

DOI: 10.20103/j.stxb.202410232588

钟洪麟¹, 李丁丁¹, 刘茜¹, 严萌², 姜璐², 王晨¹, 王赛鸽^{3,*}. 全球退役光伏组件回收研究热点、演化趋势与展望. 生态学报, 2025, 45(9): 4079-4106.

Zhong H L, Li D D, Liu X, Yan M, Jiang L, Wang C, Wang S G. Global hotspots, trends, and future prospects of waste photovoltaic modules recycling: a bibliometric analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4079-4106.

全球退役光伏组件回收研究热点、演化趋势与展望

钟洪麟¹, 李丁丁¹, 刘茜¹, 严萌², 姜璐², 王晨¹, 王赛鸽^{3,*}

¹ 山东大学蓝绿发展研究院, 威海 264209

² 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

³ 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083

摘要:为实现全球碳减排与温控目标,以光伏为主的清洁能源产业发展迅速。然而即将迎来的光伏组件大规模集中退役与处置已成为其产业可持续发展的重要问题。全球退役光伏组件回收也逐渐成为新能源发展领域的焦点。基于大量文献调研,从光伏组件回收技术、影响评估和管理策略三个维度对光伏回收产业的研究现状与发展趋势进行了深入剖析,具体包括:(1)梳理了光伏组件回收处理技术和管理体系的现状,识别了潜在问题和未来发展趋势;(2)总结了光伏组件回收潜在的污染物排放、生态环境影响及再利用带来的社会经济-生态环境效益等方面的相关研究进展;(3)提出了退役光伏组件回收体系构建、策略设计、合规发展等方面的研究进展和问题,为未来研究方向和产业可持续发展提供了策略建议。本研究对于从全生命周期视角统筹管理光伏产业链、制定未来循环再利用产业发展路径规划以及相关标准与政策等具有重要的参考价值,有助于促进光伏产业的可持续发展和资源循环再利用。

关键词:退役光伏组件回收;回收技术;综合评估;政策设计;产业发展与管理;可持续发展

Global hotspots, trends, and future prospects of waste photovoltaic modules recycling: a bibliometric analysis

ZHONG Honglin¹, LI Dingding¹, LIU Xi¹, YAN Meng², JIANG Lu², WANG Chen¹, WANG Saige^{3,*}

¹ Institute of Blue and Green Development, Shandong University, Weihai 264209, China

² Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

³ School of Energy and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: The rapid development of the photovoltaic (PV)-dominated clean energy industry plays a critical role in achieving global carbon mitigation and climate targets. However, the upcoming large-scale decommissioning and disposal of PV modules has emerged as a significant challenge to the industry's sustainable development. Recycling decommissioned PV modules is thus increasingly becoming a focal point in the renewable energy sector. This study provides an in-depth analysis of the current status and evolving trends of the PV module recycling industry, focusing on three key dimensions, including recycling technologies, impact assessments, and management strategies. Specifically, it (1) reviewed the state-of-the-art PV module recycling technologies and management frameworks, identifying key challenges and potential future directions; (2) synthesized research progress on potential pollutant emissions, ecological impacts, as well as the socioeconomic and environmental benefits associated with module recycling and reuse; and (3) identified key issues in current recycling systems, policy designs, and regulatory compliance, offering strategic recommendations for future research and the

基金项目:国家自然科学基金(72174111, 72103022);山东省泰山学者青年专家项目(tsqnz20221106)

收稿日期:2024-10-23; **网络出版日期:**2025-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: saige@ustb.edu.cn

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国澳门统计数据。

sustainable development of the industry. This study delivers valuable insights for promoting the life-cycle management of the PV industry, planning circular economy pathways, and shaping standards and policies, ultimately contributing to the sustainable development of the PV sector and resource recycling initiatives.

Key Words: photovoltaic module recycling; recycling technologies; comprehensive assessment; policy design; industrial development and management; sustainable development

全球正面临着能源转型和低碳发展的重大挑战,光伏发电成为推进能源领域碳减排的主要力量。近十年,光伏在新能源装机中占比高、增速快。据预测,全球光伏装机容量将从 2020 年的 760.4 GW 增加至 2030 年的 1600GW。然而光伏组件的预期寿命一般为 25—30 年,这意味着未来 10—30 年间全球光伏组件报废量将大幅增加^[1]。据预计,2030 年累计报废量将达到 800 万 t,2050 年增至 6000—7800 万 t^[2],同年全球退役光伏组件与新装机的比例也将增加到 80% 以上^[3],中国、美国、印度和日本将成为光伏设备报废的热点国家。中国作为光伏装机容量和报废量并列第一的国家,在 2023 年光伏发电装机容量已达到 261GW,占全球光伏新增装机容量的 80% 以上^[4],预计在 2030 年左右达到报废高峰,到 2050 年,光伏组件累积报废总量最高将达到 6400 万 t^[5]。如此大量的废旧光伏组件如果处理不当,将带来巨大的环境风险。因此,如何对报废光伏组件进行合理的回收处理和资源再利用已成为全球各国面临和急需解决的重大问题。

光伏组件组分复杂,如果将其直接填埋,不及时进行回收和妥善处置^[6],将使得组件中的重金属和有毒物质泄漏,造成严重的环境污染并危害人体健康^[7–8],成为区域能源和生态的可持续发展重大隐患^[9–10]。而有效回收利用报废光伏组件将带来可观的生态-环境-经济效益:一方面,其含有高价值的金属物质^[11],进行回收和二次利用可以节约金属资源^[3,12],降低直接填埋所造成的环境污染^[13]。另一方面,其高效回收利用能够促进循环产业发展并降低社会成本^[14],从而创造就业并促进当地经济发展。在这一背景下,美国、欧盟和中国等数十个国家(或地区)围绕光伏报废物的回收标准、责任归属和回收点的模式布局等议题,相继出台管制政策和重大文件(表 1),推进光伏产业的可持续发展和高价值资源的二次利用。综合来说,退役光伏组件回收已被纳入各个国家和地区的重大发展战略,将是未来各国新能源领域的重要任务。

尽管光伏组件大规模退役所产生的环境问题逐渐受到重视,各级政府也提出了绿色闭环产业链^[15–17]并在电子报废物管理条例中对回收过程加以管制(表 1)。但光伏回收仍面临着退役、包装和运输成本高、资源化处理后的再利用市场小等障碍^[18],如何更好地管理光伏废物的处理过程,对各国政策也提出了不同要求。学者通过比较不同光伏废物处理政策,对中国、印度等国的政策框架调整^[19–20]、立法和经济驱动因素^[21]等方面给出不同见解。欧美等发达国家已有较为成熟的回收制度,例如欧盟提出建立消费后产品回收期制度^[22],规定消费后产品从生产到销售再到使用过程中产生的所有报废物均应处理或回收。美国要求每一种消费品在上市前都应确定其回收责任^[23]。澳洲规定消费者每年至少要卖出一半的旧家电电子产品^[24]。我国自 2017 年起,也对回收再利用不同光伏设备的通用技术进行标准化规定^[25–27]。

表 1 国内外退役光伏组件回收管理政策举措和法律条例

Table 1 Policies or initiatives for decommissioned photovoltaic modules recycling in various countries

国家 Country	颁布部门 Department	日期 Date	政策文件名称 Policy name	政策举措 Policy contents
美国 United States	环境保护局	1976 年 10 月 21 日	资源保护和回收法 ^[28]	明确光伏组件的生产、处理、储存、回收和处置等方面的规范。
欧盟 European Union	议会和理事会	2012 年 7 月 24 日	关于报废电子电气设备指令 ^[29]	明确将光伏组件列入报废电子设备清单,规定专门的回收责任主体,要求生产商为报废产品回收处理提供资金。
智利 Chile	环境部	2016 年 6 月 1 日	20920 号法案 ^[30]	提出光伏组件的生产者责任延伸制度,以促进回收再利用。

续表

国家 Country	颁布部门 Department	日期 Date	政策文件名称 Policy name	政策举措 Policy contents
日本 Japan	环境省	2018 年	促进太阳能发电设备回收利用的方针(第 2 版) ^[31]	涵盖了有关光伏组件退役、运输、再利用、回收和工业废物处置的相关法律法规。
中国 China	国务院办公厅	2017 年 1 月 05 日	“十三五”节能减排综合工作方案 ^[32]	首次提出推动太阳能光伏组件等新兴报废物回收利用导向。
	发展改革委等十部委	2021 年 3 月 18 日	关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见 ^[33]	进一步探索了退役光伏组件等新兴产业固废的规范路径及可循环、高值化的再生利用途径。
	国家发展改革委等九部委	2021 年 10 月 21 日	关于印发“十四五”可再生能源发展规划的通知 ^[34]	因地制宜推进受环保约束与经济性提升要求需提早退役的光伏机组和光伏电站升级改造;推动退役光伏机组、光伏组件回收处理技术与新产业链发展,补齐光伏、光伏发电绿色产业链最后一环,实现全生命周期绿色闭环式发展。
	国务院办公厅	2021 年 10 月 26 日	2030 年前碳达峰行动方案 ^[35]	在“双碳”战略 Gs 目标背景下,强调完善废旧物资回收网络,推进光伏组件等新兴产业废物循环利用。
	工业和信息化部等五部委	2021 年 12 月 31 日	智能光伏产业创新发展行动计划(2021—2025 年) ^[17]	提出实现全链条绿色发展,鼓励研发退役光伏组件回收利用技术与路径。
	国家发展改革委等四部委	2022 年 1 月 12 日	关于加快推进城镇环境基础设施建设的指导意见 ^[16]	提出退役光伏组件等报废物分类利用和集中处置。
	河北省人民政府办公厅	2022 年 3 月 20 日	河北省“十四五”时期“无废城市”建设工作方案 ^[36]	推进再生资源高效利用,积极推动光伏组件等新兴产业废物循环利用。
	国家发展改革委、国家能源局	2022 年 5 月 14 日	关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案 ^[15]	推动退役光伏组件回收处理技术和相关新产业链发展升级,实现全生命周期闭环式绿色发展。
	天津市人民政府	2022 年 8 月 25 日	天津市碳达峰实施方案 ^[37]	鼓励探索退役光伏组件等新兴产业废物高效回收以及可循环、高值化的再生利用模式,加强资源再生产品的推广应用。
	工业和信息化部等四部委	2022 年 12 月 12 日	关于深入推进黄河流域工业绿色发展的指导意见 ^[38]	提前布局退役光伏、风力发电装置等新兴固废综合利用。
	工业和信息化部等六部委	2023 年 1 月 3 日	关于推动能源电子产业发展的指导意见 ^[39]	进一步提出要推动光伏组件回收利用技术研发及产业化应用
	山西省人民政府	2023 年 1 月 5 日	山西省碳达峰实施方案 ^[40]	加强资源再生产品和再制造产品推广力度,推进退役光伏组件等新兴产业废物循环利用。
	国家发展改革委等六部委	2023 年 7 月 21 日	关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见 ^[41]	积极构建覆盖绿色设计、规范回收、高值利用、无害处置等环节的光伏和光伏设备循环利用体系,补齐光伏、光伏产业链绿色低碳循环发展最后一环。
	生态环境部	2024 年 1 月 19 日	《固体废物分类与代码目录》 ^[42]	首次公布报废光伏组件(包含生产、技改及退役过程中产生的废弃光伏组件)废物代码。
	工业和信息化部等七部委	2024 年 2 月 5 日	关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见 ^[43]	在新能源领域,加快废旧光伏组件、风力发电机组叶片等新型固废综合利用技术研发及产业化应用。
	国务院办公厅	2024 年 2 月 6 日	关于加快构建废弃物循环利用体系的意见 ^[44]	促进退役光伏、光伏设备循环利用,建立健全光伏和光伏发电企业退役设备处理责任机制。

如何兼顾经济-资源-环境效益,高效地回收报废光伏组件已成为光伏行业、学术界和政府部门共同关注的热点问题^[45]。针对退役光伏组件回收技术的趋势与热点,已有综述围绕第一代(晶硅光伏)、第二代(薄膜光伏)和第三代(新型光伏)等不同类型的光伏,探究如何提高热处理法、化学法和物理法的回收效率,创新优化其工艺路径^[46—47];一些研究应用生命周期评估法对碳排放、环境效益、资源和能源需求、有害物质排放及其对人体健康的危害等多维影响进行评估与对比分析^[48—50];还有一些学者采用成本效益分析和技术经济评价,对比不同回收技术的成本收益及经济可行性^[51—52]。

然而已有综述仍存在以下不足:尚缺少对退役光伏组件回收处理的整体性综述,仅关注如上述现存技术方向和社会-经济-环境综合效益评估等某一专题的研究,只有少部分综述整合纳入光伏组件回收再利用的标准化现状^[53]、回收模式的适用性^[54]和监管框架^[19]等方面的研究;较少采用知识图谱分析,对不同发文国家和研究热点间的关联性阐述尚显薄弱,未形成全面统一的理论、方法和应用基础。同时,已有研究未能对光伏板报废量预测结果进行系统的整理和比较,不同结果的显著异质性成因缺乏深入分析。因此,亟需从综合视角全面归纳退役光伏组件回收的研究现状,从而为制定报废光伏组件回收措施和管理政策提供借鉴。为此,本文在系统梳理退役光伏组件物理和化学的处理和再利用工艺的基础上(表2),识别回顾了不同学者和机构对光伏报废量预测、回收环节的多维影响评估,进一步梳理了回收产业已有模式和政策规制的研究,总结了当前光伏组件报废回收所存在的问题与挑战,提出未来退役光伏处置的研究方向和光伏回收产业的发展建议,进而为光伏产业可持续发展政策制定提供参考。

