

引用格式:王鑫淼, 马志勇, 周旺潇, 等. 光伏发电系统碳中和及其影响因素[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1735-1744. [Wang X M, Ma Z Y, Zhou W X, et al. Carbon neutralization in photovoltaic power generation system and influencing factors[J]. Resources Science, 2022, 44(8): 1735-1744.] DOI: 10.18402/resci.2022.08.15

光伏发电系统碳中和及其影响因素

王鑫淼^{1,2}, 马志勇³, 周旺潇³, 黄 勇⁴, 陈利顶^{1,2}, 杨 磊^{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, 北京 100049; 3. 三峡集团云南能源投资有限公司, 昆明 650051; 4. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500)

摘 要:发展光伏能源是构建清洁能源体系、实现社会经济发展绿色低碳转型的重要举措,明确光伏发电系统的碳中和路径,辨识其影响因素对于能源转型从而促进碳中和目标实现具有重要意义。本文基于生命周期评价,解析了光伏发电系统的碳排放特征,探讨了光伏发电系统全生命周期碳收支和光伏阵列下草地生态系统固碳增汇的影响因素。研究发现:①功率为500 kW的光伏电站从生产到废弃处理全过程碳排放量约为 1.00×10^6 kg;②相比标准煤发电,其全生命周期中减碳量约为 3.05×10^5 kg/a,节省标准煤约 1.24×10^5 kg/a;③若光伏阵列下草地生态系统固碳速率以 $0.33 \text{ Mg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 为参考,全生命周期内草地生态系统的固碳量约为8.25 Mg,考虑其相比标准煤发电的减碳量后,500 kW光伏发电系统约需3.27年可以中和其生产建造过程的碳排放。光伏组件和设备生产过程中各阶段的能耗、光伏场地气候特征等均会影响光伏发电系统碳中和目标的实现,采用节能环保材料、改进生产工艺、优化光伏场地选址、构建“光伏+生态修复”协同发展技术可以有效提升光伏发电系统的碳中和效率及固碳增汇能力。

关键词:清洁能源;光伏发电;生命周期分析;碳中和;生态系统固碳

DOI: 10.18402/resci.2022.08.15

1 引言

碳中和行动是有效应对气候变化,实现社会、经济、自然可持续发展的重要举措。中国对2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和的承诺对碳中和科学机制和技术路径的研究带来了极为紧迫的需求和挑战。光伏发电技术利用光伏效应将太阳能转化为电能,与传统火力发电相比,光伏发电能优化能源结构、保障能源安全,还可以有效降低碳排放和污染物排放,改善区域生态环境^[1]。据统计,截至2020年底中国累计光伏并网容量达253 GW,同比增长23.5%;全年光伏发电量达2605亿kWh,同比增长16.2%^[2]。碳中和愿景下,能源结构转型的迫切

需求使光伏发电也面临新的机遇和挑战:一方面,光伏发电系统需要选择大量适宜的土地扩大装机规模,并提高光能利用效率,这对土地资源的合理利用和光伏场地的选址提出了更高的要求;另一方面,光伏产业在生产、运输、施工、处置全生命周期都会有不同程度的碳排放问题,需要明确其碳排放过程和特征,构建科学的碳中和技术路径和策略。

基于生命周期分析明确光伏发电系统的碳排放特征,综合考虑其能源消耗、清洁能源生产以及相比传统火力发电减少的碳排放,是解析光伏发电系统碳中和机制及其技术路径的有效途径。目前,国际上对光伏产业生命周期评价的研究主要聚焦

收稿日期:2022-01-11;修订日期:2022-06-17

基金项目:中国科学院青年创新促进会(2018057);中国科学院生态环境研究中心碳达峰碳中和生态环境技术专项(RCEES-TDZ-2021-13);中国生态学学会项目(清洁能源生产对生态环境的潜在影响)。

作者简介:王鑫淼,女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为景观格局与生态过程。E-mail: wangxinmiao710@163.com

通讯作者:杨磊,男,河南信阳人,副研究员,主要研究方向为景观格局与生态安全。E-mail: leiyang@rcees.ac.cn

在能源回收期^[3]、碳排放^[4,5]和环境影响^[6]等几个方面。中国学者对光伏组件的环境影响^[7-9]、碳排放^[10]、光伏发电技术^[11]等也开展了相关研究,例如,谢明辉等^[8,9]通过建立生命周期环境影响评价模型,对光伏组件生产的环境影响和废弃处置进行了分析,发现太阳能级多晶硅生产对环境的影响主要体现在危害人体呼吸系统、致癌等,其次是对资源(矿产资源、化石燃料)和环境质量(生态毒性、酸化、富营养化)的影响;韩梦瑶等^[10]分析了中国光伏发电的时空分布、减排效应,发现中国现有光伏装机规模的潜在减排效益到2030年可以达到19.2亿t;苗青青等^[11]对光伏发电技术中晶硅太阳能电池、薄膜太阳能电池、钙钛矿太阳能电池等生产工艺及其光电转换效率进行了较为详细的论述。然而,目前光伏发电系统碳中和的路径及其影响因素却缺乏系统的探讨。与光伏发电相比,传统火力发电的碳排放主要集中于煤炭生产、运输和燃煤发电环节,其中燃煤发电环节是碳排放最高的阶段。而光伏发电在光电转换过程中基本可以视为不产生碳排放,因而相比传统火力发电,光伏发电系统主要通过运行阶段的零碳排放来实现清洁能源生产,但光伏电站组件和设备的生产、组装及处理环节同样具有较高的碳排放。

