第 XX 卷　第 XX 期　XXXX 年 XX 月 XX 日
DOI：10.7500/AEPS20240905004
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. XX No. XX XX XX, XXXX

基于电力大数据的碳排放测算技术初探

刘昱良[1,2]，李姚旺[1,2]，杜尔顺[1,2]，张　宁[1,2]，康重庆[1,2]，杜思远[3]
（1. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 100084；2. 清华四川能源互联网研究院，四川省成都市 610213；
3. 国网北京市电力公司，北京市 100031）

摘要：能源活动是二氧化碳排放的最主要来源，即时、准确地掌握能源活动碳排放是支撑政府和企业把握碳排放总量和制定碳管控策略的基础。然而，核算法难以支撑高频度碳排放核算，实测法又需要安装额外设备，导致目前尚无低成本、高频度的碳排放测算手段。为此，文中利用电力消费与能源活动间的关联关系，提出一种基于电力大数据的能源活动碳排放测算技术（简称“以电测碳”技术）。首先，提出了“以电测碳”技术的方法架构，并从数据角度出发，详细调研分析了相关基础数据情况，探讨了现有数据的潜在应用范围。其次，构建了基于时间序列的区域-行业-企业通用“以电测碳”模型，并结合中国实际数据开展了测算效果分析。分析结果表明，所提方法能够有效提升碳排放测算的时效性。最后，对“以电测碳”技术未来的研究与应用方向进行了展望。

关键词：碳排放测算；电力大数据；以电测碳；碳监测；能源活动

0　引言

当前，因人类活动产生的碳排放而引发的全球气候变化问题日趋严重，深刻威胁到人类的生存和发展。能源活动是人为碳排放的最主要来源，其贡献的二氧化碳排放约占中国二氧化碳排放总量的85%[1-2]。因此，即时、准确地量化能源活动相关的碳排放是开展应对气候变化各项工作的重要基础和依据，对于系统掌握碳排放总体情况、科学制定碳排放管控措施具有重要意义[3]。

现行的碳排放量化方法主要包括核算法和实测法。核算法主要通过统计数据核算出碳排放量，具有简单、易操作等优点，是目前国际上应用最为广泛的方法[4]。但是，核算法涉及的活动数据和排放因子数据众多，且大多以年为周期开展，难以支撑高频度的碳排放监测。实测法主要指在线连续监测法。该方法通过计量设施直接测量排放源的二氧化碳数据，得到实时的碳排放数据，但该方法主要针对固定排放源，需要安装相应的监测装置，建设与运维成本相对较高[5]。

在国内“碳排双控”趋势和国际“绿色贸易壁垒”的双重驱动下，政府和企业需要即时掌握月度甚至更高时间分辨率的碳排放情况，以快速做出相应调整。但现行的核算法难以支撑高频度的碳核算，实测法又需要投入高昂的成本，短期内难以铺开，导致政府和企业缺乏即时掌握其自身碳排放的可行手段。因此，如何以较低成本实现碳排放的高频度测算，成为低碳发展目标下亟待解决的问题。

电力是社会、经济发展的晴雨表，电力大数据具有频率高、准确性高、价值密度大等特点，已在负荷识别、宏观经济预测等领域发挥了重要作用[6-8]。同时，电力也是社会活动要素之一，电力消费与能源活动及碳排放间具有较强的关联关系[9-10]。这些发现为碳排放的近实时测算提供了新的思路：挖掘电碳间的关联关系，基于当前用电量测算当前碳排放数据，实现“以电测碳”。目前，已有部分文献针对“以电测碳”进行了研究和探索。文献[11-13]基于非侵入式辨识的方法实现了企业碳排放的实时监测。文献[14-17]利用电-碳相关性建立监测模型，实现了区域、行业或企业的碳排放测算。上述文献初步验证了“以电测碳”在部分场景下的有效性，但缺乏对中国开展“以电测碳”的数据基础调研，以及不同核算主体使用“以电测碳”方法的应用效果实证分析，从而导致“以电测碳”方法在国内工程应用的预期效果尚不明确。

为此，本文总结并提炼了“以电测碳”技术的基本原理，并从数据角度出发，详细调研分析了当前可支撑开展“以电测碳”工作的相关基础数据情况，探

收稿日期：2024-09-05；修回日期：2025-01-23。
上网日期：2025-04-11。
国家电网有限公司总部管理科技项目资助（5700-202411271A-1-1-ZN）。

讨了现有数据的潜在应用范围。在此基础上，构建了基于时间序列算法的通用“以电测碳”模型，并结合中国主要省份和北京市主要行业的实际电力与能源活动数据开展了“以电测碳”的测算效果实证分析，分析了其在不同区域和行业的测算效果及适用性。最后，对“以电测碳”技术未来的研究与应用方向进行了展望。

1 “以电测碳”技术架构与数据基础分析

1.1 基本原理与实现步骤

能够实现“以电测碳”的主要原因在于：短期内区域或行业企业的能源消费结构、产品生产工艺通常较为稳定，其电力消费和能源消费之间存在一定程度上的“锚定”关系，而能源消费碳排放量与能源消费量直接相关（能源消费碳排放量 = $\sum$各类型能源消费量 × 对应碳排放因子）。因此，可以建立电力消费和能源活动碳排放间的关联关系，借助当前高频度的电力消费数据，实现当前时段能源活动碳排放数据的测算。需要指出的是，“以电测碳”还可以应用于除能源消费碳排放外，其余与电力消费量具有较强相关性的碳排放测算（如工业过程碳排放、全口径直接碳排放等）。

由此可见，“以电测碳”方法仅需要历史的电碳数据和当前实测的电力消费数据，无须安装额外的设备，具有较低的应用成本。同时，该方法对于核算对象没有特殊要求，具有较高的使用灵活性，可以适用于区域、行业以及企业等不同层级的碳排放测算。“以电测碳”方法的详细实现步骤如下：

步骤 1：获取历史电碳数据，形成“以电测碳”分析数据集。“以电测碳”模型为数据驱动，其可靠性与准确性高度依赖于历史数据的质量和数量，模型所涉及的核心历史数据主要包含电力消费数据、碳排放数据、能源消费数据、产品产量数据等。

步骤 2：数据预处理。由于数据来源广泛，原始数据可能存在缺失、异常等问题，需要进行数据清洗、缺失值填补等预处理。此外，可通过频率变换方法（如月度分解）对数据进行处理，使得模型能够捕捉到更细致的时间维度特征。

步骤 3：“以电测碳”模型构建。应用历史数据训练“以电测碳”模型，根据技术路线的不同，“以电测碳”模型可分为回归分析、时间序列分析、非侵入式辨识三大类。其中，回归分析法主要应用数据间的相关性实现碳排放测算，时间序列法则是通过分析数据在时间维度上的分布以及相互间的影响规律实现碳排放测算，而非侵入式辨识法则通过识别负荷运行状态来实现碳排放的测算。

步骤 4：模型参数优化。基于测试集数据对模型性能进行系统评估，以确保模型的准确性和可靠性。若评估结果不佳，则需要考虑选择不同的算法、重新设计模型结构或调整模型超参数，直至模型达到预期指标。此外，在对模型进行优化时，可以考虑添加更多的有效特征，使用集成学习等方法提升模型性能，同时，也可以探索不同的特征选择和数据预处理技术，以进一步提升模型的泛化能力。

步骤 5：模型应用。若模型评估指标符合预期，则可以将模型输出并应用于实际测算场景中，调用模型并输入当期电力数据，即可实现实时、动态的碳排放测算。为了保证模型长期的有效性和精确性，还需要考虑定期使用新数据对模型进行增量训练和更新。