表 2 退役光伏组件的回收工艺
Table 2 Recycling process of photovoltaic modules wastes

工艺类型 Technology	年份 Year	文献 References	器械/试剂 Machine/ Chemical	操作条件 Operation conditions	结果 Results	优/缺点 Advantages/Disadvantages
物理处理 Physical treatment	2019	Nevala 等 ^[55]	电动液压破碎法	利用 600J 放电产生的冲击波,以每秒 1 次脉冲的频率,分别进行 300 秒和 500 秒的脉冲处理。	①太阳能电池中约 99% 的铜、60% 的银、80% 的铅、锡和铝集中在>4mm 的颗粒内。 ②高纯度硅(99%)集中在>0.5mm 至<2mm 间的颗粒内。	优点:①高选择性分离高价值金属,并将其浓缩在特定的尺寸范围内(可以在>4mm 和<0.5mm 的颗粒区间内分配不同金属成分);②属于非接触式工艺,减少细尘的释放,最大限度降低污染。
	2019	Azeumo 等 ^[56]	刀磨机重介质分离	①移除铝框架,使用刀磨机切割面板至 0.4cm 以下;②依次使用水、氯化钠(加至密度为 1.2g/cm ³)、多钨酸钠(加至密度为 1.5g/cm ³)将玻璃、金属和聚合物分离。	回收 76% 的面板玻璃(纯度为 100%)和 100% 的初始金属(纯度为 67.2%)。	
	2020	Song 等 ^[57]	高压破碎法	在 160kV 高压下进行 300 次脉冲的放电。	①含量较低金属分布在 1—5mm 的颗粒内; ②>95% 的铜和 96% 的银集中在<1mm 的颗粒内; ③85% 的铝在大小为 0.25—2mm 间的颗粒内; ④85% 的铅和 87% 的锡在<0.5mm 的颗粒内。	优点:①材料浪费少,且不会产生额外的污染;②选择性破碎可将有价值的金属浓缩到特定尺寸范围内,粉碎效果好,便于金属回收;③能源成本相对较低。 缺点:对高压脉冲发生器要求严格,难以大批量生产。
	2022	Sim 等 ^[58]	压碎筛分法	使用切割机粉碎光伏材料,并使用 8mm 的方孔网筛分,重复三次。	①>90% 的聚合物、97.5% 的铜和 87.5% 的铅在大于 5mm 和 1—5mm 的颗粒内。 ②76.9% 的银在<0.25mm 的颗粒内。	优点:①尺寸选择性分离使聚合物和金属富集在一定尺寸范围内,提高回收效率,减少成本;②最大化减少热解中气态产物的潜在排放和化学品使用,更加环保。
	2023	Fiandra 等 ^[59]	ENEA 工艺	①使用硬塑料锤手动拆除铝框架;②使用配备刀片和滚轮的刨床去除背板和封装剂;③使用锤子打破玻璃,圆锯切割玻璃,和特制的配备旋转叶片的自动微型先导脱料机去除玻璃碎片;④使用颚式粉碎机研磨组件;⑤利用干燥的致密分离器分离富集金属。	①94.84% 的铜富集在金属馏分。 ②银被富集在小体积馏分中,占处理后模块总重量的 1.17%(金属馏分)和 7.38%(聚合物馏分)。 ③约占整个模块重量 73% 的高纯度玻璃和后聚合物层被分离和回收。	优点:①初始阶段进行玻璃和聚合物的回收,减少后期对金属回收过程的污染;②研磨和金属提炼过程使工厂投资成本、能耗、物料损耗和环境影响降低;③研磨和分离设备规模小。 缺点:步骤烦琐。

续表

工艺类型 Technology	年份 Year	文献 References	器械/试剂 Machine/ Chemical	操作条件 Operation conditions	结果 Results	优/缺点 Advantages/Disadvantages
化学处理 Chemical treatment	2017	Shin 等 ^[60]	硝酸 氢氧化钾含磷 酸的蚀刻膏	①依次使用硝酸(60%,浸泡5min)和氢氧化钾(45%,80℃浸泡8min)溶解银和铝电极;②使用含磷酸的蚀刻膏320℃、340℃、360℃、380℃和400℃下退火2min去除抗氮化硅层;③将硅晶片浸入氢氧化钾水溶液(0.05%)剥离晶片表层。	回收的硅晶片符合再制造标准(厚度大于180μm,电阻率为0.5—4Ω)。	优点:①减少了报废光伏组件清洗过程的废水量;②减少使用有害的表面活性剂。
	2019	Azeumo 等 ^[56]	甲苯	溶解温度为60℃,超声波辐照功率为200W,停留时间小于60min。	完全溶解乙烯-醋酸乙烯(EVA)层。	
	2020	Chen 等 ^[61]	硝酸 氢氧化钠 钠化双(2,4,4-三甲基戊基)膦酸 盐酸	①在80℃下用4M硝酸浸出4h,浸出银和铝;在70℃下用3M氢氧化钠浸出3h,分离硅;②使用钠化双(2,4,4-三甲基戊基)膦酸从银中萃取铝;③使用1M盐酸从有机溶剂中剥离铝。	回收98%和99.5%的银和硅。	
	2022	Zante 等 ^[62]	氯化铁水溶液 氯化胆碱水溶液	①在0.5mol/dm ³ 氯化铁的水溶液中,在30℃超声波条件下处理1min去除铝和其他低价值金属;②在65℃、1:4摩尔比的氯化胆碱与水体系中,用0.5mol/dm ³ 氯化铁溶液10min浸出银;③在浸出液中加入水沉淀氯化银,提纯银。	回收98%的高纯度银(>98%)。	优点:①该工艺未使用无机酸,更为环保;②可以自动催化和重复使用多次沥滤循环中溶剂和氧化剂,减少了氧化剂用量,降低成本。 缺点:尚未解决耗水问题。
	2023	Brenes 等 ^[63]	甲苯	温度为80℃,分离时间为120min。	可以去除72%的EVA。	优点:生成化合物较少,毒性小。密闭环境下,可以避免有毒气体的排放。 缺点:甲苯不能溶解EVA,形成与甲苯和水都不混溶的凝胶,难与太阳能电池分离。
热处理 Heat treatment	2012	Doni 等 ^[64]	电热处理	射频电热直接加热晶体硅光伏板核心。	降低EVA的粘合强度,可以将碎玻璃与光伏面板分离。	优点:①可以均匀加热电介质。②可以在非导电材料上进行核心加热。
	2017 2019	Dias 等 ^[65] Wang 等 ^[66]	热解 两阶段加热 处理	在500℃下进行30min热解。 ①在150℃下加热5min,进行背板的完整回收;②通过500℃的热解去除EVA。	有效去除超过99%的EVA。 回收未损坏的背板、玻璃和硅片。	
	2023	Feng 等 ^[67]	热解	在500℃下进行30min热解。	①>4mm的太阳能电池;回收率为91.09%,集中度为84.4%。②2—4mm的太阳能电池;回收率为82.29%,集中度为80.52%。	优点:绿色、高效。
回收工艺组合 Recycling technology combination	2012	Wang 等 ^[68]	两阶段加热处 理化学处理	①在330℃下加热30min分离EVA和背板材料;②在400℃下二次加热120min热解去除EVA;③将太阳能芯片浸入80℃的盐酸/过氧化氢/水溶液(1:1:5)去除铝电极;④用5%氢氟酸去除抗反射层和银接触层;⑤用25%氢氧化钠去除空穴型半导体和电子型半导体之间的边界和背面板。	回收62%的硅和85%的铜。	优点:保证玻璃板完整,便于再利用。

续表

工艺类型 Technology	年份 Year	文献 References	器械/试剂 Machine/ Chemical	操作条件 Operation conditions	结果 Results	优/缺点 Advantages/Disadvantages
	2019	Chen 等 ^[69]	化学处理 热处理	①溶解 EVA,回收钢化玻璃;浸泡在 D-柠檬烯和甲苯中/溶胀但需要手工分选有机溶剂(四氢呋喃、氯仿);②500℃下热处理 2h 去除残留 EVA。	去除 99.97%的 EVA,100%回收钢化玻璃。	优点:①有助于后续浸出过程;②有利于环境保护和人类健康。
	2019	Flandra 等 ^[45]	机械处理 热处理	①通过铣床进行背板分层,剥离聚合物;②500℃、氧化环境和等效燃烧比小于 1 的条件下热处理 1h 降解 EVA。	聚合物完全去除,回收约光伏板总重量的 90%。	优点:①降低了与能源支出相关的成本;②消除了聚合物降解过程中的氟化副产物,降低毒性和环境污染。
	2022	Li 等 ^[70]	激光处理 机械处理	①手动拆卸铝框架和接线盒,用便携式热风枪 500℃加热数秒背板,手动剥离背板;②采用 1064nm 光纤脉冲激光照射太阳能电池背面 EVA 层;③机械剥离背面 EVA 层。	完整回收背面 EVA 层。	优点:①减少二氧化碳的排放;②为后续整个太阳能电池进行再利用提供可能。 缺点:难以在不损坏玻璃和太阳能电池的情况下回收前 EVA 层。
	2023	Wahman 等 ^[71]	机械处理 热处理	①手动拆除铝框架、电缆和接线盒,并用圆锯切割一定大小;②机械预处理:设置 T 型槽铣刀深度为 0.3mm,去除背板;设置 T 型槽铣刀深度为 0.57mm,对后 EVA 层和太阳能电池层剥离;③在 400℃下加热 5min 降解/分层光伏板。	①回收 82.2%的玻璃(纯度为 98.7%)、0.72%的铜带(纯度为 98%)、5%的硅/金属(纯度为 96%)。 ②回收纯度高达 96.5%的背板。	优点:①提高了回收纯度;②降低了能耗和温室气体排放。
	2023	Sah 等 ^[72]	机械处理 热处理 化学处理	①去除铝框架和接线盒,并进行切割;②在 480℃下热处理 30min,以去除聚合物层(EVA 层和背板),回收玻璃、硅电池碎片和连接线;③采用氢氧化钾溶液、硝酸溶液和磷酸溶液分别去除银触点、铝触点和氮化硅涂层,获取硅片;④手工研磨硅晶片,使用石墨模具通过 SPS 技术在 1100—200℃和 50MPa 和 60MPa 压力下烧结。	获得高纯度合成硅锭(98%—99%)	优点:合成硅锭可以应用于太阳能电池以外的产品。 缺点:成本更高。
	2023	Sah 等 ^[73]	化学处理 热处理	①使用甲苯溶液分离连接线;②在密封石英管中,800℃下热处理 7h,得到铜条、铅粉和锡粉;③将铜条浸入 20mL 的 5mol/L 硝酸溶液中,然后用 15mL 的 2mol/L 氢氧化钠处理,得到氢氧化铜沉淀;过滤沉淀物并在 170℃下加热 30min,得到氧化铜粉末;④在 15mL 稀硫酸和 1.5gm 锌粉的反应下得到铜粉。	回收 90%的铜粉(纯度为 97.27%)	优点:流程简单、直接和高效。
	2023	Yashas 等 ^[74]	机械处理 热处理 化学处理	①机械切割光伏板,缩小尺寸;②利用丙酮分离背板;③在氮气下 450℃高温处理 1h 分解 EVA,筛分铜条、钢化玻璃和太阳能电池;④采用硫酸-过氧化氢混合物在 70℃和环境压力下,对太阳能电池中的银选择性浸出;⑤使用铂炭催化剂提取金属(银和铜)。	得到高纯度银(>99%)	优点:①未使用刺激性有毒化学品,回收过程环保、绿色;②只需改变 pH 值就可以灵活调整回收率;③不涉及极端温度和压力;④氢气或空气消耗量最小,高效回收银。

EVA:乙烯-醋酸乙烯 Ethylene vinyl acetate

1 数据和方法

本研究的具体框架如图 1 所示。主要利用 VOSviewer 1.6.20 软件开展可视化文献计量分析,VOSviewer 软件被用于创建各种类型的可视化文献计量网络,对科学研究领域的聚焦和方向变化进行关注^[75],至今为止,该软件在车辆通信^[76]、医学^[77-79]、宗教学^[80]、海洋生态学^[81-82]和自然灾害^[83]等多学科领域的主题聚焦和方向变化方面皆得到广泛应用。光伏组件回收领域的相关文献来源于 Web of Science (WoS) 核心数据库,通过以下检索式检索:TS(主题词)=(PV OR Photovoltaic * OR solar) AND TS=(panel * OR module * OR cell * OR component *) AND TS=(waste OR recycling OR End-of-life OR EoL OR recovery OR scrap * OR repair),其中 TS 是在文章标题、摘要和作者关键词中进行主题词索引的字段。通过检索规定的 TS 字段,得到 2000 年 1 月 1 日至 2024 年 1 月 9 日所发表的 643 篇文献。

在此基础上,首先,本文剖析 643 篇文献的时空分布情况。其次,基于文献的 WoS Categories 进行学科叠加分析。依据 Loet Leydesdorff^[84]对 WoS Categories 中的 229 个主题领域聚合分析后所划分的 4 个集群,呈现报废光伏组件回收文章所属学科的分布和时间变化趋势,其中各点大小表示领域发文量多少。再次,为阐述不同国家(或地区)间的合作关系,本研究将出现在一篇文章中所有作者署名的所属机构所涉及的国家视为一次国家间合作,如果两国存在合作关系,则两国间存在链接(Links)。在此基础上,本研究使用 VOSviewer 软件测算国家间的链接强度(Link strength),即每两国的合作次数,合作次数较高,链接强度越大,其在分析中重要性越高,即总链接强度(Total link strength,TLS)越高,并以 TLS 表征不同国家间的合作次数和强度^[85],并排序比较每个国家间的合著关系强弱,通过 ArcGIS 软件进行可视化展示,从而可认识当前退役光伏组件领域的国际合作趋势,揭示该领域合作的热门国家,为后续选取合作伙伴提供支撑。最后,分析研究方向和热点。利用 VOSviewer 软件对 643 篇文章的作者和索引关键词进行共现和聚类分析,针对关键词中的缩略词、复数和破折号等问题,设立同义词库,对关键词进行输出和同质化处理。在原有数据的 2373 个关键词基础上,通过同质化过滤和设置任意两个关键词同时出现的次数即共现频率最小为 5 次,最后得到 88 个关键词符合标准,绘制关键词共现分析图,从不同维度揭示报废光伏组件回收的研究热点。

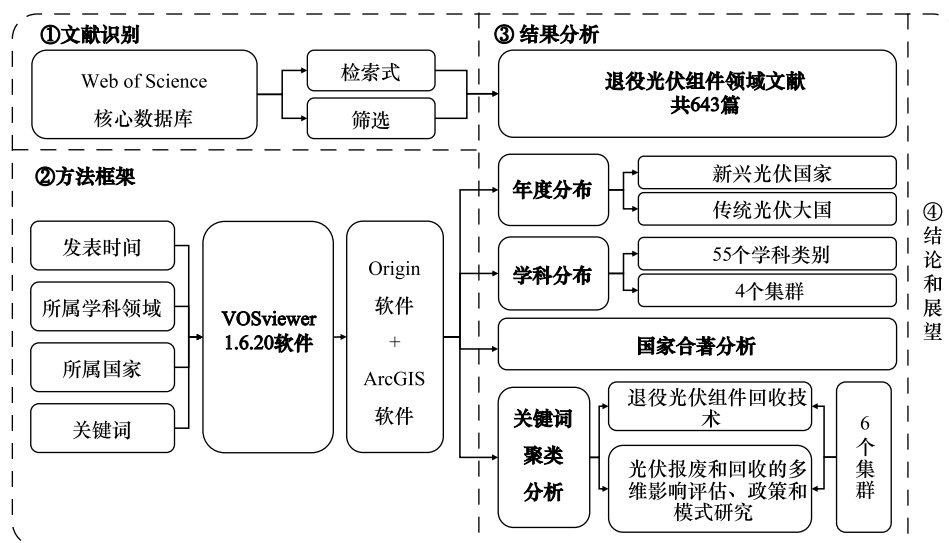


图 1 研究框架

Fig.1 Research framework

2 结果

2.1 年度分布

自 2000 年到 2023 年,退役光伏组件回收的相关研究增长迅速,文献数量由 2000 年 2 篇增长至 2023 年

643 篇,年平均增长率为 19.48% (图 2)。在此期间,相关研究经历了三个阶段,其中,第一阶段为萌芽期(2000—2011 年,32 篇),发文量年增长率较低(12.06%),生命周期评估法也在这一阶段被首次应用在报废光伏回收对减少环境影响的潜力评估上^[86—87];第二阶段为低速成长期(2012—2019 年,243 篇),增幅波动较大(14.55%),此阶段研究在技术研发方面主要关注如何提高效率^[88],在综合效果评估方面主要针对回收环节的经济性^[89—90]和政策体系的比较开展研究^[91—93]。第三阶段为高速发展期(2020 年—2023 年,368 篇),此阶段发文量年增长率升高(26.70%),更加重视先进且自动化的回收技术开发^[94—97]和全生命周期的环境影响评估^[98—103]。

