

同行专家业内评价意见书编号: 20240858137

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名: _____ 冯然

学号: _____ 22160031

申报工程师职称专业类别（领域）: _____ 能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2024年03月26日

一、个人申报

（一）基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论和专业技术知识掌握情况

本科期间攻读建筑电气与智能化专业，修读了高等数学、大学物理、模拟电路、数字电路、自动控制原理等核心课程，掌握基本的电气工程专业基础理论知识。研究生期间攻读能源动力专业，修读了储能原理、储能材和储能系统及应用等专业必修课程，以及优化算法、低温与制冷系统计算机模拟等专业选修课程；自学了传热学、流体力学等动力工程专业基础理论知识；掌握储能学科的理论基础和能源领域计算机模拟和优化的理论基础。研究生期间从事行业脱碳潜力评估和能源系统容量配置优化研究，掌握python数据处理、机器学习等方面的专业知识，掌握综合能耗计算和碳排放核算的相关标准，掌握可再生能源系统容量配置优化技术的相关专业知识。

2. 工程实践的经历

于国网浙江省电力有限公司电力科学研究所的能效提升技术研究助理岗位进行工程实践。实践期间，根据典型行业用能诊断及能效提升差异化关键技术研究项目的项目需求，协助单位完成典型工业行业能效特征研究分析和工业企业工艺流程焓分析、光储系统容量配置优化研究等工作。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

（1）化纤行业能效提升及脱碳潜力评估研究

当前行业或区域的能效提升及脱碳潜力的相关研究，通常利用投入产出法、指数分解法或LEAP等综合模型，基于产业部门级的总和数据，对综合能耗和碳排放进行情景预测并规划减碳方案。而中国化纤行业企业规模和能源利用效率的差异，为解决传统自上而下能效提升及脱碳潜力分析难以反映企业级碳排放的差异的问题，开展基于企业及数据的化纤行业能效提升及脱碳潜力研究。

综合运用综合能耗计算和机器学习的专业知识，建立了基于机器学习的VMD-LSTM-ARIMA能耗结构组合预测模型；模型将工业行业的能源消耗时间序列分解为多个子系列，使用变分模态分解（Variational Mode Decomposition, VMD），并通过自回归差分移动平均模型（Autoregressive Integrated Moving Average Model, ARIMA）和长短期记忆法（Long-Short Term Memory, LSTM）来预测具有不同稳定性的子系列。

综合运用综合能耗计算和聚类算法的专业知识，建立能效提升潜力分析模块中，提出了基于过去的能源消耗水平和强度，通过K-means++聚类算法对企业进行聚类，为每一类企业设定相对容易达到的能耗强度参照值并对标计算出不同类别企业的能效提升潜力。通过能效提升潜力分析模型，对化纤行业的能效提升潜力总量及能源类型分布，并建立常用能效提升策略库，根据能效提升潜力计算结果匹配能效提升策略。以此部分为内容，撰写中文小论文一篇并已被中文核心期刊录用。

综合运用碳排放权交易体系、绿色电力交易证明等碳交易政策的专业知识，基于文献调研设计了两种情景下的碳交易价格及规则，通过蒙特卡洛模拟法来模拟行业碳交易方案并分析成本构成。

综合运用综合能耗计算和python数据处理的专业知识，对浙江省内化纤行业的143余家企业能耗边界原始数据进行数据清洗和预处理，并进行脱碳潜力评估分析，得到以下主要结论：
a) 通过混合预测模型的计算，在不考虑能效改进的情况下，2030年该地区化纤行业的能耗将达到 1.32×10^8 GJ，相关的碳排放将达到 1.56×10^7

tCO₂。然后根据节能潜力分析模型计算，该省的化纤行业有大约 2.73×10^7 GJ的节能潜力，占总能耗的24.62%。于是考虑能效提升时，2030年该行业的碳排放将预计为约 1.21×10^7

tCO₂，这意味着到2030年，行业内有22.6%的碳排放量可以通过能效提升来减少。

b) 结合化纤行业的重要用能设备及常用的能效提升策略，该省的化纤行业中不同用能特征的企业存在不同的能效提升侧重方向：1) 行业内的大型企业能耗强度已经较低，节能减碳工作建议进一步挖掘余热利用的机会；2) 行业内中小型企业用电效率存在较大提升空间，节能减碳工作建议优先关注用电设备，如压缩空气系统的生产效率、压缩空气的传输管网漏气情况以及空调等系统中各类电机、风机及泵的效率，可以通过更换能效等级更高的设备、提高设备运行负载以及加装变频控制器等手段来实现节能；3) 行业内部分能耗强度偏高的小型企业用热效率通常很低，节能减碳工作建议优先关注加热导热油的锅炉系统的效率，包括锅炉的热效率，导热油输送管网的保温性等，有必要时更新高效的生产线设施以提高用热效率。

c) 碳交易和清洁能源将在实现净零排放目标中发挥关键作用。根据蒙特卡洛模拟的碳交易方案，该省的化纤行业在目前的情景下以使用排放交易系统(ETS)为优先，在未来的情景下以使用可交易的绿色证书(TGC)为优先。该省的化纤行业在未来实现碳中和时，建议有计划地采取一些碳减排措施，如使用清洁燃料和生产电气化。这将有助于防止未来高昂的ETS成本，约为15-23亿元每年，占行业年利润的约10%-15%。

以上述为主要内容，撰写英文小论文一篇并已发表在SCI(1区top)期刊，形成专利一项并申请发明专利。

(2) 化纤企业分布式光储系统容量配置优化研究

化纤企业生产用电量大，通过部署分布式光储系统可以提高清洁电力使用比例，减少碳排放。当前分布式可再生发电及储能系统的容量配置研究，通常以经济性为目标，结合属地资源、电价等因素配置系统容量，但化纤企业存在一些特征，如参与碳交易体系、生产用能计划可调等，为探究这些影响因素对企业光储系统容量配置的影响，开展了化纤企业分布式光储系统容量配置优化研究。

综合运用能源系统优化和优化算法的相关知识，建立了一个适用于化纤企业场景的光储系统容量配置优化模型；该模型集成了光伏发电效率模型和储能电池荷电状态和健康寿命状态更新模型以进行系统配置优化，同时考虑了制造业企业即将纳入碳排放权交易体系的未来趋势，能够量化分析不同碳价格下碳排放成本对系统容量配置的影响，并结合化纤企业负荷灵活可调的特点，能够量化分析用户负荷优化管理对系统容量配置的影响。

分布式光储系统运行的基本逻辑是光伏系统发电将优先用于维持生产，然后储能系统在低电价及光伏出力大于生产需求时进行充电，在高电价时段放电用于维持生产。基于上述基本运行逻辑，提出了一个三层优化模型；模型的第一层将用于优化储能设备的24小时运行策略，同时计算储能系统相应的运行寿命，通过建立非线性整数规划模型并调用SCIP求解器进行求解。模型的第二层将用于优化用户的年综合成本，其中结合了在前一层中确定的储能设备的运行寿命，通过粒子群算法求解。模型的第三层的将用于优化用户负荷，考虑电价政策和光伏容量的发电量来的调整优化用户的用电负荷，通过建立非线性整数规划模型并调用SCIP求解器进行求解。

