

引用格式:王影,陈利顶,施晓清. 京津冀分布式光伏发电设备报废量与可回收资源潜力预测[J]. 资源科学, 2023, 45(10): 2076–2088. [Wang Y, Chen L D, Shi X Q. Prediction of scrap volume and recyclable resource potential of distributed photovoltaic power generation equipment in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 2076–2088.] DOI: 10.18402/resci.2023.10.12

# 京津冀分布式光伏发电设备报废量与可回收资源潜力预测

王影<sup>1</sup>, 陈利顶<sup>2</sup>, 施晓清<sup>2</sup>

(1. 郑州大学河南先进技术研究院, 郑州 450000; 2. 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)

**摘要:**【目的】光伏发电是推动清洁能源转型、实现双碳目标的重要手段,但其大规模部署也带来了废弃物管理问题。研究光伏发电设备报废量及资源化潜力对科学有效管理废弃物具有重要意义。【方法】本文以2013—2021年国家能源局分布式光伏发电统计数据为基础,运用市场供给A模型、logistic模型以及资源量估算模型,预测了2022—2060年京津冀地区分布式光伏发电设备报废量及可回收资源量。【结果】①2022—2060年北京、天津、河北分布式光伏组件累计报废量最高分别可达489.84万、393.00万和8337.78万kW;②2022—2060年京津冀报废光伏组件中累计资源含量为297.37万t,其中,其他材料(主要为钢和玻璃)279.26万t,基本金属13.95万t,关键金属3.75万t,贵金属银0.39万t,特殊金属0.02万t,有毒金属0.11万t;③2022—2060年京津冀报废光伏安装系统中累计资源含量为7.65万~10.01万t,光伏安装系统中铝、铜、钢、锌分别为0.67万~0.88万t、1.28万~1.68万t、5.68万~7.44万t、0.013万~0.017万t。【结论】京津冀地区未来分布式光伏报废量较高,需要采取及时有效的管理措施,同时光伏废弃物中材料种类众多,资源回收潜力大,完善的回收利用系统设计必不可少。

**关键词:** 京津冀; 分布式光伏发电设施; 市场供给A模型; logistic模型; 资源量估算模型; 报废量; 资源化潜力

DOI: 10.18402/resci.2023.10.12

## 1 引言

碳达峰碳中和目标提出后,中国大力发展清洁能源发电<sup>[1]</sup>。与集中式光伏发电相比,分布式光伏发电以其靠近用户侧、投资金额少、输电损失少、装配灵活等特点<sup>[2]</sup>,装机量快速增长,成为国家重点扶持的新兴产业。图1为国家能源局<sup>[3]</sup>公布的2013—2021年分布式光伏和集中式光伏(光伏电站)年新增装机量,数据显示,2021年分布式光伏新增2927.9万kW,约占全部光伏新增装机的55%。分布式光伏已经形成一定规模,并已超越集中式光伏。

光伏的寿命约为25~30年<sup>[4-6]</sup>,因此第一批光伏

报废期即将到来。根据IRENA<sup>[7]</sup>报告,预计到2050年,中国将成为全球第一大光伏废弃物产生国,报废光伏板中的铝、银、镓、铜、硅片、玻璃等有价值组分,极具回收价值<sup>[8]</sup>。2012年《欧盟废弃电子电器产品管理条例》第一次将光伏纳入指令范围,规定报废光伏和家用电器作为一类产品需要强制回收处理<sup>[9]</sup>。“十四五”循环经济发展规划中,提及了光伏组件等新型废旧产品产生量急剧增加,回收和拆解面临较大挑战,要促进废弃光伏组件等的分类利用和集中处理。目前国内光伏废弃物回收还处于初级阶段,对于新兴光伏废弃物,应早作应对准备。深

收稿日期: 2023-05-04 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 国家科技部重点研发专项子课题(2016YFC0503407)。

作者简介: 王影,女,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为固废资源化。E-mail: 1558819261@qq.com

通讯作者: 施晓清,女,上海人,副研究员,研究方向为城市及产业生态学。E-mail: shixq@rcees.ac.cn

2023年10月

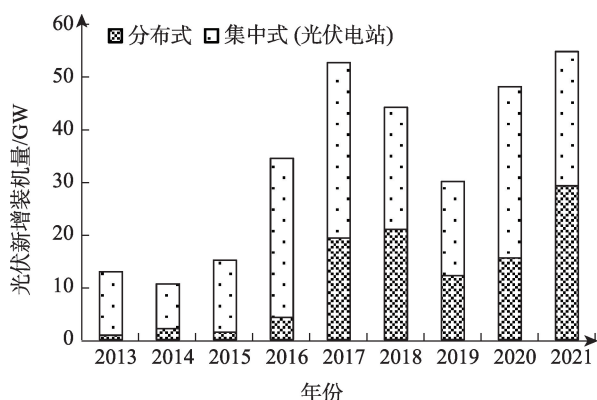


图1 2013—2021年分布式光伏和集中式光伏(光伏电站)年新增装机量

Figure 1 Annual new installed capacity of distributed photovoltaic and centralized photovoltaic (photovoltaic power plants), 2013–2021

入了解光伏发电设备废弃量、产生趋势、可回收资源量等,可为制定预防性和主动性的管理策略以及设计更完善的回收系统提供科学依据。

国内外学者已对光伏废弃物进行了大量研究,从不同的研究角度,光伏废弃物研究可分为以下几个方面:在光伏报废量的研究方法上,以光伏寿命分布的不同观点,分为以固定寿命为基础的市场供给模型<sup>[5,6,10]</sup>和动态寿命(Weibull 寿命分布)为基础的市场供给 A 模型<sup>[11–14]</sup>;在研究内容上,主要为光伏报废量<sup>[12,13]</sup>和废弃物资源含量<sup>[10,14–16]</sup>的研究,部分学者还研究了其资源的经济价值<sup>[6]</sup>、资源的供需关系<sup>[11,17]</sup>等。梳理文献后发现,研究尚存在一定的局限性:①光伏类型选取不精细。在光伏类型的选择上,除 Domínguez 等<sup>[6]</sup>将研究对象限定为 1 兆瓦以上地面光伏以外,其他研究多数对光伏类型不作区分<sup>[11–14]</sup>;②报废光伏系统设备选择不全面。除 Domínguez 等<sup>[5,6]</sup>对整套光伏系统(光伏组件和安装系统 BOS)进行研究以外,其他研究基本只针对光伏组件进行研究<sup>[11–14,18]</sup>;③缺乏区域尺度的研究。在研究尺度的选择上,除 Liu<sup>[12]</sup>和 Wang 等<sup>[13]</sup>的光伏报废量研究分别涵盖省级和城市尺度以外,其他研究多为国家尺度<sup>[10–10,11,15–17]</sup>,鲜有区域尺度的研究。

京津冀地区作为中国三大城市群之一,是中国经济增长的重要引擎<sup>[19]</sup>,且该地区的太阳能资源位于全国前列<sup>[20]</sup>;同时,“十四五”期间京津冀地区为实现双碳目标制定了多项光伏发展规划<sup>[21–23]</sup>。因此,

本文在梳理国内外光伏废弃物研究的基础上,选取分布式光伏发电设备(包括光伏组件及安装系统(逆变器、线缆、安装支架))为研究对象,综合考虑多种因素影响,选用 Weibull 动态寿命分布模型,结合市场供给 A 等模型,研究区域尺度的京津冀地区分布式光伏发电设备报废量及其可回收资源潜力,以为政府和企业对新兴光伏废弃物的回收利用和管理提供科学依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究对象