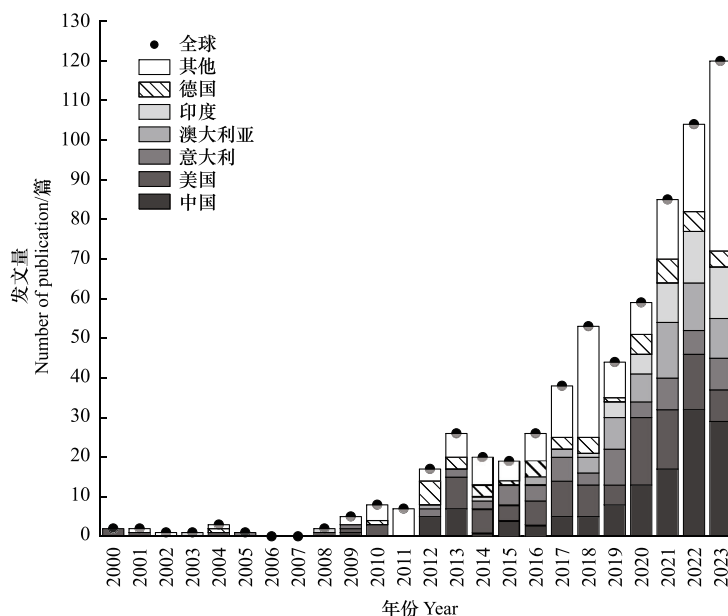


图 2 年度文献出版趋势与国家分布

Fig.2 Annual publication trends and country profiles

随后,选取发文量排名前六的中国、美国、意大利、澳大利亚、印度和德国进行年度分析。根据出版趋势将国家分为两类。第一类国家包括美国、意大利和德国等传统光伏大国,此类国家在 2005 年前开始重视对光伏组件回收和再利用研究,在 2020 年发文量达到最高,但近年发文量呈减少趋势。以最具有代表性的美国学者研究为例,首篇提及报废光伏组件回收的文章是 2000 年 2 月由美国能源部布鲁克海文国家实验室所发表的。自该篇文章发表后,美国学者在该领域的文献出版量呈逐年递增趋势,至 2020 年达到 17 篇,占同年全球所有文献出版量的 28.81%。但自 2021 年起,该国在该领域出版量逐渐减少,到 2023 年发表 8 篇。第二类国家包括中国、澳大利亚和印度等新兴光伏国家,这些国家在该领域起步较晚,普遍在 2012 年后研究逐步增多,且文献发表量至今始终呈持续增长态势。以中国和印度为例,其中,中国在 2008 年前于该领域的论文发表数量为 0,于 2009 年 5 月在 *Progress in Photovoltaics* 上发表首篇相关文章^[104]。自 2012 年起,中国学者在该领域的文献发表总体趋势逐渐趋近于全球平均增速,到 2023 年共已累计发表 130 篇文章,年平均增长率为 27.19%。而印度截至 2023 年已累计发表 49 篇相关研究,年均增长率达 13.68%。在 2017 年前,印度仅共发表该领域文献 3 篇,但在 2017 年至 2023 年间其年均发文量增加至 7 篇,并至今保持增长趋势。相较于传统光伏大国自 2000 年起开始大规模投入光伏产业,中印两国的首批大规模光伏项目和“国家太阳能计划”分别于 2009 年和 2010 年才开始实施。而考虑到光伏组件的平均使用寿命为 25 年,中印两国到 2030 年才将有大量光伏设备接近或进入报废阶段,较传统光伏大国晚约 5—10 年。因此,传统光伏大国的学术界在该领域的研究和发文高峰相对出现更早。此外,值得注意的是,随着光伏产业在全球的普及,越来越多的新兴国家和地区开始关注光伏组件的回收和报废处理问题。如东南亚、南美洲和非洲等新兴光伏市场逐渐开展相关研究,这导致除

以上六国外,包含韩国、西班牙和巴西等其他国家学术界在该领域的发文量自 2009 年起显著增加,年均增长率达 38.07%。

2.2 学科分布

本文从学科类别维度对报废光伏组件回收文献涉及的学科领域进行分布分析,以充分揭示退役光伏组件回收研究的跨学科协同发展的属性。结果显示,643 篇论文共包括 55 个学科类别(表 3),归类为 4 个集群(图 3)。报废光伏组件的回收和再利用的研究主要集中在能源、环境科学和绿色技术等学科,较少涉及生物医学和社会科学领域。其中,Physical Science(自然科学)集群在该领域中占据主导地位,占比约为 80.2%。进一步细分该集群后,论文主要分布在 Energy & fuels(能源与燃料)(267 篇)、Green & sustainable Science & Technology(绿色可持续发展科学与技术)(168 篇)、Engineering, environmental(工程学(环境))(150 篇)、Materials science, Multidisciplinary(材料学(多学科综合))(141 篇)、Physical Science(自然科学)(108 篇)五个核心学科类别中,主要集中在回收处理技术的研发^[105–106],是该领域的研究核心。自 2009 年起,报废光伏组件回收文献发文量总体呈增长趋势,这一态势在图 3(b)中表现尤为明显,尤其在 2020 年后增速显著,截止 2023 年,Physical Science(自然科学)集群发文量已较 2020 年增长 63.72%。Environmental Science & Technology(环境科学与技术)集群占比约为 15.92%(223 篇),自 2020 年起该集群发文量呈逐年增长趋势,研究主要集中在 Environmental sciences(环境科学)学科(211 篇),累计发文量占该集群的 94.62%,相关研究重点关注回收过程的环境影响评估^[50]。相比之下,Psychology & Social Sciences(心理学与社会科学)集群(44 篇)和生物学与医学(Biology & Medicine)集群(9 篇)的研究相对较少,仅占该领域累计发文量的 3.14%和 0.64%,与退役光伏组件回收领域的相关性相对较低,且所集中的学科较为单一。

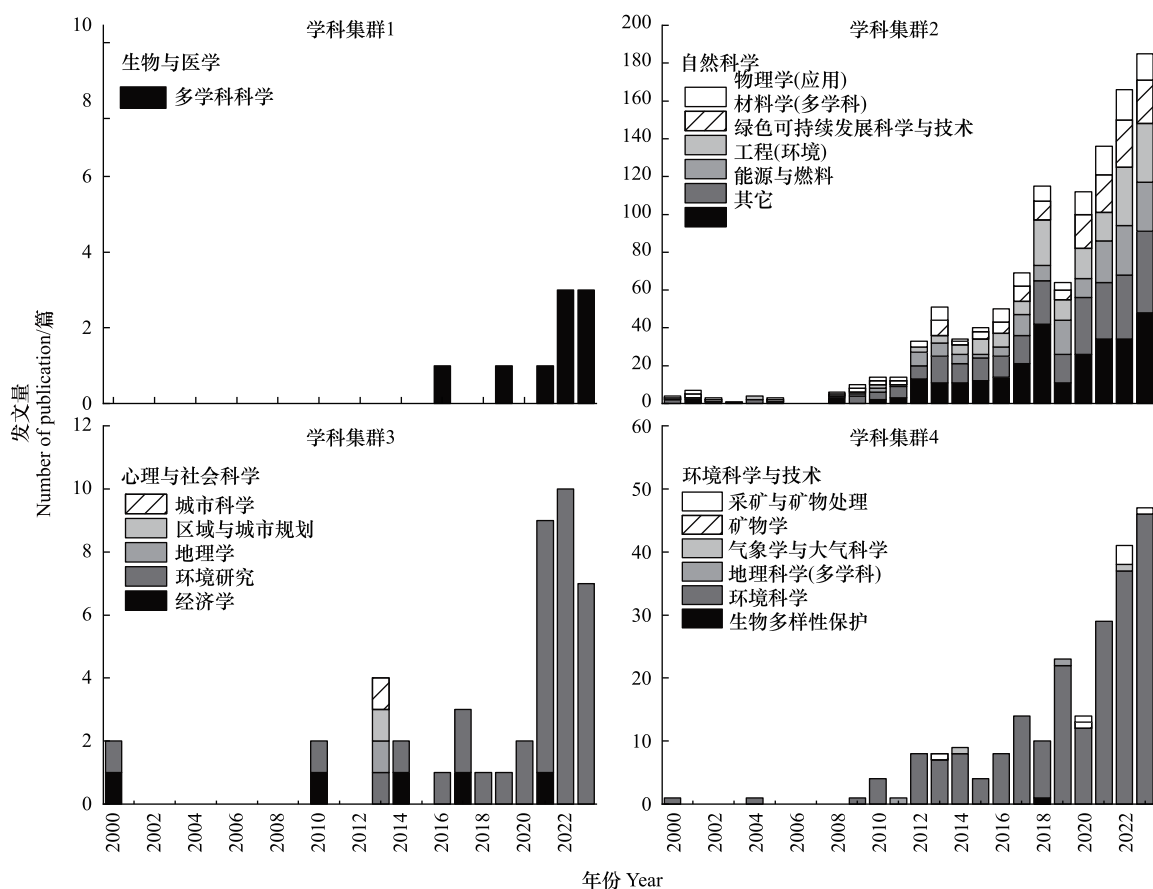


图3 学科分布分析

Fig.3 Subject distribution analysis

表 3 学科分布
Table 3 Discipline distribution

集群 Cluster	学科领域 Discipline	总篇数/篇 Total publications	发表年份/篇数 Year
生物学与医学 Biology & Medicine	Multidisciplinary sciences	9	2016(1), 2019(1), 2021(1), 2022(3), 2023(3)
自然科学 Physical Sciences	Automation & Control systems	1	2017(1)
	Chemistry, inorganic & Nuclear	1	2020(1)
	Chemistry, multidisciplinary	34	2013(1), 2014(2), 2015(4), 2016(3), 2017(1), 2018(3), 2019(2), 2020(4), 2021(3), 2022(6), 2023(5)
	Chemistry, physical	12	2013(1), 2017(3), 2020(1), 2021(1), 2022(3), 2023(3)
	Computer science, hardware & Architecture	2	2008(1), 2017(1)
	Computer science, information systems	2	2018(1), 2022(1)
	Computer science, interdisciplinary applications	6	2014(1), 2017(2), 2018(2), 2023(1)
	Computer science, theory & Methods	3	2018(2), 2021(1)
	Construction & Building technology	9	2013(2), 2015(2), 2018(1), 2021(2), 2022(1), 2023(1)
	Electrochemistry	1	2023(1)
	Energy & Fuels	267	2000(2), 2001(1), 2002(1), 2004(2), 2005(1), 2005(1), 2008(1), 2009(4), 2010(4), 2011(6), 2012(7), 2013(14), 2014(10), 2015(12), 2016(11), 2017(15), 2018(23), 2019(15), 2020(30), 2021(30), 2022(34), 2023(43)
	Engineering, aerospace	2	2023(2)
	Engineering, chemical	46	2012(2), 2013(1), 2014(2), 2015(2), 2016(4), 2017(1), 2018(4), 2020(3), 2021(8), 2022(6), 2023(13)
	Engineering, civil	6	2013(1), 2015(1), 2019(1), 2021(2), 2023(1)
	Engineering, electrical & Electronic	59	2008(1), 2011(1), 2012(7), 2013(2), 2014(3), 2015(2), 2016(6), 2017(3), 2018(14), 2019(3), 2020(5), 2021(8), 2022(1), 2023(3)
	Engineering, environmental	150	2009(1), 2010(2), 2012(7), 2013(7), 2014(5), 2015(2), 2016(5), 2017(11), 2018(8), 2019(18), 2020(10), 2021(22), 2022(26), 2023(26)
	Engineering, geological	1	2019(1)
	Engineering, industrial	6	2014(1), 2018(2), 2019(1), 2022(1), 2023(1)
	Engineering, manufacturing	5	2017(2), 2018(1), 2021(1), 2022(1)
	Engineering, mechanical	3	2010(1), 2014(1), 2018(1)
	Engineering, multidisciplinary	11	2003(1), 2012(3), 2018(2), 2020(2), 2021(1), 2022(1), 2023(1)
	Green & Sustainable science & Technology	168	2004(2), 2009(1), 2010(2), 2011(1), 2012(3), 2013(4), 2014(5), 2015(8), 2016(7), 2017(7), 2018(24), 2019(11), 2020(16), 2021(15), 2022(31), 2023(31)
	Instruments & Instrumentation	1	2021(1)
	Materials science, characterization & Testing	2	2017(2)
	Materials science, coatings & Films	5	2001(1), 2013(1), 2017(1), 2020(1), 2023(1)
	Materials science, composites	3	2018(1), 2021(2)
	Materials science, multidisciplinary	141	2000(1), 2001(2), 2002(1), 2005(1), 2008(1), 2009(2), 2010(2), 2011(2), 2013(8), 2014(2), 2015(4), 2016(6), 2017(8), 2018(10), 2019(5), 2020(18), 2021(20), 2022(25), 2023(23)
	Mechanics	2	2011(1), 2022(1)
	Metallurgy & Metallurgical engineering	18	2015(1), 2018(3), 2019(1), 2020(3), 2021(1), 2022(5), 2023(4)
	Nanoscience & Nanotechnology	11	2016(1), 2018(3), 2020(2), 2021(1), 2022(2), 2023(2)
	Nuclear science & Technology	2	2023(2)
	Operations research & Management science	2	2022(1), 2019(1)
	Optics	1	2017(1)

