制造相关的能耗与碳排放^[11]。

由于系统边界设定、研究阶段的差异,导致当前对风电场的 LCA 分析中,潜在能源消耗并未全部体现出来^[12]。本研究意在同时向前和向后延伸传统风电 LCA 研究的系统边界:考虑风电场占用土地为风电场所必须获取的一种原材料,因此系统边界向前延伸至“农田破坏”过程,该过程获得“建设用地”;而建设风电场损坏了原有植被,需要进行后续修复过程,因此系统边界向后延伸至“草地恢复”过程,该过程恢复“建设用地”。由此,将“农田破坏”与“草地恢复”都纳入风电场建设的生命周期过程,综合考虑该风电场建设前后植被破坏及恢复引起的植被碳汇影响,并对安徽某风电场进行案例研究,更加合理地核算风电场的碳排放。

1 研究方法

1.1 研究对象

安徽某风电场位于城镇交界处的低山上,装机规模为 48 MW,拟安装单机容量 2000 kW 的风电机组共 24 台。年理论发电量 127.28 GW·h,年上网电量 95.97 GW·h。该风电场距城区直线距离约 20 km。工程永久征地总面积为 0.23 km²,临时征地总面积为 0.17 km²。

1.2 研究方法

1.2.1 系统边界

本文将案例风电场以下三个阶段(图 1)中各项目涉及的温室气体排放量,并最终转换到碳排放量上进行总碳排放量核算与讨论。

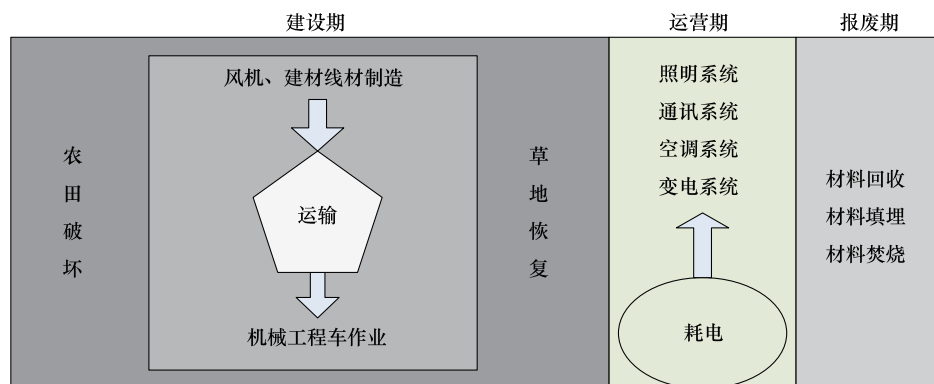


图 1 风电场系统边界

Fig. 1 System boundary of wind farm

1.2.2 核算过程

建设期包含三部分:植被变化、建设工程、运输工程。

植被变化:风电场建设将对原有土地开发,影响当地植被状况与固碳能力。本研究使用相应植被固碳值核算风电场 21 年生命周期内,由于电场建设造成的农田损失与建后植被恢复固碳量变化引发的碳排放量。

建设工程:建设工程分为两部分,其一为生产阶段,其二为建设阶段。生产阶段指风电场建设过程中需要的设备及建材的生产过程,其中包括风机材料、基础工程建设需要的建筑材料,以及线路安装工程使用的线材等。本项目使用的是 2 MW 风机,共 24 台,根据 2 MW

表 1 2MW 风机材料需求清单^[13]

Table 1 Material requirement list of 2MW wind turbines

材料 Materials	质量/t Mass/t	24 台总质量/t 24 wind turbines total mass/t
不锈钢 Stainless steel	122.86	2948.64
生铁 Cast iron	39.35	944.40
铜 Copper	2.40	57.60
环氧树脂 Epoxy	10.00	240.00
塑料制品 Plastics	2.40	57.60
玻璃纤维 Glass	24.30	583.20
总计 Total	201.31	4831.44

风机规格,可列出风机制造所需材料种类及总质量(表 1)。基础工程建设包括发电设备基础工程、变配电工程及房屋建筑工程,主要是用到较多的混凝土和钢筋。线路安装工程包括电缆敷设、架空线路、配电装置、无功补偿系统、监控系统、直流系统和远动系统的配置安装等,这些工程会用到不同材质的母线、电缆和光缆。

