

# 新疆多晶硅光伏减碳效益的全生命周期评估

杜文杰, 江 源, 关梦茜, 刘相兰, 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:** 光伏发电是实现能源系统深度减碳的重要方式, 但会受到多种自然和技术因素的影响, 其减碳效益仍有待于准确评估。以总体自然条件适宜发展光伏发电, 但区域内空间分异又较突出的新疆作为研究区, 借助生命周期评价、发电量和减碳效益模型核算了两种衰减率(DR)下的1 kW多晶硅光伏发电全生命周期碳排放、发电量及其减碳效益, 为本地发展光伏产业提供科学依据及为其他地区开展相关研究提供借鉴。结果表明: (1)与火力发电相比, 新疆光伏每度电可减少863 g CO<sub>2</sub>-eq (DR=1%)和738 g CO<sub>2</sub>-eq (DR=3%), 减排比例分别高达93%和79%, 对能源系统脱碳具有重要意义。(2)新疆内部减碳效益空间分布不均且差异大, 总趋势由东向西递减; 根据聚类分析新疆发展光伏应重点布局在一、二级区, 如哈密、吐鲁番和巴音郭楞蒙古自治州等。(3)未来新疆发展光伏应从全生命周期减碳出发, 完善光伏生产端中下游产业链以实现本地生产, 在建造使用过程充分考虑太阳辐射和衰减率等因子并合理布局, 同时加快生命末期处置回收技术的发展。

**关键词:** 碳排放; 发电量; 减碳效益; 新疆

气候变化已经对地球自然和人工生态系统产生负面影响, 而减轻气候变化负面效应的重要措施是减少碳排放<sup>[1]</sup>。为应对气候变化并推动中国经济高质量发展, 中国政府提出“碳达峰”“碳中和”目标<sup>[2]</sup>。当前, 能源行业的碳排放占全球碳排放的四分之三<sup>[3]</sup>, 控制能源行业, 特别是控制占能源活动碳排放约40%的“大户”——电力的碳排放, 成为能源系统深度碳减排, 从而减轻气候变化负面效应的关键<sup>[4,5]</sup>。为实现能源系统的深度脱碳, 新能源技术太阳能光伏发电(简称“光伏”)近年来发展迅猛, 装机容量和年发电量等大为增加<sup>[6,7]</sup>。中国政府在2021年也提出了“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”<sup>[8]</sup>。在此基础上, 深入研究和全面评估光伏的碳排放影响及减碳效益水平具有重要意义。

光伏减碳效益理解为光伏发电替代火力发电所减少的碳排放<sup>[9,10]</sup>。光伏发电会受到太阳辐射、多种因素尤其是温度影响下的系统效率<sup>[11]</sup>的影响, 具有空间差异性, 准确预测光伏发电为指导未来能源转型提供了科学依据<sup>[12,13]</sup>。但光伏系统生产、运输等自身生命周期亦会产生碳排放, 学者多利用生命周期评价(LCA)<sup>[14]</sup>定量追踪光伏系统碳排放影响<sup>[15-23]</sup>。据统计, 生产(或制造)环节是光伏系统LCA研究中最常被评估的<sup>[24]</sup>, 较多研究因受限于数据并未真正考虑全生命周期, 尤其是缺少了对处置回收环节(如运输)的碳排放计

收稿日期: 2022-01-10; 修订日期: 2022-04-13

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)

作者简介: 杜文杰(1996-), 男, 河南信阳人, 硕士, 研究方向为资源生态与自然资源保护。

E-mail: duwjie@163.com

通讯作者: 江源(1960-), 女, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为自然地理学和资源生态学。

E-mail: jiangy@bnu.edu.cn

量。同时,这部分研究多侧重于包括碳排放影响在内的多种环境影响(如环境酸化、富营养化等)评价,在核算发电量时对影响因子参数多采用单一均值,较少考虑到参数的空间差异性,同样影响到减碳效益的准确核算。将全生命周期碳排放与区域发电量统一细化研究,成为更全面评价光伏发电减碳效益的重要方向<sup>[10,25]</sup>。

新疆维吾尔自治区(简称“新疆”)地处中国西北内陆,广阔的荒漠等土地资源面积和丰富的太阳能资源为其发展光伏发电提供了独特的先天优势。然而其环境因子空间差异较大<sup>[26]</sup>,外加风沙频繁,夏季温度过高等造成光伏衰减率较一般地区有所增加,影响了光伏系统发电量的评估。作为“西电东送”的重要节点,新疆电力自需和外输供求均逐年增大,光伏等新能源技术加快发展带来的巨大的装机容量,加上较短的系统寿命会在不久的将来导致巨大的处置、回收需求。因而新疆光伏减碳效益研究更需要关注光伏全生命周期尤其是生命末期处置、回收等过程碳排放及发电量的空间差异,以准确评估光伏发电减碳效益及其空间布局,也为其他地区开展相关研究提供借鉴。

本文一是拟采用在环境影响评价中已较为成熟的LCA方法,计算光伏全生命周期尤其是处置回收环节碳排放;二是在考虑新疆各地自然条件分异基础上准确评估其全生命周期发电量,并采用碳排放因子指标详细计算新疆各地市发展1 kW多晶硅光伏的碳排放影响;三是在此基础上将之与传统火力发电的影响对比,分析新疆发展光伏发电的减碳效益及其空间分异,以期从碳减排角度为新疆光伏产业的长远发展和规划制定提供基础科学依据,服务于未来“双碳目标”在新疆地区的最终实现。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 减碳效益核算方法

参考相关研究<sup>[10,19,20,27]</sup>,通过将火力发电(TP)碳排放水平(因子)与光伏(PV)发电碳排放水平(因子)对比得到减碳效益:

$$CER = PVCEF - TPCEF \quad (1)$$

式中:  $CER$  (Carbon Emission Reduction) 为减碳效益 [ $\text{g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ];  $PVCEF$  表示光伏发电碳排放因子 [ $\text{g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ];  $TPCEF$  为火电碳排放因子 [ $\text{g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ], 取自2013—2019年西北电网电量边际排放因子<sup>[28-34]</sup>的平均值, 为  $930.5 \text{ g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

$$PVCEF = CE/LG \quad (2)$$

式中:  $CE$  (Carbon Emission) 表示光伏全生命周期碳排放 ( $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ );  $LG$  (Lifetime Generation) 表示光伏发电量 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )。