光伏发电系统除了在运行阶段的碳减排以外,光伏阵列下陆地生态系统也具有一定的固碳功能。作为光伏发电系统固碳增汇的一个组成部分,陆地生态系统固碳是通过植物光合作用吸收CO₂转化为有机物,再通过凋落物等形式进入土壤^[12]。陆地生态系统通过对CO₂的资源利用,在全球碳平衡中发挥着重要作用,陆地生态系统固碳也成为应对气候变化、实现碳中和的重要举措^[13]。光伏阵列下陆地生态系统固碳主要包括植被碳库(地上和地下生物量碳库)和土壤碳库两部分^[14,15]。植被固碳是植物通过光合作用吸收CO₂并产生地上、地下生物量的过程;土壤固碳则是土壤中的有机物经生物地球化学作用,最终以较稳定的有机碳形式储存在土壤中的过程^[16]。植物枯枝落叶及根系残体是土壤有机质的主要来源,土壤有机质的增加能够改善土壤条件,促进植物生产而提高植被初级生产率,形成土壤碳库和植被碳库的正反馈。目前多数传统光

伏发电场地中,草地是光伏阵列下的主要植被类型,其同样具有较强的碳汇能力^[17]。有研究表明,中国草地生态系统碳库大小为29.1 Pg C^[18],并且草地生态系统总碳储量的90%储存在表层0~20 cm土壤中^[19,20]。徐丽^[21]和Piao等^[22]的研究也证实,草地生态系统在1980—2010年间发挥的碳汇功能仅次于森林生态系统。

为了更明确地解析光伏发电系统的碳中和特征及其影响因素,本文从光伏发电系统全生命周期的角度出发,解析光伏组件和电场设备的生产、安装、运输以及废弃处理过程的碳排放特征,计算典型光伏电站光伏发电阶段相比传统火电减少的碳排放量以及光伏阵列下陆地生态系统的固碳量,讨论光伏发电系统碳减排和固碳增汇的路径及其影响因素。

2 研究方法

图1为光伏发电系统碳中和的实现过程,列举了光伏发电系统碳收支的主要组成部分及其影响因素,以及碳中和能力提升的路径。据此,本文将分析光伏发电系统全生命周期的耗电量,探讨其全生命周期的碳排放特征;将同等发电量条件下光伏发电相比传统火电减少的碳排放量,作为光伏发电系统的碳减排量,并解析清洁能源生产碳减排和光伏场地陆地生态系统固碳共同作用下的碳中和过程及特征;结合文献资料分析光伏发电系统碳排放和固碳增汇的影响因素,明确光伏发电系统碳中和的提升路径。

2.1 光伏发电系统全生命周期的耗电量与碳排放量

图2展示了光伏发电系统全生命周期的主要组成,包括光伏组件生产加工、设备运输、电场建造、发电运行和废弃处置5个阶段。虽然太阳能作为清洁能源有着巨大发电潜力,但光伏组件和电场设备从生产到报废的每个环节都会直接或间接地消耗化石能源而产生碳排放^[23,24]。其全生命周期的碳排放主要集中在光伏组件与电场设备生产、安装运输与废弃处置阶段^[25],但不同光伏发电系统这些环节的能源消耗量也存在较大的差异^[26]。在光伏发电系统的耗电量分析方面,龚道仁等^[24]研究了典型1 kW光伏发电系统的耗电量及其碳排放特征,得出1 kW

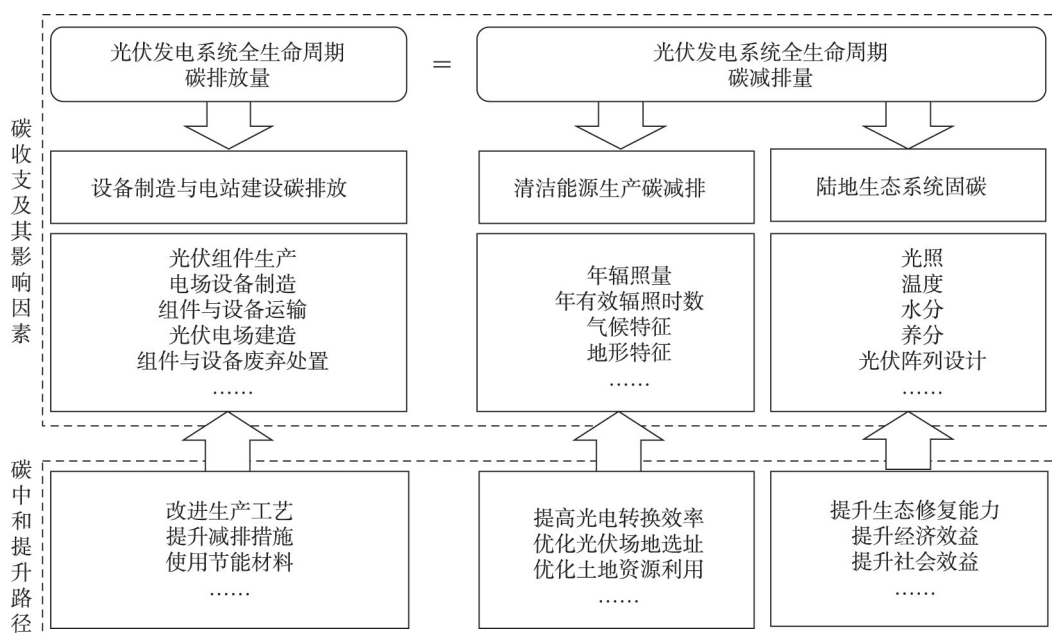


图1 光伏发电系统碳中和实现过程

Figure 1 Implementation process of carbon neutralization in photovoltaic power generation system

