

# 安徽省报废光伏组件逆向物流网络规划

吴佳佳

上海工程技术大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年6月6日; 录用日期: 2023年8月4日; 发布日期: 2023年8月10日

## 摘要

报废组件逆向物流网络的最优布局问题是实现报废光伏组件资源化回收的关键。为设计符合未来报废光伏数量的回收网络, 提出了一种基于报废量预测并以成本最小化为目标的混合整数规划模型, 使用lingo软件进行求解, 得到节点选址和各节点间流量分配的布局优化方案。以安徽省为例, 建立报废光伏组件逆向物流网络, 从而验证了模型的有效性。结果表明, 回收中心和拆解处理中心的选址为合肥、蚌埠、淮南、芜湖、铜陵; 再制造中心的选址是阳光新能源、安徽大恒能源、安徽天大; 垃圾处理中心的选址为安徽浩悦、光大绿色、马鞍山澳新、铜陵市正源。该模型符合第三方回收商的效益目标, 实现了报废光伏组件逆向物流网络设施选址和节点流量分配的成本最优化。

## 关键词

光伏组件, 报废量预测, 逆向物流网络设计, Lingo

# Scrapped PV Module Reverse Logistics Network Planning of Anhui

Jiajia Wu

School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 4<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 10<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The optimal layout of the reverse logistics network of scrapped modules is the key to realizing the resource recovery of end-of-life PV modules. In order to design a recovery network that meets the future scrap PV quantity, a hybrid integer programming model based on scrap quantity prediction and cost minimization is proposed, and the layout optimization scheme of node site selection and traffic distribution between nodes is obtained by using lingo software. Taking Anhui Province as an example, a reverse logistics network for scrapped PV modules was established, which verified

the effectiveness of the model. The results showed that the sites of the recycling center and the dismantling and processing center were Hefei, Bengbu, Huainan, Wuhu and Tongling. The sites of the remanufacturing center are Sunshine New Energy, Anhui Daheng Energy, Anhui Tianda; The garbage treatment center is located in Anhui Haoyue, Everbright Green, Maanshan Aonz, and Tongling Zhengyuan. This model meets the benefit objectives of third-party recyclers and optimizes the cost of facility siting and node traffic allocation of end-of-life PV modules reverse logistics network.

## Keywords

PV Module, Scrap Forecasting, Reverse Logistics Network, Lingo

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

据国际可再生能源机构预测,从 2025 年起,我国开始产生大批量的“退役”光伏组件,在 2060 年前,报废量将会以每年 30% 的速度增长。报废组件的爆发式增长需要完善的回收管理体系。然而目前我国报废光伏组件回收缺乏废物处置和综合利用设施以及健全的区域性资源回收利用体系,回收企业鱼龙混杂,大部分回收小作坊简单拆解出可利用物后,将其他部分则和生活垃圾掺杂在一起焚烧,对环境造成了极大污染,违背了清洁能源的初衷。

目前,已有一些关于逆向物流网络设计的研究。黄敏[1]在质量和回收率不确定的情况下建立了以成本最小化为目标的退役机械产品的回收网络模型,解决了节点的最优选址问题。王燕[2]用 LINGO 求解以费用最低为目标的报废汽车逆向物流网络模型,同时解决了节点选址和流量分配问题。徐娟等人[3]构建自营企业对可循环快递箱的逆向物流回收成本最小化模型,解决回收过程中的选址规划问题。在医疗领域,Elham [4]为了最小化与逆向物流相关的潜在费用,建立了一种综合直接物流和逆向物流的疫苗废物管理物流网络模型模型,并使用杜鹃优化算法进行求解。

以上研究的对象主要是废弃机械、医疗废弃物和电子废弃物等,虽然有小部分研究[5]涉及到报废光伏回收中心选址的问题,却很少有关于废弃光伏组件逆向物流网络的全面研究。因此,本文考虑到报废光伏组件与其他电子废弃物的不同回收特点,以安徽省为区域示例,建立包括回收点、拆解处理中心、再制造工厂以及垃圾处理点在内的第三方逆向物流网络系统,在光伏组件报废量预测的基础上建立以成本最小化为目标函数的混合整数规划模型,并借助 LINGO 软件确定节点选址和流量分配,期望为全国报废光伏组件回收基础设施建设规划提供一定的方向。

