

# 光伏报废组件逆向物流回收网络规划研究

——以山东省为例

武嘉鑫, 吴鸿生, 赵艺茗, 张亚笃, 李丽杰, 孙 源

山东大学, 山东 威海

收稿日期: 2022年7月21日; 录用日期: 2022年8月23日; 发布日期: 2022年8月31日

## 摘 要

我国光伏行业迅速发展。光伏产业在助力我国碳达峰、碳中和的同时, 也产生了退役光伏产品造成环境污染的新问题。为应对将来会出现的光伏组件“报废潮”, 本研究建立了一个以逆向物流网络总成本最小化和碳排放量成本最小化为目标, 考虑客户区、回收中心、拆解处理中心、再制造中心以及废弃物处理机构的四层回收网络系统的混合整数规划模型(Mixed Integer Linear Program, MILP)来设计报废组件回收网络, 借助Gurobi软件求解最优解, 从而确定网络中的设施选址和各个节点的流量分配情况。最后, 我们以山东省为应用研究对象, 对山东省报废光伏组件回收网络进行规划设计, 确定网络选址及流量分配, 验证MILP模型的有效性, 并希望为其他城市建立报废组件回收网络提供参考。

## 关键词

逆向物流, 回收网络系统, 光伏报废组件, 低碳, 选址模型

# Research on the Planning of Reverse Logistics Recycling Network for Photovoltaic Scrap Modules

—A Study that Takes Shandong Province as an Example

Jiaxin Wu, Hongsheng Wu, Yiming Zhao, Yadu Zhang, Lijie Li, Yuan Sun

Shandong University, Weihai Shandong

Received: Jul. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2022; published: Aug. 31<sup>st</sup>, 2022

文章引用: 武嘉鑫, 吴鸿生, 赵艺茗, 张亚笃, 李丽杰, 孙源. 光伏报废组件逆向物流回收网络规划研究[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(3): 892-905. DOI: 10.12677/aep.2022.124112

## Abstract

China's photovoltaic industry has developed rapidly. While helping China's carbon peak and carbon neutrality, the photovoltaic industry has also created new problems of environmental pollution caused by decommissioned photovoltaic products. In order to cope with the future "end-of-life wave" of photovoltaic modules, this study established a Mixed Integer Linear Program model (MILP) to design a recycling network for end-of-life components. Consider that the model needs to match the reality, the model is based on a four-tier recycling network system that considers customer areas, recycling centers, dismantling centers, remanufacturing centers, and waste disposal agencies. This model aims to minimize the total cost of the reverse logistics network and minimize the cost of carbon emissions. We solve the optimal solution with the help of Gurobi software to determine the location of facilities in the network and the distribution of traffic to each node. Finally, taking Shandong Province as the application research object, we planned and designed the scrap photovoltaic module recycling network in Shandong Province, determined the network site selection and traffic distribution, verified the effectiveness of the MILP model. We hope that our research will provide a reference for other cities to establish end-of-life component recycling networks.

## Keywords

Reverse Logistics, Recycle Network Systems, PV Scrap Modules, Low Carbon, Location Model

Copyright © 2022 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

我国光伏行业迅速发展，在助力我国碳达峰、碳中和的同时，也产生了退役光伏产品造成环境污染的新问题。团队结合相关报告计算发现 2060 年中国光伏装机总量将达到 185 万兆瓦，将产生超 7 千万吨废弃物，光伏废弃物的增长形势异常严峻。光伏产品组件在正常使用且产品无质量问题的前提下，使用年限可达 25~30 年，但我国的光伏产品是在 2010 年之后才开始大幅度增长的，所以光伏产品还没有大批量报废，这就导致政府、企业和用户群体回收意识薄弱。但在数十年后，当出现大规模组件报废时，我们就会缺乏相应的应对措施。

国外学者针对这种废品回收提出了逆向物流的构想[1]，我国学者对该领域的探索相较于国外起步较晚，在 2006 年颁布的国家标准《物流术语》[2]中才对逆向物流进行了定义。在研究逆向物流网络规划的问题时，国外学者常从物流设施的数量与位置的角度来进行规划研究。Min 建立了混合非线性整数规划数学模型求解各物流设施的最优数量与最优位置[3]，又从第三方物流的角度出发，构建了包括处理中心数量和位置的混合整数规划模型求解回收中心数量与位置的最优解[4]。Ramezani 和 Bashiri 构建了以原材料次品率、客户响应速度以及利润为目标函数的随机动态多目标多产品模型，求得各设施的最优数量与位置情况[5]。KimH 在对废旧电子产品逆向物流的研究中构建以距离最短为目标的逆向物流模型，并利用禁忌搜索算法求出距离的最优解[6]。

我国学者在研究逆向物流网络规划问题时，大多是从成本或利润的角度出发，以此构建逆向物流网络。严南南从碳排放的角度来研究废弃汽车的逆向物流网络问题，设计了一种以总成本最小与碳排放量

最小为目标的多目标数学模型[7]。董贵颖同样建立一个以利润最大为目标的混合整数规划模型，并建立了一种离散粒子群优化算法对模型进行求解[8]。徐娟以拥有自营物流企业解决快递箱逆向物流过程的选址规划问题为研究对象，建立了以逆向物流网络的总成本最低为目标函数的混合整数规划模型，求得了模型的最优解还证明了模型在该条件下的适用范围[9]。刘志峰在其研究中建立了一种逆向物流的库存模型，该模型可以求出在一定条件下最优处理周期与最低费用[10]。