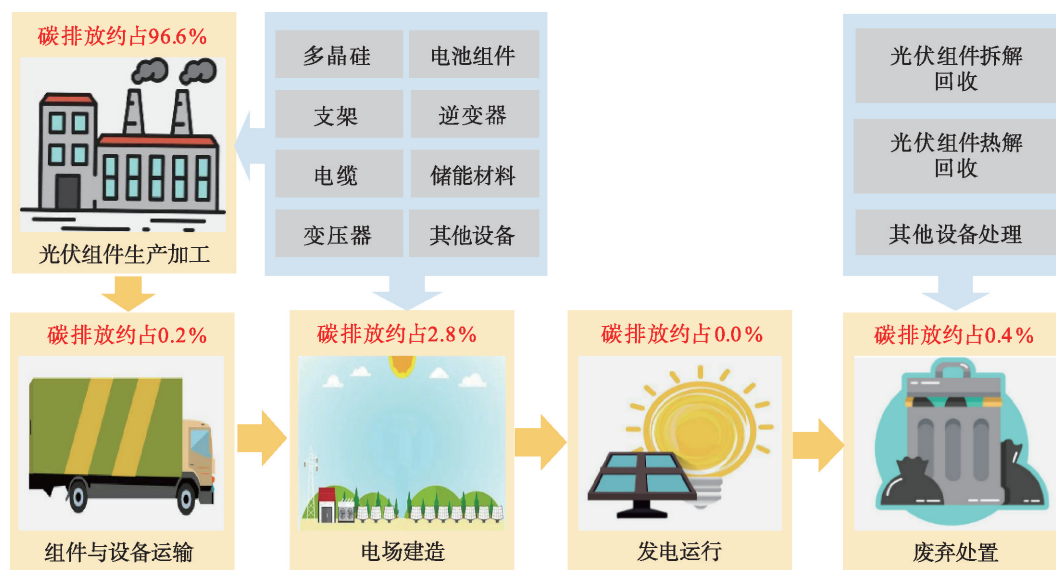


图2 光伏发电系统生命周期的碳排放特征

Figure 2 Carbon emission characteristics of photovoltaic power generation system during its life cycle

注: 图中碳排放占比数据来自参考文献[25]。

光伏发电系统全生命周期(25年)的耗电量约为2707 kWh,产生碳排放2409 kg。

2.2 光伏发电系统运行阶段的碳减排量

在年均有效辐照时数为 H ,年均太阳辐照量为 T (辐照量和有效辐照时数的关系为: $T=3.6H$),平均温度影响因子为 d 的地区发展光伏,设该光伏系统

的发电效率为 e ,使用年限为 m ,光伏组件开始的最大功率为 P ,每年的衰减功率为 X ,该光伏系统整个生命周期里的总发电量 Q_{total} 可通过下式计算:

$$Q_{\text{total}} = d \times e \times H \times P \sum_{i=1}^m (1 - X) \quad (1)$$

龚道仁等^[24]分析表明,1 kW光伏发电系统在3000、5000和9000 MJ/m²的太阳辐照量下,考虑温

度影响因子和总有效发电效率 $d \times e = 0.75$, 光伏组件每年按 2% 的功率衰减, 其全生命周期的累计发电量分别为 12372、20640 和 37175 kWh。

参考中国传统火力发电厂的平均耗能, 1 kg 标准煤完全燃烧产生 CO_2 排放为 2.46 kg^[24]。根据中国电力统计年鉴, 发电 1 kWh 要消耗约 0.30 kg 标准煤^[27]。按此计算, 采用传统火力发电 1 kW 需要排放 0.74 kg CO_2 。相比传统火力发电, 采用光伏发电 1 kWh 相当于减少 CO_2 排放 0.74 kg。光伏发电系统在运行阶段减少的碳排放量计算如下:

$$R = Q_{\text{total}} \times c \times f \quad (2)$$

式中: R 为光伏系统运行阶段减少的碳排放 (kg); $c = 0.30 \text{ kg/kWh}$, 表示每发电 1 kWh 节省 0.30 kg 标准煤; $f = 2.46 \text{ kg/kg}$, 表示每节省 1 kg 标准煤, 相当于减少 2.46 kg 碳排放。

2.3 光伏阵列下陆地生态系统的固碳速率

传统光伏阵列下植被覆盖多为草地, 草地生态系统的固碳速率已经有了丰富的研究, 但因草地的不同管理和利用方式等对其固碳速率有较大的影响, 这使不同研究中草地生态系统的固碳速率存在一定的差异。例如, 白永飞等^[28]通过数据集成分析, 并结合遥感和模型手段, 估算出的固碳速率为 $0.25 \text{ Mg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; Lu 等^[29]在实地调研的基础上, 结合文献资料, 分析了 2001—2010 年中国 6 项国家重点修复工程的碳储量变化, 得出草地生态系统年均固碳速率为 $0.26 \text{ Mg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的结果; Fang 等^[30]汇总他人研究, 得到 2001—2010 年草地系统固碳速率为 $0.48 \text{ Mg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。在本文中, 光伏阵列下草地生态系统的固碳速率参考文献[28-30], 取其平均值 $0.33 \text{ Mg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

