DOI: 10.19666/j.rlfd.202508070

退役风光设备资源化利用标准体系构建

张思索，王洪亮，刘向辉，滕 达，赵 晶，何发泉
（国能龙源环保有限公司，北京 100039）

［摘 要］随着我国风电和光伏装机规模稳居全球首位，第一批大规模投运设备即将集中退役，预计到 2030 年累计退役光伏组件将达 150 万吨，风电设备退役容量将达 200 万吨。通过系统分析我国退役风光设备资源化利用现状，结合欧盟 WEEE 指令体系、美国技术创新驱动模式、日本前瞻性立法实践等国际典型经验，针对我国在标准制定、产业链协同、监管体系等方面存在的问题，提出了坚持系统性、协调性、适应性、可操作性原则，构建基础通用、专业技术、管理规范、检测认证 4 层标准架构的完善思路，并从标准制定、政策协调、监管机制、国际合作 4 个方面提出了具体建议。

［关 键 词］退役风光设备；资源化利用；循环经济；标准体系；政策体系

［引用本文格式］张思索，王洪亮，刘向辉，等.退役风光设备资源化利用标准体系构建[J]. 热力发电，2026, 55(1): 11-19.
ZHANG Sisuo, WANG Hongliang, LIU Xianghui, et al. Constructing a standardization system for resource utilization of decommissioned wind and photovoltaic equipment[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 11-19.

Constructing a standardization system for resource utilization of decommissioned wind and photovoltaic equipment

ZHANG Sisuo, WANG Hongliang, LIU Xianghui, TENG Da, ZHAO Jing, HE Faquan
(China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: As China's installed capacity of wind power and photovoltaic systems firmly ranks first globally, the first batch of large-scale commissioned equipment is approaching centralized decommissioning. It is estimated that by 2030, the cumulative decommissioned photovoltaic modules will reach 1.5 million tons, and the decommissioned wind power equipment capacity will reach 2 million tons. Through a systematic analysis of the current status of resource utilization of decommissioned wind and photovoltaic equipment in China, and by integrating international typical experiences such as the EU's WEEE Directive system, the technology innovation-driven model in the United States, and Japan's forward-looking legislative practices, this paper, in view of the problems existing in China's standardization development, industrial chain coordination, and regulatory systems, proposes to adhere to the principles of systematicness, coordination, adaptability, and operability, and constructs a four-tier standard framework comprising basic general standards, specialized technical standards, management specifications, and testing certification standards. Moreover, specific policy recommendations are presented from four aspects: standard development, policy coordination, regulatory mechanisms, and international cooperation.

Key words: decommissioned wind and photovoltaic equipment; resource utilization; circular economy; standard system; policy system

我国新能源产业经过 20 多年的跨越式发展，已成为全球可再生能源装备制造和应用的主导力量。根据国家能源局发布的最新统计数据[1]，截至 2024 年底，全国风电装机容量约 5.2 亿千瓦，太阳能发电装机容量约 8.9 亿千瓦，装机规模均稳居全球首位。然而，伴随第一批大规模投运的风光设备逐步接近设计使用寿命，我国即将迎来首批风光设备的集中退役期。基于设备技术特性分析，风电机

收 稿 日 期：2025-08-31 修 回 日 期：2025-10-13 接 受 日 期：2025-10-15
基 金 项 目：国电科技环保集团科技创新项目（KH-2013-15）
Supported by: Science and Technology Innovation Project of CHN Energy Technology & Environment Limited (KH-2013-15)
第一作者简介：张思索（1998），女，硕士研究生，主要研究方向为新能源固废技术，20090572@ceic.com。
通信作者简介：何发泉（1970），男，博士，正高级工程师，主要研究方向为新能源固废技术，17240111@ceic.com。

组实际使用寿命为 15 年以上，光伏组件实际使用寿命为 20 年。根据国际可再生能源署（IRENA）预测[2]，到 2030 年我国累计退役光伏组件将达到 150 万吨；风电设备方面，预计到 2030 年累计退役容量将达到 200 万吨，退役设备规模将呈爆发式增长态势。面对如此庞大的退役设备规模，资源化利用已成为新能源产业可持续发展的重大挑战。

退役风光设备资源化利用的战略价值日益凸显。风光设备含有硅、银、铟、镓、稀土等战略性关键材料。光伏组件中银主要分布在电池片的栅线中，含量约为 20 kg/MW；稀土永磁材料集中在风电机组的永磁同步发电机转子中，主要是钕铁硼永磁材料，包含钕、镝、铽等稀土元素，在风电机组中的应用量约为 200~600 kg/MW。科学回收这些材料，不仅能缓解我国对外依存度较高的关键材料供应压力，还能为新能源产业提供稳定的二次原料来源。从环境保护角度看，退役设备如处置不当，其中的有毒有害物质可能对土壤和水体造成污染，特别是光伏组件中的铅、镉等重金属以及风电叶片中的玻璃纤维复合材料和环氧树脂，均需要规范化处理[3]。

