

光伏电站建设运行对气候环境的能量影响

李芬¹ 杨勇¹ 赵晋斌¹ 陈正洪² 高晓清³ 申彦波⁴

(1 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2 湖北省气象服务中心, 武汉 430205;

3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000;

4 中国气象局风能太阳能资源中心, 北京 100081)

摘要: 大规模太阳能资源开发对于缓解能源和环境危机、应对全球气候变化具有重要的意义。目前全球光伏发电进入大规模、高速发展阶段, 对国内外大规模光伏电站气候环境影响相关工作进行总结, 并主要讨论了光伏电站相关能量回收与碳排放的现状与发展趋势、光伏电站近地辐射效应及热效应、局部气候效应及整体气候效应研究的相关问题。结论表明: 光伏电站对碳排放与地表能量收支平衡有一定的影响, 对相关地区地表辐射水平、温度状况具有调节作用, 对荒漠地区的生态环境具有潜在的正面促进作用。当前国内相关研究不具备系统性, 相关工作仍然需要进一步深入探索。

关键词: 光伏电站, 气候影响, 碳排放, 生态环境

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.014

Review on Energy Impact of Photovoltaic Power Station Construction and Operation on Climate and Environment

Li Fen¹, Yang Yong¹, Zhao Jinbin¹, Chen Zhenghong², Gao Xiaoqing³, Shen Yanbo⁴

(1 School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090; 2 Hubei Provincial

Meteorological Service Center, Wuhan 430205; 3 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in

Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy

of Sciences, Lanzhou 730000; 4 Center for Wind and Solar Energy Resource Assessment, China Meteorological

Administration, Beijing 100081)

Abstract: Photovoltaic power plants are effective in reducing carbon emissions and alleviating global warming. Global photovoltaic power plants have been entering into a large-scale and high-speed period. So the climate-related and environmental impacts caused by photovoltaic power plants should be given more attentions. This paper summarizes the related work on climate and environmental impacts of photovoltaic power plants in China and abroad. Specifically, we discuss the current situation and development trend of energy recovery and carbon emissions related to large-scale photovoltaic power plants, near-earth radiation effects and thermal effects of large-scale photovoltaic power plants, local climate effects, and overall climate effects. The results show that photovoltaic power plants have certain effects on carbon emissions and balance of surface energy budget. They can be used to regulate the surface radiation level and temperature in relevant areas. Potentially, they have positive effects on the ecological environment in desert areas. Currently, relevant researches in China are not systematic, and relevant work still needs further exploration.

Keywords: photovoltaic power plant, climate impact, carbon emissions, ecological environment

0 引言

能源是经济与社会可持续发展的基础, 是人类生产与生活不可缺少的动力保障^[1]。随着能源安全、生态环境、气候变化等问题日益突出, 加快发展新能源已经成为国际社会推动能源转型发展、应对全球气候

变化的普遍共识和一致行动^[2-4]。根据国家能源局公布的数据, 2017年我国光伏新增装机5306万 kW, 其中, 光伏电站3362万 kW, 同比增加11%; 分布式光伏1944万 kW, 同比增长3.7倍。全国累计光伏装机达到1.3亿 kW, 提前完成“十三五”目标, 其中, 光伏电站10059万 kW, 分布式光伏2966万 kW。近年来, 我国每年新增光伏装机容量均超过风电, 累计装机容量未来几年会超过风电装机容量。在当前发展形势下, 大规模光伏电站开发利用可能造成的生态与气候环境影响, 应当引起更加广泛的关注。

收稿日期: 2018年8月9日; 修回日期: 2019年1月10日

第一作者: 李芬(1984—), Email: beckyhust@163.com

资助信息: 国家重点研发计划(2018YFB1502802); 上海市高校教师培养资助计划(CXYsdl18012)

国外关于大规模电站的相关研究已经从光伏电站建设、运行中的能量控制与循环拓展到光伏电站对所在地水土、植被、生物群落、气候等的影响。其中,大部分研究集中在光伏电站建设运行中的能量循环与回收以及碳排放领域,部分研究考虑了光伏电站建成运行中的有害物质排放、土地使用、水资源需求、生物群落的影响、太阳辐射作用、地表能量改变及地-气系统的辐射收支影响等。

国内对于大规模光伏电站的研究主要集中在电力工业相关方向,关注高效光伏电池技术、高效逆变器技术、并网与高效运行控制技术、光伏出力不确定性对电力系统稳定性的影响、电能质量及电能消纳等相关问题,目前还没有大规模光伏电站气候生态环境影响的系统性研究。近几年,清华大学、兰州大学、中科院等高校院所开始对大规模光伏电站的局地环境效益进行研究,采用结合现场观测和理论建模等手段,分析了我国部分地区光伏电站对局部环境的作用^[5-8]。

