

基于中国火电碳清单的全国碳市场配额盈缺预测研究

王恩军¹, 蒋志铭^{2*}, 冯田丰¹, 刘潇³, 郭树森^{3*}, 方晓露³

1. 国家能源集团电力营销中心有限公司, 北京 100009

2. 中国人民大学, 北京 100872

3. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211

DOI: 10.61369/SSSD.2025140025

摘 要 : 基于逐机组辨识燃料类型和容量, 本文升级了前期开发的全国火电碳清单, 包括全国火电逐机组燃料类型、发电煤耗、厂用电率、产能参数等。基于全国碳市场21-22年第二个履约周期的免费配额发放规则, 建立免费强度配额规则的情景设计模型, 可以自下而上地逐机组计算碳排放量与免费配额度。基于采集的多个电厂历史逐月供电、供热数据, 以国家碳达峰行动规划为依据, 本研究建立了全国火电分省出力预测模型。并用火电出力预测, 结合全国火电碳清单, 本文研究了不同免费强度配额规则下, 面向第三、四履约期的火电产业碳配额盈缺情况, 提供了一种火电行业计算碳配额盈缺预期的框架。

关 键 词 : 中国碳市场; 火电碳清单; 发电量预测; 长短期记忆网络

Research on the Prediction of Surplus and Shortage of National Carbon Market Quotas Based on China's Thermal Power Carbon Inventory

Wang Enjun¹, Jiang Zhiming^{2*}, Feng Tianfeng¹, Liu Xiao³, Guo Shusen^{3*}, Fang Xiaolu³

1.China Energy Group Electricity Marketing Center Co., Ltd., Beijing 100009

2.Renmin University of China, Beijing 100872

3.National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211

Abstract : Based on the identification of fuel types and capacities for each unit, this paper upgrades the previously developed national thermal power carbon inventory, including the fuel types, coal consumption for power generation, plant power consumption rate, and capacity parameters for each unit of national thermal power. Based on the free quota allocation rules for the second compliance period of the national carbon market in 2021-2022, a scenario design model for free intensity quota rules is established, which can calculate carbon emissions and free quotas for each unit from bottom to top. Based on the collected historical monthly power supply and heat supply data of multiple power plants, and in accordance with the national carbon peak action plan, this study establishes a provincial-level output prediction model for national thermal power. Using thermal power output predictions and combining the national thermal power carbon inventory, this paper studies the carbon quota surplus and deficit situation of the thermal power industry facing the third and fourth compliance periods under different free intensity quota rules, providing a framework for calculating the expected carbon quota surplus and deficit in the thermal power industry.

Keywords : Chinese carbon market; thermal power carbon inventory; power generation forecast; long short-term memory network

一、国内外研究现状

全国碳市场于2021年7月16日正式启动上线交易, 年度覆盖二氧化碳排放量约45亿吨。第一个履约周期(2019-2020年度)以发电行业为首个重点行业, 采用以强度控制为基本思路的行业基准法实施配额分配。截止2023年底, 全国碳市场碳排放配额累计成交4.42亿吨, 累计成交额249.19亿元。经测算, 全国碳市场第一履约周期整体盈余约3.84亿吨, 第二履约周期整体盈余约0.14亿吨[1,2], 当前碳市场整体配额供给相对充足。

碳市场免费配额基准是市场政策的关键要素, 其严格性对于

实现减排目标至关重要, 过于严格的配额基准给企业和经济带来沉重的负担, 而宽松的配额基准则无法产生足够的价格激励。欧盟碳市场为解决配额冗余, 推动减排目标设定了逐年下降的免费配额总量。此外, 文献表明^[3,4], 设定逐步收紧的免费配额基准可加速中国电力系统碳达峰。参考欧洲经验和国内研究来看, 中国碳市场未来可能进一步收紧免费配额基准以强化减排机制, 届时市场供需形势也将发生变化。

对全国碳市场的免费配额盈缺的及时跟踪一方面可推测市场交易进度, 辅助电力企业规划交易策略降低履约风险, 另一方面可评价市场政策合理性与减排机制有效性。目前已有部分机构建

立起免费配额盈余测算的方法，但大多采用宏观分析方法，无法反映政策设置的差异性。自下而上的清单编制法在计算配额盈余方面具有准确、灵活的特点，可分析不同机组类型、不同区域间的分布特点，在此基础上结合政策预期和火电出力预测，则可进一步推算未来不同基准下的免费配额盈余。