2023 年 8 月，国家发展和改革委员会等六部门印发《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》，提出了明确的发展目标：到 2030 年，退役风电、光伏设备循环利用技术装备和回收利用体系基本成熟，资源循环利用模式基本建立。重点任务包括：完善设备回收体系，推进技术装备攻关，完善标准规范体系，加强全生命周期环境管理等。这是我国首份系统部署退役风电、光伏设备循环利用工作的政策文件，标志着我国退役风光设备资源化利用进入规范化发展阶段。然而，对标欧盟 WEEE（waste electrical and electronic equipment）指令体系、美国技术导向与市场机制并重模式、日本前瞻性立法与技术创新结合的成熟经验，我国政策体系在强制性法律约束、技术标准完整性、监管机制有效性等方面仍存在显著差距，亟需完善。本文通过深入分析我国退役风光设备资源化利用现状，系统梳理国际典型经验，识别关键问题和发展趋势，提出完善我国标准政策体系的基本思路和政策建议，为推动新能源产业可持续发展提供理论支撑和决策参考。

1 我国退役风光设备资源化利用标准现状

1.1 标准体系现状

我国退役风光设备资源化利用的政策基础主要依托循环经济和固体废物管理法律框架（表 1）。《循环经济促进法》（2018 年修订）确立了“减量化、再利用、资源化”的基本原则，《固体废物污染环境防治法》（2020 年修订）进一步强化了固体废物的分类管理和资源化利用要求，为风光设备制造商承担回收责任提供了法律支撑。2021 年 7 月发布的《“十四五”循环经济发展规划》（发改环资〔2021〕969 号）将废旧物资循环利用体系建设工程列为重点工程，明确提出推进废旧光伏组件、风电机组叶片等新兴产业废物循环利用，政策导向日趋明确。

表 1 我国退役风光设备资源化利用标准政策现状梳理

Tab.1 Overview of current standards and policies for resource utilization of decommissioned wind and photovoltaic equipment in China

政策类别	政策/标准名称	发布机构	发布时间	主要内容
国家标准	《光伏组件回收再利用通用技术要求》GB/T 39753—2021	国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会	2021 年	光伏组件回收技术要求、工艺流程、质量标准
国家标准	《晶体硅光伏组件回收处理方法 物理法》GB/T 43752—2024	国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会	2024 年	晶硅光伏组件回收处理流程、质量评价标准
国家标准	《风能发电系统 风力发电机组废弃纤维复合材料回收方法》GB/T 45195—2024	国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会	2024 年	风电叶片复合材料回收方法和技术要求
基础法律	《循环经济促进法》	全国人大常委会	2018 年修订	确立“减量化、再利用、资源化”基本原则
基础法律	《固体废物污染环境防治法》	全国人大常委会	2020 年修订	固废分类管理和资源化利用要求
管理条例	《废弃电器电子产品回收处理管理条例》	国务院	2019 年修订	电子产品回收处理管理制度
地方标准	《晶体硅光伏组件回收规范》DB64/T 1971—2023	宁夏市场监督管理厅	2023 年	光伏组件回收处理技术规范

我国退役风光设备资源化利用的标准体系尚处于起步阶段，现行国家标准仅有《光伏组件回收再利用通用技术要求》（GB/T 39753—2021）[4]、《晶体硅光伏组件回收处理方法 物理法》（GB/T 43752—2024）[5]和《风能发电系统 风力发电机组废弃纤维复合材料回收方法》（GB/T 45195—2024）[6] 3 项。现有的《废弃电器电子产品回收处理管理 条例》（2019 年修订）[7]及其配套标准主要针对传统电子产品，对光伏组件的特殊性考虑不足。中国光伏行业协会持续发布及更新相关的光伏组件回收利用技术规范团体标准，例如《晶体硅光伏组件回收再利用通用技术要求》（T/CPIA 0002—2017）[8]、《废弃光伏组件回收利用 电池片处理方法 湿化学法》（T/CPIA 0086—2024）[9]等，但在法律效力和约束力方面存在不足；风电设备标准更为匮乏。中国可再生能源学会风能专业委员会等机构正在制定相关的风电设备回收利用标准，尚未形成完整的标准体系。

江苏省、内蒙古自治区、河北省等地方对于退役风光组件回收利用呈现差异化探索态势。然而，地方实践普遍存在规模小、技术不成熟、缺乏统一标准等问题，难以形成可复制、可推广的经验模式。宁夏回族自治区率先发布实施《晶体硅光伏组件回收规范》（DB64/T 1971—2023）[10]（表 1），为地方标准制定提供了示范。

