



典型磷化工企业碳足迹核算及减排措施

李贵东¹, 王雪萌¹, 安燕¹, 刘海², 田蒙奎^{1,✉}

1. 贵州大学化学与化工学院, 贵阳 550025; 2. 中低品位磷矿及其伴生资源高效利用国家重点实验室, 贵阳 550016

摘要 磷化工企业是碳排放的重点领域, 其绿色低碳发展对我国“双碳”战略的推进和实施具有重要意义。目前针对磷化工企业碳足迹核算还处于起步阶段, 缺乏系统的研究和规范。本研究以贵州省某代表性磷化工企业为研究对象, 对磷化工企业生产过程中的能源使用情况进行分析, 并结合企业生产工艺特点, 构建了磷化工企业的碳足迹核算模型。计算表明该企业 2021 年碳足迹为 703 377.26 tCO₂, 其中化石能源燃烧直接碳排放为 463 418.66 tCO₂, 占企业碳排放总量的 65.88%; 工业生产过程碳排放为 239 852.26 tCO₂, 占企业碳排放总量的 34.10%; 电力消耗间接碳排放为 106.34 tCO₂, 占企业碳排放总量的 0.02%。从车间来看, 碳排放主要由磷石膏制酸联产水泥车间和动力车间产生, 其中磷石膏制酸联产水泥车间的碳足迹为 471 476.6 tCO₂, 占企业碳排放总量的 67.03%, 动力车间的碳足迹为 151 257.43 tCO₂, 占企业碳排放总量的 21.50%。基于碳足迹分析结果, 针对磷化工企业提出了系列减排措施。该研究可为磷化工企业的降碳减排、绿色低碳和可持续发展提供一定的理论支撑。

关键词 碳达峰; 碳中和; 磷化工企业; 绿色低碳; 碳足迹

为应对全球气候变化及治理, 中国在 2020 年 9 月提出力争在 2030 年前实现“碳达峰”, 2060 年前实现“碳中和”的“双碳”战略目标。“双碳”战略目标的前提是准确核算企业的碳排放总量和碳足迹, 从而评估该企业对环境的影响及碳排放贡献^[1]。2022 年 4 月, 《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》中明确指出要建立健全行业企业碳排放核算机制, 碳排放核算对于企业认识自身碳排放水平进而实施节能降碳具有重要指导意义^[2]。

中国是全球第一大碳排放国, 根据中国碳核算数据库的数据估算, 近年来年均 CO₂ 排放量超 1×10¹⁰ t, 占全球 30% 的比例。在此巨量的排放中, 能源活动及工业领域占据了绝大份额。中国是世界上磷化工产品的生产、消费和出口大国, 磷化工产能与日俱增, 其在促进我国经济发展的同时, 也带来了巨量的资源消耗和严重的环境问题^[3]。磷化工行业属于高耗能行业, 并且能源的使用偏向高碳型能源, 是重要 CO₂ 排放源。据统计, 2021 年磷化工行业碳排放量大约为 2.1×10⁷ tCO₂^[4]。现有的关于磷化工行业碳足迹研究工作仍处在起步阶段, 针对磷化工企业开展碳足迹核算具有研究价值和意义, 特别是针对磷矿资源丰富、磷化工产业较为发达的贵州省更具有现实指导意义。相关研究结果可为管理者和决策者制定碳减排措施提供理论支持, 对磷化工行业碳减排及碳达峰、碳中和路径有一定的指导意义。

本研究根据碳足迹相关核算标准规范方法, 选定贵州省某一磷化工企业为研究对象。基于该企业各个生产车间相对独立的特点, 提出一种基于车间碳足迹的核算方法, 整个企业的碳足迹 (不包括供水、照明等公共附属设施) 即为各个车间碳足迹之和。并结合该企业实际生产状况, 使用排放因子法对该企业的各个车间的直接、间接碳排放进行了核算, 针对核算结果提出了相应的减排措施。

1 碳足迹及其核算方法

1.1 碳足迹定义

“碳足迹” (carbon footprint, CF) 概念是“生态足迹”概念的重要扩展之一, 它指的是产品以及活动 (个

收稿日期: 2024-03-07 录用日期: 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (22162007); 贵州省科技计划资助项目 (黔科合支撑 [2021]480, 黔科合支撑 [2023]379); 瓮福 (集团) 有限责任公司技术开发资助项目 (WH-220787 (YF))

第一作者: 李贵东 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为化学工程, 1411761903@qq.com ✉通信作者: 田蒙奎 (1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为化学工程, tianmk78@126.com

人、团体、公司、政府等)直接和间接引起的温室气体排放总量,采用 CO₂ 当量为计量单位,它是一种量化碳排放的标准^[5-6]。碳足迹是目前使用最广泛的环境指标之一,用于报告直接和间接的温室气体 (GHG) 排放^[7-8]。

碳足迹可在产品层面进行评估,遵循 GHG protocol (2011)、PAS 2050 (2011)、ISO 14067 (2012) 等相关标准;也可以在企业层面进行评估,遵循 ISO 14064 (2006)、GHG protocol (2004) 等标准^[9-10]。

1.2 碳足迹核算方法

为了定量分析产品及其企业生产活动产生的碳足迹,常用的碳足迹核算方法主要有排放因子法、投入产出分析法、生命周期评价法、实测法。

排放因子法 (Emission-factor approach) 是按照“温室气体排放总量=活动数据×排放因子”的总体思路,选择合适的活动数据和排放因子进行碳足迹核算^[11-12]。