## 2. 光伏组件报废量预测

### 2.1. 报废量计算公式

市场供给 A 模型在电子废弃物报废量预测方面有着广泛应用。阮久莉[6]和宋岷洧等[7]分别利用市场供给 A 模型预测未来我国打印机和动力电池的报废量。张钦等[8]在利用威布尔分布的基础上,使用神经网络模型和市场供给 A 模型来预测我国光伏报废量。借鉴以上文献,本文采用市场供给 A 模型预测报废光伏组件量。模型公式为:

$$Q_w = \sum_i S_i P_i \quad (1)$$

式中： $S_i$ 为从该年算起*i*年前装机量； $P_i$ 为寿命为*i*年的所占百分比。

## 2.2. 威布尔分布

威布尔分布函数是由 Weibull 提出的一种表示运行时间和其他因素对机器设备使用寿命影响的一种统计学模型。2013 年，太阳能美国规范和标准委员会证实了威布尔函数在预估光伏寿命分布方面的实用性，Kumar 等人[9]也通过数据和实例演示了威布尔函数和光伏寿命的拟合效果。之后，Zhao 等人[10]通过测试数据和加速度模型对紫外线诱导光伏退化的规律进行了建模，其模型与威布尔分布吻合良好。光伏组件的威布尔分布的概率密度函数为[8]：

$$f(t) = \frac{\alpha}{T} \left( \frac{t}{T} \right)^{\alpha-1} e^{-\left( \frac{t}{T} \right)^{\alpha}} \quad (2)$$

其中： $\alpha$ 为形状参数， $T$ 为光伏组件的特征寿命

在 IRENA 2016 报告中，国际可再生能源机构将光伏故障原因分为常规损失( $\alpha = 5.3759$ )和早期损失( $\alpha = 2.4928$ )，认为光伏寿命普遍在 25 到 30 年，而后依据光伏寿命周期内的故障概率(威布尔分布)估计全球光伏报废量。参考上述研究，本文利用威布尔函数计算光伏组件寿命的分布概率，分布概率图如图 1 所示。