模型能够实现输入负荷曲线、气象条件、设备参数和碳排放价格，输出企业最佳的光伏储能配置容量，以及优化后的负荷曲线。以某化纤制造企业为案例，通过三个递进的情景进行结果讨论，得到以下主要结论：

a) 不考虑碳排放成本和负荷管理的情景(情景1)。这时对于该化纤制造企业最佳的光伏系统安装容量是受区域限制的最大允许容量。而储能系统在不同的光伏安装容量变化下展现了不同的最优安装容量和功率。与基础情景相比，企业的年度碳排放减少1832.27

tCO₂, 总成本降低约12.73%, 系统的投资回报期约为13.74年。

b) 考虑了碳排放成本的情景(情景2)。当考虑碳排放成本时, DPVES系统减少的碳排放能够降低用户综合成本。在高碳价格下, 企业的年度成本较基础情景减少了21.07%, 系统的投资回报周期改善到了9.42年。然而, 碳价格的提高增加了储能系统的全生命周期和能量损失两部分碳排放的成本, 影响了其经济可行性。因此, 在高碳价格下, 最优储能配置相较于情景1减少了24.51%。

c) 考虑了碳排放和负荷管理策略的情景(情景3)。该情景模拟了企业通过负荷管理策略实现负荷的转移, 这些策略能够替代储能系统的功能, 导致储能系统的配置进一步减少。相比情景2, 负荷管理在低碳价格情景下减少储能容量的46.45%, 将系统的回本期减少了3.57年; 在高碳价格情景下, 减少储能系统容量的39.31%, 将系统的回本期减少了2.21年。结果同时强调了优先考虑负荷管理策略的重要性, 特别是在低碳价格环境下, 因为它们在减少储能设备需求方面提供了实质性的帮助, 并产生了更为显著的经济效益。

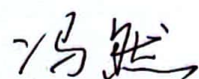
以上述部分为内容, 撰写英文论文一篇, 投稿至SCI期刊, 截至目前处于二审阶段。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
A machine-learning assisted multi-cluster assessment for decarbonization in the chemical fiber industry towards net-zero: a case study in a Chinese province	TOP期刊	2023年11月01日	Journal of Cleaner Production	1/4	SCI期刊收录
一种基于聚类算法和机器学习的工业行业能源消耗量预测方法及系统	发明专利申请	2023年12月19日	申请号: 202311752109.6	2/4	
基于企业聚类的某省份化纤行业节能减碳潜力分析	核心期刊	2023年08月14日	环境污染与防治	4/7	已录用

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 84 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 82 分(要求80分及以上)
本人承诺	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名： </p>	

浙江工业大学研究生学院

攻读硕士学位研究生成绩表

学号: 22160031	姓名: 冯然	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 能源动力	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 24.0学分	已获得: 24.0学分		入学年月: 2021-09								
学位证书号: 1033532024602133	毕业证书号: 103351202402600359		授予学位: 能源动力硕士								
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2021-2022学年秋季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课	2021-2022学年冬季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课
2021-2022学年秋季学期	储能原理		2.0	88	专业学位课	2021-2022学年春季学期	储能器件与装备		2.0	89	专业学位课
2021-2022学年秋季学期	储能材料		2.0	86	专业学位课	2021-2022学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	84	公共学位课
2021-2022学年秋季学期	中国特色社会主义理论与实践研究		2.0	82	公共学位课	2021-2022学年夏季学期	产品研发中的数值模拟技术		2.0	86	专业选修课
2021-2022学年冬季学期	工程伦理		2.0	90	公共学位课	2021-2022学年夏季学期	储能系统及应用		2.0	84	专业学位课
2021-2022学年秋季学期	研究生论文写作指导		1.0	85	专业学位课	2021-2022学年春季学期	优化算法		3.0	90	专业选修课
2021-2022学年冬季学期	制冷与低温系统计算机分析		2.0	88	专业学位课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制 (通过、不通过), 两级制 (及格、不及格), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。

2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章: (00)

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2024-04-02

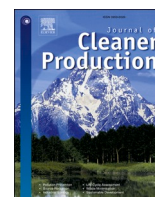
The screenshot shows a web browser displaying a ScienceDirect article page. The browser's address bar shows the URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623031232>. The page header includes the ScienceDirect logo, 'Journals & Books', a search bar, and 'Register' and 'Sign in' buttons. Below the header, there are navigation options: 'Access through your institution' and 'Purchase PDF'. The main content area features a sidebar on the left with 'Article preview' options: Abstract, Introduction, Section snippets, References (48), and Cited by (1). The central part of the page displays the article title: 'A machine-learning assisted multi-cluster assessment for decarbonization in the chemical fiber industry toward net-zero: A case study in a Chinese province'. Below the title, the authors are listed: 'Ban Feng^a, Xu Xu^c, Zi-Tao Yu^{a,b}, Qingyana Lin^{a,b}'. There are options to 'Show more', 'Add to Mendeley', 'Share', and 'Cite'. The DOI is provided as <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138965>. A 'Highlights' section contains two bullet points: 'Industry energy consumption and CO₂ emission prediction based on a hybrid model assisted by machine learning' and 'Comprehensive analysis of the industry's energy efficiency improvement'. On the right side, there is a 'Recommended articles' section with three article titles: 'Synergistic Co-liquefaction of waste plastic express bags and low-rank coal based on...', 'Preparation of high-strength and degradable films from waste soft tissue b...', and 'Syngestrical reduction of PM and NO formation in preheating co-firing of coal...'. A 'FEEDBACK' button is located at the bottom right of the article content area.

[A machine-learning assisted multi-cluster assessment for decarbonization in the chemical fiber industry toward net-zero: A case study in a Chinese province - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623031232)



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

A machine-learning assisted multi-cluster assessment for decarbonization in the chemical fiber industry toward net-zero: A case study in a Chinese province

Ran Feng ^a, Xu Xu ^c, Zi-Tao Yu ^{a,b}, Qingyang Lin ^{a,b,*}

^a State Key Lab of Clean Energy Utilization, State Environmental Protection Center for Coal-Fired Air Pollution Control, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China

^b Key Laboratory of Clean Energy and Carbon Neutrality of Zhejiang Province, Jiaxing Research Institute, Zhejiang University, 1300 Dongshengxilu Road, Jiaxing, 314031, China

^c College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, 310018, China

ARTICLE INFO

Keywords:

Industrial decarbonization
Energy efficiency
Chemical fiber industry
CO₂ emission reduction potential
Carbon trading scheme
Carbon accounting

ABSTRACT

China has pledged to achieve carbon neutrality by 2060, requiring deep decarbonization in its manufacturing sector, aligning with sustainable development goals such as climate action and responsible production. Notably, China's chemical fiber industry contributes over 70% of global production, facing challenges in net-zero transition due to differences in enterprise scale and energy efficiency. This study proposed an assessment framework for the decarbonization pathway for this type of manufacturing industries, use the chemical fiber industry as a case study. A hybrid model based on machine learning was introduced to predict the industry's energy consumption, while multiple-cluster standards were established to assess energy efficiency improvement potential. Monte Carlo simulation was employed to analyze the carbon trading impact on industry decarbonization. Using a Chinese province's chemical fiber industry as a case, results suggest its carbon emissions could reach 1.58×10^7 tCO₂ by 2030, and energy efficiency enhancements could reduce emissions by approximately 22.6%. Achieving carbon neutrality would cause the industry to reduce profits by approximately 10%~15% on higher-priced emissions trading system (ETS), unless additional carbon reduction techniques are adopted. This assessment framework can be applied to study decarbonization transitions in other manufacturing industries.