#### 1.1.2 全生命周期碳排放核算

本文以1 kW多晶硅光伏为功能单位,将光伏全生命周期划分为产品生产环节、建造使用环节和处置回收环节(图1),采用生命周期评价方法计算光伏全生命周期(LCA)碳排放 ( $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ ):

$$CE = CE_1 + CE_2 + CE_3 \quad (3)$$

式中:  $CE_1$  为产品生产环节碳排放 ( $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ );  $CE_2$  为建造使用环节碳排放(使用过程几乎不产生碳排放<sup>[35]</sup>) ( $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ );  $CE_3$  为生命末期管理环节碳排放 ( $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ )。  $CE$  可由具体过程的物质、能源消耗量及对应的碳排放因子核算。

光伏组件假设从生产地江苏运输至目的地新疆(或各地市)<sup>[16]</sup>,可计算碳排放  $CE_n$ :

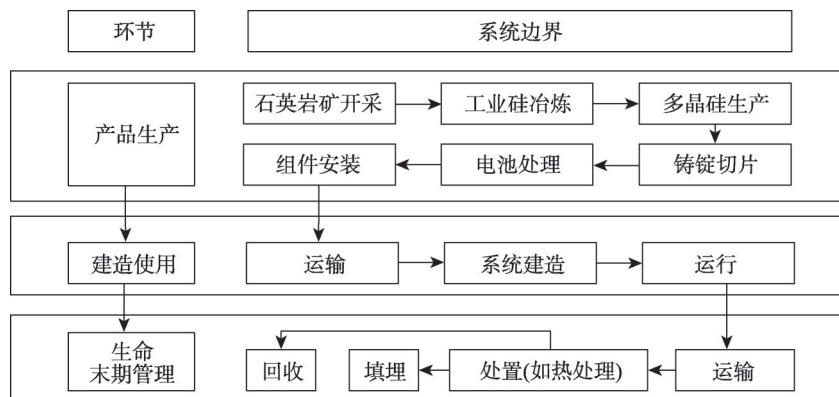


图1 多晶硅光伏系统全生命周期系统边界

Fig. 1 Life cycle boundary of a multi-crystalline silicon photovoltaic (multi-Si PV) system

$$CE_{T1} = D_{ij} \times U_{gasoline} \times CE_{gasoline} \quad (4)$$

式中： $D_{ij}$ 表示出发地*i*到目的地*j*的距离（km），如江苏至新疆距离为3593 km； $U_{gasoline}$ 表示轻型汽油货车单位公里的燃料最低消耗量（L/km）； $CE_{gasoline}$ 表示燃料的碳排放因子（kg CO<sub>2</sub>-eq/L）。在核算新疆发展光伏全生命周期碳排放时考虑目的地为新疆，在核算新疆各地市发展光伏碳排放及减碳效益时目的地为具体地市。

生命末期管理环节碳排放 $CE_3$ 包括运输和处置回收碳排放：

$$CE_3 = CE_{T2} + CE_R \quad (5)$$

式中：假设新疆未来在乌鲁木齐市建立光伏处理回收中心， $CE_{T2}$ 表示从新疆各地市运输光伏废弃物到乌鲁木齐市的碳排放（kg CO<sub>2</sub>-eq），计算方法同式（4）； $CE_R$ 表示处置回收过程碳排放（kg CO<sub>2</sub>-eq）。

根据处置清单关于物质、能量及物质回收率报告的完整性，在处置回收环节最终选择FREL P方法<sup>[36,37]</sup>作为参考。处置回收碳排放（ $CE_R$ ）可分为三部分，具体核算如下：

$$CE_R = CE_{R1} + CE_{R2} + CE_{R3} \quad (6)$$

式中： $CE_{R1}$ 表示处置回收过程所需能源、物质导致的碳排放（kg CO<sub>2</sub>-eq）； $CE_{R2}$ 表示热处理过程中的碳排放以及能量回收导致的碳负排放（kg CO<sub>2</sub>-eq）； $CE_{R3}$ 表示硅、铝、玻璃、银和铜的循环再利用导致的碳负排放（kg CO<sub>2</sub>-eq）。

### 1.1.3 发电量核算

发电量受到太阳总辐射、装机容量、系统效率和年衰减率<sup>[38]</sup>等因素的影响。根据前人研究<sup>[15,16]</sup>，光伏生命周期发电量 $LG$ 计算公式如下：

$$LG = \sum_{\lambda=1}^y AG(1-DR)^{\lambda-1} \quad (7)$$

式中： $AG$ （Annual Generation）表示光伏年发电量（kW·h）； $DR$ （Degradation Rate）表示光伏年衰减率（%），考虑到新疆风沙较多等自然环境条件，衰减率较一般地区高，按最小（取1%）、最大（取3%）两种情况考虑<sup>[39,40]</sup>； $\lambda$ 表示光伏运行第 $\lambda$ 年（业界一般定义光伏组件功率衰减到初始功率的80%所对应的时间点是光伏组件的寿命）； $y$ 表示最长运行年份（年）。

$$AG = PH \times W_p \times SE \quad (8)$$

式中： $PH$ 是峰值日照时数（h），即太阳辐照度平均达到1 kW/m<sup>2</sup>每年的等效小时数； $W_p$

是光伏的额定功率容量 (kW)，本文设定光伏额定功率是 1 kW； $SE$  (System Efficiency) 表示系统效率 (%)。以温度为主导作用的  $SE$  计算参考 Kawajiri 等<sup>[11]</sup>的模型：

$$SE = [1 + \alpha p_{\max}(T + \Delta T - 25)] \times K \quad (9)$$

式中： $T$ 表示环境温度 (°C)，取年均温； $\alpha p_{\max}$ 表示晶硅光伏组件的额定功率温度系数，取缺省值-0.0041； $\Delta T$ 表示组件温度年增加值的加权平均值，取缺省值 18.4； $K$ 表示其余影响因素，取缺省值 0.7562。

#### 1.1.4 区域差异分析

首先通过 Z-score 标准化计算新疆 19 个地市碳排放、发电量和减碳效益三个指标的标准得分 ( $z$  值)，其中均值 (19 个地市的发电量和减碳效益均值作为新疆的平均水平) 和标准差计算数据为 19 个地市对应指标的数值，对比三个指标的地区差异。再根据减碳效益指标，对新疆 19 个地市进行聚类分析，聚类方法采用离差平方和法<sup>[41,42]</sup>，以进一步研究新疆各地市光伏减碳效益的空间分异。

#### 1.1.5 敏感性分析

敏感性分析是研究模型参数等输入的变化对模型输出的影响程度<sup>[43]</sup>，在参考前人研究<sup>[16,22]</sup>并考虑因子的重要性及自然因子可变范围有限性的基础上，选择铝耗、电耗、火力发电碳排放因子、运输、(年总) 太阳辐射、温度六个参数，对六个参数现有取值分别减少 1%，分析其对新疆整体发展 1 kW 多晶硅光伏减碳效果影响。