虽大规模光伏电站相关的气候环境问题尚未凸显,但对大规模光伏电站发展与环境之间的影响机理进行透彻研究,有助于科学合理地应对全球气候变化,推动能源转型的平稳开展,实现我国能源的可持续发展。本文从能量流动及其对相关环境因素影响角度出发,对大规模光伏电站的气候环境影响及研究现状进行整理总结,从其碳排放、能量回收、近地面辐射及热效应、局部及整体的气候作用展开讨论,希望能够对下一步研究探索有所帮助。

1 光伏电站对气候环境的影响因素

1.1 光伏电站对气候环境影响方式分类

光伏电站对气候影响方式是多样的。光伏电站生命周期的不同阶段对气候环境的影响方式不同。从光伏电站的基础建设到前期准备与建设过程中,光伏组件的制备是整个制造环节的基础,也是高耗能与高污染部分。光伏组件的制备过程中,需要使用大量的化学工艺,光伏电站建设过程中其他配套设备的制造、基础设置建设、施工设备的使用等,这类影响与其他工业过程对能耗需求与对环境的影响类似。

大规模光伏电站的运行过程中,通过光伏效应进行发电。到达光伏组件表面的太阳辐射,一部分参与到光伏效应中,一部分被光伏组件本身吸收为内能,剩下一部分被反射至大气中。同时,光伏组件的存在阻碍了大地向上的长波辐射及大气向下长波辐射的路径。这一阶段的光伏电站基本不会对环境造成污染影响,但是改变了地表原有的能量平衡方式,大规模、大面积的光伏电站对局部气候及全球气候可能会造成一定的影响。

光伏电站对气候环境的影响方式主要分为建设前与建设后。光伏电站建设前,其对环境的影响与其他工业制造过程类似;光伏电站建成投产后通过吸收辐射能量进行发电,这一过程改变了地表原有的辐射系统结构,改变地表能量流动方式,借此影响地表其他环境要素。

1.2 光伏电站建设工业制造过程中对环境的影响

光伏电站建设前期的工业制造过程中,最主要的高耗能部分为光伏组件的制备。其过程耗能较高、污染相对较重,光伏电站生命周期内对环境的负面影响程度最高。光伏电站生命周期中的负面影响,大都通过光伏组件的制备过程体现。

光伏电站建设及投产后的工业过程中,可通过多种方式对地表环境产生影响。光伏电站建成后,大面积的光伏组件阵列对地面形成遮蔽,改变了原有的地貌结构可能会对当地植被及生物群落带来影响^[8]。大规模光伏电站建设运行过程中对植被及生物群落的影响问题很难量化分析。并且复杂的相互影响也为量化分析理论的建立造成困难。国外对大规模光伏电站植被影响及生物群落影响环境问题的关注与研究很早就开展^[12]。我国目前此方向研究较少。另外,受政策法规的影响,我国相关问题的现状与国外可能有所差别。我国国家林业局发布第50号令,宣布《在国家级自然保护区修筑设置审批管理暂行办法》(以下简称《办法》)。
《办法》第三条明确表示:禁止在国家级自然保护区修筑光伏发电、风力发电、火力发电等项目的设施。

1.3 光伏系统近地能量影响机理

光伏电站通过光伏效应进行发电。到达光伏组件表面的太阳辐射,一部分参与到光伏效应中,一部分被光伏组件本身吸收为内能,剩下一部分被反射至大气中。同时,光伏组件的存在阻碍了大地向上的长波辐射及大气向下长波辐射的路径。这一阶段的光伏电站基本不会对环境造成污染影响,但是改变了地表原有的能量平衡方式,大规模、大面积的光伏电站对局部气候及全球气候可能会造成一定的影响。

大规模光伏电站对气候的影响,最开始都应该是从光伏电站本身性质考虑。光伏电站的特点可以概括如下:

- 1) 光伏组件在其下垫面上形成遮蔽,阻碍了部分下垫面的热量吸收;
- 2) 光伏组件本身厚度较低,比热容较小,但是光伏组件在发电时会有电流热效应及能量吸收、散发行为,在向上、向下两个方向均会辐射热量(长波);
- 3) 建设过程中光伏电站内植被被移除或遭到改变,改变了地面能量吸收及反射情况;

4) 光伏电站通过光伏组件的光伏效应发电, 吸收了部分太阳辐射(短波), 反射很小;