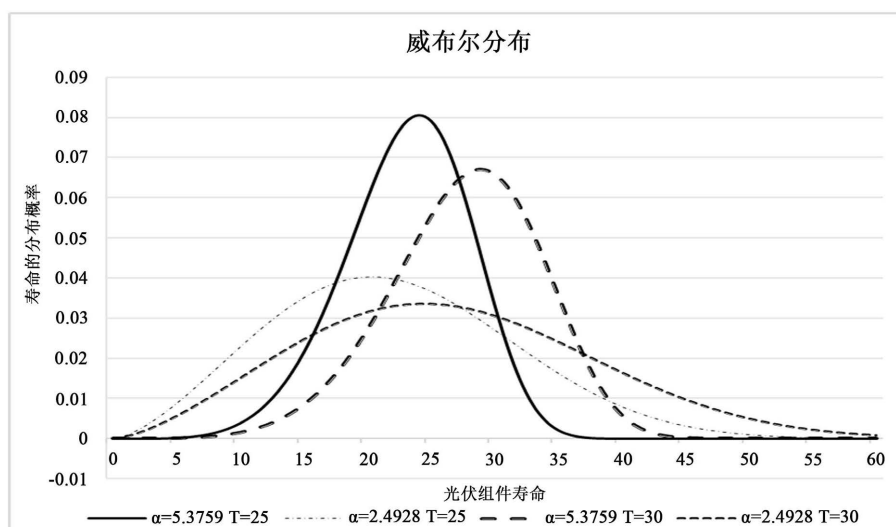


Figure 1. Weibull distribution probability plot

图 1. 威布尔分布概率图

## 2.3. 安徽省光伏组件报废量预测

### 2.3.1. 新增光伏量预测

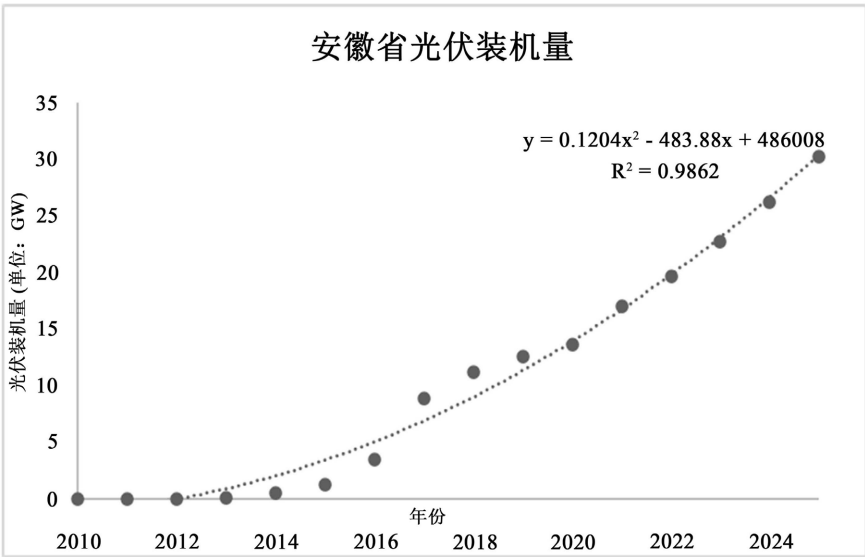
Excel 作为基础 Office 中的一部分，操作简单易学，数据分析功能强大。陆子恒[11]利用 Excel 对白化病基因发病频率进行函数拟合，以此来预测未来中国白化病发病人数。孙晓蕾[12]通过对断面高锰酸盐指数监测数据进行线性回归拟合，并将拟合后的公式可用于实际监测活动。利用 Excel 对数据进行线性回归分析实现拟合，可以节省学习编程的时间成本，使用便捷，与实际数据的误差也在可接受的范围内。因此，本文利用 Excel 的数据拟合功能对 2010~2021 年安徽省实际光伏装机量和“十四五”能源规划装

机量(每年 15.4%增长量)进行线性回归拟合, 装机量如表 1 所示, 拟合结果如图 2 所示, 拟合后相关系数为 0.9862, 相关度高, 然后利用拟合函数对 2026~2040 年光伏装机量进行预测, 结果如表 2 所示。

**Table 1.** Installed capacity of photovoltaics in Anhui Province from 2010 to 2021 and installed capacity (GW) in the “Twelfth Five-Year Plan” from 2022 to 2025

**表 1.** 安徽省 2010~2021 年光伏装机量和 2022~2025 年 “十二五” 规划装机量(GW)

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
0.002	0.026	0.05	0.15	0.5	1.3	3.45	8.88	11.18	12.538	13.696	17.068	19.7	22.7297	26.2301	30.2695



**Figure 2.** Fitting diagram of installed capacity of photovoltaic modules  
**图 2.** 光伏组件装机量拟合图

**Table 2.** Forecast PV installed capacity (GW) in Anhui Province from 2026 to 2040

**表 2.** 安徽省 2026~2040 年预测光伏装机量(GW)

(a)							
2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
34.4609	38.7268	43.2335	47.981	52.9693	58.1984	63.6683	
(b)							
2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
69.379	75.3305	81.5528	87.9559	94.6298	101.5445	108.7	116.0963

2.3.2. 报废量计算

根据文献[13], 要预测报废光伏组件重量, 必须知道新增装机容量、组件重量和不同组件技术的市场占比及额定功率。相关参数如表 3 所示, 计算结果如表 4 所示, 组件重量计算公式如下:

$$\text{组件重量} = \frac{\text{新增装机容量}(\text{W}) * \text{组件重量}(\text{kg/m}^2) * \text{市场占比}}{\text{组件额定功率}(\text{wp/m}^2)} \tag{3}$$

**Table 3.** Information related to the calculation of the weight of scrapped photovoltaic modules**表 3.** 报废光伏组件重量计算相关资料

组件技术	功率(WP/m <sup>2</sup> ) [8]	重量(kg/m <sup>2</sup> )	市场占比
c-si	164.82	15.43	91.575%
薄膜组件	97.52	14.10	8.425%

**Table 4.** Estimated scrap weight of PV modules from 2026 to 2040 (10,000 tons)**表 4.** 2026~2040 年预估光伏组件报废重量(万吨)

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
$\alpha = 5.3759$ $T = 25$	0.37	0.57	0.86	1.25	1.78	2.47	3.34	4.42	5.72	7.27	9.06	11.07	13.27	15.62	18.06
$\alpha = 2.4928$ $T = 25$	3.29	4.05	4.9	5.84	6.89	8.04	9.28	10.62	12.06	13.58	15.19	16.88	18.66	20.5	22.41
$\alpha = 5.3759$ $T = 30$	0.137	0.26	0.33	0.48	0.68	0.96	1.31	1.76	2.32	3.01	3.85	4.86	6.03	7.39	8.94
$\alpha = 2.4928$ $T = 30$	2.15	2.65	3.22	3.87	4.59	5.4	6.28	7.24	8.28	9.41	10.62	11.9	13.27	14.71	16.23