1. Introduction

The increase in greenhouse gas emission, especially CO₂ emissions, has become an environmental concern worldwide (Du et al., 2022). The world's major carbon emitting nations and organizations, for example, the US, EU, China and India that have contributed 58% of the global CO₂ emissions in 2021 (IEA, 2022a). Decarbonization in all sectors globally is essential to react on the climate action and responsible production to meet the Sustainable Development Goals (SDGs). Manufacturing sector is one of the bases that sustain the world economy, as well as a major CO₂ emitter (Naudé et al., 2012). Recently, numerous international organizations have made substantial progress in formulating carbon trading schemes as a means of regulating CO₂ emissions which has a crucial impact on the net-zero transition for the manufacturing sector (Maestre-Andrés et al., 2021; Wolde-Rufael et al., 2021). Since the CO₂

emissions of manufacturing sector come primarily from energy consumption, the increased energy-use efficiency and the access to clean and renewable energy are critical to ensure the decarbonization, as well as sustainable consumption and production patterns of manufacturing sector.

China is currently the world's largest manufacturer and exporter that contributes approximately 30% of global manufacturing output in 2021 (World Bank, 2020). The decarbonization in China's manufacturing sector is an accelerator to support sustainable development worldwide. In particular, chemical fiber industry in China contributes more than 70% of global chemical fiber products since 2011 (Lin et al., 2015) and contributes over 4.7% of China's total energy consumption and associated emission in 2020 (National Bureau of Statistics of China, 2021). The deep decarbonization of this industry is crucial to reduce the CO₂ emission while providing sustainable chemical fiber products worldwide. However, for chemical fiber industry in China, the energy scale

* Corresponding author. State Key Lab of Clean Energy Utilization, State Environmental Protection Center for Coal-Fired Air Pollution Control, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China.

E-mail address: qingyang.lin@zju.edu.cn (Q. Lin).

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138965>

Received 4 August 2023; Received in revised form 16 September 2023; Accepted 19 September 2023

Available online 21 September 2023

0959-6526/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

《SCI-EXPANDED》收录、《JCR》期刊影响因子、分区及中科院期刊分区证明

经检索《Web of Science》、《Journal Citation Reports (JCR)》及《中国科学院文献情报中心期刊分区表》数据库,《Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)》收录论文及其期刊影响因子、分区情况如下。(检索时间:2023年12月12日)

第1条,共1条

标题:A machine-learning assisted multi-cluster assessment for decarbonization in the chemical fiber industry toward net-zero: A case study in a Chinese province

作者:Feng, R(Feng, Ran);Xu, X(Xu, Xu);Yu, ZT(Yu, Zi-Tao);Lin, QY(Lin, Qingyang);

来源出版物:JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION 卷:425 文献号:138965 提前访问日期:SEP 2023

DOI:10.1016/j.jclepro.2023.138965 出版年:NOV 1 2023

入藏号:WOS:001085204200001

文献类型:Article

地址:

[Feng, Ran; Yu, Zi-Tao; Lin, Qingyang] Zhejiang Univ, State Environm Protect Ctr Coal Fired Air Pollut C, State Key Lab Clean Energy Utilizat, Hangzhou 310027, Peoples R China.

[Yu, Zi-Tao; Lin, Qingyang] Zhejiang Univ, Jiaxing Res Inst, Key Lab Clean Energy & Carbon Neutral Zhejiang Pro, 1300 Dongshengxilu Rd, Jiaxing 314031, Peoples R China.

[Xu, Xu] China Jiliang Univ, Coll Metrol & Measurement Engn, Hangzhou 310018, Peoples R China.

通讯作者地址:

Lin, QY (corresponding author), Zhejiang Univ, State Environm Protect Ctr Coal Fired Air Pollut C, State Key Lab Clean Energy Utilizat, Hangzhou 310027, Peoples R China.

电子邮件地址:qingyang_lin@zju.edu.cn

IDS号:U5LB5

ISSN:0959-6526

eISSN:1879-1786

期刊《J CLEAN PROD》2022年的影响因子为11.1,五年影响因子为11.0。

期刊《J CLEAN PROD》2022年的JCR分区情况为:

Edition	JCR® 类别	类别中的排序	JCR 分区
SCI	ENGINEERING, ENVIRONMENTAL	8/55	Q1
SCI	ENVIRONMENTAL SCIENCES	22/275	Q1
SCI	GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY	8/46	Q1

期刊《Journal of Cleaner Production》2022年升级版的中科院期刊分区情况为:

刊名	Journal of Cleaner Production		
年份	2022		
ISSN	0959-6526		
	学科	分区	Top 期刊
大类	环境科学与生态学	1	是
小类	ENVIRONMENTAL SCIENCES 环境科学	1	-
小类	GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY 绿色可持续发展技术	1	-
小类	ENGINEERING, ENVIRONMENTAL 工程: 环境	2	-

注:

1. 期刊影响因子及分区情况最新数据以 JCR 数据库、《中国科学院文献情报中心期刊分区表》最新数据为准。
2. 以上检索结果来自 CALIS 查收查引系统。
3. 以上检索结果均得到委托人及被检索作者的确认。



教育部科技查新工作站 (Z09)

检索人 (签章): 李佳

2023年12月12日



310013

浙江省杭州市西湖区古墩路 701 号紫金广场 C 座 1506 室 杭州求是
专利事务所有限公司
万尾甜(0571-87911726-819)韩介梅(0571-87911726)

发文日:

2023 年 12 月 19 日



申请号: 202311752109.6

发文序号: 2023121902329470

专利申请受理通知书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 2023117521096

申请日: 2023 年 12 月 19 日

申请人: 浙江大学

发明人: 林青阳, 冯然, 徐旭, 俞自涛

发明创造名称: 一种基于聚类算法和机器学习的工业行业能源消耗量预测方法及系统
经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

