



移动扫码阅读

冯钦娥, 阮馨慧, 阮泽云, 等. 基于生命周期视角的光伏玻璃减碳潜力分析 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(6): 155–165.

FENG Qin'e, RUAN Xinhui, RUAN Zeyun, et al. Carbon Reduction Potential Analysis of Photovoltaic Glass from a Life Cycle Perspective[J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(6): 155–165.

基于生命周期视角的光伏玻璃减碳潜力分析

冯钦娥¹, 阮馨慧¹, 阮泽云², 陈玲红^{1,3,*}, 孙锐¹, 吴卫红³, 郑成航¹

(1. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 福莱特玻璃集团股份有限公司,
浙江 嘉兴 314001; 3. 浙江大学嘉兴研究院, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 光伏玻璃是光伏组件的核心材料, 研究其减碳潜力对光伏行业组件全生命周期的减碳及应对绿色贸易壁垒具有重要意义。采用生命周期评价方法(LCA), 分析了我国典型光伏玻璃生产的碳足迹, 建立了基于物理关系的混合分配方法和关键工序的生命周期碳排放核算模型, 同时通过情景分析揭示了不同生命周期阶段的碳减排潜力。结果表明, 化石燃料燃烧、原料获取和电力消耗是光伏玻璃碳排放的关键环节, 分别占总碳足迹的 26.74%、24.84% 和 20.62%。重油消耗、纯碱消耗和电力碳排放因子是影响光伏玻璃产品碳足迹最敏感的因素。在碳减排潜力优化方面, 采用氢气替代、绿色甲醇替代、提高天然气用量、纯碱工艺优化和光伏电替代 5 种低碳情景, 光伏玻璃的碳减排量分别为 2.40、0.82、0.50、0.64 和 0.22 kg CO₂-eq。在氢气燃料替换、优化电力结构和纯碱生产工艺的协同优化情景下, 碳减排潜力达到了 41.11%。研究表明, 实现光伏玻璃产业的深度低碳化发展需构建全产业链协同机制, 推动上下游企业联动实施系统性降碳措施。

关键词: 光伏玻璃; 碳足迹; 生命周期评价; 情景分析; 碳减排潜力

中图分类号: X781.5 文献标识码: A 文章编号: 2097-4183(2025)06-0155-11

Carbon Reduction Potential Analysis of Photovoltaic Glass from a Life Cycle Perspective

FENG Qin'e¹, RUAN Xinhui¹, RUAN Zeyun², CHEN Linghong^{1,3,*},
SUN Rui¹, WU Weihong³, ZHENG Chenghang¹

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Flat Glass Group Co., Ltd., Jiaxing 314001, China; 3. Jiaxing Research Institute, Zhejiang University, Jiaxing 314000, China)

Abstract: As a critical material for the rapidly expanding photovoltaic (PV) industry, PV glass is facing increasingly rigorous environmental scrutiny. A thorough investigation into its decarbonization potential is of paramount importance, not only for advancing the long-term sustainability of the entire PV sector from a life-cycle perspective but also for effectively navigating the complexities of emerging global green trade policies. This study employed a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) methodology to evaluate the carbon footprint associated with the manufacturing of typical PV glass in China. We developed a robust, process-based life cycle carbon emission accounting model that focuses on the two pivotal stages of production: raw glass sheet formation and subsequent deep-processing

treatments. To ensure a high degree of accuracy, we developed a hybrid allocation methodology grounded in the physical relationships of mass and area, tailored for activity-level data. Our quantitative analysis of a 2 mm thick, 1 m² PV glass panel elucidates that the primary carbon emission hotspots are the combustion of fossil fuels (heavy oil and natural gas), raw material acquisition, and electricity consumption, which contribute 26.74%, 24.84%, and 20.62% to the total carbon footprint, respectively. In contrast, ancillary activities such as the procurement of packaging materials, water resource consumption, and waste disposal have a negligible impact, collectively constituting less than 1% of the total emissions. A sensitivity analysis further identifies the consumption volumes of heavy oil and soda ash, along with the carbon emission factor of the electricity mix, as the most influential parameters affecting the product's overall carbon footprint. To chart a path toward a low-carbon future, a scenario analysis was conducted to quantify the technically feasible carbon mitigation potential. Five standalone low-carbon scenarios were modeled: (1) substituting fossil fuels with green hydrogen, (2) replacing them with green methanol, (3) increasing the proportion of natural gas, (4) optimizing the soda ash production process, and (5) powering operations with PV-generated electricity. These strategies were found to yield carbon reductions of 2.40 kg CO₂-eq (30.14%), 0.82 kg CO₂-eq (10.21%), 0.50 kg CO₂-eq (6.31%), 0.64 kg CO₂-eq (8.07%), and 0.22 kg CO₂-eq (2.77%) per panel, respectively. More significantly, a synergistic optimization scenario that integrates the use of hydrogen fuel, a decarbonized electricity grid, and an optimized soda ash supply chain demonstrated a substantial cumulative reduction potential of 41.11%. The findings underscore that the deep decarbonization of the PV glass sector is contingent upon the establishment of a coordinated, synergistic mechanism across the entire value chain. This requires concerted efforts and the implementation of systemic carbon reduction strategies through close collaboration between upstream raw material suppliers and downstream manufacturers.

Keywords: Photovoltaic glass; Carbon footprint; Life cycle assessment; Scenario analysis; Carbon reduction potential

0 引 言

在全球能源转型和我国“双碳”目标的双重驱动下,以光伏为代表的可再生能源产业正迎来历史性发展机遇。然而,光伏产业在贡献“绿色电力”的同时,其产业链自身,特别是能源密集型的上游制造环节,仍存在显著的碳排放^[1]。作为光伏组件的关键上游材料和核心封装部件,光伏玻璃的生产过程(尤其是熔窑熔化过程)是典型的高耗能环节,其对气候变化贡献占光伏组件的 8.58%^[2]。光伏玻璃碳足迹不仅直接影响自身行业的可持续发展,更通过产业链传导,深刻影响下游光伏组件的整体低碳属性。随着欧盟“碳边境调节机制(CBAM)”和法国“碳足迹(CFP)”等绿色贸易壁垒的日益严苛,光伏产品的生命周期碳足迹正迅速演变为进入国际市场的“隐形通行证”^[3]。因此,科学核算光伏玻璃的碳足迹,并系统分析其减碳潜力,对于推动光伏全产业链的绿色低碳发展、

确保光伏能源的“真绿”属性、助力实现“双碳”目标具有至关重要的现实意义。

国内外学者已采用生命周期评价(LCA)方法对光伏系统或光伏组件的碳足迹进行了相关核算,但对于光伏玻璃的评价方法存在不足。例如,SHENG 等^[4]基于 LCA 方法,分析了我国单晶硅光伏组件的环境影响,但其对光伏玻璃等上游材料的核算采用了数据库通用数据,未能反映具体企业的工艺差异。庄园等^[5]在探究不同技术生产的太阳能电池片碳足迹研究中,选取钢化玻璃的碳排放因子(1.48 kg CO₂/kg)计算组件辅材碳足迹。部分研究则聚焦于光伏发电系统的全生命周期碳排放和碳减排效益^[6-9],这类研究通常将光伏组件视为一个整体输入单元,其内部各材料(如玻璃、硅片、背板等)的碳足迹贡献并未被详细拆解和深入探讨。现有研究仍存在明显局限性,多数研究的数据来源于国外数据库或行业报告,缺乏基于我国领先企业实际生产工艺和能源结构的实