续表

集群 Cluster	学科领域 Discipline	总篇数/篇 Total publications	发表年份/篇数 Year
	Physics, applied	108	2000(1),2001(2),2002(1),2005(1),2008(1),2009(2),2010(2),2011(2), 2012(3),2013(7),2014(1),2015(2),2016(7),2017(7),2018(8),2019(4), 2020(12),2021(15),2022(16),2023(14)
	Physics, atomic, molecular & Chemical	2	2017(1),2020(1)
	Physics, condensed matter	13	2001(1),2010(1),2013(1),2017(2),2020(2),2021(1),2022(3),2023(2)
	Physics, fluids & plasmas	1	2023(1)
	Physics, mathematical	1	2017(1)
	Physics, multidisciplinary	1	2023(1)
	Polymer science	3	2020(1),2021(1),2023(1)
	Telecommunications	5	2008(1),2012(1),2017(1),2018(1),2020(1)
	Thermodynamics	8	2011(1),2014(1),2017(1),2018(1),2019(1),2022(1),2023(2)
	Transportation science & technology	1	2013(1)
心理学与社会科学	Economics	5	2000(1),2010(1),2014(1),2017(1),2021(1)
Psychology & Social Sciences	Environmental studies	36	2000(1),2010(1),2013(1),2014(1),2016(1),2017(2),2018(1),2019(1), 2020(2),2021(8),2022(10),2023(7)
	Geography	1	2013(1)
	Regional & urban planning	1	2013(1)
	Urban studies	1	2013(1)
环境科学与技术	Biodiversity conservation	1	2018(1)
Environment Science & Technology	Environmental sciences	211	2000(1),2004(1),2009(1),2010(4),2012(8),2013(7),2014(8),2015(4), 2016(8),2017(14),2018(9),2019(22),2020(12),2021(29),2022(37),2023 (46)
	Geosciences, multidisciplinary	2	2011(1),2019(1)
	Meteorology & Atmospheric sciences	2	2014(1),2022(1)
	Mineralogy	2	2013(1),2020(1)
	Mining & Mineral processing	5	2020(1),2022(3),2023(1)

2.3 国家合著分析

自 2000 年以来,共有 68 个国家(或地区)为报废光伏组件回收领域做出不同贡献。在 643 篇文献中,国家合作论文 454 篇,占总数的 70.61%,可见,在该领域大多数国家间合作较为密切。图 4 展示了参与退役光伏组件回收领域研究的国家(或地区)间的合著网络。

在研究贡献度方面,分各洲来看,大多数研究由欧洲(314 篇)和亚洲(305 篇)的学者完成(表 4)。分国别来看,累计发文量排名前三的国家分别是中国(130 篇,共被引 2379 次)、美国(109 篇,共被引 4049 次)、意大利(61 篇,共被引 3266 次)。这些国家研究多关注回收技术、回收过程的环境影响评估、经济可行性^[107]和投资回报率^[108]等方面。其中,中国(127 次)和美国(118 次)的篇均被引频次皆远高于其他国家,领域影响力显著,研究结果在全球范围内被广泛认可。此外,国家合作主要集中在中国(TLS=48,与 21 个国家合作)、德国(TLS=47,与 19 个国家合作)、美国(TLS=44,与 19 个国家合作)等传统光伏大国或发达国家^[109]。

2.4 关键词聚类分析

由关键词共现分析可知,recycling(循环)、life cycle assessment(全生命周期分析)、silicon(硅)、recovery(恢复)和 management(管理)等词影响力较大(图 5)。在经过映射和聚类后,退役光伏组件回收领域 88 个相关的关键词共形成 6 个不同的聚类团块(表 5)。

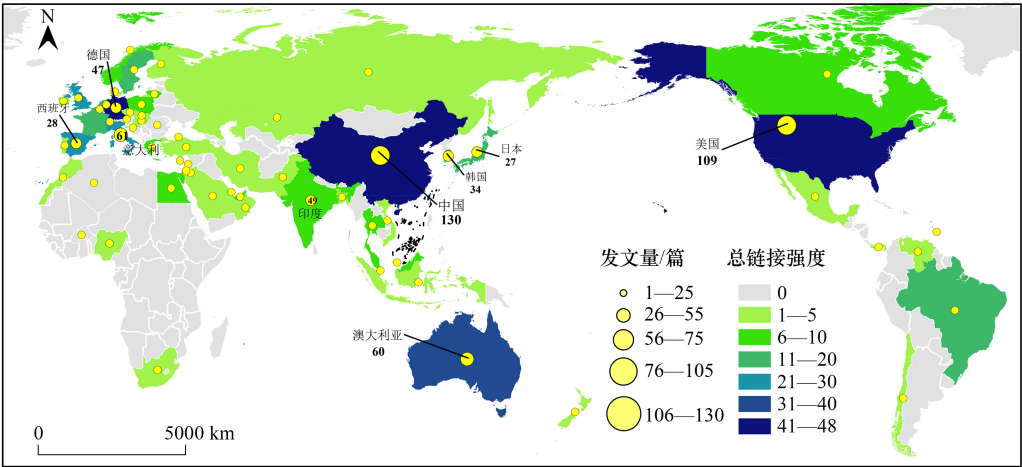


图 4 各国累计发文量和合作强度图

Fig.4 Cumulative number of publications and cooperation intensity

表 4 各州发文量和合作强度统计表

Table 4 Number of publications and total link strength of each country/region

序号 No.	洲 Continent	国家 Country	累计发文量 Total publications	共被引次数 Cited number	总链接强度 Total link strength
1	大洋洲	澳大利亚	60	1565	36
		新西兰	3	72	2
2	欧洲	意大利	61	3266	22
		德国	47	1293	47
		西班牙	28	616	22
		英国	22	1399	28
		波兰	21	467	7
		法国	17	413	19
		比利时	15	368	15
		希腊	13	672	6
		荷兰	12	480	18
		瑞典	11	237	11
		瑞士	10	371	21
		奥地利	9	41	0
		立陶宛	8	126	8
		挪威	7	184	7
		芬兰	6	116	5
		丹麦	5	159	5
		捷克共和国	4	6	1
		斯洛伐克	4	227	4
		爱尔兰	4	165	5
		克罗地亚	3	231	5
3	亚洲	匈牙利	2	6	2
		俄罗斯	2	27	1
		塞浦路斯	1	10	0
		葡萄牙	1	227	4
		罗马尼亚	1	0	0
		中国	130	2379	48
		印度	49	624	9
		韩国	34	1238	13
		日本	27	575	19
		马来西亚	9	592	9

续表

序号 No.	洲 Continent	国家 Country	累计发文量 Total publications	共被引次数 Cited number	总链接强度 Total link strength
4	南美洲	新加坡	7	140	3
		泰国	6	434	7
		土耳其	6	77	4
		孟加拉国	5	307	4
		伊朗	5	77	2
		阿联酋	4	474	7
		约旦	3	198	4
		巴基斯坦	3	0	4
		沙特阿拉伯	3	15	4
		卡塔尔	3	187	5
		印度尼西亚	2	16	1
		以色列	2	13	0
		阿曼	2	113	4
		黎巴嫩	2	35	0
		哈萨克斯坦	1	0	1
		巴勒斯坦	1	5	1
		越南	1	3	1
		巴西	17	674	11
		智利	2	47	2
		委内瑞拉	1	0	1
5	北美洲	美国	109	4049	44
		墨西哥	5	49	1
		巴拿马	1	5	1
6	非洲	巴巴多斯	1	31	1
		埃及	6	380	10
		南非	3	6	2
		阿尔及利亚	1	29	0
		布基纳法索	1	0	0
		摩洛哥	1	9	1
		尼日利亚	1	6	1

表 5 关键词聚类分布表

Table 5 Keyword clustering distribution

序号 No.	研究主题 Research topics	研究方法 Research methods	仪器或软件 Instruments or software	聚类 Cluster	关键词 Keywords
1	退役光伏组件回收技术	6E 分析、热力学技术(热重分析、差热分析和热体积分析法)和流体动力学等	X 射线衍射、扫描电子显微镜、能量色散光谱、电感耦合等离子体发射光谱等	1	Ag, copper, counter electrode, crystalline, delamination, efficiency, electrodes, fabrication, halide perovskites, hydrometallurgy, lead, lithium-ion batteries, nanoparticles, performance, silicon, stability, sustainability, thin film, toxicity, upeycling
				2	Adsorption, cadmium, cadmium telluride, cigs, concrete, extraction, gallium, glass, indium, kinetics, leaching, mechanism, printed-circuit boards, recovery, reduction, removal, separation, tellurium, water
				3	Behavior, degradation, EVA, impact assessment, pyrolysis, recycling, reliability, reuse, technology, thermal treatment
				4	Aluminum, cost, energy payback, greenhouse gas emissions, system, time (n=6)

续表

序号 No.	研究主题 Research topics	研究方法 Research methods	仪器或软件 Instruments or software	聚类 Cluster	关键词 Keywords
2	光伏报废与回收的多维影响评估、政策和模式研究	威布尔函数、物质流分析、生命周期评估、生命周期成本分析和成本效益分析等	GaBi 软件和 SimaPro 软件等	5	Amorphous-silicon, chemical treatment, circular economy, consumption, design, forecasting, life cycle assessment, model, optimization, renewable energy, reverse logistics, storage, supply chain
				6	Barriers, carbon, challenges, China, climate change, crystalline silicon, economic feasibility, energy, environmental impact, human health, industry, management, metals, pathways, policy, power, power generation, simulation, strategies

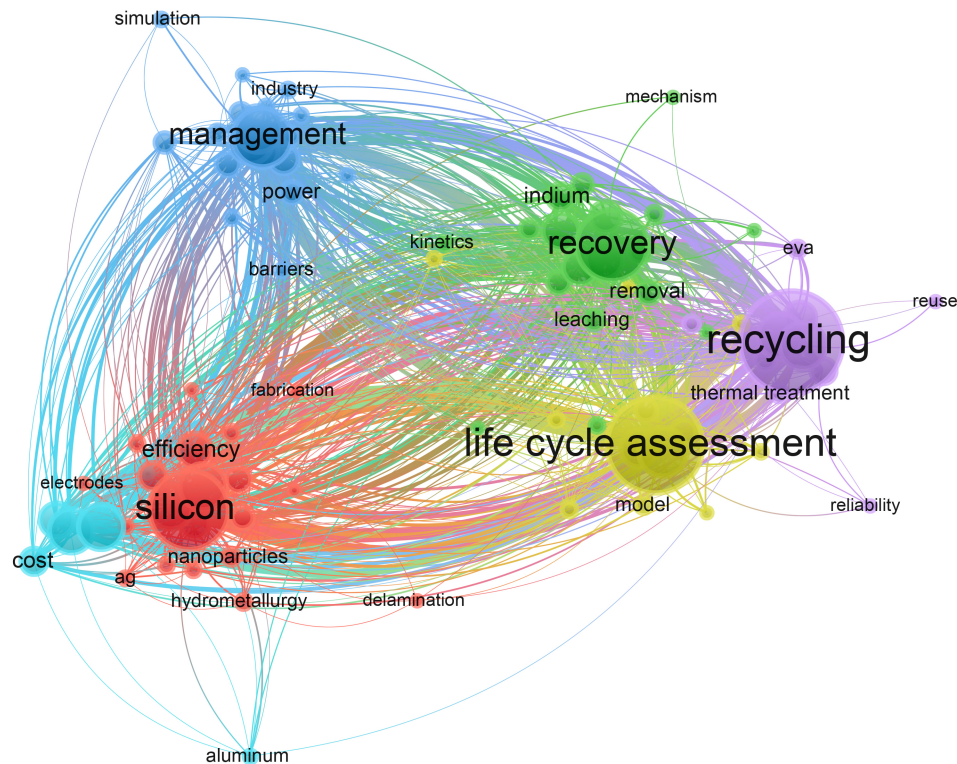


图 5 关键词共现分析图

Fig.5 Keyword co-occurrence analysis

2.4.1 退役光伏组件回收技术

退役光伏组件的处理主要通过物理破碎拆除和研磨分选^[110],获取玻璃和金属粉末等高分子材料^[111],使用高温热解的方法充分溶解薄膜,经由化学处理分离金属元素^[112]。一般来说,物理刨除分离对原材料损害程度较小^[113],能够最大程度保留原料价值,而化学处理的效率更高、回收金属种类多,能够快速处理大批量报废组件并获取高纯度金属^[56]。本节从以下两部分进行概述,并在表 2 中对现有回收工艺进行总结。

(1) 以低排放和高效为目的创新提取工艺

对退役光伏组件的非金属废物(玻璃、乙烯-醋酸乙烯共聚物)和金属废物(铝、硅、铜、银和金)等 24 种物质和 6 类材料设定不同回收处理情景,分解主要废物流,发现高价值物质的回收量将约占所有废物量的 90%^[101],且具有较高的经济价值^[103,114]。因此,提取和回收这些高价值材料至关重要,但在金属处理的蚀刻

和浸出过程中,常使用含有强酸、强碱和氰化物等有毒或有害的化学试剂,会危害人体健康和环境。因此,在第一集群和第二集群的研究中,为实现重要资源高效回收过程中保护环境 and 健康的目标,学者在物理层面研发新技术和优化传统技术。例如,将含砷化镓的光伏废料和氟氯烃进行水热共处理,显著减少温室气体排放量,节省了处理成本,产生可观的经济效益^[115]。同样,逐层萃取方法也被用来回收钙钛矿太阳能电池中昂贵且掺氟的氧化锡涂层玻璃板,以隔离有毒物质^[116]。此外,Huang 等^[12]利用顺序电解沉积和薄层电阻监测技术对硅光模块进行分解和回收,所得到的金属不仅符合太阳能行业的原料标准,且其几乎为零的垃圾填埋减少了对环境的负面影响。这些创新工艺都提高了硅、银等金属的回收纯度,抵消了回收过程中经济和环境方面的消极影响^[8]。

然而,仅通过物理处理法无法完全分离所有材料,所提取的金属纯度也较低,还需要匹配复杂的分选操作。因此,化学处理也是极为重要的回收步骤^[117]。如在已有研究中,通过施加化学蚀刻溶液去除金属杂质^[10]、对比多种浸出剂后选择最优组合萃取钢和镓、采用多种化学催化体系和电积工艺选择性浸出和提取银^[74]、使用酸性和碱性方法分离硅、铝和银^[61]等工艺,可以得到回收率达 96% 以上的金属材料。但值得注意的是,化学试剂的溶胀时间具有不确定性,在分离过程中也可能带来毒性风险,现今学者们更致力于优化浸出参数,开发和选取新型绿色环保试剂,以期望在有效回收有价材料的同时,又能将环境影响最小化。其中,有学者依次使用硝酸和氢氧化钾溶解银和铝电极,并使用含磷酸的蚀刻膏在不同温度下去除抗反射涂层提取硅片^[60]。也有学者创新使用低毒、高沸点、低溶胀能力的新型绿色分离试剂 DMPU ($C_6H_{12}N_2O$) 和 DBE ($C_{21}H_{36}O_{12}$) 来分离光伏组件中的不同层^[118-119]。这些方法不仅节约了能耗,也具有更为显著的环保性能。

(2) 采用热解和热处理技术回收退役光伏组件

针对热解和热处理技术在光伏组件回收环节的应用和其对环境影响方面的研究在第三集群中成为研究焦点。热处理法因其能够在无氧或低氧条件下分解有机物质,在光伏模块回收过程中被广泛应用。热解法则是通过加热至一定温度,利用乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)的热塑性,使已经固化的 EVA 胶膜软化以便于拆解^[120],这些方法在退役光伏组件回收中应用潜力高,能够高效回收背板和玻璃等材料,同时产生负面环境影响较小^[64,121],降低了行业碳排放程度^[122]。