建设工程部分使用的材料及能源在其生产或使用时会均会产生温室气体排放,在计算时只考虑 CDM 中规定的温室气体:CO₂(二氧化碳)、CH₄(甲烷)、N₂O(氧化亚氮)、HFCs(氢氟碳化物)、PFCs(全氟化碳)、SF₆(六氟化硫),其中与工程相关的有 CO₂、CH₄ 和 N₂O。其中排放一吨 CH₄ 相当于排放 21 tCO₂,排放 1 tN₂O 相当于 310 tCO₂^[14]。根据不同能源及材料的使用量及排放因子(表 2),可以计算出建设工程整个过程中的碳排

放量。

项目建设期需要运输的主要是各种机械设备及基础工程所需的建筑材料,如风机设备、变压器设备、线路材料及建筑材料。将每种材料的质量及距离的乘积相加,就可得到总的运输量。对于大型运输车辆,由于柴油提供的马力大,运输效率较高,所以一般使用柴油。对车辆运输能耗以柴油计算,单位能耗采用 0.06 L/tkm。在本研究中,考虑风力涡轮机、变压器、线路材料、混凝土和钢筋的运输,其中前三者以风电场与最近的风力发电机公司之间的距离计算,约 449.3 km;而混凝土及钢筋在当地可买到,距离以 20.5 km 计。

运营期:风力发电机发电过程可认为极少排放或不排放温室气体。为维持风电场机械设备的运转及工作人员的日常生 活,需要消耗一部分能源。在风电场运行期生产性建筑物的能源主要是电能。本项目所建风电场运行期间主要建筑及电气设备有:风电场照明系统、通风空调系统、一次、二次、通讯设备等负荷;电气设备电能损耗主要产生在集电线路、主变压器、箱式变电站、

厂用变压器等。为了便利使用及稳定运行,风电场自身用电由国家电网提供,国家电网主要由火电提供,所以风电场运行期由于电能消耗产生的碳排放量由火电决定,即以火电的 CO₂排放因子 0.81 kg/kWh 计算。

报废期:本项目风电场拟运营 20 年,正好符合风力涡轮机规定使用年限,所以可认为在 20 年内不更换或废弃各种设备材料。运营期结束后,大量材料废弃并进行处理时仍可能产生温室气体。部分材料可进行回收利用,所以在总的碳排放量中需减去回收的部分。

2 研究结果

2.1 建设期

2.1.1 建设期——植被变化

根据风电场可行性报告,风电场所占地原为农田,由于风电场的建设运营,该地将减少 21 年的农田水平固碳量。建设期过后,在临时征用土地上进行植被恢复,恢复后为草地。忽略草生长时间,本文按运营期 20 年计算恢复植被固碳量,并使用农田与草地的全国平均固碳量数值计算植被变化带来的固碳量损失(表 3)。

表 3 植被变化固碳影响计算
Table 3 Calculation of carbon sequestration affected by vegetation changes

时期 Periods	土地类型 Land type	面积/hm ² Area/hm ²	年数/a Year/a	单位固碳量/t hm ⁻² a ⁻¹ Unit carbon sequestration content/ t hm ⁻² a ⁻¹	碳汇能力/tC Carbon Sequestration capacity/tC	总计/tC Total/tC
植被破坏 Vegetation deterioration	农田	40	21	0.38 ^[23]	(-)319.20	
草地恢复 Recovery	草地	17	20	0.50 ^[24]	170.00	(-) 149.20

计算可得,由于风电场建设对植被造成改变,在 21 年运行寿命中,植被碳汇量减少 149.20 tC。

2.1.2 建设期——建设工程

建设期建设工程部分的总碳排放量经计算相当于 3.86×10⁴tCO₂,折合为 1.05×10⁴tC。

表 2 风电场材料及能源温室气体排放清单^[7,14-22]