回顾以往研究特点，本研究将建立一个以逆向物流网络总成本最小化和碳排放量成本最小化为目标，考虑客户区、回收中心、拆解处理中心、再制造中心以及废弃物处理机构的四层回收网络系统的混合整数网络规划模型，并利用 Gurobi 求解。

## 2. 报废光伏组件回收网络规划模型

### 2.1. 报废光伏组件回收网络整体架构

多篇研究文章都对各类废弃物品的逆向物流回收网络进行过描述，如严南南，徐友良等[7] [11]建立的包括回收中心、拆解中心、再制造中心与填埋场的报废汽车逆向回收网络；陈刘芬[12]等建立的包括回收中心、拆解中心、再制造中心与填埋场的报废轮胎逆向回收网络，而其他如对城市固废、产业废物[13] [14]的逆向物流规划也大多包含上述几类对象。我们的团队在对山东省力诺公司采访后，也得出了光伏废弃物的回收流程：光伏组件报废后，首先会被收集、检测以进行更进一步的组件的拆卸和分类，然后将拆卸并分类好的光伏组件用于部件的更新迭代、材料的再次利用或是直接进行废物废液处置。

因此，我们参照各类废弃物回收网络，设立了包含客户区、回收中心、拆解中心、再制造中心与废弃物处理机构(即其他网络中的填埋场)的回收网络，这一由各类设施构成的四层报废光伏组件逆向物流回收网络体系如图 1 所示：

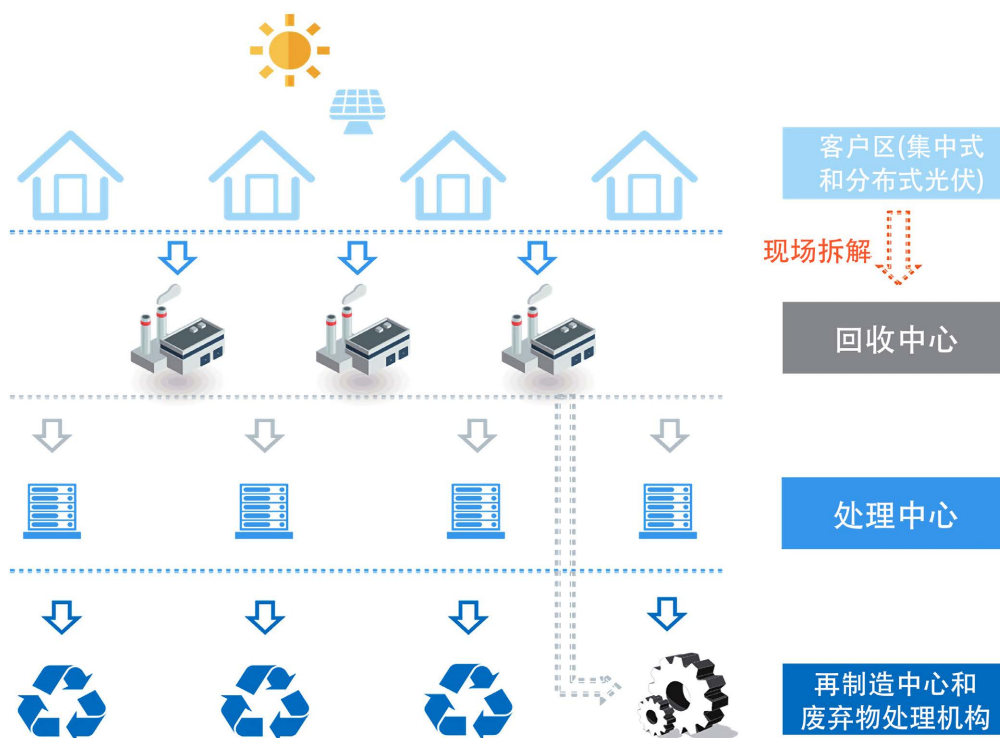


Figure 1. The architecture of scrapped PV module reverse logistics recycling network  
图 1. 报废光伏组件逆向物流回收网络架构

也有论文指出[15], 由于光伏设备的特殊性, 其安装时对于设备的稳固性要求较高, 因此普通民众无法自行操作对报废的光伏设备进行拆卸, 需要专业的设备拆卸团队进行现场拆解并将组件运输至回收中心。本文基于简化模型的考量, 将现场拆解的活动环节纳入到回收中心的活动环节之中。

由此根据上图所示, 我们获知报废光伏组件逆向物流回收网络具体的运行流程是: 光伏设备用户区主要分为集中式光伏和分布式光伏两种, 回收中心从光伏设备用户区中收集报废光伏组件, 其中就包含为普通民众现场拆解报废设备, 同时将收集到的光伏组件进行分类, 对于不可回收的组件送往废弃物处理机构进行处置, 对于可回收组件运往拆解处理中心进行进一步的处理加工。拆解处理中心主要负责将回收而来光伏报废组件进行更为细致地拆卸检测和分类, 为后续的再制造中心活动环节提供原材料, 对于通过分类判定为不可回收的组件直接运输至废弃物处理机构进行处理。再制造中心主要负责将来自拆解处理中心的可回收零件进行进一步的拆解或组装, 以获得可用的二手部件或零部件。