### 3. 模型构建

#### 3.1. 问题描述

在设计逆向物流网络中, 第三方回收商回收产生的废弃组件送往回收中心, 经过分类整理后送往拆解处理中心分离可回收物和废料, 可回收物经过下游企业(本文假设仅限于光伏制造商)形成高价值材料后再次进入市场, 废料被送往垃圾填埋中心。

#### 3.2. 问题假设

- 1) 报废区的位置和数量、可回收材料比例已知;
- 2) 回收中心、拆解中心、再制造工厂和填埋场的候选地位置、容量已知;
- 3) 在预测期间, 各设施的固定成本、单位运营成本和运输成本等数值不变;
- 4) 各相同设施的固定成本和单位运营成本相同;
- 5) 报废的光伏组件回收率为 100%;
- 6) 严格按照设计的网络流转, 各相同设施之间不流通;
- 7) 在运输过程中, 材料没有损失;
- 8) 均采用公路运输且路况良好, 无堵车等特殊状况, 运输车辆规格相同;

#### 3.3. 符号定义

- 1) 索引集

$B = \{b | b = 1, 2, \dots, b\}$  光伏报废区地点集合

$R = \{r | r = 1, 2, \dots, r\}$  光伏回收中心地点集合

$C = \{c | c = 1, 2, \dots, c\}$  光伏拆解处理中心地点集合

$M = \{m | m = 1, 2, \dots, m\}$  再制造工厂地点集合

$W = \{w | w = 1, 2, \dots, w\}$  垃圾处理中心地点集合

## 2) 决策变量

$S_{br}$ : 从报废中心  $B$  到回收中心  $R$  的运输量

$S_{rc}$ : 从回收中心  $R$  到光伏拆解中心  $C$  的运输量

$S_{cm}$ : 从拆解处理中心  $C$  到光伏再制造工厂  $M$  的运输量

$S_{cw}$ : 从拆解处理中心  $C$  到垃圾处理中心  $W$  的运输量

$S_{rm}$ : 从回收中心  $R$  到再制造工厂  $M$  的运输量

$$X_r, X_c, X_m, X_w = \begin{cases} 0 & (\text{不在此处建立}) \\ 1 & (\text{在此处建立}) \end{cases}$$

## 3) 参数

$EC_r$ : 光伏回收中心建设成本

$EC_c$ : 光伏拆解处理中心建设成本

$OC_r$ : 光伏回收中心单位运营成本

$OC_c$ : 光伏拆解中心单位运营成本

$OC_w$ : 垃圾处理中心单位运营成本

$RC_b, DC_b$ : 支付的单位回收成本和拆卸成本

$L_{br}$ : 从报废中心  $B$  到回收中心  $R$  的运输距离

$L_{rc}$ : 从回收中心  $R$  到光伏拆解中心  $C$  的运输距离

$L_{cm}$ : 从拆解处理中心  $C$  到光伏再制造工厂  $M$  的运输距离

$L_{cw}$ : 从拆解处理中心  $C$  到垃圾处理中心  $W$  的运输距离

$U_{br}$ : 从报废中心  $B$  到回收中心  $R$  的单位运输成本

$U_{rc}$ : 从回收中心  $R$  到光伏拆解中心  $C$  的单位运输成本

$U_{cm}$ : 从拆解处理中心  $C$  到光伏再制造工厂  $M$  的单位运输成本

$U_{cw}$ : 从拆解处理中心  $C$  到垃圾处理中心  $W$  的单位运输成本

$\varepsilon_b$ : 从报废区  $B$  回收的光伏数量

$MC_r$ :  $R$  光伏回收中心容量上限

$MC_c$ :  $C$  光伏拆解中心的容量上限

$LC_r$ :  $R$  光伏回收中心的容量下限

$LC_c$ :  $C$  光伏拆解中心的容量下限

## 3.4. 模型

## 3.4.1. 目标函数

TC (总成本) = DC (现场拆卸成本) + HC (回收成本) + FC (设施建设成本) + YC (设施运营成本) + SC (运输成本)