1.2 标准体系主要问题

1）技术发展与标准制定存在明显滞后性

随着风光设备技术快速迭代，退役设备的材料构成和回收难度呈现新特点[11]。光伏领域早期的晶硅光伏组件相对简单，但近年来出现了双玻组件、柔性组件、异质结组件等新型产品，材料构成更加复杂。以双玻组件为例，其背板材料从传统材料改为玻璃，显著增加了回收处理的难度和成本。此外，新兴的钙钛矿太阳能电池、有机光伏电池等第三代光伏技术中使用的新型材料，如有机-无机杂化钙钛矿材料，其含铅量虽然较少（每个组件 0.5~1.0 g），但毒性较强，且目前缺乏成熟的回收技术和相应的环境影响评估标准[12]。风电领域早期风电机组单机容量较小，叶片长度相对较短，主要采用玻璃纤维复合材料。目前，主流风电机组单机容量已达到数兆瓦级别，海上风电机组单机容量更是超过 10 MW，叶片长度大幅增加，材料构成也从单一的玻璃纤维发展为玻璃纤维与碳纤维的复合材料，其分离回收技术复杂，成本高昂[13]。此外，随着风电机组向大型化、智能化发展，其电控系统、传动系统等关键部件中使用了大量的稀土永磁材料、高性能合金钢等高价值材料，现有标准完全无法适应[14]。

2）市场主体需求与标准供给不匹配问题突出

设备制造商在产品设计阶段对终端回收便利性考虑不足，缺乏针对可回收设计的具体标准要求，致使后续拆解回收成本攀升[15]。头部企业虽然开始探索可回收设计，但现有标准体系中缺乏针对风电叶片可回收设计的具体要求。运营商缺乏统一的退役设备评估标准和处置规范，导致企业在设备退役决策（如退役时点判定、处置方式选择）上缺乏科学依据，对于仍具潜在使用价值的设备，在技术改造延长服役周期与直接进入拆解回收流程之间缺乏系统性的评估框架。回收处理企业采用的技术路径、工艺流程、质量标准等存在较大差异，不同企业的回收产品质量参差不齐，市场认可度不高，难以形成协同、高效的产业生态。

3）环境监管与标准执行存在薄弱环节

退役风光设备在拆解、运输、处理过程中可能产生多种环境污染，包括重金属渗漏、粉尘排放、废液排放等[16]。目前，针对退役风光设备的环境监管标准不够完善。例如，光伏组件拆解过程中产生的含铅废料、含镉废料的处置标准不明确，部分小型回收企业缺乏必要的环保设施，可能造成二次污染。风电叶片破碎过程中产生的玻璃纤维粉尘对工人健康和周边环境存在危害，但相关的职业健康标准和环境排放标准尚未建立。

4）产业链协同发展政策支撑不足

尽管《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》提出了生产者责任延伸制度，但具体的实施细则和激励措施尚未出台。设备制造企业开展可回收设计需要增加研发投入和生产成本，但缺乏相应的政策支持和市场激励，企业参与积极性不高。设备回收处理涉及复杂的材料分离、有害物质处理等技术难题，需要大量的研发投入，现有的科技创新政策对这一领域的支持力度有限。此外，回收材料的市场应用缺乏政策推动，由于缺乏统一的质量标准和认证体系，下游应用企业对回收材料的接受度不高。

2 国际退役风光设备资源化利用标准现状

2.1 各国退役风光设备资源化利用现状

欧洲在 20 世纪 90 年代初开始高度关注电子废弃物的产生及其影响。德国、瑞士等欧盟成员国先后颁布实施了有关电子废弃物的管理办法，但由于各申根国家的法律基础、资源利用和回收现状有所不同，各自出台的管理办法不利于欧盟的统一管理。因此，欧盟开始在共同体层面制定关于电子废弃物的专项法律，2002 年通过 WEEE 指令（2002/96/EC）。WEEE 指令生效后，在实施范围、管理及法律诸多层面依旧存在问题，后分别于 2012 年和 2024 年进行了 2 次修订。WEEE 指令标准体系核心内容包括：1）产品分类管理体系，将电子电器产品分为 10 个类别，每类产品采用差异化的回收目标和处理要求 2024 年修正案（Directive （EU）2024/884）为光伏组件设立了第 11 类新类别，专门针对光伏面板的特殊性制定管理要求；2）生产者责任延伸制度（EPR），要求生产商承担产品整个生命周期的环境责任，包括设计、生产、销售、回收和处置各环节；3）设立回收目标，新版指令要求实现回收率 85%，再利用率 80%以上；4）技术标准体系，制定了废物收集、运输、储存、预处理和最终处理的技术规范；5）监管体系，建立了从成员国到欧盟层面的多层级监管机制[17]。该指令通过强制性回收目标倒逼技术创新，通过标准化处理流程提高回收效率，通过区域协调机制实现规模效应。此外，配套 WEEE 指令，欧盟制定了《废物运输法规》（Regulation （EC） No 1013/2006，2024 年 Regulation (EU) 2024/1157 出台后被废除替代），规范废物转移，确保回收过程对环境影响最小化[18]。结合欧盟的另一项强制性标准 RoHS（restriction of hazardous substances），主要成员国也陆续转化出台本国法令。德国通过 ElektroG 法律转化 WEEE 指令，建立了完善的收集网络，年处理能力超过 200 万吨；法国 PV CYCLE 组织自 2007 年成立以来，已回收处理超过 10 万吨光伏组件；比利时 Umicore 公司开发的贵金属回收技术，能够从光伏组件中回收 95%以上的银。截至 2022 年，欧盟电子废物回收率达到 74.2%，超过了 65%的目标[19]。与光伏组件不同，风电设备尚未形成强制性法律框架。2021 年在西班牙风能协会（AEE）的年会上，WindEurope 和 AEE 呼吁，到 2025 年在欧洲范围内禁止对退役的风电叶片进行填埋处置，欧洲的风电行业应积极致力于重新使用或 100%回收退役叶片。欧盟退役风光设备资源化利用经验的核心特征是通过强制性法律框架确保政策执行的统一性和有效性，生产者责任延伸制度明确了企业责任边界，建立了长效机制[20]。美国早在 20 世纪就开始推行环境保护并立法。《资源保护和回收法》（resource conservation and recovery act，RCRA）是美国于 1976 年制定的一部联邦法律，该法是第 1 部专门关注改进固体废物处置方法的法规并沿用至今[21]。根据美国环保署（EPA）要求，风电、光伏固废需按照 RCRA 中的固体废物和潜在危险废物的标准进行处理。2025 年 1 月，美国能源部（DOE）发布了美国的风能系统回收报告（recycling wind energy systems in the United States）[14]，明确美国现有基础设施可回收 90%退役风机材料（如钢塔架、混凝土基座），但叶片、发电机稀土永磁体（镍、钴等）和机舱罩复合材料回收技术存在空白，并提出了阶段性的研发计划。

