

生产型企业光伏电站扩建项目 全生命周期环境评价

朱晓晨

(苏州市宏宇环境科技股份有限公司, 江苏 苏州 215001)

摘 要 本文以某生产型企业光伏电站扩建项目为案例, 开展全生命周期环境评价, 旨在识别环境影响关键环节并量化其生态足迹。评价范围覆盖原材料获取、设备制造、运输建设、运行维护及报废回收阶段; 进行清单分析以收集各阶段能源与物料流数据, 并运用特征化模型量化全球变暖、酸化、富营养化等指标, 结合贡献分析解析各阶段影响权重。结果表明, 设备制造阶段因硅料生产和能耗产生较高碳足迹, 运行阶段虽无直接排放但间接维护活动带来轻微影响, 报废回收阶段资源化潜力显著; 全生命周期相比化石能源具有显著环境效益。

关键词 光伏电站扩建; 全生命周期评价; 环境影响; 清单分析

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.024

0 引言

当前对光伏项目的环境评价多集中于运行阶段的减排效益, 而忽略从硅料开采、电池片制造、组件生产到运输建设、运维乃至最终报废回收全过程。全生命周期评价方法作为一种系统性环境管理工具能量化产品, 在国际上已被广泛应用于评估能源技术综合环境影响。将其应用于生产型企业光伏电站扩建项目可弥补传统评价方法不足, 精准识别环境影响热点与减排潜力, 为项目绿色规划、清洁采购和废弃组件环境友好型处理提供科学依据, 推动光伏发电在全生命周期维度上实现真正环境友好与可持续发展, 对企业绿色转型与区域低碳发展具有现实意义。

1 项目概况与评价范围界定

1.1 扩建项目基本情况

本项目位于华东地区某大型装备制造企业的现有工业园区内, 企业主要生产精密机械零部件与自动化设备, 响应国家“双碳”目标及企业自身绿色供应链建设需求, 本次扩建工程计划基于已建成的一期光伏电站, 利用厂区剩余所有可用屋顶资源及部分停车场车棚空间进行光伏电站扩容。扩建项目总规划装机容量为 5.95 兆瓦, 采用当前主流的单晶硅 PERC 高效光伏组件, 组件效率不低于 21.5%, 计划安装面积约 5.8 万平方米。项目建成后预计首年发电量可达 650 万千瓦时, 所发电量将优先供应该工业园区白天的生产用电负荷, 实现自发自用模式, 可显著降低外购电成本与范围二碳排放。

1.2 全生命周期评价范围界定

本次全生命周期评价研究旨在系统且定量地评估该光伏电站扩建项目从建设到废弃整个生命周期过程对环境的综合影响, 评价范围界定遵循 ISO 14040/14044 标准并采用“从摇篮到坟墓”分析路径, 其系统边界明确包含原材料获取与设备制造、运输与建设安装、运行维护、报废回收这四个连续且相互关联的核心阶段。

2 生命周期清单分析

2.1 原材料获取与设备制造阶段

原材料获取与设备制造阶段构成了项目全生命周期资源消耗与环境排放的主要部分。生产 5.95 兆瓦单晶硅 PERC 组件本身消耗的多晶硅原料约为 335 吨, 其高纯度硅料冶炼提纯过程是能耗热点, 电力消耗折合超过 180 万千瓦时, 对应产生约 1 200 吨二氧化碳当量的碳排放。铝材是支架系统与组件边框的主要材料, 其开采与初级加工阶段清单包含了约 95 吨铝锭的消耗, 基于全球平均水平, 每吨原铝生产的电力消耗约为 14 500 千瓦时, 导致该部分隐含的碳排放量接近 1 400 吨二氧化碳当量。逆变器、汇流箱及电缆等电气设备的制造则涉及大量的铜、钢及塑料等原材料, 其中铜的消耗量约为 18 吨, 其冶炼过程的二氧化硫排放潜力需要被记录在清单中。

2.2 运输与建设安装阶段

运输与建设安装阶段的清单分析基于具体的物流情景, 光伏组件主要从华东地区的生产基地通过重型

卡车公路运输至项目地，平均运距设定为 350 公里，支架与电缆等从省内供应商运输，平均运距 150 公里，逆变器等关键电气设备可能涉及更远距离的运输。所有物料的总运输吨公里数被详细计算，并基于重型柴油卡车的单位能耗与排放因子，核算出该阶段消耗的柴油总量约为 42 吨，直接排放的二氧化碳约为 132 吨，并伴有氮氧化物与颗粒物的排放。建设安装阶段的现场活动清单主要包括土方开挖、混凝土基础浇筑、支架钢结构焊接与固定、组件安装与电气系统接线等工序。