### 1.2 数据来源与处理

参考现有研究或报告搜集光伏生产、建造使用环节重要能源、原材料的消耗清单数据<sup>[15,16,23]</sup>及对应碳排放因子<sup>[15,28-34,44-47]</sup>。对缺失碳排放因子的物质参考近似物质，对无近似物质可参考且影响较小的在清单分析中予以忽略。处置回收环节清单参考 Latunussa 等<sup>[37]</sup>的研究得到，并将其依比例转化为本文研究的功能单位。基于时空分辨率考虑，选择 Worldclim 太阳辐射量和月均温度数据 (分辨率为 1 km<sup>2</sup>) (表 1)，计算年总太阳辐射量和年均温，通过与 2015 年新疆地市行政边界叠加，计算新疆各地市的年总太阳辐射量 (kW·h/m<sup>2</sup>/a) 和年均温 (°C)。在未来减碳效益预测中新疆地区生产总值 (GDP) 与年发电量数据来源见表 1，并将 2015—2020 年的 GDP 修正为按 2015 年不变价格计算的 GDP。

## 2 结果分析

### 2.1 新疆光伏全生命周期碳排放

经核算，新疆发展 1 kW 多晶硅光伏产品全生命周期碳排放  $CE$  为 1596 kg CO<sub>2</sub>-eq，各

表 1 数据及来源说明

Table 1 Illustration to data sets and their sources

数据	来源	时间段/年
太阳辐射量/ (kJ/m <sup>2</sup> /day)	WorldClim ( <a href="https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html">https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html</a> )	1970—2000
月均温度/°C	同上	1970—2000
新疆地市行政边界	2015 年中国地市行政边界数据 (资源环境科学与数据中心)	2015
GDP	2020 年《新疆统计年鉴》	2015—2019
	《新疆维吾尔自治区 2020 年国民经济和社会发展统计公报》	2020
年发电量	2020 年《新疆统计年鉴》	2015—2019
	新疆维吾尔自治区发展和改革委员会公开数据	2020

环节及其子环节排放情况见图2。

产品生产的碳排放 $CE_1$ 最高,为1482 kg CO<sub>2</sub>-eq。其中组件安装导致最多碳排放(30%),其次是多晶硅生产(28%)、工业硅冶炼(15%)、电池处理(14%)、铸锭切片(13%),石英岩矿开采碳排放最少。只有组件安装碳排放主要由原材料生产导致,其他生产过程如多晶硅生产、电池处理等碳排放主要来自于能源消耗。

建造使用环节碳排放 $CE_2$ 居中,为815 kg CO<sub>2</sub>-eq。其中运输过程考虑从江苏出发运至新疆,由于距离远,运输过程因为燃料燃烧产生碳排放 $CE_{T1}$  453 kg CO<sub>2</sub>-eq,十分接近组件安装碳排放。在组件到达新疆后,建造光伏系统过程因为原材料消耗又产生362 kg CO<sub>2</sub>-eq排放。

生命末期管理过程碳排放 $CE_3$ 最少,为-702 kg CO<sub>2</sub>-eq,具有良好的减碳效果。将各地市光伏废弃物运输至乌鲁木齐处理回收中心产生的碳排放取均值作为新疆运输碳排放 $CE_{T2}$ ,为82 kg CO<sub>2</sub>-eq。处置回收碳排放 $CE_R$ 为-785 kg CO<sub>2</sub>-eq,其中 $CE_{R1}$ 为10 kg CO<sub>2</sub>-eq, $CE_{R2}$ 为7 kg CO<sub>2</sub>-eq。材料循环再利用导致的碳排放 $CE_{R3}$ 为-801 kg CO<sub>2</sub>-eq,使全生命周期碳排放由2397 kg CO<sub>2</sub>-eq减少为1596 kg CO<sub>2</sub>-eq。其中由于铝的使用量大回收量最多,可抵消碳排放604 kg CO<sub>2</sub>-eq,其次是硅(108 kg CO<sub>2</sub>-eq)、玻璃(77 kg CO<sub>2</sub>-eq)和铜(12 kg CO<sub>2</sub>-eq)。

各地市发展1 kW多晶硅光伏产品全生命周期碳排放( $CE$ ) (表2)随着光伏组件运输和光伏废弃物运输过程中距离不同产生的碳排放不同而有差异,占到对应本市光伏碳排放总量( $CE_1+CE_2+CE_3$ )的30%~43%。总体上看(图3a),以乌鲁木齐市为核心的新疆中东部区域因距离江苏省和乌鲁木齐市较近导致运输过程中产生的碳排放较其他地区小,产生的碳排放普遍小于500 kg CO<sub>2</sub>-eq,总碳排放量也较其他地区小;其次是新疆北部区域、西部区域,西南部区域排放水平最高。乌鲁木齐市、吐鲁番地区、哈密地区、昌吉回族自治州、五家渠市和石河子市、克拉玛依市、巴音郭楞蒙古自治州、北屯市和博尔塔拉蒙古自治州发展1 kW多晶硅光伏的碳排放低于19个地市平均水平(即 $z < 0$ ) (图4)。克孜勒苏柯尔克孜自治州和喀什地区因位于新疆西部运输距离远,导致运输过程中产生了700~800 kg CO<sub>2</sub>-eq,总碳排放位于前二,超过1800 kg CO<sub>2</sub>-eq。

## 2.2 新疆光伏发电量及空间差异

由发电量模型得知,年总太阳辐射与发电量的关系成正比,温度与发电量的关系成反比。根据模型计算,可得衰减率较低情况下(1%)和较高情况下(3%)新疆各地市1 kW多晶硅光伏的生命周期发电量(表2)。发电量空间变化趋势为从东南先往西再往北呈环状