2.4 光伏发电系统碳中和时间

光伏发电系统运行阶段的累计碳减排量和陆地生态系统的累计固碳量等于光伏组件生产、电场设备制造、组件与设备运输、电场建造、废弃处置等

环节的碳排放量即实现碳中和(图 1)。本文以年辐照量为 5000 MJ/m^2 的地区为例, 这一辐照量地区光热资源充足, 年平均日照时数较长, 占适宜光伏发展地区的面积比例较大^[31]。假设构建功率为 500 kW、占地面积 1 hm^2 的光伏电站, 考虑草地生态系统固碳速率为 $0.33 \text{ Mg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 基于 1 kW 光伏系统的碳排放相关数据, 探讨光伏发电系统碳中和的特征及其影响因素。考虑光伏发电系统运行阶段减少的碳排放, 其实现碳中和的时间计算如下:

$$T = \frac{M}{r + k} \quad (3)$$

式中: T 为光伏发电系统实现碳中和时间 (a); M 为光伏发电系统全生命周期的碳排放量 (kg); r 为光伏发电系统年均减少碳排放量 (kg); k 为单位面积草地每年的固碳量。

3 结果与分析

3.1 光伏发电系统的碳排放特征

表 1 为功率为 500 kW、占地面积 1 hm^2 的光伏电站在年辐照量为 5000 MJ/m^2 地区的全生命周期碳排放。根据公式(2), 这一规模的光伏发电系统从原材料获取、生产、运输、施工到报废处置的全生命周期累计耗电量约为 $1.35 \times 10^6 \text{ kWh}$ 。若这些耗电量来源于传统的火力发电, 相当于消耗标准煤 $4.06 \times 10^5 \text{ kg}$, 产生的碳排放为 $1.00 \times 10^6 \text{ kg}$ 。需要注意的是, 受装机规模、使用年限等条件影响, 不同学者对光伏发电系统全生命周期碳排放的估算存在一定的差异, 例如, 翁琳等^[25]的计算表明 12 MW、占地 14 hm^2 的典型光伏发电系统全生命周期的碳排放约为 $2.18 \times 10^7 \text{ kg}$; 郭敏晓^[32]对使用年限为 25 年、占地 8 hm^2 、功率为 5 MW 的某大型光伏并网电站各阶段碳排放进行核算, 发现其全生命周期碳排放为 $4.35 \times 10^7 \text{ kg}$ 。

光伏组件的材料、生产工艺、安装质量、废弃处置工艺等会直接影响其能源消耗量。翁琳等^[25]研究发现, 光伏组件原材料获取和生产环节占全部碳排

表 1 光伏发电系统全生命周期的能源消耗与碳排放特征

Table 1 Energy consumption and carbon emission of typical photovoltaic power system

功率/kW	面积/ hm^2	耗电量/kWh	耗标准煤/kg	碳排放/kg
500	1	1.35×10^6	4.06×10^5	1.00×10^6

2022年8月

放的96.6%,这使光伏组件的材料、生产工艺等影响更加举足轻重。作为光伏发电系统的关键组件,单晶硅太阳能电池具有较高的光电转换效率,但其生产过程伴随着较高的能耗和碳排放,相比之下,多晶硅太阳能电池虽然转换效率略低,但因其廉价的成本,在光伏组件生产中应用更普遍^[33],这使光伏发电效率与光伏组件成本之间存在权衡关系,也使光伏发电效益与碳排放之间存在权衡。李兴盛等^[34]针对1 kW多晶硅电池发电系统的研究发现,采用金刚线切割工艺的多晶硅电池发电系统碳排放仅为砂浆切割工艺总碳排放的17.6%,能耗和碳排放均明显降低。就组件与设备运输环节而言,光伏组件和电场设备从生产地到安装场地的运输距离越长,运输过程中燃料的消耗量就越大,其碳排放就越高。就电场建造环节而言,于志强等^[35]分析表明光伏发电系统部件的产品质量、系统安装质量等因素会直接影响光伏发电系统随时间的衰减程度和最大输出功率,从而影响光伏系统的碳减排效果。就废弃处置环节而言,光伏组件不同的废弃处置工艺,其碳排放差异也很大。赵若楠^[3]研究155 kW光伏系统在不同处置方式下的碳排放情况发现,采用填埋方式处理光伏组件的碳排放量约为0.12 kgCO₂-eq;采用人工拆解回收组件的碳排放约为-9.88 kgCO₂-eq,即实现9.88 kgCO₂-eq的碳减排;而采用人工拆解+热解回收的方法可以回收利用多种物质,其减少的碳排放可达到约55.60 kgCO₂-eq,占生产和使用阶段碳排放的33.54%。此外,有研究表明,光伏阵列平衡系统铝支架、光伏组件铝边框、太阳能级多晶硅锭生产过程和硅片回收过程中所消耗的电力和工业硅也是影响光伏系统总能量需求的关键因素^[35]。