研究表明,在 500℃ 的温度下进行 30min 的热解,能有效去除超过 99% 的 EVA,实现 91.09% 的太阳能电池回收率^[65,67]。也有学者对热解过程进行优化时发现。加热的温度越高,则剥离背板所需的时间越短^[123]。同时,学者们为提高回收效率和降低环境影响,对热处理技术进行了多方面的拓展和创新。首先,Doni 等^[64]提出将电热处理添加到回收环节中,通过改变物理特性来实现玻璃和 EVA 的分离。这一过程不仅处理时间比化学处理时间短,更是显著弱化了环境影响。其次,也有学者将整个热处理过程分为两个不同的温度阶段进行^[66,68]。在第一阶段,以较低温度加热光伏组件,软化和分解背板和封装材料,便于后续处理;在第二阶段,升高加热温度以促进光伏组件中金属材料的分离,这种方法保证了玻璃板的完整性、硅和铜等金属的高纯度有效回收。

2.4.2 光伏报废和回收的多维影响评估、政策和模式研究

已有大量研究关注报废光伏组件的回收技术,但考虑到现有回收体系存在程序复杂、流程较长和污染大等问题,仍需要进一步剖析低成本、高效率、环保化、产业化和系统化的回收管理体系。结合第五集群和第六集群的关键词,对未来光伏报废预测进行总结,通过学者设立有关生产工艺^[124]、面板类型^[125-126]、回收处理方法^[52,127]和替代装机时间^[128]的不同情景进行全生命周期能源消耗量、工业用水量、生态毒性、土地利用和全球变暖潜势的综合评估概述,以考量比较光伏产业链中回收流程的资源效率、生态环境和人体健康的潜在影响,进而为光伏废弃物回收过程的环境监测和网络优化提出有效举措^[129],最大限度地减少废物产生和资源消耗,具体可分为以下三部分。

(1) 未来光伏报废时空预测与对比

全球光伏报废量的时空预测是提前部署回收设施和设计回收策略的基本前提。国际可再生能源机构

(IRENA) 和国际能源署 (IEA) 对未来退役光伏量进行预测发现, 自 2030 年到 2050 年全球退役光伏组件量在总体上将呈上升趋势。到 2050 年后, 中国将成为光伏报废量最多的国家 (1350—2000 万 t), 其次是美国 (750—100 万 t)、日本 (650—750 万 t) 和印度 (440—750 万 t)。同时, 也有学者对各国进行不同年份区间和回收情景的光伏报废量预测, 表 6 对现有研究中光伏报废量的预测结果进行汇总。

表 6 光伏废弃物量预测结果
Table 6 Photovoltaic module waste streams forecasting results

年份 Year	文献来源 References	国家/组织 Country/ Organization	研究区间 Study period	报废量预测 Waste projection	主要废物流分析 Major waste flow analysis	回收量预测 Recycle projection
2016	国际可再生能源机 构和国际能源署 ^[2]	全球	—2030 年 —2050 年	170—800 万 t 6000—7800 万 t		
2018	Santos 等 ^[130]	西班牙	2020—2030 年 —2050 年	10 万 t 70 万 t		
2019	Domínguez 等 ^[131]	美国	2030—2060 年	980 万 t	铁:44% 铝:32% 硅:18% 铜:5% 锌:0.4% 镁:0.1%	银:1816t 金:27t 镓:1073t 铟:515t 碲:2010t
2019	Mahmoudi 等 ^[90]	澳大利亚	—2040 年 —2050 年 2031—2047 年 2048—2060 年	130 万 t 550 万 t 817941t 100—800 万 t	非金属材料:608302t 贵金属:340.9t 贱金属和特殊金属:124978t 有害物质:299t 关键物质:38660t 其他金属:76363t	
2020	张钦等 ^[5]	中国	—2050 年	6462.3 万 t	银:3134.5t、 碲:228.1t 镉:463.4t 镓:58.5t 铟:29.8t 铅:263.9t 硅:43735.4t	
2021	Mahmoudi 等 ^[103]	经济合作与发展 组织 36 国	2001—2050 年	2500—2850 万 t	贵金属:130t 有害金属:75t 关键物质:125t 贱金属和特殊金属:4.58t 其他金属:2.37t 非金属材料:25.69t	
2021	Gautam 等 ^[132]	印度	2020—2047 年	2.95 亿 t	玻璃:51% 铝:31% EVA:5% 铜:6% 硅:1%	
2022	Oteng 等 ^[133]	南澳大利亚	—2050 年	1.97 亿 t 109007t		
2022	Tasnim 等 ^[134]	孟加拉国		33205.36t		玻璃:24468t 铅:2656.43t 硅:1404.92t 铜:49.89t

续表

年份 Year	文献来源 References	国家/组织 Country/ Organization	研究区间 Study period	报废量预测 Waste projection	主要废物流分析 Major waste flow analysis	回收量预测 Recycle projection
2022	Kastanaki 等 ^[114]	欧盟 27 国	—2050 年	1430—1850 万 t	玻璃:848.67 万 t 铝:196.72 万 t 钢:116.28 万 t EVA:81.82 万 t 铜:11.27 万 t 镁:6.19 万 t	
2022	Zhang 等 ^[135]	中国	2025—2040 年 (悲观情景) 2030—2040 年 (正常情景) 2035—2040 年 (乐观情景)	3610 万 t >1500 万 t 670 万 t		
2023	Kabir 等 ^[136]	孟加拉国	2025—2045 年	196250t		玻璃:144601t 铝:15700t 硅:8321.54t 铜:1394.84t
2023	Sharma 等 ^[137]	印度	—2040 年	正常情景: 664 万 t(早期损失) 548 万 t(常规损失) 目标情景: 1030 万 t(早期损失) 851 万 t(常规损失)		
2023	Song 等 ^[138]	中国	2000—2050 年	1.34 亿 t(早期损失) 7181 万 t(常规损失)	多晶硅玻璃: 63.45%—63.71% 铝:15.89%—16.02% 钢:10.93%—11.19% 其余 18 种金属:2.2%左右	铝:1150—2130 万 t 银:3.42 万 t 银:2.36 万 t

在该部分,本综述将 IRENA 与表 6 所列各学者的研究结果进行对比,发现不同学者和机构在报废量的预测结果上存在巨大差异。例如,Song 等^[138]认为 2000—2050 年间,中国预计产生 0.72—1.34 亿 t 的光伏废弃物;Domínguez 等^[131]的预测指出到 2050 年,美国累计产生的光伏退役量将达到 550 万 t,这都和 IRENA 的预测不同。而造成这种预测结果差异的原因是不同的发展情景和假设条件,如光伏寿命、装机容量和计算方式等。

首先,光伏组件寿命的规定是影响报废量预测的关键要素。不同类型光伏设施的寿命长短不同,且其寿命受环境条件和制造工艺等方面的影响。因此,学者们对光伏组件的寿命进行不同假设,例如 IRENA^[2]和 Domínguez 等^[131]假设使用寿命为 30 年进行预测,而在 Gautam 等^[132]的研究中,使用寿命的假设则为 25 年。同时,寿命长短和光伏组件的损耗相关联,故学者常设计不同情景表征差异化的损耗率,包括常规损耗、固定损耗和早期损耗等。IRENA^[2]、Song 等^[138]、Santos 等^[130]和 Sharma 等^[137]主要考虑常规损耗和早期损耗;Mahmoudi 等^[90]考虑常规损耗和固定损耗;Gautam 等^[132]综合对比三种损耗情景来预测光伏报废量。其次,未来光伏装机容量的预测将直接影响未来报废量的评估。有学者认为新冠大流行使得光伏产业供应链断裂,致使 2020 年新增装机容量减少^[137],也有学者认为光伏部署政策的不确定性会改变未来装机容量的发展^[114,132],而学者所预估的未来装机容量的不同导致了其所得结果与 IRENA 的预测形成较大差别。此外,替代装机容量的增长也将对光伏组件报废量的预测产生影响,Zhang 等^[135]发现在失效光伏组件被替代的情景下,到 2040 年替代光伏组件的比例将增长至近 30%,报废数量也将大幅增加。最后,数据选取和评估模型的不同也是造成结果差异的重要原因。已有研究中,学者常选取世界领先生产商或指定国家太阳能制造商的面

板数据,使用威布尔函数^[90]、市场供给 A 模型^[5]、功率重量比^[137]和灰色模型^[139]等不同方法进行寿命和报废量的预估,以上两个因素的选择不同导致了预测结果的差异显著。综上,考虑到这些因素的不确定性和对预测未来报废量时空变化所产生的不同影响,未来有必要加强光伏报废量、废物流和回收量的时空变化特征研究,以此为依据开展对退役光伏组件回收流程的综合评估和产业部署策略的制定。

(2) 社会-经济-生态-环境多重影响评估

相较于将光伏废物直接进行垃圾填埋,通过综合利用和机械分拣、化学处理和热处理等回收工艺处理这些报废光伏组件,能够分离和回收不同材料(如玻璃、铝、铜和硅等)^[140],并有效地去除有毒有害的物质(如铅和镉),减少固体报废物规模、资源浪费和因直接填埋所带来的生态环境影响^[141],生态毒性和人体毒性也进一步减弱,对人体健康造成的危害相对较小^[142—143]。研究表明,在光伏产业链中加入回收环节,可以显著降低光伏系统对环境的整体影响,淡水富营养化潜势、非生物消耗潜势和人类潜在非致癌毒性影响等指标上的下降尤其明显^[144]。相对于从自然资源开采到材料生产过程,直接回收报废光伏组件也能够减少原材料和能源投入^[107,145],进而大幅降低生态环境影响、碳排放和污染物排放^[12,140—141],如回收晶硅光伏能大幅降低再生生产过程的电力消耗,减少电力的温室气体排放量^[98]。同时,报废光伏组件回收产业的发展将促进当地就业、税收、教育、对外贸易等方面的发展^[126],这对欠发达地区的社会经济发展尤其重要。例如,在光伏组件的回收、拆解、运输、销售等环节和产业发展过程中,对掌握相关技术和管理的人才需求也很大,一方面能创造大量就业机会^[51],进而带动相关企业的经济活动与税收^[146];另一方面能够促进当地相关教育和培训的发展,进而提高综合人才素质和技术水平^[147]。在回收价值上,再生材料能够作为原材料进行销售,由此对当地带来税收的增加并影响经济效益^[107]。同时,与购买新的光伏组件相比,使用由回收材料再利用生产的光伏组件可以显著降低生产成本和光伏电站的投资成本^[148]。

然而,报废光伏组件回收和材料循环再利用具有双重效益,尽管能够减少生态环境影响,解决原材料供应不足的问题^[149],但回收处理过程本身也会消耗能源和排放污染物^[150]。例如通过热处理回收光伏组件时,EVA 胶膜在蒸发过程中会排放气体,甚至可能会造成水污染^[151];报废光伏组件中稀有金属等材料的处理同样也会产生污染物并影响环境^[11]。因此,需要采用适当的技术和方法来最大限度地减少环境影响。已有研究针对光伏组件中有害元素铅的捕获、浸出液的回收和废水的处理进行了设计和试验,并开展量化评估^[152],发现通过光解和热解可以有效控制处置阶段的碳排放^[122]。此外,回收技术创新和优化回收策略也可以大幅度减少处置过程中排放的温室气体^[153—154]。

(3) 回收政策和模式研究

现有电子报废物和退役光伏组件回收的主要制度是生产者延伸责任制^[19,155],即要求制造商负责处理或处置消费后产品。生产者参与收集网络的建设将提高光伏回收系统的整体效率和经济可行性^[156],从源头开展管理,有效加强制造商的责任^[19]。目前生产者延伸责任制按照处理实体不同可划分为原始设备制造商回收、集合回收和第三方回收^[157]。其中,原始设备制造商回收使得制造商承担了报废产品和报废物的回收责任,此时光伏组件制造商只对自己生产的组件负责;集合回收模式下,制造商或生产者通常建立合作或设立回收体系,共同负责所有组件的报废管理;第三方回收中,回收企业或组织承担了报废产品或报废物的回收和处理责任,生产者可以合作或委托第三方来管理报废物。

此外,相关研究也探索了诸如逆向物流网络^[133,158—159]、行业协会回收和区域电网责任回收^[11]等其他电子报废物回收模式。但从经济性角度考虑,没有政府引导和产业界参与情况下的制度很难落地实施^[160],如非法倾倒、焚烧和不规范处理有毒物质和污染物的不合规现象也会时有发生。这不仅对生态平衡产生破坏性影响,导致有害物质释放,严重污染土壤、水源和大气,而且会对正规回收商的资源供应和安全性产生冲击^[161],还可能通过食物链或空气传播有害物质,损害从事回收工作的人员的身体健康。因此,报废光伏组件循环再利用产业的健康发展,仍然需要依靠政府、大规模回收组织或机构多方协调确保退役光伏组件回收与循环再利用管理系统的运行^[90],实现回收企业的长期发展^[109]。

从政策管理的角度来看,补贴和惩罚在不同成本投资中的有效性有所差异^[162],如光伏制造商是否回收电子垃圾与政府补贴和处罚制度密切相关^[163],且电子垃圾的再制造利用率对政府补贴的分配策略有较大影响^[164]。为确保退役光伏组件回收产业的合规发展,减少不合规企业在回收过程中的环境污染,应增加对合规企业的补贴以支撑其发展^[162]。基于政府补贴对正规和非正规逆向供应链的研究表明,正规回收商的最佳选择是建立自己的收集渠道或选择其他集中独立收集渠道^[165],需要在一定阈值内给予无证回收企业补贴,超过上限将给政府带来较大的财政负担,低于下限会影响未认证回收企业的技术升级^[166]。此外,还能通过基于生命周期共生的光伏电池板循环利用管理方法,将光伏组件报废物与其他工业废物相结合的方式,使不同类型回收企业间实现经济互动^[167]。也有学者认为应该在企业不同的发展阶段或在光伏产业的不同流程(设计、制造、使用和回收)施行对应的管理政策,实现政府、回收者、消费者三方的稳定协作^[90,168]。最后,考虑到非正规企业组织出现回收效率低下、回收材料的品质下降等问题,可能是因为没有规范的操作流程。Li等^[157]认为可以通过制定回收流程标准和技术规范,将统一的生产标准纳入光伏企业,加强对回收过程的监督和检查,确保回收的有效性和安全性,减少分类处理的时间投入,确保回收过程的规模化批量处理,从而提升回收效率并节约时间成本。在生产端,生产标准能约束生产材料的组成,促使光伏回收企业能够对光伏组件中的掺杂剂进行一致的分类和分离,并将其放入不同的处理工艺中。在回收端,可以通过鉴定回收企业的回收率是否达标,规范回收组织的行为。还可以制定预付报废回收阶段费用的优惠政策,吸引更多回收组织对报废光伏处置的投资。