Table 2 Greenhouse gas emission inventory of energy and materials of wind farm

材料/能源 Materials/energy	单位 Unit	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
钢铁 Steel	kg/t	2473.00	0.04	0.07
不锈钢 Stainless steel	kg/t	3275.00	0.04	0.07
钢筋钢 Concrete steel	kg/t	2163.83	0.10	0.07
玻璃制品 Glass	kg/t	566.00	0.04	0.01
环氧树脂 Epoxy	kg/t	3941.00	0.08	0.12
聚酯纤维 Polyester	kg/t	3941.00	0.08	0.12
铜 Copper	kg/t	6536.00	0.16	0.19
混凝土 Concrete	kg/t	119.02	0.03	8.70×10 ⁻⁵
汽油 Gasoline	kg/L	2.26	9.80×10 ⁻⁵	1.96×10 ⁻⁵
柴油 Diesel	kg/L	2.73	1.11×10 ⁻⁴	2.21×10 ⁻⁵
电能 Electricity	kg/kWh	0.81	-	-
铜芯电缆 Copper wire cable	kg/10 ³ km	444.22	-	-

建设工程部分主要是由于各种资源能源的消耗引起碳排放。资源消耗主要是由于风机材料制造和基础工程建材的使用;能源消耗主要由于基础建设及设备安装中机械工程车的使用。其中,能源消耗引起的碳排放量如表 4 所示:

表 4 建设工程能源消耗计算
Table 4 Calculation of energy consumption for construction engineering

能源 Energy	总消耗量/kWh 或 L Aggregate consumption/kWh or L	CO ₂ 排放量/tCO ₂ CO ₂ emission/tCO ₂	碳排放量/tC Carbon emission/tC
电能 Electricity	1.30×10 ⁶	1.05×10 ³	3.81×10 ³
柴油 Diesel	1.60×10 ⁵	4.38×10 ²	1.59×10 ²
汽油 Gasoline	3.43×10 ⁴	7.78×10 ¹	2.83×10 ¹
总计 Total		1.57×10 ³	5.69×10 ²

2.1.3 建设期——运输工程

项目建设期需要运输的主要是各种机械设备及基础工程所需的建筑材料,如风机设备、变压器设备、线路材料及建筑材料。运输工程产生碳排放的主要原因是运输过程的油耗,而油耗与距离及货物重量相关。计算发现,运输工程的总柴油消耗量为 2.30×10⁵L。由此计算得到碳排放量相当于 6.30×10²tCO₂,折合为 1.72×10²tC。

将建设期的碳排放分为三大部分:植被变化、建设工程和运输工程。经过计算,植被变化、建设工程和运输工程造成的碳排放量分别是 149.20 tC、1.05×10⁴tC 和 1.72×10²tC,其中建设工程占建设期总碳排的 97.04%,主导着建设期的碳排放总量(图 2)。

2.2 运营期

本项目风电场拟运营 20 年,根据风电场运营的能源年消耗量,可计算得到整个运营期将要排放的总碳量,相当于 6.27×10⁴tCO₂,折合成 1.71×10⁴tC。

2.3 报废期

本项目风电场拟运营 20 年,正好符合风力涡轮机规定使用年限,所以可认为在 20 年内不更换或废弃各种设备材料。运营期结束后,大量的材料废弃,废弃处理时仍可能产生温室气体。部分材料可进行回收利用,所以在总的碳排放量中需减去回收的部分。下表(表 5)为各种材料的回收及其它处理情况。

表 5 风机回收和废物处理^[25]
Table 5 Recycling and disposal of the waste from the wind turbines

材料 Materials	拆除类型 Dismantle type	回收量/t Recycle/t	填埋量/t Landfill/t	焚烧量/t Incineration/t
不锈钢 Stainless steel	90%回收,10%填埋	2653.78	294.86	—
生铁 Cast iron	90%回收,10%填埋	849.96	94.44	—
铜 Copper	95%回收,5%填埋	54.72	2.88	—
环氧树脂 Epoxy	100%焚烧	—	—	240.00
塑料制品 Plastics	100%焚烧	—	—	57.60
玻璃纤维 Glass fiber	100%焚烧	—	—	583.20
混凝土 Concrete	100%填埋	—	72500.00	—