1.2 数据基础分析

由于“以电测碳”技术为数据驱动，基础数据是否充分、可靠是影响该技术是否能够支撑落地应用以及决定落地应用效果的关键。因此，本节对“以电测碳”数据条件现状展开分析，构建“以电测碳”模型所涉及的核心历史数据，包括历史电力消费数据、碳排放数据（含能源活动碳排放数据）、能源消费数据及产品产量数据等。

其中，历史电力消费数据主要的公开获取途径包括统计年鉴、统计公报及公开数据集等。中国电力企业联合会《电力工业统计资料汇编》以及国家统计局《中国能源统计年鉴》每年会发布更新上一年度的分省、分行业用电量数据。此外，部分省份及城市会在统计月报中对月度用电量数据进行公开。更为高频、详尽的电力消费数据通过公开渠道难以获取，一般由各级电网公司及相关主管部门采集和管理。

而历史碳排放数据与电力消费数据不同，需要基于完整的方法学体系或核算指南进行计算并公开。在区域层面，中国已经初步建立了国家温室气体清单编制体系，但目前国家官方层面的温室气体清单历史数据有限且暂无固定的更新发布时间，无法满足“以电测碳”的数据需求。在省区一级，中国目前已经发布了《省级温室气体清单编制指南》，部分省区也陆续出台发布了省区级的温室气体清单编制指南，但目前省区级的温室气体清单编制情况存在较大地区差异，暂无统一的编制发布要求。在行业企业层面，国际标准化组织（International Organization for Standardization，ISO）发布了国际通用的 ISO 14064 系列规范，用以指导企业碳排放量核算，中国也先后发布了涵盖 24 个重点行业的碳排放核算指南。2021 年 12 月，生态环境部发布《企

业环境信息依法披露管理办法》，要求重点企业应当依法披露包括碳排放量在内的环境信息，部分重点企业的历史碳排放数据可在环境信息披露网站获取[18]。此外，国内外部分非官方的研究机构也基于核算方法学指南或者自身研究成果开展碳排放数据计算工作，并且通过数据集对计算结果进行公开。目前，国内外部分公开的非官方碳排放数据集如下：中国碳核算数据库核算并提供1997—2021年国内分区域、分行业多尺度碳排放清单[19]；中国多尺度排放清单模型构建了高分辨率的全球范围多尺度人为源温室气体排放清单数据库，提供的碳排放数据主要包括省级碳排放清单和分部门碳排放清单[20]；世界银行通过Climatewatch数据集提供1990—2020年全球各国年度二氧化碳排放总量及分行业碳排放数据[21]；中国城市温室气体工作组计算并整理了2010—2020年以5年为间隔的中国各地市碳排放数据[22]；Carbnon Monitor基于碳排放参数化定量方法计算和公开了全球多个国家以及中国各省的天尺度碳排放数据，以及中国省级电力、工业、居民消费、地面交通、航空、海运的近实时尺度碳排放数据[23]；全球大气研究排放数据库计算并提供了全球226个国家1970—2022年的月度碳排放数据（分部门）[24]。但由于数据来源、计算过程、计算范围、缺省值以及计算方法上的差异，各数据集的准确性难以得到验证，即使是相同数据类别也可能存在一定程度的差异。文献[25]将中国官方公布的年度碳排放数据与研究机构的公开数据库进行对比分析发现，研究机构对于中国的碳排放量估算值普遍偏高，最高达7%左右。因此，直接引用部分非官方的数据集开展“以电测碳”可能会带来数据源本身固有误差较大的问题。

在能源消费数据方面，《中国能源统计年鉴》以及各地的统计月报均会定期公布分区域、分行业的能源消费情况。此外，部分行业协会也会定期公布主要产品产量数据，如中国钢铁工业协会每月会公布上一月度的产量数据[26]。

基于以上数据源，可以形成“以电测碳”分析数据集，并作为“以电测碳”模型构建的基础。本文从不同维度对比和分析了当前部分公开数据集，详见表1。由表1可知，根据现有的官方公开数据集开展“以电测碳”，可以实现全国所有省份及主要行业的年度碳排放量测算；而对于数据基础较好的公开月度电力消费量的区域及行业，则可以实现月度的碳排放量测算。

表1　支撑开展“以电测碳”的基础数据集

Table 1　Basic data sets to support implementation of “electricity-based carbon emission estimation”

机构或数据集	是否为官方数据库	数据类型	时间频度	覆盖范围	计算方法
电力工业统计资料汇编[27]	是	电力消费数据	年度	全国分省、分行业	统计汇总
地区月度统计公报[28]	是	电力消费数据	月度	部分省份、部分行业	统计汇总
中国能源统计年鉴[29]	是	电力消费数据、能源消费数据	年度	全国分省、分行业	统计汇总
企业环境信息依法披露系统[18]	是	碳排放数据	年度	清单企业	行业指南
中国碳核算数据库[19]	否	碳排放数据、能源消费数据	年度（1997—2021年）	全国、省、市、县及分行业	IPCC 2006指南部门法
中国多尺度排放清单[20]	否	碳排放数据、能源消费数据	年度（1990—2021年）	全球、国家、州省及分行业	中国多尺度排放清单模型
中国城市温室气体工作组[22]	否	碳排放数据	5年度（2010—2020年）	地市级	参照城市温室气体核算国际标准计算
全球大气研究排放数据库[24]	否	碳排放数据	月度（1970—2022年）	国家级、分部门	IPCC 2006指南部门法
Climatewatch[21]	否	碳排放数据	年度（1990—2020年）	全球大部分国家和地区、分行业	清单编制法
Carbon Monitor[23]	否	碳排放数据	近实时	全球多个国家以及中国各省区、分行业	碳排放近实时定量方法

2　基于时间序列的区域-行业-企业通用“以电测碳”模型

为说明“以电测碳”方法的可行性与灵活性，本文基于电-碳折算系数时间序列分析方法构建适用于区域-行业-企业的“以电测碳”通用基础模型并开展实证分析。电-碳折算系数是能源活动碳排放量与电力消费量的比值，其含义是平均单位电力消费量对应的能源活动碳排放量。电-碳折算系数的计算公式如下：

$$k_{t,\mathrm{c}}=\frac{C_{t,\mathrm{total}}}{Q_{t,\mathrm{total}}} \tag{1}$$

式中：$k_{t,\mathrm{c}}$为时段t内的电-碳折算系数；$C_{t,\mathrm{total}}$为时段t内的能源活动碳排放总量；$Q_{t,\mathrm{total}}$为时段t内的电力消费总量。

由于技术更新迭代、能源结构转型以及社会低碳发展等原因，电-碳折算系数会随时间变化而变化。因此，根据历史电力数据和能源活动碳排放数据，计算得到电-碳折算系数的历史时间序列分布，然后应用时间序列分析法对当前时段的电-碳折算系数进行测算，再基于当前时段的电力消费量与电-碳折算系数即可计算得到当期的能源活动碳排放量。本文采用自回归移动平均模型进行电-碳折算系数测算。测算公式如下：

$$\begin{aligned}k_{t,\mathrm{c}}=&\beta_0+\beta_1 k_{t-1,\mathrm{c}}+\cdots+\beta_p k_{t-p,\mathrm{c}}+\\&e_t+\theta_1 e_{t-1}+\cdots+\theta_q e_{t-q}\end{aligned} \tag{2}$$

式中：$\beta_0,\beta_1,\cdots,\beta_p$为模型自回归参数；$\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_q$为模型滑动平均参数；$p$为模型自回归阶数；$q$为模型滑动平均阶数；$e_t$为时段$t$的白噪声。

