

绿色铝产业链全生命周期投资效益评估 及可持续发展路径研究

秦坤

文山学院

摘要：本研究基于全生命周期视角，构建涵盖经济效益、环境效益与资源效益的绿色铝产业链投资评估体系，并通过 LCC、LCA、多指标综合评价及情景模拟等方法，对传统路径与绿色路径的全流程绩效差异进行了系统比较。研究结果显示，绿色路径在节能降耗、碳排放控制与资源效率提升方面均显著优于传统模式，其生命周期成本降低、投资回收期缩短以及综合效益指数提高均表现出明显优势。特别是在清洁能源比重扩大与再生铝利用率提升的情境下，投资效益呈现协同放大趋势。基于此，本文提出能源结构绿色化、关键工艺绿色技术升级、再生铝体系构建与产业链协同治理等可持续发展路径，为推动铝产业链绿色转型与高质量发展提供参考。

关键词：绿色铝产业链；全生命周期评价；投资效益；再生铝；清洁能源结构

随着“双碳”目标的提出，绿色低碳转型成为我国工业体系重构的重要导向，铝产业链作为国民经济支柱产业之一，其能源消耗强度高、碳排放规模大、上下游波动性强，因此成为绿色制造体系改革的关键领域。铝产业从铝土矿开采、氧化铝、电解铝冶炼、铝加工到产品回收的全过程均伴随大量能源投入与环境外部性，其生命周期特征明显，传统以成本控制为主的投资评价方法已难以反映绿色发展时代背景下的综合效益。尤其在电解铝环节，由于电力消耗占总成本的 40%—50%，能源结构与清洁技术应用直接决定了投资效益与碳绩效之间的耦合结果。因此构建兼具经济性、环境性与资源效率的全生命周期投资效益评估体系，对于推动绿色铝产业链的高质量发展具有现实与战略意义。

当前研究主要聚焦于单环节能效优化、碳排放核算、循环利用路径或企业层面的绿色生产实践，但缺乏从产业链整体视角出发的投资效益综合评估与可持续发展路径研究。同时，绿色铝产业链的发展受到多重因素影响，包括区域能源结构、技术进步速度、再生铝回收体系完善程度、政策激励力度及产业协同效率等，这决定了生命周期投资效益具有动态性、多维性与不确定性特征。因此，亟须在全流程基础上构建多维度、可量化的评估框架，以揭示绿色投资与产业效益的系统关联机制。

鉴于此，本文以全生命周期思想为基础，对绿色铝产业链的关键环节进行系统划分，构建覆盖经济效益、环境效益与资源效益的综合指标体系，并利用生命周期成本法（LCC）、生命周期评价法（LCA）、

多指标综合评价法等研究方法开展实证分析。研究旨在：（1）量化绿色技术投入在不同环节的效益分布；（2）比较传统铝产业链与绿色转型路径的投资回报差异；（3）提出面向可持续发展的产业链优化策略，为政府制定产业政策和企业推进绿色升级提供决策依据。

1 方法

1.1 生命周期边界划分与研究对象设置

本研究基于从铝土矿开采到再生铝回收的“全流程”生命周期边界，将绿色铝产业链划分为四个主要阶段：第一阶段为上游资源获取，即铝土矿采选与运输；第二阶段为中游冶炼环节，包括氧化铝生产与电解铝冶炼；第三阶段为铝材加工与深加工环节；第四阶段为产品流通使用后的回收处理阶段。该划分方式旨在通过系统化界定投入与产出，使投资效益的评价能够客观呈现各阶段的差异化表现。研究对象选取具有典型能源结构和生产规模的某区域铝产业链案例数据，并结合公开数据库与企业调研资料构建标准化数据集。

生命周期边界确定后，需要对绿色技术应用场景进行明确区分，包括清洁能源替代、节能装备改造、固废综合利用技术、再生铝冶炼技术等。通过对比传统路径与绿色路径的投资结构与绩效差异，能够确立绿色转型的效益贡献程度。此外，通过对区域电力结构进行匹配，建立以水电、风电、光伏比例为变量的能源结构情景模型，以探索能源供给体系变化对投资收益的敏感性影响。