投入产出分析法 (input-output, I-O) 主要是通过投入产出表和建立相关的数学模型来计算整个生产链上的碳足迹^[13-14]。I-O 法是一种“自上而下”的方法,该方法更适用于宏观层面和经济领域,不适合用于产品、企业等微观系统^[14]。

实测法 (experiment approach, EA) 利用相关测量仪器对现场某一碳排放源气体体积流量和体积分数等相关指标进行检测和监测,并以此来核算碳排放量的方法^[11]。此方法涉及的中间环节最少,计算结果误差最小,但是实际操作难度大,国内外均较少采用实测法对碳足迹进行计算,且国内企业目前大多数没有进行定期监测统计,是碳足迹量化使用最少的方法^[15]。

生命周期评估 (life cycle assessment, LCA) 是一种用于评估产品、工艺或服务的环境影响的工具,是碳足迹核算中最常见的方法。主要包括以下 4 个步骤:目标定义和范围的界定、清单分析、影响评价和结果解释。它从生命周期的角度分析对环境的影响,可用于对个人、产品、企业等提出优化和改进措施^[10,16]。LCA 可用于评价人体毒性、酸化潜势、全球变暖潜势等多个环境影响类别,但其逐渐走向简化趋势,关注单一指标碳足迹^[7,9-10]。

2 案例企业简介

选取贵州省黔南州一磷化工企业为研究对象。该企业是全国较大的肥料生产基地,年主产品、副产品及中间品合计 2.67×10⁶ t。建成有年产 2.00×10⁵ t 湿法磷酸,产生的磷石膏通过高温煅烧还原实现硫、钙元素资源回收利用,能力达到 1.60×10⁶ t·a⁻¹,能实现磷石膏的零排放,是国内目前在湿法磷酸工艺针对磷石膏回收硫元素方面的领先企业。该企业主要涉及磷矿选矿、湿法磷酸生产、硝酸生产、硫磺制酸、磷石膏制酸联产水泥、磷肥生产等工艺,企业 2021 年主要产品及其产量详见表 1。

3 碳足迹核算

3.1 核算边界及功能单位的确定

为了能够清晰界定直接和间接碳排放源,《温室气体协定书》(2004)中明确规定了企业生命周期内碳足迹 3 种排放范围:范围 1 包括来自该企业拥有或者经营的直接排放(锅炉、熔炉、移动燃烧、过程排放等);范围 2 包括企业电力、热力消耗产生的间接温室气体排放(这类排放实际发生在发电、发热的工厂中,被归类为间接排放);范围 3 包括该协议的其他自愿类别,包括企业生命周期的上游和下游阶段(如与原材料提取或使用产品相关的排放)^[1,10,17]。范围 1 和范围 2 必须包含在任何企业碳足迹评估报告中,本研究对范围 3 不予考虑^[10]。案例磷化工企业核算边界

表 1 案例企业主要产品及产量

Table 1 Case phosphorus chemical enterprise main products and output

产品名称	产量/t
磷精矿	809 189.65
磷酸	241 060.88
磷酸一铵 (折合 100%P ₂ O ₅)	193 018.54
63%硝酸	141 847.08
98%硫酸	596 879.44
水泥熟料	370 925.87
复混肥	116 242.13
有机肥	4 813.76
硝基肥	112 161.98
硫基肥	84 875.29

如图 1 所示,生产系统主要包括选矿、磷酸、磷石膏制酸联产、硝酸、肥料等车间;辅助生产系统包括动力、供电等。

在磷化工企业内,企业包括许多不同的产品,有不同的生产工艺与能源消耗,为了便于在该过程的每个阶段进行计算,使用吨二氧化碳(tCO_2)作为功能单位(即将所有的排放都转换为 CO_2 排放,使用 tCO_2 作为单位便于比较和分析在不同的活动过程中产生的排放量, CH_4 和 N_2O 等非 CO_2 温室气体分别乘以其全球变暖潜能值折合为 CO_2 当量)。选择 2021 年为核算基准年,核算该企业 2021 年全年的碳足迹。

3.2 排放源

该磷化工企业在其核算边界内,温室气体排放源主要包括:1)化石能源燃烧排放,磷化工产品生产过程使用煤炭、焦炭、柴油等燃料燃烧产生的直接碳排放;2)工业过程排放,企业内部各车间在工艺过程中由于化学反应造成的直接碳排放;3)其他间接排放,指该磷化企业使用的净购电力所产生的间接碳排放。案例磷化工企业的温室气体排放来源见图 2 所示。该磷化工企业温室气体的排放主要涉及 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的排放。 CH_4 排放主要是由于化石燃料燃烧不充分产生的,而在该企业中所有的车间都有化石燃料的燃烧,如磷石膏制酸联产水泥车间等。 CO_2 排放除了车间化石燃料燃烧排放外,还有外购电力的间接排放等。而 N_2O 排放主要由硝酸车间生产排放。