5) 光伏组件吸收或反射地表的长波辐射, 在夜晚削弱了地表的冷却过程。

图1为相关对象的影响关系。

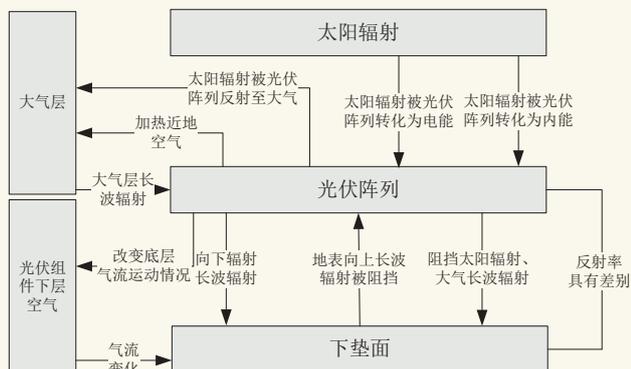


图1 光伏阵列对地表辐射环境的影响

Fig.1 The influence of photovoltaic array on the surface radiation

大规模光伏电站对气候环境的影响机理, 应当在上述五种作用下通过规模效应体现。

光伏电站本身观测数据很少对外公布, 并且由于数据采集持续时间、数据分辨率等限制, 对大规模光伏电站整体气候影响的研究主要集中在模型模拟计算。通过建立光伏电站的温场、辐射场等模型, 研究大规模光伏电站对近地表辐射、温度影响与大气层稳定影响。这类模型结论大多缺乏实际数据支撑, 往往误差较大。利用卫星遥感数据对气候变化进行大空间尺度分析研究不失为一种好方法, 风电场相关环境研究中已有部分学者采用这种方式^[13], 但是在光伏电站气候环境分析中, 目前在我国鲜有相关报道。

相对于全球气候的影响, 大规模光伏电站的局部气候影响研究较为常见^[5-8], 常见的局部气候研究手段主要是现场观测, 通过对光伏电站所在地实际温度、辐射、植被状况进行数据采集, 对比周边环境差异, 分析大规模光伏电站对局部地区的能量作用。也有对光伏电站周围植被、生物群落变化进行分析, 侧面反映光伏电站的存在对环境作用^[14-16]

2 碳排放与能量回收

2.1 光伏电站的碳排放相关研究方法

自从低碳经济概念提出以后, 国内外学术界纷纷展开相关研究, 在碳排放的测算方法研究中获得了不少研究成果。肖宏伟^[18]在总结国内相关研究后, 认为碳排放的测算方法可以划分为模型估算法和物料衡算法。模型估算法需要构建估算模型, 物料衡算法以质量守恒定律为基本原则, 对生产过程中使用的物料进

行定量分析。表1为相关方法分类及研究方式。

表1 碳排放测算方法分类及其研究方式

Table 1 Classification of carbon emission measurement methods and their research methods

划分类别	定义	研究方式
模型估算法	在宏观和微观层面上进行碳排放情景分析和政策模拟时, 通过构建数学模型进行研究	能源排放模型 ^[19] 能源系统模型 ^[20] 系统动力学模型 ^[21] 生命周期模型 ^[22] 投入产出模型 ^[23]
物料衡算法	以生产过程中的投入产出遵循质量守恒定律为基本原则, 对生产过程中所使用的物料进行定量分析	以详细技术分类 ^[24] 以详细燃料分类 ^[24]

光伏电站作为一个系统性工程, 其建设与运行过程中均会对环境产生相关影响。大部分针对光伏电站碳排放采用的研究方式为生命周期评估(Life Cycle Assessment (LCA) framework), Fthenakis^[25]在2011年对光伏发电中的LCA研究方法做了相对详细的总结。目前一些评价指标可用于光伏系统生命周期评估^[25], 见表2。

表2 光伏系统生命周期内部分评价指标

Table 2 Part of the metrics used in LCA of PV system

指标名称	描述
碳排放 (Greenhouse gases, GHG)	光伏发电系统整个生命周期中碳排放总量与其总发电量比值
累计能量需求 (Cumulated energy demand, CED)	光伏发电系统整个生命周期中需要的各类能量
酸化潜力 (Acidification potential, AP)	对土壤酸化的能力
臭氧层分解潜力 (Ozone depletion)	稀释、分解臭氧层的能力
生态毒性 (Ecotoxicity)	对生物圈的毒害能力
水资源与土地占用 (Land use and water use)	对土地的占用与水资源的使用情况
能量回收期 (Energy payback time, EPBT)	光伏发电系统发电量达到其生命周期中总耗能的年限
能源投入回报率 (Energy return on investment, EROI)	光伏发电系统生命时长与能量回收期的比值, 表示光伏发电系统生命周期内的经济效益
减排潜力 (Impact mitigation potentials, IMP)	减缓温室效应的潜力

在上述各种评价指标中, 常用的有GHG与EPBT。

$$GHG_{r-rate} = \frac{GHG_{e-total}}{E_{LCA-output}} = \frac{GHG_{PV} + GHG_{BOS}}{E_{LCA-output}}, \quad (1)$$