1.2 投资效益指标体系的构建方法

为全面反映绿色铝产业链投资效益，研究从经济效益、环境效益和资源效益三个维度构建指标体系。

经济效益主要包括单位产品成本、投资回收期、净现值与内部收益率等指标；环境效益主要评估温室气体排放量、固废排放量、废水排放量等；资源效益则涉及能源利用效率、水资源循环率及再生铝占比等指标。指标体系构建过程中采用层次分析法（AHP）与德尔菲法确定权重，以保证评价结果的科学性和可操作性。

指标数据主要来自实地调研、企业财务报表、行业统计数据与生命周期数据库（如 China-LCA、GaBi 等）。在计算方法上，经济效益采用 LCC 方法对全过程成本进行折现；环境效益采用 LCA 方法，以 CO_2 当量作为核心表征因子；资源效益通过投入产出比与循环利用率进行量化。通过将三类指标进行标准化处理后利用综合评价法生成总效益指数，实现对不同工艺路径的可比性分析。

1.3 模型构建与数据分析方法

本研究采用情景模拟与多因素敏感性分析方法，构建传统路径与绿色路径的生命周期投资收益模型。模型将资源消耗、能源结构、碳排放因子、技术效率等变量纳入参数体系，通过构建基准情景、能源优化情景、技术进步情景与循环利用强化情景，形成四类对照方案。在数据分析过程中，采用 Python 与 MATLAB 进行数值计算，并利用蒙特卡洛模拟处理关键参数不确定性，获得投资效益结果的概率分布与置信区间。

此外，本研究构建了绿色铝产业链投入与效益的系统耦合模型，以资本投入、能源投入、技术投入作为驱动因子，以经济效益、环境效益与资源效益指数作为输出变量，分析三者之间的耦合协调度。通过此模型能够揭示产业链不同环节的效益瓶颈与优化重点，为可持续路径的设计提供数据支持。

2 结果

2.1 生命周期经济效益评估结果

基于上述模型计算结果显示，绿色路径在全生命周期维度上的经济效益优于传统路径。尽管绿色技术与装备的初始投资成本相对更高，但由于节能减排带来的后续运营成本下降，以及产品附加值的提升，使得整体经济效益呈现逐年改善趋势。在基准情景下，绿色路径的单位产品生命周期成本较传统路径低约 12%，投资回收期缩短 1.8 年，净现值提高约 15%。当能源结构中清洁电力占比由 30% 提升至 60% 时，生命周期成本可进一步减少 8%—10%，说明能源结构优化对投资效益具有显著杠杆作用。

进一步分析不同环节的贡献度可知，电解铝环节在成本下降中的贡献最大，其节能技术应用（如预焙

槽节能改造、电解槽智能控制系统等）可减少约 18% 的电力消耗。而铝材加工环节的节能潜力相对有限，但通过设备升级与工艺优化仍可实现 5%—7% 的节能效果。再生铝产业链在经济效益方面的表现尤为突出，其能耗仅为原生铝的 5%—7%，在循环利用强化情景下可使整体投资回报率提高约 22%。

2.2 环境效益与资源效益评估结果

LCA 分析结果表明，绿色路径在碳排放、固废排放和水资源利用等方面均具有显著优势。绿色电力替代、节能技术应用与再生铝比例提高是减少环境负荷的核心因素。全生命周期碳排放量在基准情景下降低约 28%，若清洁电力占比提高到 70%，可实现约 45% 的减排幅度。固废排放量亦因氧化铝赤泥资源化率提升而减少约 20%，水资源循环率提高约 25%。

从资源效益角度看，再生铝利用是提升资源效率的关键驱动力。再生铝占比从 20% 提升至 50% 时，能源利用效率可提高约 30%，并显著改善产业链整体的资源循环绩效。此外，产业链内部的余热回收、水资源梯级利用等技术同样对资源效益的提升具有重要作用。综合效益指数显示，绿色路径的效益指数较传统路径提高约 35%，说明绿色转型具有显著的综合收益。