3.3 计算方法

基于该企业各个生产车间相对独立的特点,提出一种基于车间碳足迹的核算方法,整个企业的碳足迹即为各个车间碳足迹之和,单个车间使用排放因子法进行核算。计算公式参考《中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》里的计算公式^[18]。磷化工生产企业碳足迹核算是企业煤炭、柴油等化石能源燃烧所产生的排放量、工业生产过程中由于化学反应产生的排放量以及由于企业电力消耗所产生的间接排放量之和,按照公式(1)计算。

$$E = E_i + E_c + E_e \quad (1)$$

式中: E 为企业 2021 年度排放的碳排放总量, tCO_2 ; E_i 为企业化石能源燃烧碳排放量, tCO_2 ; E_c 为企业所有生产过程中产生的碳排放量, tCO_2 ; E_e 为净购电力消耗产生的间接碳排放量, tCO_2 。

1)化石能源燃烧排放核算。化石能源燃烧产生的 CO_2 ,主要指企业在核算的统计期内各种燃料的消耗量为基础,通过各种化石能源燃烧排放量加和得到,采用公式(2)、(3)计算。

$$E_i = AD_i \times EF_i \quad (2)$$

式中: AD_i 为化石能源类型 i 的活动水平数据, t ; EF_i 为化石能源类型 i 的 CO_2 排放因子, $\text{tCO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$ 。

$$EF_i = \text{NCV}_i \times \text{CC}_i \times \text{OF}_i \times 44/12 \quad (3)$$

式中: NCV_i 为化石能源类型 i 的平均低位发热值, $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$; CC_i 为化石能源类型 i 的单位热值含碳量, $\text{tC} \cdot (\text{TJ})^{-1}$; OF_i 为化石能源类型 i 的碳氧化率,%。单位热值含碳量、碳氧化率选择企业实测值,企业若没有

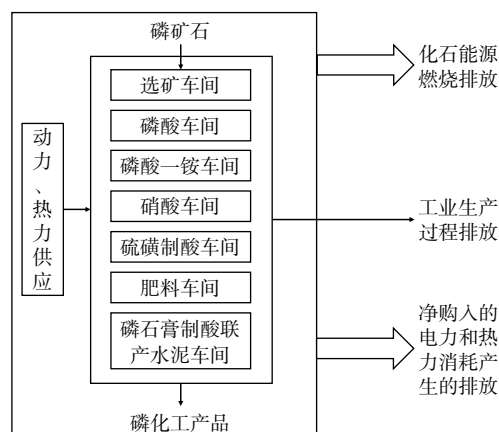


图 1 案例磷化工企业碳足迹核算系统边界

Fig. 1 Case carbon footprint accounting system boundary of phosphorus chemical enterprise

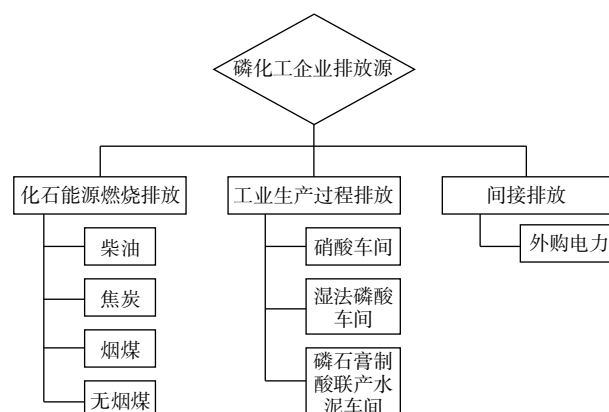


图 2 案例磷化工企业的碳足迹来源

Fig. 2 Case study on carbon footprint source of phosphorus chemical enterprise

相关数据,则采用省级温室气体清单编制指南给出的缺省值。本研究化石燃料特征性参数缺省值来源于国家发展改革委于2011年发布的《省级温室气体清单编制指南》,具体数据如表2所示。

2) 工业生产过程排放核算。工业生产过程排放是指除了化石能源燃烧排放外的化学或物理过程变化造成的温室气体排放,总量为统计期内各车间的工业生产过程排放总和。该企业的工业生产过程排放由磷酸、硝酸和磷石膏制酸联产水泥3个车间产生,采用公式(4)~(7)进行核算。

燃料品种	单位热值含碳量/ (tC·(TJ) ⁻¹)	平均低位发热值/ (GJ·t ⁻¹)	碳氧化率
烟煤	25.77	19.57	93%
固体燃料 无烟煤	27.65	26.70	94%
焦炭	29.42	28.44	93%
液体燃料 柴油	20.20	41.65	98%
原油	20.08	41.82	98%

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_{ci} \quad (4)$$

式中: E_c 为该企业工业生产过程碳排放总量, tCO₂。

$$E_{C1} = AD_{\text{磷精矿}} \times PUR_{\text{磷精矿}} \times w(\text{CO}_2) / w[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_3] \quad (5)$$