3 结论和展望

3.1 结论

(1) 退役光伏组件处理领域的研究起始于 2000 年,发文量呈增长态势,年平均增长率为 19.48%,至今已步入该领域研究的高速发展期。其中,中国在该领域发展速度快,研究成果多,仅 2023 年一年的发表量就已达到全球最高,在全球论文发表量中占比 24.17%,且与 21 个国家开展学术合作,在该领域的研究中处于核心地位。

(2) 退役光伏组件回收技术这一主题着重探讨了研发高效高价回收关键金属的工艺、以低排放为目的的技术选取和创新开发、热解和热处理回收技术等热点问题。学者们主要在全生命周期内对碲、镉、镓和玻璃等材料的不同种回收工艺进行比较^[169—170],研发可以提高光伏废弃物处理效率、提取纯度和环境友好型属性的技术^[171—172],以达到在回收过程中减弱金属材料毒性、降低环境风险、提高分离和提取精度的目的。而热解和热处理技术因其可以改变太阳能组件的物理和化学性质作为技术研发的一大热点,在 EVA 去除、金属剥离和再利用环节被广泛使用^[173],提高了光伏组件的整体回收效率和环境可持续性。

(3) 退役光伏组件回收的综合评估和政策规制主要包括未来光伏报废量预测、回收环节带来的社会-生态-经济-环境影响、回收管制政策和模式等热点。通过对未来光伏报废量的模拟预测,可以确定退役组件收集点、回收点的最佳位置和规模,降低基础设施建设、废物运输和网点运营成本,以便进行更高效的回收。此外,报废光伏组件的高效回收处理与材料循环利用具有两面性,虽然在解决资源回收、减少废物负面环境效应和增加就业、刺激市场经济增长方面具有较大潜力,但也需要重视报废光伏组件回收过程中的能源消耗、污染物排放、有害元素处理、废水处理和回收成本高等一系列问题^[174—176]。

3.2 展望

尽管大量的研究对回收技术和产业管理进行创新和规划,但现今对于该领域研究和退役光伏回收和处理产业的重视水平仍较低,且面临着一系列挑战。首先,退役光伏组件回收和再利用工艺尚存在不完整性,实现高效、清洁的提取和循环利用仍需依赖多环节和多工艺类型的复杂流程体系,同时,虽然其减轻了对环境的负面影响,但仍不可避免提取过程中污染物的产生,因此,完备且更为清洁的回收技术仍有待开发;其次,光伏设备的使用寿命长,预计可达 25—50 年,然而当前现有光伏设备报废量和循环再利用产业的规模较小,对未来

报废量和风险影响的量化评估仍依赖案例数据或情景假设,数据范围具有局限性,难以更好地反映影响情况^[11,177],相关评估方法和政策制定仍有待完善创新^[157];最后,经济激励机制的不足和政策框架的不完善限制了回收企业的投资意愿,使得其在操作过程中面临风险性和不确定性^[178],以致多数企业处于观望状态,阻碍了该产业的健康发展。因此,结合已有文献,本文就未来研究重点和产业管理提出以下建议:

未来研究方面,主要包括以下四部分。

(1) 优化开发清洁、高效和完备的回收再利用工艺流程,加强其回收工艺流程的环境影响评估和控制。一方面,基于对已有退役光伏组件回收工艺的整理发现,组合回收工艺成为回收技术的研究趋势之一。创新采用多步回收的清洁、绿色工艺,将物理分离、化学试剂溶解和热处理法等传统工艺和各种先进新型的分离提取技术相结合,寻找一种可以实现对光伏组件中高价值材料有效分离、回收和再利用的完备工艺,可以强化回收环节的环境友好性和可持续性,减少能源消耗、废弃物排放和环境污染问题,进一步推动光伏回收技术的高效发展、完善;另一方面,随着硅光伏转换效率已接近理论极限,及生命周期对环境的影响越来越受到关注^[179-180],以钙钛矿光伏为代表的新兴光伏技术因其成本效益和高转换效率逐渐成为潜在的替代方案^[181-182]。这些新兴技术有可能带来光伏行业的结构性变革^[2,183],并可能对未来几十年内环境产生重大影响^[184-185],尤其在回收过程中所产生的铅暴露可能会对人体和环境造成毒性。因此,针对钙钛矿光伏等新型技术,亟需加强其回收工艺流程的环境影响评估与控制,以确保其在推广应用过程中能够有效减少对环境的负面影响。

(2) 基于机器学习构建光伏报废量和残余寿命预测模型。当前,机器学习已被广泛应用于温室气体排放量^[186]、能源需求^[187-188]、能源贫困^[189]和家庭碳排放的驱动因素^[190]等方面的预测评估中,并展现出较高的预测精度。同时,已有研究表明机器学习在太阳能电池和光伏板等相关材料的寿命预测方面具有显著优势。在考虑到光伏组件的复杂性能退化特征及其受环境、使用方式等多因素影响的特点的基础上,机器学习能够通过多维数据的高效分析实现对组件报废量和残余寿命的精准预测^[191-192]。因此,未来可以进一步利用机器学习算法对不同损耗模式 and 政策规制情景进行时空相关性建模。通过更短的训练时间和更少的数据模拟得到更精确的报废时空预测量和组件残余寿命,避免过早或过晚维修产生的时间和经济成本,减少因故障而提前报废的现象发生,以设计更有效、效益更高的管理策略和回收系统。

(3) 建立高分辨率的市县级退役光伏组件和精细化信息库。利用机器学习算法进行预测模拟往往需要大量高质量、精细化样本数据。然而,目前退役光伏组件的相关数据存在时空维度的缺失,尤其在市县级范围内缺乏精确的人口分布、气候条件、光伏组件地理分布以及运维状况等精细化数据^[193-194]。这些数据的缺失直接影响了对光伏组件报废量的准确预测、流向把握和对政策环境效果的评估。未来仍需通过实地调研和跟踪多案例、多地区光伏报废量的时空动态变化,补齐市县级退役光伏组件数据缺口,建立包括组件类型、数量规模、使用年限和报废原因等信息的退役光伏数据库,全面了解已有光伏可能存在的技术问题,追踪退役光伏组件流向和处理方式。同时,构建包含地理位置、人口分布、建筑类型、物流网络、运维信息和气候气象等高分辨率时空数据集,为回收技术的创新研发、组件的寿命和报废量预测提供数据支撑。在此基础上,基于机器学习算法,弥补当前因数据不足导致的预测偏差,并结合已有政策进行不同退役组件处理方案的多维度影响评估,为组件处理和二次利用的政策制定和实施提供科学依据。

(4) 兼顾社会-经济-生态-环境多目标的回收政策体系和精细化设施布局研究。回收企业选址不仅影响自身运营成本,还会因政策体系和布局规划的差异,对周边社会、经济和环境产生影响^[192,195-196]。因此,一方面,未来研究应着重于在不同政策体系和回收模式下,光伏组件使用回收对社会、经济和环境长期效益的评估^[197],探索在各类社会 and 气候情景中不同经济激励措施、光伏电站分布和回收企业的地理位置对光伏组件回收行为的作用路径^[11,198]。另一方面,从社会因素角度出发,系统评估能源政策和融资方案^[199],制定符合国际废物处置标准的光伏组件回收政策体系,对回收点、回收企业和回收运输路线进行合理且精细化的布局,实现回收网络的优化配置,探索如何通过政策引导促进回收技术创新和产业升级。

产业管理方面,主要包括以下三部分。

(1)开展光伏全产业链协同。对生产端进行相对统一的管理,设立统一设计和材料选用标准,通过模块化、组件化生产进行改善,以提高回收工艺的适用率^[200];在设备装机使用阶段,充分考虑城市异质性在不同光伏部署形式和策略下会带来不同影响^[201],根据城市资源利用和提纯能力进行光伏部署,便于后续回收;对回收端进行全过程监控和信息化追溯,完善光伏组件处理责任机制,简化设计回收过程和优化分拣处理流程,根据固体废物代码对报废光伏组件进行标准化和规范化的分类回收,以降低报废光伏组件的回收成本,提升报废光伏组件回收物质在再生产过程中的利用效率^[11]。此外,回收端标准化体系尚需进一步建立完善,特别是针对回收流程的统一管理与标准制定,以确保回收链高效运作。

(2)推动退役光伏组件的绿色回收技术突破。综合考虑经济、环保效益,加强产业研融合,由行业协会、科研机构和固废回收企业联合攻关,优化回收处置工艺,重点解决报废光伏组件综合利用技术路线和成套技术设备研发等难题。积极推动更为环保的物理回收方法,比如通过挤压或切割成型材和板材,以更低成本实现材料的高效率再利用,并显著减少对环境的负担。同时,投入资源研究和开发低能耗、零污染的化学回收工艺,利用特定的溶剂和催化剂在控制条件下实现玻璃纤维与树脂的高效分离,提高回收率并大幅降低有害物质的排放。

(3)深入优化退役光伏组件资源化利用,构建光伏废弃物回收新型模式与体系。一是支持光伏组件制造企业通过自主回收、联合回收或委托回收等模式,主动提供回收服务,打通产业链“最后一公里”光伏退役回收与循环利用。二是支持第三方专业回收企业开展退役光伏组件回收业务,支持发展退役光伏组件拆除、运输、回收、拆解,提供“一站式”服务模式。三是延长产业链,鼓励生产制造企业、发电企业、运营企业、回收企业、利用企业建立长效合作机制,畅通回收利用渠道,加强上下游产业衔接协同,通过同伴(同行业)态度等社会因素提高光伏组件回收的循环性和经济性^[202]。引导退役光伏机组拆除后进行就地、就近、集中拆解。引导再生资源回收企业规范有序回收废钢铁、废有色金属等再生资源。四是增强对退役光伏组件回收、利用和处置全过程的环境监管力度,确保所有操作严格遵循国家环保标准,从而减少对环境的不良影响。

参考文献(References):

- [1] Majewski P, Al-shammari W, Dudley M, Jit J, Lee S, Kim M, Kim S. Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory approaches. *Energy Policy*, 2021, 149: 112062.
- [2] Weckend S, Wade A, Heath G. End of life management: Solar Photovoltaic Panels. United States: IRENA and IEA-PVPS, 2016.
- [3] Sica D, Malandrino O, Supino S, Testa M, Lucchetti M C. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2934-2945.
- [4] International Energy Agency. Clean energy market monitor. Paris: IEA, 2024.
- [5] 张钦,傅丽芝. 中国光伏组件报废量的预测. *环境工程*, 2020, 38(6): 214-220.
- [6] Salim H K, Stewart R A, Sahin O, Dudley M. Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 537-554.
- [7] Chowdhury M S, Rahman K S, Chowdhury T, Nuthammachot N, Techato K, Akhtaruzzaman M, Tiong S K, Sopian K, Amin N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 27: 100431.
- [8] Ardente F, Latunussa C E L, Blengini G A. Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. *Waste Management*, 2019, 91: 156-167.
- [9] Marwede M, Berger W, Schlummer M, Mäurer A, Reller A. Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste -Current feasible processes. *Renewable Energy*, 2013, 55: 220-229.
- [10] Kang S, Yoo S, Lee J, Boo B, Ryu H. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 2012, 47: 152-159.
- [11] Xu Y, Li J, Tan Q, Peters A L, Yang C. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, 2018, 75: 450-458.
- [12] Huang W H, Shin W J, Wang L D, Sun W C, Tao M. Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. *Solar Energy*, 2017, 144: 22-31.
- [13] Huang B, Zhao J, Chai J, Xue B, Zhao F, Wang X. Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy*, 2017, 143: 132-141.

- [14] Farrell C C, Osman A I, Doherty R, Saad M, Zhang X, Murphy A, Harrison J, Vennard A S M, Kumaravel V, Al-Muhtaseb A H, Rooney D W. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 128: 109911.
- [15] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案. (2022-01-12) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5696245.htm.
- [16] 国家发展改革委等四部委. 关于加快推进城镇环境基础设施建设的指导意见. (2022-01-12) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5675952.htm.
- [17] 工业和信息化部等五部委. 智能光伏产业创新发展行动计划(2021年-2025年). (2021-12-31) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/05/content_5666484.htm.
- [18] Tao M, Fthenakis V, Ebin B, Steenari B M, Butler E, Sinha P, Corkish R, Wambach K, Simon E S. Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2020, 28(10): 1077-1088.
- [19] Jain S, Sharma T, Gupta A K. End-of-life management of solar PV waste in India: Situation analysis and proposed policy framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111774.
- [20] Wang X, Xue J, Hou X. Barriers analysis to Chinese waste photovoltaic module recycling under the background of "double carbon". *Renewable Energy*, 2023, 214: 39-54.
- [21] Charles R G, Doolin A, García-Rodríguez R, Villalobos K V, Davies M L. Circular economy for perovskite solar cells-drivers, progress and challenges. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16(9): 3711-3733.
- [22] Briassoulis D, Pikasi A, Hiskakis M. Recirculation potential of post-consumer/industrial bio-based plastics through mechanical recycling-Techno-economic sustainability criteria and indicators. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, 183: 109217.
- [23] Curtis T L, Buchanan H, Heath G, Smith L, Shaw S. Solar photovoltaic module recycling: A survey of U.S. policies and initiatives. United States: National Renewable Energy Laboratory, 2021, <https://doi.org/10.2172/1774839>.
- [24] Dias P, Bernardes A M, Huda N. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management: An analysis on the Australian e-waste recycling scheme. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 750-764.
- [25] 建筑用薄膜太阳能电池组件回收再利用通用技术要求. GB/T 38785-2020. 北京: 国家标准委, 2020-06-02.
- [26] 光伏组件回收再利用通用技术要求. GB/T 39753-2021. 北京: 国家标准委, 2021-03-09.
- [27] 晶硅光伏组件回收再利用通用技术要求. T/CPIA 0002-2022. 北京: 中国光伏行业协会, 2022-03-20.
- [28] Environmental Protection Agency. Contact us about the resource conservation and recovery act (RCRA) laws and regulations. (1976-10-21) [2024-02-11]. <https://www.epa.gov/rcra>.
- [29] Huber-Humer M. EU spreads the net for waste electrical and electronic equipment. (2012-08-13) [2024-02-11]. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/cien.2013.166.3.102>.
- [30] De Medio Ambiente Chile. Ley 20920 establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. (2016-06-01) [2024-02-11]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894&idParte=9705129&idVersion=2016-06-01>.
- [31] Japanese Ministry of Environment. Guidelines for promoting recycling of solar power generation equipment, second edition. (2018) [2024-02-11]. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/110514.pdf>.
- [32] 国务院. "十三五"节能减排综合工作方案. (2017-01-05) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm.
- [33] 发展改革委等十部委. 关于"十四五"大宗固体废弃物综合利用的指导意见. (2021-03-08) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content_5595566.htm.
- [34] 国家发展改革委等九部委. "十四五"可再生能源发展规划的通知. (2022-06-01) [2024-02-11]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/t20220601_1326719.html.
- [35] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案. (2021-10-26) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [36] 河北省人民政府办公厅. 河北省"十四五"时期"无废城市"建设工作方案. (2022-03-20) [2024-02-11]. https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/2020/wfcsjssdgz/dcsj/wfcszcwj/202204/t20220401_973382.shtml.
- [37] 天津市人民政府. 天津市碳达峰实施方案. (2022-09-14) [2024-02-11]. https://www.tj.gov.cn/zwgk/szfwj/tjsrmzf/202209/t20220914_5987984.html.
- [38] 工业和信息化部等四部委. 关于深入推进黄河流域工业绿色发展的指导意见. (2022-12-12) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-12/13/content_5731663.htm.
- [39] 工业和信息化部等六部委. 关于推动能源电子产业发展的指导意见. (2023-01-03) [2024-02-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/17/content_5737584.htm.
- [40] 山西省人民政府. 山西省碳达峰实施方案. (2023-01-05) [2024-02-11]. http://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfxgkzl/fdzdkgknr/lzyj/szfwj/202301/t20230119_7825853.shtml.
- [41] 国家发展改革委等六部委. 关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见. (2023-07-21) [2024-02-11]. <https://www.gov.cn/>

zhengce/zhengceku/202308/content_6898747.htm.