分布式光伏发电设备基本组成为:光伏组件、逆变器、线缆、支架、光伏计量表、智能电表等,如图 2 所示。此外,大型电站还需要变压器和配电柜等其他辅助设备<sup>[25,26]</sup>。光伏组件将太阳能转换为电能,是光伏发电系统的核心<sup>[4]</sup>。为确保光伏组件能接收到最大的太阳能辐射、提高光伏组件效率以及固定作用,光伏组件底部会装有支架,多为铝合金材质<sup>[5]</sup>。光伏组件产生的电为直流电,需要用逆变器将其转换为交流电,供用户使用或直接输送给电网<sup>[4]</sup>。光伏计量表主要计量光伏组件系统的总发电量。智能电表的功能是双向计量,计算上网电量和实际用电量。此外,整个系统的每个部分都由电缆连接。基于现有的数据,本文仅对分布式光伏组件、逆变器、线缆和安装支架的废弃情况进行研究。

### 2.2 光伏组件报废量估算方法

首先,根据质量守恒定律,流入的量减去流出的量等于系统增加的量,所以光伏组件的新增装机

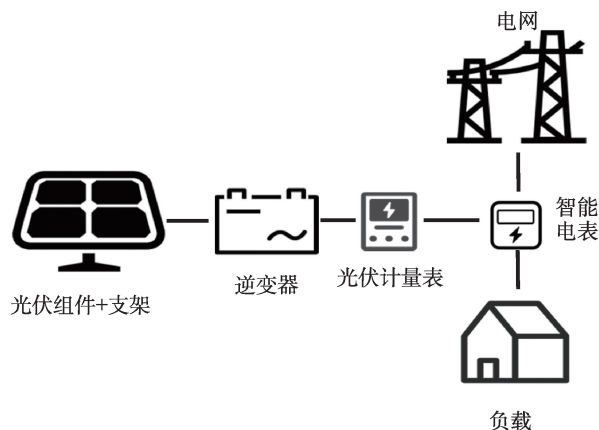


图2 分布式光伏发电系统图

Figure 2 Distributed photovoltaic power generation system

量、报废量和累计装机量有如下等式<sup>[27]</sup>:

$$S_t - Q_t = D_t - D_{t-1} \quad (1)$$

式中:  $S_t$  为  $t$  年光伏组件新增装机量(kW);  $Q_t$  为  $t$  年光伏组件报废量(kW);  $D_t$  和  $D_{t-1}$  分别为  $t$  年和  $t-1$  年光伏组件累计装机量(kW)。

一般来说,一个新技术的使用和传播通常遵循“S”型曲线行为,最初表现为缓慢渗透阶段,然后是指数增长阶段,而后是拐点,最终是饱和阶段<sup>[28,29]</sup>,该函数常被用来描述新技术的传播渗透情况<sup>[30]</sup>。因此,本文使用 logistic 函数来描述远期(2022—2060 年<sup>①</sup>)全国分布式光伏累计装机量  $D_t$  的增长趋势,如公式(2)所示:

$$D_t = \frac{S}{1 + e^{(-k(t-t_a))}} \quad (2)$$

式中:  $S$  为光伏装机量渐近值;  $k$  为扩散速率;  $t_a$  为  $D_t$  出现最大增长速率的拐点年份。本文利用全国分布式光伏累计装机量的 logistic 函数增长曲线,得到 2022—2060 年全国分布式光伏累计装机量增长率;假设京津冀的增长率与全国增长率相同,结合国家能源局公布的北京市、天津市、河北省 2013—2021 年分布式光伏累计装机量,得到京津冀 2022—2060 年分布式光伏累计装机量。

光伏组件报废量  $Q_t$  的计算参考电子废弃物估算中的市场供给 A 模型<sup>[31]</sup>,用光伏的新增装机量来替代电子废弃物销售量,公式如下:

$$Q_t = \sum_{n=t_0}^{t-1} [S_n \times f(n)] \quad (3)$$

式中:  $n$  为  $t$  年报废光伏组件的装机年份;  $t_0$  为光伏组件产品安装的初始年份;  $S_n$  为第  $n$  年分布式光伏的新增装机量(kW);  $f(n)_t$  为  $n$  年新增的光伏组件产品在  $t$  年的报废概率,见公式(4)计算。

Weibull 寿命分布模型反映了光伏组件的动态寿命变化,公式如下:

$$f(n) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{n}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left[\frac{n}{\beta}\right]^\alpha\right) \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为描述产品逐渐老化的形状参数;  $\beta$  为描述产品特征寿命的比例参数。

### 2.3 光伏组件资源含量估算方法

为了计算报废光伏组件中的每种材料的产生

量,本文根据张钦等<sup>[14]</sup>的研究,建立了光伏组件资源量估算模型:

$$C_j(t) = \sum_{i=1}^m \frac{Q_t \times \omega_i \times u_{ji}}{P_i} \quad (5)$$

式中:  $C_j(t)$  为  $t$  年报废光伏组件中  $j$  资源含量(kg);  $\omega_i$  为  $i(i=1, 2, \dots, m)$  组件的市场份额(%);  $u_{ji}$  为每平方米  $i$  组件中  $j$  资源平均含量(kg/m<sup>2</sup>);  $P_i$  为  $i$  组件中单位面积组件额定功率(W/m<sup>2</sup>)。

### 2.4 逆变器报废量及资源含量估算方法

在分布式光伏系统中,为了确保逆变器以其最大输出功率运行,光伏阵列容量与逆变器容量的配比通常约为 1.15<sup>[6]</sup>,根据该值得到逆变器报废量及资源含量的计算方法,如公式(6)–(7)所示:

$$N_t = \frac{Q_t \times \mu}{F} \quad (6)$$

$$W_j(t) = N_t \times O_j \times V \quad (7)$$

式中:  $N_t$  为逆变器报废量(台);  $\mu$  为逆变器容配比;  $F$  为逆变器容量(kW/台);  $W_j(t)$  为  $t$  年报废逆变器中  $j$  资源含量(kg);  $O_j$  为逆变器中  $j$  资源平均含量(%);  $V$  为逆变器质量(kg/台)。

### 2.5 线缆和安装支架资源含量估算方法

根据 Sinha 等<sup>[32]</sup>和 Domínguez 等<sup>[5,6]</sup>的研究,估计电缆中包含的材料量,计算公式如下:

$$M_t = \sum_{i=1}^m \frac{Q_t \times \omega_i}{P_i} \times \tau_h \quad (8)$$

式中:  $M_t$  为  $t$  年分布式光伏发电系统中使用的线缆中的金属的量(kg);  $\tau_h$  为每平方米光伏组件所用线缆中金属的含量(kg/m<sup>2</sup>);  $h$  为金属种类。

安装支架是光伏系统的重要组成成分,支架包括轨道和零部件,材料主要采用铝和钢,公式如下:

$$G_j(t) = \sum_{i=1}^m \frac{Q_t \times \omega_i}{P_i} \times \tau_j \quad (9)$$

式中:  $G_j(t)$  为  $t$  年分布式光伏系统安装支架中  $j$  资源含量;  $\tau_j$  为每平方米光伏组件所用支架中  $j$  资源含量(kg/m<sup>2</sup>)。

### 2.6 数据来源

#### 2.6.1 新增装机量、累计装机量

本文中 2013—2021 年的京津冀和全国分布式

① 截至 2023 年 3 月,国家能源局尚未公布 2022 年光伏发电统计数据,故以 2022 年为起点;为响应碳中和目标,以 2060 年为终点年份。



2023年10月

光伏新增装机量、累计装机量数据均来自于国家能源局。2021年初,国家电网计划投资建设分布式太阳能装置<sup>[33,34]</sup>,预计2025年分布式光伏累计装机量将达到1.798亿kW,2030年达到2.997亿kW,2050年达到10.010亿kW,2060年达到11.020亿kW。