如果历史数据集中电力消费量与能源活动碳排放量之间存在时间频率不一致的情况，则需要对数据进行频率转换。本文采用Chow-Lin法对数据频率进行变换。变换公式如下：

$$w_t=u_t\kappa+\varepsilon_t \tag{3}$$

式中：w_t为已知的低频数据序列；u_t为与w_t相关的高频数据解释变量；κ为转换系数；ε_t为随机扰动项。

序列平稳性是开展时间序列测算的前提，故首先需要对数据进行平稳性检验。本文采用单位根检验法进行平稳性检验。检验公式如下：

$$\Delta X_t=\alpha+\beta t+\gamma X_{t-1}+\sum_{i=1}^{M}\beta_i\Delta X_{t-i}+\delta_t \tag{4}$$

式中：X_t为原始时间序列；Δ为差分符号；α为常数项；β为时间趋势项；γ为滞后项系数；δ_t为白噪声序列；M为滞后阶数；β_i为滞后i的差分滞后项ΔX_{t-i}的系数。

平稳性检验之后，如果序列非平稳，则需要对其进行差分、对数等变换，然后再次进行检验直至满足要求。本文选用赤池信息量准则（Akaike information criterion，AIC）和贝叶斯信息量准则（Bayesian information criterion，BIC）来进行模型定阶。定阶公式如下：

$$f_{\mathrm{AIC},k}=\ln\hat{\sigma}_k^2+\frac{2k}{N}\qquad k=0,1,\cdots,K \tag{5}$$

$$f_{\mathrm{BIC},k}=\ln\hat{\sigma}_k^2+\frac{k\ln N}{N}\qquad k=0,1,\cdots,K \tag{6}$$

式中：$\hat{\sigma}_k^2$为似然函数；k为模型阶数；$f_{\mathrm{AIC},k}$为模型在阶数k下的AIC值；$f_{\mathrm{BIC},k}$为模型在阶数k下的BIC值；K为模型拟合的最高阶数；N为序列宽度。

3 “以电测碳”方法测算效果实证分析

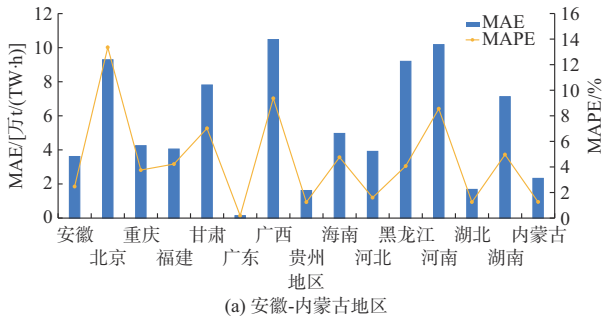
3.1 区域“以电测碳”实证分析

区域所用分析数据主要来自国家统计局每年定期发布出版的《中国能源统计年鉴》。区域层面的能源活动碳排放数据主要为区域中各类型燃料燃烧产生的二氧化碳（含发电与供热产生的二氧化碳）数据。首先，根据全国部分省份2000—2020年不同品类能源消费量及电力消费量数据，计算得到各省份年度能源活动碳排放数据和电-碳折算系数。然后，将2000—2019年的数据作为模型训练集，以2020年的数据作为验证集，基于训练集数据构建“以电测碳”模型，并在验证集开展“以电测碳”。最后，通过比较验证集测算值与真实值之间的误差来判断模型优劣。

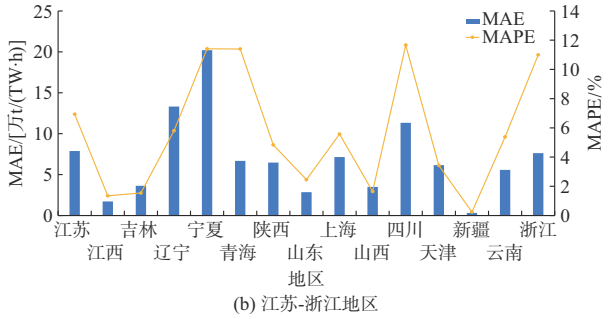
附录A图A1为全国部分省份2020年电-碳折算系数的测算值和实际值，图A2为全国部分省份2020年能源活动碳排放量的测算值和实际值。由附录A图A1与图A2可以看出，由于能源和产业结构存在差异，不同省份之间的电-碳折算系数大小存在明显差异。其中，河北、黑龙江、吉林和辽宁等省份电-碳折算系数较高，均在200万t/(TW·h)以上；而北京、浙江、广东等地的电-碳折算系数相对较低，均在100万t/(TW·h)以下。同时，不同省份之间碳排放量也存在较大差异。

采用平均绝对误差（mean absolute error，MAE）和平均绝对百分比误差（mean absolute percentage error，MAPE）对回归模型的拟合结果进行评估分析。图1所示为区域电-碳折算系数测算结果误差。由图1可以看出，广东、新疆等地的模型MAE较低，在1万t/(TW·h)左右，广西、宁夏等地的模型MAE较高，在10万t/(TW·h)以上。整体来看，大部分省区MAPE均在10%以内，本文所提基于电-碳折算系数回归的碳排放测算模型具有较好的效果。

为验证所提基于时间序列的通用“以电测碳”模型的应用效果，本文基于以上数据，选取了在回归及预测领域中常用的随机森林（random forest，RF）、支持向量机（support vector machine，SVM）、长短期记忆（long short-term memory，LSTM）网络和卷积神经网络（convolutional neural network，CNN）算法开展了对比测试，测试结果如图2所示。由图2可以看出，本文所提方法在“以电测碳”场景下平均MAPE最低（5.1%），计算耗时（2.56 s）也远低于LSTM网络与CNN算法，对于小样本容量数据具有更好的表现。



(a) 安徽-内蒙古地区



(b) 江苏-浙江地区

图1　区域电-碳折算系数测算结果误差

Fig. 1　Calculation result errors of regional electricity-carbon conversion coefficients

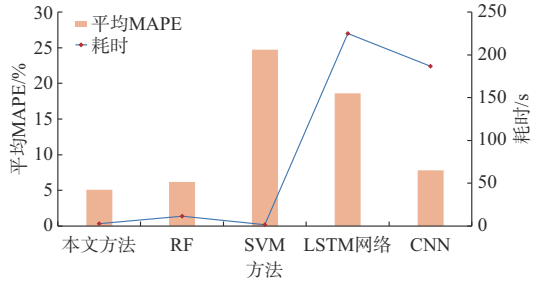


图2　不同算法对比测试

Fig. 2　Comparison test of different algorithms

广东省统计局会定期公布全省月度用电量信息，具有较好的数据基础。因此，文中以广东省为例开展月度碳排放测算分析。采用Chow-Lin法对广东省历史年度电-碳折算系数进行月度分解，然后应用本文方法测算得到2021年1月—2024年11月的电-碳折算系数，如附录A图A3所示。由附录A图A3可以看出，广东省的电-碳折算系数也呈现出下降趋势。基于月度用电量数据和月度电-碳折算系数即可计算得到月度能源活动碳排放量，广东省2021年1月—2024年11月的月度能源活动碳排放量测算结果如附录A图A4所示。

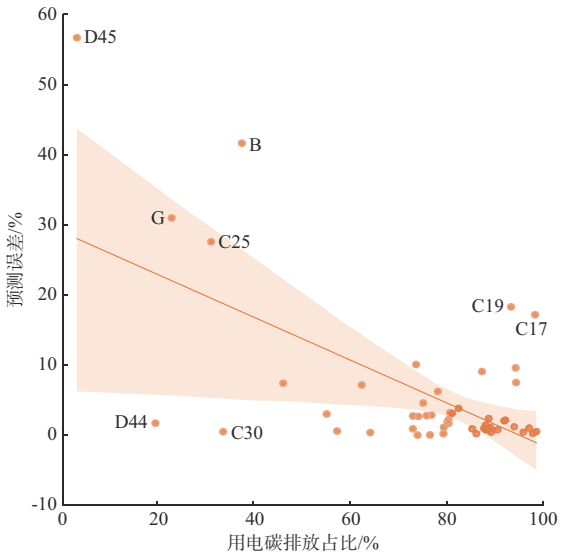
3.2　行业“以电测碳”实证分析

北京市统计年鉴会公开北京主要行业的能耗信息，具有较好的数据基础。因此，文中选择北京市51个主要行业为行业“以电测碳”实证分析对象，各行业分类代码对照规则详见附录A表A1。行业层面的能源活动碳排放数据主要包括：各类型燃料燃烧产生的二氧化碳直接排放（含自发自用电厂发电与供热产生的二氧化碳）和外购电力与热力产生的间接二氧化碳排放。