式中, GHG_{r-rate} 表示光伏发电系统每产生一单位电量时等价排放的碳量, 其单位为 $gCO_2-eq/(kW \cdot h)$; $GHG_{e-total}$ 表示光伏发电系统整个生命周期中碳排放总量, 其单位为 gCO_2-eq ; $E_{LCA-output}$ 是光伏发电系统生命周期中总发电量, 单位为 $kW \cdot h$ 。

$$EPBT = \frac{E_{input} + E_{BOS,E}}{E_{output}}, \quad (2)$$

式中, E_{input} 表示光伏组件生命周期中所需的所有能量, 包括光伏组件的制造、安装运行、维护、回收处理等所需要外部输入的全部能量, 单位为MJ。 $E_{BOS,E}$ 表示光伏发电系统中能量平衡设备 (Balance of

system, BOS) (指基础设施建设、电缆、逆变器、变压器、蓄电池等光伏组件外的其他设备) 需要的所有能量, 其单位为MJ。 E_{output} 表示光伏发电系统生命周期中年平均发电量, 单位为MJ。

2.2 光伏发电系统能量循环分析

当前较为常见的光伏组件原材料包括: 单晶硅(mono-Si)、多晶硅(multi-Si)、非晶硅(a-Si)、碲化镉薄膜(CdTe)、铜铟硒薄膜(CIS)等。目前已经有不少关于不同材料组成的光伏发电系统之间碳排放对比研究^[26-27]。

部分学者通过数据搜集与分析整理, 计算了基于mono-Si、multi-Si、a-Si、CdTe、CIS这5种不同组件的光伏发电系统的能量回收时间及碳排放指标^[27]。并推算出5种不同光伏组件组成的光伏发电系统生命周期中耗能需求, 发现CdTe的EPBT与GHG两个指标表现最优, 这是因为其有相对较低的能源需求与相对较高的光电转化效率。另外, 由于单晶硅生产过程中高能耗的特点, 使用单晶硅的光伏发电系统EPBT与GHG两个指标相对最差。Pacca等^[27]进行了多晶硅与非晶硅发电系统的比较研究, 利用密歇根大学33 kWp的屋顶光伏开展相关工作。研究发现, 多晶硅碳排放量为72.4 gCO₂-eq/(kW·h), 非晶硅碳排放量为34.3 gCO₂-eq/(kW·h)。但是其他学者采用了不同的测算标准, 获得的碳排放情况与Pacca等结论有较大出入^[28]。也有学者在研究光伏电站生命周期碳排放时考虑了经济问题, 比如国际贸易对光伏组件进口国与出口国带来的碳足迹的改变^[30]。

光伏电站整个生命周期中的能量回收时间, 是光伏电站大规模推广后应当着重考虑的问题, 整个生命周期中的经济效益决定了大规模光伏电站推广的可行性。考虑到光伏电站经济效益与国情有关, 各国研究具有较大差别^[31]。国内相关研究没有普及, 部分研究者进行了初步探讨, 主要集中的研究方向为不同安装方式下能量输出和生产流程各个阶段能量消耗的对比。不同研究结果见表3。

表3 国内部分学者关于光伏电站生命周期内能量回收研究结果
Table 3 Domestic research results of energy recovery in the life cycle of photovoltaic plants

研究对象	结论
北京地区1 kWp屋顶光伏 ^[32]	生命周期中总耗能为4339 (kW·h)/kWp, 能量回收期为3.14年
天津地区多个1 kWp建筑并网光伏系统 ^[33]	能量回收期为3~6年。全生命周期产能为消耗能源的4~8倍。建筑并网光伏系统与燃煤发电相比在能源耗竭和生态系统影响等方面具有较大优势。安装并网光伏系统能够满足70%的居民非采暖用电负荷
上海某1 MW并网光伏电站 ^[34]	分析了不同回收处理情形下的能量回收时间、温室气体排放量, 并进行了生命周期影响评价。发电的能量代价为1810.8 kJ/(kW·h), 碳排放水平为0.0984 kg/(kW·h)

2.3 光伏发电系统碳排放研究特点

不同研究机构关于碳排放及能量回收的研究得出的结论差异显著, 产生这一现象的原因有多种。首先, 针对光伏电站采用的LCA研究方法, 少有考虑环境代价。例如, 部分LCA研究结果显示^[35-38], 光伏电站生命周期中, 碳排放量为16~40 g CO₂/(kW·h), 但是这些数据没有考虑到光伏电站建设地环境变化带来的隐形碳排放量改变。特别是大规模光伏电站的建设, 对地表环境的改变作用非常显著, 因此, 在评价大规模光伏电站对环境的影响, 需要考虑地形特征以及地貌改变造成的隐形影响。在确定地形特点后, 再考虑土地利用情况、人体影响及人类生活环境影响、野生物种及其栖息地影响、水资源影响、气候及碳排放影响^[39]。文献[40]在5种影响分类基础上, 将大规模光伏电站的环境影响细分为32种, 通过对比传统能源形式, 分析这32种影响的正面性与负面性。最终得出结论, 所考虑的32种影响中, 22种影响相比于传统化石能源, 是大规模光伏电站的优势, 剩余的10项影响中, 4项为中性, 6项需要经过进一步研究评估才能得出结果。另外, 早期的研究方法最初都不是针对光伏发电系统提出的^[41], 光伏发电系统与其他耗能型系统具有本质的区别, 其生命周期中的能量消耗主要集中在制造和建设环节, 而其他耗能型系统, 则需通过某种方式获得持续的能量供给。因此, 针对光伏发电系统的LCA研究应当更加精确地界定系统型别及边界。为此, Zhou等^[41]引入了物理系统边界的时间扩展概念(Temporal expansion of the physical system boundaries), 来区分系统主要成分和次要成分。这能够用于准确、透明和一致地描述系统和边界条件, 且与以往研究方法的基本原则相一致。

