

薄膜太阳能电池再循环的经济可行性研究 ——以山东省为例

李沫 童昕[†]

北京大学城市与环境学院, 北京 100871; [†] 通信作者, E-mail: tongxin@urban.pku.edu.cn

摘要 以山东省为例, 按照世界自然基金会(WWF)的中国 8760 电网模型和山东省太阳能消费需求潜力, 设置 2050 年山东省太阳能光伏电池装机总量和空间分布的情景分析模型。在此基础上, 根据铜铟镓硒薄膜太阳能电池组件的物质流构成, 计算实现材料再循环的成本收益, 并评估 3 种情景下实现资源回收和再循环的经济可行性。1) 规模经济情景: 按照运输成本最小化假设, 全省建立一家集中循环处理设施; 2) 市场导向情景: 在人口最密集的两个大都市区(济南和青岛)附近建立集中循环处理设施; 3) 生产者责任延伸情景: 由 6 家铜铟镓硒生产企业利用生产区位提供循环处理设施。结果表明, 生产者责任延伸情景具有最佳的成本收益结果, 由此进一步探讨生产者责任延伸制度对再生能源技术方向和基础设施发展的意义。

关键词 铜铟镓硒薄膜太阳能电池; 循环利用; 延伸生产者责任制度; 成本-收益分析; 山东
中图分类号 K909

Economic Feasibility of Recycling Thin-film Photovoltaic Modules in Shandong Province

LI Mo, TONG Xin[†]

College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;
[†] Corresponding author, E-mail: tongxin@urban.pku.edu.cn

Abstract This paper takes Shandong Province as example, one of the most aggressive regions in solar energy adoption in China, to examine the economic feasibility of recycling thin-film PV modules. Based on China 8760 electric power grid model and potential of solar demand, total installed capacity of solar photovoltaic cells and spatial distribution in 2050 are estimated. Benefit-cost analysis is conducted for the recycling of CIGS thin-film PV modules through the material flow analysis under three scenarios: 1) economy of scale, with one centralized recycling facility serving the whole province; 2) convenience for users, with two large recycling facilities closed to most populated cities, i.e. Jinan and Qingdao; 3) producer responsibility, four major PV producers in Shandong take back the end-of-life products and build recycling facilities close to their plants. The result shows that solution 3 has cost advantage in take back transportation. The paper discusses the potential to encourage producer responsibility in the PV manufacturing sector, and its implication in the entire energy industry.

Key words CIGS thin-film PV modules; recycling; extended producer responsibility; cost-benefit analysis; Shandong Province

太阳能技术正得到日益广泛的应用, 2012 年太阳能发电已经成为欧洲新增电能供应中最大的电源类型。在政府的大力支持下, 中国已超越欧盟成为太阳能光伏发电装机量增长最快的国家^[1]。研究者

对当前主要的太阳能光伏材料开展了大量物质流分析和生命周期环境影响评价, 总体上认为几种主要应用的光伏太阳能技术在整个生命周期内降低碳排放方面存在优势^[2-3], 其中新型薄膜太阳能电池由

于效率高、生产成本低成为新一代太阳能材料的发展方向^[4]。市场预测曾一度对薄膜技术的增长做出非常乐观的预期,2009 年预估 2015 年薄膜电池占太阳能光伏组件的市场可达到 50%。2013 年,薄膜电池实际占全球光伏产品出货量比重达到 10%^[5]。薄膜技术的广泛使用对相关材料的资源消耗和市场供给可能带来重要影响^[6],例如碲化镉存在环境风险,而铜铟镓硒也存在资源供应瓶颈。由于这些材料不仅在太阳能行业,而且在其他尖端技术应用领域也有着广泛应用前景,因而作为战略性金属(critical metal)受到学术和政策领域的重点关注^[7]。考虑用量和价格波动的潜在风险,循环利用成为新一代薄膜太阳能电池在成本和环境效益上超越上一代晶体硅光伏材料的重要环节^[8]。