附录A图A5为根据北京市2022年各主要行业能源消费及碳排放数据所绘制的碳排放流动桑基图。由附录A图A5可以看出，北京市第三产业为主导产业，其碳排放量占比最大，居民生活、交通、电热生产和供应以及燃料加工是主要的一次能源消费及直接碳排放行业，而其余行业则因为电力消费占比较大，主要以间接碳排放为主。

根据各行业历年的能源消费量及电力消费量数据，计算得到其年度能源活动碳排放数据和电-碳折算系数。然后，以2022年数据作为测试集，以2022年之前的数据作为模型训练集构建行业“以电测碳”模型，模型测算结果如附录A表A2所示。

基于附录A表A2结果，进一步开展用电碳排放量占比与模型误差直接的相关性分析，计算得到二者之间的皮尔逊相关系数为－0.614，具有一定程度的负相关关系。因此，对于大部分行业，其用电碳排放占比（电力消费占能源消费比例）越高，测算误差就越小，模型也具有更好的表现。图3所示为各行业用电碳排放占比与测算误差的分布图。图中：散点代表各行业；直线代表行业用电碳排放占比与测算误差的回归趋势线；阴影代表置信区间。



B: 采矿业; C17: 纺织业; C19: 皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业; C25: 石油、煤炭及其他燃料加工业; C30: 非金属矿物制品业; D44: 电力、热力生产和供应业; D45: 燃气生产和供应业; G: 交通运输、仓储和邮政业。

图3　各行业用电碳排放占比与测算误差的分布

Fig. 3　Distribution of electricity carbon emission proportion and estimation error across various industries

由附录A表A2和图3可以看出，不同行业模型表现存在较大差异，但多数行业的测算误差的分布

主要还是集中在10%以内，基于“以电测碳”的技术路线能够取得较好的测算效果。但在诸多行业中，行业B、C17、C19、C25、D45以及行业G的“以电测碳”误差较大，这主要是由于上述行业能源消费结构特点所致。例如，行业G中的电力消费主要来自电动汽车，而碳排放主要来自燃油汽车，电力消费与其他能源消费的碳排放相关性较弱（从图3也可以看出，行业G中电力消费碳排放并不占主导），故不适合采用“以电测碳”的方法。而行业C25和D45的能源活动碳排放与电力消耗的相关性较低。例如，消耗的燃气量主要取决于用户需求，与行业的电力消费量不存在关联，故也不适合采用“以电测碳”的方法。

此外，从图3也可以看出，行业用电碳排放占比与测算误差整体呈现出负相关关系，除个别行业外，行业用电碳排放量占比越高，模型表现越好。图3中行业C17与行业C19虽然用电碳排放占比高，但其模型表现不佳。这可能是由于上述两个行业近年来的终端能耗设备的电气化改造，导致其能源消费结构变化较大。例如，纺织业由传统锅炉改造为电锅炉或集中供热，电力消费碳排放占比从50%提升到90%以上，其电-碳折算系数呈现出不平稳波动，故测算误差较大。未来，随着上述行业能源消费结构的稳定，模型表现将会更佳。而行业D44与行业C30虽然用电碳排放占比不高，但其模型表现较好，这主要是由于虽然其电能消费占比不高，但能源消费结构较为稳定，故仍然具有较好的表现。

由于水泥、钢铁和电解铝这三大高耗能行业是随着全国碳市场扩容将被纳入的行业，也是欧盟碳关税纳入考核的重点行业，文中进一步针对以上三个重点行业所在的行业类别（C30、C31和C32）开展碳排放特性和模型测算效果分析。附录A图A6为三个行业历史碳排放量及电-碳折算系数。由图A6可以看出，三个重点行业间的电-碳折算系数存在较大差异。其中，水泥行业的电-碳折算系数较高，这是由于水泥行业的碳排放主要来源于工业过程，电力消费碳排放占比不高。而电解铝行业以电解为主要工艺流程，主要能源消费为电力，故其电-碳折算系数相对较低且较为平稳。在碳排放量方面，水泥和钢铁行业呈现出明显的下降趋势，这可能与北京市实行的环保及产业转移调整政策相关。图4为三个重点行业碳排放量实际值与测算值对比图。结合附录A图A6和图4可知，水泥、钢铁和电解铝这三大高耗能行业整体用能结构较为平稳，用电碳排放量占比较为稳定，通过“以电测碳”的方法可以较为准确地测算出上述三个重点行业的碳排放量，其测算误差分别为0.54%、3.06%、1.24%。

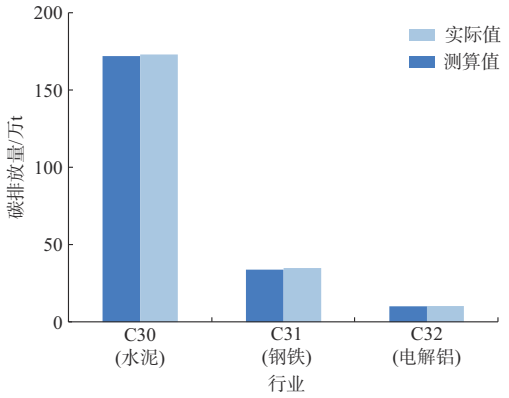


图4　北京市重点行业碳排放量测算结果
Fig. 4　Carbon emission estimation results of key industries in Beijing, China

3.3　企业“以电测碳”实证分析

根据某化工企业2019—2023年温室气体排放信息披露报告中发布的数据，开展企业“以电测碳”实证分析。企业层面的能源活动碳排放数据主要包括：各类型燃料燃烧产生的二氧化碳直接排放（含自发自用电厂发电与供热产生的二氧化碳）和外购电力与热力产生的间接二氧化碳排放。附录A图A7为该企业历年的碳排放数据与电-碳折算系数。

由附录A图A7可以看出，虽然碳排放量存在年度波动，但该企业能源消费结构较为稳定，电-碳折算系数也较为平稳。测算得到该企业电力消费与碳排放量之间的皮尔逊相关系数为0.978，具有显著的正相关性。基于本文所提方法，以2019—2022年的数据作为训练集，以2023年的数据作为验证集开展“以电测碳”分析，测算得到2023年的碳排放量为81.13万t，MAPE为1.97%。由此可见，本文所提方法在企业碳排放测算中同样具有较好的应用效果。

4　研究与应用展望

4.1　研究展望

“以电测碳”的测算准确度及推广应用范围将高度依赖于数据、模型的成熟与完善，也受到相关机制的影响。本文面向“以电测碳”技术的未来发展需要，从基础数据、测算模型和机制保障三个方面进行了研究展望：

1）基础数据方面，当前能源电力相关统计数据存在省间数据差异大、行业及企业数据获取途径有限等问题。下一步，可考虑推动电力企业、用能企业和政府部门开展多方合作，在保障数据安全的前提下，共建共享面向“以电测碳”的电力、能源基础数据库。在碳信息披露方面，需要构建统一规范的披露机制、标准和方法，保证碳信息披露数据的一致性、