美国联邦体制下，各州在风光设备回收监管方面呈现显著差异，形成联邦-州-地方的三级监管体系：联邦层面制定基础性法律法规和技术指导，州级政府制定具体实施方案和监管措施，地方政府负责具体执法和监督。联邦层面不强制要求回收，但通过资金支持和技术指导影响行业发展。而不同州的法规要求、实施路径和技术重点存在较大差别。这种分层监管模式的优势在于灵活性和创新性，各州可以根据自身产业特点和环境需求制定差异化政策。但也存在碎片化问题，不同州之间的政策差异导致跨州回收成本增加。根据美国清洁电力协会（ACP）的统计，单台风电机组的退役成本在不同州之间差异显著，从 6.7 万美元到 15 万美元不等[16]，主要原因是各州的填埋费用、运输成本、环保要求存在差异。

美国在退役光伏组件回收方面已形成了一定的产业化模式。作为北美最大的光伏开发商之一，EDF Renewables North America 宣布与一家以技术为基础的太阳能回收公司 Solarcycle 达成协议，回收在施工和运营期间损坏或破损的太阳能电池板，这种企业间合作模式为行业提供了可行的商业化回收解决方案[22]。

日本在退役光伏（太阳能）组件管理方面较早建立了立法体系。1997 年，日本国会出台了《促进

新能源利用特别措施法》，引入了新能源发展的基本方针。2000 年，《循环型社会形成推进基本法》制定，该法为日本建设循环型社会的“宪法”，核心为推动废弃物的减量化、再利用和资源化及废弃物处理优先顺序为抑制产生、再利用、再循环、热回收、适当处置。2004 年，日本发行《关于太阳能电池类物品废弃处理的法律事项》，明确了光伏组件的废弃物分类（一般废弃物或产业废弃物）和处理责任，为后续光伏设备的退役处理提供了法律依据[23]。《第七次能源基本计划》明确提出“要推动可再生能源系统的回收，尤其是退役太阳能组件将强制进行回收处理”，预计到 2030 年代中期实施强制回收制度，回收目标为组件总质量的 80%以上[24]。日本企业在退役设备回收技术创新方面表现突出。2018 年 6 月，日本 NextEnergy 公司首个使用回收旧组件建造的光伏电站投入运营[25]，项目运行 5 年后，发电量与预期基本相符。

此外，日本采取了政府引导与行业自律相结合的管理模式。政府通过认证制度和自愿性指南实现“软监管”。2012 年日本实施“上网电价补贴”（FIT）制度后，光伏装机量快速增长[26]。日本经济产业省建立了光伏组件回收企业认证制度，只有获得认证的企业才能处理 FIT 项目的退役组件[27]。同时，行业组织在制定自愿性技术规范和促进产业协调方面发挥了重要作用。日本光伏能源协会（JPEA）制定了《太阳能发电设备回收利用指南》，为会员企业提供自愿性技术规范。指南涵盖了从产品设计、回收物流、拆解处理到材料再利用的全流程，并定期更新以适应技术发展[28]。会员企业自愿承诺遵守指南要求，协会通过培训、交流、评估等方式促进行业自律。

2.2 国际标准化进展

在国际标准化层面，国际电工委员会（IEC）正在加强风电回收标准的制定工作[3]。国际电工委员会风能发电系统技术委员会（IEC/TC 88）负责制定风力发电系统的技术标准，其范围涵盖从设计、生产、建设、运营、维护到退役、拆解、材料回收和回收的完整生命周期，已于 2025 年 3 月发布《风能发电系统 第 28 部分：风电资产全生命周期管理与寿命延长》（IEC TS 61400—28）[29-30]。