权利要求书 1 份 3 页, 权利要求项数: 8 项

说明书 1 份 13 页

说明书附图 1 份 4 页

说明书摘要 1 份 1 页

专利代理委托书 1 份 2 页

发明专利请求书 1 份 5 页

实质审查请求书 文件份数: 1 份

申请方案卷号: 万-231-293

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。

2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。

审查员: 自动受理

联系电话: 010-62356655

审查部门: 初审及流程管理部



录用证明

尊敬的**丁历威**作者：

经审稿专家审查和本刊编辑部的最终审定，您的论文“基于企业聚类的某省份化纤行业节能减碳潜力分析”已被本刊印刷版录用。

特此证明。

全部作者姓名：丁历威、吕洪坤、韩高岩、冯然、郑梦莲、俞自涛、
林青阳

浙江《环境污染与防治》杂志社

2023年08月14日



第一作者：丁历威，男，1979年生，硕士，高级工程师，主要从事节能减排方面的研究工作。*通讯作者。
*国网浙江省电力有限公司科技项目（No.B311DS221007）。

基于企业聚类的某省份化纤行业节能减碳潜力分析*

丁历威¹ 吕洪坤¹ 韩高岩¹ 冯然² 郑梦莲² 俞自涛² 林青阳^{2#}

(1.国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310010; 2.浙江省清洁能源与碳中和重点实验室, 浙江大学嘉兴研究院, 浙江 嘉兴 314031)

摘要 化纤行业在“双碳”战略背景下面临着巨大的节能减碳压力，需要分析行业的能耗现状与节能减碳潜力。以中国化纤行业第一大省的146家化纤企业为研究对象，利用企业能耗数据分析行业的能耗总体特征，基于聚类算法分类对标计算行业的节能减碳潜力。结果表明，该省化纤行业节能潜力可占总能耗的24.6%，减碳潜力占总碳排放量的22.9%；大型企业的碳排放建议以减少原煤、热力及天然气消耗为主，中小企业的碳排放建议以减少电力消耗为主。最后总结了化纤行业的重点用能系统及其能效提升方法，给不同类型的企业节能降碳提供技术参考。

关键词 化纤行业 能耗特征 减碳潜力 数据挖掘 聚类算法

Analysis of energy saving and carbon reduction potential of chemical fiber industry in a province based on enterprise clustering DING Liwei¹, LYU Hongkun¹, HAN Gaoyan¹, FENG Ran², ZHENG Menglian², YU Zitao², LIN Qingyang². (1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou Zhejiang 310010; 2. Laboratory of Clean Energy and Carbon Neutrality of Zhejiang Province, Jiaxing Research Institute, Zhejiang University, Jiaxing Zhejiang 314031)

Abstract: The chemical fiber industry is under great pressure to save energy and reduce carbon in the context of the "double carbon" strategy, and it is necessary to analyze the current energy consumption and energy saving and carbon reduction potential of the industry. Taking 146 chemical fiber enterprises in China's largest chemical fiber province as the target, we analyzed the overall energy consumption characteristics of the industry using enterprise energy consumption data, and calculated the energy saving and carbon reduction potential of the industry based on the clustering algorithm. The results show that the energy saving potential of the chemical fiber industry in the province can account for 24.6% of the total energy consumption and 22.9% of the total carbon emission reduction potential; the carbon emission of large enterprises is recommended to reduce raw coal, heat and natural gas consumption, while the carbon emission of small and medium-sized enterprises is recommended to reduce electricity consumption. Finally, the key energy-using systems of the chemical fiber industry and their energy efficiency improvement methods are summarized to provide technical references for different types of enterprises to save energy and reduce carbon.

Keywords: chemical fiber industry; energy consumption characteristics; energy saving potential; data mining; clustering algorithm;

温室气体排放是造成全球变暖、极端天气频发等全球气候变化的主要原因之一。作为碳排放大国，中国提出了2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的双碳战略目标^[1]。同时，碳税作为价格型的碳定价方式，因其推进能源转型与气候变化治理的独特作用，在全球得到日益重视和广泛应用^[2]。我国的化纤行业贡献了全球70%以上的化纤产品，消耗了纺织行业22.6%的能源^[3]，但与发达国家相比仍存在能源利用效率低、技术装备落后等问题^[4]。化纤企业数量多，两极分化特征明显^[5]。据调研，化纤企业间能耗强度差距最大达10倍以上，用能效率差距明显，行业的节能减碳空间较大。因此，其节能减碳工作对

于中国实现“双碳”目标、从容应对国际碳税机制具有重要意义。

能效提升是节能减碳的关键，国内外对行业能效提升潜力的研究颇多。部分研究通过投入产出等方法将能耗分解成多个因素，通过因素变化分析行业节能成本。LI 等^[6]应用基于投入产出法的 DEA 模型估算了中国三类行业的节能减排潜力与方法；HUANG 等^[7]应用节能供应曲线和边际减排成本曲线分析造纸行业节能减碳的各种选择。这种方式将官方发布的行业能耗数据作为主要依据，数据可挖掘性较低，难以分析行业具体的节能潜力。部分研究通过对标能效标准值计算具体行业的能效提升潜力。LU 等^[8]采用对标单位总产值能耗的方法分析中国台湾省工业行业的节能潜力；SHABBIR 等^[9]通过能效对标的方法对造纸行业的能效提升潜力进行评估。中国部分地区发布了化纤行业的产品能耗限额^[10]，用于企业评价自身的生产水平，但产品的能效指标用于行业整体节能潜力的计算比较困难。根据《综合能耗计算通则》（GB/T 2589—2020），单位工业总产值能耗可以也作为衡量企业能效的指标。由于化纤企业的生产规模和能效水平参差不齐，引入单一的单位工业总产值能耗标准值难以有效计算行业的节能潜力，鼓励全行业的节能提效与低碳转型。如果能将能耗规模和强度相似化纤企业分为一类，建立一个分企业类别分能源类别的单位工业总产值能耗对标体系，那么就能够充分考虑化纤企业生产规模与能效水平的差距，更详细有效地分析行业内的节能减碳潜力。

我国的化纤产地主要集中在东部沿海一带^[11]，其中东部沿海某典型化纤大省的化纤产量占全国总产量 45% 以上^[12]。本研究以该省 146 家规模以上化纤企业作为研究对象，基于聚类算法量化分析化纤行业分能源类别的节能减碳潜力；总结化纤行业的节能提效关键技术，根据不同类别企业的节能减碳潜力侧重点，提供相应的节能提效技术。

1 研究方法

1.1 能耗及碳排放特征计算方法

1.1.1 能耗及碳排放结构计算方法

行业的能耗结构由企业能耗数据求和得到。企业的综合能耗可以通过式（1）计算；企业的综合能源效率可以通过单位总产值综合能耗（标煤）来衡量，计算方法见式（2）。

$$EC = \sum_i EC_i = \sum_i f_i \cdot C_i \quad (1)$$

$$EI = EC / G \quad (2)$$

式中： EC 是综合能源消耗量，t，以标准煤计； EC_i 是第 i 类能源的折标煤量，t，以标准煤计； EI 是能源强度，t/万元； G 是工业总产值，万元； f_i 是 i 类能源的标煤折算系数，取值参照 GB/T 2589—2020； C_i 是 i 类能源消耗量。 f_i 和 C_i 的单位根据实际情况确定。表 1 列出了化纤行业使用能源的标煤折算系数。

表 1 标煤折算系数

Table 1 Conversion factors of standard coal for different energy sources.