- [42] 生态环境部.《固体废物分类与代码目录》.(2024-01-19)[2024-03-08].https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202402/t20240201_1065530.html.
- [43] 工业和信息化部等七部委.关于加快推动制造业绿色化发展的指导意见.(2024-02-05)[2024-02-11].https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2024/art_f1be5a86074d46c99c20be36713f6838.html.
- [44] 国务院.关于加快构建废弃物循环利用体系的意见.(2024-02-06)[2024-03-02].https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11186/202402/content_6934547.html.
- [45] Fiandra V, Sannino L, Andreozzi C, Corcelli F, Graditi G. Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers and separation of materials. *Waste Management*, 2019, 87: 97-107.
- [46] Trivedi H K, Meshram A, Gupta R. Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(2): 109501.
- [47] 孔慧玲, 顾卫华, 彭圣娟, 白建峰. 废旧光伏组件回收及高值化利用研究进展. *有色金属(冶炼部分)*, 2023(9): 22-29.
- [48] Kadro J M, Hagfeldt A. The end-of-life of perovskite PV. *Joule*, 2017, 1(1): 29-46.
- [49] Mao D, Yang S, Ma L, Ma W, Yu Z, Xi F, Yu J. Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: A case study of crystalline silicon photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140320.
- [50] Ludin N A, Mustafa N I, Hanafiah M M, Ibrahim M A, Asri Mat Teridi M, Sepeai S, Zaharim A, Sopian K. Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96: 11-28.
- [51] Deng R, Chang N L, Zi O, Chong C M. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 109: 532-550.
- [52] Li J, Shao J, Yao X, Li J. Life cycle analysis of the economic costs and environmental benefits of photovoltaic module waste recycling in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196: 107027.
- [53] Tsanakas J A, van der Heide A, Radavičius T, Denafas J, Lemaire E, Wang K, Poortmans J, Voroshazi E. Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2019, 28(6): 454-464.
- [54] Yu H F, Hasanuzzaman M, Rahim N A. Recycling end-of-life photovoltaic modules in Malaysia: Challenges and potential solutions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, 1261: 012017.
- [55] Nevala S M, Hamuyuni J, Junnila T, Sirviö T, Eisert S, Wilson B P, Serna-Guerrero R, Lundström M. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels-Impact on recycling. *Waste Management*, 2019, 87: 43-50.
- [56] Azeumo M F, Germana C, Ippolito N M, Franco M, Luigi P, Settimio S. Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 193: 314-319.
- [57] Song B, Zhang M, Fan Y, Jiang L, Kang J, Gou T, Zhang C, Yang N, Zhang G, Zhou X. Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation. *Waste Management*, 2020, 101: 180-187.
- [58] Sim Y, Tay Y B, Pham H K, Mathews N. A facile crush-and-sieve treatment for recycling end-of-life photovoltaics. *Waste Management*, 2023, 156: 97-106.
- [59] Fiandra V, Sannino L, Andreozzi C. Photovoltaic waste as source of valuable materials: A new recovery mechanical approach. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 385: 135702.
- [60] Shin J, Park J, Park N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 162: 1-6.
- [61] Chen W, Chen Y, Yueh K, Cheng C, Chang T. Recovery of valuable metal from photovoltaic solar cells through extraction. 4th International conference on optics in materials, energy, and technologies. Taiwan: IOP Publishing, 2020.
- [62] Zante G, Marin Rivera R, Hartley J M, Abbott A P. Efficient recycling of metals from solar cells using catalytic etchants. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370: 133552.
- [63] Brenes G H, Riech I, Giacomán-Vallejos G, González-Sánchez A, Rejón V. Chemical method for ethyl vinyl acetate removal in crystalline silicon photovoltaic modules. *Solar Energy*, 2023, 263: 111778.
- [64] Doni A, Dughiero F. Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling. 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012, 757-762.
- [65] Dias P, Javimczik S, Benevit M, Veit H. Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management*, 2017, 60: 716-722.
- [66] Wang R, Song E, Zhang C, Zhuang X, Ma E, Bai J, Yuan W, Wang J. Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a two-stage heating treatment. *RSC Advances*, 2019, 9(32): 18115-18123.
- [67] Feng Y, He Y Q, Zhang G, Wang S, Wei N, Zhang T. A promising method for the liberation and separation of solar cells from damaged crystalline silicon photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 262: 112553.

- [68] Wang T, Hsiao J, Du C. Recycling of materials from silicon base solar cell module. 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012, 2355-2358.
- [69] Chen W, Chen Y, Chen Y. The application of organic solvents and thermal process for eliminating EVA resin layer from waste photovoltaic modules. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 291(1): 012012.
- [70] Li X, Liu H, You J, Diao H, Zhao L, Wang W. Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling. Waste Management, 2022, 137: 312-318.
- [71] Wahman M, Surowiak A, Berent K, Szymczak P. Eco-efficient removal of polymer back sheet fraction and material separation from solar cell waste. Solar Energy, 2023, 264: 112085.
- [72] Sah D, Chitra, Upadhyay N K, Muthiah S, Kumar S. Growth and analysis of polycrystalline silicon ingots using recycled silicon from waste solar module. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 261: 112524.
- [73] Sah D, Chitra, Kumar S. Investigation and recovery of copper from waste silicon solar module. Materials Chemistry and Physics, 2023, 296: 127205.
- [74] Yashas S R, Ruck E B, Demissie H, Manor-Korin N, Gendel Y. Catalytic recovery of metals from end-of-life polycrystalline silicon photovoltaic cells: Experimental insights into silver recovery. Waste Management, 2023, 171: 184-194.
- [75] van Eck N J, Waltman L. Visualizing Bibliometric Networks. In: Ding Y, Rousseau R, Wolfram D. (eds) Measuring Scholarly Impact. Springer International Publishing, 2014: 285-320.
- [76] Sood S K, Kumar N, Saini M. Scientometric analysis of literature on distributed vehicular networks: VOSViewer visualization techniques. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(8): 6309-6341.
- [77] Miao L, Shi J, Yu H, Song L, Zhu C, Shi D, Gao J. Studies on atrial fibrillation and venous thromboembolism in the past 20 years: A bibliometric analysis via CiteSpace and VOSViewer. Journal of the American Heart Association, 2023, 12(17): e029810.
- [78] Liu Z, Yu Q, Liu H. Mesenchymal stem cells in heterotopic ossification in ankylosing spondylitis: A bibliometric study based on CiteSpace and VOSViewer. Journal of Inflammation Research, 2023, 16: 4389-4398.
- [79] Thomas K N, Lawrence A. Medical and psychological comorbidities in fibromyalgia: A cross sectional study. Annals of the Rheumatic Diseases, 2022, 81: 1717-1718.
- [80] Nadi-Ravandi S, Batooli Z. Knowledge mapping of articles on application of the Quran and Hadiths in health care: VOSviewer visualization techniques. Journal of Religion & Health, 2022, 61(5): 3940-3968.
- [81] Tang J, Shen Q, Han Y, Wu Y, He X, Li D, Huang Y. Analysis of research status and trends on marine benthic dinoflagellate toxins: A bibliometric study based on web of science database and VOSviewer. Environmental Research, 2023, 238: 117179.
- [82] 周隽如, 姚焱中, 蒋含明, 樊雨, 宋有涛. 海洋生态系统服务价值研究热点及主题演化—基于文献计量研究. 生态学报, 2022, 42(9): 3878-3887.
- [83] 赵海莉, 张婧. 基于 Citespace 和 VOSviewer 的中国水旱灾害研究进展与热点分析. 生态学报, 2020, 40(12): 4219-4228.
- [84] Leydesdorff L, Carley S, Rafols I. Global maps of science based on the new Web-of-Science categories. Scientometrics, 2013, 94(2): 589-593.
- [85] van Eck N J, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, 2010, 84: 523-538.
- [86] Taherbaneh M, Ghafoofard H, Rezaie A H, Rahimi K. Evaluation end-of-life power generation of a satellite solar array. Energy Conversion and Management, 2011, 52(7): 2518-2525.
- [87] Ito M, Kudo M, Nagura M, Kurokawa K. A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-solar plant. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011, 19(7): 878-886.
- [88] Lu X, Miki T, Takeda O, Zhu H, Nagasaka T. Thermodynamic criteria of the end-of-life silicon wafers refining for closing the recycling loop of photovoltaic panels. Science and Technology of Advanced Materials, 2019, 20(1): 813-825.
- [89] Salim H K, Stewart R A, Sahin O, Dudley M. End-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A stakeholder survey in Australia. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 150: 104444.
- [90] Mahmoudi S, Huda N, Behnia M. Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 146: 192-205.
- [91] Jia Z, Fang L. Review of solar photovoltaic system recycling technologies and regulations in China. DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Science, 2016: 255-259.
- [92] Brenner W, Adamovic N. Standardization as a tool for promoting innovation and commercialization of a circular economy for PV waste-The example of the European H2020 project CABRISS. 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2018, 122-127.
- [93] Brenner W, Bednar N, Biermayr P, Adamovic N. Standardization and life cycle cost assessment approach in circular economy for photovoltaic waste. 2018 3rd International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), 2018, 1-6.
- [94] Anjana E I, Christan S, Akhil M G, Venkatesan J, Jayasankar K. Thermal plasma synthesis of silicon carbide from solar waste panels. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(7): 2602-2608.

- [95] Wu Z, Wang S, Gao D, Wei X, Du C, Qi Z. A novel method for layer separation in waste crystalline silicon PV modules via combined low-temperature and thermal treatment. *Waste Management*, 2023, 172: 299-307.
- [96] Lin K, Pang C, Li G, Ruan J. Enriching scattered metals from waste Cu (InGa) Se₂ solar cells through friction separation technology by microsolid media. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(38): 14167-14175.
- [97] 张晟邳, 张承龙, 王瑞雪, 马恩. 退役晶硅光伏组件接线盒和边框自动化拆解设备设计. *有色金属(冶炼部分)*, 2024(1): 98-105.
- [98] Klugmann-Radziemska E, Kuczyńska-Łażewska A. The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production- A life cycle assessment of environmental impacts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 205: 110259.
- [99] Contreras Lisperguer R, Muñoz Cerón E, de la Casa Higuera J, Martín R D. Environmental impact assessment of crystalline solar photovoltaic panels' end-of-life phase: Open and closed-loop material flow scenarios. *Sustainable Production and Consumption*, 2020, 23: 157-173.
- [100] Maani T, Celik I, Heben M J, Ellingson R J, Apul D. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. *Science of the Total Environment*, 2020, 735: 138827.
- [101] Mahmoudi S, Huda N, Behnia M. Multi-levels of photovoltaic waste management: A holistic framework. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 294: 126252.
- [102] Bartie N, Cobos-Becerra L, Fröhling M, Reuter M A, Schlattmann R. Process simulation and digitalization for comprehensive life-cycle sustainability assessment of Silicon photovoltaic systems. 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2021: 1244-1249.
- [103] Mahmoudi S, Huda N, Behnia M. Critical assessment of renewable energy waste generation in OECD countries: Decommissioned PV panels. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105145.
- [104] Wang T Y, Lin Y C, Tai C Y, Fei C C, Tseng M Y, Lan C W. Recovery of silicon from kerf loss slurry waste for photovoltaic applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, 17(3): 155-163.
- [105] Prasad D S, Sanjana B, Sai Kiran D, Srinivasa Kumar P P, Ratheesh R. A unique sustainable chemical method for the recovery of pure silicon from waste crystalline silicon solar panels. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 37: e00671.
- [106] Schmidt F, Amrein M, Hedwig S, Kober-Czerny M, Paracchino A, Holappa V, Suhonen R, Schäffer A, Constable E C, Snaith H J, Lenz M. Organic solvent free PbI₂ recycling from perovskite solar cells using hot water. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 447: 130829.
- [107] Liu C J, Zhang Q, Wang H. Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China. *Waste Management*, 2020, 118: 491-500.
- [108] Granata G, Altamari P, Pagnanelli F, De Greef J. Recycling of solar photovoltaic panels: Techno-economic assessment in waste management perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132384.
- [109] D'Adamo I, Miliacca M, Rosa P. Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules. *International Journal of Photoenergy*, 2017, 2017: 4184676.
- [110] Del Pero F, Delogu M, Berzi L, Escamilla M. Innovative device for mechanical treatment of end of life photovoltaic panels: Technical and environmental analysis. *Waste Management*, 2019, 95: 535-548.
- [111] Granata G, Pagnanelli F, Moscardini E, Havlik T, Toro L. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 123: 239-248.
- [112] Todorov T, Mitzi D B. Direct liquid coating of chalcopyrite light-absorbing layers for photovoltaic devices. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2009, 2010(1): 17-28.
- [113] Zhao P, Guo J, Yan G, Zhu G, Zhu X, Zhang Z, Zhang B. A novel and efficient method for resources recycling in waste photovoltaic panels: High voltage pulse crushing. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120442.
- [114] Kastanaki E, Giannis A. Energy decarbonisation in the European Union: Assessment of photovoltaic waste recycling potential. *Renewable Energy*, 2022, 192: 1-13.
- [115] Zhang Y, Zhan L, Yuan X, Xu Z. Simultaneous harmless ionization of CFC and resource utilization of waste solar panel through one-pot hydrothermal treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 441: 129918.
- [116] Chowdhury M S, Rahman K S, Selvanathan V, Hasan A K M, Jamal M S, Samsudin N A, Akhtaruzzaman M, Amin N, Techato K. Recovery of FTO coated glass substrate via environment-friendly facile recycling perovskite solar cells. *RSC Advances*, 2021, 11(24): 14534-14541.
- [117] Klugmann-Radziemska E, Ostrowski P. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 2010, 35(8): 1751-1759.
- [118] Li K, Wang Z, Liu C, Wang D, Li G, Chen X, Qian G, Hu K. A green method to separate different layers in photovoltaic modules by using DMPU as a separation agent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 245: 111870.
- [119] Li K, Wang D, Hu K, Liu C, Wang Z, Li G, Chen X, Qian G. Recycling of solar cells from photovoltaic modules via an environmentally friendly and controllable swelling process by using dibasic ester. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2023, 25(7): 2203-2212.
- [120] Tao R, Li B, Wu Y, Zhang W, Yuan H, Gu J, Chen Y. Pyrolysis mechanism and recycling strategy of end-of-life photovoltaic modules based on the experiment and the density functional theory. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 217: 110545.
- [121] 黄智豪, 巫宇森, 秦保家, 朱洁, 阮菊俊. 退役 Cu(InGa)Se₂ 光伏层压件封装材料热解物理场模拟及温度优化. *中山大学学报(自然科学版)*, 2024, 63(3): 154-162.