## 2.2. 网络规划模型的建立

### 2.2.1. 模型假设

- 1) 光伏设备用户所在地及其报废量、回收中心、拆解处理中心、再制造中心、废弃物处理机构的候选地点均可通过一定方式已获知。
- 2) 模型中涉及的报废光伏组件回收网络设施均有容量约束条件。
- 3) 光伏设备的用户分为两类: 集中式光伏和分布式光伏。
- 4) 在回收网络中各个设施之间交通条件良好, 不会影响物流运输。
- 5) 报废的光伏组件分为晶硅组件和薄膜组件两种, 并在回收网络中回收流通。
- 6) 不同地点的同类设施节点的固定投资成本相同。
- 7) 光伏报废组件逆向物流回收网络中同一层各个设施之间相互独立, 不流通。

### 2.2.2. 模型变量说明(表 1~3)

**Table 1.** The facility collection and its index labels  
**表 1.** 设施集合及其索引标注

符号	含义
$C$	光伏组件客户区集合, $c=1,2,\dots,C$
$O$	回收中心集合, $o=1,2,\dots,O$
$T$	拆解处理中心集合, $t=1,2,\dots,T$
$R$	再制造中心集合, $r=1,2,\dots,R$
$L$	废弃物处理机构集合, $l=1,2,\dots,L$

**Table 2.** Model parameter settings  
**表 2.** 模型参数设置

符号	含义
$FO_i$	设施 $i$ 的固定投资成本, $i \in \{O, T, R, L\}$
$C_i$	设施 $i$ 处理报废组件的单位处理成本, $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ , 分别代表回收中心、拆解处理中心、在制造中心和废弃物处理机构的单位处理成本。
$D_{ij}$	设施 $i$ 与设施 $j$ 之间的运输距离, $i, j \in \{O, T, R, L\}$
$T_{ij}$	设施 $i$ 与设施 $j$ 间的单位运输成本, $i, j \in \{O, T, R, L\}$

Continued

$LO_i$	设施 $i$ 的处理容量下限, $i \in \{O, T, R, L\}$
$UP_i$	设施 $i$ 的处理容量上限, $i \in \{O, T, R, L\}$
$NU_i$	可建设的设施 $i$ 的最大数量限制, $i \in \{O, T, R, L\}$
$DI$	回收中心到客户区现场拆卸的单位拆卸成本
$PV_i$	客户区 $i$ 的光伏组件报废量, $i \in \{C\}$
$PVR$	光伏组件报废容量与重量的转化比例系数
$\tau$	报废组件回收率
$\alpha$	报废组件可运往拆解处理中心进行处理的比例
$\beta$	报废组件用于再制造比例
$c_{TPF}$	单位碳排放量成本

Table 3. Model variables

表 3. 模型变量

符号	含义
$Q_{ij}$	设施 $i$ 与设施 $j$ 之间的报废光伏组件运输流量, $i, j \in \{O, T, R, L\}$
$Y_i$	$Y_i = \begin{cases} 0, & \text{建立设施 } i \\ 1, & \text{不建立设施 } i \end{cases}, i \in \{O, T, R, L\}$

### 2.3. 网络规划模型的建立

鉴于目前国内的光伏报废组件回收尚未形成一个完整的体系, 其报废光伏组件再制造重新流入市场所产生的利润尚不能进行统一精确地衡量, 因此本模型的第一个目标函数主要是整个报废光伏组件逆向物流回收网络的建设及运营总成本最小化[15]; 同时我国倡导可持续发展的政策与节能减排的理念, 并面临着“碳达峰”“碳中和”的双目标, 因此我们在设计报废光伏组件逆向物流回收网络的时候, 应考虑整个回收网络系统的碳排放量成本尽可能小, 因此本模型的第二个目标函数便是整个报废光伏组件逆向物流回收网络的总碳排放量成本最小化[7]。因此, 目标函数中包含  $Z_1$  (网络回收设施建设固定资产投资成本)、 $Z_2$  (回收中心派遣人员现场拆卸成本)、 $Z_3$  (逆向物流系统中各级设施之间的物流运输成本)、 $Z_4$  (回收系统中各级设施关于报废光伏组件的处理成本)和  $Q$  (逆向物流回收网络系统的总碳排放量成本), 用公式表示如式 6 所示:

$$Z_1 = \sum_{o=1}^O FO_o \cdot Y_o + \sum_{t=1}^T FO_t \cdot Y_t + \sum_{r=1}^R FO_r \cdot Y_r + \sum_{l=1}^L FO_l \cdot Y_l \quad (1)$$

$$Z_2 = \sum_{c=1}^C DI \cdot PV_c \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z_3 = & \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O T_{co} \cdot D_{co} \cdot Q_{co} \cdot PVR + \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T T_{ot} \cdot D_{ot} \cdot Q_{ot} \cdot PVR \\ & + \sum_{o=1}^O \sum_{l=1}^L T_{ol} \cdot D_{ol} \cdot Q_{ol} \cdot PVR + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R T_{tr} \cdot D_{tr} \cdot Q_{tr} \cdot PVR \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L T_{tl} \cdot D_{tl} \cdot Q_{tl} \cdot PVR \end{aligned} \quad (3)$$

$$Z_4 = \sum_{o=1}^O \sum_{c=1}^C Q_{co} \cdot PVR \cdot C_1 + \sum_{t=1}^T \sum_{o=1}^O Q_{ot} \cdot PVR \cdot C_2 + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T Q_{tr} \cdot PVR \cdot C_3 + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T Q_{tl} \cdot PVR \cdot C_4 + \sum_{l=1}^L \sum_{o=1}^O Q_{ol} \cdot PVR \cdot C_4 \quad (4)$$