目前国内外研究机构已经建立起多种层次的碳清单，可提供排放量、排放源以及变化趋势等多种信息。孙洋洋 [4] 通过文献调研同时对部分机组点源的实测数据进行整理，采用基于计算和模拟的方法对数据库进行更新补充，建立了全国范围的机组级火电排放清单，研究火电产业污染物时空分布以及控制成效。日本国立环境研究所基于全球夜间灯光和逐电厂排放信息建立的人为二氧化碳开源数据清单 [5] 是全球范围的高分辨率碳排放清单，覆盖发电厂、运输、水泥生产、工业设施和陆地区域天然气燃烧排放，其空间分辨率为 1km，时间分辨率为月。2023 年 Dou 等 [6] 开发的全球网格化每日碳排放数据集，覆盖电力、工业、住宅、交通，国内外航空以及国际航运等行业，时间分辨率为天，时间尺度相比以往的数据集更小，可以更加及时准确地提供碳排放信息及变化趋势。清单编制可实现碳排放的高分辨率计算，并直观地对行业排放进行分析。

当前学界和工业界对火电出力预测已建立诸多方法，包括回归模型、时序预测方法和机器学习等。2017 年 Berriel 等 [7] 建立了基于深度学习的月度负荷预测体系，并对比了全连接、卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）、长短期记忆神经网络（Long Short-Term Memory, LSTM）三种架构，结果表明 LSTM 架构的性能最优，为月度火力发电量预测提供了方法参考。王英伟等 [8] 提出了一种基于自回归移动平均模型（Auto-Regressive Moving Average, ARIMA）、支持向量回归模型（Support Vector Regression, SVR）和深度 LSTM 模型的时间序列混合预测模型，采用具有不同统计特征的数据集测试了预测精度，为发电量预测提供了手段。Kamalov 等 [9] 提出了一种基于零样本本学习的发电量预测方法，该方法基于大规模通用数据集构建预训练模型，而后迁移至小规模专用数据集微调，在测试精度上优于 ARIMA 等传统方法。Yang 等 [10] 构建了一种结构自适应离散灰色伯努利模型预测全国各类型电源的发电量，该模型引入了非线性动态结构项，可模拟发电数据并有效提高了模型适用性，为小规模数据集发电量预测提供了手段。

为提高配额盈余预测的精确性与灵活性，本文结合清单编制法和基于 LSTM 模型的出力预测法，能够依据未来不同的免费配额基准测算不同类型、不同地区的免费配额盈余量，可指导履约企业判断市场供需形势，制定履约交易策略；还可进一步分析政策的合理性。其整体技术路线如图 1 所示。

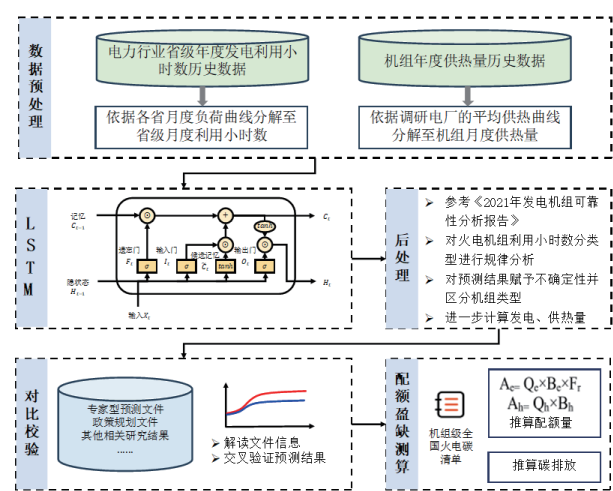


图1 技术路线图

二、清单编制

本文主要根据《2017 年电力工业统计汇编》、《2020 年电力工业统计汇编》、《纳入 2019–2020 年全国碳排放权交易配额管理的重点排放单位名单》和《2021 年度发电机组运行可靠性分析报告》，结合针对逐电厂机组信息的实际调研，以 2020 年为基准年自下而上地编制了全国火电机组级碳清单。

清单包含全国 2225 家火电厂，3370 台火电机组，其中机组类型、容量、煤耗、投产日期、位置是真实、客观的数据，依据公开文献内的信息和实际调研得到，根据机组类型可确定每台火电机组的免费碳排放基准。具体测算每台机组的免费配额强度，还需根据配额分配规则在基准上测算修正系数。本文采集了分布在中国 25 个省共 156 家电厂 369 台火电机组，历史连续 3 年以上的实际运行负荷率与电、热量生产信息，用分布在各省代表电厂的实际数据为依据，对该省其余热电联产电厂的负荷率与供热比进行设置。依据《中国火电节水和水污染防治报告》对中国 2000 台以上火电机组冷却方式的统计结果，对全国机组冷却方式的技术比例进行统一设置。