国际电工委员会太阳能光伏能源系统技术委员会（IEC/TC 82）也正在制定光伏组件回收处理的专项标准——光伏组件再利用与循环经济（IEC TR 63525），预计在 2026 年发布。

2.3 国际经验特征分析

各国政策经验呈现出以下共同特征：1）普遍建立了生产者责任延伸制度，要求设备制造商承担相应的回收责任；2）技术创新驱动，各国都加大了对回收技术研发的投入；3）标准化协调，通过国际组织推动技术标准的统一；4）市场化运作，鼓励企业参与回收产业链建设。

各国政策实践也存在显著差异，欧盟 WEEE 指令的分类管理经验可为建立差异化回收标准提供参考；美国分层监管模式有助于处理中央与地方政策衔接问题；日本政府引导与行业自律结合的做法具有较强的适用性。

3 完善我国退役风光设备资源化利用标准体系

我国在退役风光设备资源化利用方面面临着规模最大、区域差异更明显、制造业优势更突出等特点。预计到 2030 年我国退役光伏组件将达 150 万吨，风电设备退役容量将达 45 GW，远超任何单一国家或地区，需要建立超大规模的回收体系。我国幅员辽阔，东西部、沿海内陆的风光资源禀赋、产业基础、经济发展水平差异巨大，需要差异化的政策设计。我国是全球最大的风光设备制造国，产业链完整，技术水平先进，这为建立闭环循环体系提供了有利条件。应在深入学习国际先进经验的基础上，结合自身实际情况，加快构建系统性、协调性、适应性强的标准体系，推动退役风光设备资源化利用。借鉴动力电池回收、废旧电器电子产品回收等相关行业的成功经验，结合风光设备回收的技术特点和产业需求，构建一套科学完善、协调统一、适应性强的标准体系。

3.1 标准体系完善基本原则

3.1.1 系统性

标准体系建设应统筹考虑退役风光设备全生命周期管理需求，构建覆盖设备评估、拆解回收、材料处理、环境保护的完整标准链条。《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》建立了从设计制造、销售使用到回收利用的全链条管理体系，有效解决了动力电池回收的系统性问题。借鉴其成功经验，风光设备回收标准体系也应注重系统性设计，建立“源头减量-过程控制-末端治理”的系统性标准框架。源头减量方面，可借鉴欧盟 WEEE 指

令的可回收设计理念，制定风光设备可回收设计规范等标准，要求制造商在产品设计阶段考虑回收便利性，如采用易拆解连接方式、减少胶黏剂使用、标注材料类型等；过程控制方面，建立退役评估、拆解分离、材料分类等技术标准；末端治理方面，完善有害物质处置、环境保护等管理标准；环境监测方面，建立风光设备回收处理环境监测技术规范，规定回收处理过程中的大气、水、土壤污染物监测方法和限值，保护生态环境。

3.1.2 协调性

标准体系应实现国家标准、行业标准、团体标准的层次清晰和有机衔接。参考废旧电器电子产品回收体系的建设经验，通过《废弃电器电子产品回收处理管理条例》确立基本框架，配套制定处理资格许可、处理基金管理等行业标准，形成了较为协调的标准体系。风光设备回收标准体系应借鉴这一模式，实现领域内国家标准、行业标准、团体标准、企业标准之间的有机衔接；退役风光设备相关标准应与相关领域标准应相互协调。例如，加强与现有《循环经济促进法》《固体废物污染环境防治法》等上位法的协调，确保标准体系的法律依据充分。同时，应与国际标准（如 IEC 标准）相对接，便于技术交流和产品出口。

3.1.3 适应性

退役风光设备资源化利用技术正处于快速发展期，新材料、新工艺、新模式不断涌现，标准体系必须具备较强的适应性，能够及时响应技术进步和产业发展需求。借鉴国际经验，适应性原则要求建立动态调整和前瞻性研究机制。动态调整方面，定期（建议每 3 年）评估标准的适用性和有效性，对于技术发展较快的领域（如新型光伏组件回收、叶片化学回收等），建议采用 1～2 年的快速迭代周期；对于已经滞后的标准，应及时启动修订程序。对于暂时无法制定国家标准的新技术、新工艺，可以先发布团体标准或技术指南，积累经验后再上升为国家标准。前瞻性研究方面，跟踪 IEC/TC 88、ISO/TC 323 等国际标准化组织的工作动态，及时了解国际标准制定方向；关注钙钛矿太阳能电池、固态电池、可回收树脂叶片等前沿技术发展，提前布局标准预研工作。