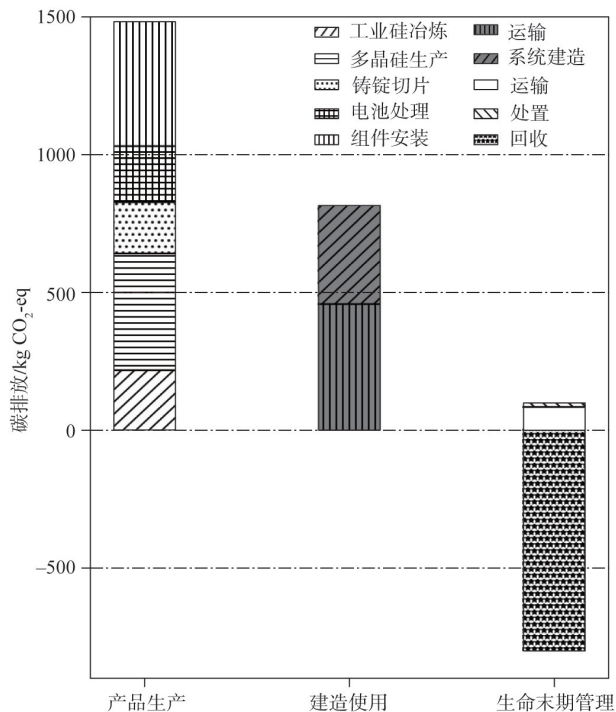


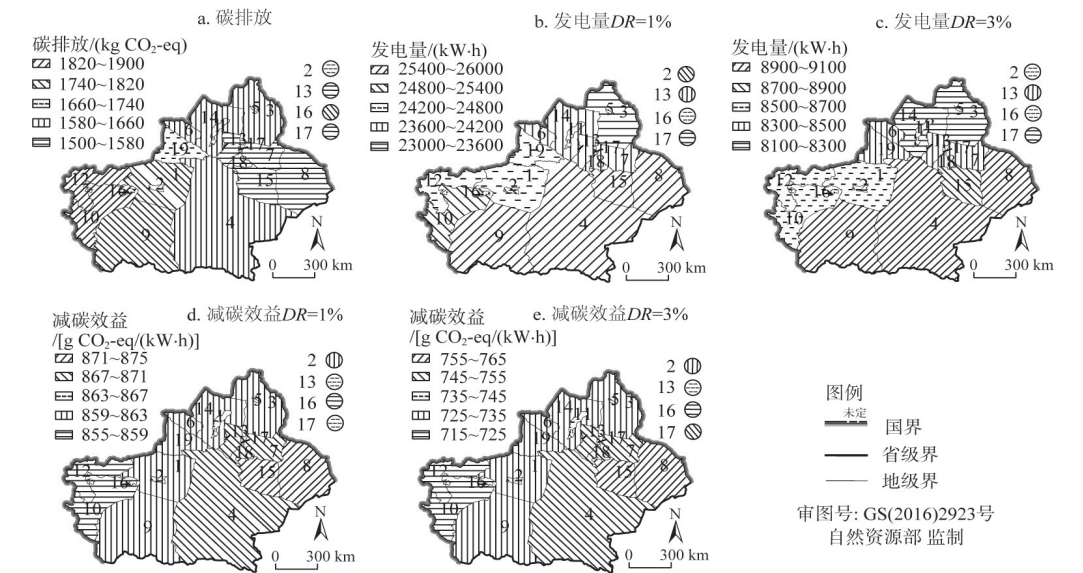
图2 1 kW多晶硅光伏全生命周期碳排放

Fig. 2 Life cycle carbon emission of 1 kW multi-Si PV system

表2 新疆各地市1 kW多晶硅光伏碳排放、发电量及减碳效益统计

Table 2 Accounting for CE, LG and CER of 1 kW multi-Si PV system of cities in Xinjiang

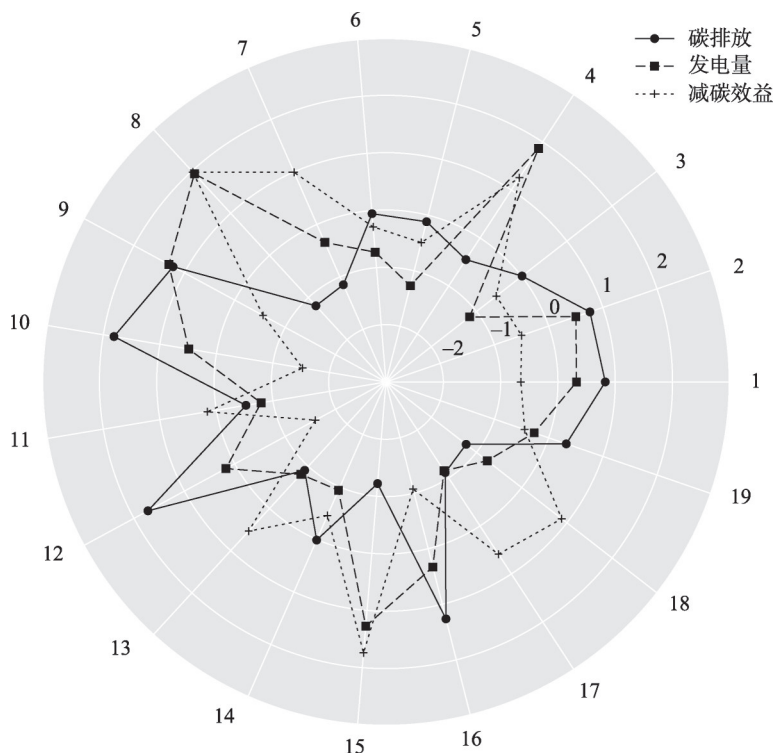
地区	碳排放/ kg CO <sub>2</sub> -eq		发电量/(kW·h)		减碳效益/[g CO <sub>2</sub> -eq/(kW·h)]		地区	碳排放/ kg CO <sub>2</sub> -eq		发电量/(kW·h)		减碳效益/[g CO <sub>2</sub> -eq/(kW·h)]	
	DR=1%	DR=1%	DR=1%	DR=1%	DR=1%	DR=3%		DR=1%	DR=1%	DR=1%	DR=1%	DR=1%	DR=3%
阿克苏地区	1742	24721	8634		860	729	阿拉尔市	1735	24860	8683		861	731
阿勒泰地区	1651	23565	8231		860	730	巴音郭楞 蒙古自治州	1600	25925	9055		869	754
北屯市	1637	23474	8199		861	731	博尔塔拉蒙 古自治州	1644	23896	8346		862	734
昌吉回族 自治州	1522	24199	8452		868	750	哈密地区	1517	25980	9074		872	763
和田地区	1786	25490	8903		860	730	喀什地区	1851	24849	8679		856	717
克拉玛依市	1592	23848	8330		864	739	克孜勒苏 柯尔克孜 自治州	1841	24604	8593		856	716
石河子市	1549	23834	8325		865	744	塔城地区	1651	23734	8290		861	731
吐鲁番地区	1514	25463	8894		871	760	图木舒克市	1790	24726	8636		858	723
五家渠市	1527	23567	8231		866	745	乌鲁木齐市	1514	23870	8337		867	749
伊犁哈萨 克自治州	1686	24259	8473		861	731							