与传统大宗工业金属相比,很多新能源材料都存在材料使用分散、单个产品用量少,并以复杂合金的形式存在于产品之中,给回收利用带来非常大的挑战^[9]。目前全球对太阳能材料回收利用的设施建设还处于起步阶段,合理的空间布局可以进一步降低太阳能电池材料的回收成本,提高回收利用的效率^[10]。此外,材料的循环利用受到社会行为习惯、产品设计、循环利用技术以及分拣过程的热力学等多方面影响。从电子产品的发展历程来看,缺少有效的市场激励,技术上过度追求时髦和更新换代,难以建立经济有效的循环利用机制,导致花费巨大的经济和环境代价开采的金属材料往往只用一

次就变成废物耗散在环境中,无法再利用。电子废物的跨国流动又给贫穷地区带来严重的环境污染问题。可再生能源的发展是否能够避免同样的问题,建立从摇篮到摇篮的产品-服务系统,对于能源系统的低碳转型具有现实意义。

本文以山东省为例,研究太阳能电池组件回收利用的经济可行性,并尝试探讨不同机制可能对循环利用基础设施建设和材料选择带来的影响。

1 研究区概况

图 1 显示研究区域山东省的单位面积太阳能年均辐射量分区情况以及目前全省太阳能光伏组件生产能力的空间分布。山东省太阳能资源理论总储量在全国排第 17 位。我国太阳能资源总体分布从西北向东南倾斜,太阳能资源丰富的地区往往是人烟稀少、自然条件恶劣的地区,而人口集中、能源消耗量大的地区,太阳能资源相对贫乏。从太阳能资源与能源消费需求的匹配度来看,山东省位于我国发展太阳能条件较为优越的地区^[11]。

21 世纪以来,山东省政府积极推动新能源产业发展和技术推广应用,促进能源结构转型方面也走在全国前列。《山东省“十二五”太阳能产业和光伏产业发展规划》^[12]中规划 2015 年全省地面光伏电站装机容量为 600 MW,屋顶光伏电站装机容量为 160 MW,建筑一体化装机容量为 40 MW,其中薄膜电池发电站达到约 1/4。但是,受制于电价补贴

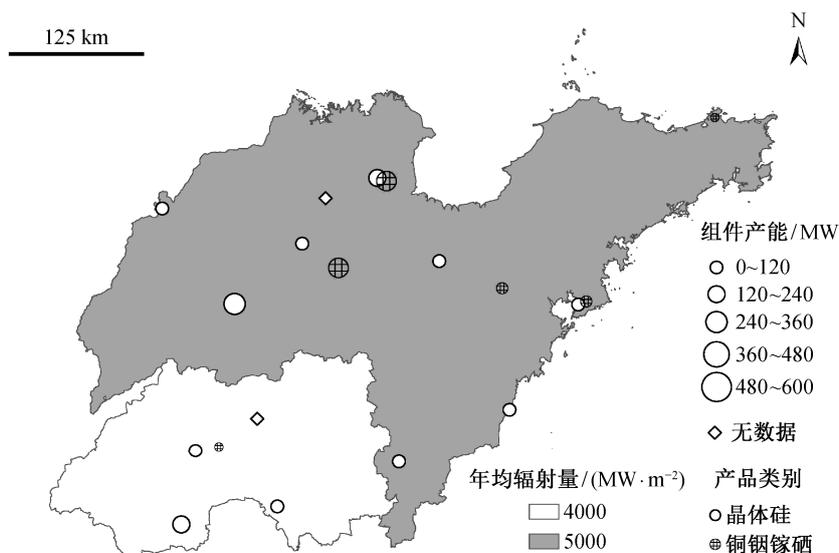


图 1 山东省太阳能辐射量分区和主要太阳能光伏组件生产企业及产能分布

Fig. 1 Solar radiation partition and distribution of PV producers with their production volume in Shandong Province