连贯性和可比性，为构建“以电测碳”模型奠定可靠的数据基础。

2）测算模型方面，需要加强“以电测碳”基础方法与模型研究，进一步挖掘不同对象、不同尺度电力消费与碳排放的关联关系，平衡“以电测碳”模型的准确度和测算成本。开展小样本测算模型研究，研究数据不足场景下的“以电测碳”方法，并融合多维度辅助测算手段及数据，推动构建科学性更强、可解释性更强、应用范围更广的“以电测碳”模型体系。

3）机制保障方面，应探索构建“以电测碳”技术的相关规范与标准，为“以电测碳”技术的应用提供规范化的参考和指导。进一步建立健全相关监管体系，对碳排放测算和数据披露行为进行监督管理，确保数据的真实性和披露的透明度，为低碳发展提供坚实的制度保障。

4.2　应用展望

基于电力大数据的“以电测碳”技术无须安装额外的测量装置，且测算对象不受空间范围限制，能够以较低的代价实现区域、行业、企业的碳排放测算。在国务院印发的计量发展规划（2021—2035年）中明确提出，要进一步完善碳排放计量监测体系，开展基于用电信息推算碳排放量应用，为碳排放统计核算工作提供支撑[30]。2024年10月，国家多部门联合印发《完善碳排放统计核算体系工作方案》，要求建立基于电力大数据的碳排放核算机制，完善“电-碳分析模型”，开展碳排放数据测算、分析、应用研究[31]。由此可见，“以电测碳”技术未来将在中国碳排放计量监测体系中发挥重要作用，本文针对区域及行业企业两个不同应用范围，对“以电测碳”的应用场景进行了展望：

1）区域碳排放测算方面。目前，主要基于统计核算法，存在时间滞后性强、监管难度大等问题，难以掌握区域碳排放的动态变化情况。而“以电测碳”技术对于数据的要求较低，目前大部分区域的公开数据即可满足测算需求，并且相关部门也掌握了更为全面的基础数据，开展区域“以电测碳”具备良好的数据基础。“以电测碳”相较于统计核算法更为简单便捷，将其应用于区域碳排放监测可以实现更低成本、更高频度的碳排放测算，极大地缩短了碳排放数据分析的时间尺度，可以帮助掌握区域碳排放的短期变化情况，为区域在低碳发展与减排进程中提供及时和量化的指导。此外，基于高频的碳排放测算数据，还可对未来的碳排放趋势进行推演与预警，适时做出政策调整并指导开展区域碳排放管控工作，保障完成区域碳排放的管控或考核目标。

2）行业企业碳排放测算方面。目前，部分重点行业企业以及上市公司需要自愿或强制进行碳排放核算、上报与披露公开，也主要采用统计核算法，但核算法监管难度大，容易存在违规造假。因此，为保证碳排放数据的真实性和准确性，需要第三方核查机构来进行企业碳排放测算工作，所需投入的人力物力资源较大。而“以电测碳”能够实现行业企业碳排放数据的低成本快速测算，可应用于大范围内企业碳排放披露数据的初筛，快速识别出可能存在漏报瞒报、数据造假的企业。此外，企业本身通过“以电测碳”技术也能掌握自身碳排放动态变化情况，为企业开展各项碳减排工作提供指导。在数据方面，行业企业的基础数据虽然公开渠道难以获取，但企业本身以及相关主管部门掌握了大量的企业生产及能耗数据。因此，开展行业企业“以电测碳”也具有较为良好的数据基础。

5　结语

本文首先分析了“以电测碳”的基本原理，详细调研分析了相关基础数据情况，探讨了现有数据的潜在应用范围；然后，构建了“以电测碳”分析通用基础模型，并结合全国部分省份以及北京市主要行业基础能源统计数据开展了“以电测碳”测算效果实证分析。分析结果表明，“以电测碳”方法能够适用于区域、行业以及企业等不同层级的能源活动二氧化碳排放测算，具有实现低成本、高频度的碳排放测算的潜力，对于主要省份的测算误差平均值为5.1%，对于北京市钢铁、水泥、电解铝等短期能源消费结构较为稳定的行业企业测算误差均在4%以内，而交通、燃气等电-碳相关性较弱的行业企业测算误差较大，不适宜采用“以电测碳”的方法。最后，对“以电测碳”技术未来的研究与应用方向进行了展望。

本文所提“以电测碳”模型测算的有效性和准确性较大程度上依赖于历史数据的质量和数量，在数据缺失或质量不佳情况下存在一定的局限性，且不适用于电-碳相关性较弱对象的碳排放测算。未来，将进一步研究数据不足场景下的“以电测碳”方法，并融合多维度辅助测算手段及数据，构建可解释性更强、应用范围更广的“以电测碳”模型。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx），扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国生态环境部.中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告[R].北京：中华人民共和国生态环境部，2024.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of

China. The first biennial transparency report on climate change of the People's Republic of China[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2024.

[2] 蒋旭东,王丹,杨庆.碳排放核算方法学[M].北京:中国社会科学出版社,2021.
JIANG Xudong, WANG Dan, YANG Qing. Carbon emission accounting methodology [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2021.

[3] 关于印发《完善碳排放统计核算体系工作方案》的通知[EB/OL]. [2024-10-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241024_1393879.html.
Notice on issuing the "Work Plan for Improving the Carbon Emissions Statistical Accounting System"[EB/OL]. [2024-10-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241024_1393879.html.

[4] 刘昱良,李姚旺,周春雷,等.电力系统碳排放计量与分析方法综述[J].中国电机工程学报,2024,44(6):2220-2236.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2236.

[5] 张宁,李姚旺,黄俊辉,等.电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J].电力系统自动化,2023,47(9):2-12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12.

[6] 邓旭晖,陈中,杨凯,等.基于多任务学习卷积网络的非侵入式负荷监测方法[J].电力系统自动化,2023,47(8):189-197.
DENG Xuhui, CHEN Zhong, YANG Kai, et al. Non-intrusive load monitoring method based on multi-task learning convolutional network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 189-197.

[7] 彭放,彭高群,祁亚茹,等.基于电力大数据的中国工业增加值现时预测[J].电信科学,2021,37(7):115-125.
PENG Fang, PENG Gaoqun, QI Yaru, et al. Nowcasting of China's industrial added value based on electric power big data [J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 115-125.

[8] 赵俊华,文福拴,黄建伟,等.基于大语言模型的电力系统通用人工智能展望:理论与应用[J].电力系统自动化,2024,48(6):13-28.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, HUANG Jianwei, et al. Prospect of artificial general intelligence for power systems based on large language model: theory and applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 13-28.

[9] ACARAVCI A, OZTURK I. On the relationship between energy consumption, CO_2 emissions and economic growth in Europe[J]. Energy, 2010, 35(12): 5412-5420.

[10] ALI S S S, RAZMAN M R, AWANG A. The nexus of population, GDP growth, electricity generation, electricity consumption and carbon emissions output in Malaysia [J]. International Journal of Energy Economics and Policy, 2020, 10(3): 84-89.

[11] LIU G L, LIU J J, ZHAO J H, et al. Real-time corporate carbon footprint estimation methodology based on appliance identification[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(2): 1401-1412.

[12] YANG C, LIANG G Q, LIU J J, et al. A non-intrusive carbon emission accounting method for industrial corporations from the perspective of modern power systems [J]. Applied Energy, 2023, 350: 121712.

[13] XIA Y Q, SUN G C, WANG Y F, et al. A novel carbon emission estimation method based on electricity-carbon nexus and non-intrusive load monitoring[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122773.

[14] 国家电网公司召开全国碳排放监测服务平台"电-碳分析模型"评审会[EB/OL].[2024-03-01]. https://news.bjx.com.cn/html/20221114/1268515.shtml.
State Grid Corporation of China held a review meeting for the "Electricity-Carbon Analysis Model" of the National Carbon Emission Monitoring Service Platform [EB/OL]. [2024-03-01]. https://news.bjx.com.cn/html/20221114/1268515.shtml.