3.2 不同年辐照量条件下光伏发电系统碳减排特征

如图2所示,光伏发电系统在运行阶段可以有效减少碳排放,但运行阶段的发电量受场地太阳能

资源的直接影响。受纬度、海拔、气候、地形等地理环境的影响,不同地区的太阳能资源存在较大的差异。例如,在中国青海、西藏中西部、新疆东部等太阳能资源极为丰富的地区,年辐照量可达9000 MJ/m²,而在四川、重庆、湖南中西部等地区年辐照量则小于3000 MJ/m²。在不同年辐照量下根据公式(1)计算,发现500 kW的光伏发电系统的累计发电量、年均发电量、年均节省标准煤、年均碳减排量随着年有效辐照时数和年辐照量的增加而增加(表2)。在有效辐照时数长、辐照量丰富的地区,光伏发电系统能更好地发挥碳中和的作用。在年辐照量为3000 MJ/m²的地区,其年均发电量为 2.47×10^5 kWh/a,碳减排量为 1.83×10^5 kg/a;而在年辐照量为9000 MJ/m²的地区,年均发电量可达到 7.44×10^5 kWh/a,碳减排量为 5.49×10^5 kg/a。

光伏发电系统安装场地的气候条件会影响光伏组件的发电效率及其碳减排量。其中,太阳能资源的差异会直接影响光伏发电系统的发电量,进而影响碳减排效果^[24]。例如,何津津等^[36]对光伏系统安装地点进行敏感性分析发现,功率1 kW年均发电量约960 kWh的光伏发电系统在太阳能资源丰富的拉萨地区碳排放回收期是1.51年,而在太阳能资源相对较少的南京地区碳排放回收期为2.60年。此外,光伏组件的输出效率具有显著的温度效应,研究发现,标准测试条件下功率为280 W的晶体硅光伏组件温度每升高1℃,其功率大约会下降1.5 W^[37],因此,同等装机条件下温度较低地区光伏系统的发电量会显著增加。由以上分析可以看出,光伏发电系统的碳减排应全方位考虑场站气候条件等因素,优化场地选址,提高光能利用效率,以提高其碳减排能力。

3.3 光伏发电系统的碳中和分析

若不考虑气候条件对草地生态系统固碳量的

表2 不同年辐照量条件下光伏发电系统碳减排效果

Table 2 Carbon reduction effect of typical photovoltaic power system under different annual irradiation conditions

年辐照量/(MJ/m ²)	年有效辐照时数/h	累计发电量/kWh	年均发电量/(kWh/a)	年均节省标准煤/(kg/a)	年均碳减排量/(kg/a)
3000	833	0.62×10^7	2.47×10^5	0.74×10^5	1.83×10^5
5000	1388	1.00×10^7	4.13×10^5	1.24×10^5	3.05×10^5
9000	2500	1.90×10^7	7.44×10^5	2.23×10^5	5.49×10^5

影响,面积为1 hm²光伏电站在25年的时间内光伏阵列下覆草地生态系统的总固碳量约为8.25 Mg。表3为代表性光伏发电系统碳中和的时间分析。根据公式(3),若考虑光伏发电系统运行阶段减少的碳排放,在光伏发电碳减排和草地生态系统固碳的共同作用下,年辐照量为9000 MJ/m²的地区光伏发电系统实现碳中和仅需1.82年,而在年辐照量为3000 MJ/m²地区实现碳中和所需年数约为9000 MJ/m²地区的3倍。若不考虑光伏发电的碳减排量,而仅通过草地生态系统固碳来中和光伏系统全生命周期的碳排放,实现此过程则需要3030年。

本文以位于年辐照量为5000 MJ/m²地区的光伏发电系统为例,对其碳中和特征进行了理论探讨。需要明确的是,不同的光伏组件材料、生产工艺、光伏组件的运输距离、安装方式、废弃处置方式以及安装场地的太阳能资源、气候特征等都是影响光伏发电系统碳中和的重要因素。这些关键过程的碳收支特征在不同的环境条件下存在较大的差异,并且不同环境因素及因素间的作用也较为复杂,在光伏发电系统碳中和过程分析中需要因地制宜选择合适的参数,以更为精准地评估光伏发电系统的碳中和贡献。

3.4 光伏发电系统的生态效益探讨与展望

由表3也可以明显看出,光伏阵列下草地生态系统的固碳对碳中和的贡献相对较弱,仅靠生态系统固碳来中和光伏组件生产、电站建造和废弃处置等环节的碳排放极为困难,光伏发电系统促进碳中和目标的实现需要从生产工艺改进、减排措施和节能材料使用来降低生产过程各阶段的能耗。值得注意的是,由于光伏电站需要大量廉价的可利用土地及较强的太阳辐射,因此,大部分光伏电站建设于干旱、半干旱气候条件下的戈壁、荒漠及石漠化

地区^[38]。光伏阵列在这种环境中也具有一定的生态修复功能。例如,在生态脆弱的沙漠戈壁区发展光伏不仅可以提高光伏系统的生产效率^[39],还有助于防沙治沙、提升生态功能。这主要由于:①光伏阵列可以削减太阳辐射,减少土壤物理蒸发,减少土壤水分损失而有利于植物生长;②光伏阵列有一定的集雨功能,可以促进光伏阵列下植物群落的生长和演替;③光伏阵列可以削弱沙尘暴和风流沙的发生^[40]。光伏阵列不仅可以增加电站地表的粗糙度,减弱地表风,促进植被生长,且建成后的电站地表少有人为干扰,有利于受损生态系统的恢复^[41,42]。将光伏发电系统和生态修复相结合,可以充分发挥“光伏阵列-植被生态系统”蓄水保土、阻风固沙和调节气候等作用,让光伏发电与生态修复优势互补,既可以将丰富的太阳能资源转化为清洁能源,又可以固碳增汇,促进碳中和目标的实现。