3.1.4 可操作性

标准的生命力在于实施，可操作性原则要求标准制定必须与产业实际相结合，确保标准内容科学合理、技术可行、经济适用。可操作性原则要求注重实用性、平衡性和可测量性。实用性方面，标准要注重实用性，避免过于抽象和宽泛的表述。例如在制定光伏组件拆解技术规范时，应明确规定拆解流程（拆边框→去接线盒→分离玻璃→剥离背板→分选材料）、关键设备（如加热台温度范围、机械压力范围）、操作要求（如工人防护要求、粉尘控制措施）、质量标准（如玻璃破损率小于 5%、银回收率大于 90%）等具体内容。平衡性方面，标准既不能过于超前导致难以实施，也不能过于滞后失去指导意义，需要在技术先进性和经济合理性之间找到平衡点。例如，对于叶片化学回收技术，虽然溶剂法能够达到 95%以上的纤维回收率，但成本是机械法的 3~5 倍，现阶段大规模推广存在困难，标准可以将溶剂法列为推荐性技术路线，允许企业根据自身条件选择。可测量性方面，标准中的技术指标、质量要求应当是可测量、可验证的，配套制定检测方法标准，为标准实施提供技术支撑。

3.2 优化标准体系架构建议

标准体系架构包括基础通用标准层、专业技术标准层、管理规范标准层

3.2.1 基础通用标准层

基础通用标准是整个标准体系的基石，应优先制定术语定义、分类方法、评估准则等基础性标准。首先统一退役风光设备相关的基本概念，明确退役、梯次利用、资源化回收、再制造等关键术语的内涵和外延，为后续标准制定提供统一定义。在分类方法方面，建立基于设备类型、材料构成、技术状态的科学分类体系，为差异化管理提供技术支撑。在评估准则方面，应制定退役设备状态评估的统一方法学，包括性能检测指标、安全评估标准、经济性分析方法等。基础通用标准应重点解决“是什么”“怎么分”“如何评”的基本问题，为产业发展提供基础性技术支撑。

3.2.2 专业技术标准层

专业技术标准是标准体系的核心，应重点完善拆解工艺、材料分离、再制造质量等技术标准。专业技术标准应重点解决当前产业发展面临的技术瓶颈。例如，对于光伏组件，重点规范组件拆解、玻璃分离、金属回收等关键工艺流程；对于风电设备，重点规范叶片切割、复合材料分离、稀土永磁材料回收等技术要求。

3.2.3 管理规范标准层

管理规范标准是保障退役风光设备资源化利用规范有序的制度基础，其核心内容是环境保护。

1）污染控制标准　明确退役光伏组件回收处理环境保护技术规范，含铅焊料、含镉薄膜等危险废物的收集、储存、处理要求，规定废水中重金属排放限值（建议铅小于 0.10 mg/L，镉小于 0.05 mg/L，参考欧盟标准），废气中氟化物、氯化氢等有害气体排放浓度；制定风电叶片回收处理环境保护技术规范，规定叶片破碎、焚烧等工艺的粉尘控制要求（工作场所空气中玻璃纤维浓度小于 5 mg/m³）及二噁英排放限值等。

2）环境监测标准　规定回收企业应监测的环境指标（大气污染物、水污染物、土壤重金属、噪声等）、监测频次、监测方法和数据报告要求，推动重点企业安装在线监测系统，实现污染物排放实时监控。

3）应急处置标准　指导企业建立环境风险评估机制、应急响应机制和污染事故处置流程。

3.3 标准实施支撑体系

3.3.1 建设技术支撑平台

建立国家级技术支撑平台是保障标准有效实施的重要基础。

1）建设国家级检测认证机构，具备退役风光设备材料成分检测、有害物质检测、产品质量检测等能力；

2）建设技术研发平台，开展回收技术研发、标准验证、产业化示范等工作；

3）完善标准化技术委员会体系，发挥标准化技术委员会在标准制定、技术咨询、国际交流中的作用；

4）建设环境监测与风险评估平台，开展退役设备回收处理过程的环境影响评估、污染物排放监测、生态风险评估等工作。

3.3.2 建立产业链协同发展机制

产业链协同发展机制的建立应统筹上下游协调发展，促进设备制造企业、运营企业、回收处理企业、材料应用企业等产业链各环节的有效对接。借鉴欧盟 EPR 制度和日本行业协会模式，建立多方协同机制。上游设备制造环节，应推动制造企业开展面向回收的设计，在产品设计阶段就考虑后续的回收处理需求，提高设备的可拆解性和材料的可分离性。中游回收处理环节，应支持专业化回收处理企业做大做强，提高技术水平和处理能力，形成规模化、集约化的发展格局。下游材料应用环节，推动回收材料在新能源设备制造中的应用，形成闭环循环利用模式。此外，可以通过建立信息共享平台、技术合作机制、利益分享机制等方式，推动产业链上下游企业深度合作，形成协同发展格局。同时，建立全国统一的退役风光设备信息平台，实现设备信息、回收信息、材料信息共享。