因此模型的逆向物流回收网络的建设运营成本的目标函数为:

$$\text{Min } Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (5)$$

同时我们考虑到要使整个回收网络的碳排放量成本达到最小[7], 即有:

$$\begin{aligned} \text{Min } Q = & \sum_{c=1}^C \sum_{o=1}^O Q_{co} \cdot PVR \cdot D_{co} \cdot c_{TPF} + \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T Q_{ot} \cdot PVR \cdot D_{ot} \cdot c_{TPF} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R Q_{tr} \cdot PVR \cdot D_{tr} \cdot c_{TPF} + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T Q_{tl} \cdot PVR \cdot D_{tl} \cdot c_{TPF} \\ & + \sum_{o=1}^O \sum_{l=1}^L Q_{ol} \cdot PVR \cdot D_{ol} \cdot c_{TPF} \end{aligned} \quad (6)$$

其中该模型需要满足的约束条件有[15]:

1) 逆向物流回收设施的容量约束条件:

$$LO_o \cdot Y_o \leq \sum_{c=1}^C Q_{co} \cdot PVR \leq UP_o \cdot Y_o \quad (7)$$

$$LO_t \cdot Y_t \leq \sum_{o=1}^O Q_{ot} \cdot PVR \leq UP_t \cdot Y_t \quad (8)$$

$$LO_r \cdot Y_r \leq \sum_{t=1}^T Q_{tr} \cdot PVR \leq UP_r \cdot Y_r \quad (9)$$

$$LO_l \cdot Y_l \leq \sum_{t=1}^T Q_{tl} \cdot PVR + \sum_{o=1}^O Q_{ol} \cdot PVR \leq UP_l \cdot Y_l \quad (10)$$

2) 逆向物流回收网络中各级设施的流量守恒原则:

$$\sum_{o=1}^O Q_{co} = \tau \cdot PV_c \quad (11)$$

$$\sum_{c=1}^C Q_{co} = \sum_{t=1}^T Q_{ot} + \sum_{l=1}^L Q_{ol} \quad (12)$$

$$\sum_{o=1}^O Q_{ot} = \sum_{r=1}^R Q_{tr} + \sum_{l=1}^L Q_{tl} \quad (13)$$

3) 报废光伏组件流入再制造中心与废弃物处理机构的比例关系式:

$$\sum_{l=1}^L Q_{ol} = \alpha \cdot \sum_{c=1}^C Q_{co} \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^L Q_{ol} = (1 - \alpha) \cdot \sum_{c=1}^C Q_{co} \quad (15)$$

$$\sum_{r=1}^R Q_{tr} = \beta \cdot \sum_{o=1}^O Q_{ot} \quad (16)$$

$$\sum_{l=1}^L Q_{tl} = (1 - \beta) \cdot \sum_{o=1}^O Q_{ot} \quad (17)$$

4) 设施数量约束限制:

$$\sum_{o=1}^O Y_o \leq NU_1, \sum_{t=1}^T Y_t \leq NU_2, \sum_{r=1}^R Y_r \leq NU_3, \sum_{l=1}^L Y_l \leq NU_4 \quad (18)$$

5) 其他变量约束条件:

$$Q_{co}, Q_{ot}, Q_{tr}, Q_{il}, Q_{ol} \geq 0 \quad (19)$$

$$Y_o, Y_t, Y_r, Y_l \in \{0, 1\} \quad (20)$$

$$\forall c \in C, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall r \in R, \forall l \in L \quad (21)$$

### 3. 报废光伏组件回收网络规划应用研究

山东省作为光伏装机大省, 连续位列全国新增装机前列, 装机容量大、装机类型多。因此, 我们以山东为对象, 使用上述模型进行区域光伏报废组件逆向物流回收网络的规划。

#### 3.1. 回收网络节点分布

为方便计算, 本研究对各节点进行如下处理:

1) 用户区。为了简化研究, 本文将光伏客户区划分为有限个用户区, 将每个市的市政府作为用户区的中心, 同时将分布式与集中式光伏用户区地点统一为一个地点进行计算。

2) 回收中心。我们假设各地级市各设置一个回收中心。

3) 拆解处理中心。拆解处理中心的建设规模需要考虑未来报废光伏组件的趋势, 并且为了防止资源的浪费, 设置上不能进行盲目多建, 对此本文研究的假设是: 在每一市建设一个拆解处理中心, 一共 17 个拆解处理中心。