光伏清洁能源的发展受到多种因素的限制,并且光伏板下土地资源的闲置以及经济收益的不足,使光伏发电的同时进行生态恢复或发展农林产业成为光伏基地资源综合高效利用的迫切需求。然而,当前光伏与生态修复协同发展缺乏较为系统的基础研究,未来研究应着重以下几个方面:

(1)光伏与生态修复结合的空间适应性科学基础研究,包括如何协同区域土地资源与环境特征,因地制宜设计生态修复模式和光伏系统。

(2)光伏阵列对关键环境要素和生态过程的影响机制研究,包括光伏阵列对光照、温度、水分、养分等环境要素以及土壤、植被、水文过程影响的机理研究。

(3)如何构建光-热-水-土-肥资源高效利用模式和技术以提升土壤保持、水源涵养、养分供给、固碳增汇等生态系统服务的科学机理研究。发展光

表3 不同年辐照量条件下光伏发电系统碳中和分析

Table 3 Carbon neutrality analysis of typical photovoltaic power system under different annual irradiation conditions

年辐照量/(MJ/m ²)	全生命周期碳排放量/kg	年均碳减排量/(kg/a)	草地生态系统固碳量/(kg/a)	时间/年
3000	1.00×10 ⁶	1.83×10 ⁵	0.33×10 ³	5.45
5000	1.00×10 ⁶	3.05×10 ⁵	0.33×10 ³	3.27
9000	1.00×10 ⁶	5.49×10 ⁵	0.33×10 ³	1.82
—	1.00×10 ⁶	—	0.33×10 ³	3030.30

2022年8月

伏清洁能源促进碳中和的同时,亟待集成土地适宜性评价和光热资源潜力评价,构建光伏与生态修复协同发展的技术与模式,进行合理的规划与设计,以更为高效地利用光热资源提升社会经济效益与生态效益,促进碳中和目标的实现。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于理论模型,以 5000 MJ/m^2 太阳辐照量地区为例,计算了建设面积为 1 hm^2 、功率为 500 kW 的光伏发电系统全生命周期的碳收支特征,讨论了光伏发电系统碳中和的影响因素及其技术路径。研究发现:

(1)功率为 500 kW 的光伏电站,从原材料获取、生产、运输、施工到报废处置的全生命周期生产过程碳排放量约为 $1.00\times 10^6\text{ kg}$ 。

(2)与传统火力发电相比,在平均年辐照量为 5000 MJ/m^2 的条件下,年均节省标准煤 $1.24\times 10^5\text{ kg}$,减少碳排放量 $3.05\times 10^5\text{ kg}$,实现碳中和需3.27年。在平均年辐照量为 3000 MJ/m^2 的地区,实现碳中和需5.45年;而在平均年辐照量为 9000 MJ/m^2 的地区,实现碳中和仅需1.82年。

(3)制约光伏发电系统碳中和的内因主要是光伏组件和电场设备自身生产、运输、组装、维护等环节产生的碳排放,且以光伏组件生产阶段的碳排放最多;安装场地气候因素等会影响光伏系统发电效率和固碳速率,是影响光伏发电系统碳中和的环境因素。

4.2 政策建议

基于以上结论,本文提出如下政策建议:

(1)光伏发电系统促进碳中和目标的实现需要从光伏组件生产工艺改进、减排措施提升和节能材料使用等方面来减少生产、建造和处置阶段的碳排放,并通过技术进步提高光电转换效率、优化光伏场地选址、优化土地资源利用等来提升光伏发电系统运行阶段的碳中和能力。

(2)光伏发电系统需要与区域生态修复有机结合,因地制宜构建“光伏+生态修复”协同发展的技术与模式,采取科学的生态系统管理措施提高其固碳增汇能力,维持和提升光伏阵列下土壤、植被的

生态系统服务功能,以“光伏+生态修复”协同发展促进社会、经济、生态效益的综合提升。

参考文献(References):

- [1] 牟初夫,王礼茂,屈秋实,等. 主要新能源发电替代减排的研究综述[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2323–2334. [Mu C F, Wang L M, Qu Q S, et al. Review of emission reduction research on major new energy generation[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2323–2334.]
- [2] 金艳梅,江华,强彦政,等. 中国光伏产业2020年回顾与2021年展望[J]. 太阳能, 2021, (4): 42–50. [Jin Y M, Jiang H, Qiang Y Z, et al. Review of China's PV industry in 2020 and prospect in 2021[J]. Solar Energy, 2021, (4): 42–50.]
- [3] 赵若楠,董莉,白璐,等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751–2757. [Zhao R N, Dong L, Bai L, et al. Inventory analysis on carbon of photovoltaic industry[J]. China Environmental Science, 2020, 40(6): 2751–2757.]
- [4] Miller I, Gencer E, Vogelbaum H S, et al. Parametric modeling of life cycle greenhouse gas emissions from photovoltaic power[J]. Applied Energy, 2019, 238: 760–764.
- [5] Raugi M, Peluso A, Leccisi E, et al. Life-cycle carbon emissions and energy return on investment for 80% domestic renewable electricity with battery storage in California (USA)[J]. Energies, 2020, 13(15): 1–22.
- [6] Kouloumpis V, Kalogerakis A, Pavlidou A, et al. Should photovoltaics stay at home? Comparative life cycle environmental assessment on roof-mounted and ground-mounted photovoltaics[J]. Sustainability, 2020, 12(21): 1–15.
- [7] 赵若楠,董莉,乔琦,等. 考虑处置阶段的光伏组件生命周期评价[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 807–813. [Zhao R N, Dong L, Qiao Q, et al. Life cycle assessment of photovoltaic module considering disposal stage[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 807–813.]
- [8] Xie M H, Ruan J L, Bai W N, et al. Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multi-crystalline photovoltaic production based on life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 648–659.
- [9] 谢明辉,阮久莉,白璐,等. 太阳能级多晶硅生命周期环境影响评价[J]. 环境科学研究, 2015, 28(2): 291–296. [Xie M H, Ruan J L, Bai L, et al. Environmental impacts of solar grade polysilicon based on life cycle assessment[J]. Research of Environmental Science, 2015, 28(2): 291–296.]
- [10] 韩梦瑶,熊焦,刘卫东. 中国光伏发电的时空分布、竞争格局及减排效益[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1338–1351. [Han M