注：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；1为阿克苏地区，2为阿拉尔市，3为阿勒泰地区，4为巴音郭楞蒙古自治州，5为北屯市，6为博尔塔拉蒙古自治州，7为昌吉回族自治州，8为哈密地区，9为和田地区，10为喀什地区，11为克拉玛依市，12为克孜勒苏柯尔克孜自治州，13为石河子市，14为塔城地区，15为吐鲁番地区，16为图木舒克市，17为五家渠市，18为乌鲁木齐市，19为伊犁哈萨克自治州，下同。

图3 新疆各地市1 kW多晶硅光伏碳排放、发电量及减碳效益空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of CE, LG and CER of 1 kW multi-Si PV system of cities in Xinjiang

图4 各地市三种指标 $z$ 值Fig. 4 Three kinds of index  $z$ -scores of cities in Xinjiang

逐渐降低 (图 3b、图 3c)。高值集中于东部的哈密地区、巴音郭楞蒙古自治州、和田地区和吐鲁番地区, 尽管该区域光伏系统效率参差不齐, 但得益于年总太阳辐射量大, 发电量显著高于新疆平均水平。除此之外, 阿拉尔市、喀什地区、图木舒克市、阿克苏地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州的光伏系统发电量也高于新疆平均水平 (即  $0 < z$ ) (图 4)。其中哈密地区 1 kW 光伏生命周期发电量为 25980 kW·h ( $DR=1\%$ ) 和 9074 kW·h ( $DR=3\%$ ), 为全疆最高。北屯市尽管具有较高的系统效率, 但太阳辐射量最少导致发电量依然处于全疆最低水平, 较哈密地区减少 2506 kW·h ( $DR=1\%$ ) 和 875 kW·h ( $DR=3\%$ )。

### 2.3 新疆光伏减碳效益及分区

由各地市全生命周期碳排放和发电量得到光伏发电的碳排放因子, 再与火电对比可得减碳效益 (表 2) 及其空间分布 (图 3d、图 3e)。新疆 1 kW 光伏碳减排效益的空间分布总趋势为由东向西 (先西北后西南) 递减。其中高于新疆减碳效益平均水平 (即  $z > 0$ ) 的地市共 8 个 (图 4), 包括哈密地区 ( $z=1.98$ )、吐鲁番地区 ( $z=1.74$ )、巴音郭楞蒙古自治州 ( $z=1.26$ )、昌吉回族自治州 ( $z=0.99$ )、乌鲁木齐市 ( $z=0.89$ )、五家渠市 ( $z=0.59$ )、石河子市 ( $z=0.54$ ) 和克拉玛依市 ( $z=0.16$ ), 从空间上看, 这些区域多位于新疆中东和东南部。其余地市的减碳效益均低于平均水平。其中哈密地区发展 1 kW 光伏的全生命周期碳排放居新疆倒数, 发电量则为全疆最高, 因此减碳效益同为新疆最高, 达到 872 g CO<sub>2</sub>-eq/kW·h ( $DR=1\%$ ) 和 763 g CO<sub>2</sub>-eq/kW·h ( $DR=3\%$ )。西南部的克孜勒苏柯尔克孜自治州虽然发电量高于新疆平均水平, 但发展光伏的碳排放居新疆第二高导致其减碳效益最低, 为 856 g CO<sub>2</sub>-eq/kW·h ( $DR=1\%$ ) 和 716 g CO<sub>2</sub>-eq/kW·h ( $DR=3\%$ ), 排在其前一位

的喀什地区得益于发电量大减碳效益稍好。新疆内部减碳效益差异大。最高值（位于哈密地区）与最低值（位于克孜勒苏柯尔克孜自治州）差值达到  $16 \text{ g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  ( $DR=1\%$ ) 和  $47 \text{ g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  ( $DR=3\%$ )。若考虑年巨大发电量，此差异更不容忽视。乌鲁木齐市虽然发展光伏的碳排放最少，受其发电量的影响，最终减碳效益差于其他四市，同样位于上游水平。

通过减碳效益聚类分析，可将新疆划分为一级区至四级区（图5）。一级区减碳效益最高，为哈密地区和吐鲁番地区， $z$ 值介于1.7~2。二级区减碳效益次高，包括巴音郭楞蒙古自治州、昌吉回族自治区、乌鲁木齐市、五家渠市、石河子市、克拉玛依市， $z$ 值介于0~1.3。三级区减碳效益中等，包括博尔塔拉蒙古自治州、伊犁哈萨克自治州、塔城地区、北屯市、阿拉尔市、阿勒泰地区、和田地区、阿克苏地区， $z$ 值介于-0.7~0。四级区减碳效益较差，包括图木舒克、喀什地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州， $z$ 值介于-1.6~-1。

## 2.4 敏感性分析

就新疆平均水平而言，当生产过程中铝耗减少1%，减碳效益增加0.031% ( $DR=1\%$ ) 和0.104% ( $DR=3\%$ )。当生产和生命末期处置电耗减少1%，减碳效益增加0.034% ( $DR=1\%$ ) 和0.112% ( $DR=3\%$ )，火电碳排放因子减少1%对减碳效益具有相同效果。当运输距离减少1%，减碳效益增加0.025% ( $DR=1\%$ ) 和0.084% ( $DR=3\%$ )。当温度减少1%，减碳效益增加0.004% ( $DR=1\%$ ) 和0.012% ( $DR=3\%$ )。而当太阳辐射减少1%，减碳效益减少0.08% ( $DR=1\%$ ) 和0.268% ( $DR=3\%$ )。从影响大小看，依次为温度<运输<铝耗<电耗（发电碳排放因子）<太阳辐射。

衰减率会对敏感性分析结果产生较显著影响。考虑不同衰减率造成的差异， $DR=3\%$ 时参数变化引起的碳减排效益变化程度与变化绝对量较 $DR=1\%$ 高约3倍，表明衰减率的增大促升了参数的减碳效益敏感性。