[15] 文博,李家熙,文明,等.基于电力数据的碳排放组合预测方法研究[J].湖南电力,2024,44(2):134-140.
WEN Bo, LI Jiaxi, WEN Ming, et al. Research on carbon emission combination forecasting method based on power data [J]. Hunan Electric Power, 2024, 44(2): 134-140.

[16] ZHOU C L, XUAN D H, MIAO Y H, et al. Accounting CO_2 emissions of the cement industry: based on an electricity-carbon coupling analysis[J]. Energies, 2023, 16(11): 4453.

[17] LAI G S, YE Q, CHEN W X, et al. Electricity-carbon modeling of flat glass industry based on correlation variable[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1265-1274.

[18] 企业环境信息依法披露管理办法[EB/OL].[2024-03-01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202112/t20211221_964837.html.
Measures for the administration of enterprise environmental information disclosure according to law [EB/OL]. [2024-03-01]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202112/t20211221_964837.html.

[19] 中国碳核算数据库[EB/OL].[2024-03-01]. https://www.ceads.net.cn/.
China carbon accounting database [EB/OL]. [2024-03-01]. https://www.ceads.net.cn/.

[20] Multi-resolution emission inventory model for climate and air pollution research[EB/OL]. [2024-03-01]. http://meicmodel.org.cn/.

[21] Climate watch historical GHG emissions (1990—2020)[EB/OL]. [2024-03-01]. https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906522-data-updates-and-errata.

[22] China City Greenhouse Gas Working Group[EB/OL]. [2024-03-01]. http://www.cityghg.com/.

[23] Carbon monitor [EB/OL]. [2024-03-01]. https://carbonmonitor.org/.

[24] Emissions database for global atmospheric research[EB/OL]. [2024-03-01]. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/.

[25] 李继峰,郭焦锋,高世楫,等.国家碳排放核算工作的现状、问题及挑战[J].发展研究,2020(6):9-14.
LI Jifeng, GUO Jiaofeng, GAO Shiji, et al. Current status, issues and challenges of the national carbon emission accounting work[J]. Development Research, 2020(6): 9-14.

[26] 中国钢铁工业协会.中国钢铁工业协会统计发布[EB/OL]. [2024-03-01]. https://www.chinaisa.org.cn/gxportal/xfgl/

portal/index.html.
China Iron and Steel Association[EB/OL]. Statistical release by China Iron and Steel Association[2024-03-01]. https://www.chinaisa.org.cn/gxportal/xfgl/portal/index.html.
[27] 中国电力企业联合会.2020年电力工业统计资料汇编[M].北京:中国电力企业联合会,2021.
China Electricity Council. Compilation of statistical data on the electric power industry in 2020[M]. Beijing: China Electricity Council, 2021.
[28] 广东统计信息网.广东主要统计指标[EB/OL].[2024-03-01]. http://stats.gd.gov.cn/gmjjzyzb/index.html.
Guangdong Statistical Information Network. Main statistical indicators in Guangdong Province[EB/OL]. [2024-03-01]. http://stats.gd.gov.cn/gmjjzyzb/index.html.
[29] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴2022[M].北京:中国统计出版社,2023.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
[30] 中华人民共和国中央人民政府.国务院关于印发计量发展规划(2021—2035年)的通知[EB/OL].[2024-03-01].http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm.
The Central People's Government of the People's Republic of China. Circular of the State Council on printing and distributing the metrological development plan (2021—2035)[EB/OL]. [2024-03-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm.
[31] 国家发展和改革委员会.关于印发《完善碳排放统计核算体系工作方案》的通知[EB/OL].[2024-10-08].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241024_1393879.html.
National Development and Reform Commission. Notice on issuing the "Work Plan for Improving the Carbon Emission Statistics and Accounting System"[EB/OL]. [2024-10-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241024_1393879.html.

刘昱良(1995—),男,硕士,工程师,主要研究方向:低碳电力技术。E-mail:liuyl@tsinghua-eiri.org

李姚旺(1993—),男,通信作者,博士,副研究员,主要研究方向:低碳电力技术、云储能技术。E-mail:yaowang_li@126.com

杜尔顺(1992—),男,博士,副研究员,主要研究方向:低碳电力技术、电力系统规划与运行。E-mail:duershun@tsinghua.edu.cn

(编辑　章黎)

Preliminary Exploration of Carbon Emission Estimation Technology Based on Power Big Data

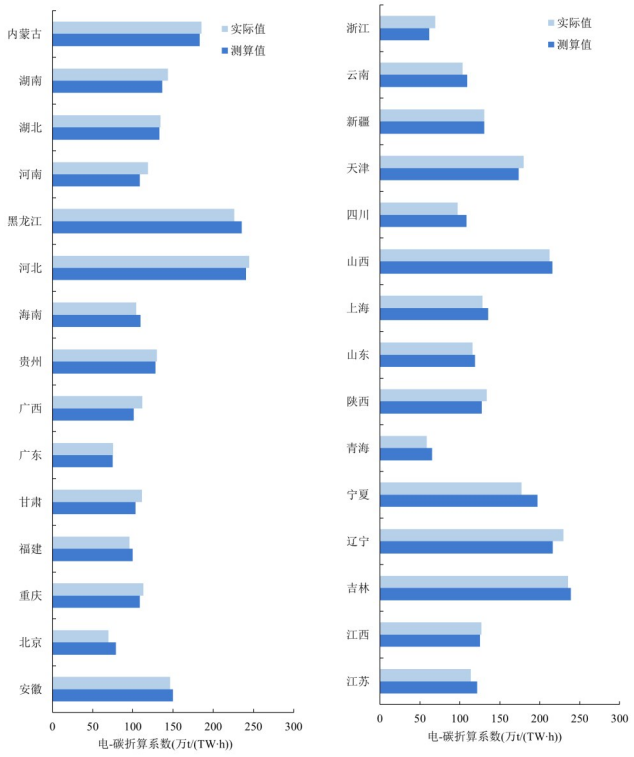
LIU Yuliang[1,2], *LI Yaowang*[1,2], *DU Ershun*[1,2], *ZHANG Ning*[1,2], *KANG Chongqing*[1,2], *DU Siyuan*[3]
(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China;
3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: Energy activities are the primary source of carbon dioxide emissions. Accurate and near real-time monitoring of carbon emissions from energy activities is fundamental for governments and enterprises to grasp the total carbon emissions and formulate carbon management strategies. However, existing accounting methods are insufficient for high-frequency carbon emission calculations, whereas direct measurement methods necessitate additional equipment to be installed. Consequently, low-cost and high-frequency carbon emission estimation techniques remain unavailable. To address this issue, by using the correlation between electricity consumption and energy activities, this paper proposes an estimation technology for carbon emissions from energy activities based on power big data (abbreviated as "electricity-based carbon emission estimation" technology). Firstly, the methodological framework for "electricity-based carbon emission estimation" technology is proposed. From a data-centric perspective, a detailed investigation and analysis on related foundational data are conducted, and the potential application scope of existing data is explored. Secondly, a time-series based "electricity-based carbon emission estimation" model applicable at regional, industrial, and enterprise levels is constructed, followed by an evaluation of its effectiveness using actual data from China. The analysis results demonstrate that the proposed method can significantly improve the timeliness of carbon emission estimation. Finally, the future research and potential application directions for the "electricity-based carbon emission estimation" technology are prospected.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5700-202411271A-1-1-ZN).