### 2.6.2 组件技术和规格、组件市场份额及材料组成

光伏发电技术通常分为三代:第一代光伏发电技术以晶体硅(c-Si)光伏发电技术为代表,包括单晶硅和多晶硅;第二代光伏发电技术主要是无机化合物薄膜光伏发电技术,包括非晶硅(a-Si)、碲化镉(CdTe)和铜铟镓硒(CIGS)等;第三代光伏发电技术为新型光伏发电技术,包括无机、有机薄膜太阳能电池,染料敏化、量子点敏化太阳能电池和钙钛矿太阳能电池<sup>[35]</sup>。基于产业成熟度的原因,目前晶体硅太阳能电池在商业和民用领域广泛应用,在全球光伏市场占据95%以上<sup>[36]</sup>,中国分布式光伏电站中也主要使用硅基组件<sup>[37]</sup>。因为缺乏京津冀地区数据,本文采用全国的光伏组件市场份额估算京津冀地区情况。涵盖的光伏组件类型包括晶体硅组件(c-Si)和薄膜组件,薄膜组件分为非晶硅(a-Si)、碲化镉(CdTe)和铜铟镓硒(CIGS),表1展示了光伏组件的不同市场份额,数值来源于文献及报告中2015、2017和2021年不同种类光伏组件市场份额的3年平均值。

表2给出了不同光伏技术的材料组成,数据来自 Domínguez 等<sup>[5,6]</sup>的研究,光伏组件中的材料组成成分大致可分为6类,其他材料(硅、钢、EVA(光伏面板材料)和玻璃)、贵金属(银)、基本金属(铝、铜、铁、锰、锌和锡)、特殊金属(镍、铬、钛和钼)、关键金属(镁、镓、铟和碲)和有毒金属(镉、铅和硒),不同种类的材料占比不同,在不同光伏种类中占比较高的材料分别是,晶体硅组件中的玻璃和铝,非晶硅

组件中的铝和钢,碲化镉组件中的玻璃和EVA,以及铜铟镓硒组件中的玻璃和铝。贵金属只在晶体硅组件中存在,基本金属含量较多的是铝和铜,特殊金属微量存在于光伏组件中,关键金属虽然也微量存在,但是其在中国储量较低<sup>[40]</sup>,需特别关注其金属存量与需求间的供应关系。有毒金属存在较少,但是其对环境影响较大,需关注其回收处理。

光伏组件的规格因型号而异,并因技术的快速发展而变化。根据 Ecoinvent 数据库 3.3 的光伏规格数据,不同光伏组件规格如表3所示。

### 2.6.3 逆变器材料组成

本文通过查询国内逆变器出货量最大的两家厂商(华为、阳光电源)的分布式逆变器规格,最终得到43个不同型号的户用和工商业分布式光伏组件规格参数,取平均数得到分布式光伏逆变器参数:逆变器容量( $F$ )为41.5 kW/台,逆变器重量( $V$ )为36.3 kg/台。每台逆变器的材料组成( $O_j$ )(质量比)如表4所示,其中钢(75.2%)、铜(17.7%)和铝(6.9%)占比较高,为主要金属。

### 2.6.4 线缆和安装支架的材料组成

根据文献数据<sup>[6,32]</sup>,线缆材料量与光伏组件面积之间的比值为0.64 kg铜/m<sup>2</sup>光伏组件(线缆仅考虑材料铜)。同时,基于 Ecoinvent 数据库 3.3 中安装支架材料组成数据,光伏安装支架材料与光伏组件面积之间的比值确定为3.9 kg铝/m<sup>2</sup>光伏组件、7.5 kg钢/m<sup>2</sup>光伏组件和0.27 kg锌/m<sup>2</sup>光伏组件。

## 3 结果与分析

### 3.1 京津冀分布式光伏组件累计装机量、新增装机量和报废量

根据全国总装机量和国家电网的计划装机量数据,得到全国分布式光伏累计装机量预测曲线,如图3所示,得到的参数如表5所示。由图3可知,

表1 光伏组件的不同市场份额(%)

Table 1 Market shares of photovoltaic components worldwide (%)

年份	晶体硅组件(c-Si)	薄膜组件			数据来源
		非晶硅(a-Si)	碲化镉(CdTe)	铜铟镓硒(CIGS)	
2015	93.0	1.0	4.0	2.0	王世江 <sup>[38]</sup>
2017	96.5	0.1	2.4	1.0	王世江等 <sup>[39]</sup>
2021	96.000	0.004	3.838	0.168	CIPA <sup>[36]</sup>
平均值	95.2	0.4	3.4	1.0	



表2 不同光伏种类的材料组成情况 (kg/m²)

Table 2 Material composition of different photovoltaic types (kg/m²)

资源种类	组成成分	晶体硅组件(c-Si)	非晶硅(a-Si)	碲化镉(CdTe)	铜钢镓硒(CIGS)
其他	Si	0.12	0.20×10 <sup>3</sup>	0.05	0.00
	钢	1.47	3.10	0.20	0.00
	EVA	1.00	1.24	0.60	0.90
	玻璃	10.10	0.04	15.20	15.00
贵金属	Ag	0.89×10 <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00
基本金属	Al	2.54	3.24	0.02	1.51
	Cu	0.11	0.07	0.50	0.05
	Fe	0.00	0.58×10 <sup>4</sup>	0.00	0.00
	Mn	0.00	0.73×10 <sup>4</sup>	0.00	0.00
	Zn	0.12×10 <sup>5</sup>	0.29×10 <sup>4</sup>	0.30×10 <sup>6</sup>	0.01
	Sn	0.90×10 <sup>5</sup>	0.00	0.23×10 <sup>6</sup>	0.01
特殊金属	Ni	1.63×10 <sup>4</sup>	0.00	0.00	0.00
	Cr	0.00	0.44×10 <sup>4</sup>	0.30×10 <sup>2</sup>	0.00
	Ti	0.80×10 <sup>6</sup>	0.00	0.23×10 <sup>7</sup>	0.00
	Mo	0.00	0.00	0.00	0.01
关键金属	Mg	0.08	0.10	0.00	0.05
	Ga	0.00	0.00	0.00	0.01
	In	0.00	0.90×10 <sup>3</sup>	0.00	0.01
	Te	0.00	0.50×10 <sup>3</sup>	0.02	0.00
有毒金属	Cd	0.00	0.40×10 <sup>3</sup>	0.02	0.03
	Pb	7.20×10 <sup>4</sup>	0.00	0.70×10 <sup>3</sup>	0.00
	Se	0.00	0.00	0.00	0.01

表3 不同光伏组件规格

Table 3 Different photovoltaic module specifications

光伏种类	来源	面积/m²	功率/W	$P_i/(W/m^2)$
c-Si	Ecoinvent 3.3	1.46	224	153.42
a-Si	Ecoinvent 3.3	2.30	128	55.65
CdTe	Ecoinvent 3.3	0.72	65	90.28
CIGS	Ecoinvent 3.3	0.72	80	111.11

分布式光伏随着政策的支持,累计装机量快速上升,但在2036年开始放缓,随后渐渐趋于平缓。

根据公式(2)部分提到的京津冀地区累计装机量的预测方法,得到京津冀2013—2060年分布式光伏累计装机量预测值,如图4所示。

由图4可知,京津冀分布式光伏累计装机量预计2060年分别将达到969.26万kW、761.19万kW、和16315.94万kW,相较于2013年初始年分别增长约111倍、195倍和877倍。北京、天津、河北的分布式光伏累计装机量在2035年达到拐点,后期增长趋势逐渐变小。