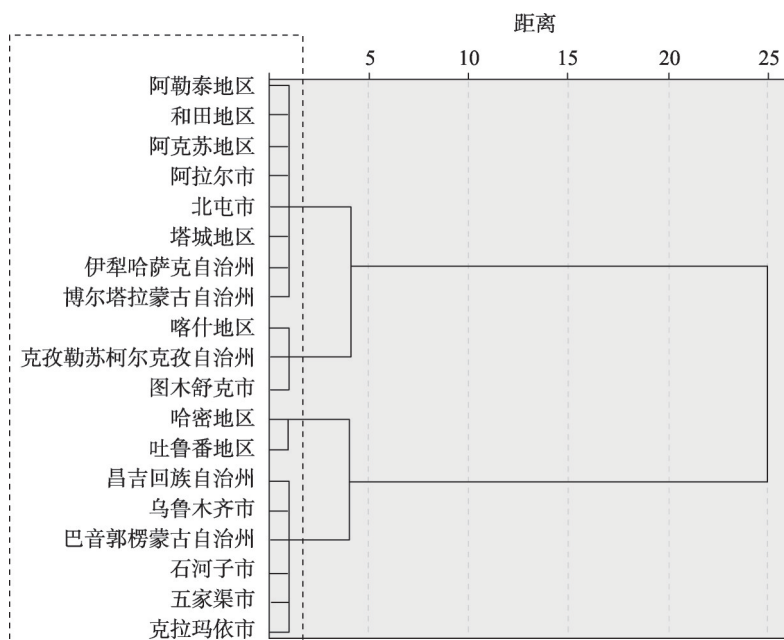


图5 各地市减碳效益聚类

Fig. 5 City clusters divided by carbon emission reduction

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1) 新疆可通过发展光伏发电替代火力发电, 实现电力能源系统减碳。光伏发电的减碳效益较好, 达到  $863 \text{ g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  ( $DR=1\%$ ) 和  $738 \text{ g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  ( $DR=3\%$ ), 较火力发电减排比例达  $93\%$  ( $DR=1\%$ ) 和  $79\%$  ( $DR=3\%$ ), 对当前及未来替代火力发电存在巨大潜在减碳贡献。据预测, 到2025年光伏发电带来的减碳效益达到  $4059\times 10^4 \text{ t}$  ( $DR=3\%$ ) 至  $4749\times 10^4 \text{ t}$  ( $DR=1\%$ )。

(2) 新疆内部的光伏减碳效益区域差异较大, 空间分布由东向西递减, 东部哈密、吐鲁番地区减碳效益位居前二, 西南部克孜勒苏柯尔克孜自治州和喀什地区减碳效益最低。一级区和二级区的减碳效益高于新疆平均水平, 因此从区域角度出发, 新疆发展光伏应重点布局在一级区和二级区, 尤其是哈密地区等, 研究结果与哈密被国家确定为百万千瓦级光伏发电示范基地的政策相印证。需注意的是, 随着未来运输等条件的变化, 减碳效益的空间格局亦有可能发生改变。

(3) 从全生命周期角度出发, 未来新疆光伏生产应尽快完善中下游产业链, 同时减少生产过程物质和能源消耗, 改善火电技术, 从生产和运输端减少碳排放。在系统建造使用过程, 应尽可能提高发电量, 既应从大尺度考虑, 着力寻找并大量布设光伏于太阳能资源更为丰富的区域; 又应从小尺度出发, 布局在受风沙、高温影响小等环境条件较好的地方, 以尽可能降低衰减。在生命周期末端, 应尽快发展处置回收技术和布局回收中心, 提高物质的处置与循环再利用水平, 以推进双碳战略与循环经济的协同发展。

#### 3.2 讨论

(1) 新疆发展光伏发电具有较高减碳效益。不仅是在中国, 相比发达国家如美国和日本火电碳排放水平 [ $433 \text{ g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  和  $544 \text{ g CO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ]<sup>[4]</sup>, 单位发电量也分别至少减少  $240 \text{ g CO}_2\text{-eq}$  和  $351 \text{ g CO}_2\text{-eq}$ , 因此能极大程度地实现了本地电力系统脱碳。回归分析预测的未来新疆地区发电量及其相应的光伏减排效益潜力巨大。因国内生产总值对所有社会经济因子的代表性及其与电力供应水平的关系, 按2015年不变价格修正后的新疆2015—2020年GDP与对应年份的发电数据进行线性回归分析, 模拟得出GDP与发电量回归关系。由于《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》未对“十四五”期间的国内生产总值增长率定量规定, 因此将修正后的2015—2020年GDP年均增长率作为未来五年GDP年增长率, 并以此预测新疆地区2025年的GDP和发电量。结果表明, 2025年新疆发电量达  $550.2\times 10^9 \text{ kW}\cdot\text{h}$ , 较2020年增长36%。参考国家发展改革委能源研究所等机构对未来光伏发电量的预测<sup>[48]</sup>, 假设2025年光伏发电占总发电量的10%, 则其减碳效益为  $4059\times 10^4 \text{ t}$  ( $DR=3\%$ ) 至  $4749\times 10^4 \text{ t}$  ( $DR=1\%$ ), 此值占新疆2019年整年化石燃料燃烧导致的碳排放总量(数据取自CEADs数据库, [www.ceads.net](http://www.ceads.net))的9% ( $DR=3\%$ ) 至10% ( $DR=1\%$ ), 说明在新疆地区发展光伏脱碳的潜力巨大, 极有助于该地区尽早实现碳减排最终目标。

(2) 减碳效益未来空间格局。光伏发电减碳效益( $CE_R$ )依赖于碳排放和发电量, 二者的变化将影响减碳效益的未来空间布局。以运输为例, 若新疆未来实现光伏本地化生产, 可减少从江苏到新疆的运输过程碳排放( $CE_T$ )  $453 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ , 建造使用环节碳排放( $CE_2$ )将会大幅减小。此时各地市的光伏运输将会在新疆内部发生, 若光伏生产中心布局在乌鲁木齐市(参考模型中处置回收中心位置), 进一步分析后可发现减碳效益空间

格局总体变化不大,大多地市减碳效益排名总体上升或下降1~2名。但部分地市如哈密地区排名下降6位,这与其在实现本地生产后区位优势消失有密切关系。同理,光伏处置回收中心位置设置也会影响各地市发展光伏导致的碳排放。由此可以看出减碳效益未来空间布局仍需结合实际情况进一步分析。此外,衰减率亦会对发电量产生较大影响,统计分析表明,不同衰减率下的两组减碳效益结果之间具有显著差异( $t=47.161$ ,  $p<0.001$ ),即衰减率对减碳效益存在显著影响。本文尚未结合地理条件详细量化衰减率区域差异,应在今后的研究中作更为精细的讨论。

(3) 光伏发电持续减碳途径。从全生命周期考虑,结合敏感性分析结果,首先应减少生产过程中的物质、能源消耗,尤其是占比较高的铝耗和电耗,进一步降低新疆发展光伏的碳排放。其次应减少运输距离,目前新疆工业硅产能居全国首位,并已成为全球多晶硅产业最为集中的地区<sup>[49]</sup>,在完善光伏中下游生产链以实现本地化生产后可减少较大的省外运输距离。最后需发展处置回收技术并建立光伏处置回收中心。根据 Full Recovery End of Life Photovoltaic (FRELP) 方法<sup>[37]</sup>核算经过处置回收后能使光伏全生命周期碳排放减少33%。但由于上述方法未实现产业化应用,新疆本地企业在学习吸收国外技术的基础上也应积极创新开发可供产业化应用、处置过程更为环保、回收率更高的技术,以适应未来光伏生命末期管理的巨大需求。