4 我国退役风光设备资源化利用标准发展趋势与建议

未来 5~10 年，退役风光设备资源化利用将呈现技术密集型发展特征，钙钛矿–硅叠层电池、有机光伏、碳纤维复合材料等新一代技术的规模化应用，将对传统回收技术和标准体系形成冲击。特别是钙钛矿材料中铅等有毒物质的环境风险管控，以及碳纤维复合材料的高效分离回收，均需要建立全新的技术标准框架。

随着 IEC/TC 88、ISO 14000 系列环境管理标准等国际标准化组织加快制定全球统一的风电回收标准，各国标准体系的趋同性将不断增强。我国新能源设备出口规模持续扩大，退役设备的跨境回收处理需求将显著增长。积极参与 IEC/TC 88、ISO/TC 323 等国际标准制定，推动具有中国特色的技术方案和管理经验上升为国际标准，提升话语权和影响力。

建立政策传导的层级机制，确保国家政策在地方层面得到有效落实，同时鼓励地方结合实际情况开展政策创新试点。依托京津冀、长三角、珠三角等区域一体化发展机制，推动建立退役设备跨区域协同处置体系。可以在重点区域建设 1、2 个国家级退役风光设备资源化利用综合示范基地，探索形成可复制、可推广的发展模式。监管体系要覆盖退役设备产生、收集、运输、处置全过程，建立从设备退役登记到最终处置的全链条监管制度。

退役设备技术迭代速度快于标准更新速度的矛盾长期存在。随着新材料、新工艺的快速发展，现有标准可能无法适应技术进步需要，存在标准滞后于技术发展的风险。完善标准动态调整机制，建立标准实施情况跟踪评价体系，有助于对技术进步较快的领域实施标准快速迭代。

5 结　语

推进我国退役风光设备资源化利用标准体系

建设，对于规范产业发展秩序、提升国际竞争力、支撑双碳目标实现具有重要的现实意义。本文通过对我国退役风光设备资源化利用标准现状的系统梳理，考虑到我国超大规模回收需求、区域差异明显、制造业优势突出等特殊国情，提出标准体系的完善应坚持系统性、协调性、适应性、可操作性原则，通过建立覆盖全生命周期的标准框架、完善跨部门协调机制、强化动态调整能力，形成技术先进、管理科学、运行高效的制度体系。

当前技术快速迭代对标准制定提出了更高要求，国际标准化进程的加速推进为我国参与全球治理创造了机遇。面向未来，应在具体技术标准制定、政策实施效果评估、国际合作机制深化等方面开展进一步研究，为新能源产业的可持续发展和循环经济的深度应用提供更加有力的保障。

[参 考 文 献]

[1] 国家能源局. 2024 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2025-01-20)[2025-09-11]. https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html.
National Energy Administration. 2024 national electric power industry statistical data[EB/OL]. (2025-01-21)[2025-09-11]. https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd 3498897639857d86d5dac/c.html.

[2] International Renewable Energy Agency, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. End-of-life management: solar photovoltaic panels[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2016: 1.

[3] JENSEN J P, SKELTON K. Wind turbine blade recycling: experiences, challenges and possibilities in a circular economy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 97: 165-176.

[4] 全国电器电子产品与系统标准化技术委员会. 光伏组件回收再利用通用技术要求: GB/T 39753—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 3.
National Technical Committee for Standardization of Electrical Appliances and Electronic Products. General technical requirements for recycling and reuse of photovoltaic modules: GB/T 39753—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 3.

[5] 全国半导体设备和材料标准化技术委员会. 晶体硅光伏组件回收处理方法 物理法: GB/T 43752—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024: 3.
National Technical Committee for Standardization of Semiconductor Equipment and Materials. Method for recycling and processing of crystalline silicon photovoltaic modules-physical method: GB/T 43752—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024: 3.

[6] 全国风力发电标准化技术委员会. 风能发电系统 风力发电机组废弃纤维复合材料回收方法: GB/T 45195—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024: 3.
National Technical Committee for Standardization of Wind Power Generation. Wind power generation systems: method for recycling of waste fiber composite materials from wind turbines: GB/T 45195—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024: 3.

[7] 国务院. 废弃电器电子产品回收处理管理条例(2019年修订)[S]. 北京: 中国法制出版社, 2019: 3.
State Council. Regulations on the administration of the recycling and treatment of waste electrical and electronic products (revised in 2019)[S]. Beijing: China Legal System Publishing House, 2019: 3.

[8] 中国光伏行业协会. 晶体硅光伏组件回收再利用通用技术要求: T/CPIA 0002—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 3.
China Photovoltaic Industry Association. General technical requirements for recycling and reuse of crystalline silicon photovoltaic modules: T/CPIA 0002—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 3.

[9] 中国光伏行业协会. 废弃光伏组件回收利用 电池片处理方法 湿化学法: T/CPIA 0086—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024: 3.
China Photovoltaic Industry Association. Method for recycling and reusing waste photovoltaic modules - wet chemical method for cell processing: T/CPIA 0086—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024: 3.