式中: E_{C1} 为磷酸生产过程中由于磷精矿中的碳酸盐(主要成分 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_3$) 发生化学反应产生的 CO₂ 排放量, tCO₂; $AD_{\text{磷精矿}}$ 为磷酸生产中磷精矿的消耗量, t; $PUR_{\text{磷精矿}}$ 为磷精矿中碳酸盐质量百分比, %; $w(\text{CO}_2)$ 为 CO₂ 的相对分子质量; $w[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_3]$ 为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_3$ 的相对分子质量。

$$E_{C2} = NAP \times EF_{\text{N}_2\text{O}} \times GWP \quad (6)$$

式中: E_{C2} 为生产硝酸产生的温室气体排放量, tCO₂; NAP 为硝酸产量, t; $EF_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N₂O 排放因子, kgN₂O·(tHNO₃)⁻¹; GWP 为 N₂O 的全球变暖潜能值, 取 298。

$$E_{C3} = AD_{\text{焦炭}} \times w(C) \times 44/12 \quad (7)$$

式中: E_{C3} 为磷石膏制酸联产水泥生产过程焦炭做还原剂产生的 CO₂ 排放量, tCO₂; $AD_{\text{焦炭}}$ 为焦炭做还原剂的消耗量, t; $w(C)$ 为焦炭的含碳量, %, $w(C)$ 取 82.45%。

3) 外购电力排放核算。外购电力产生的 CO₂ 间接排放, 以企业能源统计报表、企业电力结算数为核算依据, 使用公式(8)进行计算。

$$E_e = AD_e \times EF_e \quad (8)$$

式中: E_e 为该企业电力消耗碳排放量, tCO₂; AD_e 为企业统计期内的净外购电力, MWh; EF_e 为电力碳排放系数, tCO₂·(MWh)⁻¹, 采用 0.581 tCO₂·(MWh)⁻¹[19]。

4 案例分析

4.1 数据来源

结合上述碳足迹核算方法, 对案例磷化企业进行实地调研, 获得基础数据。依据图1的核算边界, 核算包括化石能源燃烧排放, 工业生产过程排放, 外购电力间接排放(该企业热力的消耗源自其动力车间)。核算中涉及的生产数据均来自该企业的生产统计报表、能耗统计表以及台账, 企业各车间生产状况根据企业实际生产效益随时调整, 部分车间并非全年运行。该企业实际消耗基础数据汇总详见表3。

根据前文计算公式整理得到了碳足迹核算需要的碳排放因子, 详见表4。碳排放因子计算使用的单位热值含碳量、碳氧化率一般为企业的实测值。但企业提供的单位热值含碳量和碳氧化率的数值通常不同, 就导致计算的碳排放因子不同。本研究碳排放因子的计算结果偏小[20]。

4.2 结果分析

基于磷化工企业碳足迹核算方法, 结合案例企业实际生产数据, 计算得到案例企业的碳足迹结果, 碳足迹数据详见表5。

1) 企业车间碳足迹分析。根据表5, 该企业2021年碳足迹为 703 377.26 tCO₂, 计算得到各个车间碳足迹具体占比如图3所示。其中, 磷石膏制酸联产水泥车间、动力车间和硝酸车间碳足迹分别为 471 476.6、

表 3 案例磷化工企业实际消耗基础数据表		
Table 3 Case actual consumption of phosphorus chemical enterprises basic data table		
车间名称	名称	消耗量
选矿车间	柴油/t	170.45
	电力/kWh	21 158.52
湿法磷酸车间	柴油/t	92.96
	电力/kWh	20 535.65
铵镁车间	柴油/t	28.01
	电力/kWh	8 200.53
磷铵车间	柴油/t	52.34
	电力/kWh	11 935.40
磷铵二车间	柴油/t	16.09
	电力/kWh	4 939.73
硝酸车间	柴油/t	0.12
	电力/kWh	1 835.30
硫磺制酸车间	柴油/t	9.65
	电力/kWh	2 184.68
磷石膏制酸联产水泥烧成车间	柴油/t	163.48
	烟煤/t	172 305.43
	焦炭/t	57 284.13
	无烟煤/t	243.06
	电力/kWh	63 202.66
磷石膏制酸联产水泥烟气制酸车间	柴油/t	271.31
	电力/kWh	23 819.49
复混肥车间	柴油/t	32.95
	无烟煤/t	1 015.10
	电力/kWh	2 830.77
固体菌剂车间	柴油/t	1.34
	烟煤/t	355.40
	无烟煤/t	207.04
	电力/kWh	212.00
高塔车间	柴油/t	56.06
	电力/kWh	6 341.58
喷浆车间	柴油/t	14.24
	烟煤/t	650.31
	无烟煤/t	3 005.19
	电力/kWh	7 412.89
动力车间	柴油/t	25.86
	无烟煤/t	59 412.20
	电力/kWh	8 446.12

注：各车间的热力（蒸汽）消耗均由企业动力车间提供，将不再在各个车间进行统计。各车间柴油使用量包括车间内生产设备用油和原材料、产品交通运输消耗。

表 4 碳排放因子	
Table 4 Carbon emission factor	
项目	数值
柴油/(tCO ₂ ·t ⁻¹)	3.023 2
烟煤/(tCO ₂ ·t ⁻¹)	1.719 7
无烟煤/(tCO ₂ ·t ⁻¹)	2.544 5
电力/(tCO ₂ ·(MWh) ⁻¹)	0.581 0