- Y, Xiong J, Liu W D. Spatio-temporal distribution, competitive development and emission reduction of China's photovoltaic power generation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1338–1351.]
- [11] 苗青青, 石春艳, 张香平. 碳中和目标下的光伏发电技术[J]. *化工进展*, 2022, 41(3): 1125–1131. [Miao Q Q, Shi C Y, Zhang X P. Photovoltaic technology under carbon neutrality[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(3): 1125–1131.]
- [12] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534–574. [Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2022, 52(4): 534–574.]
- [13] 胡小夫, 王凯亮, 沈建永, 等. 基于生物固碳技术的CO₂资源化利用研究进展[J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 79–85. [Hu X F, Wang K L, Shen J Y, et al. Research progress of CO₂ resource utilization based on biological carbon sequestration technology[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 79–85.]
- [14] 尚二萍, 张红旗. 1980s–2010s新疆伊犁河谷草地碳存储动态评估[J]. *资源科学*, 2016, 38(7): 1229–1238. [Shang E P, Zhang H Q. Dynamic assessment of the carbon stock of different grassland types in the Yili Valley from 1980s to 2010s[J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1229–1238.]
- [15] He H L, Wang S Q, Zhang L, et al. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus[J]. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505–514.
- [16] 祝贞科, 肖谋良, 魏亮, 等. 稻田土壤固碳关键过程的生物地球化学机制及其碳中和对策[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(4): 592–602. [Zhu Z K, Xiao M L, Wei L, et al. Key biogeochemical processes of carbon sequestration in paddy soil and its countermeasures for carbon neutralization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 592–602.]
- [17] 王穗子, 刘帅, 樊江文, 等. 碳交易市场现状及草地碳汇潜力研究[J]. *草业学报*, 2018, 27(6): 177–187. [Wang S Z, Liu S, Fan J W, et al. Research on the current situation of carbon trading markets and the potential of grassland carbon sinks[J]. *Acta Prataculurae Sinica*, 2018, 27(6): 177–187.]
- [18] 白永飞, 陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 261–264. [Bai Y F, Chen S P. Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: Stock, rate and potential[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 261–264.]
- [19] 戴尔阜, 黄宇, 赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 3908–3918. [Dai E F, Huang Y, Zhao D S. Review on soil carbon sequestration potential in grassland ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 3908–3918.]
- [20] 高树琴, 赵霞, 方精云. 我国草地的固碳功能[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(1): 73–79. [Gao S Q, Zhao X, Fang J Y. Carbon sequestration of grassland in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(1): 73–79.]
- [21] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s–2010s中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2150–2167. [Xu L, Yu G R, He N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2150–2167.]
- [22] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009–1014.
- [23] Santos J D, Alonso-García M C. Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 1613–1628.
- [24] 毛爱涵, 李发祥, 杨思源, 等. 青海省清洁能源发电潜力及价值分析[J]. *资源科学*, 2021, 43(1): 104–121. [Mao A H, Li F X, Yang S Y, et al. Clean energy power generation potential and value in Qinghai Province[J]. *Resources Science*, 2021, 43(1): 104–121.]
- [25] 翁琳, 陈剑波. 光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析[J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(3): 282–288. [Weng L, Chen J B. Environmental and economic analysis on the carbon dioxide emission calculation in the life cycle of a photovoltaic system[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2017, 39(3): 282–288.]
- [26] 贾亚雷, 王继选, 韩中合, 等. 基于LCA的风力发电、光伏发电及燃煤发电的环境负荷分析[J]. *动力工程学报*, 2016, 36(12): 1000–1009. [Jia Y L, Wang J X, Han Z H, et al. Analysis on environmental load of wind, PV and coal-fired power generation based on life cycle assessment[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2016, 36(12): 1000–1009.]
- [27] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. [China Electricity Council. *China Electricity Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.]
- [28] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 675–689. [Bai Y F, Zhao Y J, Wang Y, et al. Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in northern China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(6): 675–689.]
- [29] Lu F, Hu H, Sun W, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039–4044.