证分析,研究结果的本土适用性有待商榷。

除碳足迹核算方法存在不足外,当前针对光伏玻璃减排潜力的系统分析也明显缺失。现有文献大多关注下游光伏电池转化效率提升或组件端的能效优化,而对于上游材料制造过程的减碳路径研究相对匮乏。在玻璃行业碳减排研究领域,学者聚焦于能源替代及低碳工艺优化路径探索^[10-12]。魏娜娜等^[13]研究指出,天然气掺氢燃烧在玻璃生产阶段减碳效果明显,当掺氢比例为70%时,碳排放量减少41.46%。崔兴光等^[14]发现通过对玻璃窑炉的结构设计及选材等进行技术改造,可以使玻璃窑炉的设计使用寿命提高至8年以上,节省燃料11.76%。欧阳自强等^[15]结合玻璃企业生产实际,讨论了目前比较成熟且被广泛采用、易忽视和需要重点推进的节能减排技术途径。然而,针对玻璃减碳潜力的分析多为定性描述或单一技术评估,缺少对多种减排路径的系统性、定量化潜力分析。

综上所述,尽管已有大量研究对光伏产业的碳排放进行了探讨,但专门针对我国光伏玻璃生命周期的碳足迹精细化核算及其减碳潜力的系统性研究仍然不足。鉴于此,本研究采用生命周期评价方法,结合我国光伏玻璃企业的实际运行数据,建立了基于物理关系的混合分配方法和关键工序的生命周期碳排放核算模型,同时采用情景分析方法揭示了光伏玻璃不同生命周期阶段的碳减排潜力。研究成果旨在为光伏玻璃行业建立标准化的碳核算方法提供理论依据,并为产业协同

降碳、推动光伏全产业链脱碳提供科学的数据支持和技术决策参考。

1 研究方法

本文采用生命周期评价方法,主要分为4个部分:目标与范围定义、生命周期清单分析、生命周期影响评价以及生命周期解释。《IPCC国家温室气体清单指南》中提供的排放因子法是目前最为广泛的温室气体核算方法,即把反映人类活动程度的水平(活动数据)与量化为单位活动的排放量或者清除量的系数(排放因子)相结合。因此,本文采用排放因子法计算光伏玻璃碳足迹。

1.1 系统边界和功能单位

光伏玻璃是在平板玻璃基础上经过加工处理的特种玻璃,主要分为面板玻璃和背板玻璃^[16]。本研究主要以面板玻璃为例进行探讨,其生产流程通常分为两大环节:原片生产和深加工。原片工艺主要涉及熔化、成型、退火、切裁等;深加工工艺主要有磨边、镀膜、钢化、下片等^[17]。本研究划定的系统边界为“从摇篮到大门”(CTW)。根据BS EN 17074:2019规定的平板玻璃及相关产品的生命周期阶段划分(图1),光伏玻璃的产品生产阶段包括玻璃原片制造的原辅料及能源获取(A1)、原辅料及能源运输(A2/A'2)、原片生产制造(A3);光伏玻璃深加工中的原辅料获取(A'1)、原辅料运输(A'2)、光伏玻璃成品的深加工过程(A'3)。功能单位设定为厚度为2 mm、面积为1 m²的光伏玻璃。

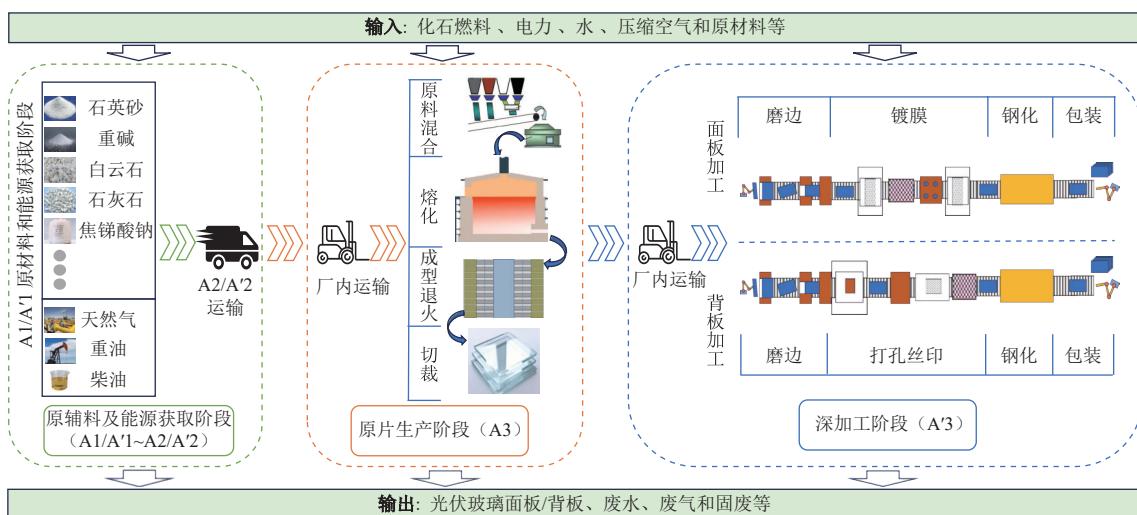


图1 光伏玻璃系统生命周期边界图

Fig. 1 Boundary diagram of photovoltaic glass system life cycle

1.2 数据来源

本研究主要通过对某国内大型光伏玻璃制造企业进行调研获取数据。该企业产品市场占有率为25%。本研究统计了2023年1~12月各条生产线平均数据，数据较为可靠，且具有较强的代表性。

背景数据主要涉及碳排放因子，优先从国内官方发布的排放因子数据集中选取，以契合我国的碳排放实际情况，提高核算的准确性和可靠性。如电力碳排放因子采用《用于发电的太阳能光伏(PV)系统产品类别规则》推荐的区域电力混合全球变暖潜势(GWP)因子，化石燃料碳排放因子相关参数来源于《碳排放核算与报告要求 第7部分：平板玻璃生产企业》(GB/T 32151.7—2023)，运输碳足迹因子来源于《建筑碳排放计算标准》。其他碳排放因子来源于Ecoinvent数据库中集成的IPCC 2021GWP100a方法学。

1.2.1 活动数据分配方法

通过对国内光伏玻璃生产企业的工艺流程进行调研发现，同一工厂通常生产多种类型的玻璃；而同一条生产线也能够灵活生产不同厚度的玻璃产品。活动数据的分配方法直接影响数据收集和

系统边界的划分，也关系到产品碳足迹结果的可信度^[18-19]。显然，光伏玻璃生产中的活动数据分配问题主要涉及产品间物理关系分配，按产品产量进行分配是最基本且广泛应用的方法^[20]。现有研究多采用单一的质量或面积分配方式，未能充分反映各生产环节的物理特性，易导致核算结果出现偏差。针对该问题，本研究在不同生产阶段采用差异化的分配方式。