Key words: carbon emission estimation; power big data; electricity-based carbon emission estimation; carbon monitoring; energy activity

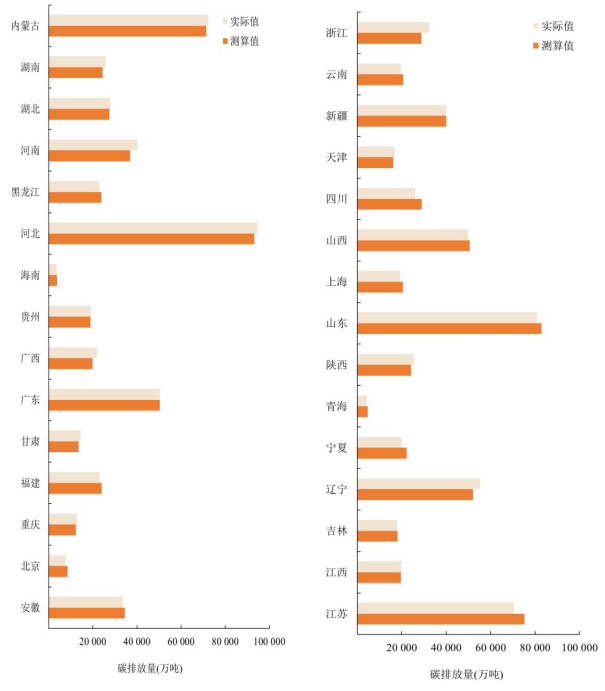
附录 A



(a) 安徽-内蒙古　　(b) 江苏-浙江

图 A1　部分省份电-碳折算系数(2020 年)

Fig. A1　Electricity-carbon conversion factors of some Chinese provinces (2020)



(a) 安徽-内蒙古　　(b) 江苏-浙江

图 A2　部分省份碳排放量(2020 年)

Fig. A2　Carbon emissions of some Chinese provinces (2020)

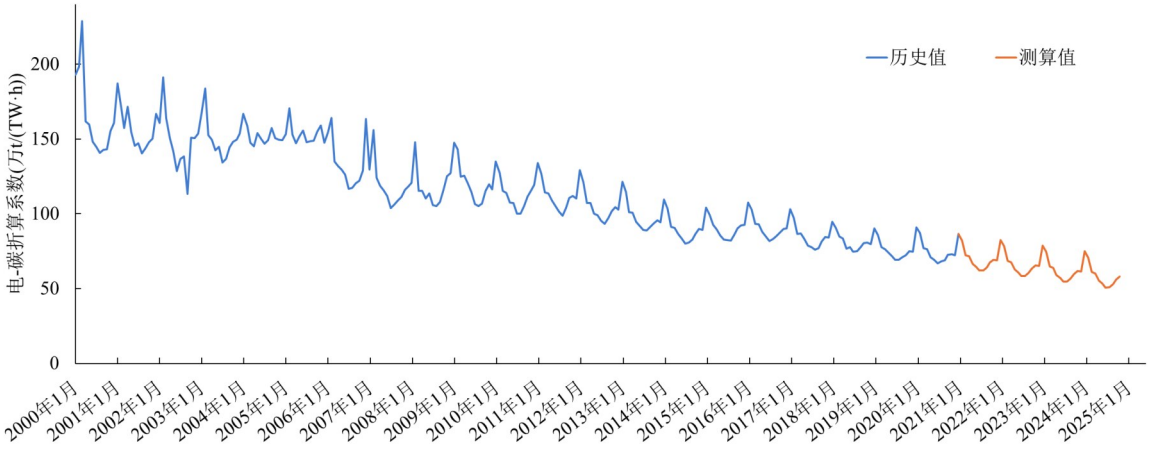


图 A3　广东省月度电-碳折算系数
Fig. A3　Monthly electricity-carbon conversion coefficients of Guangdong Province

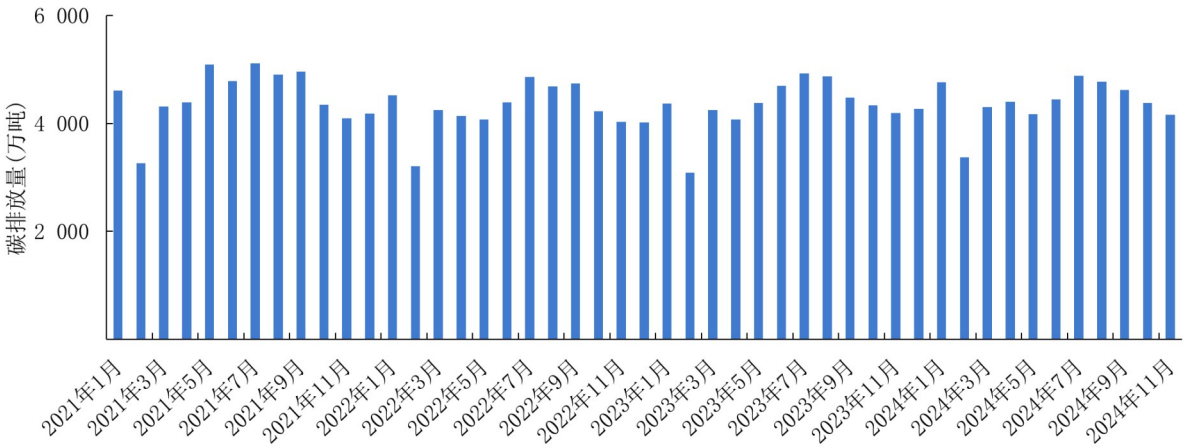


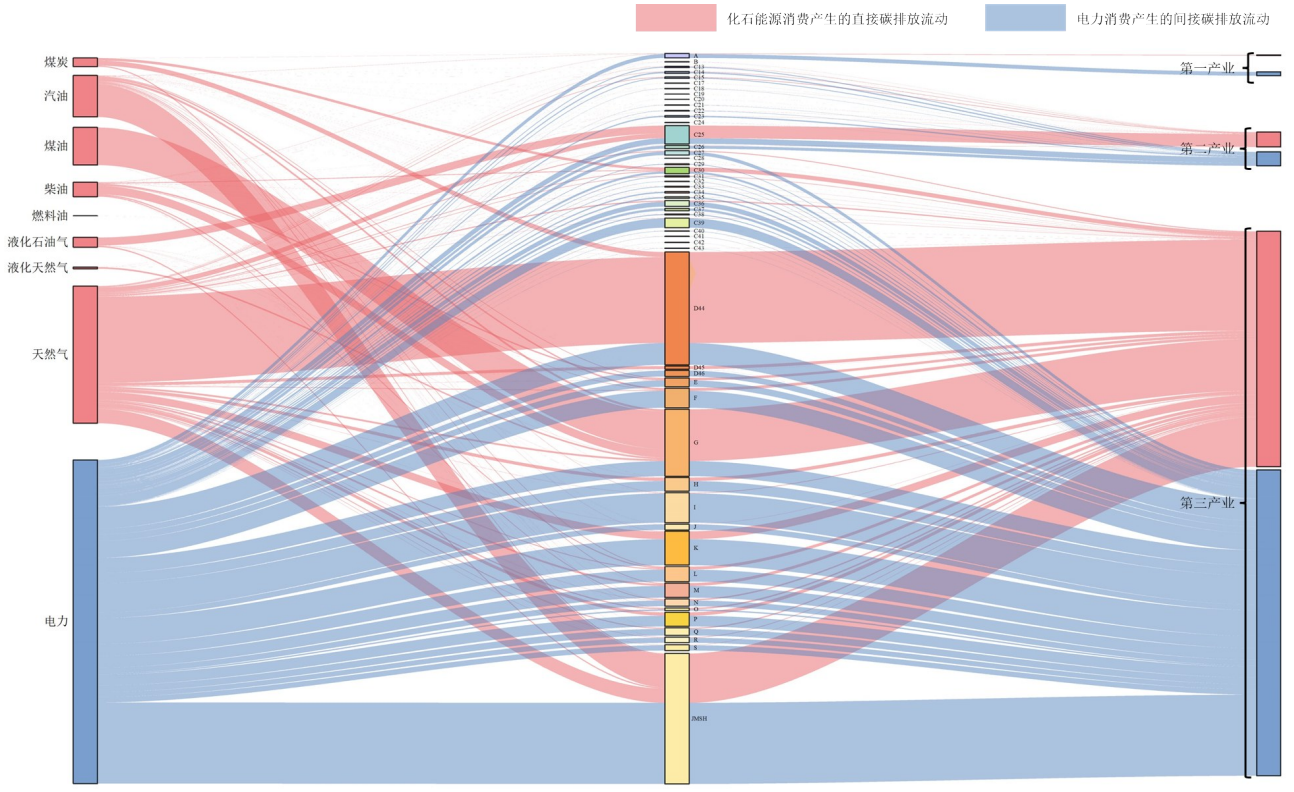
图 A4　广东省月度碳排放测算
Fig. A4　Estimation of monthly carbon emissions of Guangdong Province