表4 逆变器的材料组成<sup>[6]</sup>

Table 4 Material composition of inverters<sup>[6]</sup>

材料	材料占比/%
Al	6.90
Cu	17.70
钢	75.20
Mn	0.10×10 <sup>3</sup>
Ni	0.01
Fe	0.30×10 <sup>2</sup>
Ag	0.02
Ta	0.10×10 <sup>2</sup>
Sn	0.10×10 <sup>2</sup>
Mg	0.40×10 <sup>3</sup>
Pb	0.10
Au	0.03
Zn	0.02

IRENA<sup>[7]</sup>给出了早期退化和常规退化两种情景下光伏废弃物评估方法。早期退化情景下,假设光伏安装不合格、后期维护不良等情况;常规退化情景下,假设光伏安装合格,后期维护良好等情况<sup>[17]</sup>。

2023年10月

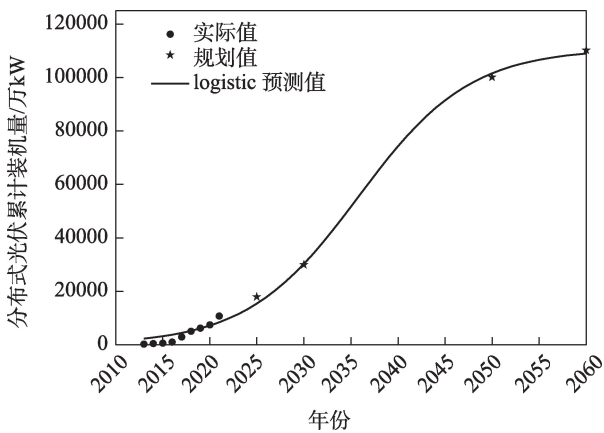


图3 2013—2060年全国分布式光伏累计装机实际值、规划值及预测曲线

Figure 3 Actual value, planned value, and forecast curve of cumulative installed capacity of distributed photovoltaics in China, 2013–2060

表5 分布式光伏累计装机量 logistic 函数参数估算

Table 5 Logistic function parameter estimation for cumulative installed capacity of distributed photovoltaics

	$R^2$	$S$	$k$	$t_s$
参数值	0.9976	110800	0.1688	23.79

本文也将采用上述两种情况来评估光伏废弃物,参数值如表6所示,寿命分布概率如图5所示。数据显示,在安装的第1年,早期退化情景下,约有

0.05%的光伏组件报废,常规退化情景下,概率约为0.6‰;在安装的第35年,早期退化情景下,累计约有78%的光伏组件报废,常规退化情景下,概率约为92%。相对早期退化而言,常规退化下组件报废开始得较晚,结束得较早,报废时间更集中。

京津冀地区分布式光伏在早期退化和常规退化情景下,2022—2060年新增装机量 $S_{i1}$ (早期退化)和 $S_{i2}$ (常规退化)、2022—2060年报废量 $Q_{i1}$ (早期退化)和 $Q_{i2}$ (常规退化)如图6a、6b、6c所示。早期退化情景下,分布式光伏新增装机量(京津冀地区均如此)在2022—2038年将快速增长,2039—2054年将缓慢下降,2055—2060年又将缓慢上升;常规退化情景下,新增装机量在2022—2037年快速增长,2038—2051年缓慢下降,2052—2060年又缓慢上升。因为一开始光伏需求量大,累计装机量增长速度较快,使得新增装机量同样快速增长;后期需求量慢慢饱和,累计装机量增长速度逐渐平缓,新增装机量开始缓慢下降;再往后光伏组件开始进入报废高峰期,大量的光伏组件报废,带来了新增装机量增长趋势的上升。

分布式光伏报废量先缓慢上升、再快速增长、过了拐点以后,增长速率逐渐下降。早期退化情景

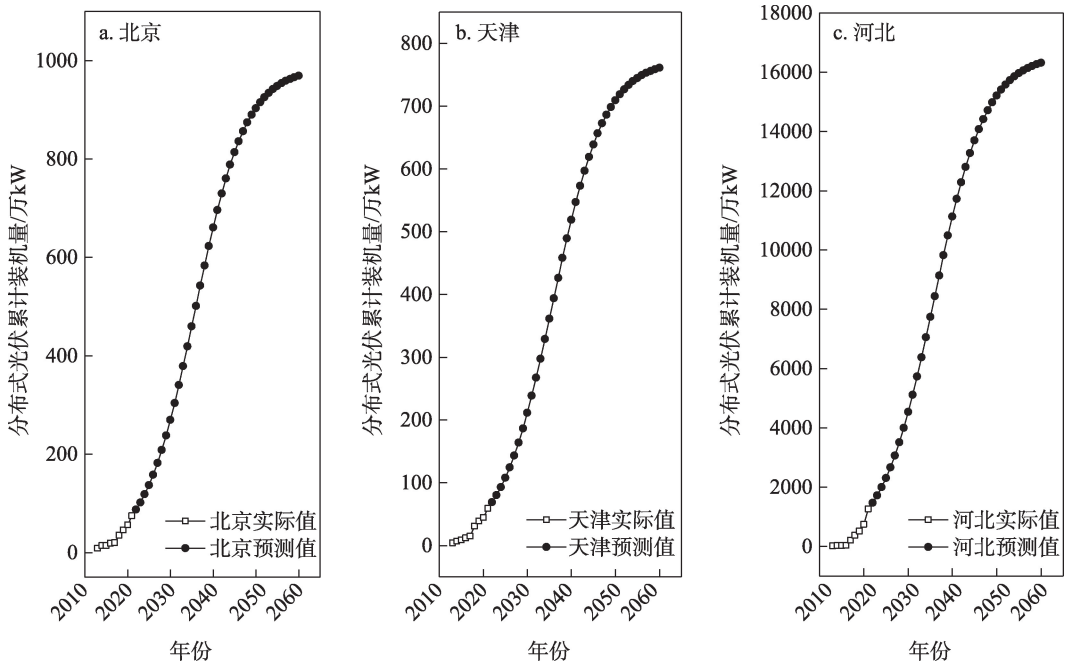


图4 2013—2060年分布式光伏累计装机量实际值和预测值

Figure 4 Actual and predicted values of cumulative installed capacity of distributed photovoltaics, 2013–2060

表6 Weibull函数参数值

Table 6 Parameter values of the Weibull function		
场景	$\alpha$	$\beta$
早期退化场景	2.4928	30
常规退化场景	5.3759	30

下,北京、天津、河北 2022 年报废量分别为 0.24 万 kW、0.25 万 kW、2.88 万 kW,拐点均出现在 2049 年; 2060 年预计报废量分别为 32.2 万 kW、25.52 万 kW 和 546.31 万 kW;常规退化情景下,北京、天津、河北 2022 年报废量分别 59、67、307 kW,拐点分别出现在 2054 年、2055 年、2052 年,2060 年预计报废量分别为 33.24 万 kW、26.24 万 kW、560.56 万 kW。

早期退化情景下,北京、天津、河北光伏组件报废量 2022 年至拐点年之间年增长率为 17.8%、16.6%和 19.3%,拐点年至 2060 年之间的年增长率为 4.50%、4.42%和 4.45%;常规退化情景下,北京、天津、河北光伏组件报废量 2022 年至拐点年之间年

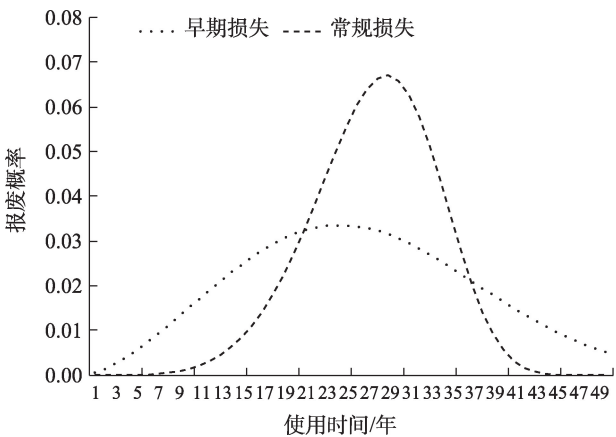


图5 光伏组件早期退化和常规退化 Weibull 分布图

Figure 5 Weibull distribution of early-loss and regular-loss of photovoltaic modules