4) 再制造中心。我们从《中国光伏行业协会会员名单》中选取了 12 个在山东省内实力较强且影响力较大的企业作为再制造中心的候选企业(如表 4 所示)。

**Table 4.** Candidate enterprise of remanufacturing center in Shandong Province

**表 4.** 山东省再制造中心候选企业

企业名称	企业地址
力诺电力集团股份有限公司	济南市历城区经十东路 30766 号力诺科技园阳光楼办公室
润峰电力有限公司	山东省微山经济开发区润峰工业园
水发能源集团有限公司	山东省济南市历城区经十东路 33399 号 13 层东半区
山东大海集团有限公司	东营市广饶县稻庄镇闫口村
济宁农信通新能源有限公司	济宁市菱花路 1 号
淄博福祿新型材料有限责任公司	淄博市淄川区昆仑镇铁路街 263 号
山东金晶科技股份有限公司	山东省淄博市张店区 205 国道
万华化学集团股份有限公司	山东省烟台市经济技术开发区重庆大街 59 号
山东华建铝业集团有限公司	中国山东省潍坊市临朐县沂山路沂山路东首
德州宇浩光伏有限公司	山东省德州市乐陵市五洲中大道 567 号
山东恒圣石墨科技有限公司	山东省济宁市嘉祥县万张工业园
青岛凯希尔测试技术服务有限公司	青岛市城阳区书云东路 57 号 5 层

5) 废弃物处理机构。对山东省环保厅发布的《山东省危险废物经营许可证颁发情况(截至 2021 年 6 月 30 日)》表格进行检索,并对企业的核准经营方式及其处理废物类别进行筛选后,选取出以下山东省有经营许可的、符合本模型废弃物处理机构的候选企业名单。(如表 5 所示)

**Table 5.** Candidate enterprise of photovoltaic scrap module waste treatment agency in Shandong Province  
**表 5.** 山东省光伏报废组件废弃物处理机构候选企业

城市	企业名称	地址	年处置量(t)	编号
济南	济南莱芜鑫润环保科技有限公司	山东省济南市莱芜高新区精细化工产业园区内	10,000	D1
	济南德正环保科技有限公司	山东省济南市莱芜高新区武当山路 8 号	46,500	D2
淄博	淄博管仲环保科技有限公司	淄博市临淄区金山镇辛庄村北	50,000	D3
烟台	鑫广绿环再生资源股份有限公司	开发区开封路 8 号	120,639	D4
潍坊	潍坊环海博锐再生资源有限公司	山东省潍坊市寒亭区北海工业园	60,000	D5
济宁	济宁丹佳环境服务有限公司	金乡县胡集镇济宁市化学工业经济技术开发区	40,000	D6
泰安	泰安市腾跃环保科技有限公司	山东省泰安市肥城市老城街道办事处	50,000	D7
威海	威海市环保科技有限公司(处置)	威海市环翠区光明路 94 号	9200	D8
	山东东顺环保科技有限公司	威海市南海新区龙泰西路 58 号	62,500	D9
日照	中信环境技术(日照)有限公司	日照市岚山区金山三路以南、银山一路以西	84,000	D10
	山东创业环保科技发展有限公司	山东省沂水县庐山中路 C00392 号	93,300	D11
临沂	光大绿色环保固体废物填埋(临沭)有限公司	山东省临沂市临沭县蛟龙镇烈大公路	20,000	D12
	光大绿色环保危废处置(临沭)有限公司	山东省临沂市临沭县经济开发区(郑山)大琅琳子西北	20,000	D13
滨州	山东清博生态材料综合利用有限公司	山东省滨州市博兴县经济开发区	41,700	D14
	滨州市北海魏桥固废处置有限公司	山东省滨州市北海经济开发区北海大街	2,000,000	D15
	山东平福环境服务有限公司	山东省滨州市邹平市焦桥镇	114,400~	D16
	山东环沃环保科技有限公司	山东省滨州市阳信县经济开发区工业九路东首	30,000	D17

### 3.2. 基本数据

#### 1) 山东省省各客户区报废量计算

结合山东省力诺公司提供的 2001 年至 2021 年中国光伏累计装机容量数据,我们利用线性插值法结合对《中国 2060 年前碳中和研究报告》中的预测值进行拟合,并根据全国各地的累计装机容量占比预测了 2021 年至 2060 年山东省及其地级市的光伏装机容量,并利用澳大利亚学者 Paiano [16]提到的报废量预测模型对上述地区的光伏组件报废量进行预测。我们以 2042 年报废量数据作为我们此次规划模型中客户区产生的光伏组件报废量,具体数据如表 6 所示。



**Table 6.** PV module scrap volume in each cities in Shandong Province in 2042 (unit: MW)  
**表 6.** 2042 年山东省各地级市光伏组件报废量(单位: MW)

地市名称	报废量	地市名称	报废量	地市名称	报废量
济南	24.61	潍坊	244.54	德州	39.19
青岛	21.61	济宁	75.11	聊城	33.26
淄博	13.82	泰安	67.53	滨州	36.99
枣庄	27.23	威海	5.82	菏泽	141.09
东营	65.97	日照	9.34		
烟台	10.59	临沂	36.01		

2) 各个节点间运输距离

在报废组件回收网络规划过程中, 各节点之间的距离直接关系到运费成本, 是重要的参数组成。距离为上述各公司(市中心)之间距离, 利用高德地图可直接查询得出, 数据表格如表 7~10 所示。

**Table 7.** The transport distance from the customer center to the recycling center (unit: km)  
**表 7.** 客户中心到回收中心的运输距离(单位: km)