依据BS EN 17074:2019产品类别规则，原片制造(A1~A3)阶段按照质量进行活动数据分配，深加工(A'1~A'3)阶段基于合适的物理关系进行分配。深加工阶段的材料(A'1、A'2)主要为镀膜液、包装材料，与产品面积直接相关，因此按照面积进行分配。深加工阶段(A'3)的电力消耗占据碳排放份额显著，且产品与电力消耗量物理关系不明确，通过线性拟合分析确定其分配方式。对某光伏玻璃企业深加工环节耗电量与面板质量产量、面积产量分别进行线性拟合，结果如图2所示。结果表明，耗电量与质量产量的决定系数(R^2)更高，线性关系更显著，故深加工阶段(A'3)采用质量分配更为合理。

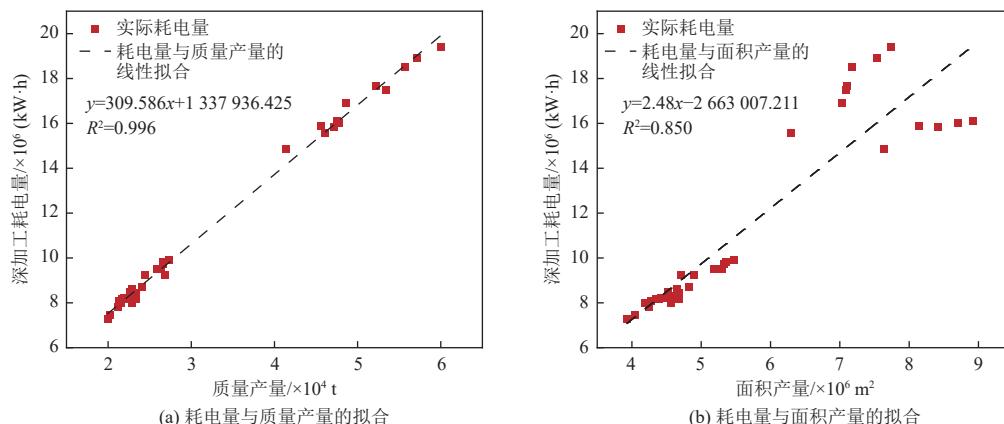


图2 深加工过程耗电量与质量产量、面积产量的线性拟合

Fig. 2 Linear fitting of electricity consumption with mass yield and area yield in the deep manufacturing processes

1.2.2 清单分析

根据分配原则，厚度2 mm、面积1 m^2 光伏面板玻璃的生命周期清单见表1。

1.3 生命周期碳排放核算模型

1.3.1 光伏玻璃碳足迹核算模型

依据前文所述的分配原则，基于原片制造和深加工处理的光伏玻璃的生命周期碳排放量 E 计算见式(1)：

$$E = \frac{\rho \times \delta \times S \times 10^{-3}}{\eta} \times (C_m^r + C_t^r + C_p^r) + \\ S \times (C_m^f + C_t^f + \rho \times \delta \times 10^{-3} \times C_p^f) \quad (1)$$

式中： ρ 为光伏玻璃的密度， kg/m^3 ，取 $2.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ^[21]； δ 为光伏玻璃厚度，mm； S 为光伏玻璃面积，本研究取 1 m^2 ； η 为深加工成品率，取97%。 C_m^r 、 C_m^f 为单位质量原片、单位面积深加工玻璃过程的原辅料及能源获取排放， $\text{kg CO}_{2-\text{eq}}/\text{kg}$ 、 $\text{kg CO}_{2-\text{eq}}/\text{m}^2$ ； C_t^r 、 C_t^f 为单位质量原片、单位面积深加工玻璃的原辅

表 1 厚度 2 mm、面积 1 m² 光伏面板玻璃的生命周期清单

Table 1 Life cycle inventory of 2 mm thickness, 1 m² photovoltaic panel glass

物质/能源	运输方式	运输距离/km	消耗/排放量	单位
石英砂	公路-柴油货车	850.00	3.56	kg
纯碱	公路-柴油货车	250.00	1.11	kg
白云石	公路-柴油货车	150.00	0.87	kg
石灰石	公路-柴油货车	80.00	0.29	kg
芒硝	公路-柴油货车	10.00	0.03	kg
氢氧化铝	公路-柴油货车	15.00	0.08	kg
焦锑酸钠	公路-柴油货车	3.65	0.01	kg
硝酸钠	公路-柴油货车	4.95	0.03	kg
液氨	公路-柴油货车	2.50	0.07	kg
氢氧化钙	公路-柴油货车	4.90	0.08	kg
镀膜液	公路-柴油货车	12.20	0.01	kg
木材	公路-柴油货车	754.08	1.21×10 ⁻⁴	m ³
塑料	公路-柴油货车	30.66	0.01	kg
重油	公路-柴油货车	325.00	0.52	kg
天然气	管道运输	—	0.27	m ³
市政电	电网运输	—	2.04	kW·h
自来水	管道运输	—	0.01	m ³
CO ₂	烟囱排放	—	3.12	kg
CH ₄	烟囱排放	—	7.43×10 ⁻⁵	kg
N ₂ O	烟囱排放	—	1.38×10 ⁻⁵	kg

料及能源运输排放, kg CO_{2-eq}/kg、kg CO_{2-eq}/m²; C_p^r、C_p^f为单位质量原片、深加工玻璃的生产排放, kg CO_{2-eq}/kg。

1.3.2 原辅料和能源获取碳排放

该阶段包括原片生产的原辅料和能源获取阶段(A1)和深加工原辅料获取阶段(A'1)中所有原辅料和能源获取产生的碳排放,如开采、提取和加工用于生产光伏玻璃的石英砂、重碱、化石燃料和镀膜液等产生的碳排放。原辅料和能源获取碳排放计算见式(2):

$$C_m = \sum_{i=1}^n M_i \times EF_i \quad (2)$$

式中: C_m包括C_m^r与C_m^f; M_i为第*i*种原辅料或能源的消耗量, kg 或 m³; EF_i为获取第*i*种原辅料或能源的碳排放因子, kg CO_{2-eq}/kg 或 kg CO_{2-eq}/m³。

1.3.3 原辅料和能源运输碳排放

此阶段考虑将原辅料及能源运输到制造工厂,包括石英砂、重碱、镀膜液等原辅料和化石燃料的运输。原辅料和能源运输碳排放计算公式见式(3):

$$C_t = \sum_{i=1}^n M_i \times J_i \times D_i / 1000 \quad (3)$$

式中: C_t包括C_t^r与C_t^f; J_i为第*i*种原辅料或化石能源的运输距离, km; D_i为第*i*种运输方式的排放因子, kg CO_{2-eq}/(t·km)。