政策及电网接入等现实障碍,这一发展目标进展不如预期。到 2013 年,山东省光伏发电装机容量累计 118 MW^[13]。随着薄膜技术的发展,太阳能技术选择也面临新的变化。与建筑结合的分布式太阳能系统在土地利用和能源传输效率方面的优势日渐显著,且投资门槛相对较低,民营企业参与方式更加灵活,对鼓励创业和拉动内需的潜力更大。2014 年国家能源局拟定的 1.4×10^4 MW 安装量目标中分布式太阳能系统占 8×10^3 MW。山东省也出台《关于促进光伏产业健康发展的意见》^[14],提出大力发展分布式光伏发电,并且制定了相应的电价补贴政策。鼓励各类电力用户按照“自发自用、余量上网、电网调节”的方式建设分布式光伏发电系统。优先支持在用电价格较高的工商业企业、工业园区建设规模化的分布式光伏发电系统。支持在机关、学校、医院、事业单位、居民社区建筑和构筑物等推广小型分布式光伏发电系统。鼓励光伏建筑一体化应用,新建建筑、旧建筑改造等原则上按照分布式光伏发电要求统一设计、同步建设。鼓励在路灯照明、景观以及通讯基站、交通信号灯等领域推广分布式光伏电源。开展以新能源智能微电网技术为支撑的分布式光伏发电示范项目建设。力争到 2015 年年底,全省建成分布式光伏发电装机 1.2×10^3 MW。本文从光伏发电系统的循环经济角度,考察最理想的光伏技术应用前景下,建设循环利用基础设施及逆向物流系统的成本效益可行性。

2 数据和方法

Chandler 等^[15]设计的中国 8760 电网模型预测,到 2050 年,最理想的可再生能源利用情景下,中国太阳能光伏发电量在所有发电量中所占比重将提高到 27.36%,成为比重最大的能源供给类型。这是迄今为止,从电网和市场可行性角度预测的最理想的中国低碳能源结构转型情景。本文以此情景为基础,考察以薄膜技术实现这一理想情景对材料循环的影响。薄膜太阳能电池技术具有较好的环境适应性,更适用于分布式安装使用。随着生产的标准化以及电网接入的瓶颈突破,人口分布将对技术的扩散采纳产生直接影响。因此,我们根据中国 8760 电网预测模型中的人均装机容量,结合预测人口数据,估算山东省全省及各县的预测光伏装机容量。

首先,在 8760 预测模型中,预测 2050 年全国人口为 13 亿人,设为 P_{cn} ; 全国年用电量为 $1.17 \times$

10^7 MW, 设为 D 。每年有 8760 小时,光伏发电量在所有发电量中所占比重为 27.36%。这样,人均光伏装机容量 PC 为

$$PC = 27.36\% \times \frac{D}{8760 \times P_{cn}},$$

得出人均光伏装机容量为 0.28 kW/人。

然后,根据 2000 年和 2010 年两次人口普查数据^[16],山东省人口空间分布变化较小。假定 2050 年人口规模和分布不变,按照山东省人口占全国比重估算全省的光伏装机容量为 2.69×10^4 MW。进一步按分县人口数据预估各县的光伏装机容量。

铜铟镓硒太阳能薄膜电池的物料构主要参考 Marwede 等^[8]的研究结果,目前商业化生产的铜铟镓硒薄膜太阳能中每兆瓦电池组件的物料构成包含铜 15 kg, 铟 19 kg, 镓 5 kg, 硒 38 kg。此外,根据 Kim 等^[3]对废弃薄膜太阳能电池组件中材料构成分析,可从铜铟镓硒材料的重量推算出每兆瓦废弃组件的总重量为 1.05×10^4 kg。