表 A1　行业分类代码对照表
Table A1　Industry classification code cross-reference table

行业代码	行业名称	行业代码	行业名称
A	农、林、牧、渔业	C38	电气机械和器材制造业
B	采矿业	C39	计算机、通讯和其他电子设备制造业
C13	农副食品加工业	C40	仪器仪表制造业
C14	食品制造业	C41	其他制造业
C15	酒、饮料和精制茶制造业	C42	废弃资源综合利用业
C17	纺织业	C43	金属制品、机械和设备修理业
C18	纺织服装、服饰业	D44	电力、热力生产和供应业
C19	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	D45	燃气生产和供应业
C20	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	D46	水的生产和供应业
C21	家具制造业	E	建筑业
C22	造纸和纸制品业	F	批发和零售业
C23	印刷和记录媒介复制业	G	交通运输、仓储和邮政业

续表

行业代码	行业名称	行业代码	行业名称
C24	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	H	住宿和餐饮业
C25	石油、煤炭及其他燃料加工业	I	信息传输、软件和信息技术服务业
C26	化学原料和化学制品制造业	J	金融业
C27	医药制造业	K	房地产业
C28	化学纤维制造业	L	租赁和商务服务业
C29	橡胶和塑料制品业	M	科学研究和技术服务业
C30	非金属矿物制品业	N	水利、环境和公共设施管理业
C31	黑色金属冶炼及压延加工业	O	居民服务、修理和其他服务业
C32	有色金属冶炼及压延加工业	P	教育
C33	金属制品业	Q	卫生和社会工作
C34	通用设备制造业	R	文化、体育和娱乐业
C35	专用设备制造业	S	公共管理、社会保障和社会组织
C36	汽车制造业	JMSH	居民生活
C37	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业		



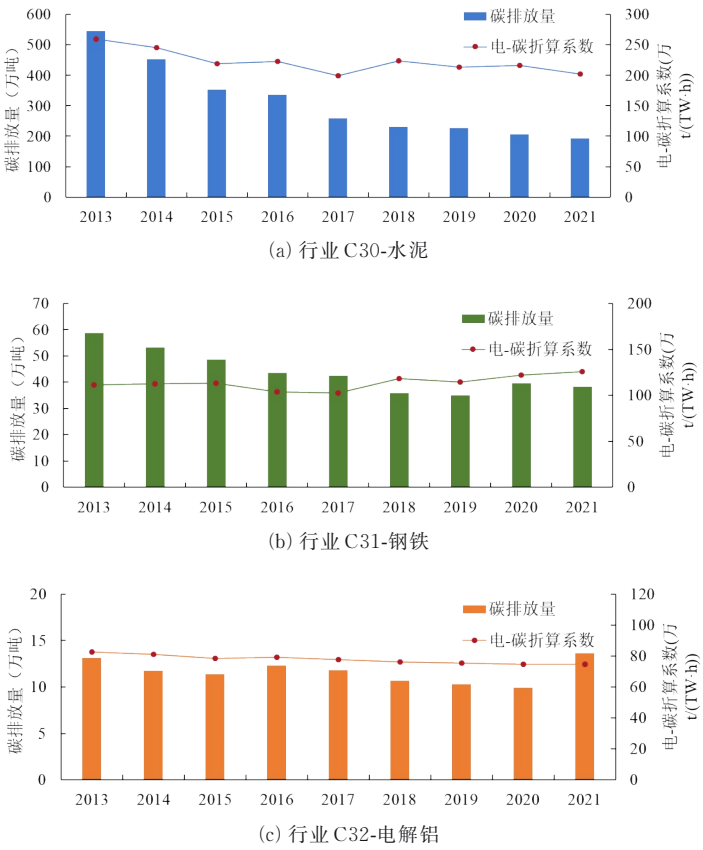
图A5　北京市主要行业碳排放流动桑基图(2022年)

Fig. A5　Sankey diagram of carbon emission flows in major industries of Beijing (2022)

表A2　行业电-碳折算系数测算结果误差分析表

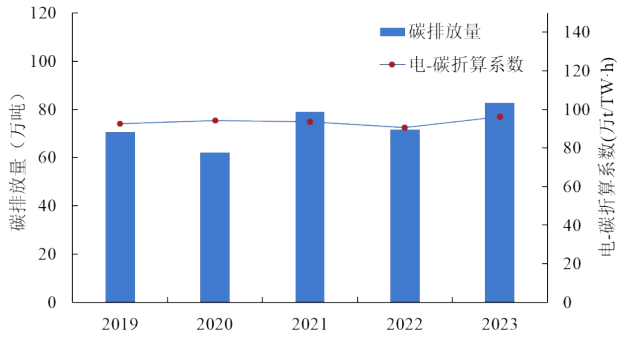
Table A2　Error analysis table for calculation results of industry electricity-carbon conversion factors

行业代码	MAE/[万t/(TW·h)]	MAPE/%	行业代码	MAE/[万t/(TW·h)]	MAPE/%
A	0.64	0.80	C38	0.81	1.01
B	78.24	41.64	C39	0.78	1.08
C13	0.05	0.05	C40	0.63	0.81
C14	2.66	2.77	C41	2.73	3.16
C15	0.78	0.63	C42	7.32	9.11
C17	12.27	17.21	C43	0.45	0.41
C18	2.57	2.71	D44	3.63	1.33
C19	13.77	18.33	D45	4.83	56.68
C20	0.08	0.08	D46	1343.85	0.57
C21	3.27	3.85	E	0.4	0.95
C22	5.62	6.26	F	0.91	0.27
C23	0.38	0.48	G	0.22	31.01
C24	1.16	1.45	H	95.83	4.62
C25	62.64	27.61	I	4.32	0.30
C26	1.6	2.10	J	0.22	0.48
C27	1.02	1.15	K	0.35	2.91
C28	9.63	10.11	L	2.66	1.72
C29	1.67	2.19	M	1.5	2.26
C30	1.13	0.54	N	1.97	3.26
C31	3.9	3.06	O	2.83	7.44
C32	0.92	1.24	P	11.36	2.83
C33	1.73	1.97	Q	2.62	0.97
C34	0.89	1.13	R	0.8	2.42
C35	0.73	0.93	S	1.91	9.63
C36	0.22	0.25	JMSH	7.16	7.19
C37	5.6	7.54			



图A6　北京市重点行业历史碳排放量及电-碳折算系数

Fig. A6　Historical carbon emissions and electricity-carbon conversion coefficients of key industries in Beijing



图A7　某化工企业历史碳排放量及电-碳折算系数

Fig. A7　Historical carbon emissions and electricity-carbon conversion coefficients of a chemical enterprise