光伏发电系统的建造及应用场地的差异, 也会引起碳排放及能量回收相关研究结论的差异。根据EPBF和GHG定义可以看出, 碳排放及能量回收不仅与光伏系统建造过程中消耗的能量及排放的温室气体有关, 还与实际投放场合有关。生产过程可以标准化控制, 但是建站地区太阳辐射资源总量及分布形式的差异, 也会不可避免地带来碳排放及能量回收相关结论的巨大差异。区分光伏电站生命周期中碳排放影响因子权重特点, 合理区分生命周期边界条件, 及时更新最新制造技术信息以及市场需求特点, 对光伏电站碳排放研究具有重要推进作用。

3 近地表辐射效应及热效应

3.1 荒漠地区内光伏电站的辐射效应及其附带影响

国内关于大规模光伏电站气候影响相关研究才刚刚起步, 少数学者依托大型光伏电站, 采集气象参

数,对光伏电站内外环境参数变化进行比对,分析大规模光伏电站对环境产生的影响。我国大规模光伏电站集中于中西部地区,相关的气候、环境研究也集中于中西部地区。主要的研究内容为大规模光伏电站对当地辐射、空气温湿度、地表温度、土壤温度、地表能量收支变化等影响。

高晓清等针对光伏电站在荒漠地区的气候影响进行了持续的研究,其主要研究地点是位于柴达木盆地南侧边缘地带的110 MWp光伏电站^[5]。高晓清等从辐射场、土壤温度、空气温湿度3个方面分析光伏电站对当地气候环境的影响^[5-7]。常蕊等^[8]也对光伏电站内辐射、气温等变化情况进行了研究,相关研究地点为龙羊峡水光互补电站I期,装机容量为320 MWp;常蕊等对实验地的太阳短波辐射、长波辐射、净辐射、2 m气温、光伏组件表面温度等进行了测量。中国科学院吴治永等^[15]对我国宁夏中卫市某聚光热发电电站(CSP)对土壤侵蚀和土壤温度等影响进行了定量研究。上述学者的研究均集中于我国中西部地区干旱或沙漠地区,研究结论有相似之处,但是也存在一些差别,分析如下。

光伏电站吸收了一部分短波辐射,自身向外辐射长波辐射的同时也对地表辐射特征产生影响。关于光伏电站对辐射场的影响,杨丽薇等^[5]研究认为光伏电站夜间有保温效应,白天有降温效应;光伏电站内外反照率差异明显;站内与站外辐射各分量年内变化特征明显,站内年均向上短波辐射明显低于站外;光伏电站是一个能量汇聚点,因光伏组件将部分辐射能转换为电能输出,导致站内地表温度低于站外。Chang等^[8]同样认为光伏组件表面短波辐射分量的变化使得光伏组件在一年中都起到了能量源的作用,并且光伏组件阵列表面温度的升高,使得其周围空气温度上升,可能产生光伏热岛效应。

光伏电站的运行使地表原有能量状态发生变化,同时,光伏组件的大面积铺设,对地表产生了遮蔽作用,也对地表的气流产生影响。综合作用造成了地表土壤温度的变化。关于光伏电站对荒漠地区土壤温度的影响,高晓晴等研究结果表明^[6],在土壤浅层(5~10 cm),光伏电站内外土壤温度日变化差异明显,5 cm层土壤温度日最大值相差9.7 °C。土壤浅层,土壤温度日较差站内明显低于站外,表明光伏装置具有绝热保温作用。夏季站内外各层土壤温差不明显;冬季,站外各层土壤温度均明显高于站内,光伏电站是冷源。常蕊等认为光伏电站地面的冷却作用与光伏组件阵列形成的阴影有关^[8]。但是吴治永等研究结论与高晓清等结果略有差异,吴治永等的研究结

果表明,电站内土壤温度相较于站外有0.5~4 °C的变化,冬季站内温度明显高于站外,夏季相反^[15]。吴治永等与高晓清等研究结论的差异可能是光伏电站类型差异造成的,因此,不同类型光伏电站的气候环境影响,可能需要在后续工作中展开研究。