1.3.4 生产碳排放

该阶段包括原片生产制造阶段(A3)和深加工制造阶段(A'3),每个生产阶段的直接碳排放和间接碳排放,分别按式(4)和式(5)计算:

$$C_p^r = C_c^r + C_d^r + C_e^r + C_w^r + C_{wt}^r \quad (4)$$

$$C_p^f = C_e^f + C_w^f + C_{wt}^f \quad (5)$$

式中: C_p^r为原片化石燃料燃烧排放, kg CO_{2-eq}/kg, 计算方式见式(6), 排放因子计算方式见式(7); C_p^f为原片碳酸盐分解排放, kg CO_{2-eq}/kg, 计算方式见式(8); C_e^r、C_e^f为原片、深加工电力消耗排放, kg CO_{2-eq}/kg, 计算方式见式(9); C_w^r、C_w^f为原片、深加工水资源消耗排放, kg CO_{2-eq}/kg, 计算方式见式(10); C_{wt}^r、C_{wt}^f为原片、深加工废水、固废处理排放, kg CO_{2-eq}/kg, 计算方式见式(11)。

$$C_c^r = \sum_{i=1}^n FC_i \times EF_{c,i} \quad (6)$$

式中: FC_i为生产单位质量原片第*i*种化石燃料的净消耗量, kg 或 m³; EF_{c,i}为第*i*种化石燃料的碳排放因子, kg CO_{2-eq}/kg 或 kg CO_{2-eq}/m³:

$$EF_{c,i} = NCC_i \times \left(CC_i \times OF_i \times \frac{44}{12} + EF_{CH_4,i} \times 27.9 + EF_{N_2O,i} \times 273 \right) \quad (7)$$

式中: NCC_i代表第*i*种化石燃料的低位发热量, GJ/10³ m³ 或 GJ/t; CC_i代表第*i*种化石燃料的单位热值含碳量, t C/GJ; OF_i代表第*i*种化石燃料的碳氧化率, %; EF_{CH₄,i}、EF_{N₂O,i}代表第*i*种化石燃料单位热值下甲烷、氧化亚氮排放因子, t/GJ。

根据IPCC第6次评估报告, N₂O 和 CH₄ 的GWP 分别为 27.9 和 273.0^[22]。固定源化石燃料相关参数从《碳排放核算与报告要求 第7部分: 平板玻璃生产企业》(GB/T 32151.7—2023) 及 IPCC 报告中获得^[23]。

$$C_d^r = \sum_{i=1}^n MP_i \times EF_{d,i} \times F_i \quad (8)$$

式中: MP_i 为生产单位质量原片消耗的第 i 种碳酸盐的质量, kg; $EF_{d,i}$ 为第 i 种碳酸盐的碳排放因子, kg CO_{2-eq}/kg; F_i 为第 i 种碳酸盐的煅烧比例, 默认取 100%。

$$C_e = \sum_{i=1}^n Q_i \times EF_{e,i} \quad (9)$$

式中: C_e 为电力消耗排放, kg CO_{2-eq}/kg, 包括 C_e^r 、 C_e^f ; Q_i 为第 i 种电力的消耗量, kW·h; $EF_{e,i}$ 为第 i 种电力的碳排放因子, kg CO_{2-eq}/(kW·h)。

$$C_w = \sum_{i=1}^n M_i \times EF_{w,i} \quad (10)$$

式中: C_w 为水资源消耗排放, kg CO_{2-eq}/kg, 包括 C_w^r 、 C_w^f ; M_i 为第 i 种水资源的消耗量, m³; $EF_{w,i}$ 为第 i 种水资源的获取碳排放因子, kg CO_{2-eq}/m³。

$$C_{wt} = \sum_{i=1}^n M_i \times EF_{wt,i} \quad (11)$$

式中: C_{wt} 为废水、固废处理排放, kg CO_{2-eq}/kg, 包括 C_{wt}^r 、 C_{wt}^f ; M_i 为第 i 种废水、固废的排放量, m³ 或 kg; $EF_{wt,i}$ 为第 i 种废水、固废处理的碳排放因子, kg CO_{2-eq}/m³ 或 kg CO_{2-eq}/kg。根据计算结果, 本研究中废水、固废排放碳排放占比之和约

为 0.02%, 依据取舍原则, 该部分的碳排放量忽略不计。

1.4 不确定性分析

由于生命周期清单数据缺失或不准确, 研究模型可能存在不确定性。因此, 本研究基于一阶误差传播方程, 对光伏玻璃生命周期清单数据的不确定性进行分析, 以确保碳足迹核算结果的可靠有效, 计算见式(12)(13)。活动水平数据的不确定性和碳排放因子的不确定性分别取 5% 和 10%^[24]。

$$L_{N_{ij}} = \sqrt{(L_{T_{ij}})^2 + (L_{R_{ij}})^2} \quad (12)$$

$$L_{\text{total}} = \frac{\sqrt{(L_{N_1} \times N_1)^2 + (L_{N_2} \times N_2)^2 + \dots + (L_{N_i} \times N_i)^2}}{N_1 + N_2 + \dots + N_i} \quad (13)$$

式中: $L_{N_{ij}}$ 为第 i 个阶段中第 j 种碳源估算的不确定性, %; $L_{T_{ij}}$ 为碳足迹因子的不确定性, %; $L_{R_{ij}}$ 为活动水平数据的不确定性, %; L_{N_i} 为第 i 个阶段的不确定性, %; L_{total} 为总的不确定性, %; N_i 为第 i 个阶段不同碳源的碳排放量, kg CO_{2-eq}。

1.5 减排情景构建

本研究通过优化化石燃料结构、原料工艺和电力结构这 3 个方面, 评估相应光伏玻璃的碳减排潜力, 具体情景设置见表 2。

表 2 光伏玻璃碳减排情景设置

Table 2 Carbon emission reduction scenario settings for photovoltaic glass manufacturing

减排情景	情景说明	关键参数	关键参数设定	单位
燃料结构优化	天然气替代	天然气替代率	100.00	%
	绿色甲醇替代	甲醇碳足迹因子	1.25 ^[25]	kg CO _{2-eq} /kg
	氢气替代	氢气碳足迹因子	0.68 ^[26]	kg CO _{2-eq} /kg
原料工艺优化	优化纯碱生产工艺, 选用天然碱法生产的纯碱	纯碱获取碳足迹因子	0.62 ^[27]	kg CO _{2-eq} /kg
	采用光伏电替代市政电	光伏电替代比例	15.00 ^[28]	%
电力结构优化	采用光伏电替代市政电	光伏电碳足迹因子	0.05 ^[29]	kg CO _{2-eq} /(kW·h)

2 结果与讨论

2.1 典型光伏玻璃碳足迹分析

根据式(1)~(10)计算得出厚度为 2 mm、面积为 1 m² 的光伏面板玻璃的生命周期各阶段的碳排放情况。通过文献调研发现, 目前浮法玻璃 CTW 的碳足迹范围为 0.93~1.36 kg CO_{2-eq}/kg^[30~32]。本研究中玻璃原片的碳足迹位于该公开范围内等偏上水平; 钢化玻璃 CTW 的碳足迹值为 1.48~

1.53 kg CO_{2-eq}/kg^[31, 33], 本研究光伏玻璃的碳足迹略高于该公开范围, 但仍处于合理区间。将光伏玻璃生产阶段合并, 结合玻璃原片生产与深加工过程计算结果, 分析光伏玻璃各类排放源占比情况, 绘制光伏玻璃碳排放桑基图, 如图 3 所示。