废弃太阳能组件循环处理成本参考 Kim 等^[3]基于 First Solar 美国工厂的运行条件计算的结果,每吨废弃组件的处理成本约为 603 元。薄膜电池光伏组件的材料回收包括生产环节上的残次品和废料回收,以及消费后的废弃产品回收两部分。前者在薄膜太阳能电池生产企业中已广泛实施,回收率可达 100%,按照 Marwede 等^[8]开展的物质流分析,这部分铜铟镓硒材料大约可占生产投入材料的 1/6。消费后废弃组件的回收则面临消费者的配合及运输成本等因素限制,很难实现 100% 的回收。2012 年欧盟将太阳能电池组件纳入 WEEE 目录以前,欧美废太阳能组件的回收活动主要基于太阳能电池企业的自愿行动,特别是碲化镉薄膜组件材料有较严重的环境风险,其代表生产企业 First Solar 对组件的回收再利用做了长期研究。2011 年欧盟的 PV Cycle 回收计划回收了超过 1400 吨 PV 组件,回收率接近 70%^[17]。太阳能电池组件纳入 WEEE 以后,根据该指令要求,2019 年以前电子产品回收率需要达到 85% 以上,其中材料的再循环率要达到 80% 以上^[18]。尽管欧盟以外市场并未对太阳能光伏组件的回收利用做出强制性的立法规定,但欧盟市场的标准对整个业界具有一定的示范引导性。因此,我们在计算中也参考这一指标设定消费后产品的回收率。据此,废弃产品回收材料的收益 R_n 的计算方法如下:

$$R_n = W_n \times r_c \times r_m,$$

其中, W_n 为组件中特定材料的总重量, r_c 为废弃组件的回收率(设定为 85%), r_m 为回收后的废弃组件处理的再循环率(设定为 80%)。

3 研究结果

3.1 再循环材料处理的成本-收益

表 1 展示以目前商用铜铟镓硒薄膜太阳能电池技术满足 WWF 预期的 2050 年理想低碳转型情景下山东省总装机容量 2.69×10^4 MW 所需的材料重量, 以及根据 2014 年国际金属价格计算的废弃组件回收后可以获得的回收材料价值。总的材料回收收益可以达到 18 亿元。

从表 1 可以看出, 铜铟镓硒材料循环处理收益最大的物质来自铟, 约占回收材料价值的 75%。此外, 由于目前回收技术还不能将铜镓合金分离, 总的回收收益是按照回收铜镓合金的价值来计算的, 事实上分离提纯的镓的价值远高于铜镓合金。特别是考虑到镓在未来新能源和其他关键技术领域中的广泛应用前景, 相应的分离提纯技术的经济前景值得期待。

不过, 由于国际金属价格波动较大, 上述计算结果受金属价格波动影响, 会有较大的不确定性。例如镓的价格在两年前曾达到 720 美元/kg, 但目前已经下降到不足 300 美元/kg。除此以外, 薄膜太阳能电池的生产技术持续改进, 能量转换效率持续提升, 材料用量却不断下降, 也使得同样装机容量的产品实际材料消耗有可能大幅度下降。

进一步参考 First Solar 的工厂废弃薄膜组件的处理成本 603 元/t, 全部组件废弃后的再生处理成本为 1.46×10^8 元。与回收收益相比, 材料回收的经

济性比较显著。

3.2 废弃组件回收的运输成本

从材料回收的成本效益上看, 回收铜铟镓硒薄膜太阳能电池组件尽管是经济可行的, 但由于铜铟镓硒材料在整个光伏组件中所占的比重非常低(不足总重量的 1%), 如果将废弃组件直接混入一般的城市固体废物流的话, 铜铟镓硒的回收就难以实现。由于废弃组件主要是玻璃的重量, 并且很难在处理之前进行分离, 因此回收过程中的运输成本就成为需要考虑的因素之一。图 2 展示根据人口比重加权平均计算的 2050 年山东省各县级行政单元的装机容量, 作为运输成本估算的基础。山东省总体地势较为平坦, 省内公路交通发达, 因此对运输成本的计算采用简化方法。假设每个县级行政单元的废弃太阳能组件均先集中到其行政地域的质心位置, 作为废弃物收集的原点, 再以每个质心到处理厂的直线距离作为近似的运输距离, 公路运输成本按 0.5 元/(t·km)计算。