关于空气温湿度影响,高晓清等结果显示:对2 m气温而言,冬季白天站内外基本相同;春、夏、秋季白天站内明显高于站外,夏季差异达最大,这与光伏组件发热、加热空气的效应大于光伏组件的遮阳冷却效应有关;而在夜间,站内2 m气温值均高于站外,这可能与光伏组件对近地面层的保温作用有关。而10 m气温,四季白天站内均低于站外,这主要是由于白天站内下垫面将部分接收的太阳辐射转换成电能输出,使得站内下垫面吸收及反射获得的能量低于站外所致;其秋、冬季相差较大,夏季相差最小,这可能因为夏季气温较高,光伏组件光电转化效率降低^[45],进而造成吸收太阳辐射较小的缘故。在年内变化中,站内2 m气温月均值均高于站外,而站内10 m气温月均值均低于站外。在10 m高度处,夜间站内相对湿度大于站外。

光伏电站的辐射与温湿度效应会带来气流影响。部分研究表明,当大气层处于中性层结构下,近地面层风速与高度呈现对数变化规律,近地层风速廓线与热力层有关^[42]。赵鹏宇等^[43]依托乌兰布和沙漠东北边缘的光伏电站,研究了沙漠地区光伏电站的气流影响。结果表明,由于光伏电站的存在以及其对地区温度影响,相关地域内风速较旷野处有明显变化。光伏阵列行道间、光伏组件前檐与后檐风速明显降低,光伏板前檐10~100 cm与200~250 cm高度处风速加强,光伏电站内10~20 cm与200~250 cm处风速变化缓慢,20~200 cm处风速变化剧烈。这一性质可以为荒漠地区防风固沙工作带来新思路^[44]。

综上所述,荒漠地区大规模光伏电站的存在,对当地的地表气候环境带来影响,改变地表的反照率与局部温度情况,并改变地表粗糙度状态,影响风速的变化。上述关于荒漠地区研究均基于实地测量与现场分析,能够反映特定地区光伏电站的环境影响情况,但是不具备推广到一般性结论的条件。光伏电站的电池组件直接减少了地表反照率,带来局部地表风速下降效果,造成最低温度与最高温度水平的显著变化,并且最低温度变化高于最高温度变化。这种不对称的温度冲击,可能会造成区域夜晚时段内垂直的空气对流,增加当地湿度,增加降水概率。降水带来了植被覆盖率的提高,进一步降低地表反照率,从而形成反照率—降水—植被这种正向循环结果。上述猜想需建

立基于动态植被变化的气候模型进行验证。

3.2 光伏电站区域热效应及总体气候影响

国内大规模光伏电站气候环境影响相关研究主要集中在我国西北地区，但当前分布式光伏电站已经大规模在我国中东部地区发展。光伏电站在人口密集地域的网渗透率不断提升，应当引起思考：大规模光伏电站是否会引起热岛效应？城市内光伏电站的建立是否会加剧城市热岛效应？目前我国还少有类似研究，但国外已有学者展开了相关工作，并获得了一些初步结论^[13]。

环境地形特点对光伏电站热岛效应的形成可能具有显著影响，城市、沙漠、草地等地域地形特点各异，相关影响可能差别较大。城市内土地资源宝贵，光伏电站存在形式主要为建筑光伏。Genchi 等^[49]研究东京地区屋顶光伏组件大面积铺设对城市热岛效应的影响，其对大面积屋顶光伏的城市热岛效应问题进行了数值模拟，计算结果表明大规模安装光伏组件阵列对城市冠层温度没有明显影响，且由于光伏组件阵列的遮阴效果，城市中楼房的制冷能耗可能会降低2%~10%左右。草地表面存在较为茂密的低矮植被，对光伏电站的热效应有一定抑制作用^[47]，地面安装的光伏阵列表面反射率与安装处地表草地的反射率相似。部分学者通过简单的模型计算进行了相关验证，同时也证明安装在草地上的光伏组件基本不会产生热岛效应^[47]。荒漠地区具有辐射强烈、降水少、湿度低等特点。针对荒漠地区环境，一些学者建立了大型光伏电站内气流扰动、能量循环的3D模型，评估大规模光伏电站潜在的热岛效应，并与北美洲某1 MWp光伏电站实测数据进行对比^[13]。结果表明在2.5 m高度，白天光伏电站气温比周围气温高出1.9 °C，温差在到达5~18 m的高度后消失。Fthenakis 等^[13]分析了光伏电站内18个月的数据，表明光伏电站在夜晚基本完全冷却，与热岛效应的特性有较大差别。