根据图 3, 可直观地看出光伏玻璃生产各阶段碳排放占比大小以及各排放源占比情况。光伏玻璃的原辅料和能源获取阶段(A1+A'1)碳排放占产品总碳足迹的 35.77%。此阶段中原料获取碳排

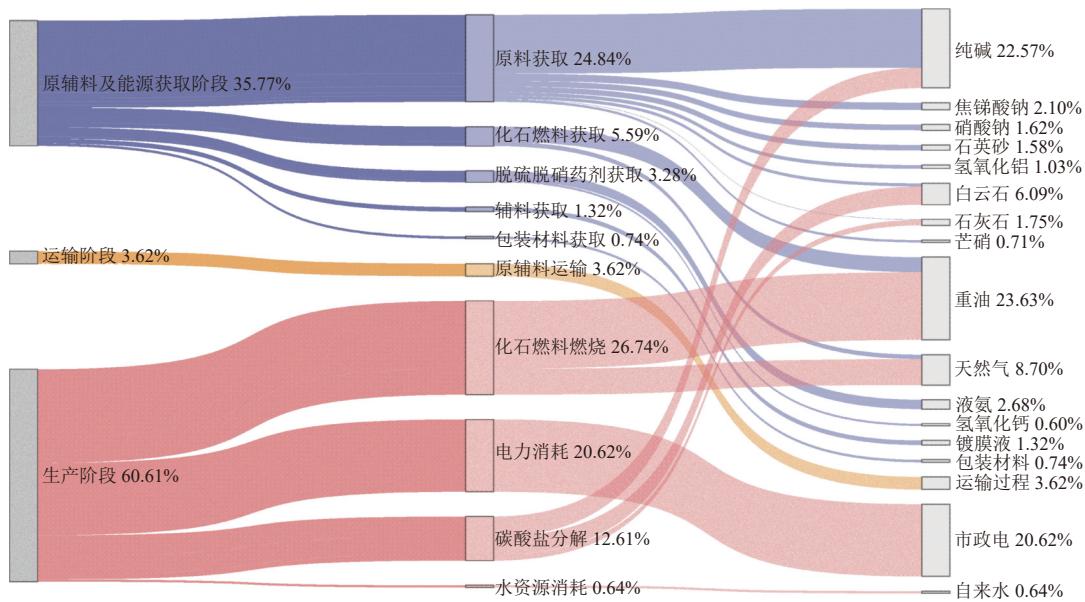


图 3 光伏玻璃生命周期碳排放桑基图

Fig. 3 Sankey diagram of carbon emissions for photovoltaic glass life cycle

放占比为 24.84%，其中纯碱获取占比最大，占原料获取碳排放量的一半以上。制造加工阶段(A3+A'3)总碳足迹占比最大，为 60.61%。该阶段中化石燃料燃烧排放和电力消耗排放比例最大，分别为 26.74% 和 20.62%。总体来看，重油获取及燃烧排放、纯碱获取及分解排放和电力消耗排放是光伏玻璃碳排放占比最为突出的 3 项。这 3 项碳排放量的占比分别为 23.63%、22.57%、20.62%；部分原料(芒硝、氢氧化钙)获取、包装材料获取和自来水消耗碳排放占比较低，不足 1%。

2.2 不确定性分析

对活动数据与碳排放因子分别施加 $\pm 10\%$ 的扰动，发现影响光伏玻璃碳排放的最敏感因素是重油消耗量，其次是纯碱消耗量和电力碳排放因子，敏感性系数分别为 0.24、0.23、0.21。基于误差传播方程量化评估了光伏玻璃生命周期碳足迹核算结果的不确定性，活动水平数据的不确定性和碳排放因子的不确定分别取 5% 和 10%^[24]，结合式(12)(13)，计算得出光伏玻璃产品总碳足迹的不确定性约为 4.34%。这说明由于活动水平数据和碳排放因子存在不确定性，光伏玻璃产品碳足迹值将有 $\pm 4.34\%$ 的浮动。对比碳排放核算相关的研究^[34-35]，本研究碳足迹值的不确定性较小，在合理范围内。

2.3 碳减排潜力分析

2.3.1 燃料结构优化

基于典型光伏玻璃碳排放分析和不确定性分

析结果，降低化石燃料燃烧排放是光伏玻璃行业减碳的重点因素。国内玻璃生产选取的化石燃料大多为天然气、重油^[36]，根据式(7)及相关数据，计算得出重油的碳排放因子($3.18 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{kg}$)高于天然气($3.01 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{kg}$)。本研究调整燃料结构，提高天然气用量，100% 替代重油。此外，本研究考虑完全使用绿氢或绿色甲醇替代化石燃料，替代比例为 100%。氢气具有体积热值低、燃烧温度高、耐储存等特点^[37]。英国 Pilkington 公司^[38]、日本电气玻璃公司^[39]、法国圣戈班集团^[40]已经开展了相关试验，证明了用一定比例氢气作为能源制造平板玻璃的技术可行性。甲醇在常温常压下为液体燃料，相较于氢气，其在存储和运输更具优势。绿色甲醇作为一种低碳、清洁的燃料日益受到关注^[41]。目前绿色甲醇主要应用在化工、交通等领域，在玻璃制造等高温窑炉中的应用仍处于早期阶段。然而，在陶瓷烧结^[42]、锅炉燃烧^[43]等领域的成功应用，已初步证明绿色甲醇适用于高温加热工艺。本研究采用电解水-风电制氢工艺生产氢气，并借助综合能源生产单元(IEPU)制备绿色甲醇。

2.3.2 原料工艺优化

当前，工业用重质纯碱的主流生产工艺(氨碱法和联合制碱法)属于化学合成法，其碳排放强度较高。研究发现，天然碱可作为纯碱的替代原料^[44]，并已被证实其适用于玻璃制造^[45-46]。由于天然碱矿加工流程相对简单，能耗与物料消耗显著降低，

其单位产品的碳排放因子远低于化学合成法工艺^[25]。因此,选用天然碱法生产的纯碱有助于显著降低光伏玻璃在纯碱原料获取和碳酸盐分解过程中的碳足迹。

2.3.3 电力结构优化

目前,我国电力行业发展迅速,但仍以火力发电为主,这导致我国的电力碳排放因子较高。光伏发电碳排放因子较低,光伏玻璃企业利用产品优势,采用光伏发电技术替代外购电力可以降低光伏玻璃生产碳足迹。

基于上述分析及表 2 参数设定,燃料结构优化、原料工艺优化、电力结构优化的单一情景的减排结果如图 4 所示。

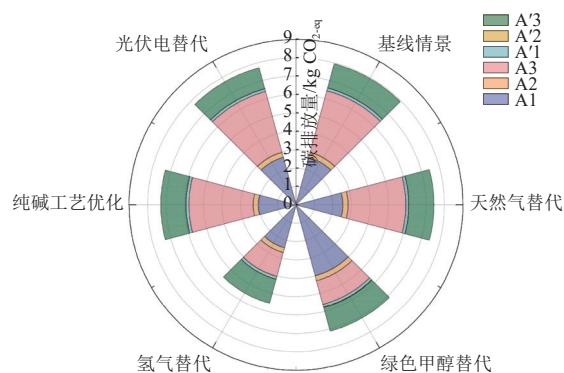


图 4 光伏玻璃单一情景碳减排结果

Fig. 4 Carbon emission reduction results for a single scenario of photovoltaic glass