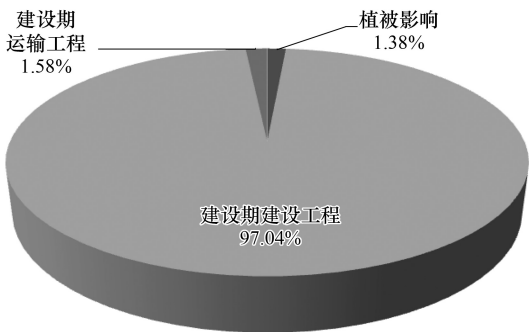


图 2 风电场建设期各部分碳排放对比
Fig. 2 Proportion of carbon emission from each stage of the construction period of wind farm

在废弃材料的处理处置阶段,虽然不锈钢、铜等金属材料有较大的回收量,但在回收时也会造成一定得温室气体排放;除此之外,材料的填埋、焚烧也会产生碳排。最终计算得到,废弃阶段的碳排量相当于 $6.68 \times 10^3 \text{ tCO}_2$,折合成 $1.83 \times 10^3 \text{ tC}$ 。

2.4 风电场生命周期碳排量

综合以上计算,建设期植被变化导致风电场所在地植被碳汇量减少了 149.20 tC ;建设期建设工程部分的总碳排量相当于 $3.86 \times 10^4 \text{ tCO}_2$,折合为 $1.05 \times 10^4 \text{ tC}$;建设期运输工程部分的总碳排量相当于 $6.30 \times 10^2 \text{ tCO}_2$,折合为 $1.72 \times 10^2 \text{ tC}$;20 年运营期总碳排放量相当于 $6.27 \times 10^4 \text{ tCO}_2$,折合成 $1.71 \times 10^4 \text{ tC}$;报废期的碳排量相当于 $6.68 \times 10^3 \text{ tCO}_2$,折合成 $1.83 \times 10^3 \text{ tC}$ 。

将所有阶段的碳排放量加和,得到整个风电场从项目建设开始到运行 20 年结束全生命周期的碳排放量,折合为 $2.97 \times 10^4 \text{ tC}$ 。

在整个碳排放过程中,运营期占的比重最大,为 57.74%,其它阶段分别为:建设期植被影响 0.0005%、建设期建设工程部分 35.54%、建设期运输工程部分 0.58%,报废期 6.15%。植被影响造成的碳排量虽然很大,但其在风电场整个生命周期中占到的比例较小(图 3)。

在整个生命周期过程中,运营期由于电能消费,温室气体排放量最大,其次是建设期。运营期持续时间为 20 年,建设期为 1 年,所以在排放密度上,建设期远超过运营期,对环境的影响相对来说更大。建设期的建设工程部分为主要碳排放贡献者,远大于运输工程和植被影响。建设工程中基础工程建材和风机材料的生产造成了主要的碳排放,这部分属于资源消耗造成的碳排放,大概占建设工程总碳排的 96%,而机械车辆作业消耗的能量造成的碳排放只有 4%(图 4)。

若是进一步扩大系统边界,考虑报废期的材料回收使大量资源继续应用到其它项目中,即相当于在建设工程部分没有使用这部分资源,则可将这部分资源造成的碳排从总碳排放量中除去,对上述计算方法进行修正。

修正时,应注意的是,只考虑报废期回收材料使总碳排量减少的部分,即除去该部分材料建设工程阶段的碳排量,但其运输工程中产生的碳排放不可忽略,其它阶段的计算均不发生改变。根据表 6 中风机回收和废物处理可知:只对不锈钢、生铁及铜进行回收,回收量分别为 90%,90%,和 95%,将其折合为减少的碳排量,即为 $1.12 \times 10^4 \text{ tCO}_2$,折合成 $3.06 \times 10^3 \text{ tC}$ 。

图 5 为修正前后各阶段排放量对比图。二者区别在于建设工程部分,修正后由于考虑材料回收对前几阶段的影响,总碳排放量要除去回收部分在建设工程计算的碳排放量,使得总碳排放量减少。