由目前的研究来看，大规模光伏电站的存在与热岛效应的形成并没有强正相关性。但大多的工作基于理论模型的分析研究，模型的可靠性、适应性等有待验证。不同条件、不同考虑方式下的研究可能会得到不同的结论。如果从能量平衡变换的角度进行光伏电站热场分析，建立了热量吸收发散模型，考虑了下垫面水汽、植被在热传导过程中的作用，可能会得出了与上述研究相反的结论。不同学者在不同情况下得出了相悖的结论，原因可能存在于评价环境与标准没有得到统一。大规模光伏电站能否产生热岛效应，与其能量流失与吸收的水平有直接关系。不同地域气候、

地形、环境各有差异，需要细致区分不同地域影响因素特点，结合实际特征分析讨论。

3.3 光伏电站辐射效应及其影响研究特点

光伏电站的整体气候影响，需要结合全球气候耦合模式进行讨论，但目前国内外相关研究并不多见。大规模光伏电站对全球气候的影响是一个多因素耦合作用。一些研究从不同角度进行了初步分析^[46]。计算发现，光伏电站大面积的建设所产生的地表反射辐射变化对地球温度的影响程度，远不及相应碳变化带来的影响。为了模拟大规模铺设降温型屋顶及安装光伏发电系统给区域气候带来的影响，一种完全耦合的数值天气预报模式（Weather research and forecasting）^[50]被用于研究地表反射率、地表温度、降水和云层覆盖之间的相互作用。美国国家大气研究中心胡爱学等^[51]采用气候系统模式CCSM4，通过修正地表反照率来模拟大规模光伏装机对可能的局地 and 全球气候影响，发现与对全球气候的平均作用相比，对局地降水的影响可能更大。

当前关于光伏电站在地表附近产生的辐射效应及热效应相关问题，并没有形成系统的理论。局部地区相关研究可采用对比测量、模型分析等手段，全球效应分析一般采用模型分析法。相关模型具有多变量高耦合的性质，提取关键影响因子、厘清影响机理及重点影响方式，应当是下一步工作的重心。

4 结论

目前，针对大规模电站建设带来的碳排放及能量回收问题已经有了较多的研究。通过对光伏产业链生命周期内不同方面的研究评价，绝大多数学者研究结论认为，大规模光伏电站具有经济效益，能够在一定时间内进行能量回收，并获得环境效益。目前相关研究仍存在需要完善之处，制造工艺及相关技术的进步，使得光伏产业链中上下游多处碳排放情况发生变化，需要重新确定产业链中不同环节的碳排放情况。另外，需要更加科学地划分光伏电站生命周期内的不同阶段，将可控阶段与不可控阶段区分，减小不同条件给研究带来的偏差。

国内关于大规模电站建成后的气候影响研究并没有得到足够的重视，当前的研究也仅仅局限于小范围。相比于国外，我国目前相关研究还较为落后，大部分研究集中于我国中西部地区光伏电站对局部地区的温湿度、辐射、植被等影响，研究手段局限于现场观测。对于大规模光伏电站的热岛效应作用以及可能存在的全球气候的影响，缺乏明确、精准的论证与解释。

大规模光伏电站对碳排放与地表能量收支平衡有一定的影响,对相关地区地表辐射水平、温度状况具有调节作用,对荒漠地区的生态环境具有潜在的正面促进作用。当前国内相关研究不具备系统性,相关工作仍然需要进一步深入探索。后续的研究中,需要寻找主要的影响因子、构建合理精确的理论模型;同时需要进一步展开实测研究,修正并验证模型。大规模光伏电站对气候环境的影响是个缓慢变化的过程,需要长期持续的观察研究。