增长率为 29.5%、27.4%和 39.7%,拐点年至 2060 年之间的年增长率为 6.07%、5.80%和 7.35%。造成这种现象的原因是,早期退化情景下,光伏报废高峰期较早到来,常规退化情景下,光伏组件报废高峰

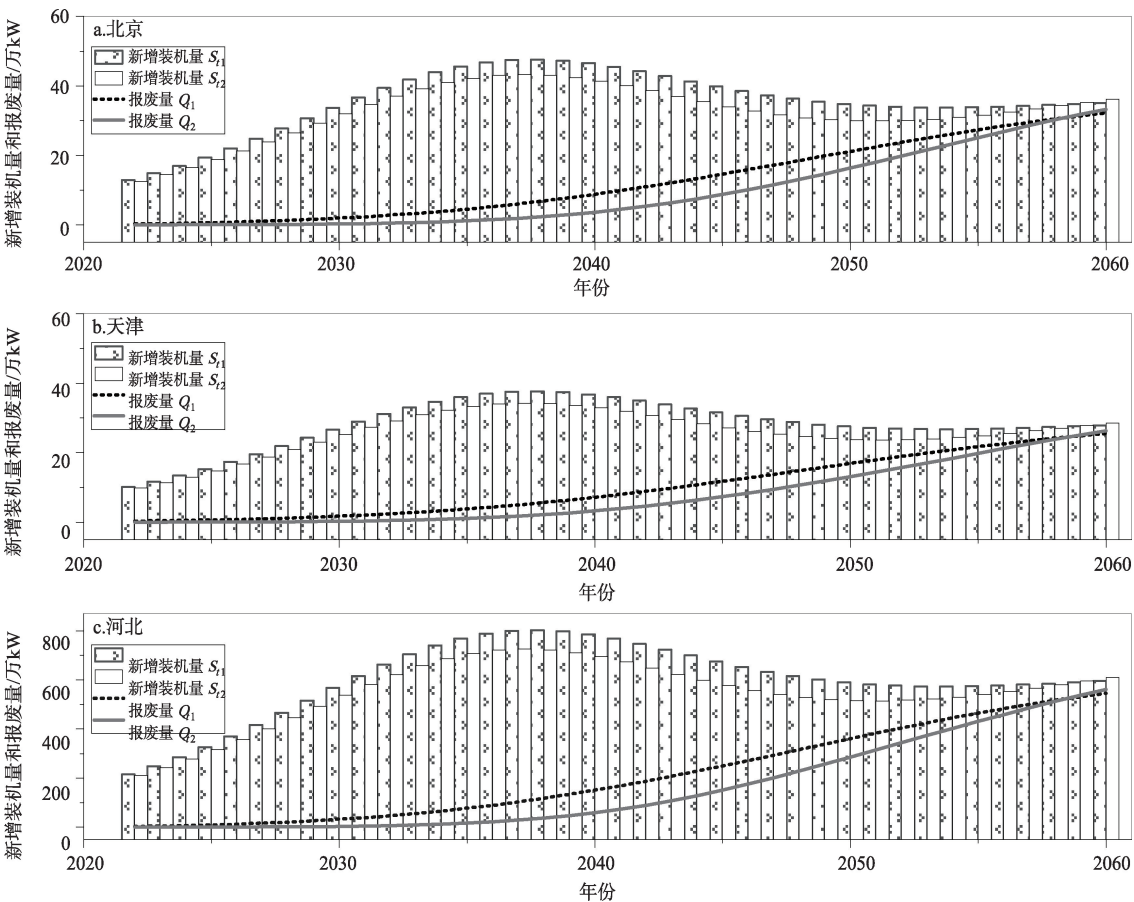


图6 2022—2060 年分布式光伏新增装机量和报废量

Figure 6 New installed and scrapped capacity of distributed photovoltaics, 2022–2060



2023年10月

期较晚到来,所以在早期退化情景下前期的光伏报废量一直高于常规退化情景,而到了后期,常规退化情景下,光伏组件开始进入报废高峰期,报废量逐渐超过早期退化情景。

### 3.2 京津冀报废分布式光伏组件中的资源含量

本文采用常规退化的光伏报废量和报废分布式光伏组件资源量估算模型,按照表2的材料分类,最终得到2022—2060年京津冀地区每年报废分布式光伏组件材料量,如图7所示。其中,报废量最高的是其他材料(包含硅、钢、EVA、玻璃),其次是基本金属、关键金属、贵金属、有毒金属和特殊金属,主要因为光伏组件中其他材料占比较高。材料量的变化随光伏组件的报废量变化,呈现“S”型增长趋势。2022年京津冀共产生其他材料(硅:1.96%;钢:23.77%;EVA:16.66%;玻璃:57.62%)17.17 t,预计到2060年将增长到24.58万 t;基本金属(铝:54.34%;铜:45.42%)2022年产生量为0.86 t,预计到2060年将增长到1.23万 t;关键金属(镁:98.08%;镓:0.13%;铟:0.37%;碲:1.42%)2022年产生量为0.23 t,预计到2060年将增长到0.33万 t;贵金属(银)

2022年产生量为0.02 t,预计到2060年将增长至0.03万 t;有毒金属(镉:66.21%;铅:29.15%;硒:4.64%)2022年产生量为7 kg,预计到2060年将增长到96 t;特殊金属(钛:0.17%;铬:25.83%;钼:38.73%;镍:35.26%)2022年1.2 kg,预计到2060年将增长到18 t。

由图7可知,资源含量在2030年之前变化较小,2030年以后将有大幅度增长,2030—2060年之间其他材料将增长24.44万 t,基本金属将增长1.22万 t,关键金属将增长0.33万 t,贵金属将增长0.03万 t,有毒金属将增长96 t,特殊金属将增长18 t。

### 3.3 京津冀报废分布式光伏逆变器、线缆和支架资源含量

随着光伏组件报废量的增长,光伏的安装系统(逆变器、线缆和支架)也呈现相同的增长态势,随着材料占比的不同和报废寿命的差异会有不同的变化,根据公式(6)–(7)以及表4计算,京津冀2022—2060年逆变器的报废量及资源含量如图8所示。早期退化情景下,2022—2060年京津冀地区将有255.32万台逆变器报废,潜在的资源量为铝