回收 客户	济南	青岛	淄博	枣庄	东营	烟台	潍坊	济宁	泰安	威海	日照	临沂	德州	聊城	滨州	菏泽
济南	5															
青岛	393	5														
淄博	106	221	5													
枣庄	240	410	231	5												
东营	200	255	85	315	5											
烟台	480	240	307	474	350	5										
潍坊	210	181	95	265	128	222	5									
济宁	186	549	203	94	399	490	268	5								
泰安	89	425	109	156	273	411	190	98	5							
威海	548	328	369	525	410	64	282	547	471	5						
日照	381	189	206	211	327	290	151	267	283	330	5					
临沂	307	287	191	100	297	384	191	164	167	431	112	5				
德州	120	513	70	307	250	449	262	228	155	513	368	319	5			
聊城	113	506	190	219	328	497	282	128	104	559	341	262	116	5		
滨州	138	317	64	293	79	298	122	254	156	362	259	255	151	210	5	
菏泽	243	636	191	177	470	589	367	105	182	648	371	264	257	141	331	5

**Table 8.** The transport distance from the recycling center to the dismantling center (unit: km)  
**表 8.** 回收中心到拆解处理中心的运输距离(km)

拆解 回收	济南	青岛	淄博	枣庄	东营	烟台	潍坊	济宁	泰安	威海	日照	临沂	德州	聊城	滨州	菏泽
济南	10															

Continued

青岛	393	10																	
淄博	106	221	10																
枣庄	240	410	231	10															
东营	200	255	85	315	10														
烟台	480	240	307	474	350	10													
潍坊	210	181	95	265	128	222	10												
济宁	186	549	203	94	399	490	268	10											
泰安	89	425	109	156	273	411	190	98	10										
威海	548	328	369	525	410	64	282	547	471	10									
日照	381	189	206	211	327	290	151	267	283	330	10								
临沂	307	287	191	100	297	384	191	164	167	431	112	10							
德州	120	513	70	307	250	449	262	228	155	513	368	319	10						
聊城	113	506	190	219	328	497	282	128	104	559	341	262	116	10					
滨州	138	317	64	293	79	298	122	254	156	362	259	255	151	210	10				
菏泽	243	636	191	177	470	589	367	105	182	648	371	264	257	141	331	10			

Table 9. The distance from the dismantling processing center to the remanufacturing center (unit: km)

表 9. 拆解处理中心到再制造中心的距离(km)

再制造 拆解	济南 力诺	济宁 润峰	水发 能源	山东 大海	济宁 信通	淄博 福祿	山东 金晶	万华 化学	华建 铝业	德州 宇浩	山东 恒升	青岛 凯希
济南	37	235	13	161	147	77	109	418	151	98	177	344
青岛	387	380	342	248	456	286	272	204	211	427	469	23
淄博	136	277	86	62	231	31	9.2	325	74	165	263	254
枣庄	205	17	248	332	144	242	280	356	277	329	138	379
东营	235	382	191	47	336	135	99	295	114	177	368	248
烟台	469	555	418	308	561	362	344	40	297	490	585	182
潍坊	235	346	184	78	327	128	110	223	62	255	351	156
济宁	140	100	191	309	35	220	258	548	264	250	27	428
泰安	34	165	79	196	92	107	145	452	168	159	128	343
威海	536	622	486	373	629	430	411	110	364	557	652	250
日照	306	258	307	236	316	245	254	328	178	414	334	154
临沂	223	135	239	243	207	205	244	419	174	345	207	262
德州	149	330	135	229	216	196	189	515	262	47	246	444
聊城	117	252	130	270	111	193	223	531	265	151	133	458
滨州	165	356	132	76	271	108	70	347	128	109	301	301
菏泽	226	184	259	399	118	309	347	655	371	306	93	541

**Table 10.** The distance from recycling centers, dismantling centers to waste disposal agencies (unit: km)  
**表 10.** 回收中心、拆解处理中心到废弃物处理机构的运输距离(km)

处理机构 \ 拆解	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17
	济南	103	101	102	423	215	212	72.1	501	476	327	219	301	286	146	206	92.9
青岛	299	297	260	215	192	488	395	272	217	202	223	297	244	280	393	306	374
淄博	89.4	88	17.2	331	116	283	168	408	383	268	172	284	270	51.3	163	39.7	132
枣庄	182	183	271	547	366	111	182	604	565	210	185	146	129	322	429	301	384
东营	194	192	110	300	79.2	388	267	391	368	288	215	324	310	59.5	132	116	115
烟台	407	406	335	44.4	250	597	498	72.1	91	363	367	441	432	343	454	371	432
潍坊	173	171	101	228	42.5	362	263	302	277	182	149	234	225	108	231	136	205
济宁	166	167	249	553	359	37.1	103	629	604	277	225	228	213	300	385	267	318
泰安	66	64.8	136	457	250	153	31.6	533	509	281	182	249	235	187	282	151	214
威海	475	473	403	114	317	664	565	1.5	66.5	430	434	508	499	407	518	438	500
日照	225	226	236	340	205	338	314	396	341	34.6	107	117	122	267	389	287	364
临沂	151	152	231	430	254	212	222	487	449	96.9	76.2	54	39.6	269	385	264	356
德州	225	224	206	520	284	280	156	598	573	447	338	425	410	201	184	162	136
聊城	182	181	216	537	329	173	87.2	614	590	391	295	357	342	255	289	202	230
滨州	166	165	92.5	353	132	335	197	443	421	322	230	338	325	40.5	84	67	58.8
菏泽	268	267	338	660	453	93	183	736	711	388	338	341	327	387	444	334	384