其中:

$$DC = \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R DC_b S_{br}$$

$$HC = \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R RC_b S_{br}$$

$$FC = \sum_{r=1}^R EC_r X_r + \sum_{c=1}^C EC_c X_c$$

$$YC = \sum_{r=1}^R \sum_{b=1}^B OC_r S_{br} + \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C OC_c S_{rc} + \sum_{w=1}^W \sum_{c=1}^C OC_w S_{cw}$$

$$SC = \sum_{r=1}^R \sum_{b=1}^B U_{br} L_{br} S_{br} + \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C U_{rc} L_{rc} S_{rc} + \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C U_{cm} L_{cm} S_{cm} + \sum_{w=1}^W \sum_{c=1}^C U_{cw} L_{cw} S_{cw}$$

### 3.4.2. 约束条件

$$\sum_{r=1}^R S_{br} = \varepsilon_b \quad (\text{各个回收站 } R \text{ 从报废区域 } B \text{ 处回收的光伏报废量} = \text{报废区域 } B \text{ 产生的报废量})$$

$$\sum_{c=1}^C S_{rc} = \sum_{b=1}^B S_{br} \quad (\text{回收站 } R \text{ 送往各拆解中心的数量} = \text{回收站 } R \text{ 从各报废区域回收的光伏报废量})$$

$$\sum_{m=1}^M S_{cm} = (1-\alpha) * \sum_{r=1}^R S_{rc} \quad (\text{拆解中心 } C \text{ 送往各再制造工厂的数量} = \text{各回收站送往拆解中心 } C \text{ 的数量} * \text{可用料比例})$$

$$\sum_{w=1}^W S_{cw} = \alpha * \sum_{r=1}^R S_{rc} \quad (\text{拆解中心 } C \text{ 送往各垃圾处理中心的数量} = \text{各回收站送往拆解中心 } C \text{ 的数量} * \text{不可用料比例})$$

$$X_r * LC_r \leq \sum_{b=1}^B S_{br} \leq MC_r * X_r$$

$$X_c * LC_c \leq \sum_{r=1}^R S_{rc} \leq MC_c * X_c$$

## 4. 安徽省报废光伏组件逆向物流网络设计

### 4.1. 网络节点分布

1) 报废区：随着光伏在建筑、交通等领域的融合发展，叠加户用的应用规模，屋顶分布式光伏将加速发展，预计未来分布式光伏电站占比也将提升，成为未来的发展主流。因此，本文将报废区定位于安徽省内 16 个市的中心区域。

2) 回收中心、拆解处理中心：为了能更及时地应对大量的报废光伏，同时也考虑到过度建设的问题，本研究根据预测的各市光伏报废量，考虑选择距离报废区 5 公里的地区作为回收中心备选点，距离回收中心 5 公里的区域作为拆解处理中心的备选点。

3) 光伏组件再制造工厂：中国光伏行业协会代表着我国光伏行业的骨干力量，协会会员的总生产量占据了我国光伏组件制造产业的绝大部分，因此中国光伏行业协会的会员企业在光伏组件制造领域具有广泛代表性[14]。本文对协会的 581 名会员进行了地域和业务范围的筛选，共选出 8 家企业作为安徽省报废光伏组件逆向物流网络中再制造中心的备选点，具体信息如表 5 所示。

**Table 5.** Remanufacturing center alternative points

**表 5.** 再制造中心备选点

企业名称	地址
阳光新能源开发股份有限公司	安徽省合肥市高新区天湖路 2 号
安徽英发睿能科技股份有限公司	安徽省滁州市纬三路 25 正北方向 40 米
安徽华晟新能源科技有限公司	安徽省宣城经济技术开发区科技园
通威太阳能(合肥)有限公司	安徽省合肥市高新技术产业开发区长宁大道 888 号
安徽大恒能源科技有限公司	安徽省合肥市天河路 358 号



Continued

芜湖贝斯特新能源开发有限公司	安徽省芜湖市三山区三山工业园区
安徽天大新能源有限公司	安徽省滁州市天长市千秋大道 988 号
安徽元太光伏科技有限公司	安徽省滁州市定远县定城镇经济开发区九梓路 99 号