能源类别	标煤折算系数
电力 (t/10 ⁴ kW · h)	1.229
原煤 (t/t)	0.714
天然气 (t/10 ⁴ Nm ³)	13.3
热力 (t/GJ)	0.034 1

工业部门的碳排放最大来源是能源消耗，其占比通常达到 70% 以上^[13]。本研究行业的碳排放计算边界是行业内企业使用能源产生直接和间接碳排放，计算方法采用排放系数法计算。碳排放系数来自《中国温室气体排放系数集（2022）》^[14]（表 2）。行业碳排放结构由企业的碳排放量求和得到，企业碳排放量计算公式见式（3）。

$$CE = \sum_i CE_i = \sum_i t_i \cdot C_i \quad (3)$$

式中： CE 是碳排放量，t，以 CO_2 计； CE_i 是第 i 类能源的碳排放量，t，以 CO_2 计； t_i 是 i 类能源的碳排放系数，单位见表 2； i 代表能源的种类。

表 2 温室气体排放系数

Table 2 Carbon emission factors for different energy sources.

能源类别	排放系数
电力 (t/10 ⁴ Kwh)	5.81
原煤 (t/t)	1.92
天然气 (t/10 ⁴ Nm ³)	21.6
热力 (t/GJ)	0.06

1.1.2 企业能耗分布及离散度

本文使用变异系数作为用能水平离散度的量化指标^[15]。行业内企业用能水平的离散程度可以通过式 (4) 计算。

$$CV_{p,y} = \frac{E_{std,p,y}}{E_{mean,p,y}} \quad (4)$$

式中： $CV_{p,y}$ 是变异系数； $E_{std,p,y}$ 是数据标准差； $E_{mean,p,y}$ 是数据平均值； p 代表分析指标的编号； y 代表年份。

1.2 基于聚类算法的化纤行业节能潜力计算方法

1.2.1 归一化处理

数据的归一化处理是数据挖掘的一项基础工作^[16]，企业能耗及碳排放数据数量级大、数据差值大，进行聚类分析时用原始数据会出现算法无法收敛、数据特征模糊的问题。为保证研究的真实性与有效性，采用最值归一化处理，其公式如下：

$$x_{scale} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5)$$

式中： x_{scale} 是样本归一化后的值； x 是样本真实值； x_{min} 是样本最小值； x_{max} 是样本最大值。

1.2.2 基于聚类算法的行业节能减碳潜力计算

由于化纤等行业的产品多样、企业生产效率差异较大，对企业的用能水平进行分类能够更有效的计算行业节能潜力。聚类算法是数据挖掘中数据划分和数据分组的重要方法^[17]，其中 K-means 因为其结构简单、收敛迅速等优势是常用的聚类算法之一。在能源领域，张忠华等^[18]基于 K-means 算法对省级碳排放进行分类研究；KAPOUSOUZ 等^[19]通过 K-means 算法对 1985-2015 年美国五十各州的人均能耗与水耗进行分析。本研究采用相比 K-means 算法改进了质心初始化流程的 K-means++ 算法来进行企业基于用能水平的聚类。

聚类过程中，每个企业都作为一个样本点，企业的用能水平通过能耗总量和能耗强度两个指标决定，所以每个样本点的维数为 2。根据 K-means++ 算法原理，本研究中对化纤企业聚类的优化目标如式 (6)、式 (7) 所示。

$$u_n = \frac{1}{|L_n|} \sum_{s \in L_n} s \quad (6)$$

$$\min D = \sum_{n=1}^K \sum_{s \in L_n} \sqrt{\sum_{p=1}^2 (s_p - u_{n,p})^2} \quad (7)$$

式中： u_n 是第 n 类企业合集 L_i 的均值向量，也称质心； L_n 是第 n 类企业的合集； s 是归一化后的样本点，每个样本点代表一个企业，存在代表能耗总量和能耗强度的两个分量； D 是优化目标，即所有样本点到其所在类的质心的欧氏距离之和； s_p 是该样本点代表企业第 p 个指标的分量； $u_{n,p}$ 为第 n 类企业的质心的第 p 个指标的分量； K 为分类数； n 代表企业类别编号。在对化纤企业聚类时，聚类数 K 从 2 开始递增，直到各类别内，企业的指标之差均小于 0.25 为止。基于聚类结果，各类企业的能源消耗强度标准取能耗强度低的前 50% 企业的各类能源平均强度作为对标值，并对标计算行业节能减碳潜力。计算方法如下：

$$E_{redu} = \sum_n \sum_m \max[(EI_{n,m} - EI_{std,n}), 0] * G_{n,m} \quad (8)$$

式中： E_{redu} 为行业节能潜力，t，以标准煤计； $EI_{n,m}$ 为第 n 类第 m 个企业的能耗强度，t/万元； $EI_{std,n}$ 为第 n 类企业的能耗强度对标值，t/万元； $G_{n,m}$ 为第 n 类第 m 个企业的工业总产值，万元； m 代表同类别中企业的编号。在使用企业总能耗强度对标计算时，总能耗强度与对标值之间的差距，可进行如下分解：

$$EI_m - EI_{std} = \sum_i (EI_{m,i} - EI_{std,i}) \quad (9)$$

式中， EI_m 是企业能耗强度，t/万元； EI_{std} 是同类对标能耗强度对标值，t/万元； $EI_{m,i}$ 是第 i 类能源的消耗强度，t/万元； $EI_{std,i}$ 对是第 i 类能源的消耗强度对标值，t/万元。本研究采用分能源品类对标，在总能耗强度高于标准值的情况下，仅计算能源消耗强度高于标准值的能源类别。

1.3 化纤行业能效提升方法

由于企业的设备级用能数据目前难以在行业层面实现汇总分析，本研究总结了化纤行业工艺、设备、系统等层面的能效提升方法，为行业层面推广节能提效工作提供技术参考。

化学纤维生产工艺流程可以总结为聚酯工艺，熔体直纺工艺和加弹性工艺，各工艺流程的能质类型如图 1 所示。其中压缩空气由空气压缩机生产后送至车间，导热油由锅炉（原煤、天然气）或热力加热后送至车间，联苯蒸汽由电加热炉产生并送至车间。

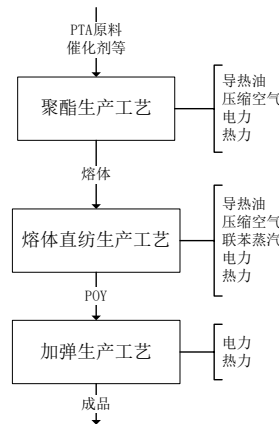


图 1 化纤生产工艺流程

Fig.1 Production process of chemical fiber enterprises.