对于光伏组件单位运输成本，我们借鉴了张志波的相关研究，采用平均数据 0.66 元/t·km 作为报废光伏组件单位运输成本并假设各节点之间的单位运输价格相同，未来一段时间内单位运输价格不变，同时我们根据严南南的研究结果，假设模型中单位运输距离下的碳排放量成本是近似不变的，设为 1 元/t·km [7] [17]。

目前我国还没有成形的报废光伏组件回收网络，根据 WEEE 指令，规定报废组件归为家用电器类强制回收处理，因此本文参考了相关电子废弃物固定投资成本、处理能力以及处理成本，详情见表 11。

**Table 11.** Fixed investment costs, processing capacity and unit processing costs for each node  
**表 11.** 各节点固定投资成本、处理能力及单位处理成本

	固定投资成本(万元) [18]	单位处理成本(元/t) [19]	处理能力(t)
回收中心	60	1580	20000
拆解处理中心	216	10530	8000

然后我们依据市面价格<sup>1</sup>得：大型的兆瓦级人工费为 0.2 元/W，小型的分布式人工费在 0.4~0.6 元/W 之间，因此本文将报废组件现场的单位拆解成本设置为 0.4 元/W。

在光伏报废组件回收流程之中，我们假设报废光伏组件全部回收，及  $\tau = 100\%$ ，从回收中心运往拆解处理中心比率  $\alpha = 85\%$ ，报废组件再制造率  $\beta = 80\%$ 。

这里假设在可预见的未来内光伏组件的重量不会发生很大的改变，目前 250 W 的光伏组件的重量一般在 19 kg，即重量单位为 76 t/MW。由于目前我国光伏再制造企业对于报废组件的需求较大，并没有出现

<sup>1</sup>农村安装的光伏板价格多少钱一平方? [EB/OL]. 土流网. <https://www.tuliu.com/read-76937.html>, 2018-3-26.

产能不足的问题。因此,本文假设再制造中心的处理能力是足够大的;同时根据《山东省危险废物经营许可证颁发情况(截至2021年6月30日)》数据显示,废弃物处理机构候选企业的年处置量均有相应规定,因此我们将该数据作为各个废弃物处理机构的处理能力数据。

### 3.3. 回收网络设计方案

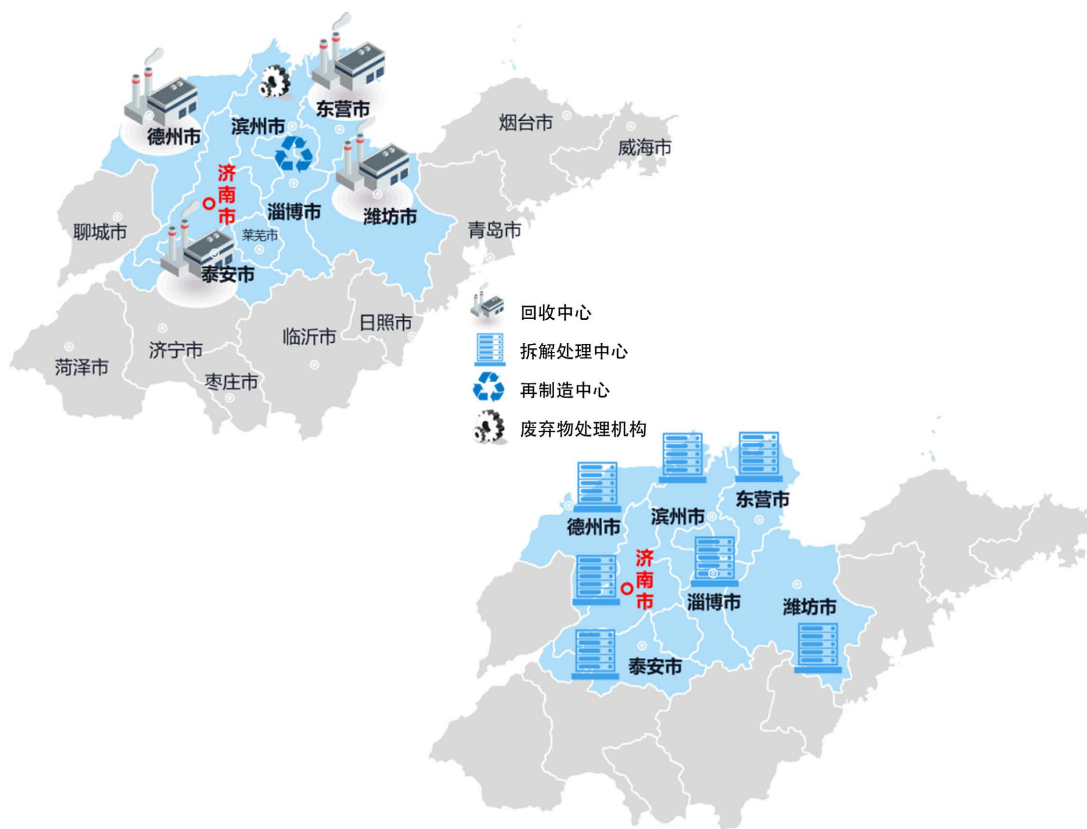
本文模型是典型的混合整数规划(MILP)问题,因此我们采用专业求解软件 Gurobi 求解模型。Gurobi 是由美国 Gurobi 公司开发的新一代大规模数学规划优化器,在 Decision Tree for Optimization Software 网站举行的第三方优化器评估中,展示出更快的优化速度和精度,成为优化器领域的新翘楚。利用 Gurobi 软件计算可以得到模型的最优解,包括回收和拆解处理中心的选址方案,以及各个节点之间的流量分配,其运行结果如下。