4) 垃圾填埋场：光伏组件的组成材料包括锌、硒和镉等有害金属，报废组件回收废料中仍会含有这些物质。我国为加强对危险废物的处置管理，对危险废物收集、利用、处置活动的污染防治实行许可管理，建立了危险废物许可证制度。本文对《安徽省行政审批危险废物经营许可证》列示的企业按照许可经营时间和业务范围进行筛选，共筛选出 10 家企业作为垃圾处理中心的备选点，具体信息如表 6 所示：

**Table 6.** Alternative sites for garbage disposal centres  
**表 6.** 垃圾处理中心备选点

名称	地址
安徽浩悦环境科技有限责任公司	安徽省合肥市吴山镇高速公路下道口南 500 米处正南方向 40 米 (填埋)
宿州海创环保科技有限公司	安徽省宿州市埇桥区曹村镇(宿州海螺院内)
阜阳中电联环保科技有限公司	安徽省阜阳市颍东区插花镇插袁路 8 号
安徽东华通源生态科技有限公司	淮南市潘集区平圩镇环厂路西侧(填埋)
光大绿色环保固废处置(滁州)有限公司	安徽省滁州市定远盐化工业园管委会
安徽省创美环保科技有限公司	安徽省六安市霍邱经济开发区环山村
马鞍山澳新环保科技有限公司	安徽省马鞍山市雨山区向山镇陶村村
宁国海创环保科技有限公司	安徽省宁国市港口镇宁国水泥厂厂内
铜陵市正源环境工程科技有限公司	铜陵市义安区天门镇西垅村郎家冲(填埋)
安庆京环绿色环境固废综合处置有限公司	安徽省安庆市大观区山口乡联胜村(填埋)

## 4.2. Lingo 求解

### 4.2.1. 相关数据

#### 1) 安徽省各市报废量

根据《安徽统计年鉴(2010~2021)》计算 2010~2021 人口分布比例的平均值，结果如表 7 所示，利用  $\alpha = 5.3759$ 、 $T = 25$  情况下的 2040 年预测报废量和平均人口分布比例将光伏装机容量分摊到各市，由此预测出 2040 年安徽省各市光伏报废量情况，如表 8 所示。

**Table 7.** Average population distribution ratio of Anhui Province from 2010 to 2021  
**表 7.** 2010~2021 年安徽省人口分布比例平均值

合肥	淮北	亳州	宿州	蚌埠	阜阳	淮南	滁州	六安	马鞍山	芜湖	宣城	铜陵	池州	安庆	黄山
0.13	0.04	0.08	0.09	0.05	0.13	0.05	0.07	0.08	0.04	0.06	0.04	0.02	0.02	0.07	0.03

**Table 8.** PV scrapping forecast by city in 2040 (10,000 tons)  
**表 8.** 2040 年各市光伏报废预测(万吨)

合肥	淮北	亳州	宿州	蚌埠	阜阳	淮南	滁州	六安	马鞍山	芜湖	宣城	铜陵	池州	安庆	黄山
2.418	0.7224	1.4448	1.6254	0.903	2.3478	0.903	1.2642	1.4448	0.7224	1.0836	0.7224	0.3612	0.3612	1.2642	0.5418



## 2) 各节点参数

目前,我国有关建立报废光伏组件回收网络的成功案例较少,也没有公开资料能提供有关回收网络节点运营成本和容量的数据。但根据欧盟在 2012 年推出的 WEEE 指令,将光伏组件纳入了报废电子电器设备的回收法规管理范围之中,故本研究根据国内外学者有关报废电子电器回收逆向物流网络建设数据和有关光伏组件回收成本效益的研究作出假设如表 9 所示。

**Table 9.** Parameter settings for each node

**表 9.** 各节点参数设置

	固定成本 [15]	处理成本 (单位: 元/吨)	容量
回收中心	75 万	1811 [16]	40,000 吨/年
拆解处理中心	300 万	9729 [17] [18]	40,000 吨/年
再制造中心	-	不属于第三方 回收商成本	-
垃圾处理中心	-	2000 [19]	-

## 3) 其他相关成本

据了解, PV Cycle 的组件回收价格仅约 0.2 元/瓦。相比之下,我国组件回收价格偏高,回收价格大概为 0.5~0.6 元/瓦,具体还要看组件的情况再确定。而且光伏组件的拆卸具备一定的技术含量,需要专业人员前往报废区完成,构成回收网络的拆卸成本。一般情况下,集中式发电站的拆卸成本为 0.2 元/瓦,小型分布式为 0.4~0.6 元/瓦。据此,本研究作出假设如表 10 所示:

**Table 10.** Other related costs

**表 10.** 其他相关成本

项目	成本
单位运输成本	0.70 元/吨*公里[20]
单位回收成本 + 单位拆卸成本	1.1 元/W [21] [22]

## 4.2.2. 求解结果

LINGO 运算编程为:

model:

sets:

Scrap/1..16/:q;

recycle/1..16/:z;

dismantle/1..16/:s;

factory/1..8/:t;

waste/1..10/:v;

Link1(Scrap,recycle):E,P,I;

Link2(recycle,dismantle):A,O,J;

Link3(dismantle,factory):D,U,K;

```
Link4(dismantle,waste):F,X,L;
endsets
data:
...
min=total cost;
@for(节点:@sum(节点: 节点间流量)<=容量约束)! 容量约束和节点间流量的约束;
0-1 约束:
@for(recycle:@bin(z));
@for(dismantle:@bin(s));
@for(factory:@bin(t));
@for(waste:@bin(v));
end
```

利用 LINGO18.0 软件求解模型，模型中变量总数为 850 个，在运行 0.96 秒、迭代 4345 次后求出报废光伏组件回收物流网络的最小总成本为 41.42108 亿元，模型最优解为：

- 1)  $Z(1)$ 、 $Z(5)$ 、 $Z(7)$ 、 $Z(11)$ 、 $Z(13) = 1$ ;
- 2)  $S(1)$ 、 $S(5)$ 、 $S(7)$ 、 $S(11)$ 、 $S(13) = 1$ ;
- 3)  $T(1)$ 、 $T(2)$ 、 $T(3) = 1$
- 4)  $V(1)$ 、 $V(2)$ 、 $V(3) = 1$

从上述求解结果可以得到报废光伏组件逆向物流网络中各设施选址和节点间的流量，选址结果如下，节点间的流量分配结果如表 11~14 所示：

- 1) 回收中心：合肥、蚌埠、淮南、芜湖、铜陵；
- 2) 拆解处理中心：合肥、蚌埠、淮南、芜湖、铜陵；
- 3) 再制造中心：阳光新能源、安徽大恒能源、安徽天大；
- 4) 垃圾处理中心：安徽浩悦、光大绿色、马鞍山澳新、铜陵正源，节点间的流量见表 11：

**Table 11.** Node traffic from the scrapped area to the recycling center  
**表 11.** 报废区到回收中心的节点流量

	合肥	蚌埠	淮南	芜湖	铜陵
合肥	24,180				
淮北		7274			
亳州		7442	7006		
宿州		16,254			
蚌埠		9030			
阜阳			23,478		
淮南			9030		
滁州	1372			11,270	
六安	14,448				
马鞍山				7224	
芜湖				10,836	

## Continued

宣城	7224	
铜陵		3612
池州		3612
安庆		12,642
黄山		

**Table 12.** Node traffic from the recycling center to the disassembly and processing center

**表 12.** 回收中心到拆解处理中心节点流量

	合肥	蚌埠	淮南	芜湖	铜陵
合肥	40,000				
蚌埠		40,000			
淮南			39,514		
芜湖				40,000	
铜陵					21,838

**Table 13.** Node flow from dismantling center to remanufacturing center

**表 13.** 拆解中心到再制造中心节点流量

	合肥	蚌埠	淮南	芜湖	铜陵
阳光新能源	38,000				
安徽大恒能源				38,000	20,746
安徽天大		38,000	37538.3		

**Table 14.** Node traffic from dismantling center to garbage disposal center

**表 14.** 拆解中心到垃圾处理中心的节点流量

	合肥	蚌埠	淮南	芜湖	铜陵
安徽东华通源			1975.7		
光大绿色	2000	2000			
马鞍山澳新				2000	
铜陵市正源					1091.9

## 5. 结论

本研究预测了安徽省 2023~2040 年报废光伏组件量,从总体预算结果可以看出,在 2030 年以后安徽省光伏组件报废量增势明显,从 2035 年开始,增长趋势迅猛发展。到 2040 年,山东省最高光伏组件报废量达到了 22.41 万吨左右,报废光伏组件回收需求突出,光伏组件回收产业发展态势较好。而且回收报废光伏组件还能够有效节约资源,防止不可再生资源的过度开采,还能减轻有害金属对环境的负面影响。由此可见报废光伏组件逆向物流网络规划的必要性。