根据化纤企业的能源管理数据^[20]，企业重点能耗设备为空气压缩机、生产成套设备以及空调系统。其中空气压缩机消耗的电力占企业总耗电量的 40% 左右，是重点用电设备；

生产成套设备消耗企业几乎全部的原煤（或天然气）、约 35%的电力和 20%的热力；空调系统消耗了企业约 80%的热力，20%的电力。所以化纤企业能效提升的关键在于提高空气压缩机效率、生产成套设备效率、锅炉的热效率以及空调系统的运行效率。适用于化纤行业的具体节能提效技术^[21]在表 3 中列出。

表 3 化纤企业能效提升技术

Table 3 Energy efficiency improvement technology for chemical fiber enterprises.

系统	能效提升技术
生产工艺	用轻量碳强化纺纱罐代替钢强化纺纱罐；纺纱机的纺丝罐之间安装铅隔板；用真空高压蒸汽喷射器代替真空低压蒸汽喷射器进行粘胶液脱泡；生产粘胶长丝时，干燥机使用换热器回收排出的蒸汽余热；优化倍捻机的气球设定；溶液纺丝高速纱线制造设备；用高速多线程纱线制造设备生产尼龙和聚酯长丝；降低车间高度，从而减少空调与加湿系统的能耗；提高假捻变形机的电机效率
压缩空气系统	对系统完整评估后，考虑淘汰落后设备；保持压缩机电机的润滑与清洁；检查压缩机皮带磨损情况，及时更换皮带；更换空气润滑油分离器；监控压缩机运行情况：主要管路压力、冷却系统温度、压缩空气使用流量、干燥机露点温度、用电量和运行小时数等；减少压缩空气在管路、压力调节器等处的漏气；避免设备在低负载下运行，提高设备运行效率；回收空气压缩机产生的余热，用于锅炉补水预热、水加热等过程
电机系统	选用能效等级高的电机；优化电机负载，更换运作低于 50%额定负载的电机；降低电压不平衡；定期润滑与校准；观测电机运行温度、振动等参数，即使发现故障；安装变频驱动器为电机运转调配合适的运行速度；通过降低电机关机时间、在交流电路安装电容器等方法修正功率因子
风机系统	避免送风管道的泄露；定期检验风机皮带磨损，及时更换；定期清洗风机的叶片；定期润滑轴承；检查气流设计是否合理，注意风道进出口拐角；选择合适的除尘设备；监控压力，用于控制系统流量；及时更换高效变频电机
泵系统	选取合适大小的泵，避免使用节流阀；及时更换损坏的叶轮；定期更换润滑油；定期检查和更换机械密封；监控运行：泵的磨损情况，流量与压力，扬程变化与升温，电流与功率，系统污垢情况等；更换匹配特定压力头和流速功能的高效泵，保证泵大部分时间以最高速度运转；对于过热的叶轮，更换叶轮大小或降低齿轮比里从而降低泵的流速和压力；检查泵的密封性；采用合适的管路尺寸，减少流体因摩擦造成的能量损失
锅炉系统	定期维护热媒锅炉；燃烧室的磨损修复，管道结垢清理，燃烧室结垢清理；检测锅炉的烟道温度和成分，优化燃料空气混合比例，避免过量空气；减少烟道、锅炉中的泄露，增加传递给导热油的热量；改进锅炉的隔热性，保证壳体损耗在 1%以下；根据锅炉类型、系统压力等选择合理的排污率；回收利用烟气余热；提高导热油输送管道的隔热性；减少导热油输送管道的泄露现象

2 化纤行业节能减碳潜力分析

2.1 化纤行业能耗特征

2.1.1 能耗及碳排放结构

通过式（1）~（3）计算历年的综合能耗量及碳排放量，得到的历年化纤行业能耗及碳排放结构如图 2~3 所示。该省份化纤行业能耗量总体保持每年 5%左右的增速，仅 2020 年受到疫情影响有所下降。能耗结构以电力为主，原煤为辅，天然气和热力作为补充，其中外购的电力和热力占总能耗量的 52%以上，这与刘世扬等^{[3]11}给出的全国化纤行业能源结构相似。

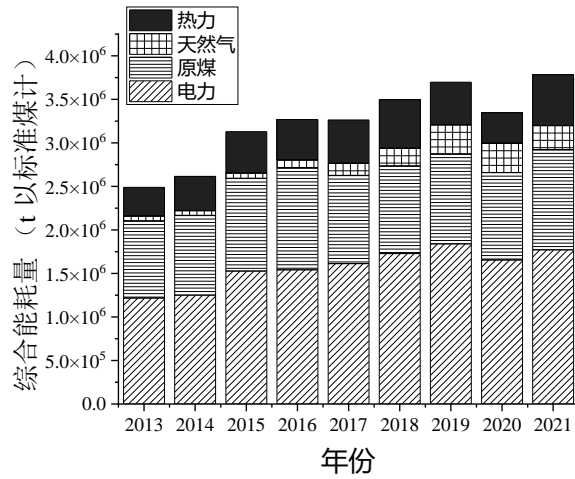


图2 化纤行业能耗结构

Fig.2 Structure of energy consumption in the chemical fiber industry.

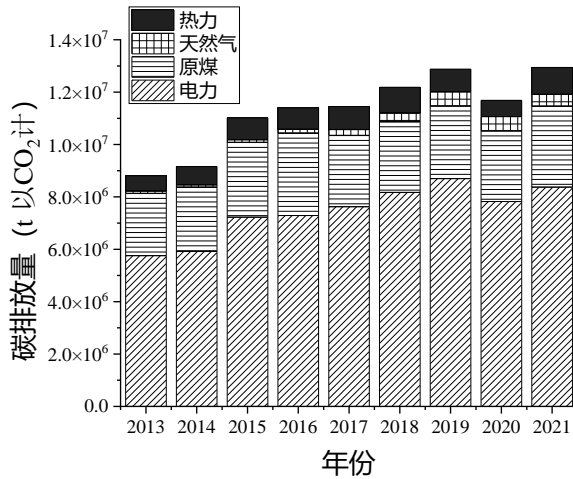


图3 化纤行业碳排放结构

Fig.3 Carbon emission structure of chemical fiber industry.

2.1.2 能耗强度离散度

通过式(4)计算化纤行业企业能耗强度的变异系数,结果如图4所示。该省化纤企业的年平均能耗强度波动较大,于2016及2020年达到峰值,表明行业在发展规模的同时并未注意提升企业的能效;年变异系数较大,表明行业内能效差距没有随行业发展缩小。

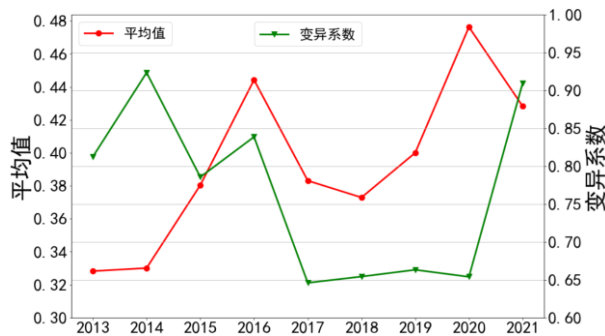


图4 化纤企业能耗强度平均值及变异系数

Fig.4 Average and coefficient of variation of energy consumption intensity of chemical fiber enterprises.