光伏报废组件回收网络最小总成本与碳排放量最小成本之和为 11.92 亿元。

在最优解中:山东省报废组件回收网络中各设施选址如下:

- 1) 回收中心(共 4 个): 在东营、潍坊、泰安、德州各建一个;
- 2) 拆解处理中心(共 7 个): 在济南、淄博、东营、潍坊、泰安、德州、滨州各建一个;
- 3) 再制造中心(共 1 个): 选择山东金晶科技股份有限公司;
- 4) 废弃物处理机构(共 1 个): 选择山东平福环境服务有限公司(D16)

为更加立体地呈现针对于山东省的报废光伏组件逆向物流回收网络设计,我们在山东省地图上将各个设施选址可视化出来,如图 2 所示:



**Figure 2.** The scrap photovoltaic module reverse logistics recycling network planning of Shandong Province  
**图 2.** 山东省报废光伏组件逆向物流回收网络选址规划

## 4. 结语

为应对即将到来的光伏组件“报废潮”，本研究建立了一个以逆向物流网络总成本最小化和碳排放量成本最小化为目标，考虑客户区、回收中心、拆解处理中心、再制造中心以及废弃物处理机构的四层回收网络系统的混合整数网络规划模型。我们选择装机容量最大，最易受“报废潮”影响的山东省为研究对象，代入相关数据并利用 Gurobi 求解，计算给出山东省报废光伏组件回收网络规划的选址以及流量方案。相较于以往对电子垃圾或光伏垃圾的回收设施规划研究，本研究充分考虑了光伏产品不同于手机、“四机一脑”等产品的回收网络规划的特点，按照实际使用情况将光伏组件回收客户区分为集中式与分布式两种，并将现场拆解考虑到回收网络规划中去，从而得出适用于报废光伏组件的回收网络系统。为了响应国家的双碳目标，我们在求解最小成本逆向物流网络的基础上，又加入了碳排放最小的目标函数，使得我们规划的回收网络具有经济、低碳的双重特点。

## 致 谢

感谢山东省力诺公司为本研究提供的 2001 年至 2021 年中国光伏累计装机容量数据以及市场数据。

## 参考文献

- [1] Stock, J.R. (1992) Reverse Logistics. Council of Logistics Management, Oak Brook, IL.
- [2] 中华人民共和国国家标准 GB/T18354-2001 物流术语(下) [J]. 中国储运, 2006(4): 40-43.
- [3] Min, H., Ko, H.J. and Chang, S.K. (2006) A Genetic Algorithm Approach to Developing the Multi-Echelon Reverse Logistics Network for Product Returns. *Omega*, **34**, 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.07.025>
- [4] Min, H. and Ko, H.J. (2012) The Dynamic Design of a Reverse Logistics Network from the Perspective of Third-Party Logistics Service Providers. *International Journal of Production Economics*, **113**, 176-192. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.01.017>
- [5] Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013) A New Multi-Objective Stochastic Model for a Forward/Reverse Logistic Network Design with Responsiveness and Quality Level. *Applied Mathematical Modelling*, **37**, 328-344. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.02.032>
- [6] Kim, H., Yang, J. and Lee, K.D. (2009) Vehicle Routing in Reverse Logistics for Recycling End-of-Life Consumer Electronic Goods in South Korea. *Transportation Research Part D Transport & Environment*, **14**, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.03.001>
- [7] 严南南, 李明. 基于低碳的报废汽车逆向物流网络选址问题研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 180-184.
- [8] 董贵颖, 胡坚堃, 黄有方. 废旧汽车再制造逆向物流网络模型优化[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(1): 60-66.
- [9] 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.
- [10] 刘志峰, 赵鹏, 黄海鸿, 许泽莹. 废旧电器再制造/再利用逆向物流库存模型[J]. 环境工程学报, 2017, 11(8): 4708-4717.
- [11] 徐友良, 陈锦生, 石悦悦, 应夏晖. 汽车再制造逆向物流网络选址规划研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(9): 154-158.
- [12] 陈刘芬, 王强, 崔梦茹, 晏绘, 吴亚鑫, 郎钰婷. 黑龙江省废旧轮胎逆向物流网络选址优化[J]. 物流技术, 2020, 39(12): 57-61+106.
- [13] 马建龙, 蒋婧秋. 城市固体废弃物逆向物流与节约环境治理成本研究——基于多周期与多目标的动态选址分析[J]. 价格理论与实践, 2020(7): 77-80. <https://doi.org/10.19851/j.cnki.cn11-1010/f.2020.07.231>
- [14] 罗宜美, 万福来, 赵南海. 基于 MILP 的再制造逆向物流网络设施选址研究[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(5): 16-20+28. <https://doi.org/10.19495/j.cnki.1007-5429.2012.05.004>
- [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. <https://doi.org/10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.000696>
- [16] Paiano, A. (2015) Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **41**, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.208>

- 
- [17] 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. <https://doi.org/10.13939/j.cnki.zgsc.2019.24.168>
- [18] 马伟华. 淮安市废旧家电回收物流网络设计研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [19] Yu, H. and Solvang, W.D. (2016) A General Reverse Logistics Network Design Model for Product Reuse and Recycling with Environmental Considerations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **87**, 2693-2711. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8612-6>