### 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>, 2014-11-01.
- [2] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用. 自然资源学报, 2021, 36(12): 2995-3006. [HUANG X J, ZHANG X Y, LU X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization. Journal of Natural Resources, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [3] International Energy Agency. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, 2021-05-18.
- [4] 玉琦彤. 中国电力行业碳排放脱钩效应情景模拟. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 194-200. [YU Q T. Scenario simulation of decoupling effect of carbon emission in China's power industry. Environmental Science & Technology, 2021, 44(6): 194-200.]
- [5] 沈镭, 钟帅, 胡舒寒. 新时代中国自然资源研究的机遇与挑战. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1773-1788. [SHEN L, ZHONG S, HU S H. Opportunities and challenges of natural resources research of China in the New Era. Journal of Natural Resources, 2020, 35(8): 1773-1788.]
- [6] International Energy Agency. Key world energy statistics 2020. <https://www.iea.org/reports/Key World Energy Statistics 2020>, 2020-08.
- [7] 杨宇, 于宏源, 鲁刚, 等. 世界能源百年变局与国家能源安全. 自然资源学报, 2020, 35(11): 2803-2820. [YANG Y, YU H Y, LU G, et al. Interview on the unprecedented changes of energy geopolitics and national energy security. Journal of Natural Resources, 2020, 35(11): 2803-2820.]
- [8] 央广网. 习近平在《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会上的主旨讲话(全文). [http://china.cnr.cn/gdgg/20211012/t20211012\\_525631263.shtml](http://china.cnr.cn/gdgg/20211012/t20211012_525631263.shtml), 2021-10-12. [CNR News. Xi Jinping attends and delivers a keynote speech at the leaders' summit of the 15th meeting of the conference of the parties to the convention on Biological Diversity, Resources and Environment. [http://china.cnr.cn/gdgg/20211012/t20211012\\_525631263.shtml](http://china.cnr.cn/gdgg/20211012/t20211012_525631263.shtml), 2021-10-12.]
- [9] 杨金焕. 光伏系统减排CO<sub>2</sub>潜力的分析. 见: 杨德仁. 第十届中国太阳能光伏会议论文集: 迎接光伏发电新时代. 杭州: 浙江大学出版社, 2008: 868-872. [YANG J H. Analysis of potential for CO<sub>2</sub> mitigation by photovoltaic systems. In: YANG D R. Proceeding of 10th China Solar Photovoltaic Conference: Welcome to Solar PV Power New Era. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 868-872.]
- [10] 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. 资源科学, 2017, 39(12): 2323-2334. [MOU C F, WANG L M, QU Q S, et al. Review of emission reduction research on major new energy generation. Resources Science, 2017, 39(12): 2323-2334.]

- [11] KAWAJIRI K, OOZEKI T, GENCHI Y. Effect of temperature on PV potential in the world. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(20): 9030-9035.
- [12] LU X, CHEN S, NIELSEN C, et al. Combined solar power and storage as cost-competitive and grid-compatible supply for China's future carbon-neutral electricity system. *PNAS*, 2021, 118(42): 1-8.
- [13] CREUTZIG F, AGOSTON P, GOLDSCHMIDT J C, et al. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. *Nature Energy*, 2017, 2(9): 1-9.
- [14] 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期评价方法及应用. 北京: 气象出版社, 2002: 65-67. [YANG J X, XU C, WANG R S. *Product Life Cycle Evaluation Method and Application*. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 65-67.]
- [15] XU L, ZHANG S F, YANG M S, et al. Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011-2016: A life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 310-329.
- [16] FU Y Y, LIU X, YUAN Z W. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 180-190.
- [17] HOU G F, SUN H H, JIANG Z Y, et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. *Applied Energy*, 2016, 164: 882-890.
- [18] STAMFORD L, AZAPAGIC A. Environmental impacts of photovoltaics: The effects of technological improvements and transfer of manufacturing from Europe to China. *Energy Technology*, 2018, 6: 1148-1160.
- [19] 赵若楠, 董莉, 白璐, 等. 光伏行业生命周期温室气体排放清单分析. *中国环境科学*, 2020, 40(6): 2751-2757. [ZHAO R N, DONG L, BAI L, et al. Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry. *China Environmental Science*, 2020, 40(6): 2751-2757.]
- [20] PU Y R, WANG P, WANG Y Y, et al. Environmental effects evaluation of photovoltaic power industry in China on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 1-11.
- [21] LUO W, KHOO Y S, KUMAR A, et al. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 157-162.
- [22] 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. *环境科学研究*, 2015, 28(2): 291-296. [XIE M H, RUN J L, BAI L, et al. Environmental impacts of solar grade polysilicon based on life cycle assessment. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(2): 291-296.]
- [23] HUANG B J, ZHAO J, CHAI J Y, et al. Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy*, 2017, 143: 132-141.
- [24] SANTOYO-CASTELAZO E, SOLANO-OLIVARES K, MARTINEZ E, et al. Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: A case study for Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 1-24.
- [25] YANG Q, HUANG T Y, WANG S G, et al. A GIS-based high spatial resolution assessment of large-scale PV generation potential in China. *Applied Energy*, 2019, 247: 254-269.
- [26] 毛东雷, 蔡富艳, 雷加强, 等. 新疆策勒沙漠—荒漠—绿洲典型下垫面小气候空间变化分析. *地理科学*, 2017, 37(4): 630-640. [MAO D L, CAI F Y, LEI J Q, et al. Spatial Analysis on changes of microclimate in typical landscapes in desert-wilderness-oasis in Cele, Xinjiang. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(4): 630-640.]
- [27] 龚道仁, 陈迪, 袁志钟. 光伏发电系统碳排放计算模型及应用. *可再生能源*, 2013, 31(9): 1-4, 9. [GONG D R, CHEN D, YUAN Z Z. Mathematics calculation model and application of CO<sub>2</sub> emission of photovoltaic (PV) power generation system. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(9): 1-4, 9.]
- [28] 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/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20. [National Development and Reform Commission. 2013 baseline emission factors for regional power grids in China. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20.]
- [29] 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/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20. [National Development and Reform Commission. 2014 baseline emission factors for regional power grids in China. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20.]
- [30] 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/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20. [National Development and Reform Commission. 2015 baseline emission factors for regional power grids in China. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20.]
- [31] 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/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20. [National Development and Reform Commission. 2016 baseline emission factors for regional power grids of annual emission reduction project in China. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtz/index_3.shtml), 2018-12-20.]