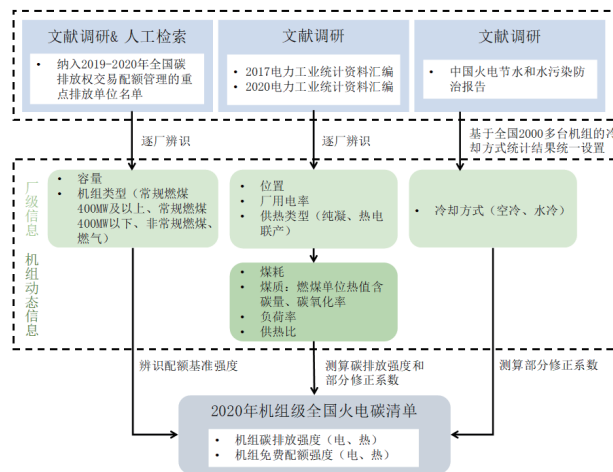


图2 清单编制技术路线图

三、出力预测模型

出力预测模型主要基于电力行业省级月度发电利用小时数和机组月度供热量历史数据训练模型，输出下一周期的发电利用小时数和供热量。结合前述的国内外研究结果，主要考虑构建 LSTM 模型，同时对比其他主流深度学习和机器学习模型以及统计模型测试验证预测效果。

LSTM 是 RNN 的一种改良版本，通过引入“门”结构来控制信息的流动。其中，输入门决定了新信息的进入，遗忘门决定了旧信息的遗忘，而输出门则决定了最终输出的信息。通过这些门，LSTM 能够选择性地记住或遗忘信息，从而在处理序列数据时具有更强的鲁棒性。其网络基本单元如图3所示。

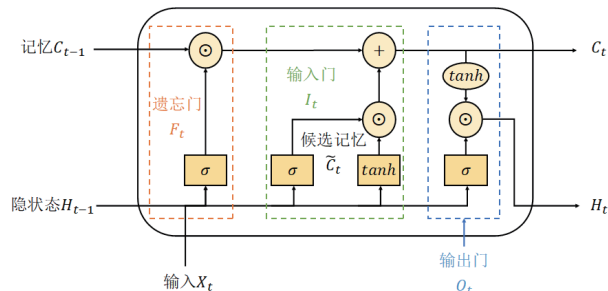


图3 LSTM 网络的基本单元

遗忘门中输入与状态记忆单元、中间输出 共同决定状态记忆单元遗忘部分。输入门中的分别经过 sigmoid 和 tanh 函数变化后共同决定状态记忆单元中保留向量。中间输出由更新后的与输出共同决定。计算公式如式（1）至式（6）所示。

- (1)
- (2)
- (3)
- (4)
- (5)
- (6)

式中， f_t 、 i_t 、 o_t 和 C_t 分别为遗忘门、输入门、输出门、状态单元和候选状态单元的状态； H_{t-1} 为隐藏层状态值； W_f 、 W_i 、 W_o 分别为相应门与输入和中间输出相乘的矩阵权重； b_f 、 b_i 、 b_o 分别为相应门的偏置项； \odot 表示向量中元素按位相乘； σ 表示 sigmoid 函数。

四、模型测试结果

实验数据方面，发电运行利用小时数预测任务上采用 2010~2022 年历史数据作为训练集，以 2022~2024 历史数据作为测试集；模型方面对比测试了全连接多层感知机（MLP），循环神经网络（RNN），LSTM 网络，门控循环网络（GRU），自回归移动平均模型（ARIMA）和支持向量回归模型（SVR），下表为测试结果。测试表明，LSTM 模型最大误差和平均误差均较小、拟合程度较高，在对比的模型中相对最优，因此后续配额盈缺预测中使用其作为分省供电出力预测模型。同时，由于机组月

度供热量历史数据量相对较小，训练神经网络模型极易过拟合，故使用统计模型 ARIMA 作为机组供热出力预测模型。

表 分省供电出力预测模型测试结果

模型	最大误差	平均误差	拟合程度 R^2
RNN	20.64	13.78	0.86
LSTM	15.68	5.79	0.95
GRU	18.12	6.79	0.91
MLP	25.68	9.01	0.87
ARIMA	30.12	11.23	0.83
SVR	28.90	10.12	0.8

五、配额盈缺预测结果分析

基于分省供电出力预测模型和机组供热出力预测模型，结合全国火电碳清单，本研究进一步计算了全国 300MW 等级以上常规燃煤机组、300MW 等级及以下常规燃煤机组、非常规燃煤机组和燃气机组面向第三、四履约期在不同免费强度配额规则下的火电产业碳配额盈缺情况，分别如图 4、图 5 所示。