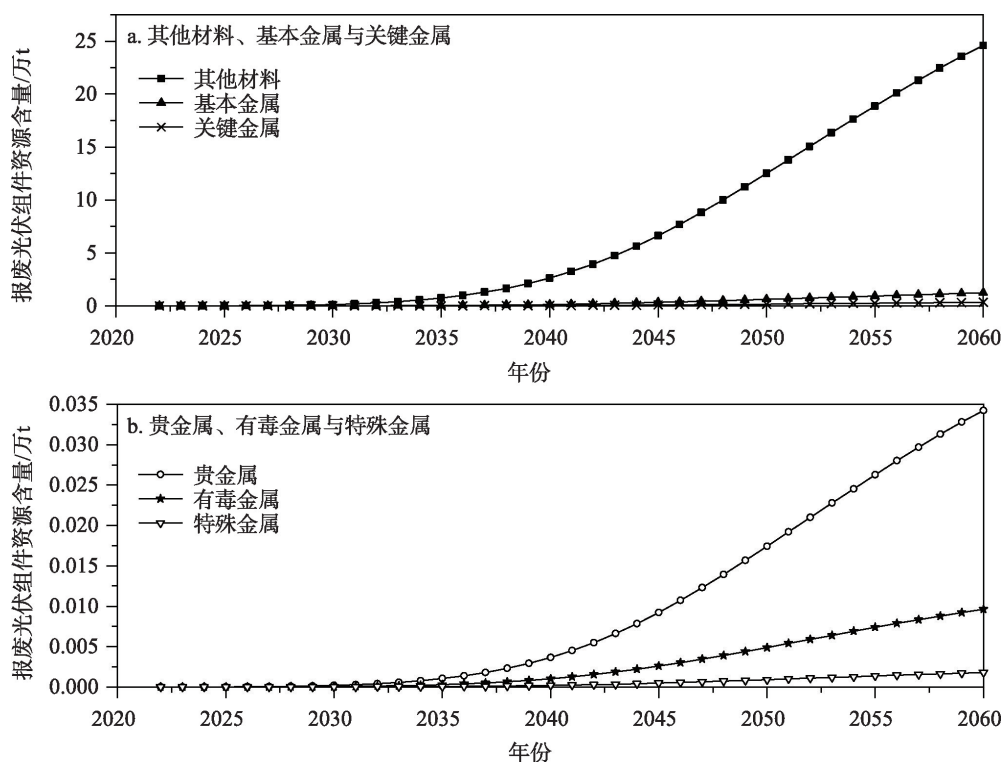


图7 2022—2060年京津冀报废光伏组件资源含量

Figure 7 Amount of scrapped photovoltaic module materials in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2022–2060

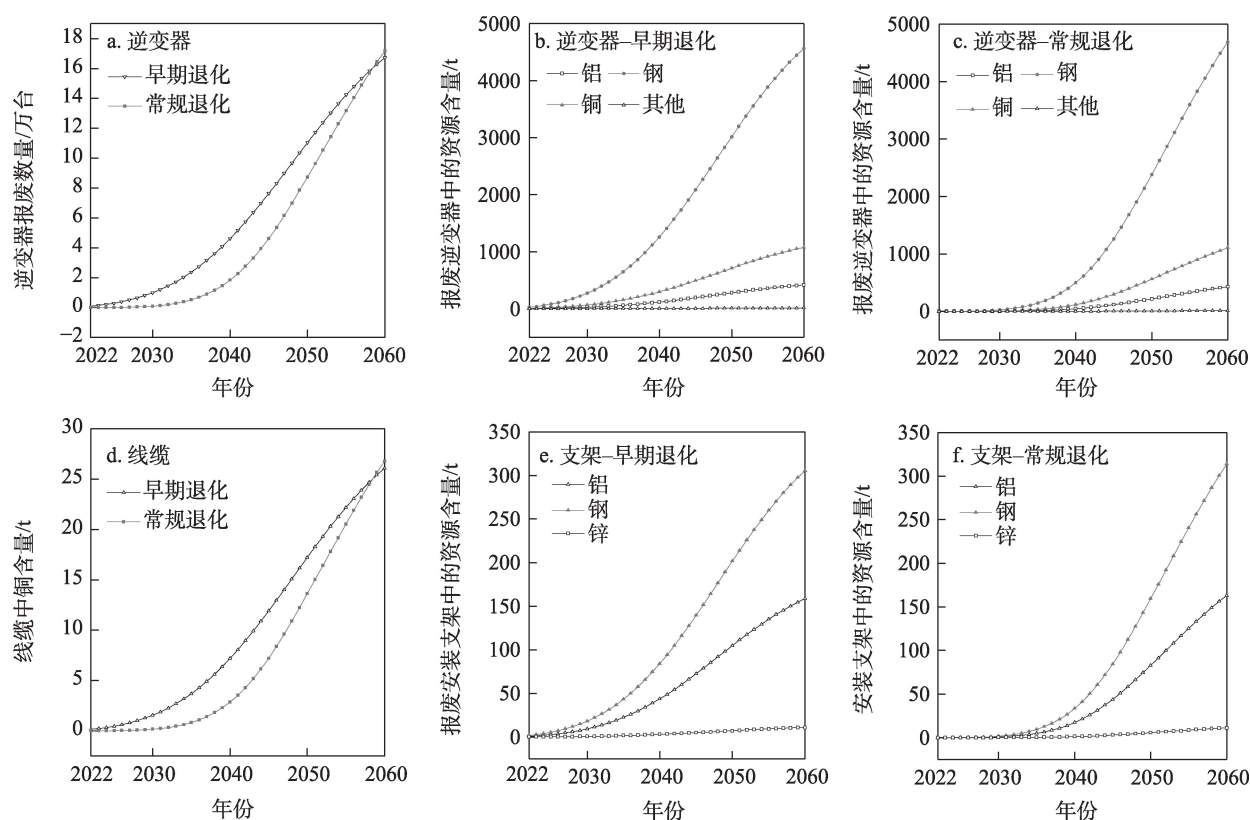


图8 京津冀地区2022—2060年分布式光伏逆变器报废量及报废逆变器、线缆和安装支架中材料量

Figure 8 Amount of scrapped distributed photovoltaic inverters in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2022 to 2060, and the material weight of scrapped inverters

6395.17 t、铜 16404.99 t、钢 69698.04 t 和其他金属(锰 0.001‰、镍 0.100‰、铁 0.030‰、银 0.200‰、钼 0.010‰、锡 0.010‰、镁 0.004‰、铅 1.000‰、金 0.300‰、锌 0.200‰) 171.93 t, 年均增长率 14.63%; 常规退化下, 2022—2060 年京津冀地区将有 195.10 万台逆变器报废, 潜在的资源量为铝 4886.77 t、铜 12535.63 t、钢 53258.74 t 和其他金属(锰 0.001‰、镍 0.100‰、铁 0.030‰、银 0.200‰、钼 0.010‰、锡 0.010‰、镁 0.004‰、铅 1.000‰、金 0.300‰、锌 0.200‰) 131.38 t, 年均增长率 28.64%。

根据公式(8)计算, 京津冀地区报废线缆潜在的铜的存量如图 8d 所示, 早期退化情景下, 2022 年线缆报废铜预计为 0.15 t, 2060 年预计为 26.07 t, 年均增长率为 11.94%, 2022—2060 年铜累计产生量预计为 397.96 t; 常规退化情景下, 2022 年线缆报废铜预计为 0.0019 t, 2060 年预计为 26.76 t, 年均增长率为 23.12%, 2022—2060 年铜累计产生量预计为 304.09 t。

根据公式(9)计算, 京津冀地区报废安装支架潜在的材料存量如图 8e、8f 所示, 在早期退化情景下, 2022 年铝、钢、锌分别预计为 0.89、1.71 和 0.06 t, 2060 年铝、钢、锌分别预计为 158.87、305.50、11.00 t, 2022—2060 年铝、钢、锌将分别累计 2425.05 t、4663.56 t、167.89 t, 年均增长率为 11.94%; 在常规退化情景下, 2022 年铝、钢、锌分别预计为 0.01、0.02、0.01 t, 2060 年铝、钢、锌分别预计为 163.07、313.60、11.29 t, 2022—2060 年铝、钢、锌将分别累计 1853.07 t、3563.59 t、128.29 t, 年均增长率为 23.12%。

## 4 结论

本文基于早期退化和常规退化两种光伏报废情景, 预测了京津冀地区分布式光伏组件报废量和分布式光伏系统的材料回收潜力, 为分布式光伏的报废管理政策的制定提供了科学依据。研究表明:

(1) 根据国家的装机目标, 2022—2060 年京津冀地区将部署大量分布式光伏发电装置, 分布式光

2023年10月

伏累计装机量2060年预计将达到1.80亿kW,相较于2013年将增长约578倍。京津冀地区分布式光伏报废量呈现先缓慢上升、再快速增长、过了拐点后增长速率逐渐下降的趋势。在北京、天津和河北的早期退化和常规退化情景下,拐点出现的时间点不同,拐点年份相对于2022年的增长率普遍在16.6%~39.7%之间,2060年各地区的分布式光伏报废量相较于拐点年份的增长率普遍在4%~7%之间。早期退化情景和常规退化情景下,京津冀2060年报废量相较于2022年增加了179倍和14314倍,北京、天津、河北分别增长了134倍和5590倍、101倍和3919倍、189倍和18273倍。因此,加强对未来报废光伏设备的管理刻不容缓。

(2)光伏组件中其他材料(包括硅、钢、EVA和玻璃)占比最高,其次是基本金属、关键金属、有毒金属、贵金属和特殊金属。2060年材料总量将达到26.18万t,玻璃材料在光伏废弃物中的质量份额最大,达到54.09%,其次是钢、EVA、铝、铜、硅、镁和其他材料。2060年京津冀地区光伏组件中材料(受计算模型影响各材料增长倍数相同)相对于2022年增加了358倍,北京增加了266倍、天津201倍和河北380倍。资源回收潜力巨大;加强对报废光伏组件的资源回收利用,可为降低中国关键金属等供应风险提供有效支持。

(3)对于光伏安装系统(逆变器、线缆和支架),京津冀地区2022—2060年将报废逆变器195.10~255.34万台,其中累计产生铝0.49万~0.64万t、铜1.25万~1.64万t、钢5.33万~6.97万t和其他材料131.38~171.93t;报废线缆将累计产生铜0.03万~0.04万t;报废安装支架将累计产生铝0.19万~0.24万t、钢0.36万~0.47万t和锌128.29~167.89t。早期退化下,逆变器、线缆和安装支架的年均增长率分别为14.63%、11.94%和11.94%;常规退化情景下,年均增长率分别为28.64%、23.12%和23.12%,具有很好的资源回收潜力。

随着分布式光伏组件报废量不断增长,政府和企业需要关注光伏废弃物处理和回收利用问题,制定相应政策和技术解决方案,以确保光伏产业发展的可持续性和环境友好性。同时,也需加强光伏产

业链的监管,提高光伏组件质量和使用寿命,减少早期退化,减缓光伏废弃物处理压力和避免资源浪费。

## 参考文献(References):

- [1] 王鑫森,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.]
- [2] 刘蕾,楚春礼,鞠美庭.中国分布式光伏发电政策演变和发展探讨[J].未来与发展,2018,42(6):6-14. [Liu L, Chu C L, Ju M T. Policy evolution and development of distributed photovoltaic power generation in China[J]. Future and Development, 2018, 42(6): 6-14.]
- [3] 国家能源局.我国光伏发电并网装机容量突破3亿千瓦分布式发展成为新亮点[N/OL].(2022-01-20)[2023-2-28].[http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c\\_1310432517.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c_1310432517.htm). [National Energy Administration. The Installed Capacity of Photovoltaic Power Generation in China has Exceeded 300 Million Kilowatts. Distributed Development has Become a New Bright Spot[N/OL]. (2022-01-20) [2023-02-28]. [http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c\\_1310432517.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c_1310432517.htm).]
- [4] 户用光伏建设运行百问百答(1)[J].大众用电,2022,37(10):10-12. [Hundred questions and answers for household photovoltaic construction and operation(1)[J]. Popular Utilization of Electricity, 2022, 37(10): 10-12.]
- [5] Domínguez A, Geyer R. Photovoltaic waste assessment in Mexico [J]. Resources Conservation & Recycling, 2017, 127: 29-41.
- [6] Domínguez A, Geyer R. Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America[J]. Renewable Energy, 2019, 133: 1188-1200.
- [7] IRENA, IEA-PVPS. End-of-Life Management, Solar Photovoltaic Panels[R]. Bonn: International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016.
- [8] 刘波,李佳怡,丁云集,等.报废光伏板回收利用的研究现状[J].稀有金属,2019,43(9):987-996. [Liu B, Li J Y, Ding Y J, et al. Recycling status of scrap photovoltaic panels[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(9): 987-996.]
- [9] EC. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)(recast)[R]. Brussels: European Community, 2012.
- [10] Paiano A. Photovoltaic waste assessment in Italy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 99-112.
- [11] 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.
- [12] Mahmoudi S, Huda N, Behnia M, et al. Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146: 192–205.
- [13] Ren K, Tang X, Hook M. Evaluating metal constraints for photovoltaics: Perspectives from China's PV development[J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116148.
- [14] Lin M, Wu Y S, Qin B J, et al. Response to the upcoming emerging waste: Necessity and feasibility analysis of photovoltaic waste recovery in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(23): 17396–17409.
- [15] Liu C J, Zhang Q, Liu L X. Estimation of photovoltaic waste spatio-temporal distribution by 2060 in the context of carbon neutrality[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(12): 34840–34855.
- [16] Wang C, Feng K S, Liu X, et al. Looming challenge of photovoltaic waste under China's solar ambition: A spatial-temporal assessment[J]. *Applied Energy*, 2023, 30(12): 34830–34855.
- [17] 张钦, 傅丽芝. 中国光伏组件报废量的预测[J]. *环境工程*, 2020, 38(6): 214–220. [Zhang Q, Fu L Z. Research on photovoltaic modules waste prediction in China[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 214–220.]
- [18] 秦磊. 光伏产业逆向物流运作模式及回收量模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019. [Qin L. Research on Reverse Logistics Operation Mode and Recovery Model of Photovoltaic Industry[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.]
- [19] 冯斐, 冯学钢, 侯经川, 等. 经济增长、区域环境污染与环境规制有效性: 基于京津冀地区的实证分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(12): 2341–2353. [Feng F, Feng X G, Hou J C, et al. Effectiveness of regional environmental regulation, economic growth and environmental pollution: An empirical study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Resources Science*, 2020, 42(12): 2341–2353.]
- [20] 国家能源局. 全国太阳辐射总量等级和区域分布表[R/OL]. (2014-08-03) [2023-02-28]. [http://www.nea.gov.cn/2014-08/03/c\\_133617073.htm](http://www.nea.gov.cn/2014-08/03/c_133617073.htm). [National Energy Administration. National Total Solar Radiation Level and Regional Distribution Table[R/OL]. (2014-08-03) [2023-02-28]. [http://www.nea.gov.cn/2014-08/03/c\\_133617073.htm](http://www.nea.gov.cn/2014-08/03/c_133617073.htm).]
- [21] 北京市人民政府. 北京市“十四五”时期能源发展规划[R/OL]. (2022-04-02) [2023-02-28]. <http://heic.org.cn/upload/file/20220402/16488818826862547.pdf>. [Beijing Municipal People's Government. Beijing Energy Development Plan for the 14th Five-Year Plan[R/OL]. (2022-04-02) [2023-02-28]. <http://heic.org.cn/upload/file/20220402/16488818826862547.pdf>.]
- [22] 天津市发改委. 天津市可再生能源发展“十四五”规划[R/OL]. (2022-01-27) [2023-02-28]. [https://fzgg.tj.gov.cn/zwgk\\_47325/zcfg\\_47338/zcwjx/fgwj/202201/t20220127\\_5791174.html](https://fzgg.tj.gov.cn/zwgk_47325/zcfg_47338/zcwjx/fgwj/202201/t20220127_5791174.html). [Tianjin Development and Reform Commission. Tianjin Renewable Energy Development “14th Five-Year Plan”[R/OL]. (2022-01-27) [2023-02-28]. [https://fzgg.tj.gov.cn/zwgk\\_47325/zcfg\\_47338/zcwjx/fgwj/202201/t20220127\\_5791174.html](https://fzgg.tj.gov.cn/zwgk_47325/zcfg_47338/zcwjx/fgwj/202201/t20220127_5791174.html).]
- [23] 河北省发改委. 河北省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[R/OL]. (2021-06-11) [2023-02-28]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzlgzh/dfzgh/202106/t20210611\\_1283092.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzlgzh/dfzgh/202106/t20210611_1283092.html?code=&state=123). [Hebei Provincial Development and Reform Commission. The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of Hebei Province and the Outline of Long-term Objectives for 2035[R/OL]. (2021-06-11) [2023-02-28]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzlgzh/dfzgh/202106/t20210611\\_1283092.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzlgzh/dfzgh/202106/t20210611_1283092.html?code=&state=123).]
- [24] 国家能源局综合司. 关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知[R/OL]. (2021-09-15) [2023-02-28]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content\\_5637323.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content_5637323.htm). [Comprehensive Department of the National Energy Administration. Notice on the Announcement of the Pilot List of Roof Distributed Photovoltaic Development in the Whole County (City, District)[R/OL]. (2021-09-15) [2023-02-28]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content\\_5637323.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content_5637323.htm).]
- [25] 张珍珍, 吕清泉, 张健美. “双碳”目标下分布式光伏发电技术的研究进展及展望[J]. *太阳能*, 2023, (1): 17–21. [Zhang Z Z, Lv Q Q, Zhang J M. Research progress and prospect of distributed photovoltaic power generation technology under the goal of “dual carbon”[J]. *Solar Energy*, 2023, (1): 17–21.]
- [26] 索比光伏网. 分布式光伏发电设备和电站主要设备的技术要求[R/OL]. (2021-07-06) [2023-02-28]. <https://news.solarbe.com/202107/06/341217.html>. [Sobi Photovoltaic Network. Technical Requirements for Distributed Photovoltaic Power Generation Equipment and Main Equipment of Power Stations[R/OL]. (2021-07-06) [2023-02-28]. <https://news.solarbe.com/202107/06/341217.html>.]
- [27] 李历经, 李伯含, 陈从喜. 区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测: 以北京为例[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 567–576. [Li L Q, Li B H, Chen C X. Forecasting prospective potential of the secondary resources in electronic waste at the regional level: Evidence from Beijing[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 567–576.]
- [28] Rogers E M. *Diffusion of Innovations*[M]. New York: Free Press, 2003.
- [29] Bass F M. A new product growth model for consumer durables[J]. *Management Science*, 1969, 15(5): 215–227.
- [30] Meade N, Islam T. Modelling and forecasting the diffusion of innovation—a 25-year review[J]. *International Journal of Forecasting*, 2006, 22(3): 519–545.