- dex\_3.shtml, 2018-12-20.]
- [32] 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/wsqtzk/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ ydqhbh/wsqtzk/index_3.shtml), 2018-12-20. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2017 baseline emission factors for regional power grids of annual emission reduction project in China. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/index\\_3.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/index_3.shtml), 2018-12-20.]
- [33] 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/wsqtzk/index\\_1.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ ydqhbh/wsqtzk/index_1.shtml), 2020-12-29. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2018 baseline emission factors for regional power grids of annual emission reduction project in China. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/index\\_1.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/index_1.shtml), 2020-12-29.]
- [34] 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/wsqtzk/index\\_1.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ ydqhbh/wsqtzk/index_1.shtml), 2020-12-29. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2019 baseline emission factors for regional power grids of annual emission reduction project in China. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/index\\_1.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/index_1.shtml), 2020-12-29.]
- [35] LOUWEN A, VAN SARK W, FAALJ A, et al. Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development. *Nature Communications*, 2016, 7: 1-9.
- [36] HEATH G A, SILVERMAN T J, KEMPE M, et al. Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. *Nature Energy*, 2020, 5(7): 502-510.
- [37] LATUNUSSA C E L, ARDENTE F, BLENGINI G A, et al. Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 156: 101-111.
- [38] SHARMA V, CHANDEL S S. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 753-767.
- [39] JORDAN D C, KURTZ S R. Photovoltaic degradation rates: An analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, 21(1): 1-30.
- [40] GEORGITSIOTI T, PEARSALL N, FORBES I, et al. A combined model for PV system lifetime energy prediction and annual energy assessment. *Solar Energy*, 2019, 183: 738-744.
- [41] 李明, 王贵文, 柴旭荣, 等. 基于空间聚类的中国东北气候分区及其气象干旱时间变化特征. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1682-1693. [LI M, WANG G W, CHAI X R, et al. Climate regionalization and temporal evolution of meteorological drought in Northeast China based on spatial clustering. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1682-1693.]
- [42] 肖雁青, 江源, 张文涛, 等. 黄芩 (*Scutellaria baicalensis* G.) 主要有效成分的区域差异及聚类分析. *资源科学*, 2010, 32(9): 1821-1828. [XIAO Y Q, JIANG Y, ZHANG W T, et al. Regional differentiation of major active components in medicinal herb *Scutellaria baicalensis* G. among samples from different origins in China determined by comparative study and cluster analysis. *Resources Science*, 2010, 32(9): 1821-1828.]
- [43] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 等. 环境模型中敏感性分析方法评述. *环境科学*, 2017, 38(11): 4889-4896. [CHEN W P, TU H Z, PENG C, et al. Comment on sensitivity analysis methods for environmental models. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4889-4896.]
- [44] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2007-04.
- [45] 张振芳. 露天煤矿碳排放核算及碳减排途径研究. 徐州: 中国矿业大学, 2013. [ZHANG Z F. Study on carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.]
- [46] 胡永飞, 张海滨. 外购热力导致的间接温室气体排放量计算方法. *中外能源*, 2014, 19(3): 96-100. [HU Y F, ZHANG H B. A study into calculating indirect greenhouse gas emissions resulting from heat purchase. *Sino-Global Energy*, 2014, 19(3): 96-100.]
- [47] 叶宏亮, 马文会, 杨斌, 等. 工业硅生产过程生命周期评价研究. *轻金属*, 2007, (11): 46-49. [YE H L, MA W H, YANG B, et al. LCA study of metallurgical silicon process. *Light Metals*, 2007, (11): 46-49.]
- [48] 央视新闻. 低碳环保 未来中国四成用电将来自光伏. <http://m.news.cctv.com/2021/04/24/ARTIdftX56lkP2LeuTvb-jbxR210424.shtml#>, 2021-04-24. [CCTV NEWS. Low-carbon and environmentally friendly, 40% electricity will come from photovoltaic in future in China. <http://m.news.cctv.com/2021/04/24/ARTIdftX56lkP2LeuTvb-jbxR210424.shtml#>, 2021-04-24.]
- [49] 潘志刚. 推动新疆硅产业高质量发展的路径选择. *化工管理*, 2020, (21): 1-2. [PAN Z G. Path selection of promoting high quality development of Silicon industry in Xinjiang. *Chemical Enterprise Management*, 2020, (21): 1-2.]

## Whole lifecycle assessment of carbon reduction benefits of polysilicon photovoltaics in Xinjiang

DU Wen-jie, JIANG Yuan, GUAN Meng-xi, LIU Xiang-lan, KANG Mu-yi

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

**Abstract:** Photovoltaic power, affected by a variety of natural and technical factors, is an important way to achieve deep carbon reduction in energy system. But its real carbon emission reduction still needs to be accurately reevaluated. Xinjiang, where the overall natural conditions are suitable for the development of photovoltaic power generation, but the vast spatial differentiation in local geographical features is also prominent, could be no doubt chosen as a study area to conduct this research. By ways of the life cycle assessment, LCA, the power generation model and carbon emission reduction model, this paper has calculated the carbon emission, power generation and carbon emission reduction in the whole life cycle of the 1 kW multi-crystalline silicon photovoltaic power under two degradation rates ( $DR$ ) in Xinjiang, so as to provide a sound scientific basis for the further development of local photovoltaic industry in the region as well as research references to other regions alike. The research results show that: (1) Compared with thermal power, the carbon emission reduction of photovoltaic power in Xinjiang reaches 863 g  $\text{CO}_2\text{-eq}$  ( $DR=1\%$ ) or 738 g  $\text{CO}_2\text{-eq}$  ( $DR=3\%$ ) per kilowatt-hour, accounting for 93% or 79% carbon emission of thermal power separately, which is of great significance to the decarbonization of energy system in the region. (2) The spatial differentiation of carbon emission reduction in Xinjiang is prominent, showing a spatial trend of decreasing from east to west. Clustering analysis shows that photovoltaic layout in the study area should focus on the first- and second-level areas in potential grades, such as Hami, Turpan and Bayangol. (3) The future development of photovoltaic power in Xinjiang should concentrate on the perspective of the whole lifecycle carbon reduction, improve the middle to downstream industrial chain of photovoltaic production to meet the goal of realization of full local production, and fully consider the influencing factors in the construction and operation processes, such as solar radiation, degradation rate, and reasonable layout, as well as accelerate the development of end-of-life treatment and recovery technology.

**Keywords:** carbon emission; power generation; carbon emission reduction; Xinjiang