图 4 显示了不同情景下光伏玻璃生命周期各阶段以及总碳足迹的变化情况。可以看出,相较于现阶段技术水平下的基线情景,所有减排情景均展现了不同程度的减排潜力。其中,氢气替代情景的碳减排效果最优,产品碳足迹降低了 2.40

$\text{kg CO}_{2\text{-eq}}$, 这归因于原片生产制造阶段(A3)碳排放的大幅降低。电解水-风电制氢的碳排放因子低,并且氢气燃烧本身不产生温室气体。在绿色甲醇替代情景中,产品碳足迹降低了 $0.82 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}$ 。在该情景下,原辅料和能源获取阶段(A1)的碳排放显著增加。这是因为采用综合能源生产单元工艺生产绿色甲醇的碳足迹较高。然而,由于甲醇燃烧所释放的 CO_2 源于其生产过程中从环境中捕集的碳,从全生命周期视角来看,其燃烧过程不释放额外的 CO_2 。因此,原片制造阶段(A3)的碳排放同样得到了大幅降低。相比之下,天然气替代、纯碱工艺优化和光伏电替代情景的减排潜力相对较小,分别实现了 0.50 、 0.64 和 $0.22 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}$ 的减排量,其总碳足迹与基线情景较为接近。

2.3.4 协同优化碳减排

前述内容分别探讨了单一减排措施(燃料结构优化、原料工艺优化、电力结构优化)对光伏玻璃产品碳足迹的影响。然而,实现碳中和目标需系统整合多种路径,挖掘其协同减排潜力。本研究设置了以下 3 种协同减排情景,探究光伏玻璃碳减排最优途径,并与当前技术水平下的基线情景碳足迹进行比较。3 种协同减排情景为协同优化一:天然气替代+光伏电替代+纯碱工艺优化;协同优化二:绿色甲醇替代+光伏电替代+纯碱工艺优化;协同优化三:氢气替代+光伏电替代+纯碱工艺优化。不同协同减排情景下的光伏玻璃产品碳足迹减排情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在协同优化一情景下,单块光伏玻璃能降低碳排放 $1.36 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}$, 碳减排潜力为 17.15%,与协同优化二情景的减排潜力

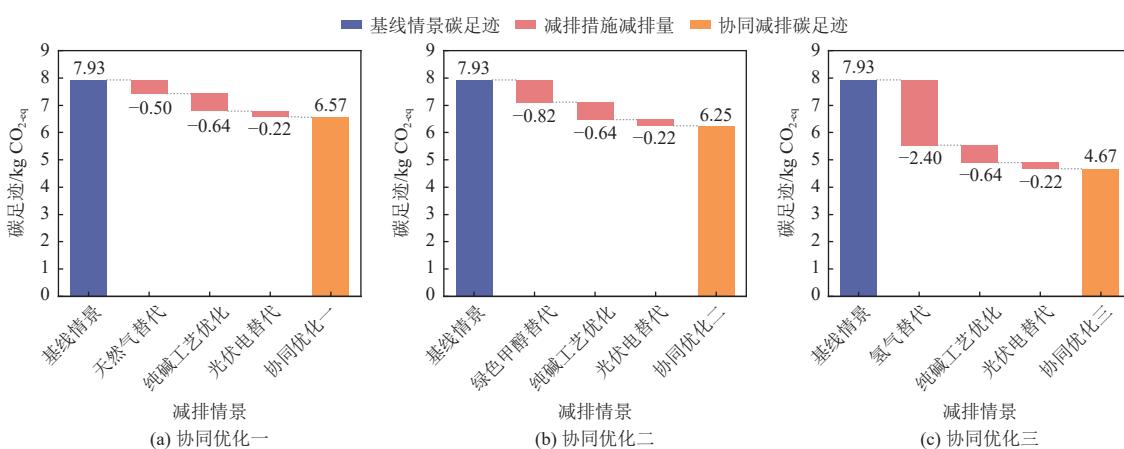


图 5 协同优化碳减排情景分析

Fig. 5 Scenario analysis of synergistic optimization for carbon emission reduction

(21.19%)相近。协同优化三情景下的碳减排潜力优于协同优化一、二, 碳减排潜力达到了41.11%, 单块典型光伏玻璃能降低碳排放 $3.26\text{ kg CO}_{2\text{-eq}}$ 。根据中国建筑玻璃与工业玻璃协会的数据, 2023年1~12月我国光伏压延玻璃产量约2 478.3万t^[47], 若在本研究最佳减排路径协同优化三情景下, 光伏玻璃行业将降低碳排放约1 616万t, 协同优化三情景有较大的减排潜力和减排效益。

当前, 我国绿色能源发展迅速, 绿色电力装机容量和占比均持续增加, 尤其是太阳能发电和风力发电占比日益提高。基于政策、经济、时间等因素, 采用氢气替代现有燃料、增加光伏电力的使用, 同时采用优化的纯碱生产工艺, 是光伏玻璃产品未来降碳的优先选择。此外, 还需考虑原料成本、技术限制等现实因素构建理论模型, 选定最佳碳减排方式。

3 结 论

本研究建立了基于物理关系的混合分配方法和关键工序的光伏玻璃生命周期碳排放核算模型, 可快速准确地计算出不同类型、不同规格的光伏玻璃碳足迹, 并利用情景分析方法分析了其不同情景下的碳减排潜力。

(1)采用了混合物理关系分配方式, 以拟合程度确定过程分配, 活动数据计算结果更加精确。将原片生产和深加工生产划分为不同的生产阶段(A1~A'3), 分别计算不同生产阶段的单位强度碳排放值。此划分方式结合本研究构建的核算模型, 可将2个生产过程的碳排放分开独立计算, 极大增强了模型在光伏玻璃行业碳足迹计算的适用性和准确性。

(2)从碳足迹角度分析, 单块厚度2 mm、面积1 m²的光伏面板玻璃碳排放来源中, 化石燃料燃烧、原料获取和电力消耗是光伏玻璃碳排放的关键环节, 分别占总碳足迹的26.74%、24.84%和20.62%。重油消耗量、纯碱消耗量和电力碳排放因子是影响光伏玻璃产品碳足迹最敏感的因素, 敏感性系数分别为0.24、0.23和0.21。

(3)在单一碳减排情景中, 氢气替代、绿色甲醇替代、天然气替代、纯碱工艺优化、光电替代等措施, 可分别降低光伏玻璃碳排放2.40、0.82、0.50、0.64和0.22 kg CO₂-eq。综合政策、经济、时间等因素, 采用氢气燃料替换、优化电力结构和纯碱生产工艺的协同优化路径, 可实现高达41.11%

的碳减排潜力, 是推动光伏玻璃产品未来降碳的有效途径。然而, 该路径的实施效果主要受制于生产工艺, 同时其大规模推广仍需克服技术成本等难题。

参考文献 (References) :