2.3 运行维护阶段

运行维护阶段跨越项目 25 年的设计寿命，其清单输入具有长期、低强度但持续累积的特点，运行期的核心产出是绿色电力，但清单分析同样关注维持这一产出所需的少量投入及其伴随的排放。光伏组件在运行期间无燃料消耗与直接污染物排放，但其发电效率存在年均约 0.5% 的线性衰减，这意味着为维持额定发电量，清单模型需考虑其性能随时间的微小变化。维护活动主要包括定期对组件表面进行清洁以防止灰尘遮挡影响发电效率，清洁用水消耗被纳入清单，预计年均耗水量约为 850 立方米。

2.4 报废回收阶段

报废回收阶段的清单分析基于 25 年寿命期结束时对电站设施的拆解与处理情景，拆除作业所需的能源，主要是重型机械消耗的柴油，估计约为 8 吨，对应排放二氧化碳 25 吨。清单输出的核心是废弃物的种类、数量及其最终去向。届时将产生约 28 500 块废弃光伏组件，总重量估计为 285 吨，其中含有玻璃、铝框、硅、银、铜等有价值材料。

3 生命周期影响评价

3.1 影响评价机制与方法选择

本文选取具有科学、透明和可比较特点的国际公认的 CML 2001 基准方法作为核心评价模型, 评价过程遵循特征化、标准化和加权评估步骤, 且本文侧重

于特征化结果以保持客观性, 针对光伏发电系统的环境特性, 研究确定全球变暖潜能、酸化潜能、富营养化潜能、人体毒性潜能和不可再生资源消耗潜能这五个关键影响类别作为评价指标^[1]。全球变暖潜能采用IPCC百年时间尺度的当量因子, 将二氧化碳、甲烷等温室气体统一转化为二氧化碳当量进行量化。酸化潜能和富营养化潜能分别以二氧化硫当量和磷酸根当量来衡量排放物质对土壤和水体酸碱度及营养状况的潜在影响^[2]。人体毒性潜能关注重金属及特定有机物对人体健康的潜在风险, 以1,4-二氯苯当量计。不可再生资源消耗潜能则聚焦化石燃料和矿产资源的枯竭压力, 以铈当量表示。

3.2 各阶段环境影响特征化与量化

基于生命周期清单数据和应用 CML 2001 方法, 对项目各阶段的环境影响潜能进行了特征化计算与量化分析, 结果见表 1^[3]。

结果显示,项目全生命周期内每提供1千瓦时电力,其全球变暖潜力为42.3克二氧化碳当量、酸化潜力为0.28克二氧化硫当量且富营养化潜力为0.11克磷酸根当量,其中原材料获取与设备制造阶段在所有影响类别中均占据主导地位,贡献了约38.5克二氧化碳当量的全球变暖潜力,该阶段的酸化潜力和富营养化潜力也最为显著,分别达到0.21克二氧化硫当量和0.08克磷酸根当量且与燃料燃烧及工业生产过程排放的硫氧化物、氮氧化物密切相关,而运输与建设安装阶段影响相对较小,却对酸化潜力有主要来自柴油发动机尾气排放的可观测贡献。

3.3 环境影响贡献分析

贡献分析表明,原材料获取与设备制造阶段是项目最主要的环境压力来源,该阶段对全球变暖潜力、酸化潜力、富营养化潜力、人体毒性潜力和不可再生资源消耗潜力的贡献率分别高达 91.0%、75.0%、72.7%、80.1% 和 88.9%,证实了上游产业链,降低该阶段环境影响的杠杆点在于使用更清洁的能源电力进行材料生

表1 各生命周期阶段对环境影响的特征化结果(以功能单位: 1千瓦时发电量计)

影响类别	单位	原材料获取与 设备制造阶段	运输与建设 安装阶段	运行维护 阶段	报废回收阶段 (填埋情景)	全生命周期 总影响
全球变暖潜力	克 CO ₂ -eq	38.5	2.1	1.4	0.3	42.3
酸化潜力	克 SO ₂ -eq	0.21	0.05	0.01	0.01	0.28
富营养化潜力	克 PO ₄ ³⁻ -eq	0.08	0.02	0.005	0.005	0.11
人体毒性潜力	克 1,4-DCB-eq	12.5	1.8	0.5	0.8	15.6
不可再生资源消耗	克 Sb-eq	4.8	0.3	0.2	0.1	5.4