表 5 案例企业碳足迹核算结果			
Table 5 Case enterprise carbon footprint accounting results			
车间名称	名称	碳足迹/tCO ₂	各车间碳足迹总量/tCO ₂
选矿车间	柴油	515.30	527.59
	电力	12.29	
湿法磷酸车间	柴油	281.04	365.74
	电力	11.93	
	过程排放	72.77	
铵镁车间	柴油	84.68	89.44
	电力	4.76	
磷铵车间	柴油	158.23	165.16
	电力	6.93	
磷铵二车间	柴油	48.64	51.51
	电力	2.87	
硝酸车间	柴油	0.36	66 601.45
	电力	1.07	
	过程排放	66 600.02	
硫磺制酸车间	柴油	29.17	30.44
	电力	1.27	
磷石膏制酸联产水泥车间（烧成）	柴油	494.23	471 476.6
	烟煤	296 313.65	
	无烟煤	618.47	
	电力	36.72	
磷石膏制酸联产水泥车间（烟气制酸）	过程排放	173 179.47	
	柴油	820.22	
	电力	13.84	
	柴油	99.61	
复混肥车间	无烟煤	2 582.92	2 684.17
	电力	1.64	
固体菌剂车间	柴油	4.05	1 142.16
	烟煤	611.18	
	无烟煤	526.81	
	电力	0.12	
	柴油	169.48	
高塔车间	电力	3.68	173.16
	柴油	43.05	
喷浆车间	烟煤	1 118.34	8 812.41
	无烟煤	7 646.71	
	电力	4.31	
动力车间	柴油	78.18	151 257.43
	无烟煤	151 174.34	
	电力	4.91	

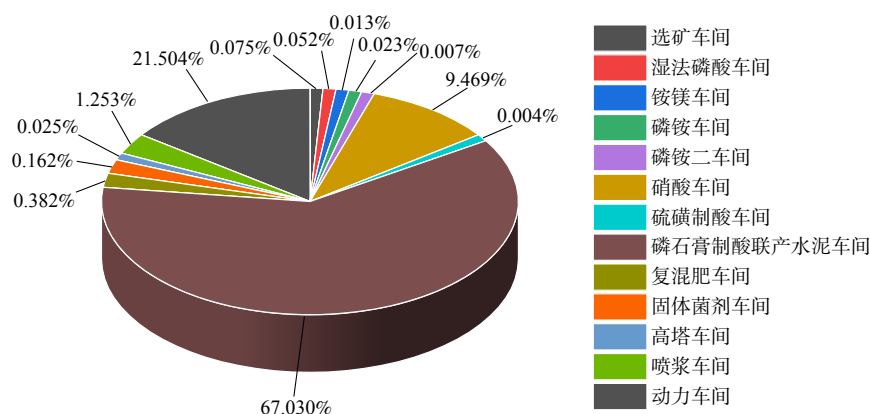


图3 企业内各车间碳足迹占比情况

Fig. 3 Proportion of carbon footprint of each workshop in the enterprise

151 257.43 和 66 601.45 tCO₂，分别占企业碳排放总量的 67.030%、21.504% 和 9.649%，是占比最多的 3 个车间。剩余车间仅占企业碳排放总量的 1.997%。

各车间不同碳排放源占比情况详见图 4。从图 4 可以看出，磷石膏制酸联产水泥车间的碳足迹主要归因于化石能源燃烧排放，占车间内总排放的 63.26%；其次是焦炭作为还原剂造成的工业生产过程排放，占车间内总排放的 36.73%；电力消耗造成的间接排放仅占车间内总排放的 0.01%。动力车间为企业内各车间提供热力，由于锅炉燃煤造成大量碳排放，化石能源燃烧排放占车间内总排放的 99.997%。硝酸车间实际能耗占比很小，大部分碳排放来自 N₂O 气体的排放折算，N₂O 的实际排放量不大，但是其全球变暖潜能值为 CO₂ 的 298 倍，导致该车间碳足迹较大。

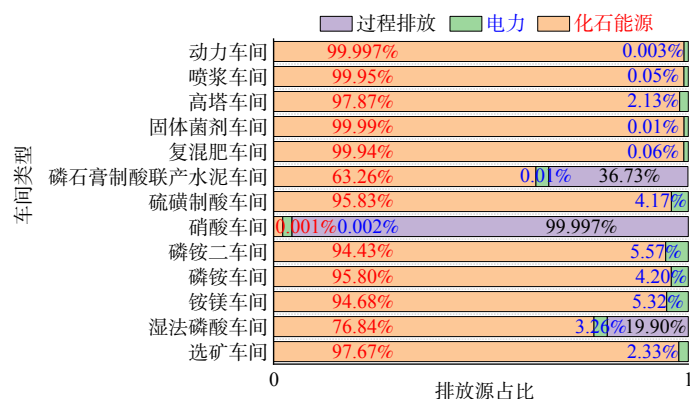


图4 企业各车间不同碳排放源占比

Fig. 4 Proportion of carbon emission sources in each workshop of the enterprise

2) 企业碳足迹分析。根据表 5，从案例企业不同碳排放源来看，化石能源燃烧碳排放为 463 418.66 tCO₂，占企业生产过程碳排放总量的 65.88%；工业生产过程碳排放为 239 852.26 tCO₂，占生产过程碳排放总量的 34.10%；电力消耗间接碳排放为 106.34 tCO₂，占生产过程碳排放总量的 0.02%，具体详见图 5。

研究发现，案例企业化石能源燃烧造成的直接碳排放量最大，工业生产过程造成的碳排放仅次于化石能源燃烧，电力消耗产生的间接排放最少。因此，在制定减排措施时，应从能源使用、工艺技术以及电力来源等方面出发，通过不同的措施来降低企业碳足迹。费伟良等对工业园区碳排放进行了核算，其中化石燃料燃烧占比最高达 83.5%，园区内工业生产占比 7.4%，外购电力占比 8.0%^[21]。化工行业碳排放在整个园区内占比 70% 以上，可见化石能源燃烧直接排放是工业园区内企业碳排放的主要来源。