- [1] 刘含笑, 朱前林, 林青阳, 等. 基于LCA方法的光伏产品碳足迹量化评价与低碳设计[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(10): 2972–2981.
LIU Hanxiao, ZHU Qianlin, LIN Qingyang, et al. Carbon footprint evaluation and low carbon design of China's photovoltaic products based on LCA methodology[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(10): 2972–2981.
- [2] JIA Xiaojie, LYU Fang, LI Ping, et al. Life-cycle assessment of p-type multi-Si back surface field (BSF) solar module in China of 2019[J]. *Solar Energy*, 2020, 196: 207–216.
- [3] 李慧明, 李晓宇. 国际绿色竞争加剧背景下中国光伏产业发展面临的国际挑战及应对策略[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2024, 40(6): 57–68.
LI Huiming, LI Xiaoyu. International challenges and coping strategies for the development of China's photovoltaic industry in the context of intensified international green competition[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences)*, 2024, 40(6): 57–68.
- [4] SHENG Xuerou, CHEN Leping, LIU Mengyue, et al. Environmental impact of monocrystalline silicon photovoltaic modules[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 220: 108373.
- [5] 庄园, 温金城, 卞与良, 等. 晶体硅和钙钛矿光伏组件碳足迹研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 41–46.
ZHUANG Yuan, WEN Jincheng, BIAN Yuliang, et al. Study on carbon footprint of crystalline silicon and perovskite photovoltaic modules[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2023, 44(12): 41–46.
- [6] 王鑫淼, 马志勇, 周旺潇, 等. 光伏发电系统碳中和及其影响因素[J]. *资源科学*, 2022, 44(8): 1735–1744.
WANG Xinmiao, MA Zhiyong, ZHOU Wangxiao, et al. Carbon neutralization in photovoltaic power generation system and influencing factors[J]. *Resources Science*, 2022, 44(8): 1735–1744.
- [7] HOTTENROTH H, VIERE T. Comparative life cycle assessment of photovoltaic systems: An evaluation of environmental impacts over time[J]. *Procedia CIRP*, 2024, 122: 79–84.
- [8] FERRARA C, MAMMIROLI B, CARVALHO M L, et al. Life cycle assessment of photovoltaic electricity production in Italy: Current scenario and future developments[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 948: 174846.
- [9] DENG Yanhua, WU Jiji, YANG Qian, et al. Life cycle-

- based carbon emission reduction benefit assessment of centralized photovoltaic power plants in China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(23): 16323.
- [10] 刘志海. 我国平板玻璃行业碳排放现状及减排措施 [J]. 玻璃, 2020, 47(1): 1–6.
LIU Zhihai. Present status of carbon emission and emission reduction measures of domestic flat glass industry[J]. Glass, 2020, 47(1): 1–6.
- [11] 孙军强, 龚志起. 平板玻璃物化环境状况的评价 [J]. 青海大学学报(自然科学版), 2004, 22(6): 50–52+56.
SUN Junqiang, GONG Zhiqi. A study on life cycle assessment of embodied environmental profile of flat glass[J]. *Journal of Qinghai University*, 2004, 22(6): 50–52+56.
- [12] GRIFFIN P W, HAMMOND G P, MCKENNA R C. Industrial energy use and decarbonisation in the glass sector: A UK perspective[J]. *Advances in Applied Energy*, 2021, 3: 100037.
- [13] 魏娜娜, 刘志海, 孟政. 天然气掺氢技术在玻璃熔化中的应用 [J]. 玻璃, 2025, 52(3): 14–21.
WEI Nana, LIU Zhihai, MENG Zheng. Application of natural gas mixed with hydrogen technology in glass melting[J]. Glass, 2025, 52(3): 14–21.
- [14] 崔兴光, 王均光, 沈建兴, 等. 玻璃窑炉节能减排技术改造及应用 [J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2022, 50(4): 24–29+10.
CUI Xingguang, WANG Junguang, SHEN Jianxing, et al. Technical improvement and application of energy conservation and pollution reduction for glass furnace[J]. Glass Enamel & Ophthalmic Optics, 2022, 50(4): 24–29+10.
- [15] 欧阳自强, 郝鹏, 刘沐阳, 等. 玻璃窑炉节能减排技术途径研究与应用 [J]. 玻璃, 2023, 50(10): 66–72.
OUYANG Ziqiang, HAO Peng, LIU Muyang, et al. Research and application of energy saving and emission reduction technology for glass furnace[J]. Glass, 2023, 50(10): 66–72.
- [16] 向鑫, 胡壮, 刘忠飞, 等. 光伏玻璃磨边常见问题及分析 [J]. 建材世界, 2023, 44(1): 24–26.
XIANG Xin, HU Zhuang, LIU Zhongfei, et al. Common problems and analysis of photovoltaic glass edging[J]. *The World of Building Materials*, 2023, 44(1): 24–26.
- [17] 景军平. 光伏玻璃在双碳目标下的生产应用和前景 [J]. 玻璃, 2024, 51(7): 59–62.
JING Junping. The production application and prospects of photovoltaic glass under the dual carbon goals[J]. Glass, 2024, 51(7): 59–62.
- [18] LI Xin, CHEN Lizhu, DING Xuemei. Allocation methodology of process-level carbon footprint calculation in textile and apparel products[J]. *Sustainability*, 2019, 11(16): 4471.
- [19] LIU Junran, LI Xin, ZHU Lisha, et al. Discussion on key issues of carbon footprint accounting for bast fiber textiles[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 897: 166272.
- [20] 冯文艳, 吴雄英, 丁雪梅. LCA 分配方法在纺织服装碳足
迹核算中的应用 [J]. 印染, 2014, 40(13): 39–42+58.
FENG Wenyan, WU Xiongying, DING Xuemei. Application of LCA allocation method to calculation of carbon footprint of textile and apparel products[J]. *Dyeing & Finishing*, 2014, 40(13): 39–42+58.
- [21] 迟昊淞, 李方慧, 吉祥, 等. 不同冲击高度和玻璃厚度对光伏玻璃抗冲击性能研究 [J]. 黑龙江大学工程学报(中英俄文), 2024, 15(4): 89–95.
CHI Haosong, LI Fanghui, JI Xiang, et al. Impact resistance of photovoltaic glass under different impact heights and glass thicknesses[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2024, 15(4): 89–95.
- [22] 陈诺, 刘路, 姚久迪, 等. 造纸和纸制品行业企业碳排放核算模型构建及应用 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2025, 51(3): 134–142.
CHEN Nuo, LIU Lu, YAO Jiudi, et al. Model establishment and application of carbon emission accounting for enterprises in the papermaking and paper product industry[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2025, 51(3): 134–142.
- [23] 刘铁牛, 郭少华, 张笛, 等. 国内外工业碳排放数据平台建设现状与应用展望 [J]. 能源环境保护, 2023, 37(4): 121–130.
LIU Tieniu, GUO Shaohua, ZHANG Di, et al. Current status and application prospects of industrial carbon emission data platforms at home and abroad[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(4): 121–130.
- [24] 张晓梅, 庄贵阳, 刘杰. 城市温室气体清单的不确定性分析 [J]. 环境经济研究, 2018, 3(1): 8–18+149.
ZHANG Xiaomei, ZHUANG Guiyang, LIU Jie. Uncertainty analysis of urban greenhouse gas inventories[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2018, 3(1): 8–18+149.
- [25] 余潜跃, 张玉琼, 赵强, 等. 综合能源生产单元的全生命周期碳足迹评价与技术经济性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3115–3125.
YU Qianyue, ZHANG Yuqiong, ZHAO Qiang, et al. Life-cycle carbon footprint assessment and techno-economic analysis of integrated energy production unit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(8): 3115–3125.
- [26] 陈馨. 典型制氢工艺生命周期碳排放对比研究 [J]. 当代石油石化, 2023, 31(1): 19–25.
CHEN Xin. Comparative study on life-cycle carbon emissions of typical hydrogen production processes[J]. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2023, 31(1): 19–25.
- [27] 乔明, 李刚, 周立峰, 等. 天然碱加工厂碳排放核算及碳减排对策研究 [J]. 化工环保, 2025, 45(1): 134–140.
QIAO Ming, LI Gang, ZHOU Lifeng, et al. Carbon emission accounting and carbon emission reduction countermeasures for natural soda processing plants[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2025, 45(1): 134–140.
- [28] 毛科皓. 新能源发电在我国电力结构组成的变化过程与趋势分析 [J]. 科学与信息化, 2024(16): 59–61.