产以及选择更高效率的组件以减少单位发电量的材料消耗^[4]。

4 生产型企业光伏电站扩建项目全生命周期环境影响评价关键问题与改进策略分析

4.1 关键环境问题诊断

第一大问题为原材料获取与设备制造阶段因多晶硅提纯、铝材电解等关键材料制备过程属高能耗工艺且严重依赖以化石能源为主导的电网电力，从而产生的超过 90% 贡献率于全球变暖潜力的高碳足迹，致使光伏组件出厂前承载大量隐含碳排放；第二关键问题是因消耗大量矿产资源且其冶炼过程加剧化石能源枯竭压力，进而凸显供应链资源密集型特征的不可再生资源的大量消耗；第三大问题是电池片制造可能涉及铅、锡等金属及报废后若简易填埋处置，因重金属离子存在缓慢浸出污染土壤和地下水风险。

4.2 环境改进潜力与优化策略

针对诊断出的关键问题,首要策略为推动供应链绿色低碳转型,即企业建立绿色采购标准,优先选择使用可再生能源电力进行生产的“零碳”或“低碳”光伏组件供应商,借此直接将单位发电量的碳足迹降低 20% 至 30%;与供应商合作研发并采用更薄硅片、低银含量浆料、高强度轻量化铝材等新型材料,从源头上减少物料消耗,同步削减资源消耗与制造环节排放。其次,优化项目设计与运营效率,在扩建设计中直接选用更高转换效率的组件产品,在相同安装面积和物料投入下发出更多电力,摊薄功能单位环境影响;引入智能机器人自动清扫,优化清洗周期与用水量,采用新一代高效逆变器降低运行损耗,以此提升全生命周期能量产出。再次,在物流与施工环节,优先采用铁路或水路等低碳运输方式替代部分公路运输,无法替代的短途运输使用国六标准或新能源卡车,施工现场推广使用电动工程机械,最大限度减少柴油燃烧产生的局部污染物^[5]。最后,构建闭环回收体系作为解决末端问题的根本策略,企业提前规划,与有资质的专业回收企业签订退役组件回收协议,确保采用物理法与热解法等先进工艺,高效回收玻璃、铝、铜、银等有价值材料,将项目终结转变为资源循环新起点。

4.3 环境效益综合评估

以华东区域电网的平均排放水平为基准，本项目 25 年运行期内预计生产的 1.48 亿千瓦时清洁电力，可显著避免因消耗化石能源电力而产生的各类污染物排放，结果见表 2。

表2 光伏电站扩建项目全生命周期环境效益汇总
(与等量电网电量对比)

影响类别	单位	项目全生命周期 总环境效益（避免的排放 / 消耗）	年均环境效益
温室气体减排量	吨 CO ₂ -eq	126 000	5 040
二氧化硫减排量	吨	110	4.4
氮氧化物减排量	吨	95	3.8
颗粒物减排量	吨	20	0.8
标准煤节约量	吨	48 000	1 920

评估结果显示，该项目最主要的正环境效益体现在应对气候变化方面，累计可减少约 12.6 万吨二氧化碳当量的温室气体排放，此排放量相当于种植超过 700 万棵树木的碳汇量；在改善区域空气质量方面，该项目可避免因燃煤发电排放约 110 吨二氧化硫和 95 吨氮氧化物，这些物质是导致酸雨和光化学烟雾的重要前体物。

5 结束语

通过对某生产型企业光伏电站扩建项目进行系统的全生命周期环境评价,清晰揭示光伏技术作为清洁能源在其“从摇篮到坟墓”完整链条中对环境的综合影响。证实尽管项目运行阶段近乎零排放,但其上游设备制造阶段因高耗能材料生产成为全球变暖、资源消耗等主要环境影响集中环节,且报废阶段处理方式关系到潜在资源浪费与污染风险,研究所提针对性优化绿色供应链、提升组件效率、构建回收体系等策略,为企业在该项目具体环境管理实践中提供清晰且可操作的改进路径。

参考文献:

- [1] 温强. 光伏电站技改建设的精细化工程管理策略与成效[J]. 价值工程, 2025, 44(29): 75-77.
- [2] 施博文, 王旭伟, 陈思铭. 分布式光伏电站全生命周期动态产能评估方法及实证研究[J]. 顺德职业技术学院学报, 2025, 23(03): 46-50.
- [3] 陈文召, 唐力, 李兵, 等. “双碳”目标背景下小型办公楼加装屋顶分布式光伏电站的实践分析[J]. 太阳能, 2025(07): 28-34.
- [4] 廖章斌. 大型光伏电站的组件布局与运维成本优化研究[J]. 现代工程科技, 2025, 04(14): 105-108.
- [5] 焦在强, 崔焱, 闫兴国, 等. 光伏电站项目全生命周期碳排放研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(10): 158-160.