因此,本研究在报废量预测的基础上设计了以成本最小化为目标的安徽省报废光伏组件逆向物流网

络数学模型, 将搜集到的相关参数数据带入模型中并利用 LINGO18.0 软件进行求解, 得到了具体规划方案, 验证了模型的可行性和有效性。

目前, 报废光伏组件回收再利用进程仍存在着诸多阻碍, 从当前国内外对报废组件回收网络设计的研究来看, 要实现报废组件的最优化利用还有很长的路要走。例如报废量的预测和设施选址还会受到众多因素的影响, 这些因素在未来的研究中都要被考虑进来, 从而增强模型在实际建设中的应用。

## 参考文献

- [1] 黄敏. 代理商主导的退役工程机械产品再制造回收体系研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [2] 王燕. 上海市报废汽车逆向物流网络优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [3] 徐娟, 孙文霞. 可循环快递箱逆向物流网络选址规划[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5870-5874.
- [4] Shadkam, E. (2022) Cuckoo Optimization Algorithm in Reverse Logistics: A Network Design for COVID-19 Waste Management. *Waste Management & Research*, **40**, 458-469. <https://doi.org/10.1177/0734242X211003947>
- [5] Guo, Q. and Kluse, C. (2020) A Framework of Photovoltaics Recycling Facility Location Optimization. *Sustainable Production and Consumption*, **23**, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.04.003>
- [6] 阮久莉, 郭玉文, 刘景洋, 乔琦. 我国打印机报废量预测研究[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(5): 32-35.
- [7] 宋岷洵, 阮久莉. 基于不同模型的动力电池报废量预测比较[C]//《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(下册). 2019: 737-740.
- [8] 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. <https://doi.org/10.13205/j.hjgc.202006035>
- [9] Kumar, S. and Sarkar, B. (2013) Design for Reliability with Weibull Analysis for Photovoltaic Modules. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, **2**, 146-151.
- [10] Wu, Z., Lv, S., Song, H. and Yun, M. (2020) Statistical Modeling of UV-Induced PV Module Power Degradation Based on Acceleration Tests. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **10**, 144-149. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2950590>
- [11] 陆子恒. 利用 Python 语言和 Excel 函数拟合——以预测 2100 年中国白化病人口为例[J]. 中国新通信, 2018, 20(23): 225-226.
- [12] 孙晓蕾. 基于 Excel 的多元线性回归优化模型预测地表水高锰酸盐指数[J]. 东北水利水电, 2017, 35(4): 12-14+25.
- [13] Domínguez, A. and Geyer, R. (2017) Photovoltaic Waste Assessment in Mexico. *Resources Conservation & Recycling*, **127**, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.013>
- [14] CPIA. 中国光伏行业协会[EB/OL]. [http://www.chinapv.org.cn/association\\_profile.html](http://www.chinapv.org.cn/association_profile.html)
- [15] 傅丽芝. 我国光伏组件报废量预测及回收网络规划研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [16] Idiano, D., Michela, M. and Paolo, R. (2017) Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy*, **2017**, Article ID: 4184676. <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>
- [17] Deng, R., Chang, N.L., Ouyang, Z., et al. (2019) A Techno-Economic Review of Silicon Photovoltaic Module Recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **109**, 532-550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>
- [18] Islam, M.T., Nizami, M., Mahmoudi, S., et al. (2021) Reverse Logistics Network Design for Waste Solar Photovoltaic Panels: A Case Study of New South Wales Councils in Australia. *Waste Management & Research*, **39**, 386-395. <https://doi.org/10.1177/0734242X20962837>
- [19] 李绍庆. 危险废物处置有了标准[EB/OL]. <https://news.sina.com.cn/o/2010-06-01/060517590573s.shtml>, 2010-06-01.
- [20] 张志波. 关于光伏项目组件物流运输市场的价格分析[J]. 中国市场, 2019(24): 168-169.
- [21] 新浪财经. 光伏组件“报废潮”来袭回收标准亟待确立[EB/OL]. <https://finance.sina.com.cn/money/future/nyzx/2020-09-24/doc-iivhvpwy8594093.shtml>, 2020-09-24.
- [22] 问一问. 安装光伏人工费用[EB/OL]. <https://zhidao.baidu.com/question/1119147944682813739.html>