- Mao Kehao. Change process and trend analysis of new energy power generation in electric power structure composition in China[J]. *Kexue yu Xinxihua*, 2024(16): 59–61.
- [29] 马艺, 段华波, 李强峰, 等. 基于生命周期分析的风电场 GHGs 减排效益 [J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2020, 37(6): 653–660.
- MA Yi, DUAN Huabo, LI Qiangfeng, et al. Benefits of GHGs emission reduction of wind farm based on life cycle assessment[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2020, 37(6): 653–660.
- [30] ANGLARILL A. Life cycle assessment of a conventional float glass production and comparison with regenerative alternatives[D]. Regensburg: Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 2018: 43–44.
- [31] 中国产品全生命周期温室气体排放系数库 [EB/OL]. [2025-08-02]. <https://lca.cityghg.com/pages>.
- China Products Carbon Footprint Factors Database(CPCD) [EB/OL]. [2025-08-02]. <https://lca.cityghg.com/pages>.
- [32] LIU Meng, LI Wenlong, CHENG Qunying, et al. Life cycle assessment for carbon emission of plate glass industry[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2011, 10(6): 739–742.
- [33] 俞海勇, 曾杰, 赵敏. 典型装饰装修材料生命周期能耗和碳排放量 [J]. *建筑科学*, 2014, 30(4): 21–25.
- YU Haiyong, ZENG Jie, ZHAO Min. Life-cycle energy consumption and carbon emission of typical decoration materials[J]. *Building Science*, 2014, 30(4): 21–25.
- [34] 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 等. 钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估 [J]. *环境科学*, 2023, 44(12): 6630–6642.
- SONG Xiaocong, DU Shuai, DENG Chenning, et al. Life cycle carbon emission accounting and emission reduction potential assessment of steel industry[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6630–6642.
- [35] 邵伟樑, 陈美芳, 常春, 等. 中国纯电动汽车与燃油汽车全生命周期碳排放比较及 2030 年碳排放预测 [J]. *环境科学学报*, 2025, 45(8): 449–460.
- SHAO Weiliang, CHEN Meifang, CHANG Chun, et al. Comparison of carbon emissions throughout the lifecycle of battery electrical vehicles and internal combustion engine vehicles in China and prediction of carbon emissions by 2030[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, 45(8): 449–460.
- [36] 张玉敏. 浮法玻璃燃料中重油和天然气的比较 [J]. *玻璃*, 2014, 41(4): 3–5.
- ZHANG Yumin. Comparison of heavy oil with natural gas used as fuel for float glass melting[J]. *Glass*, 2014, 41(4): 3–5.
- [37] 周文彩, 周芸, 刘晓鹏, 等. 平板玻璃行业的脱碳技术研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(5): 1875–1885.
- ZHOU Wencai, ZHOU Yun, LIU Xiaopeng, et al. Research progress on decarbonization technology for flat glass industry[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(5): 1875–1885.
- [38] 常维东, 李刚, 汤骅, 等. 浅析玻璃行业实现碳中和的路径 [J]. *玻璃*, 2023, 50(11): 21–27.
- CHANG Weidong, LI Gang, TANG Hua, et al. Analysis on the path of realizing carbon neutrality in glass industry[J]. *Glass*, 2023, 50(11): 21–27.
- [39] 王健, 陈福, 何威. 玻璃熔窑燃料的现状及发展趋势 [J]. *玻璃*, 2024, 51(2): 1–5.
- WANG Jian, CHEN Fu, HE Wei. Current situation and development trend of fuel in glass melting kiln[J]. *Glass*, 2024, 51(2): 1–5.
- [40] 何峰, 金明芳, 何威, 等. 氢能在玻璃生产中的利用与可行性分析 [J]. *玻璃*, 2023, 50(9): 12–19.
- HE Feng, JIN Mingfang, HE Wei, et al. Utilization and feasibility analysis of hydrogen energy in float glass[J]. *Glass*, 2023, 50(9): 12–19.
- [41] 于佳玉, 王殿铭, 贾墨, 等. 我国绿色甲醇产业发展分析与建议 [J]. *现代化工*, 2025, 45(3): 7–12.
- YU Jiayu, WANG Dianming, JIA Zhao, et al. Analysis and suggestions for development of China's green methanol industry[J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(3): 7–12.
- [42] SONG Yihong, HAN Shangbo, HU Teng, et al. Comparable study on celadon production fueled by methanol and liquefied petroleum gas at industry scale[J]. *Energies*, 2025, 18(8): 2131.
- [43] CHUDNOVSKY B, LAZEBNIKOV A, RESHEF M, et al. Methanol as a low-cost alternative fuel for the reduction of emissions[M]. Singapore: Springer, 2021: 37–83.
- [44] YAYLA Z, OZKAN I, ACAR S. Trona: Alternative raw material as a source of soda ash[J]. *Ceramics-technical*, 2010, 16(30): 54–58.
- [45] MORETTI C, HREGLICH S. Raw materials, recipes and procedures used for glass making[M]//Janssens K (ed). *Modern Methods for Analysing Archaeological and Historical Glass*. Chichester: Wiley, 2013: 23–47.
- [46] JACKSON C M, PAYNTER S, NENNA M D, et al. Glassmaking using natron from el-barnugi (egypt); pliny and the roman glass industry[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2018, 10(5): 1179–1191.
- [47] 中华人民共和国工业和信息化部: 2023 年光伏压延玻璃行业运行情况 [EB/OL]. (2024-01-19)[2025-08-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2024/art_dfb025e7a84648f888070ced18a4cf7f.html.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Operational performance of the photovoltaic rolled glass industry in 2023[EB/OL]. (2024-01-19) [2025-08-02]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2024/art_dfb025e7a84648f888070ced18a4cf7f.html.