3 分析与讨论

3.1 植被影响

风电场施工过程中,风机与变电设备占地、道路铺设、集电线路区和施工临时占地都会对当地地表植被造成破坏。表层影响为植被面积损失:占地范围内植被遭受砍伐、铲除、掩埋等人类干扰,导致植被消失;深层影响为土层扰动,土壤生产力受损,植物多样性减少及分布变化。根据计算,由于风电场建设导致农田破坏,并在建设完成后做草地恢复这一过程中引起的碳汇量损失为 149.20 tC 。上述土壤扰动、生物量减少引发的碳排放影响难以体现在计算中,故风电场建设的间接碳排放远不止 149.20 tC 。

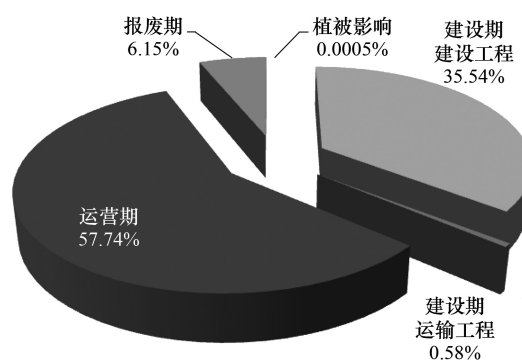


图 3 修正前各阶段碳排量

Fig. 3 Carbon emission of each stage of the total cycle before modification

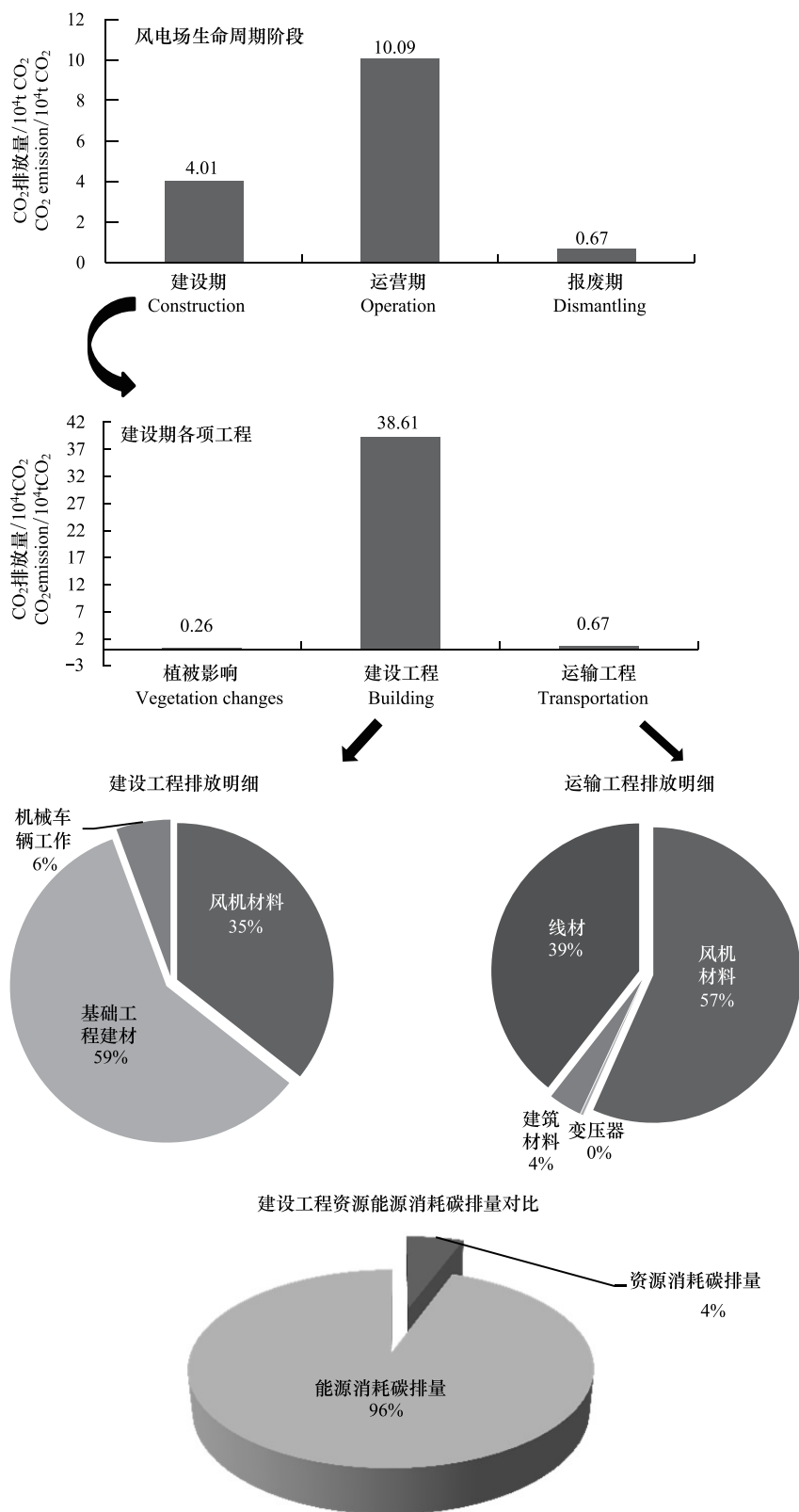


图 4 风电场生命周期各阶段碳排分析

Fig. 4 Carbon emission of each stage of the total cycle of the wind farm

实际建设过程中,施工前需要将基础表土剥离(约 50 cm),并在基坑一侧堆放,以供植被恢复时表土回覆。此段时间,土壤的水分养分有所流失,风沙产生,地表径流污染。水、气、土三圈都受到一定程度的破坏。

综上所述,风电场的建设对于自然生态环境的影响不容忽视。一方面,在对风电场建设的环境影响评价需要更加全面而定量考虑对自然环境的影响,重新考察风能发电的环境友好性;另一方面,对于风电场建设对环境造成的影响要采取更加及时有效的补偿恢复办法,重点在于严格执行。

3.2 生产期碳排分析