- [122] 赵若楠, 董莉, 白璐, 张玥, 李雪迎, 乔琦, 谢明辉, 王伟. 光伏行业生命周期碳排放清单分析. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751-2757.
- [123] Dobra T, Vollprecht D, Pomberger R. Thermal delamination of end-of-life crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management & Research*, 2022, 40(1): 96-103.
- [124] Urbina A. Sustainability of photovoltaic technologies in future net-zero emissions scenarios. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2022, 31(12): 1255-1269.
- [125] Krebs-Moberg M, Pitz M, Dorsette T L, Gheewala S H. Third generation of photovoltaic panels: A life cycle assessment. *Renewable Energy*, 2021, 164: 556-565.
- [126] Aryan V, Font-Brucart M, Maga D. A comparative life cycle assessment of end-of-life treatment pathways for photovoltaic backsheets. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2018, 26(7): 443-459.
- [127] Alberola-Borràs J A, Vidal R, Juárez-Pérez E J, Mas-Marzá E, Guerrero A, Mora-Seró I. Relative impacts of methylammonium lead triiodide perovskite solar cells based on life cycle assessment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 179: 169-177.
- [128] Herceg S, Fischer M, Weiß K A, Schebek L. Life cycle assessment of PV module repowering. *Energy Strategy Reviews*, 2022, 43: 100928.
- [129] Eskew J, Ratledge M, Wallace M, Gheewala S H, Rakkwamsuk P. An environmental life cycle assessment of rooftop solar in Bangkok, Thailand. *Renewable Energy*, 2018, 123: 781-792.
- [130] Santos J D, Alonso-García M C. Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 1613-1628.
- [131] Domínguez A, Geyer R. Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America. *Renewable Energy*, 2019, 133: 1188-1200.
- [132] Gautam A, Shankar R, Vrat P. End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: A step towards a circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 26: 65-77.
- [133] Oteng D, Zuo J, Sharifi E. Environmental emissions influencing solar photovoltaic waste management in Australia: An optimised system network of waste collection facilities. *Journal of Environmental Management*, 2022, 314: 115007.
- [134] Tasnim S S, Rahman M M, Hasan M M, Shammi M, Tareq S M. Current challenges and future perspectives of solar-PV cell waste in Bangladesh. *Heliyon*, 2022, 8(2): e08970.
- [135] Zhang L, Chang S, Wang Q, Zhou D. Projection of waste photovoltaic modules in China considering multiple scenarios. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 33: 412-424.
- [136] Kabir S E, Rafiq M K S B, Uzir M U H, Alnaser I A, Karim M R, Shahiduzzaman M, Akhtaruzzaman M. Analysing economic feasibility of recycling end-of-life solar photovoltaic modules of Bangladesh. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2023, 25(10): 3231-3245.
- [137] Sharma A, Mahajan P, Garg R. End-of-life solar photovoltaic panel waste management in India: Forecasting and environmental impact assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 21: 1961-1980.
- [138] Song G, Lu Y, Liu B, Duan H, Feng H, Liu G. Photovoltaic panel waste assessment and embodied material flows in China, 2000-2050. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338: 117675.
- [139] 周梦婷, 朱宏飞, 林民松, 徐亚, 刘玉强. “双碳”战略背景下沿黄九省份报废光伏组件产生量及其时空分布预测. 环境科学研究, 2024, 37(1): 171-179.
- [140] Duflo J R, Peeters J R, Altamirano D, Bracquene E, Dewulf W. Demanufacturing photovoltaic panels: Comparison of end-of-life treatment strategies for improved resource recovery. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 29-32.
- [141] Dias P, Schmidt L, Monteiro Lunardi M, Chang N L, Spier G, Corkish R, Veit H. Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination-technical, environmental and economic analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 165: 105241.
- [142] Daniela-Abigail H L, Tariq R, Mekaoui A E, Bassam A, Vega De Lille M, J Ricalde L, Riech I. Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103539.
- [143] Fthenakis V, Athias C, Blumenthal A, Kulur A, Magliozzo J, Ng D. Sustainability evaluation of CdTe PV: An update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 123: 109776.
- [144] Jia X, Zhou C, Tang Y, Wang W. Life cycle assessment on PERC solar modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 227: 111112.
- [145] Kadro J M, Pellet N, Giordano F, Ulianov A, Müntener O, Maier J, Grätzel M, Hagfeldt A. Proof-of-concept for facile perovskite solar cell recycling. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9(10): 3172-3179.
- [146] Gautam A, Shankar R, Vrat P. Managing end-of-life solar photovoltaic e-waste in India: A circular economy approach. *Journal of Business Research*, 2022, 142: 287-300.
- [147] Rocchetti L, Beolchini F. Recovery of valuable materials from end-of-life thin-film photovoltaic panels: Environmental impact assessment of different management options. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 89: 59-64.
- [148] Doi T, Tsuda I, Unagida H, Murata A, Sakuta K, Kurokawa K. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 67: 397-403.

- [149] Schmidt F, Schäffer A, Lenz M. Renewable energy from finite resources: Example of emerging photovoltaics. *Chimia*, 2019, 73(11): 874-879.
- [150] Tyagi V V, Rahim N A A, Rahim N A, Selvaraj J A. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20: 443-461.
- [151] Strachala D, Hylský J, Fafilek G, Jandová K. Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction. *Acta Montanistica Slovaca*, 2017, 22(3): 257-269.
- [152] Luo M, Liu F, Zhou Z, Jiang L, Jia M, Lai Y, Li J, Zhang Z. A comprehensive hydrometallurgical recycling approach for the environmental impact mitigation of EoL solar cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(6): 106830.
- [153] Tian X Y, Stranks S D, You F Q. Life cycle assessment of recycling strategies for perovskite photovoltaic modules. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 821-829.
- [154] Zhang L, Chang S, Wang Q, Zhou D. Is subsidy needed for waste PV modules recycling in China? A system dynamics simulation. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 31: 152-164.
- [155] Khawaja M K, Ghaith M, Alkhalidi A. Public-private partnership versus extended producer responsibility for end-of-life of photovoltaic modules management policy. *Solar Energy*, 2021, 222: 193-201.
- [156] Yu H, Tong X. Producer vs. local government: The locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in Zhejiang province. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 169: 105484.
- [157] Li Y, Wang G, Shen B, Zhang Q, Liu B, Xu R. Conception and policy implications of photovoltaic modules end-of-life management in China. *WIREs Energy and Environment*, 2021, 10: e387.
- [158] Molano J C, Xing K, Majewski P, Huang B. A holistic reverse logistics planning framework for end-of-life PV panel collection system design. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115331.
- [159] Islam M T, Nizami M S H, Mahmoudi S, Huda N. Reverse logistics network design for waste solar photovoltaic panels: A case study of New South Wales councils in Australia. *Waste Management & Research*, 2021, 39(2): 386-395.
- [160] Yu M, Halog A. Solar photovoltaic development in Australia-A life cycle sustainability assessment study. *Sustainability*, 2015, 7(2): 1213-1247.
- [161] Chi X, Streicher-Porte M, Wang M Y L, Reuter M A. Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China. *Waste Management*, 2011, 31(4): 731-742.
- [162] Zhang Q, Liu C, Zheng S. Investment and pricing in solar photovoltaic waste recycling with government intervention: A supply chain perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 177: 109044.
- [163] Yang Y, Chen F, Tong T. An evolutionary game model among manufacturers for return of e-wastes under government regulation//Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation. Paris: Atlantis Press, 2016: 691-701.
- [164] Wang Z, Huo J, Duan Y. Impact of government subsidies on pricing strategies in reverse supply chains of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 2019, 95: 440-449.
- [165] Wang J, Li W, Mishima N, Adachi T. Exploring the optimal reverse supply chain for e-waste treatment under Chinese government subsidy. *Waste Management*, 2022, 137: 128-138.
- [166] Wang Q, Kong L, Li J, Li B, Wang F. Behavioral evolutionary analysis between the government and uncertified recycler in China's e-waste recycling management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(19): 7221.
- [167] Mathur N, Singh S, Sutherland J W. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155: 104649.
- [168] Wang Z, Wang Q, Chen B, Wang Y. Evolutionary game analysis on behavioral strategies of multiple stakeholders in E-waste recycling industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155: 104618.
- [169] Marwede M, Reller A. Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 69: 35-49.
- [170] Ravikumar D, Sinha P, Seager T P, Fraser M P. An anticipatory approach to quantify energetics of recycling CdTe photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, 24(5): 735-746.
- [171] Briand A, Leybros A, Doucet O, Ruiz J C, Fontaine-Giraud P, Liotaud L, Grandjean A. Versatility assessment of supercritical CO₂ delamination for photovoltaic modules with ethylene-vinyl acetate, polyolefin or ethylene methacrylic acid ionomer as encapsulating polymer. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 410: 137292.
- [172] Jin E M, Kim M S, Kim T Y, Shin B, Moon J, Jeong S M. Upcycling of silicon scrap collected from photovoltaic cell manufacturing process for lithium-ion batteries via transferred arc thermal plasma. *Energy*, 2023, 262: 125447.
- [173] Jimenez-Millan J, Abad I, Jimenez-Espinosa R, Yebra-Rodriguez A. Assessment of solar panel waste glass in the manufacture of sepiolite based clay bricks. *Materials Letters*, 2018, 218: 346-348.
- [174] Göllei A, Görbe P, Magyar A. Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 34: 138-145.
- [175] Dodson J R, Parker H L, Muñoz García A, Hicken A, Asemave K, Farmer T J, He H, Clark J H, Hunt A J. Bio-derived materials as a green

- route for precious & critical metal recovery and re-use. *Green Chemistry*, 2015, 17(4): 1951-1965.
- [176] Jäger-Waldau A. Photovoltaics and renewable energies in Europe. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(7): 1414-1437.
- [177] Akram Cheema H, Ilyas S, Kang H, Kim H. Comprehensive review of the global trends and future perspectives for recycling of decommissioned photovoltaic panels. *Waste Management*, 2024, 174: 187-202.
- [178] Nain P, Kumar A. Initial metal contents and leaching rate constants of metals leached from end-of-life solar photovoltaic waste: An integrative literature review and analysis. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119: 109592.
- [179] Ballif C, Haug F J, Boccard M, Verlinden P J, Hahn G. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7: 597-616.
- [180] Gerbinet S, Belboom S, Léonard A. Life cycle analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 747-753.
- [181] Snaith H J. Present status and future prospects of perovskite photovoltaics. *Nature Materials*, 2018, 17(5): 372-376.
- [182] Cai M, Wu Y, Chen H, Yang X, Qiang Y, Han L. Cost-performance analysis of perovskite solar modules. *Advanced Science*, 2017, 4: 1600269.
- [183] Kim D H, Whitaker J B, Li Z, van Hest F A M M, Zhu K. Outlook and challenges of perovskite solar cells toward terawatt-scale photovoltaic module technology. *Joule*, 2018, 2(8): 1437-1451.
- [184] Antonanzas J, Quinn J C. Net environmental impact of the PV industry from 2000-2025. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311: 127791.
- [185] Jean J, Woodhouse M, Bulović V. Accelerating photovoltaic market entry with module replacement. *Joule*, 2019, 3(11): 2824-2841.
- [186] Nguyen Q, Diaz-Rainey I, Kuruppuarachchi D. Predicting corporate carbon footprints for climate finance risk analyses: A machine learning approach. *Energy Economics*, 2021, 95: 105129.
- [187] Robert Thomas D, Agrawal S, Harish S P, Mahajan A, Urpelainen J. Understanding segmentation in rural electricity markets: Evidence from India. *Energy Economics*, 2020, 87: 104697.
- [188] Ou S, He X, Ji W, Chen W, Sui L, Gan Y, Lu Z, Lin Z, Deng S, Przesmitzki S, Bouchard J. Machine learning model to project the impact of COVID-19 on US motor gasoline demand. *Nature Energy*, 2020, 5: 666-673.
- [189] Wang H, Maruejols L, Yu X. Predicting energy poverty with combinations of remote-sensing and socioeconomic survey data in India: Evidence from machine learning. *Energy Economics*, 2021, 102: 105510.
- [190] Chen P, Wu Y, Zhong H, Long Y, Meng J. Exploring household emission patterns and driving factors in Japan using machine learning methods. *Applied Energy*, 2022, 307: 118251.
- [191] Aitio A, Howey D A. Predicting battery end of life from solar off-grid system field data using machine learning. *Joule*, 2021, 5(12): 3204-3220.
- [192] Zhao M, Zhang Y, Wang H. Battery degradation stage detection and life prediction without accessing historical operating data. *Energy Storage Materials*, 2024, 69: 103441.
- [193] 高志卫, 袁宇, 白章, 胡文鑫. 抛物槽式太阳能集热器光热耦合特性数值模拟仿真与分析. *实验技术与管理*, 2022, 39(6): 92-96.
- [194] Kruitwagen L, Story K T, Friedrich J, Byers L, Skillman S, Hepburn C. A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. *Nature*, 2021, 598(7882): 604-610.
- [195] Goe M, Gaustad G, Tomaszewski B. System tradeoffs in siting a solar photovoltaic material recovery infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 2015, 160: 154-166.
- [196] Yu H, Tong X. Producer vs. local government: The locational strategy for end-of-life photovoltaic modules recycling in Zhejiang province. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 169: 105484.
- [197] 郑博, 白章, 袁宇, 胡文鑫. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化. *中国电机工程学报*, 2022, 42(23): 8486-8495.
- [198] Guo Q, Kluse C. A framework of photovoltaics recycling facility location optimization. *Sustainable Production and Consumption*, 2020, 23: 105-110.
- [199] Can S, Fthenakis V. Energy policy and financing options to achieve solar energy grid penetration targets: Accounting for external costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 854-868.
- [200] Sahajwalla V, Hossain R. Rethinking circular economy for electronics, energy storage, and solar photovoltaics with long product life cycles. *MRS Bulletin*, 2023, 48(4): 375-385.
- [201] Li J, Wang C, Guo J, Xin Y, Zhang N, Liu X, Feng K. Promoting sustainable development goals by optimizing city-level solar photovoltaic deployment in China. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(12): 5196-5209.
- [202] Walzberg J, Carpenter A, Heath G A. Role of the social factors in success of solar photovoltaic reuse and recycle programmes. *Nature Energy*, 2021, 6: 913-924.