对处理厂的选址做如下 3 种假设。

1) 规模经济导向。由于薄膜技术只是目前商品化应用的几种太阳能光伏技术方案之一, 未来技术变化的可能方向比较多, 因此集中处理有利于实现处理设备的规模经济, 并且适应光伏技术可能发生的变化。假设全省只建立一个处理厂, 根据运输成本最小化的目标, 可以求出距离各县质心距离之和最小的点, 就是成本最优的处理厂位置。假设县级行政区 i 需要进入再循环的废弃组件质量为 m_i , 该县到回收点的距离为 d_i , 则选址需要满足

$$\min \sum_{i=1}^{107} m_i d_i, \quad \text{s.t. } d_i \geq 0.$$

计算结果最佳点位于莱芜市区附近, 总运量为 $3.99 \times$

表 1 废弃铜铟镓硒光伏组件中的材料估算

Table 1 Estimated material in rejected CIGS PV modules

金属	单位装机容量所需物料*/(kg·MW ⁻¹)	材料价格**/元	预测山东省装机容量下的物料总重量/10 ⁵ kg	回收材料收益/10 ⁷ 元
铜	15.00	54.68	4.03	
镓	5.00	1230.00	1.35	
铜镓合金	20.00	304.08	5.38	11.1
铟	19.00	3900.00	5.11	136
硒	38.00	360.00	10.2	25.0
其他固体	1.047×10^4	0.30	2820	8.46
总计	1.054×10^4	—	2840	180

数据来源: *参考文献[8]; **金属材料价格参考文献[19], 其他固体参考废玻璃价格。

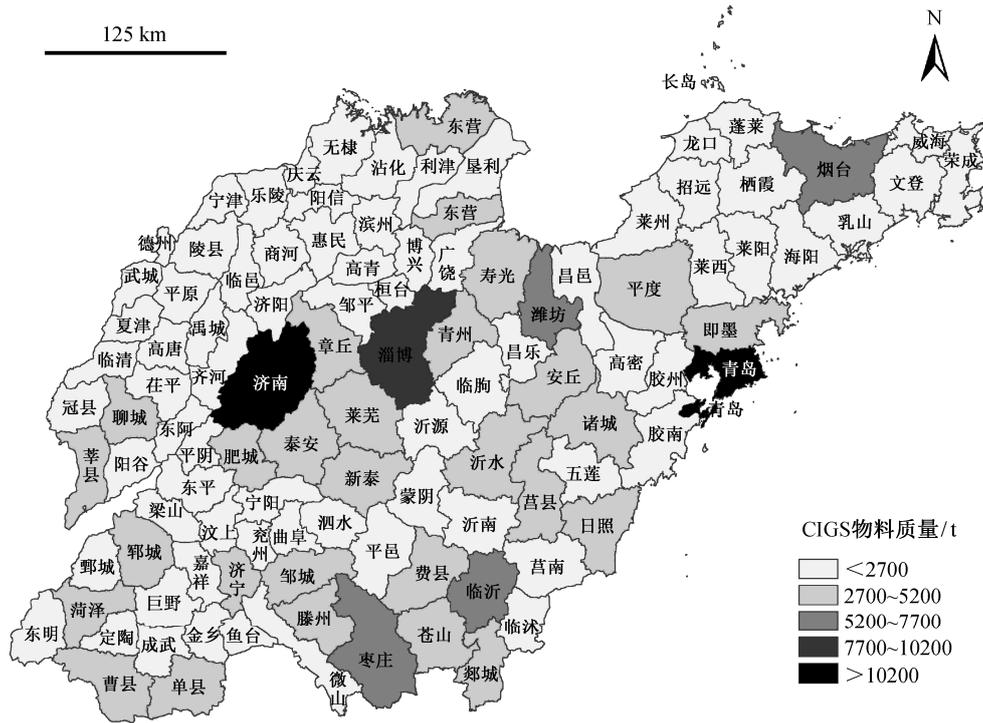


图 2 预估 2050 年山东省县级行政区太阳能薄膜电池物料分布
Fig. 2 Estimated spatial distribution of CIGS modular material in Shandong in 2050