在以往的风电场材料生产碳排分析中,只对风机材料进行了计算^[6,8],但是,通过本研究发现,在风电场设备及线路安装工程中使用了大量的线材,对运输耗能排放有约 3% 的贡献。在所有线材中,铜芯电缆所占比重最大,以铜芯电缆的排放代表整个线材部分的生产排放,可得到其生产阶段排放值。生产和运输综合,建设期电缆的排放总量约为 39.56 tCO₂,折合成 10.79 tC。

建设工程车的耗油碳排量也曾经被以往研究所忽略。据计算,混凝土浇筑、钢筋安装、土方开挖回填所需工程车工作消耗柴油引起的碳排量占总建筑工程大约 4%。此外,体型大,工作高度高的风电机安装也是风电场建设工程所独有的部分。其需要 500 t 履带吊两台,对每台风机工作 2—3 台班才可完成相关吊装安装工作。所以,吊装车作业对碳排放也有很大贡献,本文中此方面数据欠缺,尚未将其列入计算,亟待后续研究。

3.3 运营期碳排分析

传统研究将风电视作一种清洁能源,认为风力发电过程不会产生任何排放^[6,8],但在本研究中,由于风电场需要维持许多大型设备的正常运转以及工作人员的日常生活,并且常年运行,所以在整个生命周期中会消耗大量的电能,运营期年用电量占风电场年上网电量的 3.9%。运营用电来自电网,而电网以火电为主体,从而产生大量排放。因此风能发电从这一角度来讲间接消耗矿物燃料,产生一定环境污染。除此之外,由于风力发电固有的间歇性和不稳定性,必须要有足够的调峰资源以保证电力系统的稳定。一系列的调节系统会耗费大量金属材料并消耗大量电能,更加重了风电隐含的生态环境影响。

4 结论

整个风电场从植被破坏开始到报废处置,21 年内的全生命周期折合碳排放量为 2.97×10^4 tC,单位发电量碳排放量 1.09×10^{-3} tCO₂/kWh, 2.98×10^{-4} tC/kWh,与已有研究中对于火力发电的碳排放量估算值相差不大。