2.2 化纤行业节能减碳潜力

2.2.1 化纤企业用能水平聚类

将 2021 年的化纤企业能耗数据进行聚类，聚类指标为能耗规模与能耗强度，类别数量为 7。聚类结果如表 4、图 5 所示。根据聚类结果，这里定义企业能耗规模大于 2.47×10^5 t（以标准煤计）的为 大，大于 7.49×10^4 t 为中，其余为小；企业能耗强度低于 0.335 t/万元为低，低于 0.541 t/万元为中，其余为高。不难发现，能耗规模中上的企业数量少，但大部分保持较低的能耗强度；而规模小的企业数量众多，能耗强度差距较大。在后续节能潜力计算中，1、2 类企业能耗规模远超同行水平，归为一类；6、7 类别的企业能耗强度均偏高，归为一类。

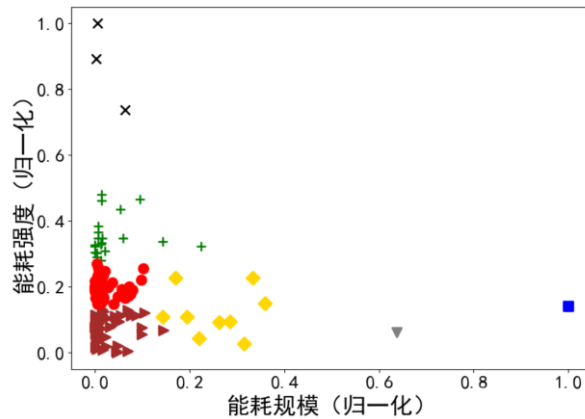


图 5 基于能耗规模和强度的化纤企业聚类结果

Fig.5 Clustering results of chemical fiber enterprises based on the scale and intensity of energy consumption.

表 4 各类企业的能耗规模和强度

Table 4 Energy consumption scale and intensity of each cluster of enterprises

类别	形状	能耗规模	能耗强度
1、2	▼、■	大	低
3	◆	中	中
4	▶	小	低
5	●	小	中
6、7	+、*	小	高

2.2.2 化纤行业节能减碳潜力分析

根据 2021 年的企业能耗数据计算化纤行业的节能潜力。样本内化纤企业年总用能量为电力 1.44×10^6 万千瓦时、热力 1.71×10^7 吉焦、天然气 2.09×10^4 万立方米、原煤 1.61×10^6 吨，折标煤共 3.78×10^6 吨。通过式 (8) 分类对标计算化纤行业节能潜力，各类别企业的对标标准如表 5 所示。可以发现 1~3 类中大型企业能耗强度对标值均较低，说明行业内规模的企业总体的用能效率是较高的。4~7 类都属于小型企业，但能耗强度对标值差异明显，说明小规模化纤企业的用能效率差异明显。

表 5 各类企业的标准能耗强度（吨标准煤/万元）

Table 5 Standard energy intensity for each type of enterprise (tce/10⁴yuan).

类别	标准能耗强度	标准耗电强度	标准耗热强度
----	--------	--------	--------

1、2	0.241	0.0936	0.147
3	0.245	0.0948	0.150
4	0.210	0.109	0.101
5	0.393	0.278	0.115
6、7	0.603	0.345	0.258

计算得到化纤行业年度节能潜力共计 9.31×10^5 吨标准煤，占总能耗的 24.62%。如图 6 所示，在行业节能潜力中，数量较少的大中型企业（第 1~3 类）企业占 44.1%；数量较多的小规模企业（4~7 类）企业占 55.9%。化纤行业内企业规模差距很大，在行业的节能提效工作中，应该优先关注少数的中大型企业，但是也不能忽视数量众多的小规模企业的节能潜力。

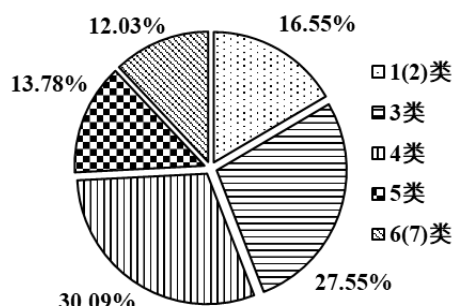


图 6 化纤行业节能潜力组成

Fig.6 Composition of the energy-saving potential of the chemical fiber industry.

化纤行业总节热潜力为 5.85×10^5 吨标准煤，占总热耗的 29.13%，高于整体节能潜力百分比；化纤行业总节电潜力为 2.81×10^5 万千瓦时，占总耗电量的 19.53%，低于整体节能潜力百分比，化纤行业内的节能潜力中节热潜力相对较大。结合表 6 中各类别企业节能潜力组成，可以发现化纤行业的大型企业（1、2 类）节能潜力以节约热力为主，中规模企业（3 类）的节热与节电都存在相当大的潜力，而不同类型小型企业节能潜力不同。能耗强度较低的小型企业（4 类）在电力和热力消耗上都有继续节约的空间；能耗强度较高的小型企业（5 类）节电潜力较高，需要首先关注电力使用的效率；能耗强度偏高的小型企业（6、7 类）则是节热潜力较高，需要首先关注热力使用的效率。

表 6 各类别企业节能潜力组成（吨标准煤）

Table 6 Energy saving potential of various clusters of enterprises (tce).

类别	节能潜力	节电潜力	节热潜力
1、2	154093.34	2036.61	152056.73
3	256583.69	123186.03	133397.66
4	280216.43	124714.05	155502.38
5	128313.79	81379.98	46933.81
6、7	112063.97	14601.16	97462.81

本研究假设原煤、热力及天然气的节热潜力分布与其能耗量分布成正比，则可以计算得到化纤行业的减碳潜力为 2.97×10^6 吨二氧化碳，占行业年碳排放总量的 22.91%。各类别企业的分能源类别减碳量见表 7。值得注意的是，企业数量较少的 1~3 类中大型企业的减碳潜力达 1.24×10^6 吨二氧化碳，占行业总量的 41.84%。1、2 类大型企业的减碳潜力以减少原煤、天然气和热力消耗为主；占该类企业减碳潜力的 97.28%；其余类的中小企业的减碳潜力以减少电力消耗为主，占到这些类别企业减碳潜力总量的 62.29%，不同类别的企业存在不同的减碳潜力侧重点。

表 7 各类企业分能源品类的碳减排潜力（吨二氧化碳）

Table 7 Carbon reduction potential of various clusters of enterprises by energy category (t CO₂ eq).