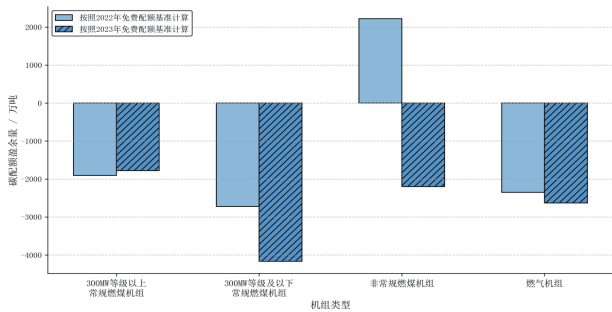


图4 第三履约期全国四类机组在不同免费配额基准下盈缺量预测结果

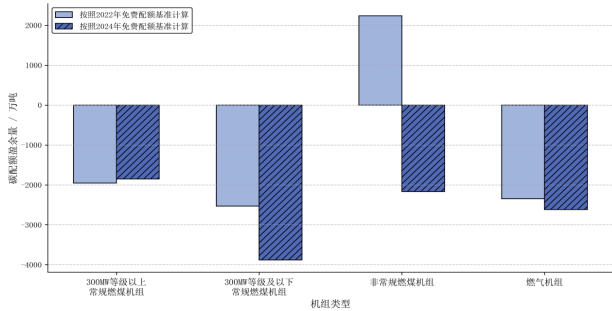


图5 第四履约期全国四类机组在不同免费配额基准下盈缺量预测结果

图 4 为本文测算得到的第三履约期全国四类机组免费碳配额盈缺量结果。依据实际配额基准（2023 年，图中为阴影柱）测算总盈缺量约为 -1.08 亿吨，四类机组均有配额缺口，其中 300MW 等级及以下常规燃煤机组缺额最为突出，约 -0.42 亿吨；依据 22 年配额基准测算的总盈缺量为 -0.48 亿吨，其中非常规燃煤机组类碳配额盈余量最为突出，约 0.22 亿吨。

图 5 为本文测算得到的第四履约期全国四类机组免费碳配额

盈缺量结果。依据实际配额基准（2024年，图中为阴影柱）测算总盈缺量约为-1.05亿吨，四类机组均有配额缺口，其中仍是300MW 等级及以下常规燃煤机组缺额最为突出，约-0.39亿吨，但相较上一年度有所缓解，推测为免费配额政策推动转型起到一定效果；依据23年配额基准测算的总盈缺量为-0.46亿吨，其中非常规燃煤机组类碳配额盈余量最为突出，约0.21亿吨。

对比以上四类机组面向第三、四履约期在不同免费强度配额规则下的火电产业碳配额盈缺情况，本文认为当前免费配额基准调整趋势符合“市场主导”的政策导向，鼓励向大规模、高效率、低排放机组进行转型。

通过基于火电企业分省月度出力预测和结合火电碳清单的全

国碳市场配额盈缺研究，本文针对当前配额规则提出几项优化建议：（1）每个履约期免费配额基准可进一步结合技术进步和能源结构变化动态更新，如对电力行业引入更细全面的机组能效、碳捕获技术应用等差异化修正因子，强化对低碳技术的激励作用；（2）逐步从免费分配转向有偿拍卖，初期可对部分配额（如5%）进行拍卖，所得资金用于支持低碳技术研发和弱势行业转型，同时建立全国统一的配额储备机制，通过拍卖调节市场供需，平抑价格异常波动；（3）逐步构建覆盖全行业的碳排放因子数据库，推动企业安装在线监测系统以减少核算误差，并引入区块链技术追踪配额流转，强化第三方核查机构的责任追溯机制，严惩数据造假行为。

参考文献

[1] 全国碳市场发展报告 (2024). 生态环境部 . 2024.

[2]ZHANG Hongyu, ZHANG Da, GUO Siyue, et al. Impact of benchmark tightening design under output-based ETS on China's power sector. *Energy*, vol. 288, 2024, pp. 129832.

[3]ZHANG Hongyu, ZHANG Da, ZHANG Xiliang. The role of output-based emission trading system in the decarbonization of China's power sector.*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 173, 2023, pp. 113080.

[4] 孙洋洋. 燃煤电厂多污染物排放清单及不确定性研究 [D]. 浙江大学, 2015.

[5]Janssens-Maenhout, G. et al. HTAP_v2. 2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 11411–11432.

[6]Dou, X., Hong, J., Ciais, P. et al. Near-real-time global gridded daily CO2 emissions 2021. *Sci Data* 10, 69 (2023).

[7]Berriel, Rodrigo F., et al. Monthly energy consumption forecast: A deep learning approach. 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2017.

[8] 王英伟, 马树才. 基于 ARIMA 和 LSTM 混合模型的时间序列预测 [J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(02): 291–298.

[9]Kamalov, Firuz, et al. Powering Electricity Forecasting with Transfer Learning. *Energies* 17.3 (2024): 626.

[10]Yang, Zhongsen, et al. Forecasting China's electricity generation using a novel structural adaptive discrete grey Bernoulli model. *Energy* 278 (2023): 127824.