$10^7 \text{ t} \cdot \text{km}$, 公路运费约为 1995.03 万元。

2) 市场导向。分布式光伏系统与集中太阳能电站系统的一个显著差别是, 用户安装的时间可能存在较大的不一致, 因此废弃时间也会存在比较大的变动范围。此外, 实际安装量受人口密度、收入水平等因素的影响, 市场需求的空间分布存在较大的不均衡。可以推测, 发达的都市中心安装量会更大。因此, 在山东省两大都市中心济南和青岛建立回收处理设施, 方便就近回收。仍然假设县级行政区 i 需要进入再循环的废弃组件质量为 m_i , 该县到济南和到青岛的距离分别为 d_i^{jn} 和 d_i^{qd} 。选址需要满足

$$\min \sum_{i=1}^{107} m_i d_i, \text{ s.t. } d_i \geq 0.$$

$$d_i^{\text{jn}} > d_i^{\text{qd}}, d_i = d_i^{\text{qd}}; d_i^{\text{jn}} < d_i^{\text{qd}}, d_i = d_i^{\text{jn}}.$$

在 ArcGIS 10 中, 利用泰森多边形的方法, 根据各县级行政区与济南和青岛的距离进行处理厂归属的划分。计算结果总运量为 $2.98 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{km}$, 公路运费约为 1490.28 万元。

3) 生产者责任(extended producer responsibili-

ty, EPR)导向。由于薄膜电池光伏组件的材料在生产环节就有很大的循环再利用潜力, 因此企业有动力首先在生产过程中建立再循环处理能力, 利用这一处理能力实现全生命周期的循环再利用具有较强的技术可行性。EPR 制度是指生产者需要全部或部分承担其产品废弃后的回收处理责任, 目前已在我国电子废物管理中得到应用。EPR 制度期望通过生产者责任的延伸, 影响其在上游材料选择和商业模式的构建, 从而促进废物减量和资源化的目标。为此, 选取山东省内 6 个薄膜太阳能电池的工厂所在地^①作为处理设施的地址。假设所有用户的废弃产品均运送到最近的工厂处理, 因此采用服务区划分的模型: 假设县级行政区 i 需要进入再循环的废弃组件质量为 m_i , 该县到 6 个工厂的距离分别设为 $d_i^n (n \in (1, 6))$ 。选址需要满足

$$\min \sum_{i=1}^{107} m_i d_i, \text{ s.t. } d_i \geq 0.$$

$$d_i = \min(d_i^n (n \in (1, 6))).$$

计算结果总运量为 $1.96 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{km}$, 公路运费约为 979.14 万元。图 3 根据就近服务原则划分每个