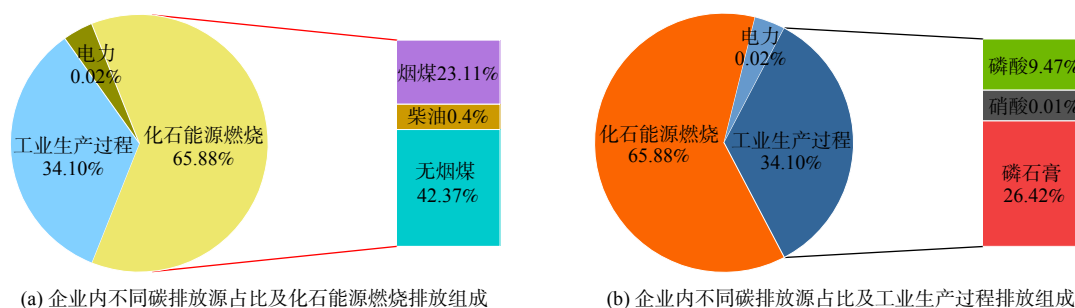


图 5 企业内不同碳排放源占比

Fig. 5 Proportion of different carbon emission sources within the enterprise

5 减排措施

5.1 优化用能结构

通过对该磷化工企业的生产过程碳足迹核算与分析可知,该企业多个车间燃煤量大,化石能源燃烧产生的碳排放量占企业生产过程碳排放总量的一半以上。煤炭等化石能源在燃烧过程中产生的 CO_2 排放量远远高于电能产生的间接排放 CO_2 。优化能源消费结构可以降低企业碳排放总量,选择绿色电源用以代替高碳能源,可显著减少企业生产过程中 CO_2 排放总量^[22]。根据联合国欧洲经济委员会发布的《Integrated life-cycle assessment of electricity sources》报告,得到不同发电方式下的碳排放量,如图 6 所示^[23]。由图 6 可知,不同来源的电力碳排放量差异巨大,选择不同来源的电力会对磷化企业碳排放总量造成显著影响。建议企业在生产过程中更大程度上选择风电、水电、核电等清洁能源替代燃煤发电。

5.2 生产设施设备的提升与优化

选择新型高效节能电机、节能照明器具、清洁运输工具等设施设备以节能降碳;也可采用性能好的隔热材料加强企业内设备和管道保温,改善企业内烘干设施,减少热量损耗,达到减少碳排放的目的。在企业的动力车间,可选择天然气或生物质锅炉代替燃煤锅炉,使用清洁能源替代高碳型能源降低碳排放量。但由于企业所采取的措施和改进的效果存在较大差异,通过生产设施设备的提升与优化的减排贡献在几个百分点到数十个百分点之间,具体可进行的措施如表 6 所示。

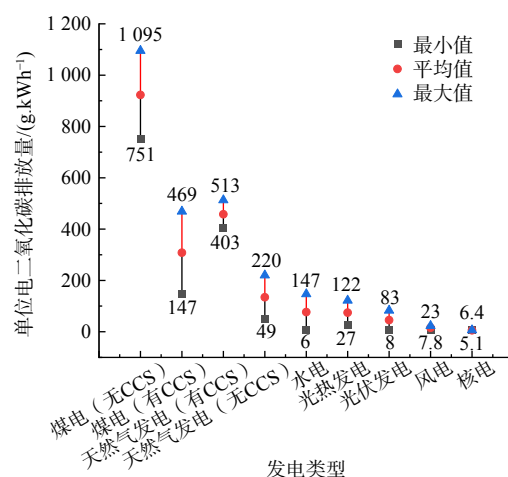


图 6 不同发电方式的碳排放量

Fig. 6 Carbon emissions of different power generation methods

表 6 生产设施设备提升与优化措施

Table 6 Production facilities and equipment upgrading and optimization measures

生产设施设备	生产工段	示例
高效节能电机	全工艺生产设备	更换YE3、YE4、YE5系列电机 ^[24]
节能照明器具	企业内	太阳能路灯、自动控制传感器
清洁型运输工具	生产运输	使用电力叉车代替柴油型叉车
天然气或生物质锅炉	动力车间	使用天然气或生物质锅炉代替燃煤锅炉 ^[25]
新型节能专用生产设备	部分工艺生产设备	新型节能设备
改善蒸汽运输设施	热力输送环节	做好管道的绝密和保温
改善烘干设施	原料干燥环节	热回收系统 ^[25]