2023年10月

- [31] 李博, 杨建新, 吕彬, 等. 废弃电器电子产品产生量估算: 方法综述与选择策略[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 7965–7973. [Li B, Yang J X, Lv B, et al. Generation estimation of waste electrical and electronic equipment: Methods review and selection strategy [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 7965–7973.]
- [32] Sinha P, Wild-Scholten M. Life Cycle Assessment of Utility-Scale CdTe PV Balance of System[C]. Valencia: 27th EU PVSEC, 2012.
- [33] 国际能源署. 中国能源体系碳中和路线图[R]. 北京: 国际能源署, 2021. [International Energy Agency. China's Energy System Carbon Neutrality Road Map[R]. Beijing: International Energy Agency, 2021.]
- [34] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望[R/OL]. (2021-03-18) [2023-02-28]. <https://www.nengapp.com/zixun/17115f0a685c491cfe2f86e7302210b0>. [Global Energy Internet Development Cooperation Organization. Research on China's Energy and Power Development Plan for 2030 and Outlook for 2060 [R/OL]. (2021-03-18) [2023-02-28]. <https://www.nengapp.com/zixun/17115f0a685c491cfe2f86e7302210b0>.]
- [35] 李波, 赵建红, 赵鑫波, 等. 新型太阳能电池的研究进展及发展趋势[J]. 能源研究与信息, 2021, 37(1): 32–39. [Li B, Zhao J B, Zhao X B, et al. Research progress and development trend of new type of solar cells[J]. Energy Research and Information, 2021, 37(1): 32–39.]
- [36] 中国光伏协会 CIPA. 2021 年薄膜电池产量增长, 但市场占有率仍有所下滑[R]. 北京: 2021–2022 年中国光伏产业年度报告, 2022. [China Photovoltaic Association CIPA. Thin-film Battery Production Growth in 2021, But the Market Share Still Declined [R]. Beijing: China Photovoltaic Industry Annual Report 2021–2022, 2022.]
- [37] Yu H F, Tong X. Producer vs. local government: The locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in Zhejiang province[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105484.
- [38] 王世江. 当代多晶硅产业发展概论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015. [Wang S J. Introduction to the Development of Contemporary Polysilicon Industry[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2015.]
- [39] 王世江, 江华, 金艳梅, 等. 中国光伏产业发展路线图(2017 年版) [M]. 北京: 中国光伏行业协会, 2018. [Wang S J, Jiang H, Jin Y M, et al. Roadmap for the Development of China's Photovoltaic Industry (2017 Edition)[M]. Beijing: China Photovoltaic Industry Association, 2018.]
- [40] 汪鹏, 王翹楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属-低碳能源关联研究综述及其启示[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 669–681. [Wang P, Wang Q C, Han R R, et al. Nexus between low-carbon energy and critical metals: Literature review and implications[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 669–681.]

# Prediction of scrap volume and recyclable resource potential of distributed photovoltaic power generation equipment in the Beijing–Tianjin–Hebei region

WANG Ying<sup>1</sup>, CHEN Liding<sup>2</sup>, SHI Xiaoqing<sup>2</sup>

(1. Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing, 100085, China)

**Abstract:** [Objective] Photovoltaic (PV) power generation is an important starting point for China to implement the clean energy transition towards achieving the dual carbon goals, but its large installed capacity has brought new e-waste management challenges, and research on future e-waste generation and resource recovery potential is of great importance for the scientific and effective management of scraps. [Methods] Based on the distributed PV data of the National Energy Administration from 2013 to 2021, this study used the market supply A model, logistic model, and resource estimation model to predict the scrap volume and recoverable resource volume of distributed PV power generation equipment in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2022 to 2060. [Results] The results show that the cumulative scrap volume of distributed PV modules in Beijing, Tianjin, and Hebei could reach 4.8984 million kW, 3.930 million kW, and 83.3778 million kW respectively from 2022 to 2060. From 2022 to 2060, the cumulative total amount of recyclable materials in scrap photovoltaic modules in the Beijing-Tianjin-Hebei region will be 2.9737 million tons, and the cumulative total amount of recyclable materials in scrap photovoltaic installation systems will be 76500 to 100100 tons. Among them, other materials in the photovoltaic modules amount to 2.7926 million tons, basic metal 0.1395 million tons, key metal 37500 tons, precious metal silver 3900 tons, special metal 200 tons, and toxic metal 1100 tons; The weight of aluminum, copper, steel, and zinc of the photovoltaic installation systems is 6700-8800 tons, 12800-16800 tons, 56800-74400 tons, and 130-170 tons, respectively. [Conclusion] In the Beijing-Tianjin-Hebei region, there is a significant presence of distributed photovoltaic waste, requiring prompt and efficient management strategies. Additionally, the wide variety of materials found in photovoltaic waste presents substantial opportunities for resource recycling. A well-designed recycling system is indispensable.

**Key words:** Beijing- Tianjin- Hebei region; distributed photovoltaic power generation facilities; model A of market supply; logistic model; resource estimation model; scrap volume; recyclable resource potential