2022年8月

- [30] Fang J, Yu G, Liu L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4015–4020.
- [31] 云南省再生经济产业开发研究会. 再生经济战略与云南产业发展研究[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2012. [Yunnan Province Renewable Economy Industry Development Research Association. Research on the Economic Regeneration Strategies and Yunnan Industrial Development[M]. Kunming: Yunnan University Press, 2012.]
- [32] 郭敏晓. 风力、光伏及生物质发电的生命周期CO₂排放核算[D]. 北京: 清华大学, 2012. [Guo M X. The Life Cycle Accounting of CO₂ Emissions for Wind, PV and Biomass Power Generation in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.]
- [33] 蒋宽宽. 单晶硅电池组件-光伏发电全生命周期碳排放[J]. 智慧城市, 2021, 7(10): 117–118. [Jiang K K. Monocrystalline silicon cell modules-carbon emissions in the whole life cycle of photovoltaic power generation[J]. Intelligent City, 2021, 7(10): 117–118.]
- [34] 李兴盛, 胡向然, 郑淞生, 等. 基于多晶硅金刚线切割工艺的光伏生命周期分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 147–151. [Li X S, Hu X R, Zheng S S, et al. Life cycle analysis of photovoltaic based on diamond wire saw process[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(3): 147–151.]
- [35] 于志强, 马文会, 魏奎先, 等. 冶金法多晶硅光伏系统能量回收期与碳足迹分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 520–528. [Yu Z Q, Ma W H, Wei K X, et al. Analysis of energy payback time and carbon footprint of metallurgical route polysilicon PV power system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(2): 520–528.]
- [36] 何津津. 基于生命周期评价的光伏发电碳排放研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017. [He J J. Research on Carbon Emission of Photovoltaic Generation with Life Cycle Assessment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.]
- [37] 于佳禾, 许盛之, 韩树伟, 等. 太阳能电池与光伏组件的温度特性及其影响因素的分析[J]. 太阳能, 2018, (3): 29–36. [Yu J H, Xu S Z, Han S W, et al. Analysis of temperature characteristics and influence factors of solar cells and PV modules[J]. Solar Energy, 2018, (3): 29–36.]
- [38] 钱莉, 林纾, 杨永龙, 等. 河西走廊东部太阳能分布特征及指数预报[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2419–2426. [Qian L, Lin S, Yang Y L, et al. Characteristics of solar energy distribution and index forecasting across the eastern Hexi corridor[J]. Resources Science, 2010, 32(12): 2419–2426.]
- [39] 王祺, 王方琳, 刘淑娟, 等. 光伏产业类荒漠植被利用太阳辐射的时空变异特征及生态意义: 以甘肃河西走廊为例[J]. 生态经济, 2020, 36(1): 79–85. [Wang Q, Wang F L, Liu S J, et al. The spatial-temporal variation characteristics and ecological significance of solar radiation utilization by photovoltaic industry analogy to desert vegetation: Taking Gansu Hexi Corridor as an example [J]. Ecological Economy, 2020, 36(1): 79–85.]
- [40] 常兆丰, 刘世增, 王祺, 等. 沙漠、戈壁光伏产业防沙治沙的生态功能: 以甘肃河西走廊为例[J]. 生态经济, 2018, 34(8): 199–202. [Chang Z F, Liu S Z, Wang Q, et al. Ecological function of PV industry for sand control in desert and gobi: A case study of Hexi Corridor, Gansu[J]. Ecological Economy, 2018, 34(8): 199–202.]
- [41] 崔永琴, 冯起, 孙家欢, 等. 西北地区光伏电站植被恢复模式研究综述[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 200–203. [Cui Y Q, Feng Q, Sun J H, et al. A review of revegetation patterns of photovoltaic plant in northwest China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 200–203.]
- [42] 张芝萍, 尚雯, 王祺, 等. 河西走廊荒漠区光伏电站植物群落物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 190–196. [Zhang Z P, Shang W, Wang Q, et al. Biodiversity of herbaceous species under large photovoltaic (PV) power stations in desert region of Hexi corridor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 190–196.]

Carbon neutralization in photovoltaic power generation system and influencing factors

WANG Xinmiao^{1,2}, MA Zhiyong³, ZHOU Wangxiao³, HUANG Yong⁴, CHEN Liding^{1,2}, YANG Lei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Three Gorges Group Yunnan Energy Investment Company, Kunming 650051, China; 4. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Identifying the carbon neutralization pathways of photovoltaic power generation system and its influencing factors are important for energy transformation and promoting the realization of the carbon neutralization goal. In this study, carbon emissions of photovoltaic power plants and their composition characteristics were analyzed based on life cycle assessment. Influencing factors of carbon emissions of photovoltaic power generation system and related influencing factors of carbon sequestration rates in grassland ecosystem under photovoltaic panels were discussed. The results show that through the entire life cycle, carbon emissions of a typical photovoltaic power plant with a power of 500 kW was 1.00×10^6 kg. When compared with standard coal power generation, the carbon reduction by photovoltaic power generation system during its entire life cycle was 3.05×10^5 kg/a. If the carbon sequestration rate of grassland ecosystem under photovoltaic panels were selected as 0.33 Mg C/(hm² · a) year, the carbon reduction amount of the grassland ecosystem was about 8.25 Mg through the entire life cycle. Considering its carbon reduction relative to standard coal power generation, it will take 3.27 years for a typical photovoltaic power plant with a power of 500 kW to achieve carbon neutrality. Analysis on the influencing factors of carbon neutrality in photovoltaic system showed that both energy consumption at each stage of photovoltaic module production and climatic factors of photovoltaic power plants will affect the achievement of carbon neutrality goals. To improve the efficiency of carbon neutralization and increase the carbon sequestration capacity of the grassland ecosystem under photovoltaic panels, usage of energy-saving and environment-friendly materials, improvement of photovoltaic module production technologies, optimization of photovoltaic power plant site selection, and development of collaborative technology of photovoltaic system and ecological restoration should be considered.

Key words: clean energy; photovoltaic power generation; life cycle assessment; carbon neutralization; ecosystem carbon sequestration