① 山东省内东营、潍坊、济宁、威海、青岛和淄博有规划或建设的薄膜光伏电池生产工厂, 所以, 在生产者责任导向情景下, 选择在这 6 个城市分别建立处理厂。

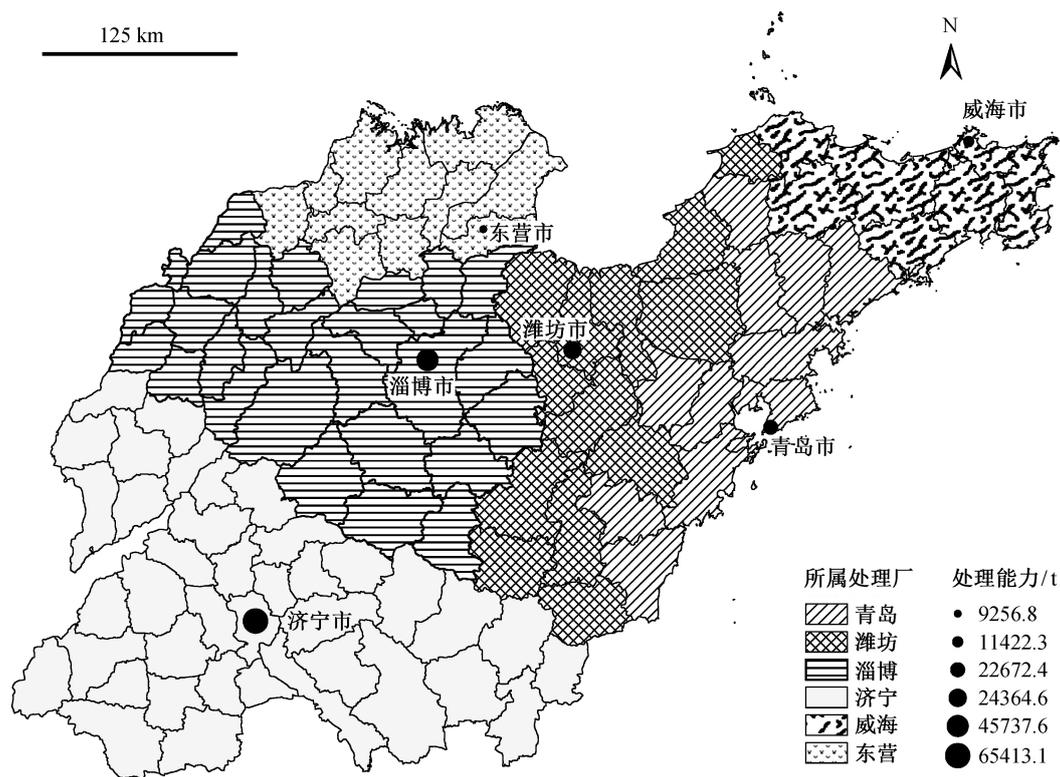


图 3 生产者责任导向的处理厂服务区划分及处理规模
Fig. 3 Service area and recycling volume in producer responsibility scenario

工厂的服务区及总回收处理量。

综合比较上述 3 种情境, 运输成本占处理成本的比重在 6.7%~13.3%之间, 由此可见, 设施布局对处理成本的影响还是比较大的。其中, 集中处理的运输成本最大, 生产者导向的运输成本最小。不过, 在生产者导向的情景假设中规定了用户废弃的产品可以运到最近的生产厂家, 这就需要生产者之间形成一定的回收责任协议, 对不是自己生产的产品也进行回收处理。如何与实际生产企业之间就成本收益进行分割, 就成为一个现实的问题。如果不能实现生产企业就近回收, 生产者导向的运输成本就可能反而高于其他两种情景。此外, 从最近光伏技术实际发展的情况来看, 随着铜铟镓硒薄膜太阳能电池技术的优化, 材料更加轻薄, 应用方式也逐步向移动化设备扩展, 材料的空间分布就更加不确定了。并且, 材料的使用寿命可能会像电子产品一样, 未达到设计使用寿命就因产品更新淘汰而废弃。这种产品的回收就更加依赖于回收体系和责任机制的设计。

4 结论

能源基础设施是现代社会的物质基础, 新能源的使用会改变基础设施的物质构成, 对未来物质流格局可能产生深远影响。新能源技术所涉及的材料已经作为战略性材料, 受到欧美等发达国家的积极重视。我国在发展新能源技术材料方面拥有非常好的自然基础。以本文讨论的薄膜太阳能光伏材料为例, 其中的钢、镓、硒, 目前我国都是全球市场主要的原料供给者, 钢和镓的储量和产量都占全球市场一半以上。这些材料在地壳中都属于稀有元素, 目前总产量很低, 并且很大程度上依赖伴生的基础金属的开采生产, 开采过程存在很高的环境负担。尽管这些材料在新技术产品中单位用量很低, 但新技术的广泛采纳必然会对材料的持续供给带来一定的冲击, 有必要从循环经济的角度考察新能源基础设施的材料回收与循环利用的成本效益, 以保障能源结构转型的可持续性。

本研究以山东省为例, 分析了薄膜太阳能电池

回收的成本-收益。山东省在我国东部沿海地区中发展分布式太阳能具有一定的优势,也是薄膜太阳能电池的重要生产区域之一,因此本研究具有较强的典型性。研究表明:1)就目前的铜铟镓硒薄膜电池技术而言,材料循环利用的经济收益还是比较显著的,但是考虑到铜铟镓硒材料在最终产品中所占比重非常低,如果没有恰当的激励机制,废弃后混在一般城市废物中处理,这些材料就很难有效回收了;2)不同的回收处理设施选址方案对回收成本会有显著的影响,运输成本大约占回收处理成本的10%左右,其中集中处理的运输成本比利用生产企业就近回收处理的成本高出一倍左右;3)回收设施的空间布局很大程度上依赖于回收处理责任的划分机制,特别是生产者责任模式需要依靠一定的组织协作,才能发挥工厂就近回收处理的经济效益。