5.3 生产工艺的改进减排

在生产工艺减排方面,提高磷矿开采回收率,进一步提升选矿工艺,开发绿色选矿技术和研发选择性高和环境友好型的选矿药剂^[4]。湿法磷酸工艺上,使用半水-二水法替代企业使用的二水法。半水-二水法生产的磷酸中 F、SO₄²⁻等杂质的物质的量浓度更低,还具有能耗较低、磷回收率高、产生的磷石膏质量高的优点,高质量的磷石膏便于企业下一步综合利用^[26]。硝酸生产工艺上,从 N₂O 减排工艺入手,推广使用先进的两段式工艺代替一段式工艺,即采用 SCR 催化剂先催化 NO_x 还原后催化 N₂O 分解,该工艺在去除 N₂O 气体方面有优势,且还原剂消耗量更少^[27]。磷复肥生产方面,推广先进的磷酸一铵、磷酸二铵、复合肥等产品的造粒技术,使用先进的三效蒸发设备,管式反应器,造粒、干燥的节能设备,一定程度上可以减少企业碳排放^[4,28]。开发新型高效磷基肥料,如高纯度磷酸一铵、磷铵复合产品等,提高磷元素利用率,降低磷肥消耗量,实现从磷化工行业源头减排^[29]。磷石膏综合利用方面,磷石膏制酸联产水泥解决了磷石膏废弃物堆积存量、大规模消纳难度大和污染环境的问题,但需要研发降低磷石膏综合利用能耗的技术,研究磷石膏无预处理技术,提高磷石膏制品的质量^[29-31]。碳捕获、利用和储存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术可以实现 CO₂ 资源化利用并产生经济效益^[32]。自中国首个 CCUS 项目于 2004 年投运以来,CO₂ 捕集能力 2.96×10⁶ t·a⁻¹、CO₂ 注入能力 1.21×10⁶ t·a⁻¹,其中中国最大的 EOR 项目,累计注入 CO₂ 超 2.00×10⁶ t,未来 CCUS 将会成为磷化工企业乃至磷化工行业减少碳排放的重要途径^[33-34]。

5.4 加强节能管理

提高企业管理水平,提高能源利用率,避免能源浪费,减少设备使用过程的能源消耗^[15,35]。加强监督机制,在生产车间设置专门的车间工作人员对机械设备定期检查和维修,防止跑、冒、滴、漏的浪费问题,确保生产设备在最佳状态下运行^[36]。加强企业碳排放关键环节的监管,对磷化工企业碳排放进行定期核算与分析,针对重要排放点进行改进^[36]。

6 结论

1) 本研究以贵州省某代表性磷化工企业为研究对象,针对磷化工企业的碳足迹核算方法进行了研究。确定了该企业的核算边界、排放源和功能单位。基于该磷化工企业的工艺特点,提出了一种基于车间碳足迹的核算模型。使用排放因子法对单个车间碳排放进行核算,从而得到整个企业的生产过程排放总量。

2) 通过核算,该企业 2021 年的生产过程碳足迹为 703 377.26 tCO₂。从企业不同碳排放源来看,化石能源燃烧碳排放为 463 418.66 tCO₂,占碳排放总量的 65.88%;工业生产过程碳排放为 239 852.26 tCO₂,占碳排放总量的 34.10%;电力消耗间接碳排放为 106.34 tCO₂,占企业碳排放总量的 0.02%。

3) 基于碳足迹分析结果,提出了优化用能结构、生产设施设备的提升与优化、生产工艺绿色发展和加强节能管理的减排措施建议。该研究对磷化工企业有序推进“双碳”战略目标具有指导意义和价值。

参考文献

- [1] NAVARRO A, PUIG R, PERE F. Product vs corporate carbon footprint: Some methodological issues: A case study and review on the wine sector[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581-582: 722-733.
- [2] 关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案[EB/OL]. [2024-03-20]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/19/5706074/files/a924a706a96645f1a4ee8981e7da686.pdf>.
- [3] 王莹,熊先孝.中国磷矿成矿系列、成矿规律与找矿方向[J]. *地球学报*, 2023, 44(4): 625-634.
- [4] 郑秀兴,白海丹,冯尚善,等.磷复肥产业碳排放现状及低碳绿色发展路径[J]. *磷肥与复肥*, 2022, 37(10): 1-7.
- [5] CHOJNACKA K, KOWALSKI Z, KULCZYCKA J, et al. Carbon footprint of fertilizer technologies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 962-967.
- [6] WANG Q, GE S T. Carbon footprint and water footprint in China: Similarities and differences[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 140070.
- [7] MAHAPATRA S K, SCHOENHERR T, JAYARAM J. An assessment of factors contributing to firms' carbon footprint reduction efforts[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 235: 108073.
- [8] CUCEK L, KLEMES J J, KRAVANJA Z. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 34: 9-20.
- [9] SANTOS A, BARBOSA-PÓVOA A, CARVALHO A. Life cycle assessment in chemical industry-A review[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2019, 26: 139-147.
- [10] MORENO J, MARTINEZ L, BELALCAZAR L, et al. Corporate carbon footprint of a palm oil mill[J]. *TECCIENCIA*, 2018, 13(24): 1-10.
- [11] WU P, XIA B, WANG X. The contribution of ISO 14067 to the evolution of global greenhouse gas standards-A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy*