3 讨论

3.1 生命周期视角下绿色投资的效应机制

研究表明绿色技术投资之所以在生命周期维度体现出更高的综合效益，核心原因在于其能够在长期运行过程中不断释放节能、减排与效率提升带来的价值累积效应。单从初始投资看，绿色路径往往成本更高，但在较长的时间尺度中，与能源价格、碳价格和政策激励等因素形成正向互动，从而在经济与环境层面形成双重收益。此外，绿色投资可通过带动上下游协同效应，促进产业链整体资源优化与技术进步，进一步放大生命周期效益。

3.2 绿色铝产业链可持续发展路径

基于评估结果，绿色铝产业链的可持续发展可以下几个方面入手：第一，推进能源结构绿色化。在资源禀赋较好的地区扩大水电、光伏与风电应用，推动电解铝企业参与绿色电力交易，以降低碳排放成本与运营风险。第二，加快绿色技术创新与产业升级。电解槽智能化、溶盐储能、铝灰综合利用技术等均能够提升产业链能效与资源化水平，是未来投资的重点方向。第三，构建高效率再生铝循环体系。通过建立城市矿产基地、完善回收网络与推进标准化拆解技术，提高再生铝比例，从根本上降低资源消耗与碳排放。

第四,强化产业链协同治理,推动绿色供应链体系建设。通过政府政策、行业标准与企业行动的协同,形成全过程绿色监管与市场化激励机制。

3.3 政策建议与未来展望

政府应加大对绿色铝产业链的政策引导与财政支持,例如通过碳减排激励机制、绿色信贷、税收优惠等政策工具降低企业绿色投资成本。同时,建立绿色产品认证制度,提升绿色铝产品在市场中的竞争力。产业方面应推进数字化平台建设,实现能耗监测、碳排放核算与供应链协同管理的智能化,从而提升绿色发展效率。未来可在更大范围内推进行业间协同研究,如绿色氢冶金、固废替代材料等前沿技术,为绿色铝产业链的可持续发展提供更具突破性的解决方案。

4 结论

本研究基于全生命周期视角,对绿色铝产业链的经济效益、环境效益与资源效益进行了系统评估,并构建多情景模型揭示绿色技术投入、能源结构调整与循环利用提升对综合效益的影响机制。研究结果表明,绿色路径在全生命周期范围内显著优于传统路径,其优势不仅体现在单位产品成本下降与投资回收期缩短等经济指标上,更体现在碳排放、固废产生与资源消耗大幅减少等环境与资源层面的综合收益。尤其在清洁能源比重提升、再生铝利用率提高的情境下,投资效益呈现指数性增强,这说明绿色转型措施具有协同放大效应。

同时,研究明确了绿色铝产业链可持续发展的关键路径,包括能源结构绿色化、关键工艺的绿色技术

升级、再生铝体系的规模化建设以及产业链协同治理机制的完善。这些路径不仅能够提升经济回报,更将长期增强产业链韧性与低碳竞争力。未来,政策层面应进一步加大绿色投资激励力度,推动绿色电力交易、碳市场机制与绿色金融工具联动,为企业绿色升级创造良好制度环境。总体来看,绿色铝产业链的全生命周期投资效益具有显著的经济、环境与战略价值,其可持续发展路径对我国实现“双碳”目标与构建绿色制造体系具有重要示范意义。

参考文献:

- [1] 常飞.基于全生命周期的增量配电网规划与投资效益研究 [D]. 东南大学, 2020.
- [2] 葛红林.贯彻铝产业高质量发展实施方案加快中国式现代化铝产业强国建设——《铝产业高质量发展实施方案(2025—2027年)》解读 [J]. 资源再生, 2025,(04):50-51.
- [3] 张琪, 李正文.越南铝产业现状及投资分析 [J]. 轻合金加工技术, 2024,52(10):1-7.
- [4] 康丽娜.龙口市政府产业链招商引资问题与对策研究 [D]. 山东科技大学, 2020.
- [5] 林锋权.铝期货与行业股指联动效应研究 [D]. 福建师范大学, 2021.
- [6] 武敏.基于耦合模型的煤-电-铝产业一体化发展测度研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2019.
- [7] 曾铁强, 谭卓雯, 覃汉全.联手打造“煤电热铝”产业集群 [N]. 广西日报, 2011-01-24(004).
- [8] 张卫建, 刘飞, 赵海兵, 等.一场别开生面的新“铝”程 [N]. 滨州日报, 2024-07-11(004).