[10] 宁夏回族自治区市场监督管理厅. 晶体硅光伏组件回收规范: DB64/T 1971—2023[S]. 银川: 宁夏回族自治区市场监督管理厅, 2023: 3.
Ningxia Hui Autonomous Region Market Supervision and Administration Department. Specification for recycling of crystalline silicon photovoltaic modules: DB64/T 1971—2023[S]. Yinchuan: Ningxia Hui Autonomous Region Market Supervision and Administration Department, 2023: 3.

[11] SICA D, MALANDRINO O, SUPINO S, et al. End-of-life wind turbine blade management across energy transition: a life cycle analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 481: 143890.

[12] 周世发, 胡广, 李朝阳, 等. 报废光伏组件处理处置现状与发展趋势[J]. 能源环境保护, 2025, 39(2): 56-69.
ZHOU Shifa, HU Guang, LI Zhaoyang, et al. Current situation and development trend of end-of-life photovoltaic module treatment and disposal[J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(2): 56-69.

[13] ŻÓŁTOWSKI M, KURTYKA K, KONSTANTINOU M, et al. Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: overview of current and coming solutions[J]. Materials, 2021, 14(5): 1124.

[14] U.S. Department of Energy. Recycling wind energy systems in the United States Part 1: providing a baseline for America's wind energy recycling infrastructure for wind turbines and systems[R]. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2025: 3.

[15] SORTE E G B, NASCIMENTO L F C, DEWULF J. End-of-life wind turbine blades: review on recycling strategies[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 275: 111335.

[16] DIRECTIVE 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain directives[S]. Brussels: Official Journal of the European Union, 2008: 3.

[17] European Parliament and Council. Directive (EU) 2024/884 amending Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)[EB/OL]. Official Journal of the European Union, 2024, L: 1-12. (2024-04-05)[2025-08-25]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ EN/TXT/?uri=OJ:L_202400884.

[18] European Parliament and Council. Regulation (EU)

2024/1157 on shipments of waste[EB/OL]. Official Journal of the European Union, 2024, L: 1-52. (2024-04-30)[2025-08-25. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/? uri=OJ:L_202401157.

[19] Eurostat. Recycling rate of e-waste[EB/OL]. (2023-10-15)[2025-08-25]. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm020/default/table?lang=en.

[20] GKANTOU M, REBELO C, BANIOTOPOULOS C. Recycling of wind turbine blades: recent developments[J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2023, 39: 100716.

[21] U.S. Environmental Protection Agency. Resource conservation and recovery act (RCRA)[Z]. Washington, DC: U.S. Government Publishing Office, 1976: 1.

[22] DF Renewables North America. EDF Renewables North America selects SOLARCYCLE to be its preferred solar recycling partner[EB/OL]. (2023-11-01)[2025-08-22]. https://www.edf-re.com/press-release/edf-renewables-north-america-selects-solarcycle-to-be-its-preferred-solar-re-cycling-partner/.

[23] 日本 JPEA. 关于太阳能电池类物品废弃处理的法律事项[Z]. 东京: 日本光伏能源协会, 2004: 3.
Japan Photovoltaic Energy Association (JPEA). Legal matters on the disposal of solar cell-related items[Z]. Tokyo: Japan Photovoltaic Energy Association, 2004: 3.

[24] Ministry of Economy, Trade and Industry. The 7th strategic energy plan[R]. Tokyo: METI, 2025: 3.

[25] Nextenergy & Resources Co., Ltd. First solar power plant using recycled modules[R]. Tokyo: NextEnergy, 2018: 3.

[26] 周杰. 日本可再生能源政策创新与市场发展[C]//中国经济社会理事会, 武汉新能源研究院. 国际清洁能源产业发展报告(2018). 澳门: 世界知识出版社, 2018: 402-423.
ZHOU Jie. Innovation in Japan's renewable energy policies and market development[C]// China Council for the Promotion of International Trade, Wuhan New Energy Research Institute. International Clean Energy Industry Development Report (2018). Macau: World Knowledge Publishing House, 2018: 402-423.

[27] Ministry of Economy, Trade and Industry. Feed-in tariff scheme for renewable energy[R]. Tokyo: METI, 2012: 3.

[28] Japan Photovoltaic Energy Association. Guidelines for appropriate disposal of end-of-life solar modules[S]. Tokyo: JPEA, 2017: 3.

[29] Wind energy generation systems: Part 28: Through life management and life extension of wind power assets: IEC/TS 61400-28: 2025[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025: 3.

[30] 全国风力发电标准化技术委员会. IEC/TS 61400-28: 2025《风能发电系统 第 28 部分: 风力发电资产的全生命周期管理与延寿》技术规范发布[EB/OL]. (2025-03-15)[2025-07-22]. http://www.cwms.org.cn/index.php?id=735.
National Technical Committee for Standardization of Wind Power Generation. IEC/TS 61400-28: 2025 *Wind energy generation systems: Part 28: life cycle management and life extension of wind power assets: technical specification* released[EB/OL]. (2025-03-15) [2025-07-22]. http://www.cwms.org.cn/index.php?id=735.

（责任编辑　杨嘉蕾）