- Reviews, 2015, 47: 142-150.
- [12] 刘学之, 孙鑫, 朱乾坤, 等. 中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J]. 生态经济, 2017, 33(11): 21-27.
- [13] LEONTIEF W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. The Review of Economics and Statistics, 1936, 18(3): 105-125.
- [14] 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 等. 基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4637-4646.
- [15] 胡启迪, 孙仁金, 邓钰喧, 等. 典型炼油企业碳减排方式与潜力研究[J]. 现代化工, 2023, 43(3): 6-12.
- [16] WANG X, DONG X, WANG X C, et al. A life cycle assessment of an enterprise's low-carbon emissions model: The Xinjiang Shihezi pig farm faecal treatment biogas project as a case study[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 304: 114251.
- [17] CHEN J W, ZHANG H, ZHAO G, et al. A novel method for estimating carbon emission based on industrial metabolism: Blast furnace iron-making with micro mechanism model[J]. Energy Reports, 2022, 8: 10133.
- [18] 中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [EB/OL]. [2024-03-20]. <https://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1c04.pdf>.
- [19] 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知[EB/OL]. [2024-03-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html?keywords=2022.
- [20] RAMPHULL M, SURROOP D. Greenhouse gas emission factor for the energy sector in Mauritius[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(6): 5994-6000.
- [21] 费伟良, 牛乐, 刘景洋, 等. 工业园区碳排放核算与因素分解实证分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3744-3753.
- [22] RAZA M Y, LIN B, LIU X. Cleaner production of Pakistan's chemical industry: Perspectives of energy conservation and emissions reduction[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 278(1): 123888.
- [23] United Nations Economic Commission for Europe. Carbon neutrality in the UNECE region: Integrated life-cycle assessment of electricity sources[R]. Geneva: UNECE, 2021.
- [24] 陈金刚, 王强. 高效电机节能设计要点和系统节能发展趋势[J]. 电气防爆, 2022, 238(6): 9-11.
- [25] 张兴惠, 翟雨轩, 张聪, 等. 新型生物质锅炉燃烧排放研究与环境效益分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 115-120.
- [26] 匡国明. 湿法磷酸工艺路线的探讨[J]. 无机盐工业, 2013, 45(4): 1-4.
- [27] 李佳, 樊星, 陈莉, 等. 硝酸生产尾气中 NO_x 和 N_2O 联合脱除技术研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(7): 3770-3779.
- [28] 郑秀兴. 复合肥料生产工艺的创新发展[J]. 磷肥与复肥, 2021, 36(11): 1-6.
- [29] 王辛龙, 许德华, 钟艳君, 等. 中国磷化工行业60年发展历程及未来发展趋势[J]. 无机盐工业, 2020, 52(10): 9-17.
- [30] 贾兴文, 吴洲, 马英. 磷石膏建材资源化利用现状[J]. 材料导报, 2013, 27(23): 139-141.
- [31] 高璐阳, 陈宏坤, 王怀利, 等. 工业副产磷石膏大宗利用清洁生产[J]. 现代化工, 2018, 38(11): 18-19.
- [32] JIANG K, ASHWORTH P. The development of carbon capture utilization and storage (CCUS) research in China: A bibliometric perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138(3): 110521.
- [33] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 35-66.
- [34] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70-80.
- [35] 陈国栋, 庞晓燕, 段力民, 等. 制革企业温室气体排放核算方法的研究及应用[J]. 中国皮革, 2023, 52(7): 10-17.
- [36] 张铭. 稀土磁性材料企业碳排放核算与分析[D]. 内蒙: 内蒙古科技大学, 2020.

(责任编辑: 陶雪)

Carbon footprint accounting model and emission reduction measures of typical phosphorus chemical enterprises

LI Guidong¹, WANG Xuemeng¹, AN Yan¹, LIU Hai², TIAN Mengkui^{1,*}

1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang city, Guizhou Province, 550025, China;

2. State Key Laboratory of Efficient Utilization for Low Grade Phosphate Rock and Associated Resources, Guiyang city, Guizhou Province, 550016, China

*Corresponding author, E-mail: tianmk78@126.com

Abstract Phosphorus chemical enterprises are the key areas of carbon emissions, and their green and low-carbon development is of great significance to the promotion and implementation of China's "double carbon" strategy. Currently, carbon footprint accounting for phosphorus chemical firms is in its early stages, with a lack of systematic research and guidelines. This study used a representative phosphorus chemical enterprise in Guizhou Province as a research object, analyzing the energy used in the enterprise's production process, and building the carbon footprint accounting model of the enterprise in conjunction with the enterprise's production process characteristics. The calculation showed that the carbon footprint of the enterprise in 2021 was 703 377.26 tCO₂, of which the direct carbon emission of fossil energy combustion was 463 418.66 tCO₂, accounting for 65.88% of the total carbon emission of the enterprise. The carbon emission of industrial production process was 239 852.26 tCO₂, accounting for 34.10% of the total carbon emission of enterprises. The indirect carbon emission of electricity consumption was 106.34 tCO₂, accounting for 0.02% of the total carbon emission of enterprises. From the perspective of the workshop, carbon emissions were mainly generated by the phosphogypsum-based acid co-production cement workshop and the power workshop. The carbon footprint of the phosphogypsum-based acid co-production cement workshop was 471 476.6 tCO₂, accounting for 67.03% of the total carbon emissions of the enterprise. The carbon footprint of the power workshop was 151 257.43 tCO₂, accounting for 21.50% of the total carbon emissions of the enterprise. Based on the results of the carbon footprint analysis, a number of emission-reduction actions were offered for phosphorus chemical companies. This study can provide some theoretical support for carbon emission reduction, green low-carbon and sustainable development of phosphorus chemical enterprises.

Keywords carbon peaking; carbon neutrality; phosphorus chemical company; green and low carbon; carbon footprint