考虑到光伏技术目前处于发展应用的早期,材料选择和商业模式还有较大的可塑性,在这个阶段引入生命周期的视角,建立基于生产者责任制的组织体系,一方面旨在促进企业建立面向循环经济的商业模式,提高新能源基础设施材料的循环利用率;另一方面也是从机制上促进企业在产品开发阶段,致力于改善产品设计,降低材料消耗。不过,在技术发展的早期,仅仅针对新能源技术强调生产者责任,可能会抑制新能源技术发展。因此,有必要在全面考察能源基础设施转型对关键物质流的影响的基础上,建立更加普遍的生产者责任延伸制度。

参考文献

- [1] European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Global market outlook for photovoltaic 2013–2017 [R/OL]. (2013) [2013–12–09]. <http://www.epia.org/news/publications/>
- [2] Hsu D D, O'Donoghue P, Fthenakis V, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(suppl 1): S122–S135
- [3] Kim H C, Fthenakis V, Choi J K, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of thin-film photovoltaic electricity generation. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(suppl 1): S110–S121
- [4] Romeo A, Terheggen M, Abou-Ras D, et al. Development of thin-film Cu (In, Ga) Se₂ and CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, 12(2/3): 93–111
- [5] Fraunhofer Institute. Photovoltaic reports [R/OL]. (2014–11–20) [2015–01–15]. <http://www.ise.fraunhofer.de>
- [6] Achzet B, Reller A, Zepf V, et al. Materials critical to the energy industry: an introduction[R]. Augsburg: University of Augsburg, 2011
- [7] EU Commission. Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials [R]. Brussels, 2010
- [8] Marwede M, Reller A. Estimation of life cycle material costs of cadmium telluride- and copper indium gallium diselenide-photovoltaic absorber materials based on life cycle material flows. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(2): 254–267
- [9] Reck B K, Graedel T E. Challenges in metal recycling. *Science*, 2012, 337: 690–695
- [10] Choi J K, Fthenakis V. Economic feasibility of recycling photovoltaic modules. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(6): 947–964
- [11] 李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1049–1054
- [12] 山东省经济和信息化委员会. 山东省“十二五”太阳能产业和光伏产业发展规划. 鲁经信资字(2011)526. 2011–09–23
- [13] 山东省统计局. 2013年山东省国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2014–03–06) [2014–10–12] http://www.shandong.gov.cn/art/2014/3/6/art_609_13801.html
- [14] 山东省发展和改革委员会. 山东省关于扶持光伏发电加快发展的意见 [EB/OL]. (2010–07–19) [2014–10–13] http://sdgb.shandong.gov.cn/art/2010/7/19/art_4563_623.html
- [15] Chandler W, Chen S, Lin R, et al. The China 8760 electric power grid model methodology and overview [R/OL]. (2013) [2014–11–03]. <http://www.etransition.org/images/China%208760%20Methodology.pdf>
- [16] 山东省统计局. 山东统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001/2011
- [17] Ziegler M. PV CYCLE: significant increase in collected end-of-life solar modules [R/OL]. (2012) [2014–11–03]. <http://www.photovoltaik-guide.de/pv-cyclesignificant-increase-in-collected-end-of-life-solar-modules-25141>
- [18] European Parliament. Directive on waste electrical and electronic equipment (WEEE). 2012/19/EU [EB/OL]. (2012–07–24) [2014–11–03]. Brussels: European Parliament. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012L0019>
- [19] Metal-Prices Ltd. Metal prices [M/OL]. (2013) [2014–12–31]. <http://www.metal-pages.com>