类别	电力	原煤	天然气	热力	总和
1、2	9627.9	233723.5	34152.9	77551.3	355055.6
3	582352.2	205043.0	29961.9	68034.9	885392.0
4	589575.8	239019.8	34926.8	79308.6	942830.9
5	384717.4	72141.1	10541.6	23937.0	491337.1
6、7	69025.8	149808.2	21890.7	49707.5	290432.3
列汇总	1635299.1	899735.6	131473.9	298539.2	2965047.8

2.3 行业能效提升技术的应用

通过 2.3 的分析,可以得到化纤行业各类别企业在各能源种类现阶段的节能减碳潜力。结合 1.3 中整理的化纤行业能效提升关键技术,可以为各类别企业实现上述节能潜力提供相应技术手段。此处给出的针对不同类型企业的节能措施是针对现阶段能效提升工作的。从行业节能减碳转型长远视角出发,所有企业都应该关注全部的节能提效措施。

对于大型企业(1、2类)和能耗强度偏高的小型企业(6、7类),原煤、天然气和热力的节能减碳潜力较大,可以优先考虑提升加热导热油的锅炉系统的热效率以及生产成套设备的效率。主要的能效提升策略包括提升锅炉及导热油输送管网的隔热性,定期为锅炉除垢,回收锅炉排污和烟气的余热,及时更新先进的化纤生产设备与工艺等。

对于大部分中小型企业(3~5类),电力的节能减碳潜力较大,提升能效可以优先考虑提升压缩空气生产系统的效率以及电机、风机、泵系统的效率。主要的能效提升策略包括减少压缩空气输送管网漏气,避免压缩空气在低负载下运行,回收空压机余热,更换匹配负载容量且能效等级高的电机,加装变频驱动器,监控电机运行参数,避免送风管道漏风,及时为风机系统除尘,监控风机运行参数,更换体积合适且匹配特定压力头和流速的高效泵,避免泵系统使用节流阀,保证泵的机械密封,及时更新先进的化纤生产设备等。

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 该地区化纤行业碳排放以电力为主,过去九年的总量增速在 5%左右;该区域的化纤企业能耗强度波动上升,企业间的能耗强度差异也没有随行业发展而缩小。

(2) 采用基于聚类的多指标能效对标体系计算得到化纤行业节能潜力为总能耗量的 24.62%,化纤行业减碳潜力为 2.97×10^6 t (以 CO₂ 计),占碳排放总量的 22.91%;其中,大型企业以减少原煤、天然气和热力消耗产生的碳排放为主,占该类型企业减碳潜力的 97.28%;中小型企业以减少电力消耗产生的碳排放为主,占该类型企业碳排放潜力的 62.29%。

3.2 建议

(1) 行业内企业规模差距较大,应该优先抓住少数中大型企业的节能减排,但是也不能忽略数量众多的小型企业的节能减排潜力;

(2) 行业内大型企业和部分能耗强度偏高的小型企业的节能减碳工作建议优先关注加热导热油的锅炉系统的效率,包括锅炉的热效率,导热油输送管网的保温性等;同时还需要关注生产设备效率,及时更新高效的生产线设施;

(3) 行业内中小型企业的节能减碳工作建议优先关注压缩空气系统,包括空气压缩机的生产效率、压缩空气的传输管网漏气情况;同时,还需要关注生产设备及空调系统中各类电机、风机及泵的效率,可以通过更换能效等级更高的设备、提高设备运行负载以及

加装变频控制器等手段来实现节能;

(4) 化纤行业通过降低能耗来降低碳排放的潜力有限, 在未来没有行业革命性技术出现的情况下, 需要考虑分布式太阳能发电、碳交易体系等手段来实现碳中和。

致谢

感谢冯彦皓对本研究的帮助。

参考文献:

- [1] 高安娜. “双碳”目标驱动下的中国清洁能源发展优化路径研究[D].镇江:江苏大学,2021.
- [2] 覃盈盈. “双碳”目标下中国碳税开征的逻辑起点、国际借鉴和政策设计[J].西南金融,2022(8):27-42.
- [3] 刘世扬,宁翠娟,刘丽华,等.我国化纤行业低碳发展建议[J].高科技纤维与应用,2022,47(5):9-15.
- [4] 中商情报网.中国化纤行业存在问题及发展前景预测分析[J].纺织检测与标准,2021,7(1):48.
- [5] 化纤行业调整升级:差异化战略和产业链合作[J].浙江经济,2016(17):44-45.
- [6] LI X.Design of energy-conservation and emission-reduction plans of China's industry: evidence from three typical industries[J].Energy,2020,209:118358.
- [7] HUANG Y H, WU J H, LIU T Y.Bottom-up analysis of energy conservation and carbon dioxide mitigation potentials by extended marginal abatement cost curves for pulp and paper industry[J].Energy Strategy Reviews,2022,42:100893.
- [8] LU S M, LU C, TSENG K T, et al.Energy-saving potential of the industrial sector of Taiwan[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,21:674-683.
- [9] SHABBIR I, MIRZAEIAN M, SHER F, et al.Energy efficiency improvement potentials through energy benchmarking in pulp and paper industry[J].Cleaner Chemical Engineering,2022,3:100058.
- [10] DB33/ 683-2019, 涤纶(长、短)纤维单位综合能耗限额及计算方法[S].
- [11] 中国化学纤维工业协会.十四五开局良好,未来压力和风险增加,中国化纤行业2021年运行分析与2022年展望[J].纺织服装周刊,2022(14):13.
- [12] 浙江省经济和信息化厅.省经信厅召开浙江省化纤行业专题座谈会
[EB/OL].(2022-06-10)[2023-06-18].https://jxt.zj.gov.cn/art/2022/6/10/art_1659217_58928676.html.
- [13] 车卫红.我国工业碳源和能源碳源排碳量估算研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [14] 中国城市温室气体工作组(CCG).中国产品全生命周期温室气体排放系数库[E].2022. <http://lca.cityghg.com/>.
- [15] 罗良清,魏和清.统计学[M].北京:中国财政经济出版社,2011.
- [16] LIU L X.Choosing Multiple Parameters for Function Regression Based on SVM[J].Electronics Optics & Control,2013,20(6):50-57.
- [17] 王森,刘琛,邢帅杰.K-means 聚类算法研究综述[J].华东交通大学学报,2022,39(5):119-126.
- [18] 张忠华,王智超,胡杰.全国碳排放及基于 K-means 聚类算法的省级碳排放研究[J].中外能源,2022,27(9):8-15.
- [19] KAPOUSOUZ E, SEYRFAR A, DERRIBLE S, et al.Data science applied to sustainability analysis[M].Cambridge:Elsevier,2021.
- [20] 孙日近.苏州某化纤企业能源管理体系贯标研究[D].苏州:苏州科技学院,2015.
- [21] HASANBEIGI A.Energy-efficiency improvement opportunities for the textile industry[R].Berkeley:Lawrence Berkeley National Lab,2010.