参考文献

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 电气科学与工程学科发展战略研究报告(2006—2020年). 科学出版社, 2017.
- [3] 李泽椿,朱蓉,何晓凤,等. 风能资源评估技术方法研究. 气象学报, 2007, 65(5): 708-717.
- [4] 丁一汇,王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [5] 杨丽薇,高晓清,吕芳,等. 光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2160-2166.
- [6] 高晓清,杨丽薇,吕芳,等. 光伏电站对格尔木荒漠地区土壤温度的影响研究. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1439-1445.
- [7] 高晓清,杨丽薇,吕芳,等. 光伏电站对格尔木荒漠地区空气温湿度影响的观测研究. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2909-2915.
- [8] Chang R, Shen Y, Luo Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. *Renewable Energy*, 2018, 118: 131-137.
- [9] 杜慧,孙芳. 初步研究光伏电站运营期对植被的影响. 环境与发展, 2017, 29(8): 30-31.
- [10] 苑森朋,张振师,党廷辉,等. 毛乌素沙地光伏电站3种植物措施生长发育状况及其生态功能比较. 水土保持研究, 2018(2): 235-239.
- [11] 王涛,王得祥,郭廷栋,等. 光伏电站建设对土壤和植被的影响. 水土保持研究, 2016, 23(3): 90-94.
- [12] Fthenakis V, Blunden J, Green T, et al. Large photovoltaic power plants: wildlife impacts and benefits. *Photovoltaic Specialists Conference, IEEE*, 2011: 2011-2016.
- [13] Fthenakis V, Yu Y. Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms. *Photovoltaic Specialists Conference, IEEE*, 2014: 3362-3366.
- [14] 刘世增,常兆丰,朱淑娟,等. 沙漠戈壁光伏电站的生态学意义. 生态经济: 中文版, 2016, 32(2): 177-181.
- [15] Wu Z, Hou A, Chang C, et al. Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. *Environ Sci Process Impacts*, 2014, 16(10): 2432-2441.
- [16] 张焕平,张占峰,汪青春. 格尔木地区总辐射、反射辐射的变化特征. 南京信息工程大学学报, 2013, 5(5): 449-454.
- [17] 李丽珍,刘辉,史雪峰,等. 浅析光伏电站对环境的影响. 科技信息, 2012(12): 91.
- [18] 肖宏伟. 中国碳排放测算方法研究. 阅江学刊, 2013(5): 48-57.
- [19] 胡秀莲. 减排对策分析: AIM/能源排放模型. 中国能源, 1998(11): 17-22.
- [20] 陈文颖,吴宗鑫. 用MARKAL模型研究中国未来可持续能源发展战略. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(12): 103-106.
- [21] 秦钟,张佳恩,骆世明,等. 我国能源消费与CO₂排放的系统动力学预测. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 1043-1047.
- [22] 徐健,赵柳榕,王济干. 能源结构的Logistic模型及其预测. 安徽农业科学, 2008, 36(31): 13477-13478.
- [23] 刘兰翠. 我国二氧化碳减排问题的政策建模与实证研究. 中国科学技术大学, 2006.
- [24] Kruger D, Galbally I, Hiraishi T, et al. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. IPCC National Greenhouse Cost Inventories programme, Technical Support Unit, 2000.
- [25] Fthenakis V, Frischknecht R, Raugi M, et al. Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity Executive Summary. 2011.
- [26] Peng J, Lu L, Yang H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19(1): 255-274.
- [27] Pacca S, Sivaraman D, Keolelian G A. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. *Energy Policy*, 2007, 35(6): 3316-3326.
- [28] Stoppato A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy*, 2008, 33(2): 224-232.
- [29] Sumper A, Robledo-García M, Villafafila-Robles R, et al. Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8): 3888-3896.
- [30] Yang D, Liu J, Yang J, et al. Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 94(1): 35-45.
- [31] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究. 太阳能, 2009, (1): 9-14.
- [32] 梁佳. 建筑并网光伏系统生命周期环境影响研究. 天津大学, 2012.
- [33] 李鹤,于随然. 中国光伏系统的生命周期评价. 环境工程, 2014, 32(10): 119-124.
- [34] 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. 上海理工大学学报, 2017, 39(3): 282-288.
- [35] Dones R, Frischknecht R. Life-cycle assessment of photovoltaic systems: results of Swiss studies on energy chains. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 1998, 6 (2): 117-125.
- [36] Fthenakis V M, Kim H C, Alsema E A, et al. emissions from photovoltaic life cycles. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(6): 2168-2174.
- [37] Mason J E, Fthenakis V M, Hansen T, et al. Energy payback and life-cycle CO₂ emissions of the BOS in an optimized 3.5 MW PV installation. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2006, 14(2): 179-190.
- [38] Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 2005, 30(11): 2042-2056.
- [39] Alsema E A, Wild-Scholten M J D. The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacturers data. *Inproceedings*, 2005.
- [40] Turney D, Fthenakis V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(6): 3261-3270.
- [41] Zhou L, Tian Y, Roy S B, et al. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 539-543.
- [42] 周秀骥. 高等大气物理学. 北京: 气象出版社, 1991.
- [43] 赵鹏宇. 光伏电板对地表土壤颗粒及小气候的影响. 内蒙古农业大学, 2016.
- [44] Chang R, Shen Y, Luo Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. *Renewable Energy*, 2018, 118: 131-137.
- [45] 张曦,康重庆,张宁,等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.
- [46] Nemet G F. Net radiative forcing from widespread deployment of photovoltaics. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(6): 2173-2178.
- [47] M. Donovan, "Memorandum: impact of PV systems on local temperature," SunPower, July 6, 2010. http://www.rurdev.usda.gov/SupportDocuments/EA_5_17_13_RUS_PartA.pdf
- [48] Barronafford G A, Minor R L, Allen N A, et al. The photovoltaic heat island effect: larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 2016, 6.
- [49] Genchi Y, Ishisaki M, Ohashi Y, et al. Impacts of large-scale photovoltaic panel installation on the heat island effect in Tokyo. 2003.
- [50] Millstein D, Menon S. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment. *Environmental Research Letters*, 2011, 49123(6): 98-204.
- [51] Hu A, Levis S, Meehl G A, et al. Impact of solar panels on global climate. *Nature Climate Change*, 2016, 6(3): 290-294.