以往研究认为风机生产阶段 CO₂ 排放占风电场生命周期比例最大^[12],并且风电场产电过程本身并不排放污染物和温室气体,所以可用风机全过程的排放代表风电总排放进行建模。但本研究在进行建设期清单分析时,全面地考虑了植被影响、用量大但较易被忽略的电缆光缆铺设引发的碳排放、运输所耗燃油之外的建设工程车耗油碳排、运营期能耗产生的碳排放等,发现风电场建设和运营期间存在大量间接碳排放,对自然生态环境的影响不容忽视。

参考文献 (References):

- [1] 王仲颖, 时璟丽, 赵勇强. 中国风电发展路线图 2050. 国家发展和改革委员会能源研究所, 2011.
- [2] 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. 科技管理研究, 2012, 32(18): 259-262.
- [3] Pehnt M, Oeser M, Swider D J. Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany. Energy, 2008, 33(5): 747-759.
- [4] Yang Q, Chen G Q, Zhao Y H, Chen B, Li Z, Zhang B, Chen Z M, Chen H. Energy cost and greenhouse gas emissions of a Chinese wind farm. Procedia Environmental Sciences, 2011, 5: 25-28.
- [5] Ardente F, Beccali M, Cellura M, Lo Brano V. Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm. Renewable and Sustainable

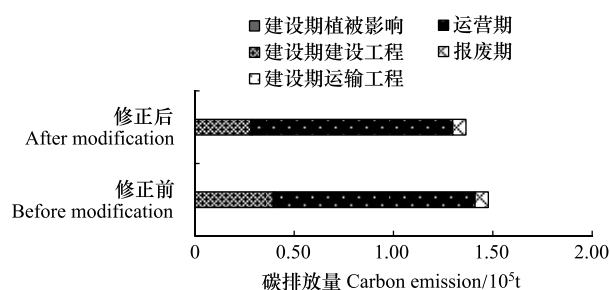


图 5 修正前后各阶段碳排放量对比

Fig. 5 Comparison of the carbon emission of each stage before and after modification

- Energy Reviews, 2008, 12(1): 200-217.
- [6] 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. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2322-2329.
- [7] Martínez E, Sanz F, Pellegrini S, Jiménez E, Blanco J. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. Renewable Energy, 2009, 34(3): 667-673.
- [8] 郭敏晓, 蔡闻佳, 王灿, 陈吉宁. 风电场生命周期 CO₂ 排放核算与不确定性分析. 中国环境科学, 2012, 32(4): 742-747.
- [9] Lenzen M, Munksgaard J. Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines—review and applications. Renewable Energy, 2002, 26(3): 339-362.
- [10] Martínez E, Jiménez E, Blanco J, Sanz F. LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine. Applied Energy, 2010, 87(7): 2293-2303.
- [11] Tremeac B, Meunier F. Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(8): 2104-2110.
- [12] Crawford R. Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2653-2660.
- [13] Guezuraga B, Zauner R, Pölz W. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. Renewable Energy, 2012, 37(1): 37-44.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [15] Kabir M R, Rooke B, Dassanayake G D, Fleck B A. Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation. Renewable Energy, 2012, 37(1): 133-141.
- [16] Athena Sustainable Materials Institute. A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential. Canada: Cement Association of Canada, 2006.
- [17] Schleisner L. Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. Renewable Energy, 2000, 20(3): 279-288.
- [18] Giurco D, Stewart M, Suljada T, Petrie J. Copper recycling alternatives: an environmental analysis // 5th Annual Environmental Engineering Research Event. Noosa, QLD, 2006.
- [19] Rieradevall J, Domènech J X, Fullana P. Application of life cycle assessment to landfilling. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1997, 2(3): 141-144.
- [20] White S W. Net energy payback and CO₂ emissions from three midwestern wind farms: an update. Natural Resources Research, 2006, 15(4): 271-281.
- [21] 马忠海. 中国几种主要能源温室气体排放系数的比较评价研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2002.
- [22] ATHENA Sustainable Materials Institute. Cradle-to-gate life cycle inventory: Canadian and US steel production by mill type. Ottawa, Canada: Markus Engineering Services, 2002.
- [23] 韩冰, 王效科, 逮非, 段晓男, 欧阳志云. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 612-619.
- [24] 郭然, 王效科, 逮非, 段晓男, 欧阳志云. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 862-867.
- [25] 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.